

可視光照射下での不均一光触媒を用いた次亜塩素酸の生成

Pang Rui・三石 雄悟・奥中 さゆり・佐山 和弘
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 機能性材料チーム

研究の目的

次亜塩素酸(HClO)は飲料水の消毒、漂白、脱臭、染料廃水の処理、および食品の消毒に世界中で一般的に使用されている。HClOは、通常、電気化学的製造プロセスを使用して生産するが、大量の電気エネルギーが必要である^{1,2)}。我々はこれまでにアノード光電極を用いて酸化化学薬品製造を研究し、酸化剤としては、食塩水溶液から次亜塩素酸塩が効率良く製造できることを見出してきた^{3,4)}。もし、太陽光エネルギーを利用した光触媒を用いて、高効率・電圧なしで実現できれば大きな省エネ効果と低コスト化が期待できる。今回、この原理を参考に、WO₃粉末光触媒反応で食塩水溶液からHClOが製造できるかについて検討した結果を報告する。

実験

50 mL 10 wt% methanol

1.0 g Catalyst

AM 1.5 G solar simulator Photoirradiation for 2 h

Wash and dry at R.T.

Metal loaded catalyst

Precursors

Metal salt: H₂PtCl₆, Pd(NO₃)₂, HAuCl₄, RuCl₃, Cu(NO₃)₂

Catalyst: WO₃

Conditions

Catalyst amount: 100 mg

Solution volume: 100 mL

Additives: 0.5 M NaCl

O₂ flow rate: 1 mL min⁻¹

Temperature: ~277 K

Light intensity: 100 mW cm⁻²

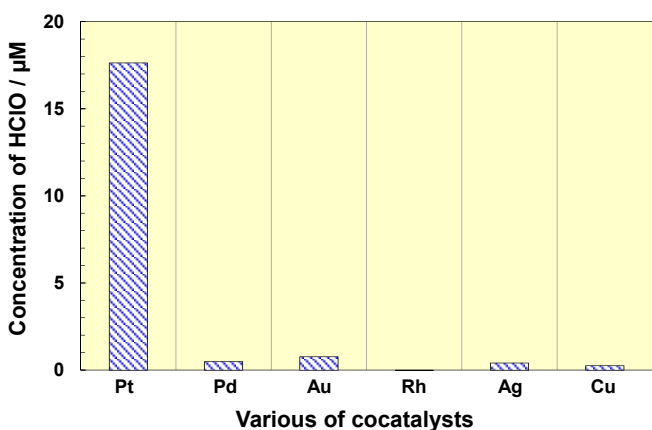
Irradiation area: 25 cm²

AM 1.5G solar simulator

O₂ in

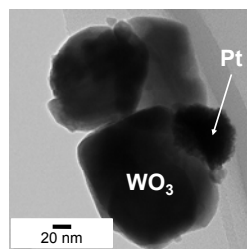
10 cm

結果

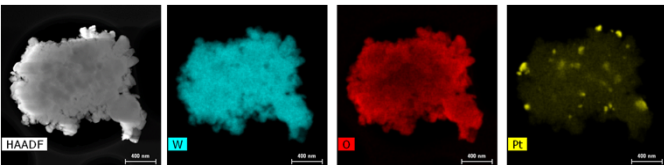


Ptを担持したWO₃のみが明らかなHClO生成を示した。

TEM

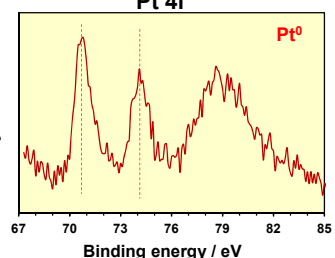


EDS

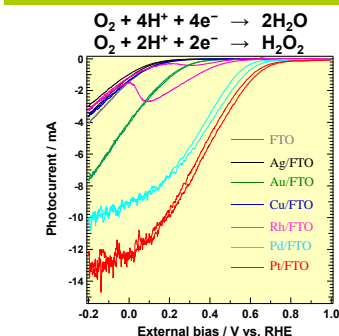


数十ナノメートルのPt⁰ナノ粒子がWO₃表面に担持された。

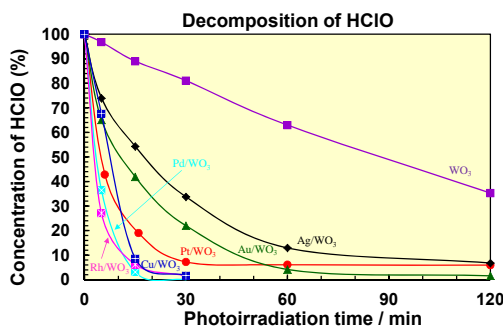
XPS



考察

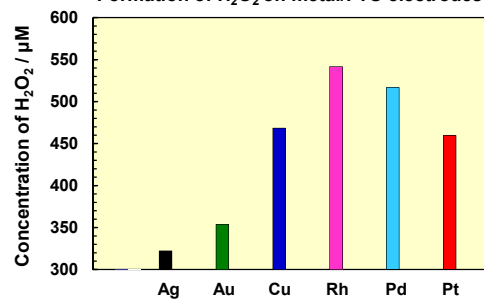


酸素還元E_{on}: Ag ≈ Cu ≈ Rh < Au < Pd < Pt



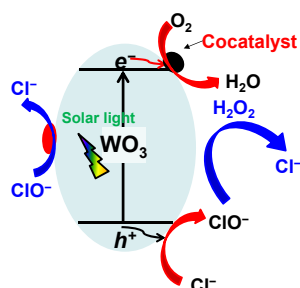
HClO分解速率: Ag < Au < Pt < Cu < Pd < Rh

Formation of H₂O₂ on metal/FTO electrodes



H₂O₂生成速率: Ag < Au < Pt < Cu < Pd < Rh

結論



1. 太陽光下でPt/WO₃粉末光触媒からのHClO生成を実現しました。
2. Pt/WO₃の高い生成速度は、他の金属触媒を担持したWO₃と比較して、O₂還元開始電位が高く、かつHClO分解を促進するH₂O₂の生成速度が低いと考えられます。

謝辞・参考文献

本研究はJSPS科研費 JP17H06439 の助成を受けたものです。

1. I. Moussallem, J. Jörissen, U. Kunz, S. Pinnow and T. Turek, *J. Appl. Electrochem.*, **2008**, 38, 1177–1194.
2. R. K. B. Karlsson and A. Cornell, *Chem. Rev.*, **2016**, 116, 2982–3028.
3. K. Sayama, *ACS Energy Lett.*, **2018**, 3, 1093–1101.
4. S. Iguchi, Y. Miseki and K. Sayama, *Sustainable Energy Fuels* **2018**, 2, 155–162.

TiO₂およびWO₃光触媒におけるFe³⁺吸着量と水の酸化反応速度の相関性

○保科和宏^{1,2}・奥中さゆり¹・三石雄悟¹・郡司天博^{1,2}・佐山和弘¹
¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 機能性材料チーム、²東京理科大学

背景

光触媒による水分解反応

特徴

- 太陽光エネルギーを利用可能
- 安価でシステムが簡便

課題

- 効率が低い
- 水素ガス捕集に課題あり

光触媒電解ハイブリッドシステム

これら課題を解決できる可能性を秘めた手法

光触媒電解ハイブリッドシステム

性能の向上が必要

光触媒反応

Fe(III)をFe(II)に還元しながら水を酸化して酸素を生成

電気分解反応

Fe(II)をFe(III)に再酸化しながら水を還元して純水素を生成・捕集

水素の捕集が容易
通常の水分解よりも低電圧で水素を得ることが可能

安価な水素生成コストを実現できる可能性

先行研究: BiVO₄におけるFe³⁺吸着量と活性の相関性

様々なpHおよび反応水溶液温度でBiVO₄の光触媒活性を評価

BiVO₄光触媒の反応速度は、反応水溶液温度およびpHよりもFe(III)吸着量に直接的に影響されていることがわかった。

量子収率 : 36% at 420 nm
太陽光変換効率 : 0.65%

本研究
 TiO₂およびWO₃についてFe(III)吸着量という因子で同様の挙動が得られるか調べる。

1) Y. Miseki and K. Sayama, *Chem Commun.* **54**, 2670 (2018)

実験方法

触媒

TiO₂: シグマアルドリッチ製、ルチル型
 WO₃: 高純度化学製、純度99.99%

触媒処理方法

WO₃ → 焼成 (973 K, 2 h) → デカンテーション 3回 → WO₃(凝集体)

活性の評価方法

光触媒: 0.2 g
2 mM Fe(ClO₄)₃: 150 mL

フェナントロリン法によりFe(II)を呈色することでFe(II)の生成速度を測定することにより測定

Fe(III)およびFe(II)吸着量の測定方法

Fe(II)

510 nmでの吸光度の差から算出

0~2 mM Fe(ClO₄)₂ : 0.2 mL
 酢酸バッファー : 0.25 mL
 1-10オルトフェナントロリン : 0.25 mL
 H₂O : 3.3 mL

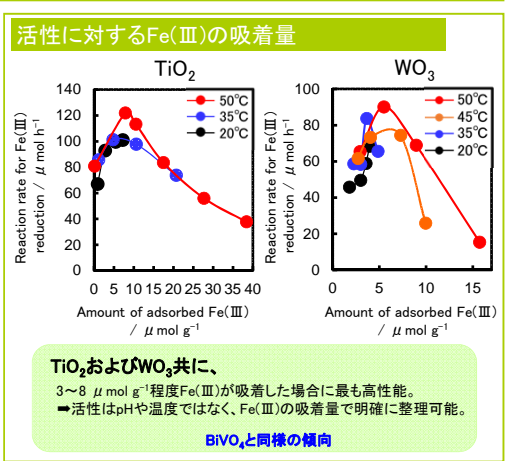
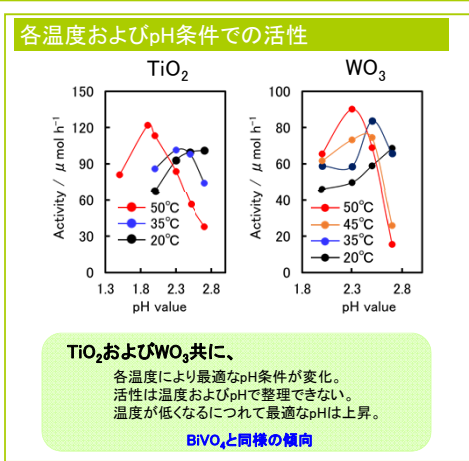
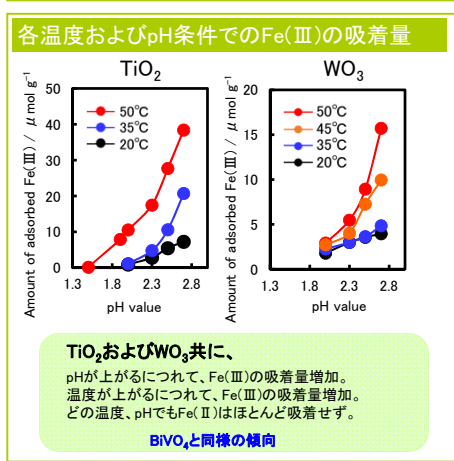
Fe(III)

365 nmでの吸光度の差から算出

0~2 mM Fe(ClO₄)₃ : 0.5 mL
 12 M HCl : 1.5 mL
 H₂O : 2.0 mL

フェナントロリン法によりFe(II)を呈色
 Fe(II) : フェナントロリン法によりFe(II)を呈色
 Fe(III) : 塩酸によりFe(III)を呈色

Hot stirrerで2分間攪拌した後、二つの吸光度の差からFe(III)の吸着量を算出。



高い活性を示した時の見かけの被覆率

BiVO₄

表面積 1.0 m²/g
見かけの被覆率 23~60%

TiO₂

表面積 2.5 m²/g
見かけの被覆率 9~24%

WO₃

表面積 1.9 m²/g
見かけの被覆率 12~32%

触媒ごとに最適な被覆率が異なる。

被覆率の最適値が異なる理由

Fe(III)が吸着すると、還元反応速度は上がるが、吸着しすぎると、酸化反応サイトまでFe(III)が覆ってしまう、酸化反応速度が低下する可能性がある。

酸化還元サイトのバランスは触媒組成に依存？
 表面組成に応じて吸着のしやすさが変化？
 吸収光子数と被覆率に相関？

Fe(III)の見かけの被覆率の計算方法

水和時のFe(III) 1個の半径を 2×10^{-10} m とするとFe(III) 1個の断面積は 12.56×10^{-20} m²

Fe(III)の占有面積 (m² g⁻¹)
 = Fe(III)の物数 (mol g⁻¹) × アボガドロ定数 (mol⁻¹) × Fe(III) 1個の断面積 (m²)

Fe(III)の見かけの被覆率 (%)
 = Fe(III)の占有面積 (m² g⁻¹) / 触媒の表面積 (m² g⁻¹) × 100 (%)

結言

TiO₂およびWO₃共にFe(III)の吸着量はpHや温度で制御できることがわかった。

TiO₂およびWO₃の活性はBiVO₄と同様に、温度やpHという因子よりもFe(III)の吸着量という因子で明確に整理できることがわかった。

高い活性を示した時の見かけの被覆率は触媒ごとに異なっていた。

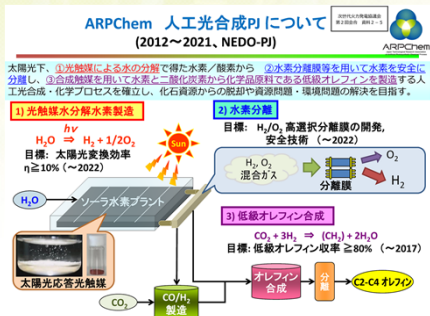
触媒の種類によって最適な反応条件が異なることがわかった。

光アノード電極の効率向上を目指した表面修飾材料の検討

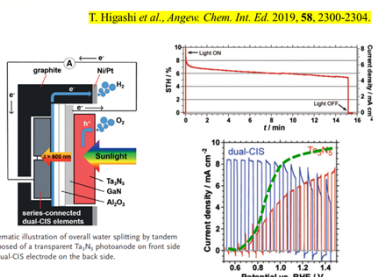
三石雄悟¹, Wang Nini¹, 佐々木豊^{2,3}, 奥中さゆり¹, 草間仁¹,
山田太郎^{2,3}, 堂免一成^{2,3}, 佐山和弘¹

¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 機能性材料チーム
²東京大学, ³人工光合成化学プロセス技術研究組合

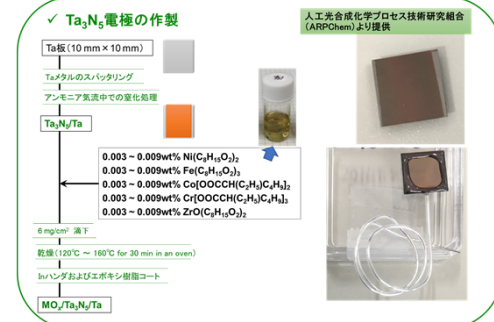
研究の目的



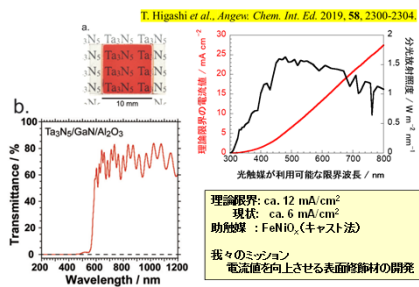
タンデム型セルによる水分解反応の現状



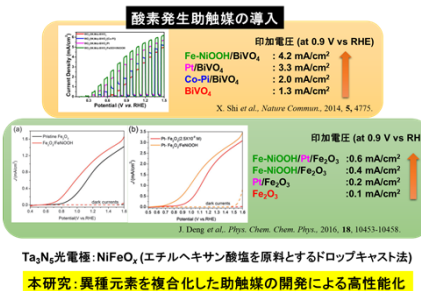
実験方法



酸素発生光電極 (Ta_3N_5 のポテンシャル)



光生成キャリアの利用効率向上



✓ Ta_3N_5 光電極の性能評価法

光電極の性能評価法

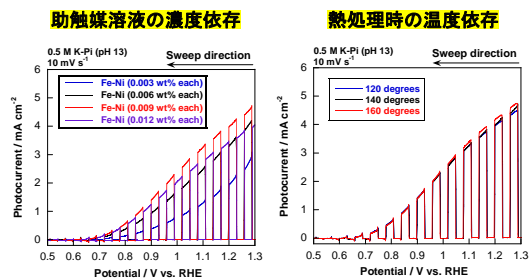
~ 参照種を用いた3電極法 ~

- 作用種: MO/ Ta_3N_5
- 対極: Pt wire
- 参照種: Ag/AgCl
- 電解水溶液: 0.5 M K₂HPO₄ (pH13)
- 掃引速度: 10 mV s⁻¹
- 光源: Solar simulator (AM1.5G)
- 照射光: 3秒ごとにオンオフ



結果

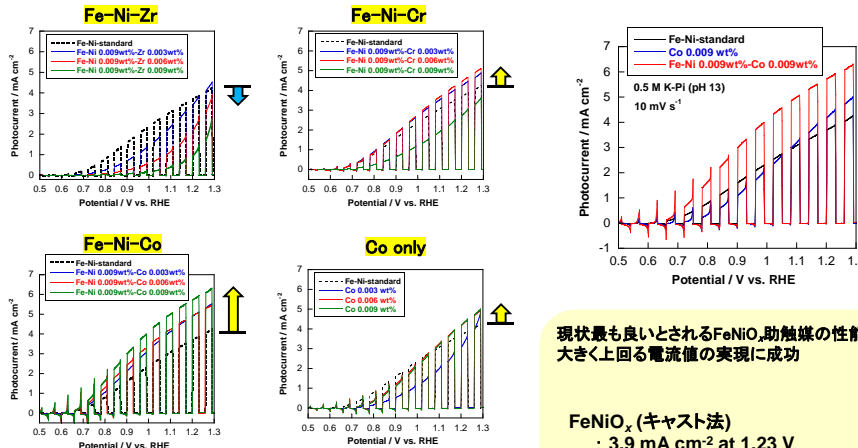
FeNiO_x 複合助触媒を所持した Ta_3N_5 光電極の電流電圧特性評価



- ✓ 電極面積 1 cm² 当たり、0.009wt% (for ヘキサン) 溶液を 6 mg 滴下した際に高い電流値が得られた。
- ✓ 焼成処理は、ほとんど性能に影響を及ぼさなかった。

標準条件

FeNiO_x (M=Zr, Cr, Co) で修飾した Ta_3N_5 光電極の性能評価



- ✓ 第3元素として、CrやCoを混合すると、電流値が向上した。
- ✓ Coのみの持場で最適化した場合にはFeNiと同等の性能であった。

現状最も良いとされるFeNiO_x助触媒の性能を大きく上回る電流値の実現に成功

FeNiO_x (キャスト法)
: 3.9 mA cm⁻² at 1.23 V
FeNiCoO_x (キャスト法)
: 5.9 mA cm⁻² at 1.23 V (約1.5倍)

結論

- ・STH10%達成のための Ta_3N_5 光電極の性能をさらに引き出す表面修飾材の探索を実施。その結果、従来の助触媒であるFeNiへCoを複合化させると電流値が約1.5倍 (1.23 vs. RHE) へ向上することがわかった。
- ⇒ この知見を研究組合へFeedbackすることで10%の目標値達成に貢献。

謝辞

ここで紹介した研究成果の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)・ARPCHEMプロジェクトにより得られたものである。

酸化的な過酸化水素生成の高効率化を目指したBiVO₄/WO₃光電極に対するAl₂O₃表面修飾法の検討

宮瀬 雄太^{*1,2}・井口 翔之^{*1}・三石 雄悟^{*1}・郡司 天博^{*2}・佐山 和弘^{*1,2}

^{*1}産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 機能性材料チーム

^{*2}東京理科大学

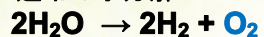
研究の目的

✓HCO₃⁻を用いた酸化的な過酸化水素生成

K. Fuku, K. Sayama, *Chem. Commun.*, 52, 5406 (2016).

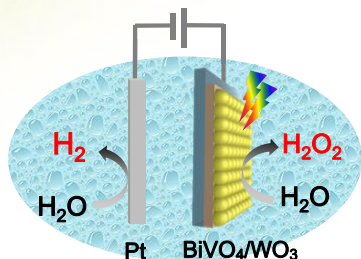
『中性条件』+『高効率水素製造』を伴う酸化的な過酸化水素製造

・通常的水分解:



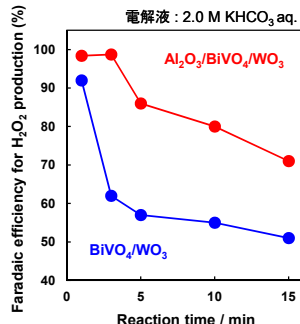
活用法が未確立

・酸化的な過酸化水素生成:
 $4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + 2\text{H}_2\text{O}_2$

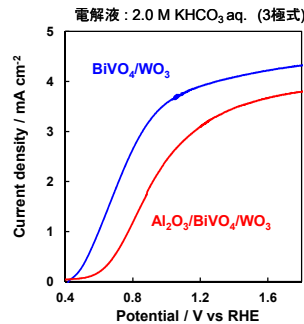


✓湿式法 (MOD法) を用いたAl₂O₃による電極表面修飾

K. Fuku *et al.*, *RSC Advances*, 7 (75), 47619 (2017).



酸化分解を抑制し選択率向上

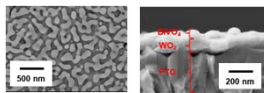


電気化学特性が大きく低下

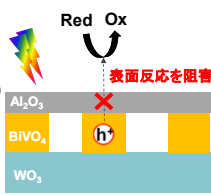
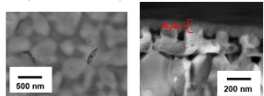
✓湿式法で修飾したAl₂O₃の構造

光電極表面を不導体のAl₂O₃が広く被覆

・BiVO₄/WO₃/FTO (top / side view)



・Al₂O₃/BiVO₄/WO₃/FTO (top / side view)



This Work

CVD法による光電極のAl₂O₃修飾を検討
→電気化学特性を維持したまま選択率の向上を目指す

実験

✓電極調製法

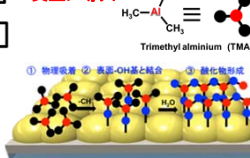
・BiVO₄/WO₃電極



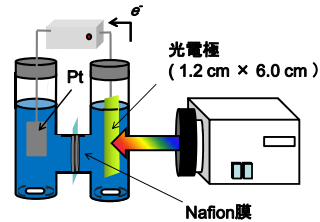
・Al₂O₃修飾 (CVD法)

装置: SAL3000Plus
サンプルヒーター: 150°C
前駆体: トリメチルアルミニウム (TMA)

TMAと水の蒸気をサンプルに交互に導入



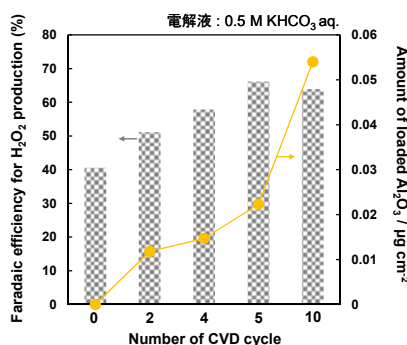
✓H₂O₂生成反応



電解液 (Anode)	KHCO ₃ aq. (35 mL)
光源	擬似太陽光 (AM1.5 G)
外部電圧	0.9 V - 1.0 V
定量法	Fe ²⁺ による呈色法

結果

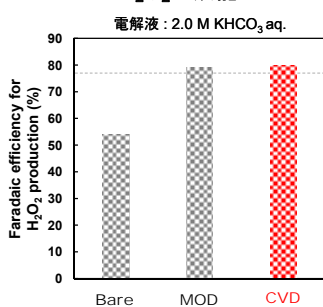
✓CVDサイクル数の最適化



CVD5サイクルで最大のFE

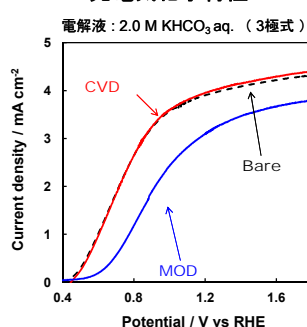
✓CVD法とMOD法の性能比較

・H₂O₂生成能



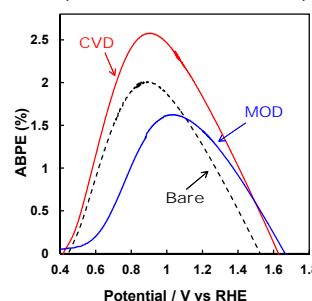
MOD法と同等のH₂O₂生成能

・光電気化学特性



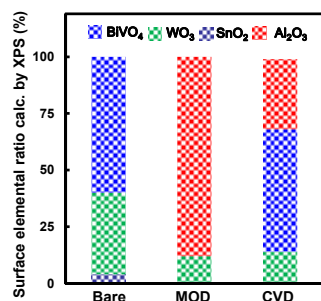
修飾後も光電気化学特性を維持

・ABPE (太陽光エネルギー変換効率)



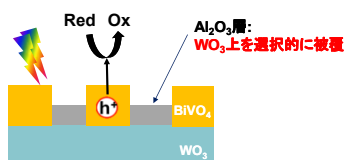
ABPEが大きく向上

✓乾式法で修飾したAl₂O₃の構造



・表面被覆率の変化

・MOD法
BiVO₄: 60%→0%, WO₃: 36%→12%
・CVD法
BiVO₄: 60%→54%, WO₃: 36%→14%



結論

CVD法を用いてAl₂O₃修飾を行うことで電気化学特性を維持したままH₂O₂生成能を向上させることに成功した。

✓CVDサイクル5回で最も高いFEとなり、MOD法と同等の過酸化水素生成能に達した。

✓CVD法による修飾による光電気化学特性の低下は非常に小さく、ABPEは未修飾の電極と比較して大きく向上した。

✓Al₂O₃はWO₃上を選択的に被覆していることが想定された。

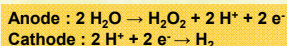
水の酸化による過酸化水素生成における BiVO_4 電極への異種元素添加効果

奥田 創太^{1,2}, 宮瀬 雄太^{1,2}, 奥中 さゆり², 三石 雄悟², 郡司 天博^{1,2}, 佐山 和弘^{1,2}

東京理科大学¹, 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 機能性材料チーム²

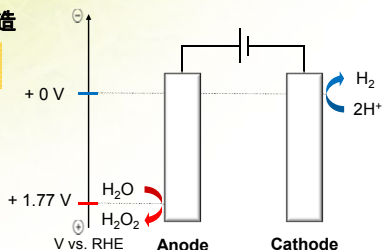
研究の目的

水の酸化による過酸化水素製造



小型スケールのオンサイト合成法

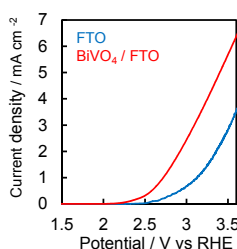
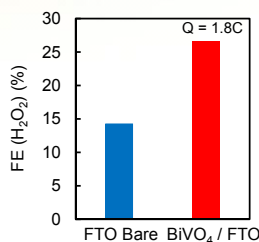
H_2O_2 の輸送や保存のコスト削減



✓ BiVO_4 の問題点 Faradaic efficiency (FE)が25%程度と低い (残り75%は酸素)
過電圧が大きい

BiVO_4 の改質を行うことで BiVO_4 の特性を向上させることができないか

本研究の目的 BiVO_4 へ異種元素Mを添加した $\text{M}:\text{BiVO}_4$ を作製し
ファラデー効率、電流電圧特性の向上を目指す

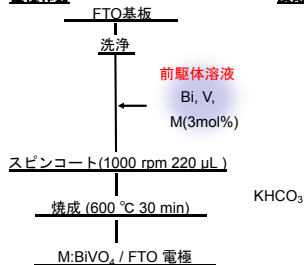


FTO上に BiVO_4 を修飾することでFE, 電流電圧特性が向上¹⁾

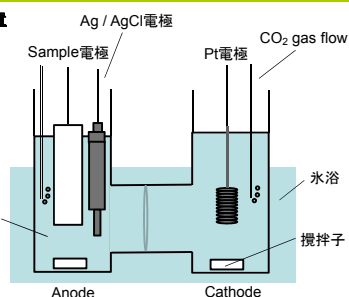
¹⁾ K. Fuku et al., ChemistrySelect, 2016, 1, 5721 – 5726.

実験

電極作製



反応装置



結果

添加元素のスクリーニング

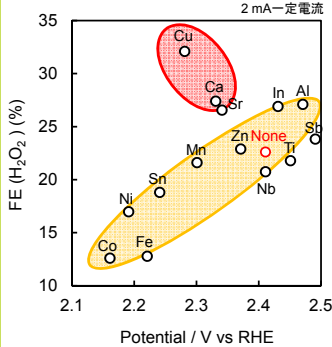


Fig. 1 $\text{M}:\text{BiVO}_4$ の性能

最適化後の $\text{Ca}:\text{BiVO}_4$ と $\text{Cu}:\text{BiVO}_4$ の性能

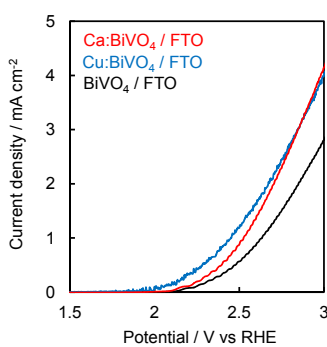


Fig. 2 各電極の電流電圧特性

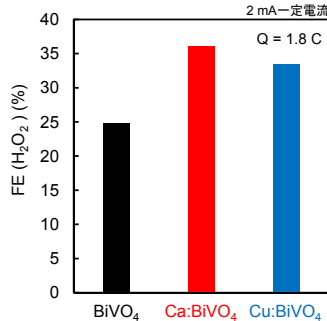


Fig. 3 各電極の H_2O_2 生成のファラデー効率

H_2O_2 蓄積試験

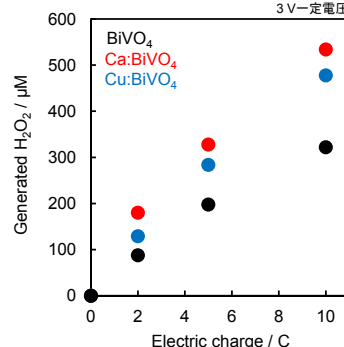


Fig. 4 各電極の H_2O_2 蓄積試験

BiVO_4 にCa, Cuを添加することで電流密度, ファラデー効率が向上

蓄積試験においても優位

積層化電極によるコントロール実験

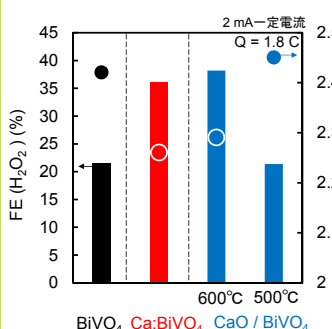
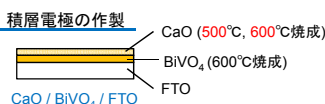


Fig. 5 積層化電極によるコントロール実験



✓ 高温焼成することで $\text{Ca}:\text{BiVO}_4$ と同様の性能。
 ✓ 低温焼成では性能は向上せず。
 → CaO を担持しても影響無し。

高温でCaが BiVO_4 内に取り込まれ、
各種特性に影響している可能性

ファラデー効率の経時変化

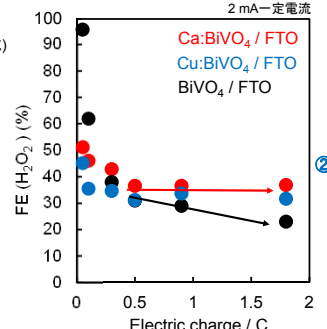
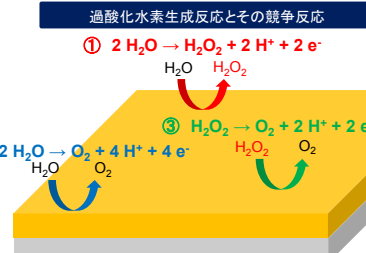


Fig. 6 H_2O_2 生成のファラデー効率の経時変化



$\text{Ca}:\text{BiVO}_4$, $\text{Cu}:\text{BiVO}_4$ は生成した過酸化水素の
逐次分解を抑制する効果があることを示唆

結論

✓ BiVO_4 にCa, Cuを添加することで未添加の BiVO_4 と比較して電流電圧特性, 過酸化水素生成量がともに向上することが確認できた。

✓ $\text{Ca}:\text{BiVO}_4$, $\text{Cu}:\text{BiVO}_4$ には生成した過酸化水素の逐次分解を抑制する効果があることが示唆された。

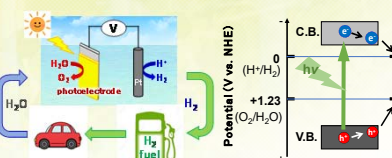
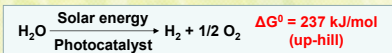
本研究の一部は、新学術領域研究「光合成分子機構の学理解明と時空間制御による革新的光-物質変換系の創製」の成果である。

太陽エネルギーを用いた光電極による 海水中の水分解反応の選択性制御

奥中さゆり・三石雄悟・佐山和弘
産業技術総合研究所 太陽光発電センター 機能性材料チーム

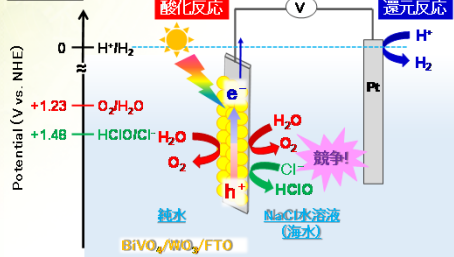
研究の目的

半導体光触媒を用いた水分解反応



半導体光触媒を用いた水分解反応による水素製造は、再生可能エネルギー技術として研究加速中

従来技術



BiVO₄/WO₃/FTO 光電極:
 ・純水⇒O₂生成 [R. Saito et al., Chem. Commun., 2012, 48, 3833]
 ・NaCl水溶液⇒O₂, HClO生成 [S. Iguchi et al., Sustainable Energy Fuels, 2018, 2, 155]

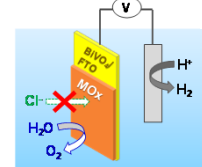
次亜塩素酸



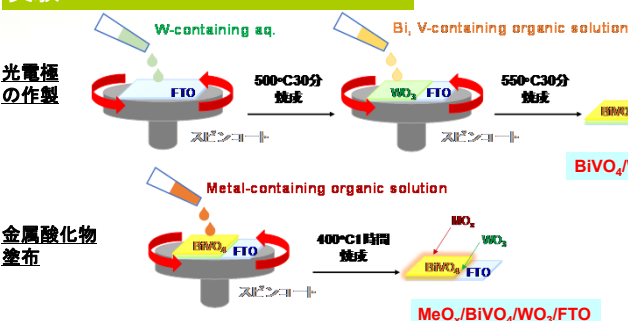
本研究

表面修飾による選択性制御!

- ✓ 金属酸化物塗布
- ✓ 特性評価
- ✓ 選択性評価 (NaCl水溶液中におけるHClO/O₂生成)

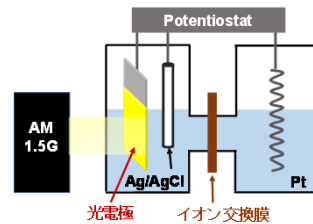


実験



電気化学測定

- セル: 二室セル (Pyrex製)
- 電解質溶液: 0.5 M NaCl aq. を, 35 mLずつ
- 光源: 疑似太陽光 (AM1.5) [SAN-EI Electric Co.]
- ポテンショスタット: ALS660B [BAS. Inc.]



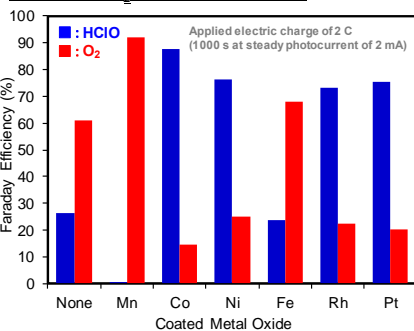
HClOおよびO₂生成の定量

- HClO: *N,N*-diethyl-*p*-phenylenediamine (DPD)法
- O₂: O₂ sensor (Optical Oxygen Meter, FireStingO₂, pyro science)



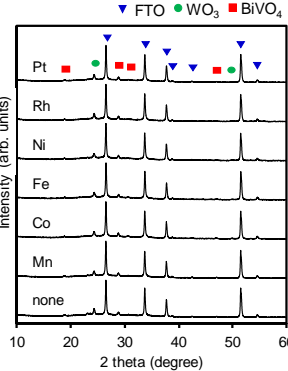
結果と考察

HClOおよびO₂生成のファラデー効率



- ✓ MnO_x: O₂のみを高いファラデー効率で生成(>90%)
- ✓ Co, Ni, Rh, Pt: HClO生成のファラデー効率向上

XRD



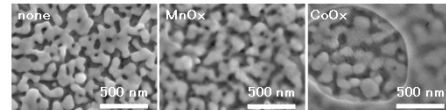
- ✓ 不純物生成なし
- ✓ MeO_x: アモルファスor低結晶性

XRF

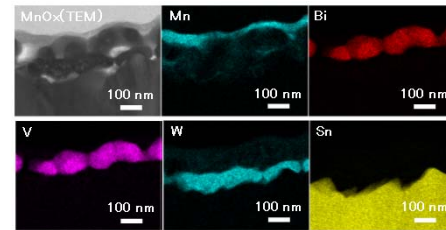
MeO _x	Loading amount (μmol/cm ²)
None	0
MnO _x	0.020
CoO _x	0.014
FeO _x	0.017
NiO _x	0.024
RhO _x	0.016
PtO _x	0.010

- ✓ 金属種による担持量の違いはない

SEM

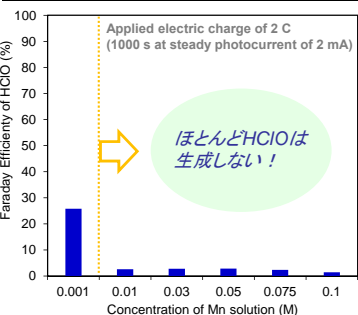


TEM



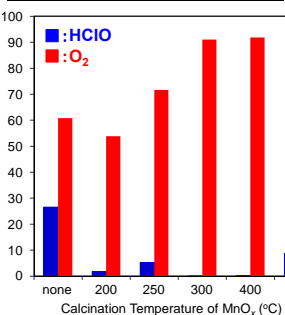
- ✓ MeO_xが光電極表面に塗布されていた
- ✓ MnO_x層の厚みは、約10-30 nm

HClO生成におけるMn前駆体の濃度の影響



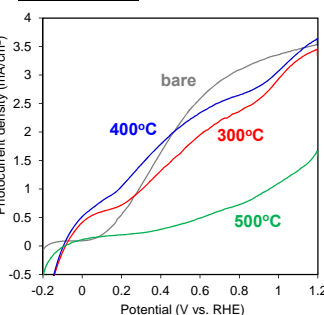
- ✓ 0.01~0.1 Mの濃度範囲のMn前駆体溶液を用いた場合、効果的にHClO生成を抑制

Mn溶液塗布後の焼成温度の影響

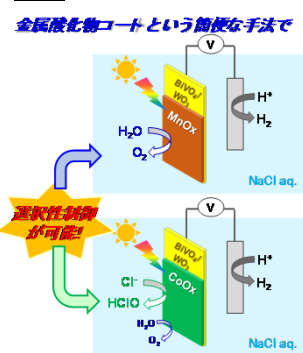


- ✓ 300, 400°C: MnO_x無担持と同等レベルの光電流を維持&HClO生成も抑制
- ✓ < 250°C: O₂生成量減少(有機物残渣の影響あり), > 500°C: 光電流低下

電流-電圧特性



まとめ



結論

- ✓ BiVO₄/WO₃/FTO光電極表面にMO_x層を形成するという簡単な方法で、NaCl水溶液からのHClO/O₂生成の選択性を制御できることを見出した。
- ✓ MnO_xの塗布条件を最適化し、光電流を維持したまま選択的にNaCl水溶液からO₂のみを生成できる光電極の作製に成功した。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省 新学術領域研究「光合成分子機構の学理解明と時空間制御による革新的光-物質変換系の創製」(平成29-33年度)による支援を受けたものである。

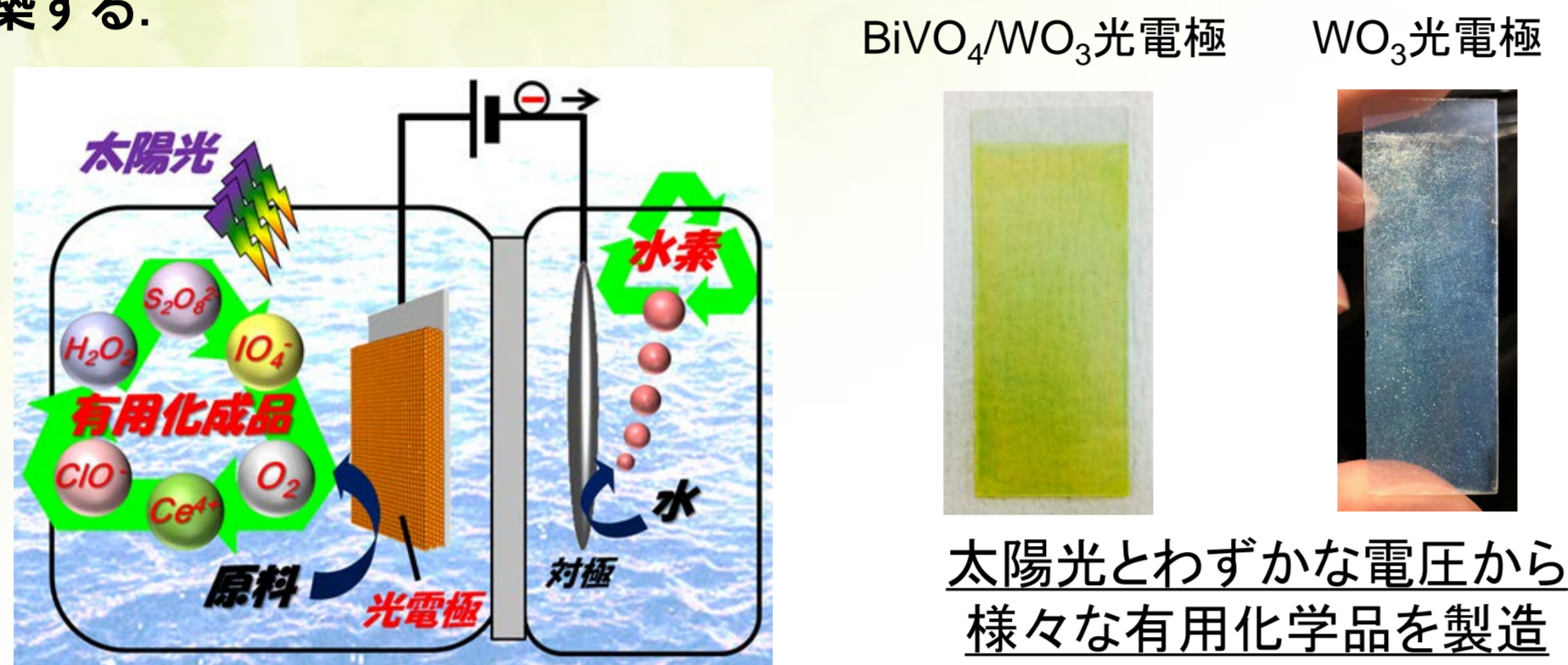
光半導体電極を用いた酸化的有機変換反応の開発

舘野 拓之・三石 雄悟・佐山 和弘

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 機能性材料チーム

研究の目的

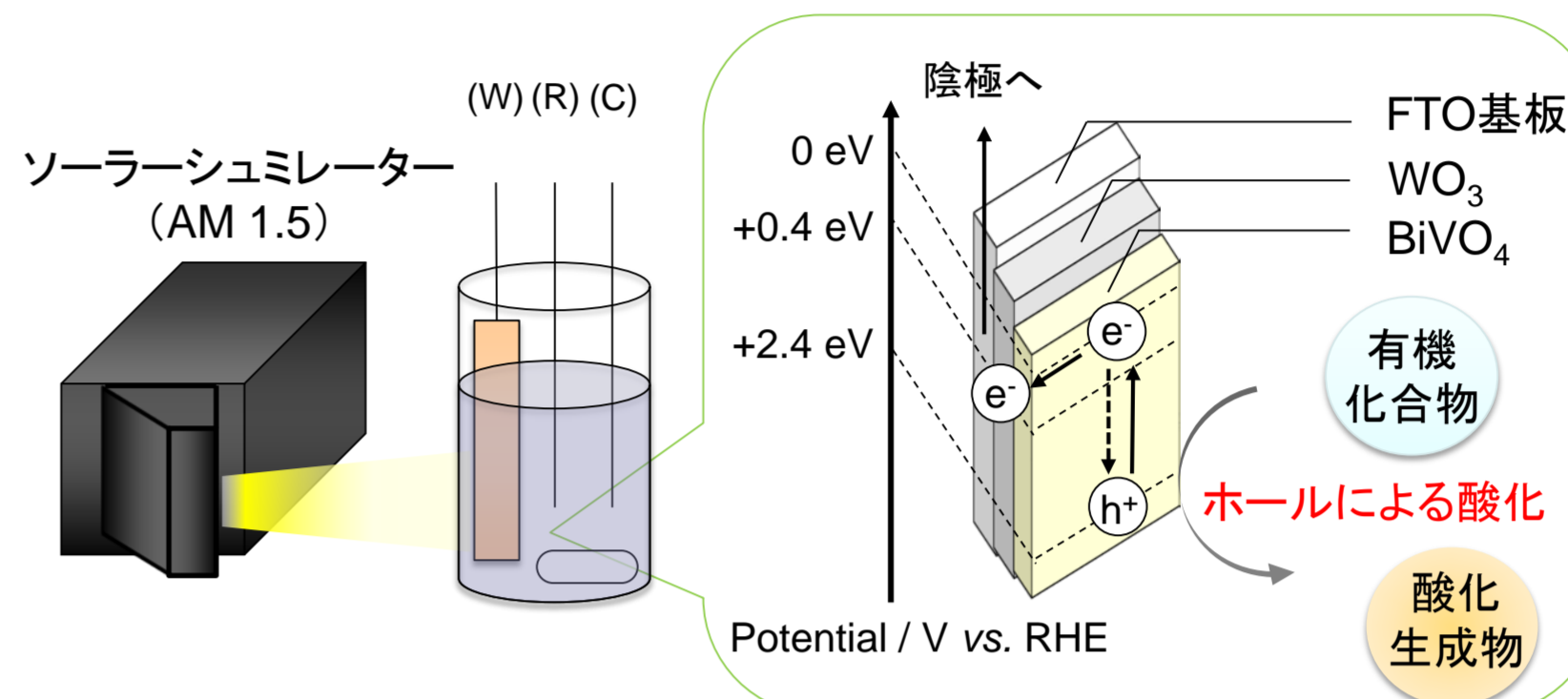
化学品製造プロセスの省エネとCO₂フリー化のため、太陽エネルギーにより、低電圧で有用化学品を製造できる光電気化学システムを構築する。



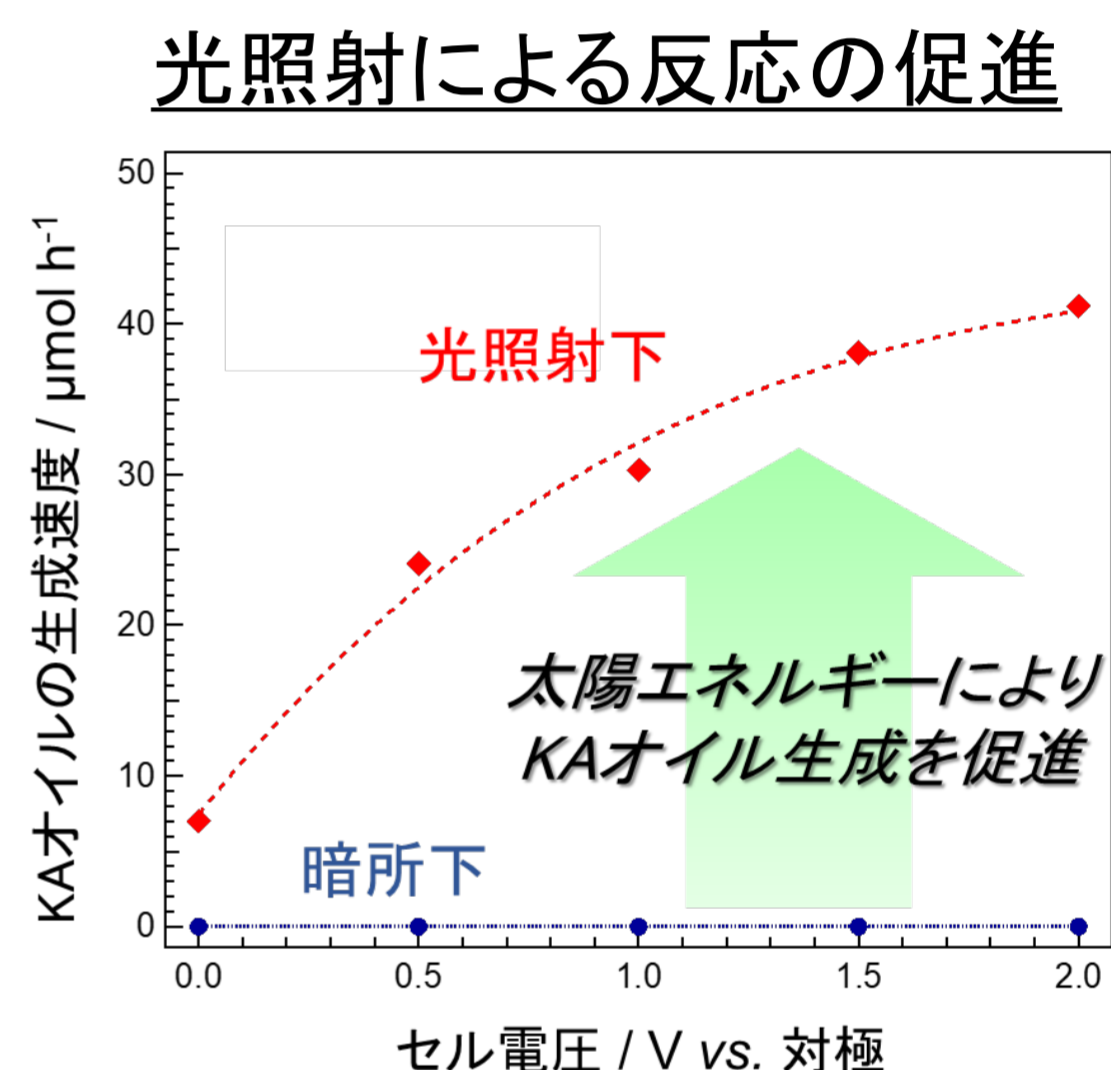
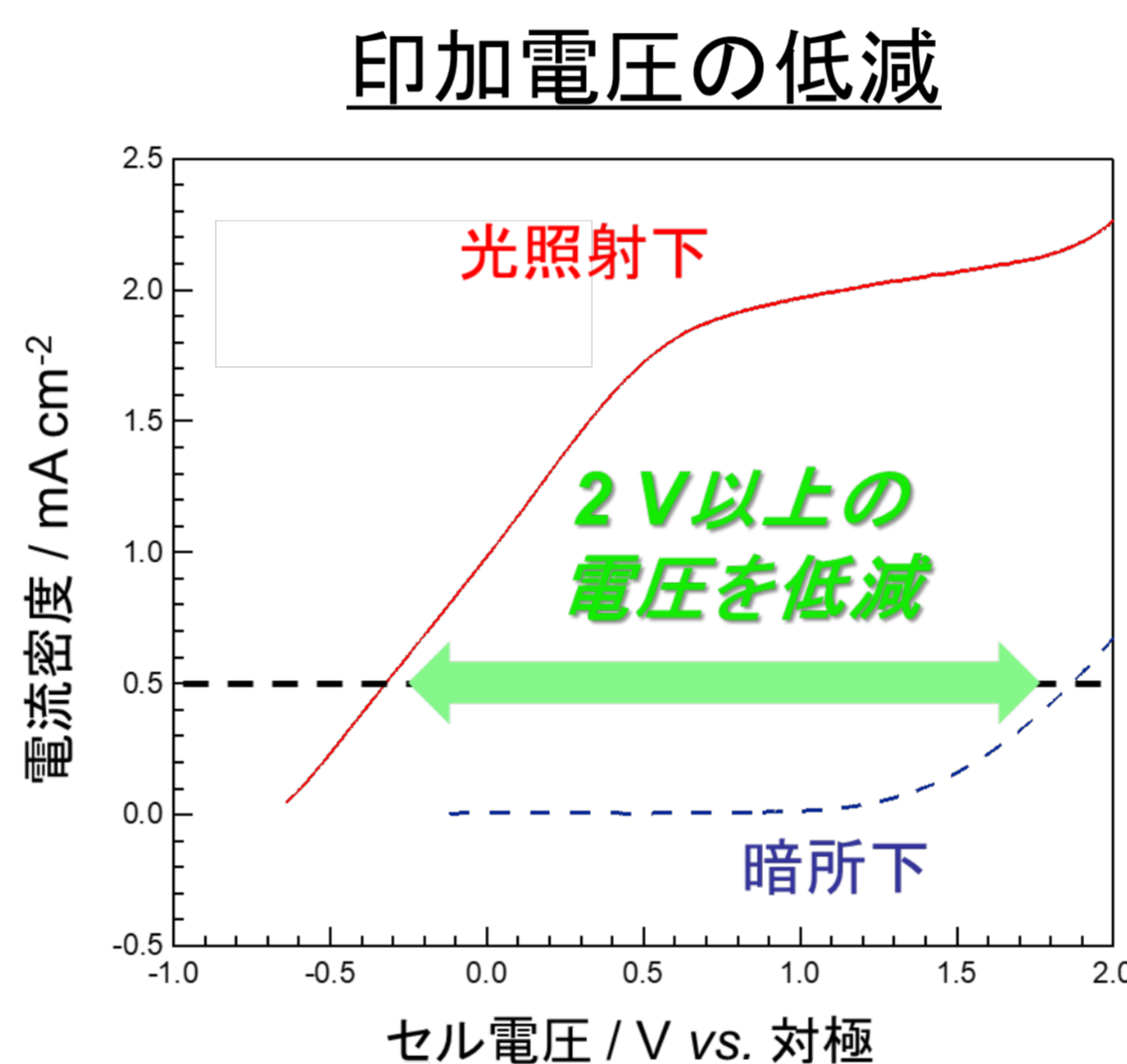
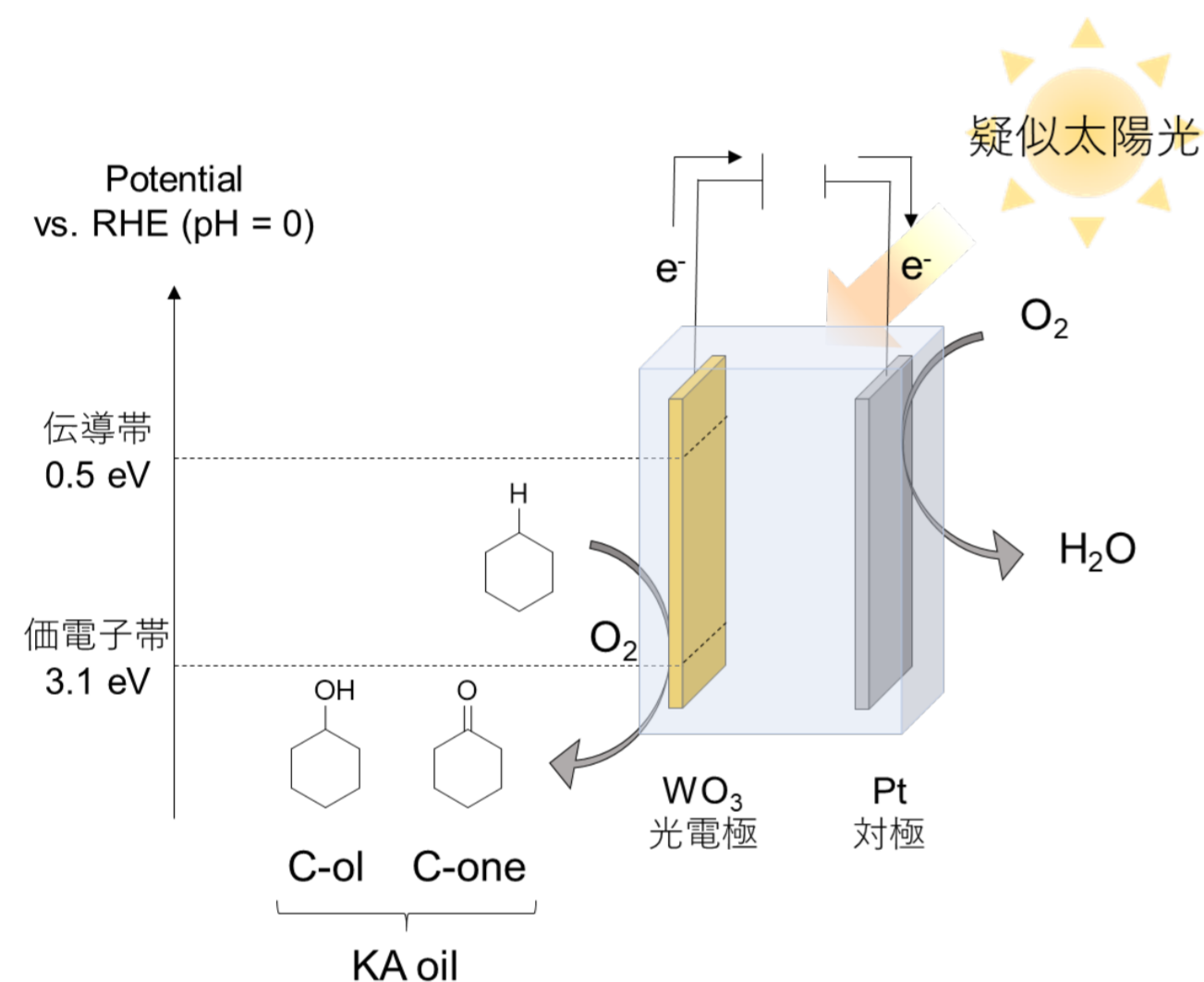
産総研 太陽光発電研究センター 機能性材料チームHPより

実験操作

ソーラーシミュレーターによる疑似太陽光照射下、光半導体電極を用いることで種々の有機化合物の光電解酸化を行った。本反応系では、光のエネルギーを利用することにより、投入するエネルギーを大幅に低減することが可能である(図はBiVO₄/WO₃光電極を用いた例)。



結果と考察 ① 難酸化性化合物であるシクロヘキサンの光電気化学的酸化反応



シクロヘキサンの酸化はナイロン繊維等の製造において重要な工程の一つとなっているが、シクロヘキサンは非常に酸化を受けづらいために、高温高压という過酷な条件が必要である。我々は、強い酸化力を有するWO₃光半導体電極と、高い耐酸化性を示す硝酸・t-BuOH混合溶媒を組み合わせることにより、常温常圧下でのシクロヘキサン酸化に成功した。

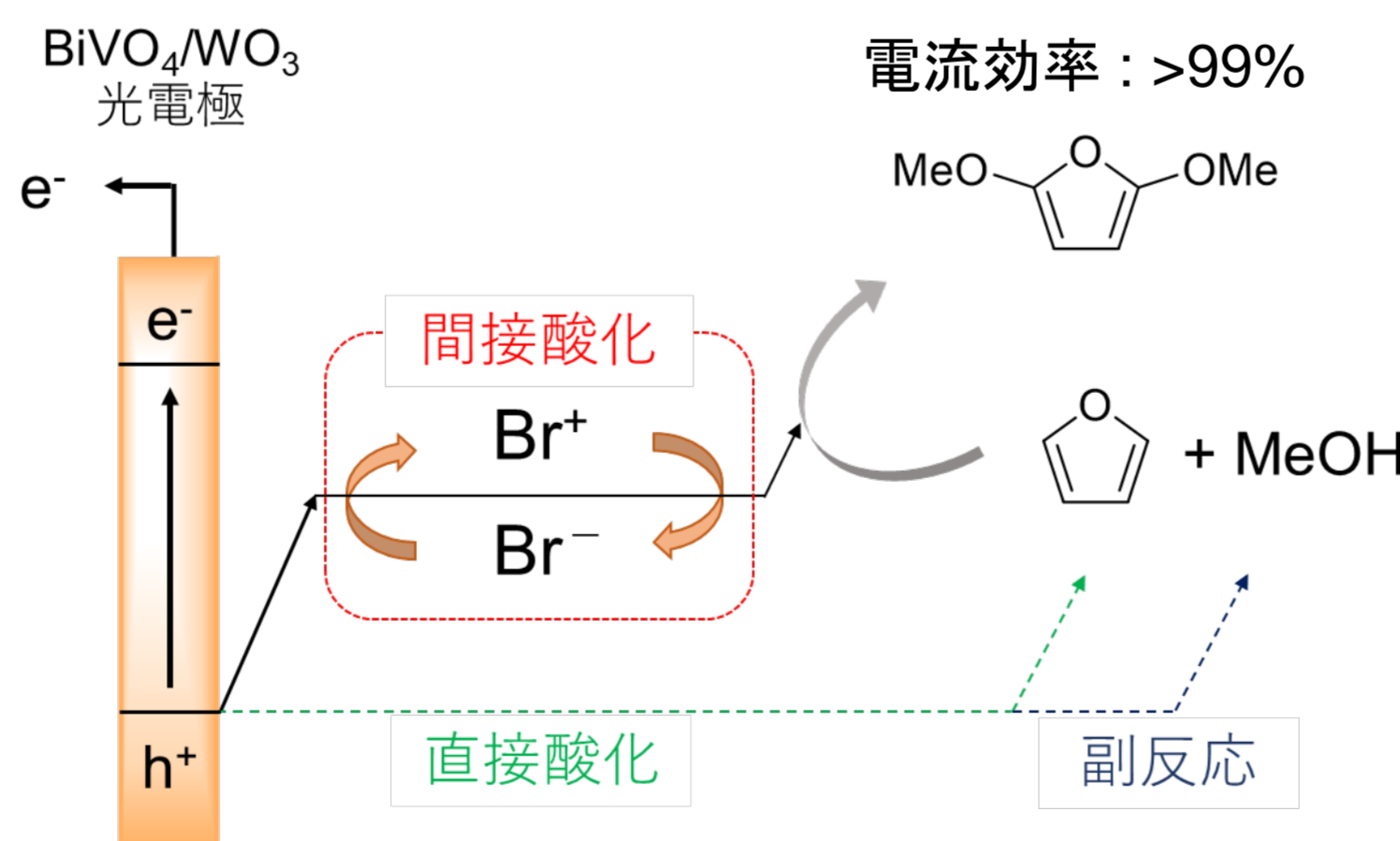
結果と考察 ② 電子移動メディエーターを用いた間接的光電気化学反応の開発

光電極は強い酸化力を持つ
↓
溶媒や支持電解質の酸化が競合し、目的とする反応の選択性が低下

間接酸化の導入

電子移動を仲介するメディエーターを導入した間接酸化により、反応の選択性を向上し、多彩な有機合成反応へと適用

世界で初めてメタノールを反応剤とした光電気化学的メキシ化反応に成功



酸化力の異なる種々のメディエーターを利用したシクロアルケンの酸化に成功

<chem>C1=CCCC=C1</chem>	<chem>C1=CC=CC=C1</chem>	<chem>C1=CC=C(C=C1)C(=O)O</chem>
$\xrightarrow[\text{0}^\circ\text{C, 5 C}]{\text{BiVO}_4/\text{WO}_3 - \text{Pt}, \text{10 mM Mediator}, \text{0.1 mA cm}^{-2}}$		
<chem>C1=CC=CC=C1</chem>	<chem>C1=CC=C(C=C1)C(=O)O</chem>	<chem>C1=CC=C(C=C1)C(=O)O</chem>
電流効率	>99% (1.2 V)	78% (1.3 V)
<chem>C1=CC=C(C=C1)C(=O)O</chem>	<chem>C1=CC=C(C=C1)C(=O)O</chem>	<chem>C1=CC=C(C=C1)C(=O)O</chem>
電流効率	65% (1.0 V)	19% (0.3 V)

カッコ内はAg/AgNO₃を参照極として測定した酸化還元電位

結論

- 酸化力の強いWO₃光半導体電極と耐酸化性の溶媒系を組み合わせることにより、これまで困難であった常温常圧下でのシクロヘキサン酸化に成功した。
- 光半導体電極と反応基質との電子移動を効率よく仲介するメディエーターを導入することで、反応の選択性を劇的に向上し、メタノールなどの容易に酸化される化合物存在下においても高効率で反応を行うことに成功した。

謝辞・参考文献

本研究の一部は、経済産業省革新的なエネルギー技術の国際共同研究開発事業「太陽光による有用化学品製造」による支援を受けたものである。

H. Tateno, Y. Miseki, K. Sayama, *Chem. Commun.*, **2017**, 53, 4378.
H. Tateno, Y. Miseki, K. Sayama, *ChemElectroChem*, **2017**, 4, 3283.
H. Tateno, S. Iguchi, Y. Miseki, K. Sayama., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2018**, 57, 11238.
H. Tateno, Y. Miseki, K. Sayama, *Chem. Commun.*, **2019**, 55, 9339.

光電極上の酸化反応による IO₃⁻からIO₄⁻生成

高杉 壮一・三石 雄悟・○佐山 和弘

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 機能性材料チーム

背景

アノード電極における酸化反応

現行技術 : H₂O → O₂

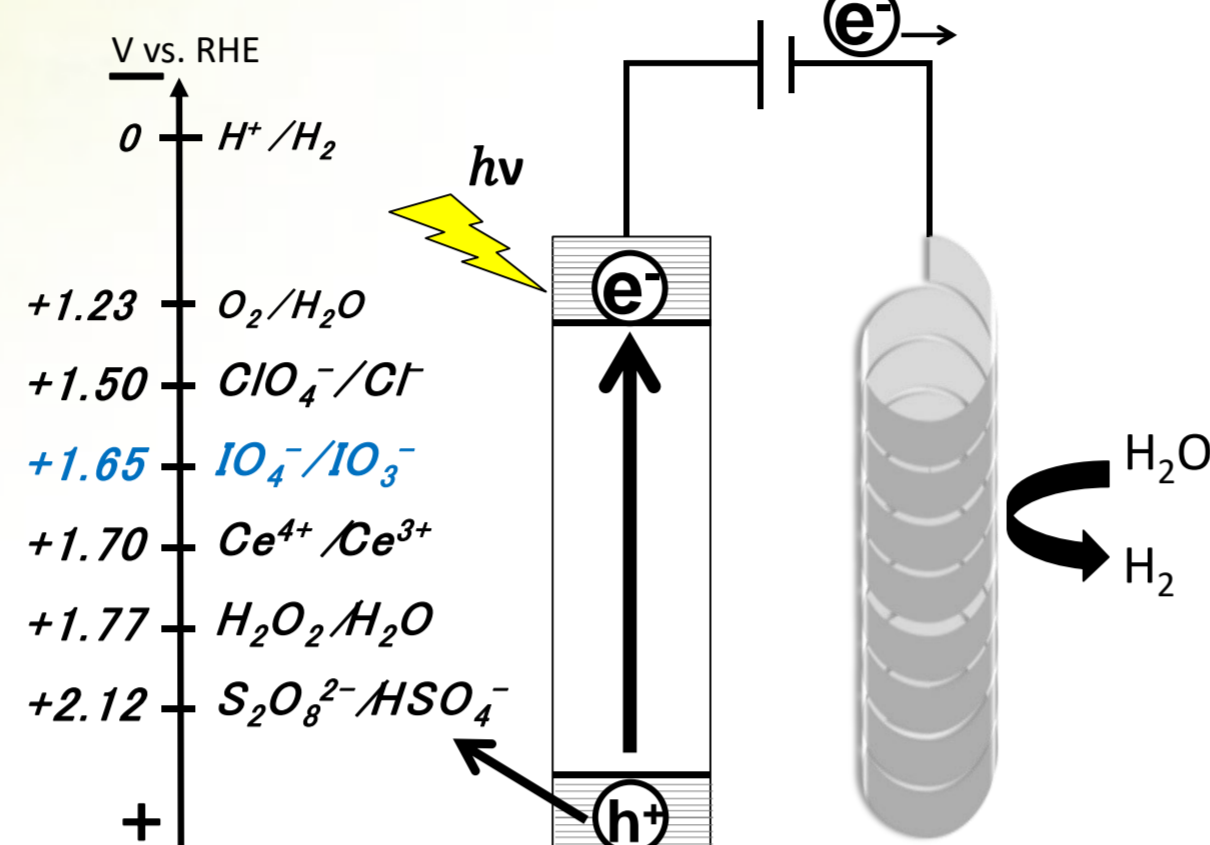
新技術 : 出発物質 → **有用化学品**

選択肢向上↑ 市場価値向上↑

IO₄⁻酸化剤

出発物質

・グリコール・エポキシド
との選択的酸化反応



光触媒アノード電極による有用化学品製造

- (1) Y. Aiya *et al.*, J. Electrochem. Soc., **109**, 419 (1962).
- (2) L. J. J. Janssen, M. H. A. Blijlevens, Electrochimica Acta, **48**, 3959 (2003).
- (3) K. Fuku *et al.*, ChemSusChem, **8**, 1593 (2015).

電気化学的なIO₄⁻の酸化生成報告例

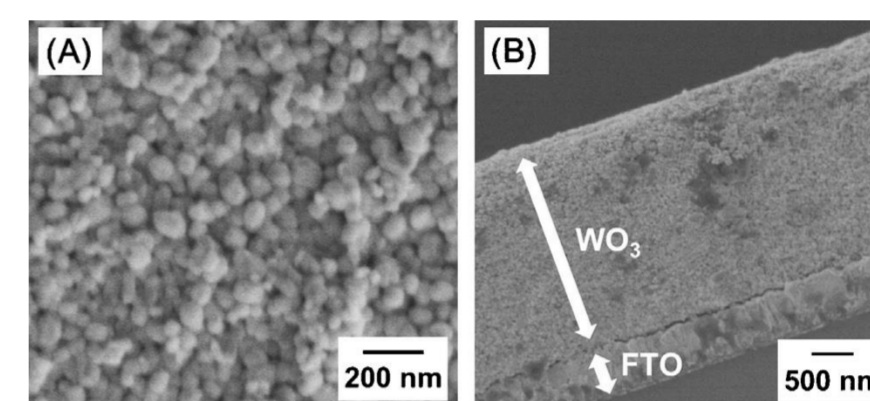
アノード電極	電解液	IO ₃ ⁻ →IO ₄ ⁻ 電流効率
Pt, グラファイト ⁽¹⁾	NaIO ₃	<5%
PbO ₂ ⁽²⁾	NaIO ₃	50~60%
WO ₃ ⁽³⁾	NaIO ₃	50~60%

実験

多孔質WO₃/FTO光電極作製

0.5 M Na₂WO₄ aq. → イオン交換 → H₂WO₄ aq. → エタノール 20 mL → H₂WO₄エタノール溶液 → PEG300 12.5 mL → 攪拌・還流 → H₂WO₄-PEG300 約13 mL

FTO → H₂WO₄-PEG300 200 μL → スピンコート 2000 rpm-15 s → 550°C 30 min → 繰り返し 7回 → WO₃/FTO



多孔質WO₃/FTOのFE-SEM観察 (A)表面像 (B)断面像

光化学反応

光源:ソーラーシミュレーター(AM1.5 1Sun)
 反応セル:2室セル イオン交換膜:Nafion (Sigma-Aldrich)
 電流電圧測定-3極(参照電極Ag/AgCl)
 アノード条件:WO₃光電極, 電解液 35 mL, 光照射面積 7 cm²
 カソード条件:Ptワイヤー, 電解液 35 mL

目的

- ・反応電解液組成によるIO₃⁻からのIO₄⁻酸化生成反応の**電流効率の向上**を目指す。
- ・酸化生成反応のメカニズムを解明し、大きく影響する因子を見出す。

結果

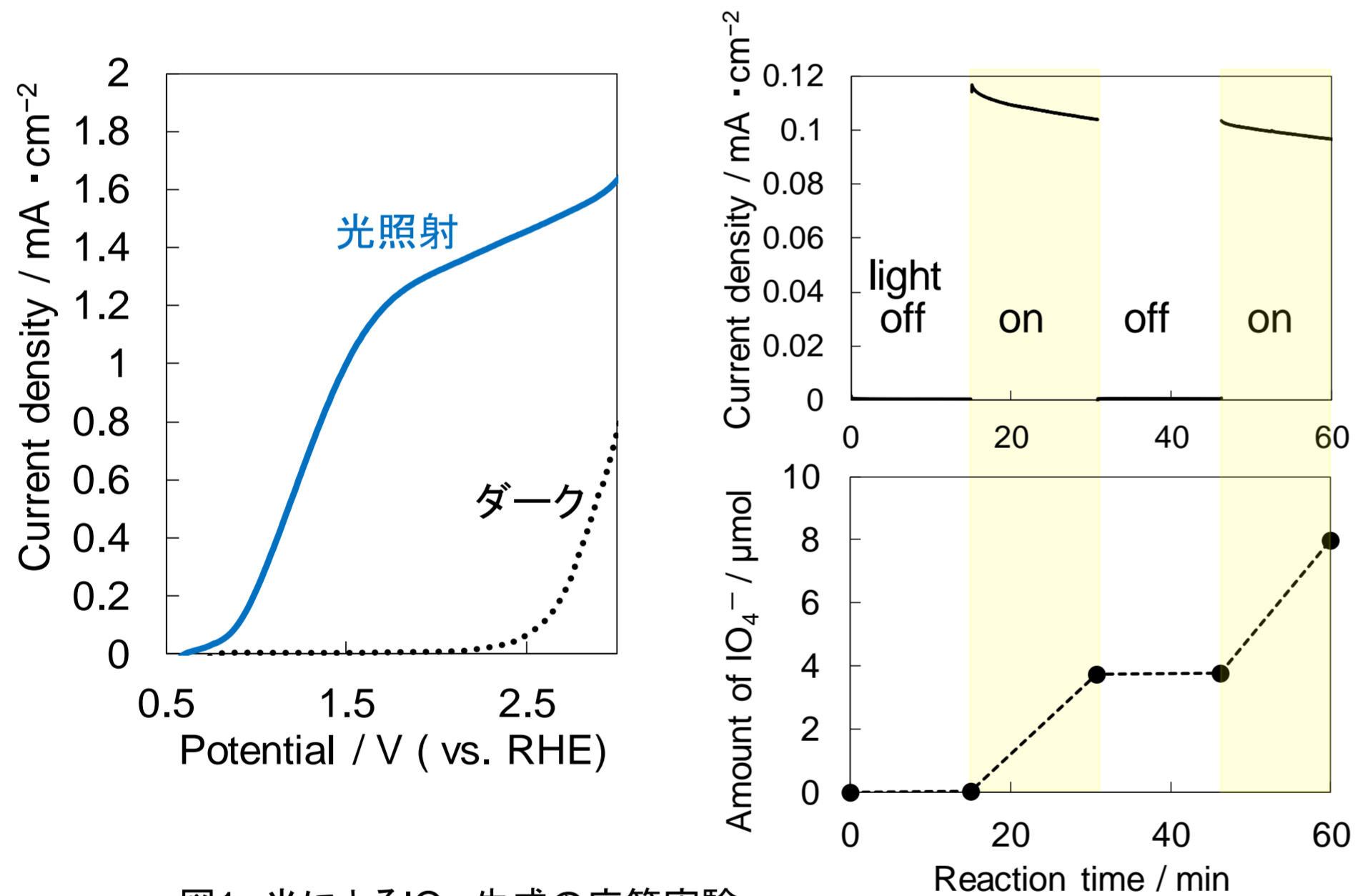


図1 光によるIO₄⁻生成の応答実験

0.2 M NaIO₃ 水溶液 右図) +1.2 V(vs. RHE) 定電圧固定

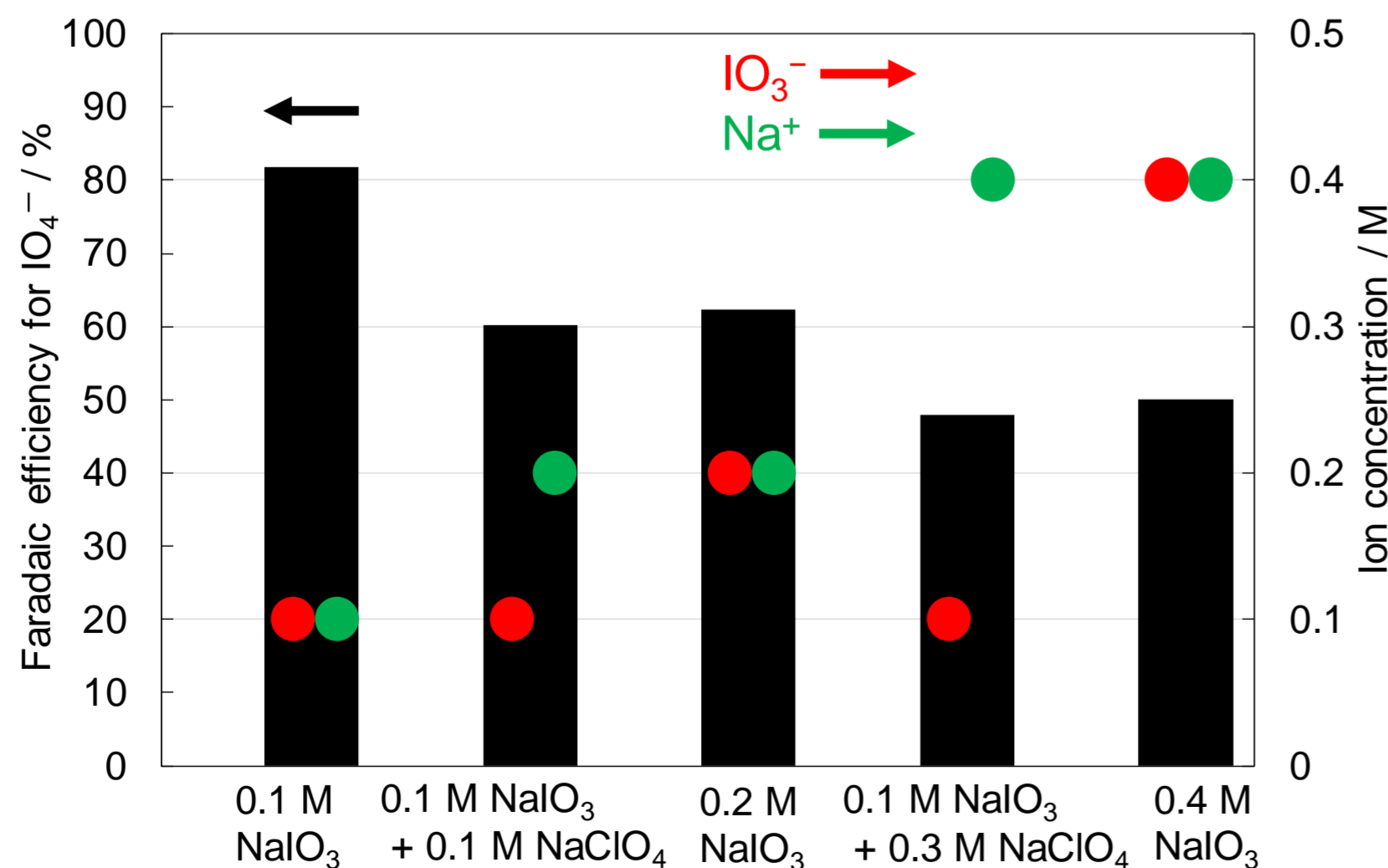


図3 含有イオン種によるIO₄⁻生成への影響実験
+0.1 mA·cm⁻² 定電流固定 3 C経過後測定

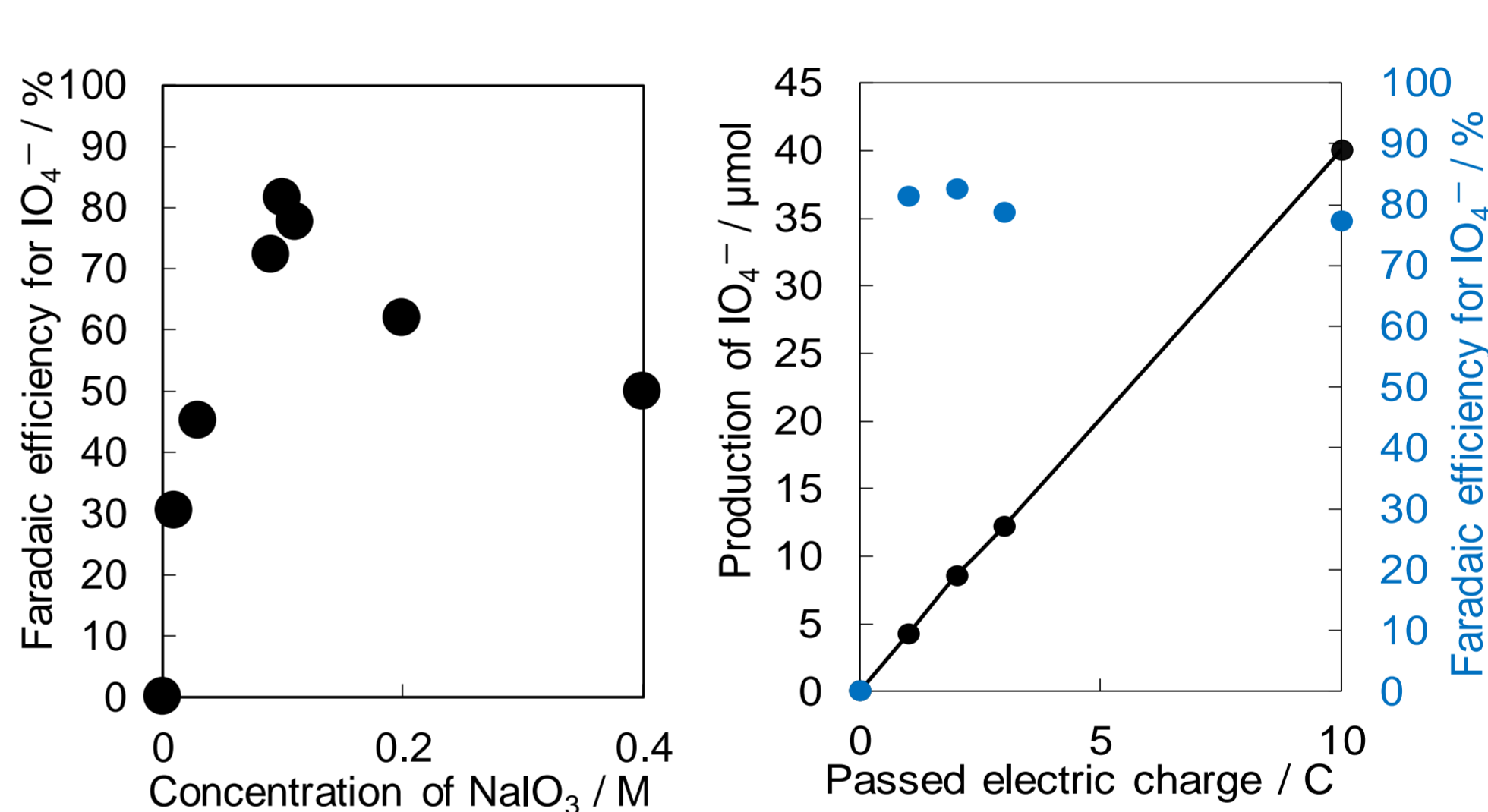


図2 反応電解液濃度によるIO₄⁻生成実験
+0.1 mA·cm⁻² 定電流固定 左図) 3 C経過後測定 右図) 0.1 M NaIO₃水溶液

- ・図1より光のエネルギーを用いることにより、電気エネルギーの削減かつ、光のオン・オフによって、生成反応を制御することに成功した。
- ・図2より0.1 MのNaIO₃濃度の時に、最高の**電流効率80%**を達成した。この時、IO₄⁻の生成は直線的に増加した。
- ・図3よりIO₄⁻生成反応は含有イオンの影響を大きく受ける。特に、Na(カチオン)が多くなるに伴い電流効率は減少した。

結論

- ・IO₃⁻からのIO₄⁻の酸化生成反応において0.1 MのNaIO₃水溶液中で**電流効率80%**を達成した。
- ・IO₄⁻の酸化生成反応ではカチオン濃度が電流効率と相関があることを見出した。

謝辞

本研究の一部は、経済産業省革新的なエネルギー技術の国際共同研究開発事業「太陽光による有用化学品製造」による支援を受けたものである。

機械学習による 3元系酸化物半導体の光電流応答に関する解析

小西由也・佐山和弘
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 機能性材料チーム

研究の目的

- 人工光合成技術(半導体光触媒・半導体光電極)
- 水素製造
 - 有用化学品製造
- 環境浄化用の可視光応答型光触媒
色素増感太陽電池・ペロブスカイト型太陽電池
- 材料としての
3元系酸化物
半導体の探索
- 材料開発のための探索
- 膨大な候補を探索
 - 探索に長時間
 - 多量のデータ
 - 実験のコスト大
- 自動合成高速スクリーニング装置による探索
(High Throughput Screening 実験)
- 得られるデータの機械学習による解析で
さらに探索を促進できないか?

実験



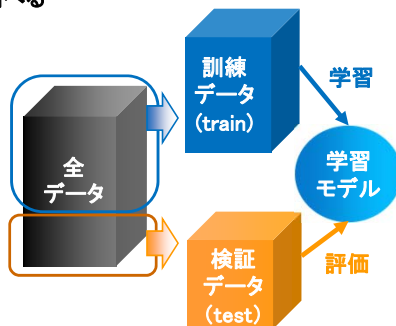
半導体膜ライブラリの自動合成装置

- 有機金属熱分解法(MOD法)により含有する元素の種類・比率が異なる半導体光電極薄膜ライブラリを自動塗布でFe系・Cu系を中心に合成
 - 半導体評価システムによって光電流応答を自動評価
- 光電流応答がある組成を探索
同じ条件で得られた実験データ
⇒ 機械学習での解析に適する

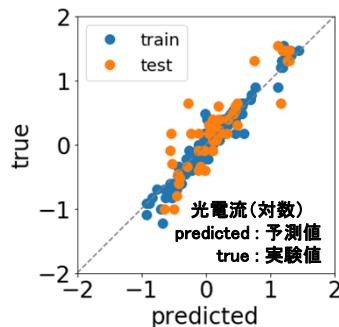
機械学習による解析

得られたデータセットに対して機械学習により規則性(パターン)を調べる
→ 光電流応答のあったもの 前処理後の226データ

- 30種類の元素(Al, B, Ba, Bi, Ca, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Fe, In, La, Mg, Mn, Nb, Ni, Pb, Sb, Si, Sm, Sn, Sr, Ta, Ti, V, Y, Zn, Zr)の中から1~3種類を含む酸化物半導体薄膜ライブラリ
- 原料の元素含有比率と半導体の型(p型・n型)を説明変数(試料薄膜の構造の情報ではなく原料における元素比率)
- 光電流値の対数を目的変数 -1.22 (0.06 μ A) ~ 1.54 (35 μ A)
- PythonによるScikit-learnライブラリを使用
- 学習モデルはRandom Forest (回帰木のアンサンブルモデル)
- ホールドアウト法でデータを分割して学習モデルを評価
- 5分割交差検証法によるGrid SearchでHyperparameterを決定
 - 回帰木の深さ: 14
 - 回帰木の数: 20



学習モデルの評価方法
「未知のデータをどの程度まで予測するか」(汎化性能)



Random Forest による
学習モデルの評価

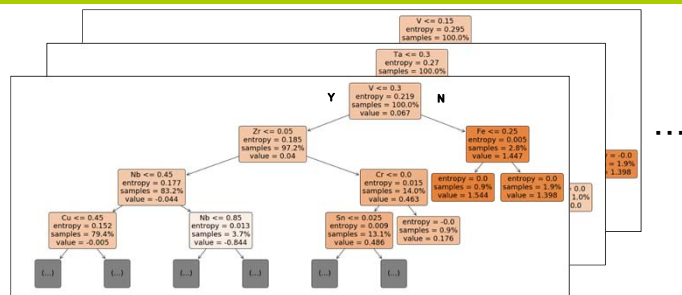
考察

- 訓練データから学習モデルを構築
→ 決定係数(R^2 値): 0.93
- 検証データの傾向を再現
→ 決定係数(R^2 値): 0.77

説明変数	重要度
Cuの比率	0.252
Vの比率	0.144
n型・p型	0.110
Zrの比率	0.101
Biの比率	0.071
Feの比率	0.070

光電流応答のある元素の組み合わせには規則性がある。

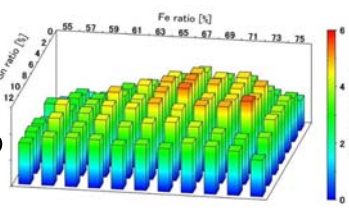
学習モデルにおける説明変数の重要度からは光電流応答へのCuの比率とVの比率が寄与が大きく、Feの比率の寄与はあまり大きくない。



回帰木の例(Random Forestではこれらを平均)

今後の展開

- 学習結果の解釈(既知の情報?)
- 未実験の組み合わせの予測
- 組成比の詳細な実験データへの適用
(→ 光電流マッピングの解析)
- 各元素の特徴量を説明変数に加える
(価電子数・電気陰性度・イオン半径...)
- 他の機械学習モデルとの比較
- 深層学習(ニューラルネットワーク)
- 実験計画への寄与(ベイズ最適化)



Fe-Sn-Zr-O系の光電流マッピング

結論と参考文献

結論

- 検証データの傾向を再現したことから光電流応答のあった元素の組み合わせには規則性があることが分かった。
- Cuの比率とVの比率が光電流応答には重要であることが分かった。それに対してFeの比率の寄与はあまり大きくなかった。

参考文献

- Takeo Arai, Yoshinari Konishi, Yasukazu Iwasaki, Hideki Sugihara, Kazuhiro Sayama, J. Comb. Chem. 9, 574-581 (2007).
- Leo Breiman, Mach. Learn. 45, 5-32 (2001).

熱回収型太陽電池の設計と実証実験

上出健仁¹・望月敏光¹・秋山英文^{2,3}・高遠秀尚¹

¹産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム

²東京大学物性研究所、³OPERANDO-OIL

研究の概要

- 結晶シリコン太陽電池の変換率は研究レベルで詳細釣り合い限界(SQ限界[1]、シリコンで約29%)に近づいた(カネカ、26.7% [2])。
- 我々は結晶シリコンを用いてSQ限界を超えることのできる『熱回収型太陽電池』を提案しており[3]、実現に向け開発を進めている。
- 高い変換効率の得られるエネルギー選択層利用型(タイプI)において、エネルギー選択層(半導体)に求められる物性を明確化し[4-6]、適した材料を探索した。
- エネルギー選択層を一般の熱電変換材料(ビスマス・テルル)で代替するタイプIIを考案し最適設計を明らかにした[7]。
- これに基づきデバイスを作製し実証実験を進めている[8]。

熱回収型太陽電池の構造とコンセプト

- 吸収体と電極の温度差(非平衡条件)を利用し熱も回収できる
- 詳細釣り合い限界(SQ限界[1])を超える高効率化が可能
- ホットキャリア太陽電池[9]と異なり、超高速キャリア取り出しが不要のためシリコンにも適用可能

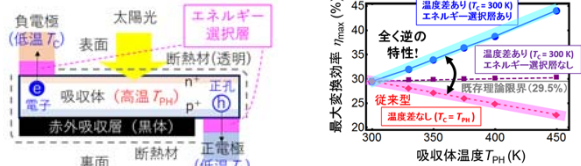


図1 熱回収型太陽電池(タイプI)の構造

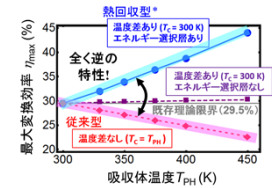


図2 タイプIの理論効率 (100 μm c-Si)

タイプI(エネルギー選択層利用型)の設計のための理論的検討

- 熱回収型太陽電池(タイプI)はエネルギー選択層の両端の温度差で生じる電圧上昇(ゼーベック効果)により高い効率が得られる太陽電池である。
- エネルギー選択層は適した障壁高さを与えるバンドオフセットを持つ必要がある。加えて、低い熱伝導率κと高い電気伝導率σを持つことが求められる。
- これらの物性値に必要な条件を数値的に評価した(吸収体に結晶シリコンを用いる場合、 $\kappa/\sigma < 10^{-3} \text{ V}^2/\text{K}$ が正の温度特性を得るために必要)。

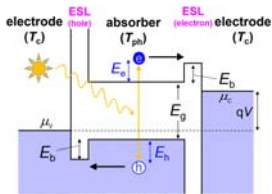


図3 エネルギー選択層(半導体)

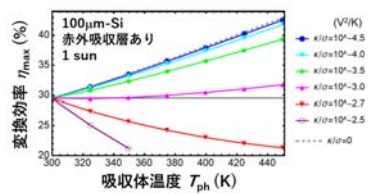


図4 理論変換効率(エネルギー選択層の熱伝導率と電気伝導率を考慮)

- 熱回収型太陽電池(タイプI)のエネルギー選択層はハイパスフィルタ(半無限の帯域)として働く。
- 一方、類似の構造をもつホットキャリア太陽電池では狭帯域のバンドパスフィルタを用いることでより高い変換効率を得られる。
- 熱回収型(タイプI)でもパスバンドの狭帯域化によりさらに高効率化が可能か調べ、現実的な範囲(500 K以下)では狭帯域化のメリットは無いことを明らかにした。

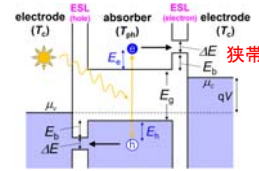


図5 エネルギー選択層(狭帯域)

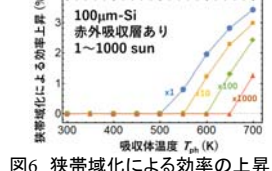


図6 狭帯域化による効率の上昇(異なる集光倍率、吸収体温度の関数として)

タイプII(熱電変換材料利用型)の設計のための理論的検討と実証実験

- エネルギー選択層の代わりに熱電変換材料を用いることでも、温度上昇による吸収体での電圧ロスに打ち勝つだけの十分な電圧上昇(大きなゼーベック係数)が得られれば、正の温度特性をもつ熱回収型太陽電池は実現できる(タイプII)。
- 吸収体に結晶シリコンを用いる場合、市販の熱電材料(ビスマステルル)でもそのようなデバイスは実現可能であることを明らかにした。
- 設計の最適化を行い、現在実証実験を進めている(開放電圧上昇は得られたが効率上昇はまだ得られていない)。

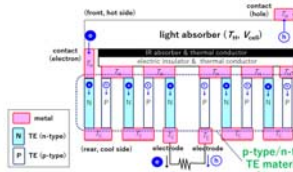


図6 熱回収型太陽電池(タイプII)

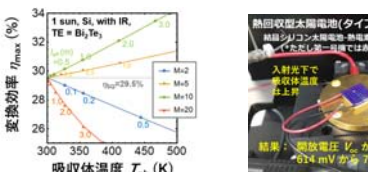


図7 理論変換効率(対数 M)

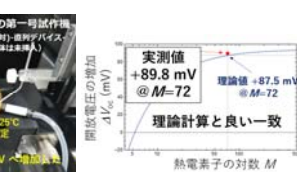


図8 予備検証実験(M=72): セットアップ(左)と結果(右)



図9 デバイス(左、M=9)と赤外線サーモグラフィ像(右、光照射下 4.6 suns、下面 25°C)

今後の予定

(タイプI)

エネルギー選択層に適した材料を選定しデバイスを作製し、まずは開放電圧の上で熱回収効果を確認する。その後、変換効率の上で効果を確認し、原理の実証を行う。

(タイプII)

理想条件でない太陽電池セルを用いた場合の最適設計を見直し、変換効率の上での熱回収効果を確認する。

参考文献

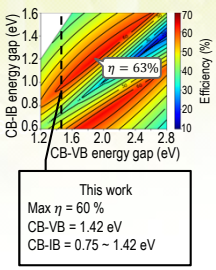
- [1] W. Shockley and H. J. Queisser, J. Appl. Phys., 32, 510 (1961).
- [2] M. A. Green *et al.*, Prog. Photovoltaics: Res. Appl. 26, 427 (2018).
- [3] 上出他、特開2019-110192
- [4] K. Kamide *et al.*, Proc. 7th WCPEC, p. 1817 (2018).
- [5] K. Kamide *et al.*, Phys. Rev. Appl., in print (2019).
- [6] K. Kamide *et al.*, PVSEC-29 (2019).
- [7] 上出他、特願2018-237064
- [8] 上出他、第66回応用物理学学会春季学術講演会、11a-W321-5 (2019).
- [9] R. T. Ross and A. J. Nozik, J. Appl. Phys., 53, 3813 (1982).

type-II 中間バンド型太陽電池に向けた GaAsSb/GaAs量子ドットの組成変調

榎木 悠亮¹、庄司 靖²、宮下直也¹、岡田 至崇¹
¹東京大学

²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム

研究の目的



中間バンド型量子ドット太陽電池
 理論変換効率 63% (最大集光時) [1]
 ☹️ 二段階光吸収によりバンドギャップ以下でも光励起
 ☹️ 中間バンドを介した再結合

GaAs_{1-x}Sb_x/GaAs量子ドット (QD)

- 長キャリア寿命のtype-II型バンド構造 [2]
- バンド構造をAs組成xで制御 [3]

中間バンド (IB) 位置
伝導帯 (CB) オフセット

実験

- GaAsSbの組成変調**
 - QDの組成測定は困難
→ GaAsSb薄膜を高分解XRDで測定
 - As fluxを変えてMBEで成膜
- GaAsSb/GaAs QD**
 - QDのバンド構造をnextnanoで計算 [4]
 - 薄膜と同じAsフラックスでQDを成長
→ QDのキャリア寿命をTRPLで測定

GaAsSb薄膜 成長条件

- 成長温度: 465°C
- 堆積量: 200 nm
- 成長速度: 0.10 ML/s
- Sb flux: 8×10^4 Pa
- As flux: $0, 1 \times 10^4, 6 \times 10^4, 1.2 \times 10^3$ Pa

サンプルの構造

QD 成長条件

- 成長温度: 465°C
- 堆積量: 2.3-6.0 ML
- 成長速度: 0.10 ML/s
- 成長中断: 1 min
- Sb flux: 8×10^4 Pa
- As flux: $0, 1 \times 10^4, 6 \times 10^4, 1 \times 10^3$ Pa

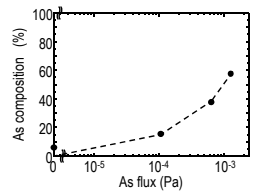
サンプルの構造

結果と考察

1. GaAsSbの組成変調

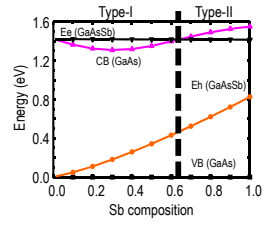
As組成を6~58%の範囲で制御

- As fluxが0 PaでAs組成が0.06
→ チャンバー内の残留Asが混入
or GaAs buffer層のAsとGaSbのSbが置換



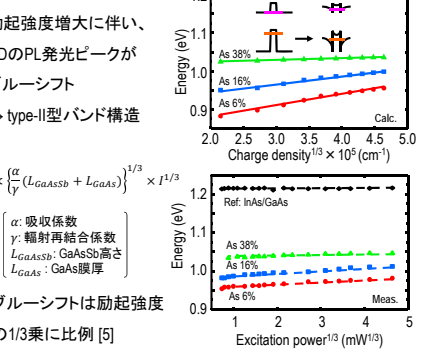
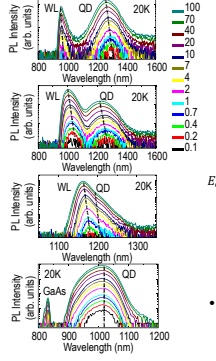
2. GaAsSb/GaAs QDの成長

- As組成増大 (Sb組成減少) によりバンド構造はtype-IIからtype-Iへ移行
- As組成増大により格子不整合が低減
→ QD密度が減少
- As組成58%ではQDが形成されず

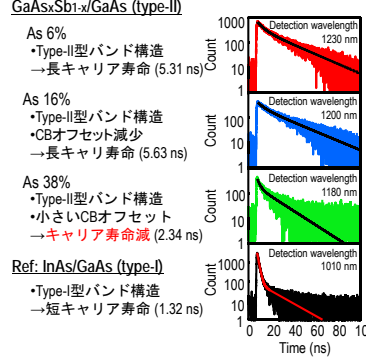


As flux	0 Pa	1×10^4 Pa	6×10^4 Pa	1×10^3 Pa
RSM GaAs(224)				
組成	As=6% (Sb=94%)	As=16% (Sb=84%)	As=38% (Sb=62%)	As=58% (Sb=42%)
バンド構造				
AFM $1 \times 1 \mu\text{m}^2$				
QD密度	$3.13 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$	$2.97 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$	$1.08 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$	No QDs

低温PLの励起強度依存性



低温時間分解PL



• 励起波長 405 nm @ 5 K
 • キャリア寿命の傾向は励起依存の傾きの値に比例
 → As組成38%のGaAsSb/GaAs QDは電子と正孔の空間的分離が弱い

QD	slope	Lifetime, τ_1	Lifetime, τ_2
As 6%	0.0064	5.31 ns	22.5 ns
As 16%	0.0076	5.63 ns	23.2 ns
As 38%	0.0034	2.34 ns	15.1 ns
InAs/GaAs	<0.0001	1.32 ns	13.5 ns

結論

- As組成6~58%のGaAsSb薄膜が得られ、量子ドットがAs組成38%まで形成された。
- シミュレーションにより、GaAsSb/GaAs量子ドットのバンド構造はAs組成が38%程度より増大するとtype-IIからtype-Iへ移行することが示された。
- キャリア寿命の長さはQDのPL発光ピークのブルーシフトの傾きに相関が見られた。
- As組成38%のQDはキャリア寿命が短く(2.34 ns)、電子と正孔の空間的分離が弱い可能性を示唆。

参考文献

[1] A. Luque and A. Marti, Phys. Rev. Lett. **78**, 5014 (1997).
 [2] C.-C. Tseng et al., IEEE J. Quantum Electron. **47**, 335 (2011).
 [3] M. Kunruga, J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 225101 (2018).
 [4] https://www.nextnano.de/nextnanoplus
 [5] N. N. Ledentsov et al., Phys. Rev. B **52**, 14058 (1995).

謝辞

本研究はNEDO高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発(超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発)の委託の下で行われた。

p型色素増感太陽電池における色素還元体の再酸化機構

草間 仁

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 機能性材料チーム

研究の目的および計算方法

【目的】

- n型色素増感太陽電池(n-DSSC)セルの η は公認値で最大12%程度
- η 向上の一案としてp型(p-DSSC)と組み合わせたタンデム型 (pn-DSSC)があり、理論限界は43%といわれている(J. Phys. Chem. B **2005**, *109*, 19403.)
- n-DSSCに比べp-DSSCの研究開発は相当遅れており色素再酸化機構など未だ不明
- 太陽電池のみならず色素増感光電極反応の観点からも重要
- p型色素とヨウ素レドックスとの相互作用に関する計算化学的研究を行い、色素還元体の再酸化機構を解明する

【量子化学計算方法】

- 密度汎関数法(DFT)
- ソフトウェア Gaussian 16, Gaussian 16W, Revision A.03
- 汎関数 mPW1PW91
- 基底関数 DGDZVP
- 溶媒効果 C-PCM, アセトニトリル
- 電子、スピン密度 Hirshfeld, Mulliken, 自然密度解析(NPA)

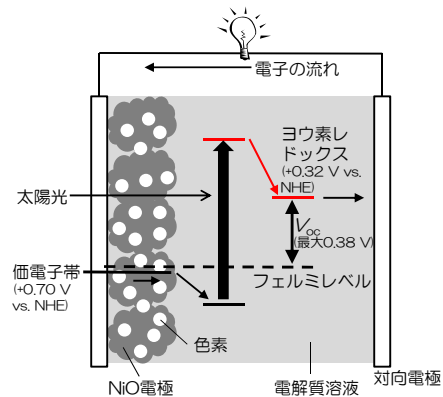
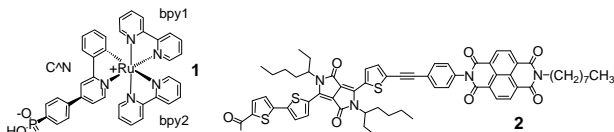


図 p-DSSCの模式図

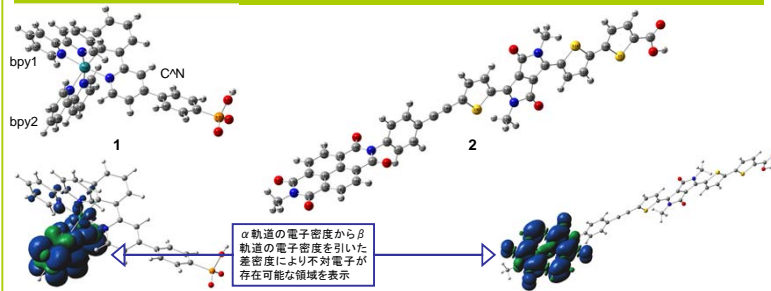
p-DSSC特性比較

色素	J_{sc} , mA cm^{-2}	V_{oc} , mV	FF, %	η , %	出典
1	4.06	95	36	0.139	Sustainable Energy Fuels 2017 , <i>1</i> , 626.
2	7.38	147	32	0.35	ChemSusChem 2017 , <i>10</i> , 2618.

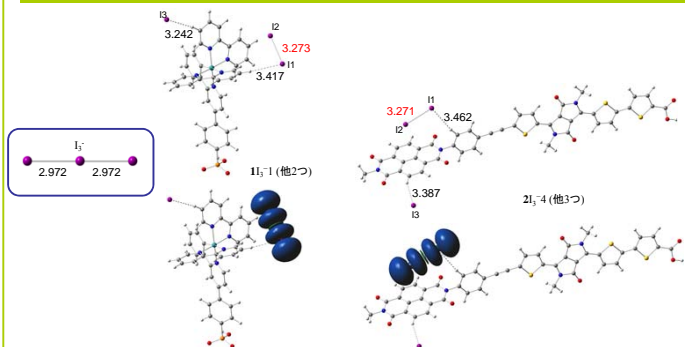
ヨウ素レドックス, 面積0.25 cm^2 , AM 1.5 G, 100 mW cm^{-2}



色素還元体の最適化構造(上)およびスピン密度(下)

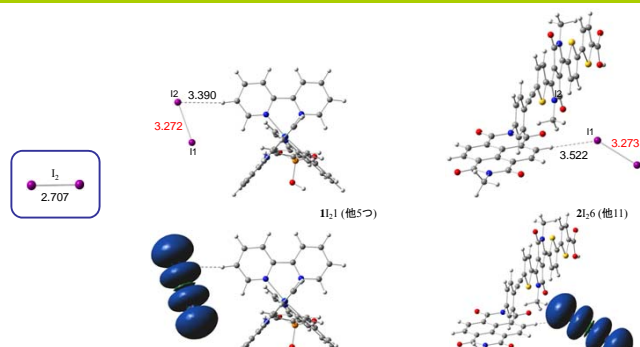


I₃⁻およびdye⁻-I₃⁻複合体の最適化構造



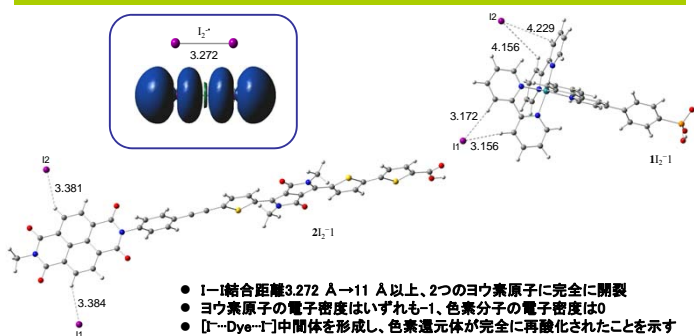
- I₂-I₃結合距離2.972 Å → 8 Å以上、I₁-I₂とI₃に完全に開裂
- I₁-I₂結合距離3.272 Åは孤立I₂⁻に相当
- I₁-I₂およびI₃の電子密度はいずれも-1、色素分子の電子密度は0
- スピンは完全に移動し、I₁-I₂およびI₃のスピン密度は1および0
- [I₂⁻-Dye⁻-I⁻]中間体を形成し色素還元体が完全に再酸化されたことを示す

I₂およびdye⁻-I₂複合体の最適化構造



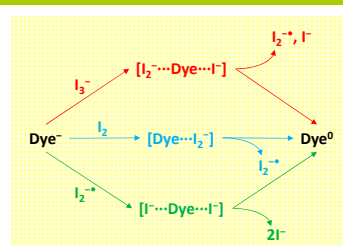
- I₁-結合距離2.707 Å → 約3.27 Åは孤立I₂⁻に相当
- I₁-および色素の電子密度は-1および0
- スピンは完全に移動し、I₁-および色素のスピン密度は1および0
- [Dye⁻-I₂⁻]中間体を形成し、色素還元体が完全に再酸化されたことを示す

I₂⁻およびdye⁻-I₂⁻複合体の最適化構造



- I₁-結合距離3.272 Å → 11 Å以上、2つのヨウ素原子に完全に開裂
- ヨウ素原子の電子密度はいずれも-1、色素分子の電子密度は0
- [I₂⁻-Dye⁻-I⁻]中間体を形成し、色素還元体が完全に再酸化されたことを示す

まとめ:p-DSSCでの色素還元体再酸化機構を初めて提案



J. Photochem. Photobiol. A: Chem. **2018**, *357*, 60.

[謝辞]本研究の理論計算の一部は、自然科学研究機構 計算科学研究センターの利用により行ったものである。また本研究はJSPS科研費 JP16K05889の助成を受けたものである。

クロロフィル誘導体を用いた新規太陽電池に関する理論的研究

北尾修¹・王晓峰²

¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 機能性材料チーム・²吉林大学

研究の目的

- (1) クロロフィル誘導体を増感剤とホール輸送剤に用いた新規太陽電池を提案する[1]。
- (2) 各種色素のDFT計算を行いHOMO-LUMO準位を整理し、太陽電池の効率との相関を議論する。
- (3) TD-DFT計算に基づく吸収スペクトルをシミュレーションし、実験結果と比較する。

実験

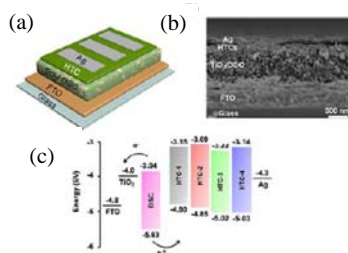


Figure 1. a) device architecture. b) cross-sectional SEM image of the solar cells. c) energy diagram tested in this study.

計算の詳細と実験結果

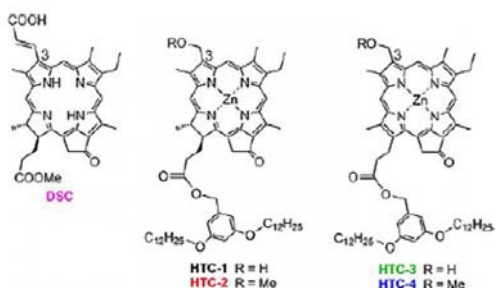


Figure 2. Molecular structures of DSC, HTC-1, HTC-2, HTC-3, and HTC-4 discussed herein.

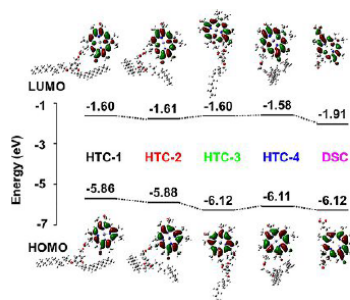


Figure 3. Frontier orbitals based on DFT/CAM-B3LYP/6-31G(d,p) with PCM (chlorobenzene) for HTC-1, HTC-2, HTC-3, HTC-4, and DSC [2].

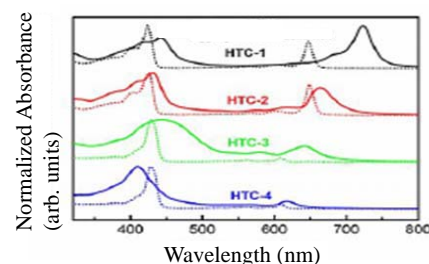


Figure 4. UV/Vis absorption spectra of HTC as the monomer in THF (dotted line) and aggregates on solid film (solid line).

計算結果と考察

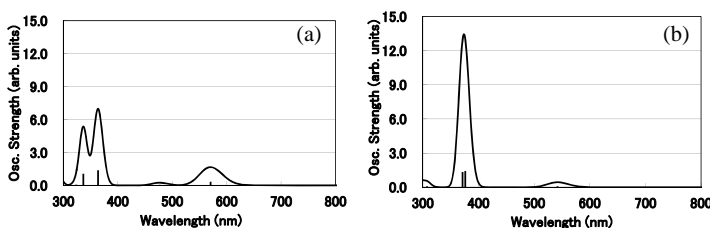


Figure 5. Theoretical absorption spectra and oscillator strength based TD-DFT/CAM-B3LYP/6-31G(d,p) with PCM(chlorobenzene) for (a) HTC-1 and (b) HTC-3 [2].

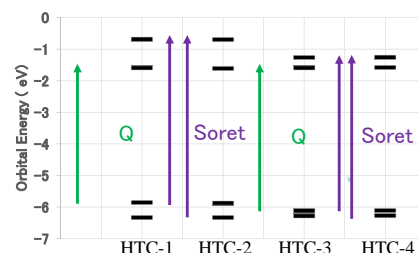


Figure 6. Frontier orbitals based on DFT/CAM-B3LYP/6-31G(d,p) with PCM(chlorobenzene) for HTC-1, HTC-2, HTC-3, and HTC-4.

結論

- (1) クロロフィル誘導体を増感剤とホール輸送剤に用いた新規太陽電池を提案した。効率はHTC-1 (0.86%), HTC-2 (0.30%), HTC-3 (0.25%), HTC-4 (0.15%)であった。
- (2) DFT計算の結果、ホール輸送剤のHOMO準位が高いものが効率が一番良い事が整理でき、実験結果とも一致した。
- (3) TD-DFT計算に基づく吸収スペクトルのシミュレーションは実験結果とよい一致をみた。

参考文献

- [1] Yue Li, Wenjie Zhao, Mengzhen Li, Gang Chen, Xiao-Feng Wang, Xueqi Fu, Osamu Kitao, Hitoshi Tamiaki, Kotowa Sakai, Toshitaka Ikeuchi, and Shin-ichi Sasaki, Chem. Eur. J., **23**, 10886 (2017).
- [2] M. J. Frisch *et al.*, Gaussian 09, Revision 01, Gaussian, Inc., Wallingford, CT (2009).

謝辞

自然科学研究機構 岡崎共通研究施設 計算科学研究センター

蒸着膜の分子配向制御におけるアルキル鎖長の影響の調査

當摩 哲也^{1,2,3}、平山 智輝²、宮寺 哲彦³、近松 真之³、吉田 郵司³

(¹ 金沢大学 ナノマテリアル研究所, ² 金沢大学大学院 新学術創成研究科, ³ 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター)

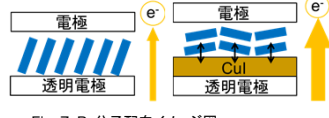
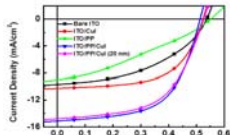
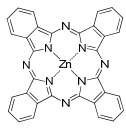
*E-mail: taima@se.kanazawa-u.ac.jp

Introduction

【研究背景】

分子配向制御・・・有機薄膜太陽電池 (OPV) の性能向上の手段として有用

Zinc Phthalocyanine (ZnPc) (Fig. 1) をCopper Iodide (CuI) 基板上に製膜することで、 π -d相互作用によりlying-down配向となる^[1]。当研究室はこの系を用い、光吸収や電荷輸送効率の増大から素子性能が向上することを報告している^[2]。



【目的】

PTCDI-Cn { ○ 有機トランジスタ
× 有機薄膜太陽電池



・電荷移動度
1.7 cm²/Vs (PTCDI-C8) > 0.6 cm²/Vs (C₆₀)

OPVへの応用で性能の向上が期待できる

配向制御する必要あり

アルキル基による配向への影響は依然不明

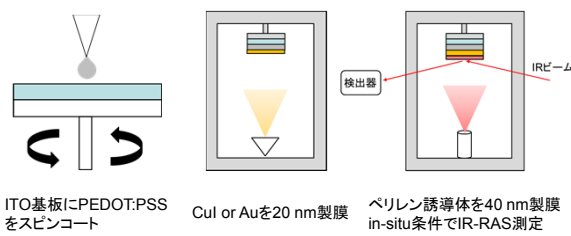
本研究

ベリリン誘導体のアルキル鎖長が配向に及ぼす影響を、IR-RAS法を用いて調査する

Fig. (上)有機トランジスタ (下)有機薄膜太陽電池のイメージ図

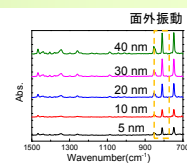
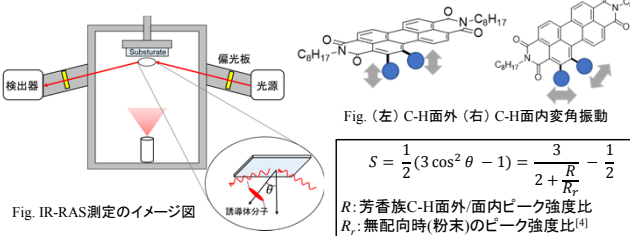
Experimental section

【サンプル作製手順】



This work

IR-RAS測定から得られたIRスペクトルから以下に示す配向パラメータS^[3]を算出し、配向の同定を行う

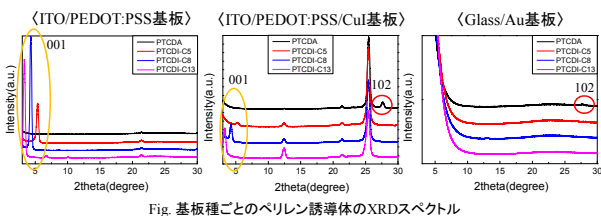


膜厚の増加に伴うC-H面外ピークの増加
→ lying-down配向

$$S = \frac{1}{2} (3 \cos^2 \theta - 1) = \frac{3}{2 + \frac{R}{R'}} - \frac{1}{2}$$

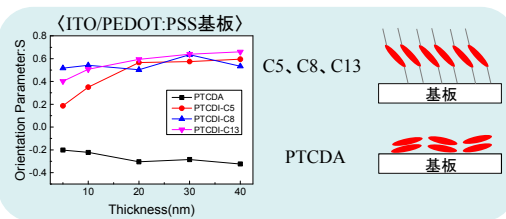
R: 芳香族C-H面外/面内ピーク強度比
R': 無配向時(粉末)のピーク強度比^[4]

Orientation control by π -d interaction



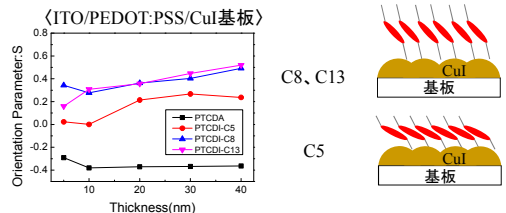
誘導体分子の(001)面 (standing-up配向) 由来のピークのみ観測可能

その他の結晶はCuI, Au基板上では結晶性が悪く、XRD測定では同定不可能

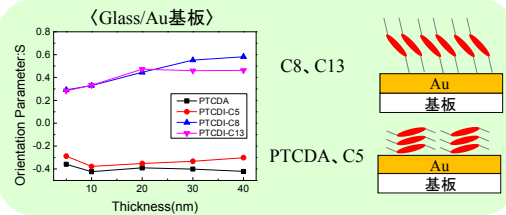


PEDOT:PSS基板との相互作用がなく、アルキル基による強い分子間相互作用が働いた

分子が自己凝集し立った配向になった



PTCDA CuIが連続膜となっており、 π -d相互作用による配向の大きな変化は見られなかった



CuIより強い π -d相互作用により、C5分子はPTCDAと同程度の寝た配向になったしかし...

C8, C13分子の配向は変化しなかった

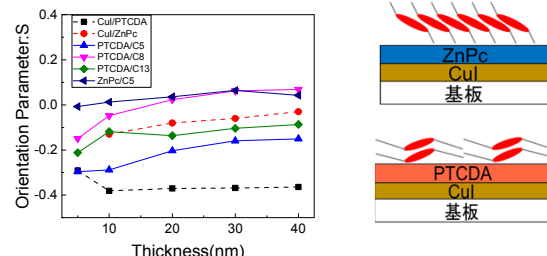
アルキル基の長さにより相互作用の大きさが変化

Fig. 基板種ごとの各ベリリン誘導体の配向パラメータSの膜厚依存性と配向イメージ図

アルキル基が短い: π -d (基板-分子間) > アルキル基 (同分子間)
アルキル基が長い: π -d (基板-分子間) < アルキル基 (同分子間)

Orientation control by π - π interaction

同じ分子骨格を持つPTCDAと異なる分子骨格を持つZnPcとの間に π - π 相互作用が働か調査した



PTCDA上においては、 π - π 相互作用の影響が強く見られlying-down配向に制御されたが、ZnPc上では、PTCDAと比較してS値が大きく π - π 相互作用の影響が弱かったと考えられる

PTCDI-C8, C13では π - π 相互作用が働かないことが示唆される

Conclusions

- 基板-分子間の π -d相互作用とアルキル基同士の分子間相互作用は競争関係にあり、アルキル基が短い場合は π -d相互作用が強く働くが、アルキル基が長くなるとアルキル基同士の分子間相互作用の方が強く働くことが分かった。
- XRDスペクトルとIR-RAS測定の結果から、XRD測定では配向同定できないような場合でも、IR-RAS測定では可能であることが分かった。
- 同じ分子骨格を持つPTCDAを配向制御層にした場合、 π - π 相互作用が強く働きlying-down配向を示すが、異なる分子骨格を持つZnPc上では相互作用は弱く、配向制御もされにくいことが示唆された。

References

[1] T. Chikamatsu, T. Taima, et al., ACS Omega, 3, 5678 (2018).
[2] Y. Zhou, T. Taima, et al., Applied Physics Letters, 100, 233302 (2012).
[3] D. Yokoyama et al., Organic Electronics, 10, 127 (2009).
[4] M. K. Debe, Journal of Applied Physics, 55, 3354 (1984).

IZO透明電極を用いた半透明型有機薄膜太陽電池におけるp型バッファ層の効果

◎ 桑野 航平^{1,2}・小江 宏幸²・近松 真之²・吉田 郵司²・渡邊 康之³・西川 英一¹

¹東京理科大学, ²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 有機系薄膜チーム, ³公立諏訪東京理科大学
E-mail:4318701@ed.tus.ac.jp

研究背景

- 半透明型有機薄膜太陽電池(ST-OPV)は、上部電極に透明導電膜を使用しており、有機半導体のもつ光透過性や着色の自由度の高さなどの特長を活かすことが可能。
- ST-OPVの利点を活かして、建材一体型太陽電池、自動車のリアガラス、農作物を栽培しながら発電が可能なソーラーシェアリング等への展開に期待できる。
- 有機半導体の持つ光透過性の特長を活かすため、上部電極を非加熱成膜でも導電性が高く、有機発電層への低ダメージで成膜が可能なIndium zinc oxide (IZO)を採用した。

研究の目的

- 現状の素子構造で用いられているp型バッファ材料のPEDOT:PSSが強酸性であるため、IZOを劣化させる課題がある。
- 本研究では、p型バッファ材料であるMoO₃、WO₃-NPs、HATCNの3種類の材料を選択し、IZOを用いたST-OPVの発電特性に対して有効性を検証した。

実験

【素子構造】

《 p型バッファ材料の検討 》

- Glass/ITO/ZnO-NPs/PPDT2FBT:PC₆₁BM/MoO₃/IZO
- Glass/ITO/ZnO-NPs/PPDT2FBT:PC₆₁BM/WO₃-NPs⁽¹⁾/IZO
- Glass/ITO/ZnO-NPs/PPDT2FBT:PC₆₁BM/HATCN⁽²⁾/IZO

【ST-OPV作製方法】

《 n型バッファ層 》

- ◆ ZnO-NPs・・・スピコート法 (大気中)

《 有機発電層 》

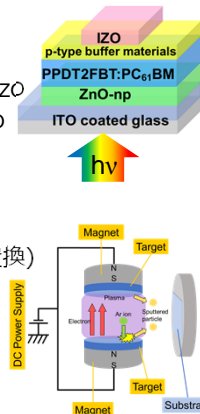
- ◆ PPDT2FBT:PC₆₁BM・・・スピコート法 (N₂置換)

《 p型バッファ層 》

- ◆ MoO₃, HATCN・・・真空蒸着法
- ◆ WO₃-NPs・・・スピコート法 (大気中)

【IZO成膜方法】

- ◆ IZO・・・対向式DCマグネトロンスパッタ法

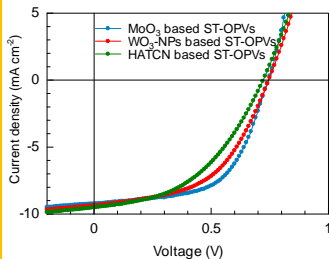


Ar (ccm)	O ₂ (ccm)	Base gas pressure (Pa)	Total gas pressure (Pa)	Substrate temperature (°C)	DC Power (W)	Time (min)
40	0.08	4.0 × 10 ⁻⁴	0.35	R.T.	50	40

結果 & 考察

> p型バッファ材料の検討

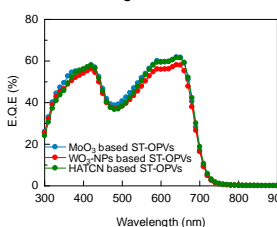
● J-V 測定結果



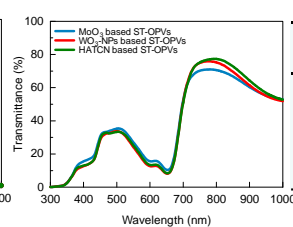
	MoO ₃	WO ₃ -NPs	HATCN
J _{sc} (mA/cm ²)	9.24	9.36	9.51
V _{oc} (V)	0.74	0.75	0.72
FF	0.59	0.51	0.46
PCE (%)	4.02	3.60	3.14
R _s (Ω·cm ²)	9.75	15.38	15.51

- MoO₃を挿入した際のST-OPVでは4.02%の効率が得られた
- 他の材料では、R_sの値が増加しFFの値が減少したことからPCEの値が低下した

● EQE測定結果



● 透過率測定結果

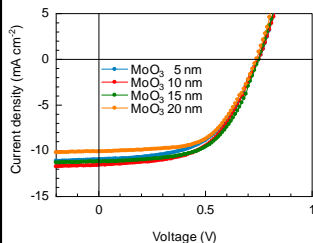


	T (%) @550 nm
MoO ₃	27.1
WO ₃ -NPs	24.2
HATCN	25.2

- 透過率測定結果より、作製したST-OPV素子は波長550 nmにおける透過率は20%程度であった

> MoO₃最適膜厚の検討

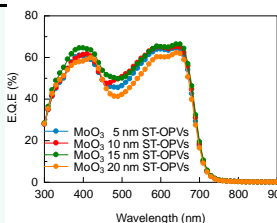
● J-V 測定結果



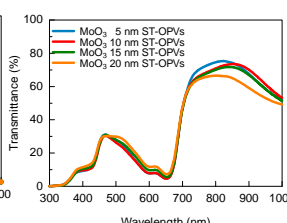
MoO ₃ (nm)	5	10	15	20
J _{sc} (mA/cm ²)	10.94	11.56	11.16	10.07
V _{oc} (V)	0.75	0.75	0.75	0.74
FF	0.54	0.55	0.58	0.59
PCE (%)	4.43	4.75	4.84	4.36
R _s (Ω·cm ²)	10.40	10.66	8.68	10.34

- MoO₃を15 nm成膜した際、4.84%と最も高い変換効率が得られた

● EQE測定結果



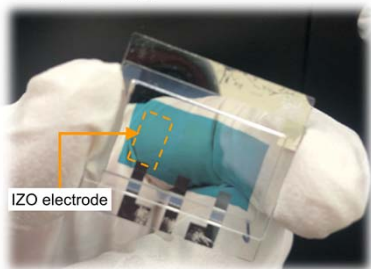
● 透過率測定結果



MoO ₃ (nm)	T (%) @550 nm
5	17.3
10	16.8
15	18.3
20	20.1

- EQE測定結果より、波長400~650 nmにおいてMoO₃を20 nm成膜した素子では、他の膜厚で成膜した素子より5-10%程度低下していた。

<<作製したST-OPV素子の外観>>



結論

- ✓ IZOを逆構造型OPVの上部電極に使用する際、最も有効なp型バッファ材料はMoO₃であった。
- ✓ MoO₃の最適膜厚は15 nmであり、PCEの値は4.84%で最も高い値が得られた。
- ✓ 作製したST-OPVの透過率は、波長 550 nmにおいて20%程度であった。

参考文献

- [1] T. Stubhan et al., Adv. Energy Mater., 2, 1433 (2012).
- [2] M.-C. Jung et al., Org. Electron. 52, 17 (2018).

LED光照射下における有機薄膜太陽電池のデバイス構造依存性

望月 博孝, 鈴木 聡美, 近松 真之, 吉田 郵司
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 有機系薄膜チーム

研究の背景・目的

◆ 様々な照度の屋内光



図1 屋内の照度.

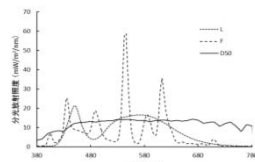
有機薄膜太陽電池(OPV)

軽量で可撓性に富むことから、屋内光・低照度下での利用や人間や動物など移動物体の利用に適している。



スマートハウス用やIoTセンサネットの電源としての普及を期待。 ²⁾

◆ 基準屋内光 (IEC規格) ³⁾



D50 : スペクトルの表D50 (太陽光間接照明)
F : スペクトルの表F (色温度5000 Kの蛍光灯)
L : スペクトルの表L (色温度5000 KのLED光源)

基準屋内照度における基準屋内光の放射強度 (mW/m²)

照度 (lx)	基準屋内光 D50	基準屋内光 F	基準屋内光 L
1,000	4,822	3,025	3,026
200	964	605	605

図2 各種光源のスペクトル (上) と放射強度 (下) .

結果

◆ BHJとPHJ構造の素子を作製し、白色LED照射下での構造による発電挙動の違いを考察する

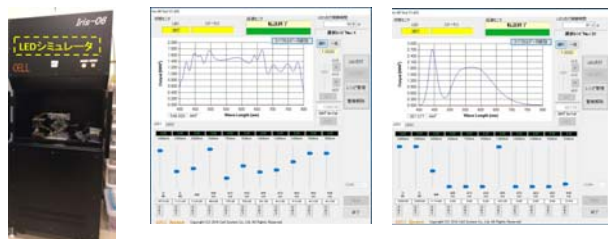


図3 LEDシミュレーター(左) とそれによって作成した疑似太陽光スペクトル (中) と白色LED (右).

LEDシミュレーターで各種形状・強度のスペクトルが作成可能。基準屋内光LED(白色LED)のスペクトル形状を再現した光が100,000から100 lxまで調整できる。

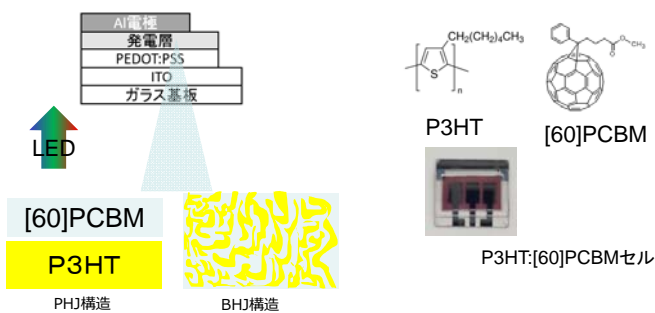


図4 素子構造(左) と発電層材料 (右).

考察

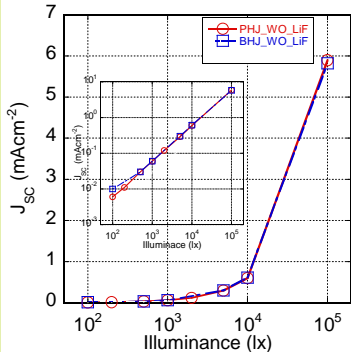


図5 短絡電流密度の照度依存性

高照度下では、BHJ=PHJ.

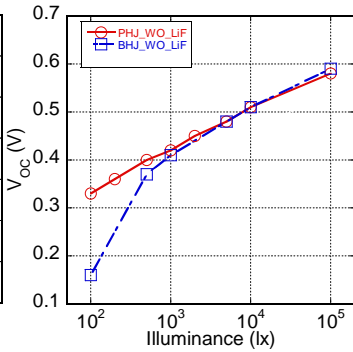


図6 開放電圧の照度依存性

低照度下でのBHJは直線から外れる。

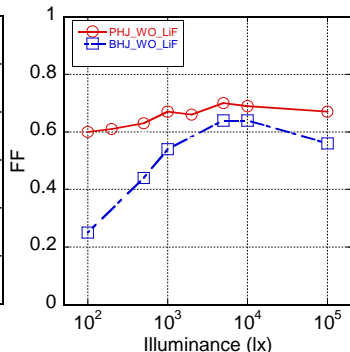


図7 形状因子の照度依存性

PHJは照度によらず一定.

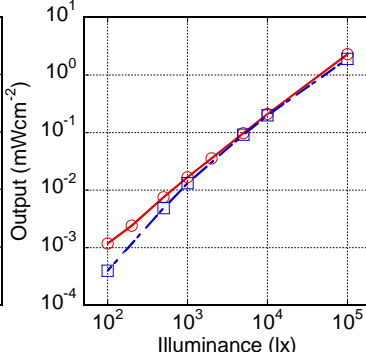


図8 出力の照度依存性

低照度下ではPHJ>BHJ.

結論

- 基準屋内光LED(白色LED)のスペクトル形状を再現した光を各種OPVセルに照射し、構造依存性について特性評価を行った。
- 高照度下での短絡電流密度と開放電圧、出力では、PHJ = BHJであるが、低照度下ではPHJ > BHJとなった。
- 低照度下でのFFではPHJは大きな低下がないが、BHJでは大きな低下が見られた。

参考文献

- 1) <https://www.nttdata-strategy.com/ehc/about/>
- 2) <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170919-2/index.html#YOUGO4>
- 3) 屋内光下での太陽電池の性能評価方法、JEITA ET-9101, 2016年3月

有機薄膜太陽電池の熱回復が 発電量に与える影響

佐藤 梨都子^{1,2}、千葉 恭男²、近松 真之²、吉田 郵司²、當摩 哲也^{2,3}、嘉数 誠^{1,2}、増田 淳^{2,3}

¹佐賀大学 大学院工学系研究科 システム創成科学専攻

²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

³金沢大学 ナノマテリアル研究所

研究の目的

産総研九州センターでは、系統連系された種々の太陽電池の生涯発電量の調査が行われており、^[1-4] その一つである有機薄膜太陽電池(OPV)アレイは発電量の季節変動を示した。これまでの研究にて、光照射効果と暗所保管による出力低下は、発電量の季節変動に影響しないことを確認した。^[5] 本研究では、OPVに影響を与える環境要因のうち熱に着目した。温度環境の制御に恒温槽を用い、屋外環境で取りうる温度における熱回復の調査、および発電量への影響について検討した。

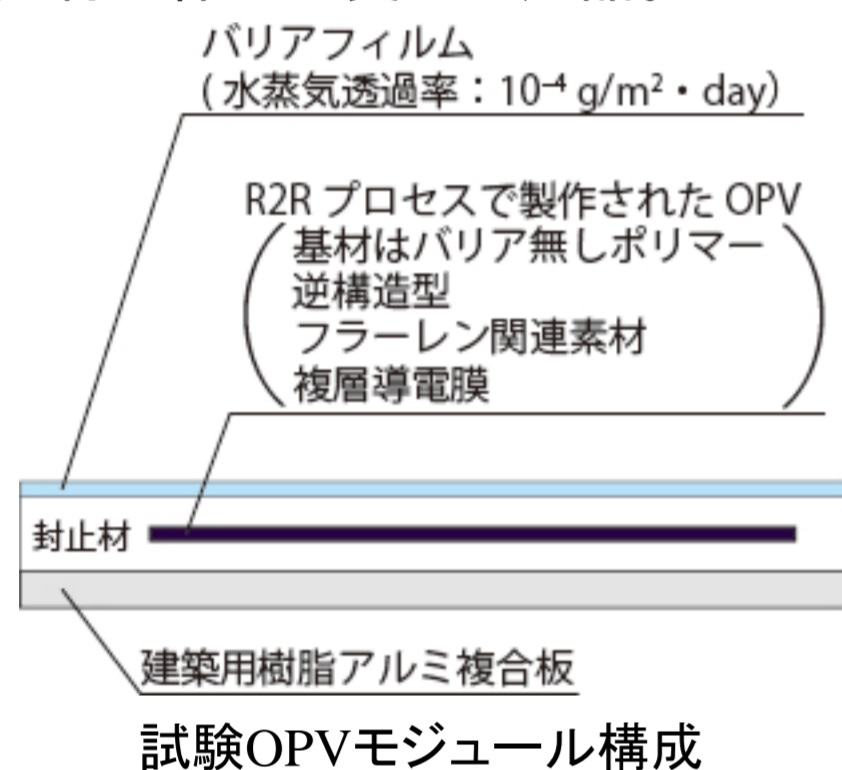


- 導入: 2014年12月
- アレイ構成: 2アレイ (4直列 x 4並列 / 1アレイ)
- 取得データ: I-V特性、モジュール裏面温度、斜面全天日射量、気温
- 室内測定: 2016年1月, 2016年12月, 2017年12月

実験方法

試験モジュール: Module A~D

約3年半の系統連系下での屋外曝露にて、二次劣化を示したモジュール。建材一体型の受注生産品。



保持温度に因る出力の経時変化

経時変化の観察のため、温度一定の環境に保持したOPVモジュールを、恒温槽より取り出して間欠的にソーラシミュレータで測定した。保持温度による違いを比較する。

恒温槽による温度保持

暗所アニール, 湿度約2%

【保持温度】

-10 °C (A), 10 °C (B), 30 °C (C), 60 °C (D)

保持温度は、屋外実使用下のモジュール裏面温度から設定。

	summer	winter
Night	20~30 °C	-10~5 °C
Daytime	30~60 °C	5~35 °C

室内計測

AM 1.5 G, 1 SUN

【計測データ】

- 電流-電圧 (I-V特性)
- モジュール裏面温度

温度補正されたシステム出力係数 (PR_{T=25})

デバイスの温度特性による発電量の季節変動を調査するため、PR_{T=25}を求めた。

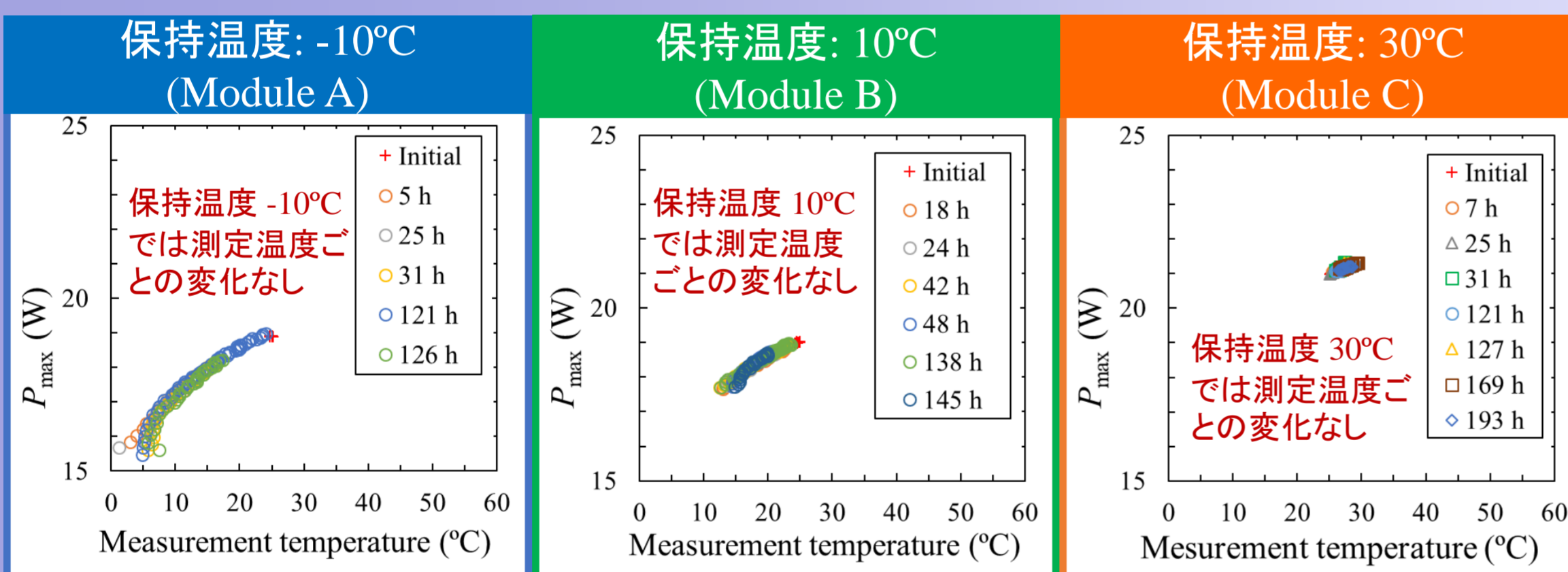
$$PR_{T=25} = \frac{P_{max}}{P_{max(STC)}} \times \frac{G_{(STC)}}{G} \times \frac{1}{1+\gamma(T-T_{(STC)})}$$

P_{max} : measured maximum output power
 $P_{max(STC)}$: shipment P_{max}
 G : measured solar irradiance
 $G_{(STC)}$: solar irradiance under the standard test condition (STC, 1000 W/m²)
 γ : temperature coefficient of P_{max}
 T : measured temperature
 $T_{(STC)}$: temperature under the STC (25 °C)

安定化処理後の温度から室温まで、複数の測定温度におけるI-V特性を得て、温度係数を算出した。

結果および考察

◆ 各保持温度で P_{max} の経時変化なし



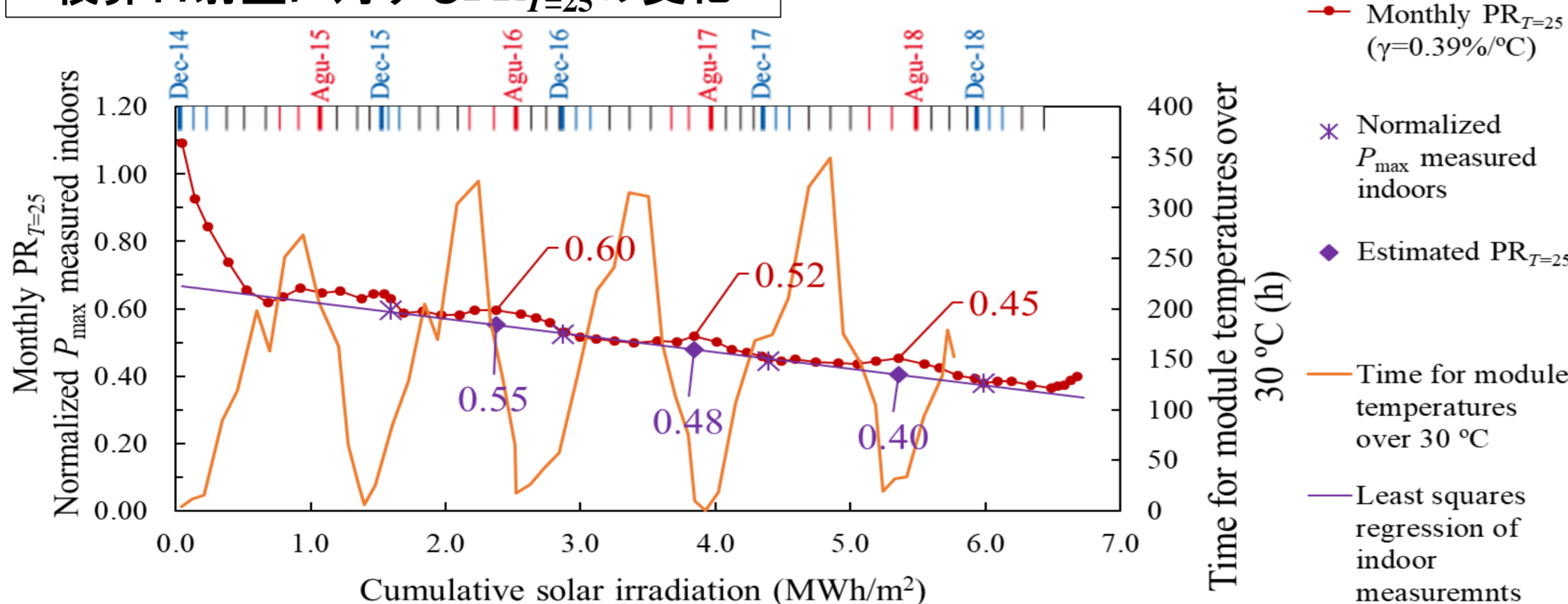
◆ P_{max} が増加

保持温度による違い

60 °C 保持のみ出力上昇がみられ、長くとも 120 h 以内に増加は飽和した。

熱回復は冬に起きず夏の日に進行

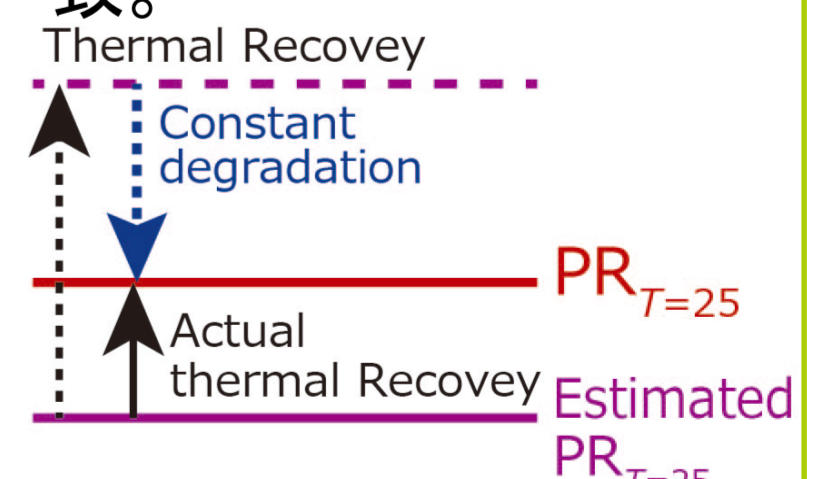
積算日射量に対する PR_{T=25} の変化



◆ Monthly PR_{T=25} の増減は温度履歴と関連。

◆ 熱回復しない冬の室内測定値と、Monthly PR_{T=25} はおおむね一致。

◆ 光劣化は積算日射量に対して直線的に進行する。



熱回復と光劣化のバランスで発電量が季節変動する

結論

- 保持温度 -10, 10, 30°C では P_{max} の回復は見られなかったが、保持温度 60°C では初期値から 1.5 W の回復を示した。また、OPVアレイの Monthly PR_{T=25} において二次劣化における季節変動は消えなかった。これらのことから、熱回復は冬の日中ではなく、夏の日中に起こることが分かった。
- 光劣化は積算日射量に対し直線的に進行する。Monthly PR_{T=25} と冬季室内測定による回帰直線の比較から、本曝露サイトにおける夏季の熱回復による発電量の利得は、初期値比約5%と推定される。

参考文献

- [1] T. Ishii and A. Masuda, Prog. Photovolt.: Res. Appl. **25**, 953–967 (2017).
- [2] S. Choi *et al.*, Thin Solid Films **661**, 116–121 (2018).
- [3] Y. Chiba *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 08RG04 (2018).
- [4] R. Sato *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 106510 (2019).
- [5] R. Sato *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 052001 (2019).

【謝辞】本研究はNEDOの委託により行われました。関係各位に心より御礼申し上げます。

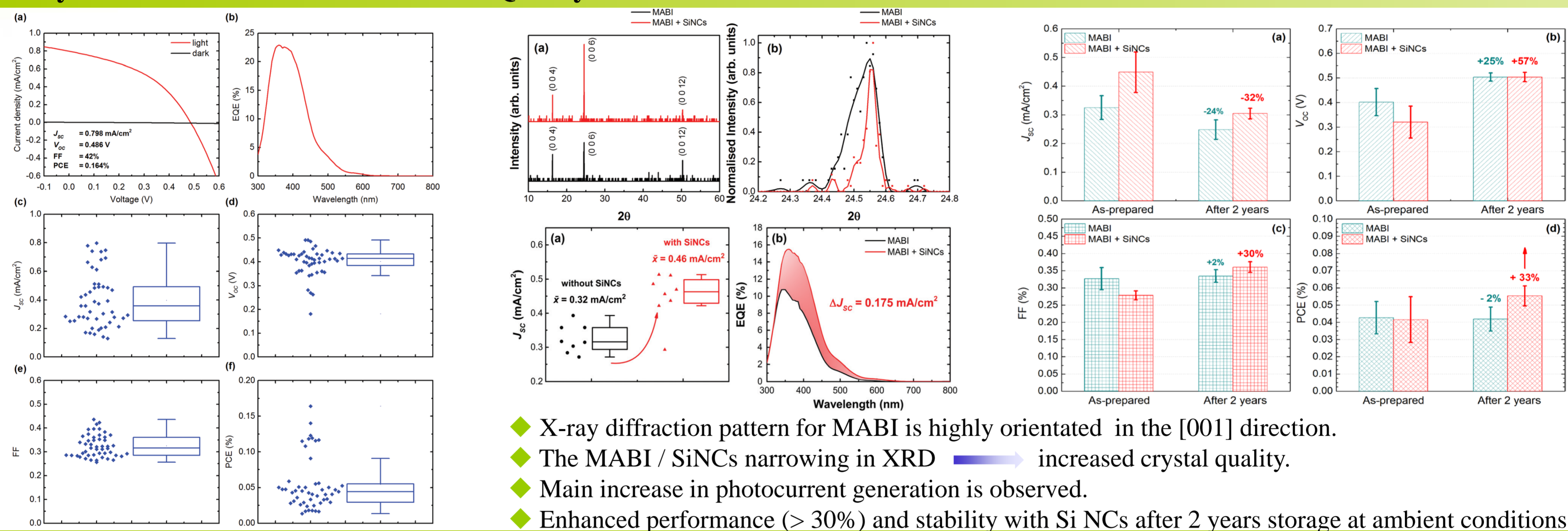
Hybrid quantum dots perovskites solar cells

V. Švrček¹, C. McDonald^{1,2}, C. Rocks^{1,2}, M. Lozac'h¹, D. Mariotti², T. Matsui¹
¹Advanced Processing Team, Research Center for Photovoltaics, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan
²Ulster University, U.K.

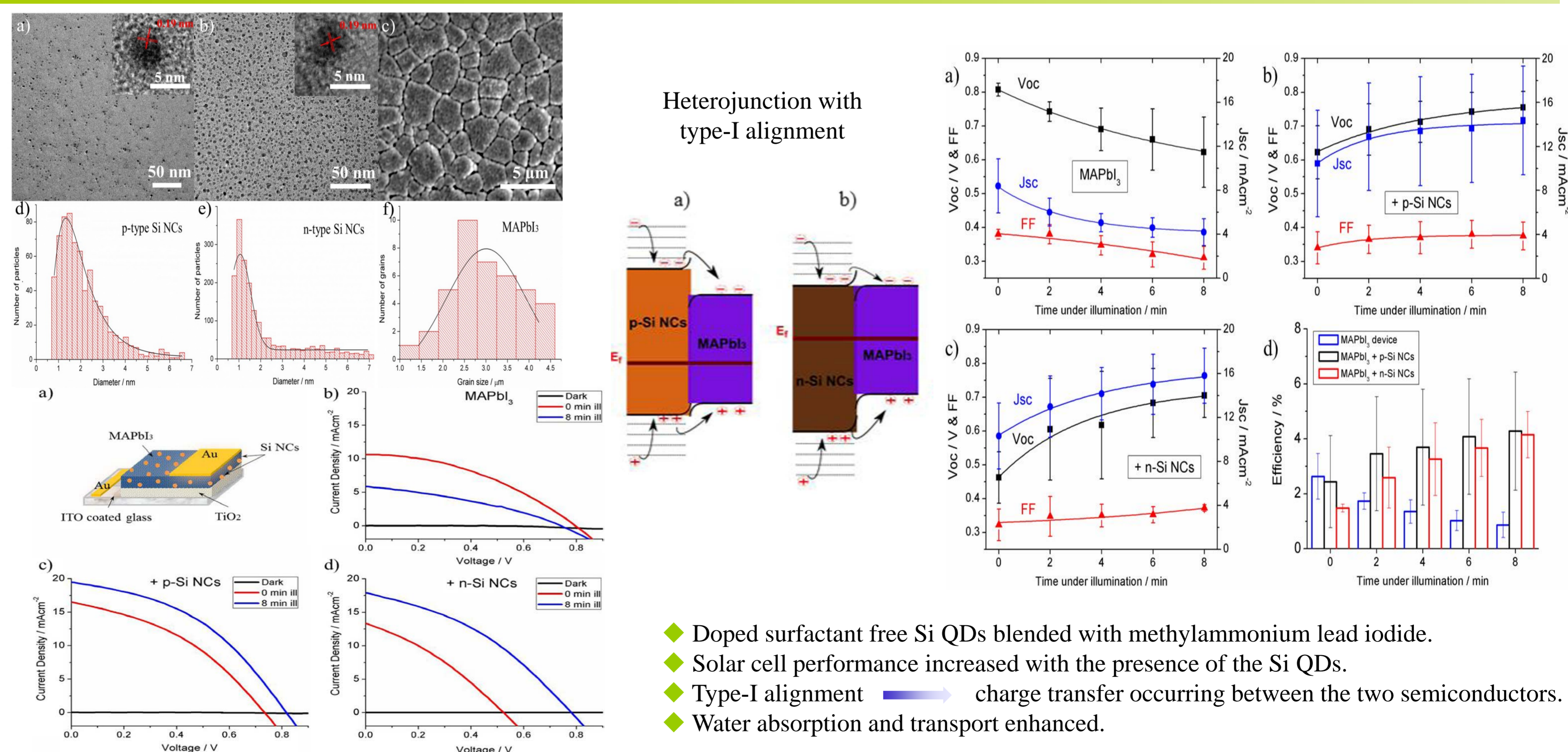
Motivation

- ◆ Silicon (Si) abundant and non toxic material.
- ◆ Significantly enhanced efficiency of solar cells with doped Si nanocrystals with quantum confinement (< 10 nm).
- ◆ Colloidal surfactant free Si quantum dots (Si QDs) based hybrids → easy to introduce to solution process.
- ◆ Methylammonium iodo bismuthate (CH₃NH₃)₃(Bi₂I₉) MABI /Si QDs hybrids → non toxic material however low efficiency.
- ◆ Methylammonium lead iodide (CH₃NH₃PbI₃) perovskite MAPI / Si QDs hybrids → Pb toxic element.

Methylammonium iodo bismuthate / Si QDs hybrids



Methylammonium lead iodide perovskite / Si QDs hybrids



Conclusions

- ◆ Perovskites hybrids based with surfactant free and colloidal dispersible Si QDs.
- ◆ Methylammonium iodo bismuthate MABI / Si QDs solar cells.
- ◆ Methylammonium lead iodide MAPI / Si QDs solar cells.
- ◆ In both cases an improvement in photocurrent generation, stability and an enhancement the endurance against light irradiation (1 sun) at ambient conditions is recorded.

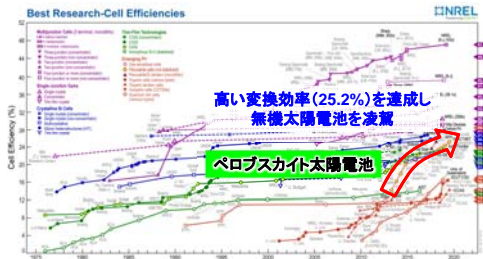
金属ハライドペロブスカイトの結晶成長

宮寺 哲彦¹・山本 晃平¹・阿内 悠人^{2,1}・大橋 昇¹・小金澤 智之³・吉田 郵司¹・近松 真之¹

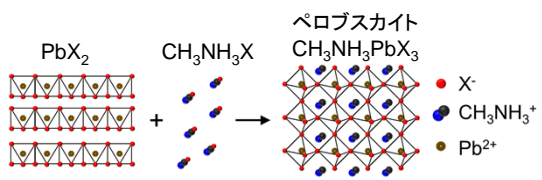
¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター, ²埼玉大学, ³高輝度光科学研究センター

研究背景

ペロブスカイト太陽電池



簡便なプロセス(溶液or真空蒸着)が特徴

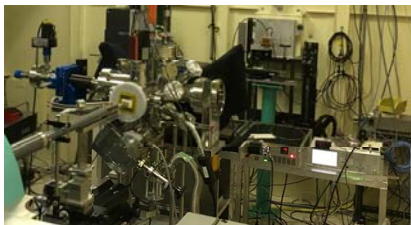


製膜制御および再現性が課題

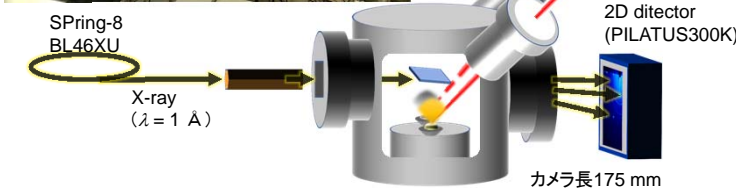
Focus of this study
ペロブスカイト結晶形成過程のリアルタイム解析により結晶化メカニズムを解明

T. Miyadera et al., *Nano Lett.* 15, 5630-5634 (2015).

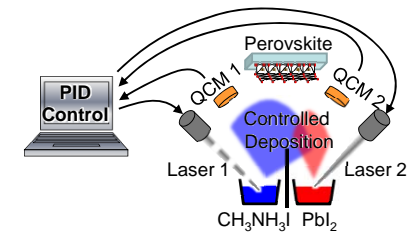
SPring-8長期利用課題(真空蒸着プロセスのリアルタイム観察)



BL46XUにレーザー蒸着チャンパーを持ち込み、成膜過程をリアルタイム観察



レーザー蒸着システム



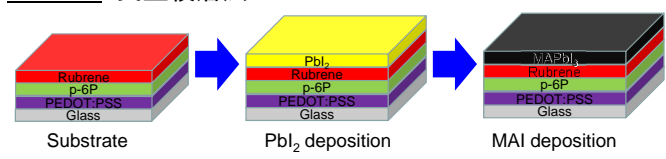
808 nm 半導体 CWレーザー
Power ~ 30 W

有機鉛ペロブスカイトを制御性良く真空蒸着することに成功。共蒸着/交互積層の両方に対応可能。ハッチ外にPCを設置して遠隔操作で成膜制御を行うことが可能。

T. Miyadera et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8, pp 26013-26018.

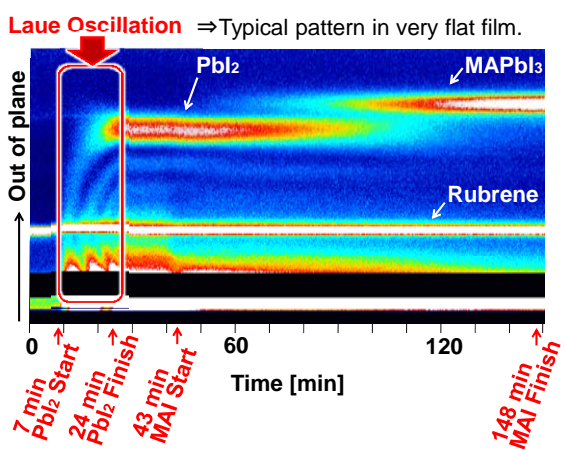
リアルタイム解析

プロセス: 交互積層法



実験条件

Beamline: Spring-8 BL46XU Exposure: 1 s for each frame
X-ray: $\lambda = 1 \text{ \AA}$ Substrate temperature: R. T.
Incident angle: 0.5° Deposition rate: 0.1 $\text{\AA}/s$ (PbI₂)
Detector: PILATUS 300K 0.05 $\text{\AA}/s$ (MAI)

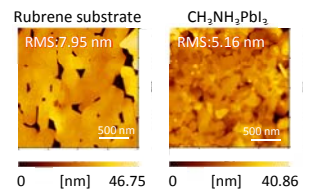


配向制御とモルフォロジー

表面平坦性

- 表面平坦性が高く、c-軸配向したPbI₂ 薄膜
- Laue振動が観察された。
- 生成したペロブスカイト薄膜も[1 1 0] 配向

強く[1 1 0]配向したペロブスカイトが得られた理由は高結晶性基板を用いている事と、成長レートを遅く制御していることに起因すると思われる。



まとめと今後の展望

- 有機鉛ペロブスカイトのレーザー蒸着過程(交互積層法)をリアルタイムGIXD観察
- PbI₂からCH₃NH₃PbI₃が形成されていく様子をとらえることに成功。
- 強く[1 1 0]配向したペロブスカイト結晶が形成された。

今後の展望

様々な材料および条件でのペロブスカイト結晶成長の解析を行う。加熱機構を増設し、温度をパラメータとした実験を行う。真空プロセス/溶液プロセスの両面で当該研究を推進。

謝辞

本研究はSpring-8長期利用課題(2017A0136~2018B0136)に採択されて推進した。また、本研究を推進するにあたり科研費の助成を受けた。関係各位に感謝する。

ペロブスカイト太陽電池における ジチオフェン-ベンゼン共重合体正孔輸送層への P型ドーピング効果

西原 佳彦^{1), 3)}・小野澤 伸子¹⁾・橘 浩昭²⁾・近松 真之¹⁾・吉田 郵司^{1), 3)}

- 1) 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 有機系薄膜チーム
- 2) 産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 メゾスコピック材料グループ
- 3) 筑波大学

研究の背景および目的

研究の背景

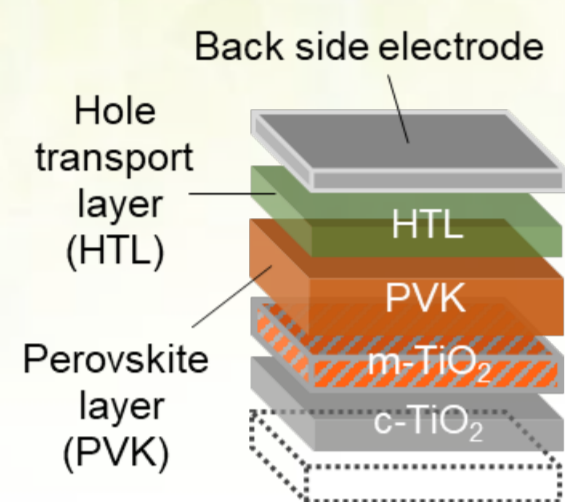


Fig. 1 一般的なメソポーラス型PSCの基本構造。

- ・ペロブスカイト太陽電池 (PSCs) の変換効率 (PCE) は 25.2% まで向上。
- ・PSCs の素子構造の内、正孔輸送層に使われる材料 (HTMs) は、活発な研究分野の一つ
→ 重視されている特性:
 - 1) 大気下での長期安定性。
 - 2) 高い正孔移動度。
 - 3) ペロブスカイト層に対するエネルギー準位の適合性。

代替材料を模索

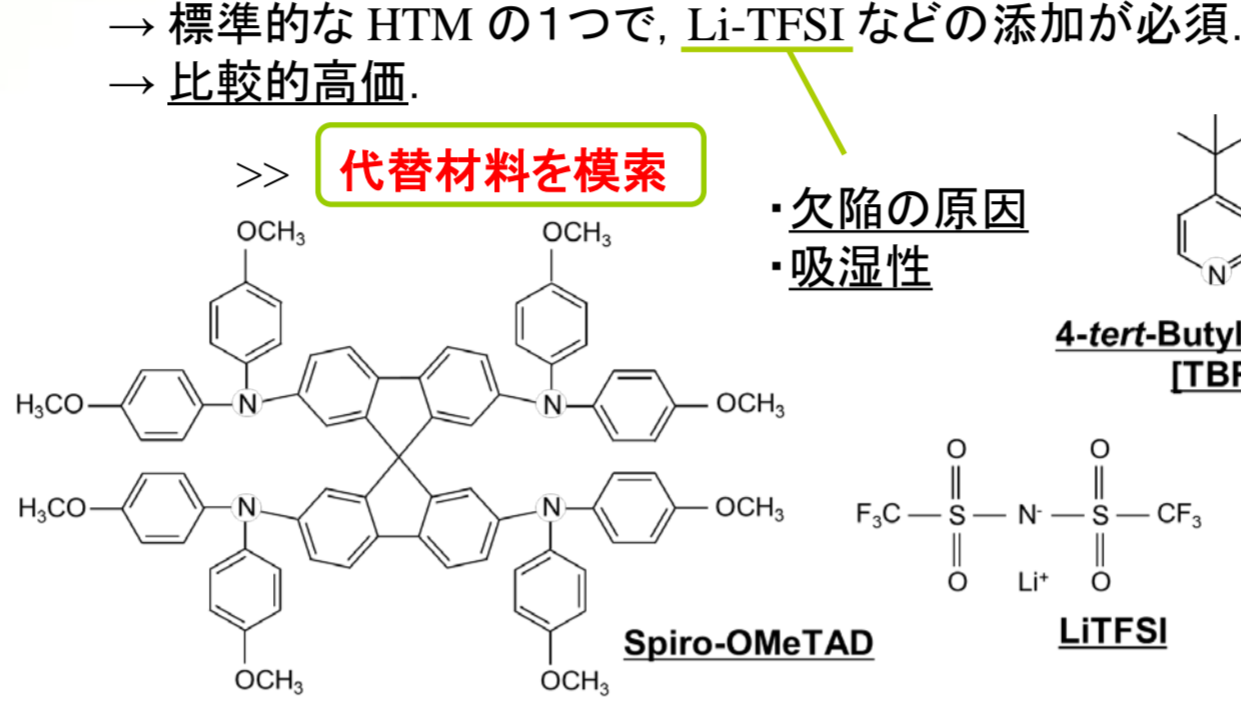


Fig. 2 Spiro-OMeTAD とドーパントの分子構造。

目的

- ・ Stille coupling > High Mw (1.55 × 10⁴)
- ・ Suzuki coupling > Low Mw (4.52 × 10³)

DTB copolymer
→ 安価 高安定性 [1]

ドーピング効果は良く分かっていない。

各分子量の DTB 共重合体で PSC 素子を作製、乾燥大気下保管による酸素ドーピングの効果を検証した。

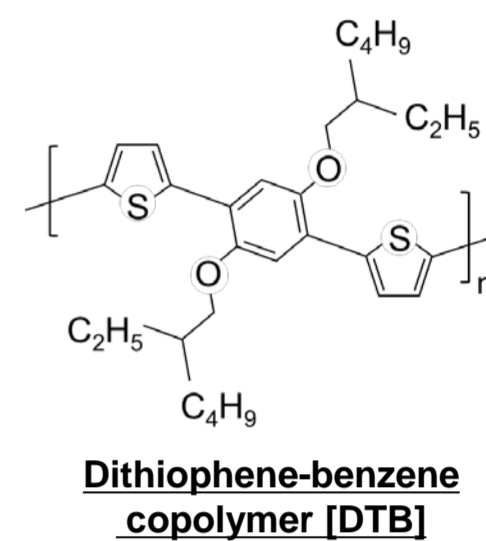


Fig. 3 DTB の分子構造。

実験

素子の作製

- ・ Perovskite および HTM 層の製膜はGB内で実施した。

● グローブボックス内部 ●

内部環境: N₂ 雰囲気下
O₂ < 15 ppm, H₂O < 10 ppm.

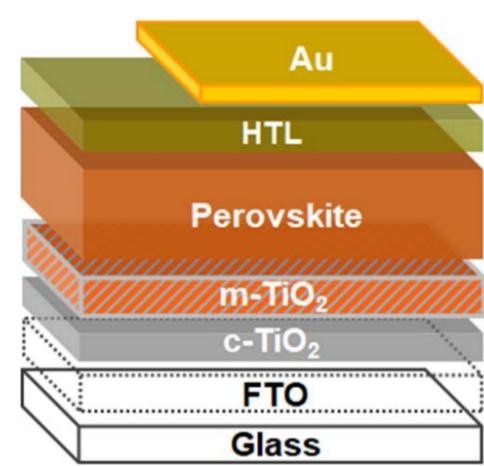


Fig. 4 本研究で作製したPSC素子の構造。

- I. Compact TiO₂ layers (c-TiO₂)
 - ・ スプレー熱分解法。
- II. Mesoporous TiO₂ layers (m-TiO₂)
 - ・ TiO₂ 微粒子の分散溶液をスピコート
→ 電気炉による熱焼成 / 450°C.
- III. Perovskite layers (PVK)
 - ・ PVK 前駆溶液 (溶媒: DMSO+DMF)
[Cs_{0.05}FA_{0.79}MA_{0.16}PbI_{2.52}Br_{0.48}]
→ ペロブスカイト層は、前駆溶液のアンチソルベント法で形成。
- IV. Hole Transporting Layers (HTL)
 - ・ HTM 溶液 (溶媒: Chlorobenzene)
[DTB] (予備加熱: 80°C)
→ スピコート製膜
- V. Au electrodes
 - ・ 真空蒸着。

● デシケータ内部 ●
内部環境: 乾燥大気下
湿度: < 5%RH
内部温度: 20 ~ 25°C

乾燥大気下で保管

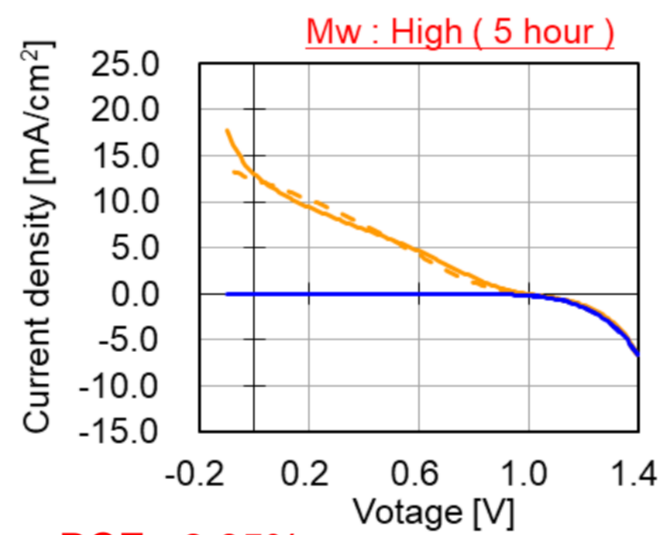
結果

素子の J-V 測定結果

- ・ 高分子量の DTB を使用した場合、大気下に出して 5 h 時点での J-V 特性が顕著に悪い。

酸素ドーピングが不十分

PCE 16.2% を記録



Keeping in dry air

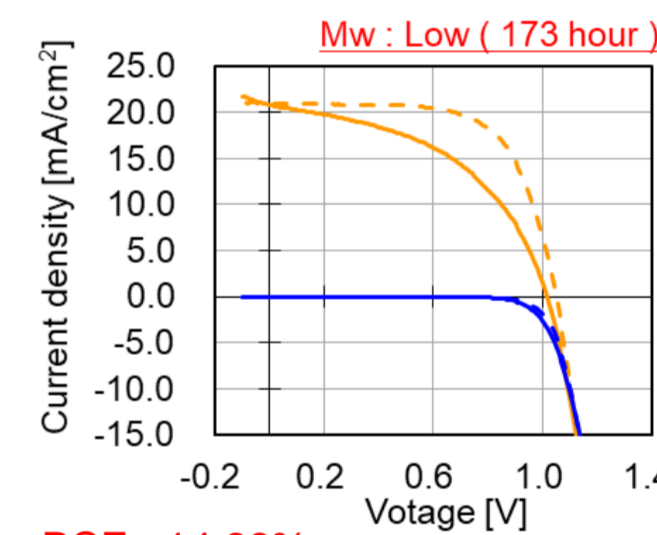
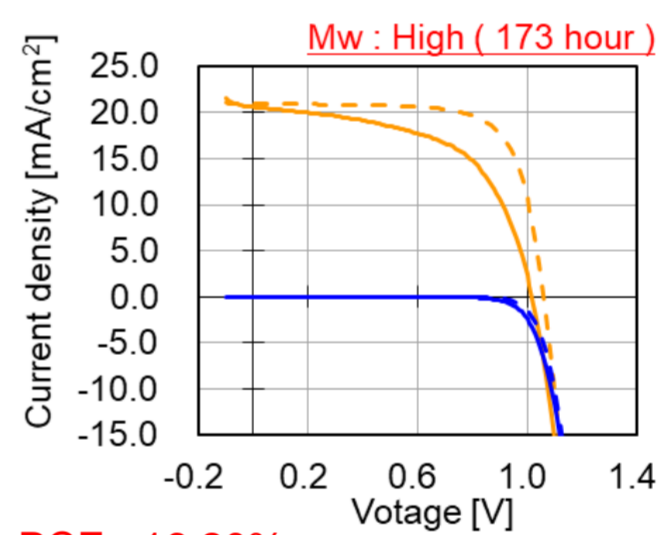


Fig. 5 DTB を HTL として使用した PSCs の J-V 特性。

- ・ DTB の分子量で PCE を比較すると、保管 173 h 時点では高分子量 DTB サンプルの方が高い。一方で、5 h では低分子量 DTB の方が高い。

考察

UV-Vis 測定

- ・ 高分子量 DTB のメインピークが 9 nm 長波長側にシフトしている。また、溶液状態では見られない 540 nm 近辺のピークが高分子量 DTB の方で顕著。

高分子量 DTB の方が凝集性が高い

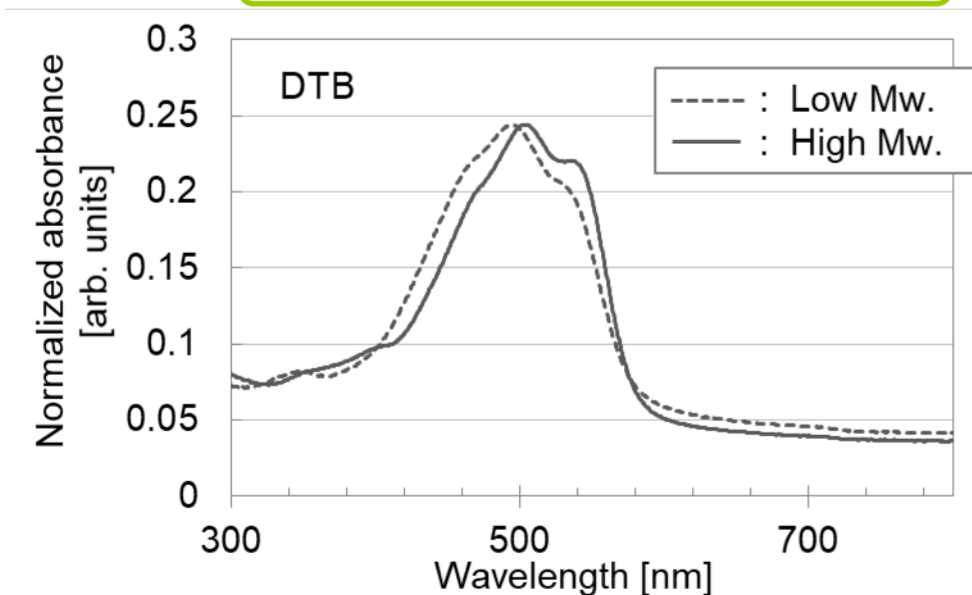


Fig. 6 高分子量および低分子量 DTB 単層膜の UV-Vis 吸光スペクトル。

AFM 観察

- ・ 高分子量 DTB: グレインが強く凝集。
→ 酸素の拡散はゆっくりだが分子秩序性が高い。

PCE に影響

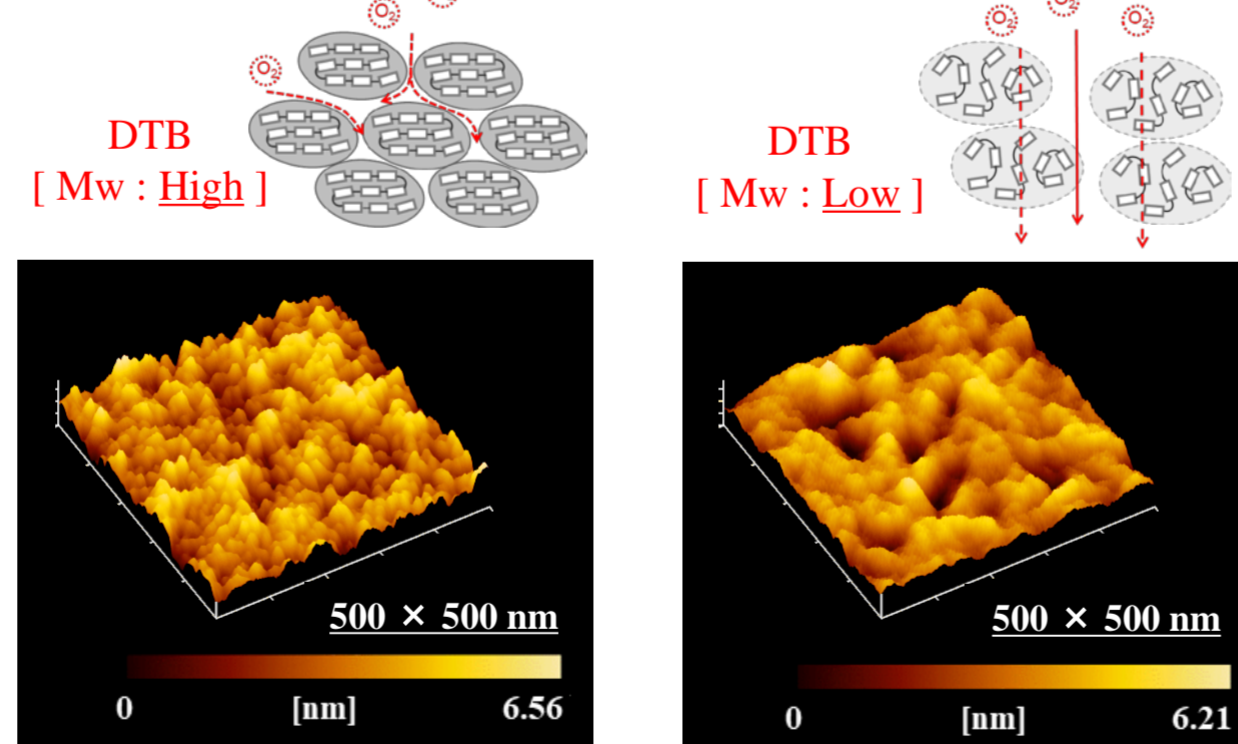


Fig. 7 高分子量および低分子量 DTB 膜表面の AFM 観察画像

低分子量 DTB の場合では逆になる。

BCF 添加

- ・ 新規 P 型ドーパント BCF [2] の添加。
→ 酸素ドーピング併用で 16.89% を記録。

Tris(pentafluorophenyl) borane [BCF]

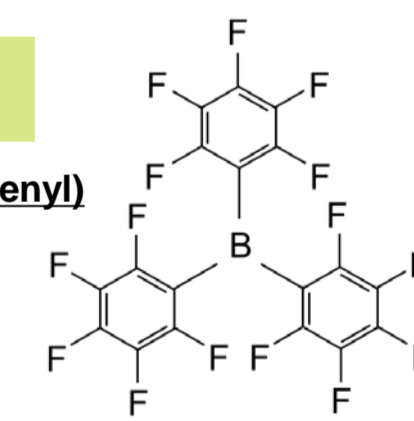


Fig. 8 BCF の分子構造

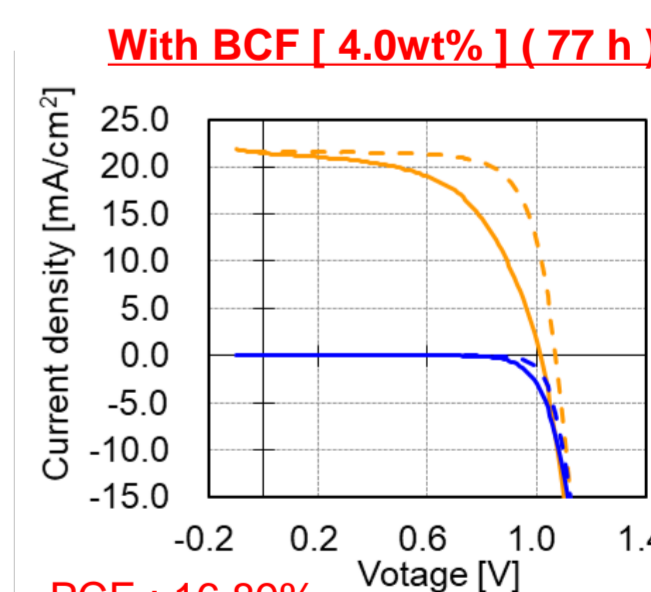
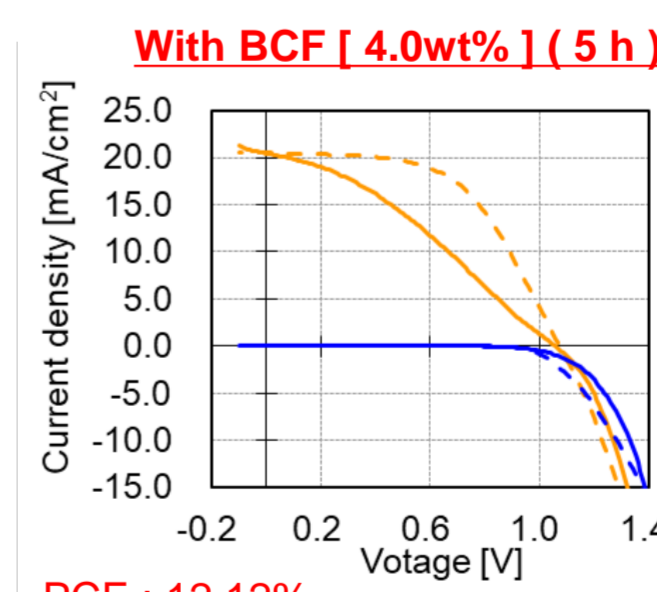


Fig. 9 DTB に BCF を添加した PSCs の J-V 特性

結論

- ・ 高分子量および低分子量の DTB 共重合体を用い、窒素雰囲気下においてメソポーラス型の PSC 素子を作製し評価した。
- ・ 高分子量の DTB を用いた場合、PCE の初期値はかなり低く、3.05% を示した。しかし、乾燥大気下保管による酸素ドーピングにより素子特性は大きく向上し、16.20% を記録した。
- ・ 酸素ドーピングが飽和した後では、その分子秩序性の高さから、高分子量 DTB で作製した素子の方が低分子量 DTB で作製した素子よりも高い PCE を示した。
- ・ BCF をドーパントとして添加した素子の場合、初期の PCE は 12.12% を示し、酸素ドーピングにより 16.89% に向上した。この値が本研究における PCE の最高値である。

参考文献

- [1] L. Zhang *et al.*, Adv. Mater. **30**, 1804028 (2018).
- [2] T. Ye *et al.*, ACS Appl. Mater. Interfaces. **9**, 17923 (2017).

謝辞

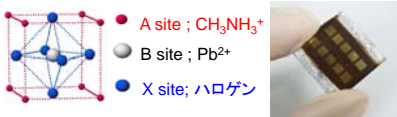
- ・ 本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成により行われた。

高性能太陽電池のためのペロブスカイト結晶後処理法の開発

古郷敦史・宮寺哲彦・近松真之
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 有機系薄膜チーム

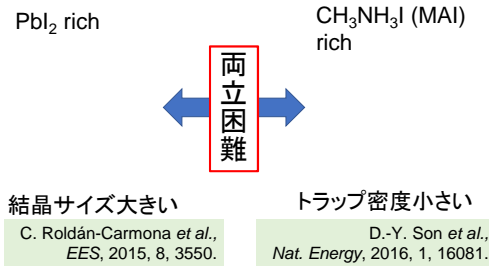
背景

ペロブスカイト太陽電池



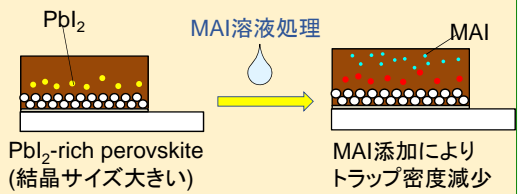
溶液塗布によって作製できる新型太陽電池
エネルギー変換効率25%
低コスト発電の期待

前駆体組成によるペロブスカイト膜特性制御

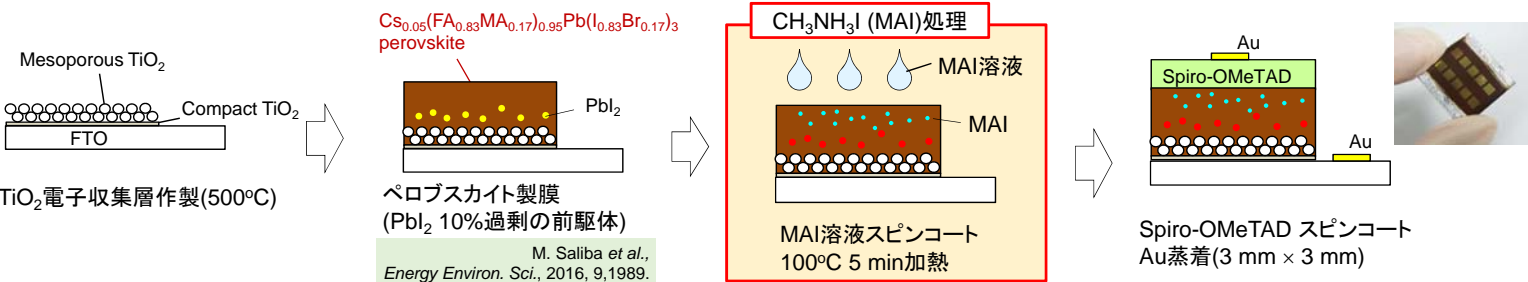


本研究の目的

高結晶、低トラップ密度両方を満たす
ペロブスカイト製膜プロセスの開発

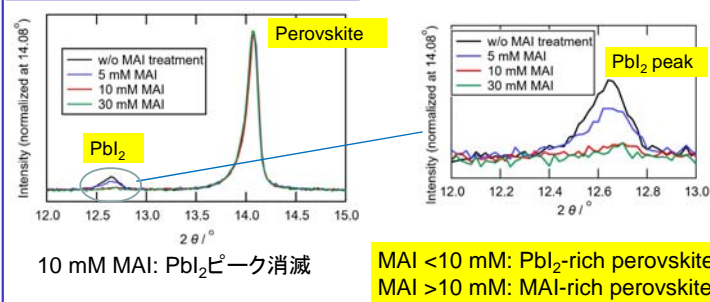


実験

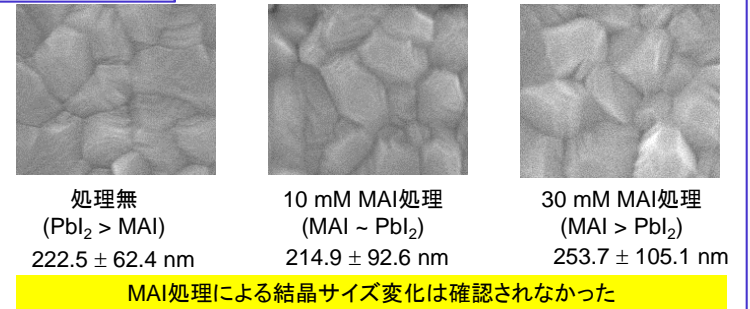


結果と考察

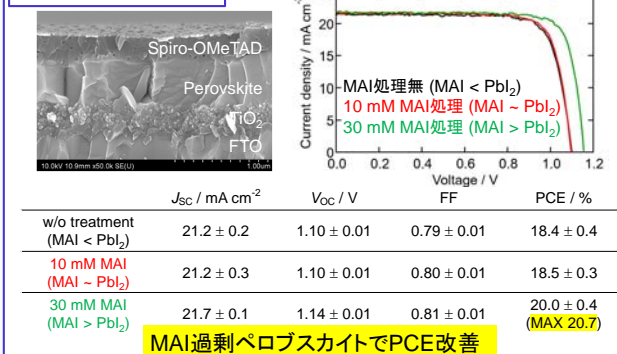
ペロブスカイト内のPbl₂評価 (XRD)



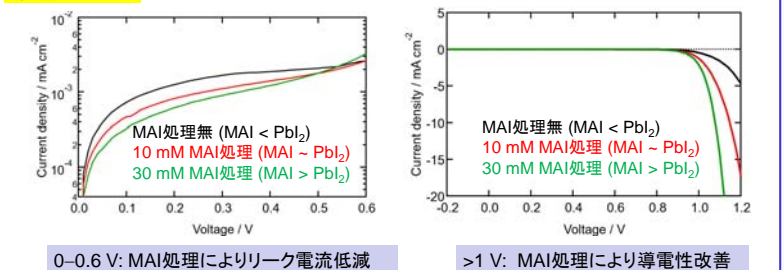
SEM表面観察



発電特性評価



暗電流特性



MAI処理により、トラップが減少、整流性・導電性改善

結論

Pbl₂-richペロブスカイト結晶にMAI処理を行い、高結晶・低トラップペロブスカイト結晶を製膜し、発電効率を改善した。(18.4% → 20.7%)

A. Kogo, T. Miyadera, M. Chikamatsu, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2019, 11, 38683.

謝辞

- ▶ 科研費若手研究「多層ペロブスカイト結晶による高耐久高効率有機無機ハイブリッド太陽電池の開発」(18K14329)
- ▶ NEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」

Pb and Pb-free Perovskite Absorbers Synthesized by Reactive Polyiodide Melt Method Applied to Photovoltaics

Said Kazaoui,¹ Ivan Turkevych,² Alexey Tarasov,³ and Michael Grätzel⁴

- ¹ Research Center for Photovoltaics, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan
- ² Sensing System Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan
- ³ Laboratory of New Materials for Solar Energetics, Lomonosov Moscow State University (MSU), Russia
- ⁴ Institute of Chemical Sciences and Engineering, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland

Introduction

Based on the strategic advantages of “reactive polyiodide melts” method (RPM), which was jointly developed by researchers from AIST, MSU and EPFL published in Nature Nanotechnology [1], we aim at synthesizing low-toxicity Pb-free materials in order to solve the problem of toxic Pb-based Perovskite materials.

Goals

We will describe the “reactive polyiodide melt” method (RPM) and its application to Pb-based Perovskite solar cells (PVs). Then, we will demonstrate that this approach is also suitable to synthesize Pb-free materials with either Perovskite or non-Perovskite crystal structure. Our long-term goal is to fabricate low-toxicity Pb-free PVs.

Pb-based perovskite materials

Concept

1st step Pb film
2nd step MAI film
3rd step RMP method I₂ vapor (Iodization) MAPbI₃ film

3rd step RMP method I₂ vapor (Iodization)
MAI film, Pb film, substrate → MAPbI₃ film

1) Pb and MAI stacked films in stoichiometry ratio were deposited sequentially by vacuum (we are already investigating die-coating, dip-coating, spray... on glass, PET substrate...)
2) Controlled iodization of MAI to form MAI₂ in-situ, which directly converts Pb into MAPbI₃ → fast and complete reaction, which lead to uniform, large grains, pin-holes free films

MAI (~250 nm)
Pb (~60 nm)
FTCO
Glass

Iodization Reaction

MAPbI₃ (~550 nm)
FTCO
Glass

405 nm, 975 nm, 545 nm

time=1 final
Intensity (a.u.)
2theta (degrees)
Intensity (n.u.)

In-situ XRD measurements during conversion of the Pb/MAI stoichiometric bilayer into MAPbI₃ perovskite film.

Pb-based MAPbI₃ and (Cs,FA,MA)PbI₃ perovskite PVs

efficiency 1.7%
efficiency 16%
MAPbI₃ based solar cells

Microcrystalline structure
Planar structure

Deposition of Pb/Cs/MA/MAI layers
Conversion in I₂ vapor
XPS analysis suggests Cs_{0.1}MA_{0.9}Pb_{0.1}

efficiency 16%
efficiency 16%
Planar structure

Efficiency (PCE) (%)
Voc (V)
Jsc (mA/cm²)
FF (%)
Hysteresis ratio H(hv) = (Jsc,0.01V - Jsc,0.95V) / Jsc,0.01V

Distribution of performance parameters for planar (P1, P2, P3) and mesoporous (M1, M2) solar cell devices with MAPbI₃ (P1, M1, P2, M2) and Cs_{0.1}MA_{0.9}FA_{0.9}Pb_{0.1} (P3) absorber layers. Solar cells' area is 2x2=4 mm²

Pb-free perovskite and non-perovskite materials

Towards the discovery and the synthesis of low-toxicity Pb-free materials

- Synthesis of low-toxicity Pb-free materials
 $X + MAI + I_2 \rightarrow MAXI_3$ or non-Perovskite
where X is an element of the periodic table or alloys
- Selection criteria:
Direct optical band gap ~1.5eV
High electron and hole mobility ~10 cm²(V.s)
Low electron and hole effective mass
Stable 3-dimensional Crystal structure
- Source of information:
Material databases
Theoretical calculations

Extending our concept to various metals

1st step Metal film (such as Bi)
2nd step MAI film
3rd step RMP method I₂ vapor (Iodization) film

Bi/3MAI + 3I₂ → MA₃BiI₉ {0D}

XRD
Counts
2θ (°)

— RPM process
— Solvent process

Conclusions

We have demonstrated that “reactive polyiodide melt” method (RPM) is suitable:

- To fabricate of Pb-based Perovskite solar cells with efficiency as high as 17%
- To synthesize Bi-based materials and to explore a wide range of Pb-free materials

Our long-term goal is to discover, synthesize and fabricate low-toxicity Pb-free PVs.

References and Acknowledgements

References:
[1] “Strategic advantages of reactive polyiodide melts for scalable perovskite photovoltaics” I. Turkevych, S. Kazaoui, N. A. Belich, A. Y. Grishko, S. A. Fateev, A. A. Petrov, T. Urano, S. Aramaki, S. Kosar, M. Kondo, E. A. Goodilin, M. Grätzel, A. B. Tarasov Nature Nanotechnology 14, 57-63 (2019).

Grant:
KAKANHI (科研費19K05683), “Innovative reactive polyiodide melt method to fabricate lead-free Perovskite absorber layers and solar cells”, PI: S. Kazaoui (AIST)



フルオロアルキルアミンのハロゲン化水素酸塩を添加剤として用いたペロブスカイト太陽電池

小野澤 伸子¹、船木 敬¹、村上 拓郎¹、古郷 敦史¹ KAZAOUI Said¹、近松 真之¹、菅野 久²
¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 有機系薄膜チーム、²株式会社クレハ

Introduction

ペロブスカイト型太陽電池

ペロブスカイトの一般的な組成

ABX₃
 A = CH₃NH₃⁺, HC(NH₃)₂⁺, Cs⁺
 B = Pb²⁺, Sn²⁺
 X = I, Br, Cl

報告例: 2,2,2-trifluoroethyl ammonium iodide (FEAI) 安定性の向上 (D. Bi, P. Gao et al., Adv. Mater., 28, 2910 (2016))

今回の研究: 2,2,2-trifluoroethyl ammonium Bromide (FEABr) CF3CH2NH3Br

変換効率はこの数年で急激に伸びている。塗布プロセスで実用可能。低コストかつ高効率な新しい太陽電池として大きな期待。安定性については課題あり。

Cell fabrication by 1step (anti solvent) method

PbI₂ + MAI + FEABr or FEAI (3 mol% or 8 mol%) solution in DMF/DMSO

Anti solvent (chlorobenzene)

MAPbI₃

m-TiO₂, c-TiO₂, FTO

HTL, Au

spiro-OMeTAD

Annealing at 120°C for 10 min

Vacuum evaporation

Photovoltaic performance

Table 1 Photovoltaic parameters of perovskite solar cells (PSCs) with perovskite containing 3 mol% and 8 mol% of FEABr (a) or FEAI (b) vs PbI₂ as an additive in the precursor solution.^a

(a) FEABr		J _{sc} ^b (mA/cm ²)	V _{oc} ^c (V)	FF ^d	PCE ^e (%)
		0%	average 21.1±0.2	1.05±0.01	0.73±0.01
	maximum	21.5	1.05	0.73	16.7
3 mol%	average	20.4±0.4	1.06±0.01	0.71±0.01	15.2±0.2
	maximum	20.8	1.06	0.71	15.7
8 mol%	average	18.4±0.7	0.99±0.02	0.68±0.02	12.4±0.5
	maximum	18.8	1.01	0.7	13.2

(b) FEAI		J _{sc} ^b (mA/cm ²)	V _{oc} ^c (V)	FF ^d	PCE ^e (%)
		0%	average 20.1±0.5	1.07±0.01	0.77±0.02
	maximum	20.2	1.08	0.79	17.1
3 mol%	average	19.1±0.7	1.02±0.01	0.73±0.01	14.2±0.8
	maximum	20.3	1.04	0.75	15.8
8 mol%	average	17.6±1.1	0.95±0.01	0.75±0.02	12.5±0.7
	maximum	19.3	0.97	0.73	13.6

^aThese values are from backward scans and are the average of 9 solar cells. ^bShort-circuit photocurrent density. ^cOpen-circuit voltage. ^dFill factor. ^ePower conversion efficiency.

Fig. 1 SIMS profile of the perovskite film with FEABr 3 mol% as an additive.

Stability

Table 2 Photovoltaic parameters of PSCs with perovskite (a) and perovskite containing 3 mol% of FEABr (b) and 3 mol% of FEAI (c) as an additive. The data were obtained after exposure of 20% relative humidity (RH) air.

(a)		J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF	PCE (%)
		1 day	average 19.6±0.5	1.03±0.01	0.75±0.02
	maximum	20.4	1.04	0.76	16.3
60 days	average	5.0±2.3	0.97±0.04	0.68±0.03	3.4±1.3
	maximum	7.5	1.00	0.71	5.3

(b)		J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF	PCE (%)
		1 day	average 19.4±0.3	1.03±0.01	0.70±0.02
	maximum	19.3	1.04	0.72	14.4
60 days	average	12.2±1.0	0.99±0.01	0.88±0.04	10.6±0.6
	maximum	13.3	0.99	0.88	11.6

(c)		J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF	PCE (%)
		1 day	average 17.9±1.0	0.96±0.01	0.69±0.03
	maximum	18.6	0.96	0.68	12.2
60 days	average	8.8±1.2	0.95±0.01	0.72±0.06	6.0±0.9
	maximum	10.0	0.95	0.77	7.3

^aThese values are from backward scans and are the average of 9 solar cells.

Fig. 2 J-V characteristics of the best-performed PSCs measured under AM 1.5G solar irradiance (100 mW/cm²).

Fig. 3 Photographs of the PSCs after storing 60 days in the 20% RH air.

XRD spectra

Fig. 4 XRD patterns of the PSCs of blank (a), FEABr 3 mol% (b) and FEAI 3 mol% (c) as an additive, which were exposed to 20% RH air.

Summary

- フルオロアルキルアミンのハロゲン化水素酸塩 (FEABr, FEAI) を、ペロブスカイトの前駆体溶液の添加剤として用いたペロブスカイト太陽電池を作製することができた。
- PbI₂ に対して 3 mol% の FEABr を添加して作製したペロブスカイト層は、XRD スペクトルの結果から 60 日後 (室温下、湿度 20%) でも劣化が少ないことがわかった。
- フルオロアルキルアミン臭化水素酸塩 (FEABr) を添加剤として用いたセルの方が、ヨウ化水素酸塩 (FEAI) を用いた場合よりも安定であることがわかった。

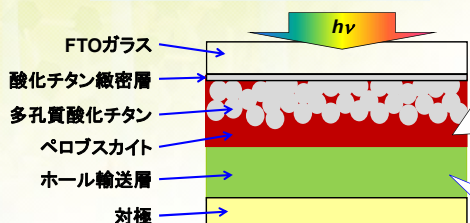
トリフェニルベンゼン骨格を持つ 芳香族アミン誘導体を用いたペロブスカイト太陽電池

船木 敬・小野澤 伸子・村上 拓郎・近松 真之
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 有機系薄膜チーム

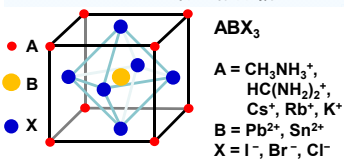
研究の目的

ペロブスカイト太陽電池の高効率・高耐久化を目指し、新規材料の開発を行っている

ペロブスカイト太陽電池の模式図



ペロブスカイト層の結晶構造

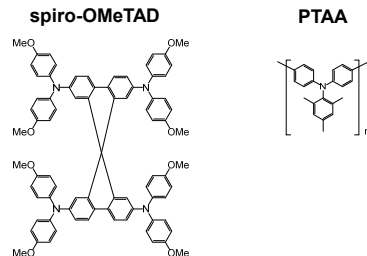


高性能化のための新規ホール輸送材料の開発が求められている

ペロブスカイト太陽電池

- アルキルアンモニウム鉛系ペロブスカイト材料を光吸収層に用いる太陽電池
- ここ数年で光電変換効率が大幅に向上し、実用太陽電池並みの高い変換効率を達成
- 信頼性に関しては、まだ多くの課題が残っている

ホール輸送材料の代表例

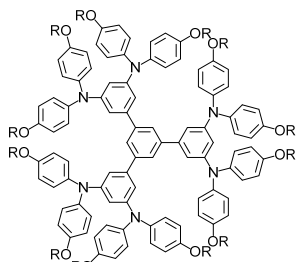


有機ホール輸送材料の課題

- 伝導性が低い
- コストが高い
- 伝導性を向上するために添加剤が必要 (Li塩、塩基、Co錯体など)
- 光、水、酸素、熱に対する安定性が不明

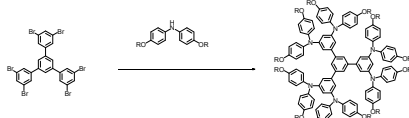
本研究で合成したホール輸送材料

芳香族アミン部分を分子内に6個持つ円盤状の化合物

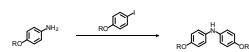


- R = CH₃ (OMe)
- R = C₃H₇ (OPr)
- R = C₆H₁₃ (OHex)

合成



2、及び3の場合

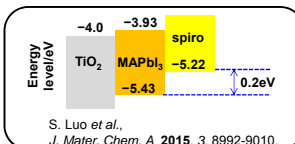


置換基にメキシ基を持つ化合物1は、原料に市販の試薬を用いて一段の反応で合成できた

E_{HOMO}の比較

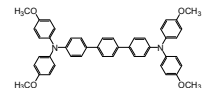
材料	E _{ox} / V vs. Fc	E _{HOMO} / eV
spiro-OMeTAD	0.14	-4.94
比較1	0.24	-5.04
比較2	0.47	-5.27
1	0.51	-5.31
2	0.55	-5.35
3	0.68	-5.48

$$E_{\text{HOMO}} = -4.8 - E_{\text{ox}}$$



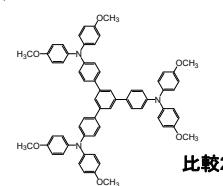
S. Luo et al., J. Mater. Chem. A 2015, 3, 8992-9010.

比較物質



比較1

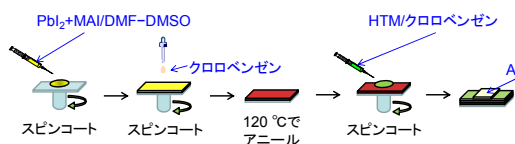
J. Wu et al., RSC Adv. 2017, 7, 45478-45483.



比較2

太陽電池特性の評価

太陽電池の作製方法



HTM溶液中の材料のモル比

- spiro-OMeTAD : LiTFSI : TBP = 1.5 : 1 : 4
- 化合物1-3 : LiTFSI : TBP = 1 : 1 : 4
- 比較物質 : LiTFSI : TBP = 1 : 1 : 4



基板 : 1.5 cm x 1.5 cm
Active area : 0.119 cm²

太陽電池特性

材料	濃度 / mM	J _{sc} / mA cm ⁻²	V _{oc} / V	FF	PCE / %
spiro-OMeTAD	70	19.6 ± 0.9	1.05 ± 0.01	0.77 ± 0.02	15.7 ± 0.5
spiro-OMeTAD	23	18.7 ± 1.3	1.01 ± 0.01	0.80 ± 0.05	15.1 ± 0.2
比較1	25	10.5 ± 0.8	0.92 ± 0.01	0.77 ± 0.03	7.4 ± 0.5
比較2	25	16.0 ± 1.2	1.02 ± 0.01	0.86 ± 0.05	14.0 ± 0.8
1	25	19.8 ± 1.1	1.02 ± 0.02	0.76 ± 0.06	15.3 ± 0.6
2	25	19.8 ± 0.4	1.01 ± 0.01	0.67 ± 0.01	13.4 ± 0.2
3	25	6.9 ± 0.5	0.92 ± 0.04	0.42 ± 0.03	2.7 ± 0.3

- 置換基にメキシ基を持つ化合物1はspiro-OMeTADとほぼ同等の光電変換効率が得られた
- 分子内の芳香族アミンの数や置換基の種類が光電変換効率に大きな影響を与えることがわかった

結論

- トリフェニルベンゼン骨格を持つ芳香族アミン誘導体を3種合成し、ホール輸送材料としての機能を評価した
- 置換基にメキシ基を持つ化合物1は、原料に市販の試薬を用いて一段の反応で合成でき、spiro-OMeTADとほぼ同等の変換効率が得られた
- 中心骨格だけでなく分子内の芳香族アミンの数や置換基の種類が光電変換効率に大きな影響を与えることがわかった
- 今後、材料の構造最適化と電池作製条件の最適化を検討する予定である
- 本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施されたものである

MPPTによるペロブスカイト太陽電池の性能評価

志村 陽哉・上田 孝・杉本 和則・吉田 正裕
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 評価・標準チーム

研究の目的

- 太陽電池性能評価の主要な目的はSTC*における定常状態でのI-V特性、発電パラメータ(最大電力 P_m 、変換効率 η など)を決定することにある。しかし、ペロブスカイト太陽電池(PSC)の性能評価においては、非常に遅い応答に起因するヒステリシスと光照射で進行する不可逆的な特性変化(劣化)が従来の方法による P_m 測定を困難にしている[1,2]。
- 現在IECではPSCの性能評価手順の標準化に向けた活動が進められている[3]。
- 特性変化を生じさせる可能性がある光照射時間を最小にし、最大電力動作点(MPP)における電力を応答時間に対して十分な時間をかけて測定するために、従来の手順である通常のI-V測定に加え最大電力動作点追従法(MPPT)による P_m 測定を実施している。
- PSCのバイアス状態の変化に対する応答を調べ、適切なMPPT条件を検討した。

*STC (Standard Test Conditions): 分光放射照度AM1.5G基準太陽光スペクトル(放射照度1 kW/m²)、セル温度25°Cの試験条件

PSCのヒステリシス、過渡応答

- ヒステリシスがあるため、応答に対して十分に長い時間掃引する必要があるが、測定が長時間であるほど特性変化の影響が無視できなくなる。
- バイアス電圧を変更した際、定常状態に達するまでの時間は電圧に依存する。

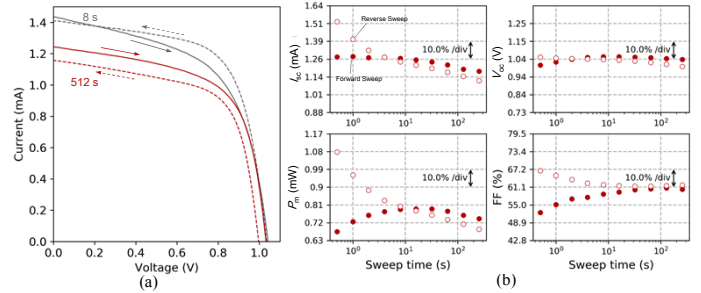


図1 I-V測定値の掃引時間依存性: (a)掃引時間8s及び512sにおけるI-V測定結果、(b)同サンプルにおけるI-Vパラメータの掃引時間依存性(時間小→大の順番に測定。特性の変化を含む。)塗りつぶされた印は順方向掃引、白抜きの印は逆方向掃引を示す。I-V測定開始直前のバイアス電圧は V_{pm} の近傍であり、掃引開始電圧で1sの待ち時間をとった。

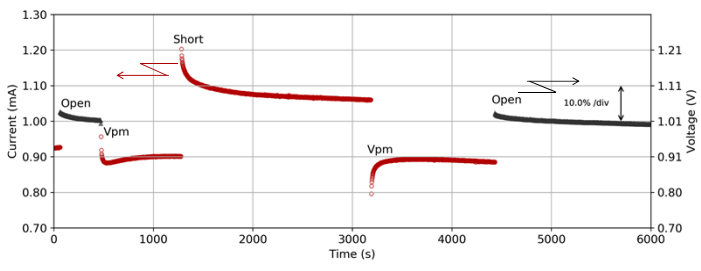


図2 バイアス状態変更直後の電流、電圧の応答: 安定に要する時間は数100~数1000s。

結論

- PSC性能評価において、特性変化の可能性と長い応答時間を考慮すると、MPPTによる P_m 測定は従来の測定方法(定速I-V)に比べ定常状態における P_m を決定するのに適している。
- サンプルの特性と動作パラメータの組み合わせによりMPPTの軌跡に発振が生じることがある。適切な動作パラメータをサンプル毎に確認する必要がある。

参考文献

[1] H. J. Snaith *et al.*, The Journal of Physical Chemistry Letters 5, 9, 1511-1515, 2014.
[2] K. Domanski *et al.*, Nature Energy 3, 61-67, 2018.
[3] IEC TR 63228:2019.
[4] T. Esram, P. Chapman, IEEE Transactions on Energy Conversion 22, 2, 439-449, 2007.

MPPTの動作

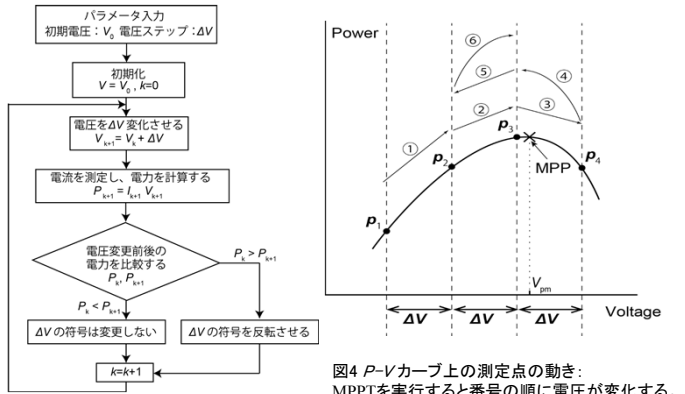


図3 MPPTのフロー: 山登り法(HC)[4]による。初期電圧は事前のI-V測定から決定する。電圧ステップ ΔV は V_{oc} の0.5%~1.5%。図4 P-Vカーブ上の測定点の動き: MPPTを実行すると番号の順に電圧が変化する。安定なI-Vカーブ上では範囲内に V_{pm} を含む3点(p_2, p_3, p_4)を往復する。電圧が V_{pm} と一致しないことによる P_m の誤差は通常~0.1%以下。

測定結果

- MPPTにより、準定常状態における P_m を直接測定できる。

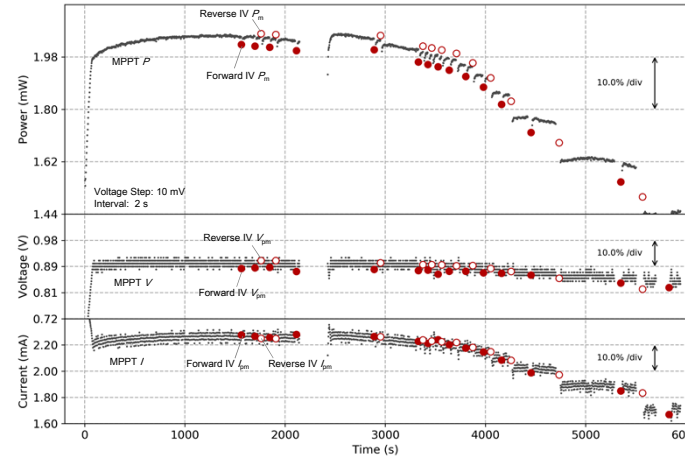


図5 MPPT&I-V測定結果の例: 図中黒点はMPPT測定結果、赤丸印はI-V測定結果(P_m, V_{pm}, I_{pm})を示す。塗りつぶされた印は順方向掃引、白抜きの印は逆方向掃引。0sで光照射、MPPTを同時に開始。2100~2400sの間暗状態。I-V測定条件は1000~3000sまで掃引前待ち時間1s、掃引時間10s。3000s以降は掃引時間を10sに固定し、掃引前待ち時間を0~128sの範囲で増加させた。掃引前待ち時間を長くした際に逆方向掃引を行うとMPPTの電力が不連続に減少しており、 V_{oc} 近傍でバイアス電圧を長時間保持することと劣化との関係[2]を示唆していると考えられる。

- MPPTにおいて発振が生じる場合がある。適切な動作パラメータ(ステップ電圧、ディレイ時間、積分時間)をサンプル毎に確認する必要がある。

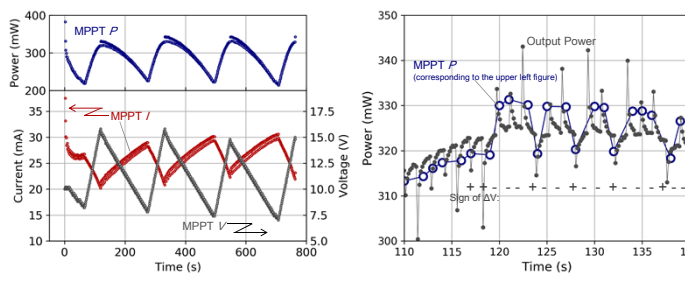


図6 MPPT実行中に発振が生じた例: 左図下段はMPPTにおける電流及び電圧、上段は電力。右図は同データの拡大で、青丸が左図上段のデータに対応する。灰色の点は同時に別の測定器で短い間隔で測定した電力。ステップ間で電圧が増加する際に電流がアンダーシュートし、減少するとオーバーシュートする。結果として前ステップとの電力測定値の比較においてP-Vカーブのスロープが反映されず発振につながる。

高移動度透明導電膜

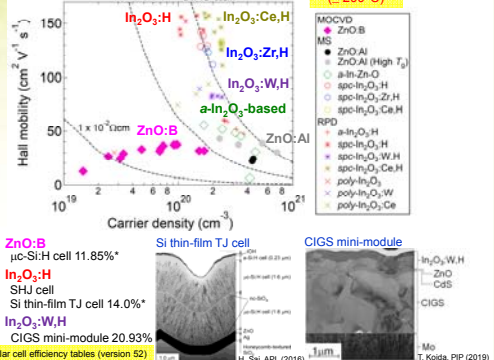
鯉田 崇

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 化合物薄膜チーム

はじめに

高い電子移動度を持つ透明導電性酸化物(TCO)薄膜は、導電率を向上させるだけでなく、自由キャリア吸収を減らすことが出来るため、多接合型太陽電池や表面照射型近赤外イメージセンサーなど、近赤外域(800-1700 nm)にも感度を持つデバイスの実現を可能にする。これまで、様々な物理蒸着法を用いてTCO薄膜の研究を行い、その中で、ITOより高移動度なIn₂O₃:Zr薄膜や200°C以下のプロセス温度で更に高移動度な固相結晶化In₂O₃:HとIn₂O₃:Me,H (Me: Zr, W, Ce)薄膜などを見出してきた。そして、過去の成果報告会でも紹介してきたように、Siヘテロ接合型太陽電池、Si系薄膜太陽電池、CIGSミニモジュールの窓電極に適用し、高移動度TCO薄膜の効果を電池性能で示してきた。今回は、これら低温製造多結晶TCO薄膜の特性を、バルクや高温成長エピタキシャル薄膜と比較しながら紹介する。

開発してきた透明導電膜



低温プロセス (≦ 200°C)

まとめ

低温製造(≦ 200°C)In₂O₃:Me,H固相結晶化薄膜は、高温成長In₂O₃:Meエピタキシャル薄膜よりも高移動度

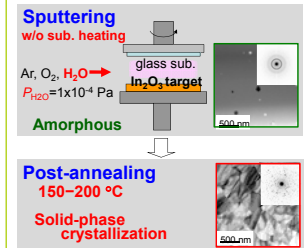
- 非加熱製膜+固相結晶化により、水素を含む高い結晶性を実現
- 水素はドナー不純物として働く。同時に、粒界および粒内の格子欠陥を不活性化させる。
- CeとZrは、水素の有無に関わらず、ドナー不純物として働く。

面内圧縮応力により、高いDH安定性を実現

- 面内圧縮応力をもつ多結晶膜は、DHテストに対して安定
- この多結晶薄膜は、高温アニールにより高移動度化が可能。適用するデバイスによっては有用な窓電極となり得る。
- 高温の水素を含む低歪・固相結晶化膜は、DHテストにおいて、Hall移動度の劣化を示す。
- ポストアニール時に、水分子が通る程度の空隙が粒界に形成され、DHテスト環境下において、ガス分子がその空隙に吸着し、電子にとってのポテンシャル障壁を形成していると考えられる。

水素ドーピングと固相結晶化プロセス

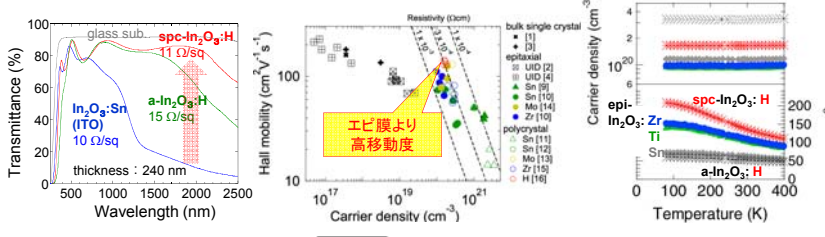
製造方法



	ITO ¹⁾	a-In ₂ O ₃ :H ²⁾	spc-In ₂ O ₃ :H ²⁾
ρ (Ωcm)	2.4x10 ⁻⁴	3.7x10 ⁻⁴	2.7x10 ⁻⁴
μ (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	29	56	130
N (cm ⁻³)	9.1x10 ²⁰	3.0x10 ²⁰	1.3x10 ²⁰

¹⁾ SnO₂ 10 wt. %
²⁾ H ~ 3 at. %

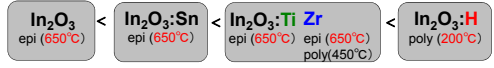
電気特性(バルク、エピタキシャル薄膜、多結晶薄膜)



Phys. Status Solidi A 214, 1600464 (2017).

Me-O bond Dissociation energy (kJ/mol)	Ion radius (C.N. 6) (pm)				
	3+	4+	5+	6+	
In 360	80.0				5s ² 5p
Sn 548		69.0			5s ² 5p ²
Mo 607		65.0	61.0	59.0	4d ⁵ 5s
W 653		66.0	62.0	60.0	5d ⁴ 6s ²
Ti 662		67.0	60.5		3d ⁴ 4s ²
Zr 760		72.0			4d ² 5s ²
Ce 795		101	87.0		4f ⁶ 5s ²

酸素空孔生成を抑制
不純物ドーパント周りの格子歪を抑制
遷移金属のd軌道間遷移(吸収)を抑制

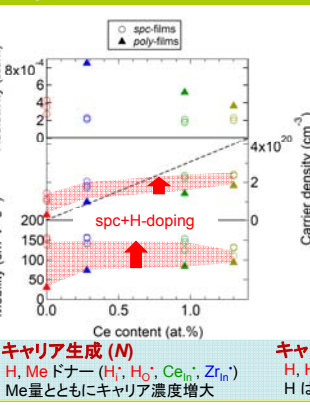
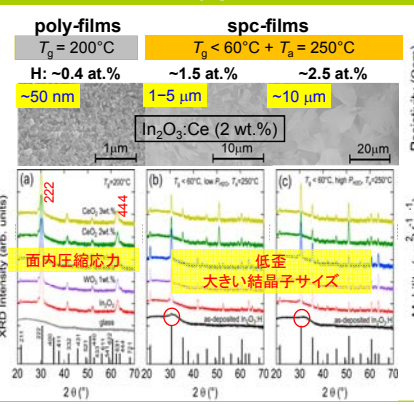
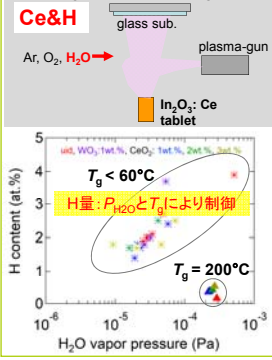


酸素空孔生成を抑制 < 強いMe-O結合エネルギー + 高結晶性 & 無歪 HIによる欠陥不活性化 ⇒ 緩和時間(τ)の増大 (< 分光エリプソメトリー)

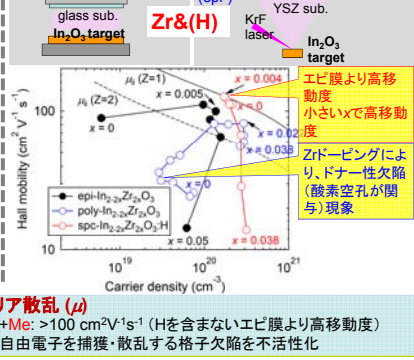
不純物として金属と水素の同時ドーピング (spc-In₂O₃:Me,H 薄膜)

Phys. Status Solidi A 215, 1700506 (2018).
WO 2008/146693 A1

Reactive plasma deposition (ion plating with dc arc discharge)

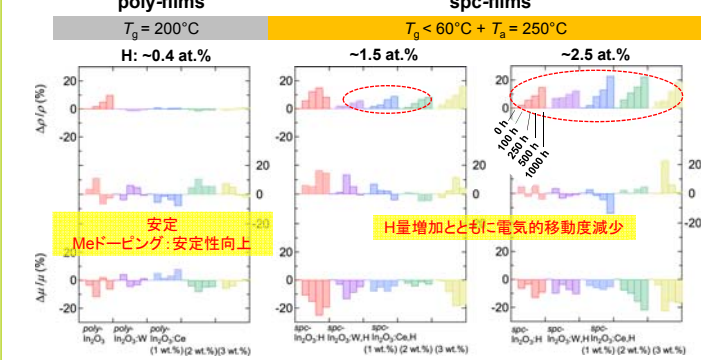


Sputtering (poly-, spc-) Pulse laser deposition (epi-)



恒温恒湿下 (85°C, 85RH%)での安定性

Hall測定による結果



他の評価手法による結果

分光エリプソメトリー
全ての薄膜においてDHテスト前後で光学的移動度の変化なし
→ Hall移動度の減少は粒界での散乱による

X線回折
低歪の固相結晶化膜においてHall移動度減少

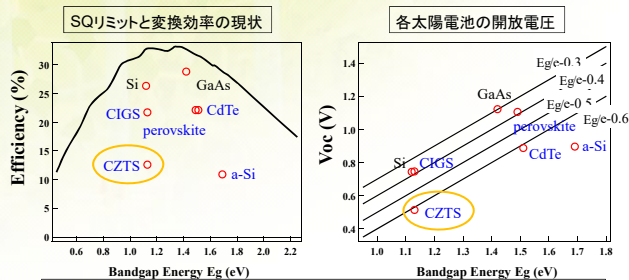
昇温脱離分析装置
固相結晶化膜からH₂Oガス放出
→ 粒界での空隙形成を示唆(水分子が通る程度のサイズ)

Hを多く含む固相結晶化膜のHall移動度の劣化は、DHテスト時にガス分子が粒界の空隙に吸着し、電子にとってポテンシャル障壁を形成したため。安定な固相結晶化薄膜を実現するには、①a-SiO_xやa-SiN_x:Hなどの誘電体バリア膜との積層構造、②面内圧縮応力を持たせることなどが考えられる。

CZTSe太陽電池のSe供給依存性

反保衆志・金信浩・永井武彦・柴田肇
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 化合物薄膜チーム

研究の目的



【これまでの代表的なVoc向上の取り組み】
 吸収層の品質向上:
 アルカリドーピング H. Tampo et al., JAP 122 (2017) 023106.
 Ge混晶化 S. Kim et al., APEX 9 (2016) 102301.
 界面の品質向上:
 表面処理 H. Tampo et al., ACS Appl. Mat. Int. 11 (2019) 13319.

実験

製膜法: MBE法

熱処理方法

Sample $\text{Se}+\text{SnSe}_2$

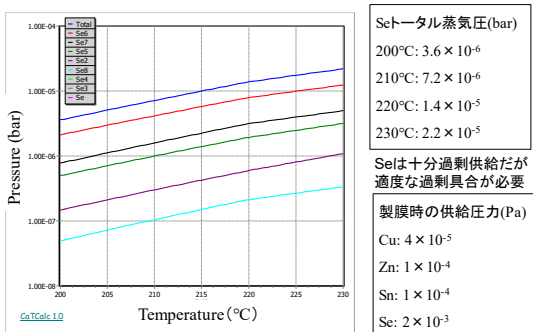
T1 (550°C) T2 (360-400°C)

デバイス構造

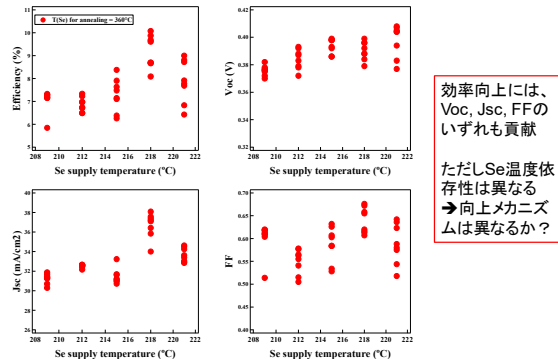
Cu Zn Sn NaF, KF Se 200-220°C Mo

結果と考察

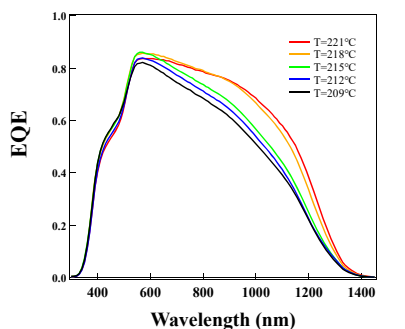
本研究の結論: 製膜時のSe供給がシビアにPV特定に影響



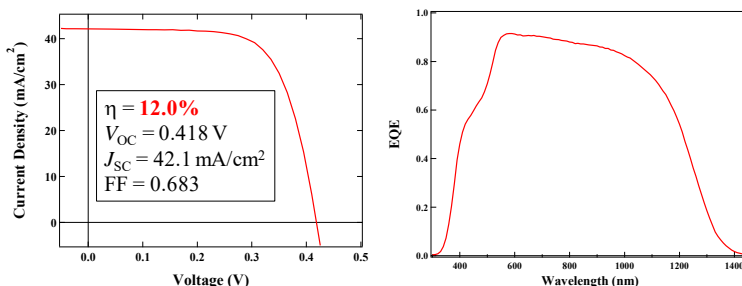
Se供給量がPV特定に与える影響



結果と考察



$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ 太陽電池で最も高い変換効率(12.0%)



結論

- Se供給のPV特性に与える影響について調査を行い、製膜時のSe供給が変換効率に大きな影響を与えることを明らかにした。
- Se供給の最適化により世界最高効率の12.0%のCZTSe太陽電池の作製に成功した。
- 開放電圧の違いによる大きな物性値の変化については、今後さらに評価する必要がある。

参考文献

- (アルカリドーピング)
- H. Tampo *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. (in press).
 - H. Tampo *et al.*, J. Appl. Phys. **122** (2017) 023106.
- (表面処理)
- H. Tampo *et al.*, ACS Appl. Mat. Int. **11** (2019) 13319.

CdS/CZTGSeへテロ接合型太陽電池の高性能化に向けた電子状態評価に関する研究

永井 武彦¹・反保 衆志¹・Kim Shinho¹・柴田 肇¹・仁木 栄²・寺田 教男³

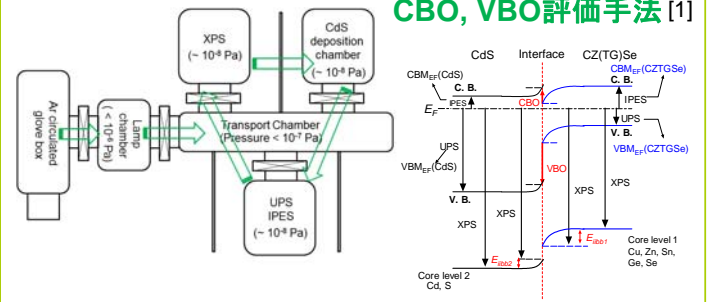
- ¹ 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 化合物薄膜チーム
- ² 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター
- ³ 鹿児島大学 大学院理工学研究科

研究の目的

内閣府より2050年における温室効果ガス排出を2013年度比で80%削減するNESTI2050が策定された。この実現のためには、再生可能エネルギーの大量導入が不可欠であり、太陽電池はその主要電源として期待されている。今後到来するであろう太陽電池の大量導入時代においては、長期信頼性に優れ、高効率で安価であるといった条件のみならず、低環境負荷の条件も望まれる事となる。

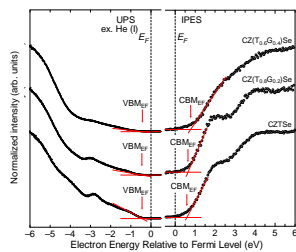
本研究は、これら全ての条件を満たす材料からなるケステライト結晶構造を有するCu₂Zn(Sn_{1-x}Ge_x)Se₄ (以下CZTGSeという)を光吸収層とした太陽電池におけるCdS/CZTGSeへテロ界面の電子状態を評価し、更なるケステライト系太陽電池の高効率化に資する基礎的知見の収集を行う事を目的とする。

実験



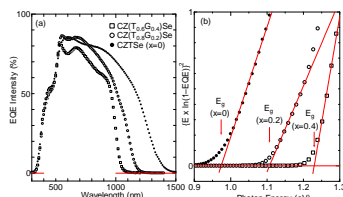
結果

UPS/IPESの測定結果



UPS/IPESから求めたE_g

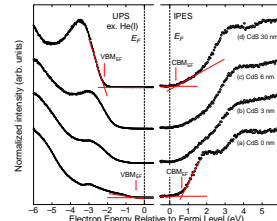
EQEスペクトル測定結果



EQEから求めたE_g [1]

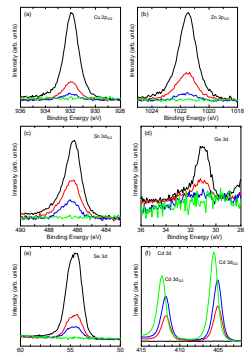
良い一致を示す

UPS/IPESのCdS膜厚依存



CZ(T,G)Se上にCdSを30 nm堆積させた試料のVBM, CBM ⇒ E_gを考慮すると妥当

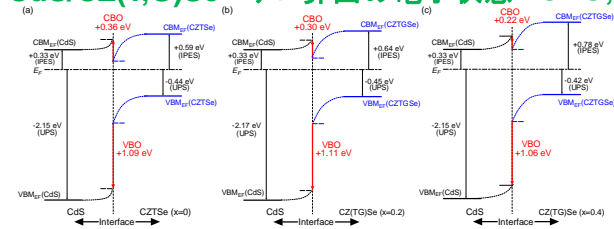
XPS測定結果



UPS/IPESで求めた価電子帯頂上(VBM),と伝導帯底(CBM)は妥当

考察

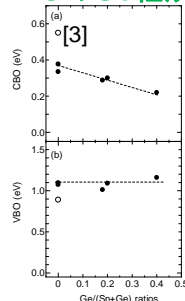
CdS/CZ(T,G)Seへテロ界面の電子状態



$$CBO = CBM_{EF}(CdS) - CBM_{EF}(CZTGSe) + E_{iibb} \quad (1)$$

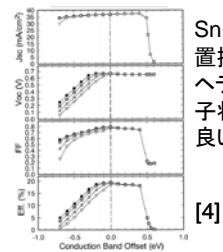
$$VBO = VBM_{EF}(CZTFSe) - VBM_{EF}(CdS) - E_{iibb} \quad (2) \quad [2]$$

CBO, VBOのGe組成比依存性



CBOはGe組成に対し減少
VBOはGe組成に依存せず一定
CBM, VBMを構成する元素の軌道を考慮すると説明が付く

CBO, VBOとPVパラメータのシミュレーション



Snの一部をGeに置換する事により、ヘテロ接合の電子状態としては、良い方向へ

結論

CZTSeにおけるSnの一部をGeに置換したCZ(T,G)SeとCdSからなるヘテロ接合型太陽電池の接合界面の電子状態を明らかにした。Ge組成の増大に伴い、CBOは減少するが、VBOは一定の値を取る事が明らかになった。

Ge組成40%以下の結果から、いずれも接合界面の伝導帯はスパイク構造を有する接合状態である事が明らかになった。

バルク内部およびCZTGSe裏面での再結合中心生成を抑制する事ができれば、更なる変換効率向上が見込まれる事が明らかとなった。

参考文献

- [1] T. Nagai *et al.*, ACS Appl. Mater. & Interfaces, **11** (2019) 4637.
- [2] M. Bär *et al.*, Appl. Phys. Lett., **99** (2011) 222105.
- [3] T. Nagai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **56** (2017) 065701.
- [4] T. Minemoto *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **67** (2001) 83.

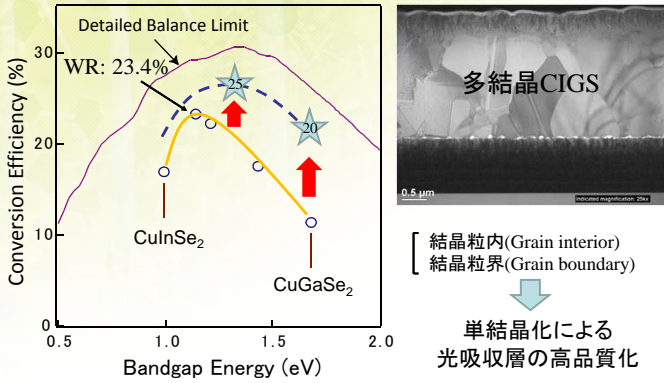
謝辞

本研究においてKCN処理を担当して頂いた樋口博文様、ガラス上へのMoの蒸着を担当して頂いた飯岡正行様、Se化を担当して頂いた高江洲績本様に感謝いたします。

III-V族半導体基板上Epitaxial CIGS太陽電池の開発

西永 慈郎、石塚 尚吾、菅谷 武芳
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

研究の目的



成膜・測定方法

CIGS solar cells

7. HCl etching
6. Cr-Ag Evaporation
5. Cleavage
4. DC magnetron sputtering
3. Chemical bath deposition
2. Molecular beam epitaxy
1. InGaSe 50 nm
0. ZnO: Al (Sputter) 300 nm
0. CdS 30 nm
0. GaAs (001) p-type Sub.
0. In melt / Ag paste
0. Cu plate

- Molecular beam epitaxy (Co-evaporation: Cu, In, Ga, Se)
- CGI: 0.3 / 0.7, CGI: 0.85, 0.95, 1.0
- InGaSe layer (50 nm), $T_{sub}=520^\circ\text{C}$
- NaF doping, KF-PDT ($T_{sub}=350^\circ\text{C}$)
- CdS/AZO/Al grid (Area: 0.25 cm²)

Measurements

- Ion gauge, RHEED, SIMS, STEM
- J-V curves and C-V

Riber 32 MBE

実験結果 (MBE・三段階法、STEM、EDX)

MBE法による組成制御

$$\frac{J_i}{J_{Ga}} = \frac{P_i \eta_{Ga}}{P_{Ga} \eta_i} \sqrt{\frac{T_i M_{Ga}}{T_{Ga} M_i}}$$

$$\frac{\eta_i}{\eta_{N_2}} = \left(\frac{0.6 Z_i}{14} + 0.4 \right)$$

$BEP = BEP_{open} - BEP_{close} - BEP_{extra}$

P_i : Beam equivalent pressure (10^{-7} Torr)
 M_i : Relative molecular mass
 T_i : Absolute cell temperature
 η_i : ionization efficiency
 Z_i : number of electrons

- $T_{Ga} = 945^\circ\text{C}$, $P_{Ga} = 3.22 \times 10^{-7}$ Torr
- $T_{In} = 745^\circ\text{C}$, $P_{In} = 2.82 \times 10^{-7}$ Torr
- $T_{Cu} = 1180^\circ\text{C}$, $P_{Cu} = 1.33 \times 10^{-7}$ Torr

$GGI_{flux} = 0.7$
 $CGI = 0.80$ (CGI was measured by EPMA.)

三段階法による組成制御

Pyrometer

Stoichiometric point

1st stage: In, Ga, Se
2nd stage: Cu, Se
3rd stage: In, Ga, Se

1st stage: $(In,Ga)_2Se_3$
2nd stage: $Cu(In,Ga)Se_2 + Cu_2Se$
3rd stage: $Cu(In,Ga)Se_2 + Cu(In,Ga)_3Se_5$

ADF-STEM images showing ZnO, CIGS, and Mo/SLG layers.

EDX line scan showing atomic percent (%) vs Depth (μm) for Cu, S, Ga, Se, In.

実験結果 (STEM-EDX, SIMS, J-V curves, C-V)

ADF-STEM images for CGI: 1.0 and BF-STEM images for CGI: 1.0.

Model: Band structure

E_C vs E_V for p-CuIn_{0.3}Ga_{0.7}Se₂ / p-GaAs. Bandgap is 1.5 eV.

J-V curves for Poly-crystal CIGS and Single-crystal CIGS.

C-V curves showing N_{Cu} (cm⁻³) vs x (μm) for Poly-CIGS, CGI: 0.95, CGI: 0.85, and 0 V bias.

	Eff. (%)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	$R_{sh, dark}$ (Ωcm^2)	$R_{ser, dark}$ (Ωcm^2)	$N_{Cu, 0V}$ (cm ⁻³)	$J_{0, dark}$ (mA/cm ²)	n_{dark}
CGI: 0.85	20.9	0.767	34.5	0.789	1×10^5	0.08	2×10^{16}	4×10^{-9}	1.3
CGI: 0.95	16.7	0.737	33.2	0.683	26000	0.5	6×10^{16}	1×10^{-8}	1.7
Poly-CIGS	22.1	0.786	35.1	0.800	5700	0.34	7×10^{16}	3×10^{-9}	1.3

結論・謝辞

➤ CIGSエピタキシャル成長

- MBE法によりCIGSエピタキシャル成長に成功
- Cu poorの場合、CIGS/GaAs界面反応を抑制
- MBE法と三段階法の相違点を検証した

➤ 太陽電池特性、今後の課題

- Ga濃度勾配、HLSによって変換効率20.9%を達成
- 構造最適化、ドーピング等により高効率化を狙う

謝辞: 本研究は経済産業省「革新的なエネルギー技術の国際共同研究開発事業」により実施されたものである。関係各位に感謝致します。

参考文献

- S. Niki, H. Shibata, P. J. Fons, A. Yamada, A. Obara, Y. Makita, T. Kurafuji, S. Chichibu, H. Nakanishi, Appl. Phys. Lett. **67**, 1289 (1995).
- M. Fujita, A. Kawaharazuka, Y. Horikoshi, J. Cryst. Growth **378**, 154 (2013).
- K. Abderrafi, R. Ribeiro-Andrade, N. Nicora, M. F. Cerqueira, M. G. Debs, H. Limborço, P. M. P. Salomé, J. C. Gonzalez, F. Briones, J. M. Garcia, S. Sadewasser, J. Cryst. Growth **475**, 300 (2017).
- S. Siebentritt, N. Papathanasiou, J. Albert, and M. Ch. Lux-Steiner, Appl. Phys. Lett. **88**, 151919 (2006).
- J. Nishinaga, T. Nagai, T. Sugaya, H. Shibata, S. Niki, Appl. Phys. Express **11**, 082302 (2018).
- J. Nishinaga, T. Koida, S. Ishizuka, Y. Kamikawa, H. Takahashi, M. Iioka, H. Higuchi, Y. Ueno, H. Shibata, S. Niki, Appl. Phys. Express **10**, 092301 (2017).

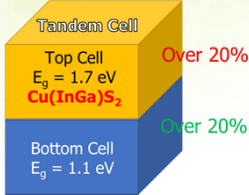
Comparison study of wide bandgap CIGS prepared from Cu-rich and Cu-poor metal precursor

Shinho Kim, Takehiko Nagai, Hitoshi Tampo, Shogo Ishizuka, and Hajime Shibata
 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
 Research Center for Photovoltaics

Introduction

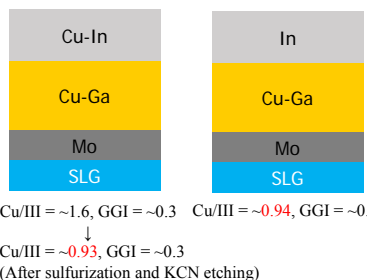
Wide bandgap chalcopyrite thin-film solar cell for tandem solar cell application

For the high efficient solar cell **beyond 30%!!**



Pure sulfide chalcopyrite, wide bandgap $\text{Cu}(\text{InGa})\text{S}_2$ (CIGS) has been reported to be a promising absorber material for the **top cell application**. Recently, solar cell prepared using CIGS absorber has reached a conversion efficiency of **16.9%** [1].

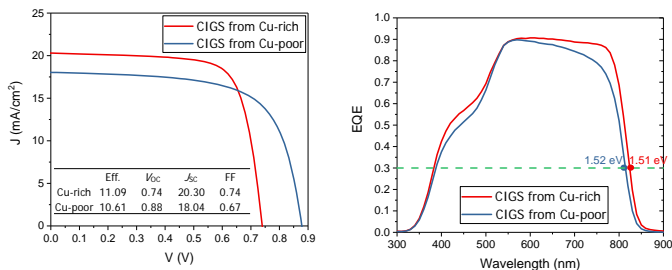
Comparison study of CIGS prepared using Cu-rich and Cu-poor metal precursor



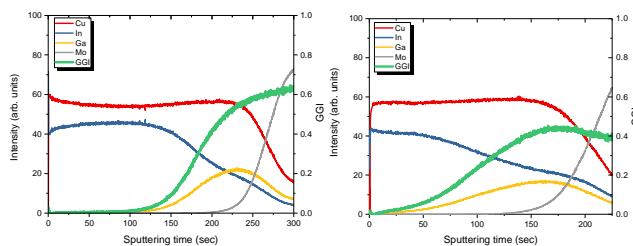
➢ In this study, CIGS was prepared using Cu-rich and Cu-poor metal precursor (MP).
 ➢ A comparison study was performed to investigate the photovoltaic properties with different Cu contents of MPs.

Results and discussion

J-V and EQE results



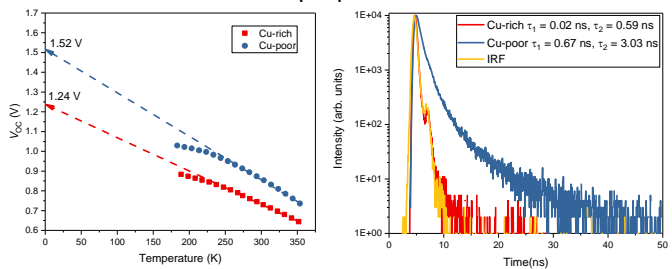
Depth profile results – GD-OES



- ✓ CIGS from **Cu-rich** shows larger J_{sc} and FF.
- ✓ J_{sc} – steep GGI profile
- ✓ FF – small shunt resistance effect: 1.1 (Cu-rich MP) and 2.7 (Cu-poor MP) ohm-cm².
- ✓ V_{oc} -deficit = 0.77 and 0.64 V for CIGS from Cu-rich and Cu-poor, respectively.

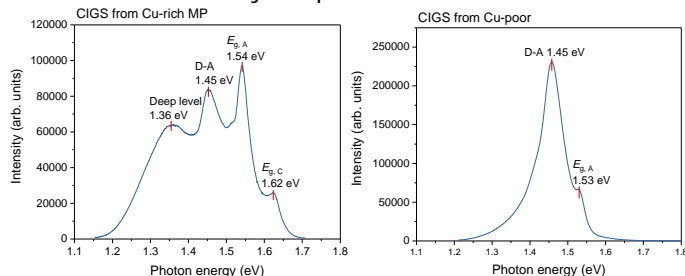
- ✓ CIGS from Cu-rich MP exhibits **steep Ga/(Ga+In) (GGI) profile**, which leads to **steeper back-graded-bandgap**.
- ➔ **Improved longer wavelength response** in EQE results.

Recombination properties of CIGS cells



- ✓ CIGS using **Cu-rich MP** shows larger recombination properties.
- ✓ Large difference between $E_{g,A}$ (1.24 eV) and $E_{g,EQE}$ (1.51 eV) cf. $E_{g,A}$ (1.52 eV) = $-E_{g,EQE}$ in CIGS using Cu-poor MP
- ✓ Very small carrier lifetime in TRPL results

Defect analysis – photoluminescence method



- ✓ CIGS prepared using Cu-rich MP exhibited **strong deep emissions at 1.36 eV**.
 ➔ the reason for the **large recombination limiting V_{oc}** of the device.
- ✓ Cu_{in} or V_{in} is known to be easily formed in the Cu-rich CuInS_2 .
 ➔ **Deep levels are caused by Cu-excess growth condition**.

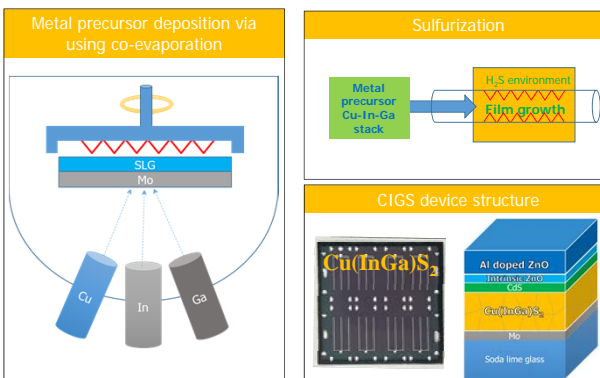
Summary

- CIGS using **Cu-rich MP**
 - Good crystallinity and morphology
 - Better J_{sc} and FF
 - Large V_{oc} loss due to large recombination
 - Deep level acceptor (Cu_{in} or V_{in}) caused by **Cu-excess growth condition**
- CIGS using **Cu-poor MP**
 - Poor crystallinity and morphology
 - Large open-circuit voltage (V_{oc}) boosting
 - Reduced recombination
 - PL emission characteristics without deep level transition

References

[1] H. Sugimoto *et al.*, PVSEC-27, Otsu, Japan (2017).

Experimental Conditions



CIGS太陽電池のアルカリ不純物効果と制御技術

石塚尚吾¹・西永慈郎¹・上川由紀子¹・金信浩¹・田口昇²
 産業技術総合研究所 ¹太陽光発電研究センター 化合物薄膜チーム
²電池技術研究部門 ナノ材料科学研究グループ

研究の目的

NaやKなどのアルカリ金属添加によって太陽電池の性能が向上する、いわゆる「**アルカリ金属効果**」は、CIGS太陽電池において1990年代頃から知られていた

最近では、CIGSに限らずCu₂Oや、Cu₂ZnSnSe₄、さらには**ペロブスカイト太陽電池**においても性能向上効果が報告されている

SiやGaAsでは**半導体キラ**、CIGSでは**不可欠**
 ⇒ どのようなメカニズムでCIGS太陽電池の性能向上に貢献しているのか、制御方法と合わせてそのメカニズムに迫る

実験

CIGS光吸収層: 三段階法蒸着製膜(膜厚約2 μm)
 アルカリ不純物の添加: 1. PDT(Postdeposition treatment)と
 2. 基板拡散法を併用し効果を検証

1. PDT法

RbF, CsFなど



2. 基板拡散法

製膜中に拡散



アルカリ不純物**添加のタイミング**や、**アルカリ金属種類ごとの効果の違い**、**準安定アクセプタ形成への影響**を検証

Na、K、Rb、Csの効果に注目し比較検証を行った

結果および考察

本ポスターの図表等のほとんどは著者が作成したのですが、すでにACS(米国化学会)やAIP(米国物理学協会)などが発行する論文誌に著作権が移管されております。詳細は当日掲示のポスターおよび下記参考文献をご参照下さい。



超軽量・高性能フレキシブルCIGS太陽電池
 には**アルカリ不純物制御が不可欠**

結論

NaやK、Rb、Csなど、アルカリ金属種類によらず太陽電池性能は向上するが、PDT添加によるCIGS表面モロジ変化はアルカリ金属の種類によって異なる傾向が観察された

Csでは、今のところKやRbで観察されているRbInSe₂のような界面異相層の形成は観察されていない

アルカリ不純物効果のメカニズム解明は長期的な研究テーマ
 ⇒ 基礎研究課題でありながら、多元系材料・デバイス性能に直結する重要な実用研究課題

参考文献

Rb、Cs等の効果、アルカリ制御、準安定アクセプタ形成に関するもの

- S. Ishizuka *et al.*, J. Phys. Chem. C **123**, 17757 (2019).
- S. Ishizuka *et al.*, J. Phys. Chem. C **122**, 3809 (2018).
- S. Ishizuka *et al.*, Appl. Phys. Lett. **113**, 063901 (2018).
- S. Ishizuka *et al.*, Appl. Phys. Express **11**, 075502 (2018).
- S. Ishizuka *et al.*, Adv. Energy Mater. **8**, 1702391 (2018).
- S. Ishizuka *et al.*, ACS Appl. Mater. Interfaces **9**, 31119 (2017).
- J. Nishinaga *et al.*, Appl. Phys. Express **10**, 092301 (2017).

特にp-n接合界面付近の異相構造形成に関するもの

- N. Taguchi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **113**, 113903 (2018).

CIGS太陽電池における裏面再結合の影響の検討

○上川 由紀子¹、Marco Nardone²、西永 慈郎¹、柴田 肇¹、石塚 尚吾¹

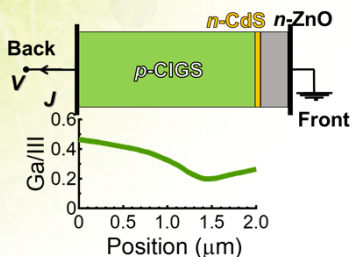
¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 化合物薄膜チーム

²Bowling Green State University

研究の目的

CIGS太陽電池では、変換効率が23%を超える等[1,2]、高性能化が進んでいる。同太陽電池では、デバイス構造の最適化の他、Cu/III比を化学量論比に近づける試み等、結晶品質向上に向けた研究も報告されている[3,4]。本研究では、少数キャリア拡散長が増加した場合に、求められるデバイス構造を検討した。

特に、裏面再結合に着目し、裏面再結合速度の影響をデバイスシミュレーションにより評価した。典型的なGa/(In+Ga)の組成比(Ga/III比)の深さ分布を設定し[5]、伝導帯(E_c)の傾斜構造を想定した上で、少数キャリア拡散長を0.5~6 μm と変化させ、それぞれの場合について検討した。



Gaグレーディング:
高効率CIGS太陽電池 (> 21%) におけるGa/IIIの深さ分布をSIMSにより評価した結果[5]を、デバイスシミュレーションに利用した。

デバイスシミュレーション

THE MATERIAL PARAMETERS OF p-CIGS, n-CdS, n-ZnO LAYER.

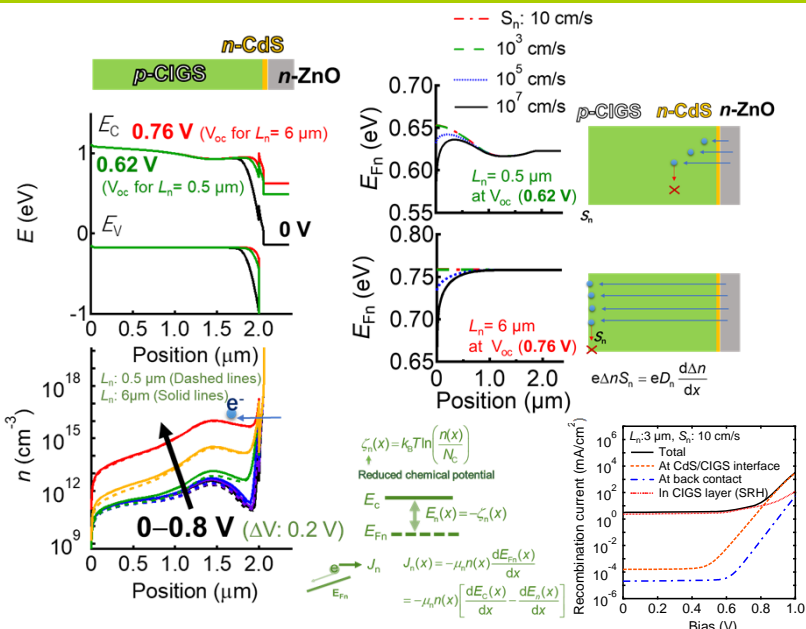
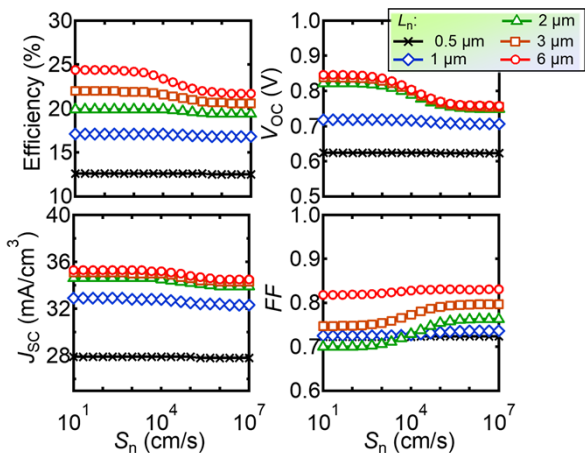
	p-CIGS	n-CdS	n-ZnO
Thickness (μm)	2.0	0.06	0.3
Dielectric constant (C/V m)	$13.6 \times \epsilon_0$	$10 \times \epsilon_0$	$9 \times \epsilon_0$
Effective mass of electron	$0.2 \times m_0$	$0.2 \times m_0$	$0.2 \times m_0$
Effective mass of hole	$0.8 \times m_0$	$0.8 \times m_0$	$0.8 \times m_0$
Mobility of electron ($\text{cm}^2/\text{V s}$)	40	100	20
Mobility of hole ($\text{cm}^2/\text{V s}$)	10	25	5
Electron affinity (eV)	$4.35 - 0.421y - 0.244y^2$	4.05	4.15
Bandgap (eV)	$1.011 + 0.421y + 0.244y^2$	2.4	3.3
Carrier density (cm^{-3})	2×10^{18}	1×10^{17}	4×10^{20}

デバイスシミュレーターには、SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator)[6]およびCOMSOL Multiphysics®を用いた。CIGS中にドナー型欠陥を導入し、濃度を $5.5 \times 10^{13} \sim 3.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ で変化させた。このとき、対応する少数キャリア拡散長は0.5~6 μm となる。欠陥のエネルギー位置はバンドギャップ中央とし、捕獲断面積は電子、正孔に対してそれぞれ $\sigma_n: 5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$, $\sigma_p: 10^{-15} \text{ cm}^2$ とし[4]。電子の裏面再結合速度(S_n)を 10^3 cm/s から 10^7 cm/s の範囲で変化させ、太陽電池特性を算出した。yはIII族元素に対するGaの比率である。

結果と考察

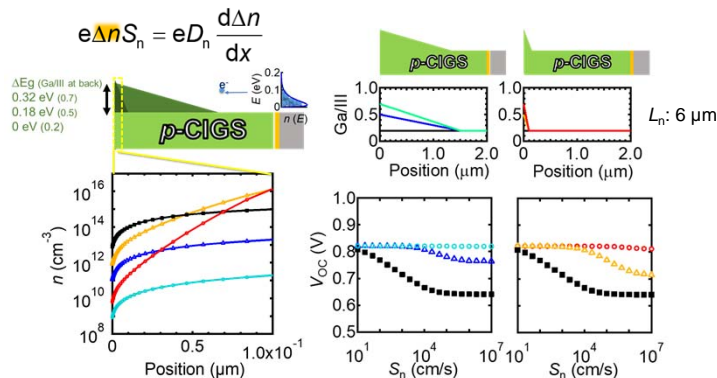
Case 1: Conventional Ga/III grading

L_n が大きい場合には裏面再結合速度を改善することで、 V_{oc} の更なる増加のポテンシャルがあることが分かる。この結果は、典型的なGa/III比グレーディングを導入した計算のもとで得られている。必ずしも従来のGa/IIIグレーディングで裏面再結合が十分に抑制されない可能性が示唆される。



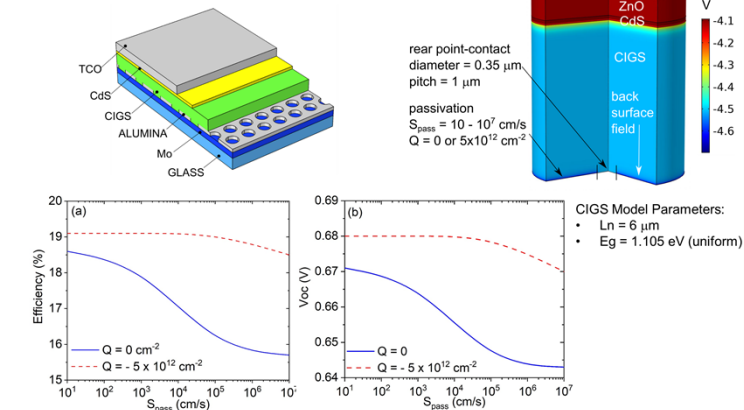
Case 2: Larger Ga/III grading

裏面再結合の抑制には、裏面でのGa/III比を増加させることも有効である。裏面での少数キャリア密度を低減することによって、裏面再結合によって生じる電流を抑えることができる。



Case 3: Passivation structure

裏面での少数キャリア密度を低減する手法として、負の固定電荷を持ったパッシベーション膜を導入することも有効である。



結論

CIGSの結晶品質が向上し L_n が増加した場合には、裏面再結合速度を低減することで、 V_{oc} の更なる増加が期待できる。Ga/IIIグレーディング等を利用して裏面電極での少数キャリア密度を低減する方法、パッシベーション膜を導入する方法等により特性向上が期待できる。

参考文献

- [1] M. A. Green *et al.*, *Progress in Photovoltaics*, vol. 27, pp. 3-12, 2019.
- [2] Solar Frontierプレス発表, 2019年1月17日
- [3] J. Nishinaga *et al.*, *Applied Physics Express*, vol. 11, p. 082302, 2018.
- [4] L. Choubrac *et al.*, *Phys. Status Solidi A*, vol. 214, p.1600482, 2017.
- [5] J. Nishinaga *et al.*, *Applied Physics Express*, vol. 10, p. 092301, 2017.
- [6] M. Bugelman *et al.*, *Thin Solid Films*, vol. 361-362, pp. 527-532, 2000.

【謝辞】 本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援により実施された。

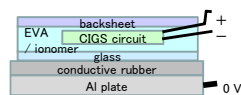
CIGS太陽電池のPIDストレスからの 光照射による高速回復現象

櫻井 啓一郎¹, 富田 仁², シュミッツ ダーシャン², 徳田 修二², 西永 慈郎¹, 柴田 肇¹, 増田 淳¹
¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター, ²ソーラーフロンティア

背景

- PVモジュールの信頼性・耐久性向上のため、IEC TC82において、関連IEC規格の大規模な改訂作業が進行中。
- 目下、薄膜太陽電池の高電圧誘起劣化(potential induced degradation, PID)耐性のIEC標準試験規格の策定作業が進められている。
- CIGSは暗所でPIDストレスを印加して出力が減少しても、光照射で回復するケースがある[1]。試験規格を策定するにあたり、この特性とメカニズムを探る必要がある。

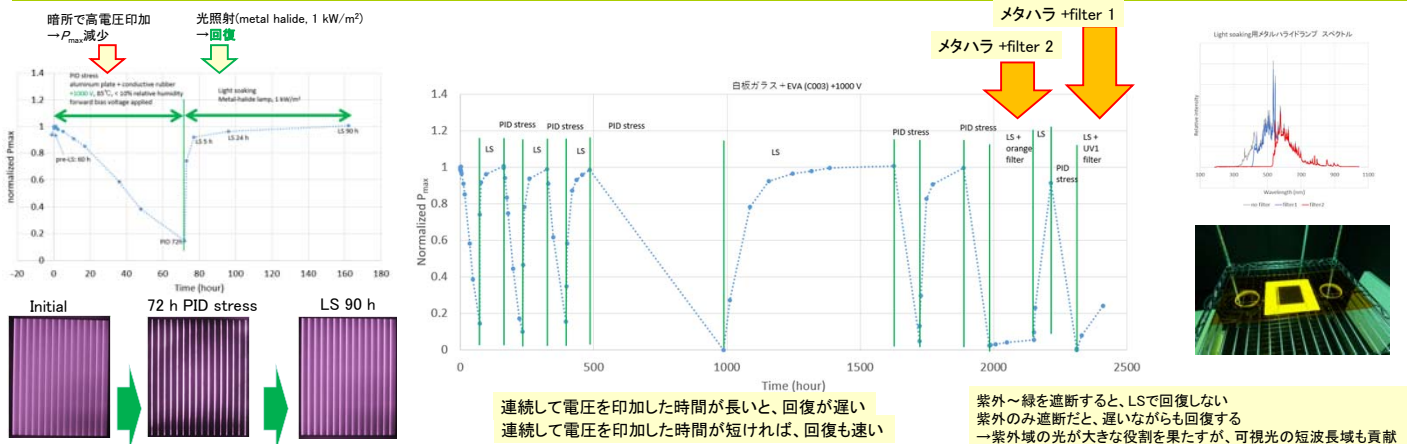
実験1: アルミ板電極法



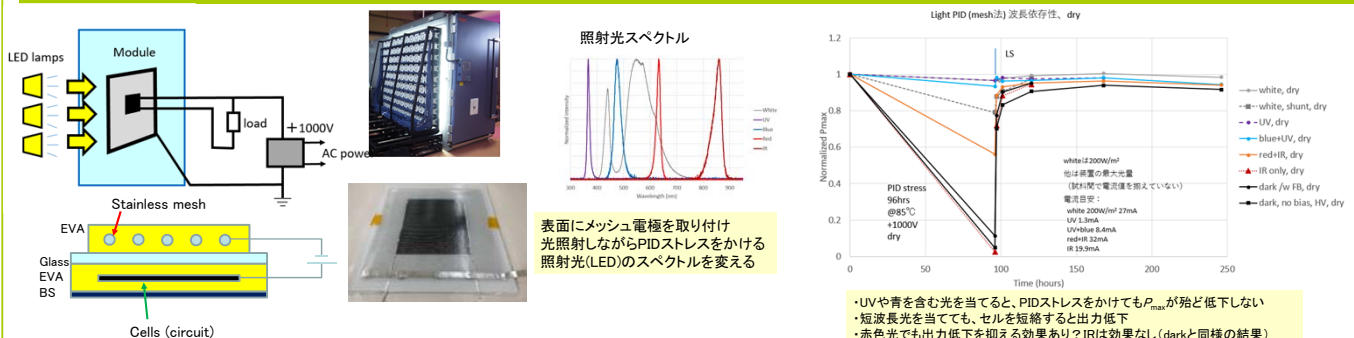
暗所、85℃、乾燥(< 10% r.h.)環境下にてPIDストレスを印加
 ・導電性ゴムを介してアルミ板を密着
 ・(非常に厳しいPID試験条件; 結晶シリコン型なら数時間でfail)[2]

PID試験後、メタルハライドランプ(1 kW/m²)を光照射

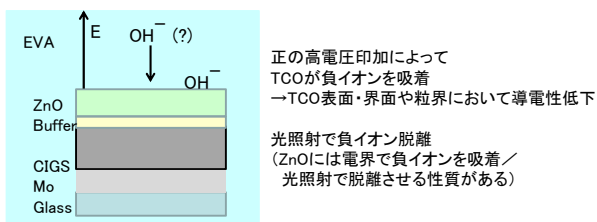
結果1: アルミ板電極法



実験2: PIDストレス印加中に光照射(実環境に近づける)



検討中のモデル



まとめ・参考文献

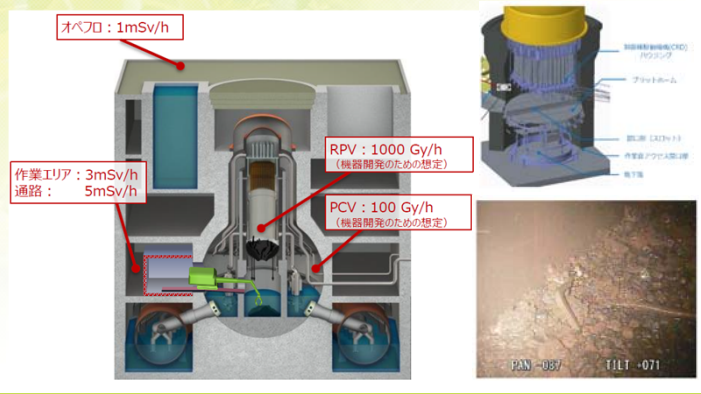
- > 暗所でバイアス電圧印加した条件下においては、正電圧でのPID試験により P_{max} が一時的に減少したが、光照射で速やかに、かつ完全に回復。
- > 暗所PID試験による P_{max} の減少速度よりも光照射による回復速度のほうが遙かに速く、実環境でPIDが観測されていない事実と整合する。
- > ストレス印加と光照射を繰り返しても回復する。
- > 封止材をEVAからionomerに変えると、PIDストレス印加中の出力低下が遅くなる
- > 光照射の効果は、主に短波長域で見られる。
- > PID試験の標準規格策定に当たっては、試験手順に光照射を含める必要がある。
 → TS62804-2の策定作業中。

[1] K. Sakurai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 08RG02 (2018).
 [2] S. Yamaguchi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 54, 08KC13 (2015).

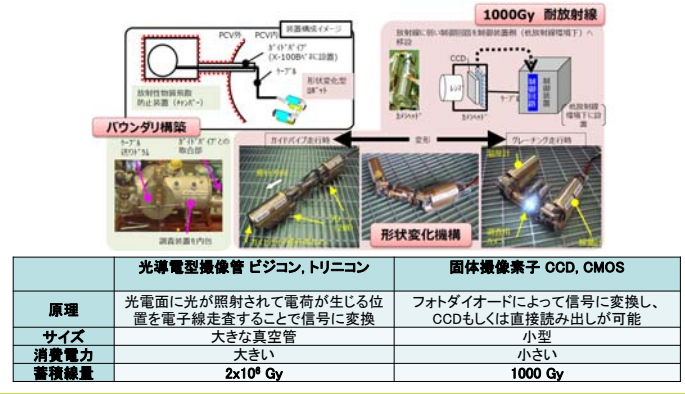
陽子線照射によるCIGS太陽電池の劣化および回復

西永 慈郎¹、外川 学²、石塚 尚吾¹
¹産業技術総合研究所、²高エネルギー加速器研究機構

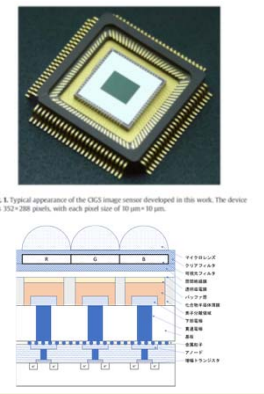
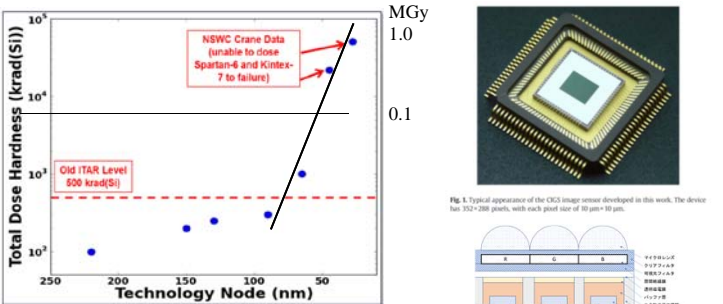
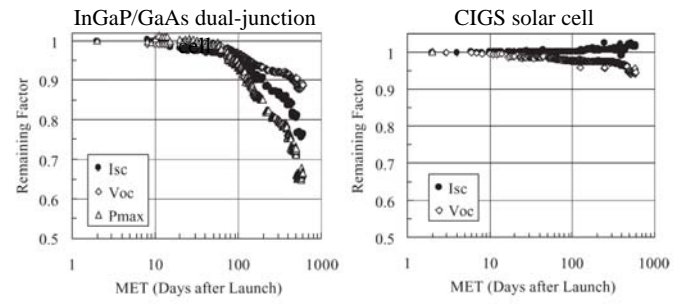
研究背景(福島第一原子力発電所)[1]



耐放射線カメラ(撮像管、固体撮像素子)[2]



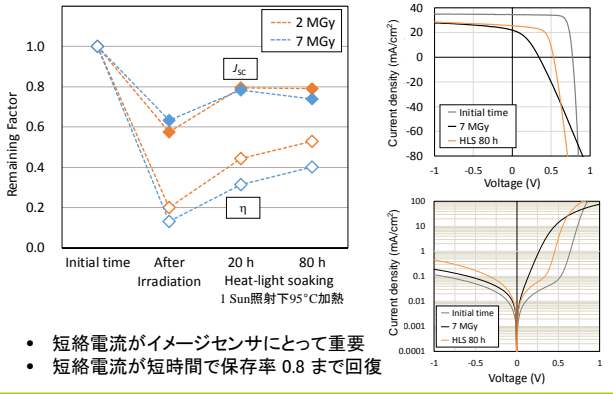
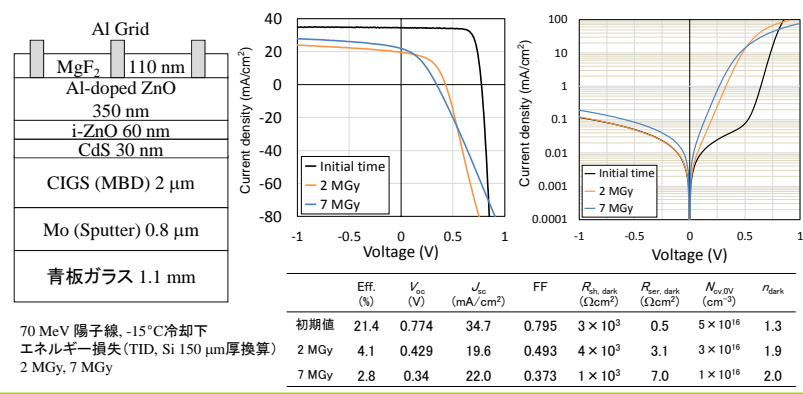
CIGS太陽電池の放射線耐性[3]、CMOS回路の放射線耐性[4]、CIGSイメージセンサの構造図[5]



• CIGS太陽電池の高い放射線耐性は、MSD-1(“Tsubasa”)などによって検証済みである。(劣化を回復させる機構を有する)

• 最新のCMOS回路は放射線耐性が飛躍的に向上している。

実験方法・結果(CIGS太陽電池への陽子線照射および熱・光処理)



• 短絡電流がイメージセンサにとって重要
 • 短絡電流が短時間で保存率 0.8 まで回復

結論

- ➔ 高放射線耐性イメージセンサ実現に向けて
 - CIGS太陽電池の放射線耐性は高い
 - 最新のCMOS集積回路は放射線耐性が飛躍的に向上
- ➔ CIGS太陽電池の放射線耐性
 - 陽子線照射(7 MGy)後も、太陽電池動作を確認
 - 熱・光処理によって、変換効率、光電流の回復を確認
 - CIGS層内の再結合中心の消失が起こり、機能が回復

参考文献・謝辞

- [1] 高守謙郎 (IRID), IRIDシンポジウム2019年.
- [2] 新井民夫(芝浦工大), IRIDシンポジウム2016年.
- [3] M. Imaizumi *et al.*, Prog. Photovolt.: Res. Appl. 13, 529 (2005).
- [4] M. Gadlage, “Radiation Hardening and Trust in a COTS Age”, Naval Sea Systems Command.
- [5] K. Miyazaki *et al.*, Thin Solid Films, 517, 2392 (2009).

謝辞: 本研究はTIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」により実施されたものである。関係各位に感謝致します。

HVPE法によるGaAsセルの超高速成長

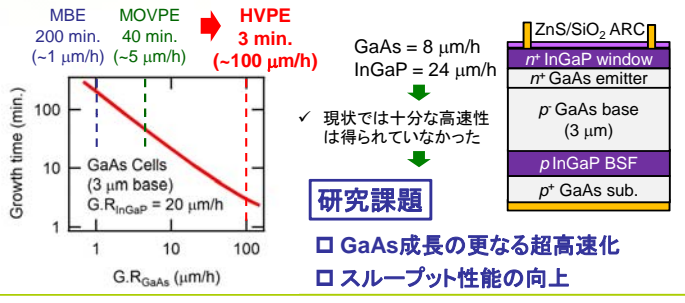
大島 隆治¹、庄司 靖¹、牧田 紀久夫¹、生方 映徳²、菅谷 武芳¹
¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム
²太陽日酸株式会社

研究背景

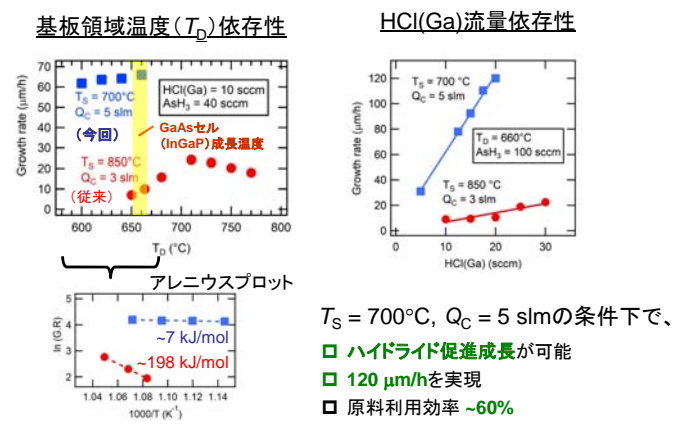
III-V族太陽電池の低コスト化技術の開発

⇒ **ハイドライド気相成長(HVPE)法**により、従来成長法(MOVPE)と比較して原料コストの低減、高速成長が可能

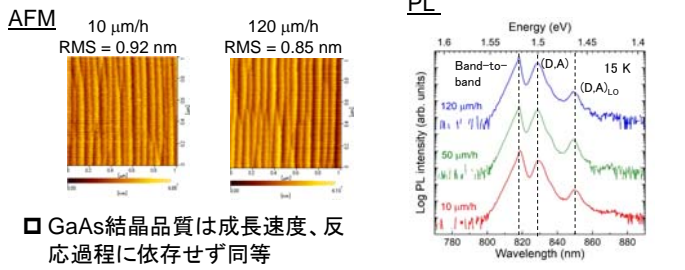
- これまでの開発**
- GaAs 単セル $\eta = 22.1\%$ ^[1]
 - InGaP 単セル $\eta = 12.1\%$ ^[2]
 - InGaP/GaAs 2接合セル $\eta = 21.8\%$ ^[3]



GaAs成長の制御



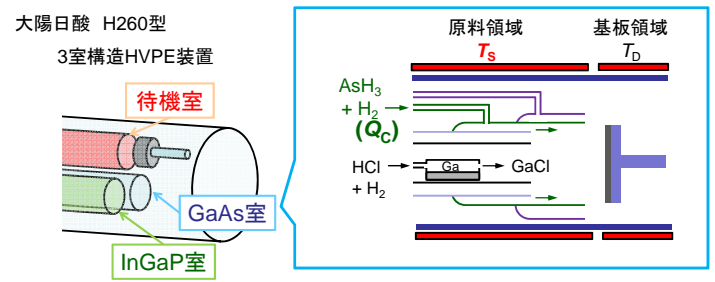
ノンープGaAs薄膜の評価



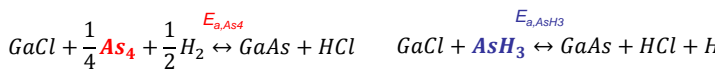
結論

- HVPE法を用いたGaAsセルの超高速成長を検討した。
- V族原料種であるAsH₃の供給条件の制御により、GaAs成長速度を120 $\mu\text{m/h}$ まで超高速化させることに成功した。
- 120 $\mu\text{m/h}$ のGaAsセルにおいて20.0%の変換効率が得られた。
- GaAsの結晶性はV族種の供給条件、成長速度に依らない一方で、超高速成長下ではヘテロの制御性に課題があることを明らかにした。

実験手法(HVPE法)



- V族原料の供給条件によって異なるGaAs反応過程
- 従来成長^[4]
- ハイドライド促進成長^[5]



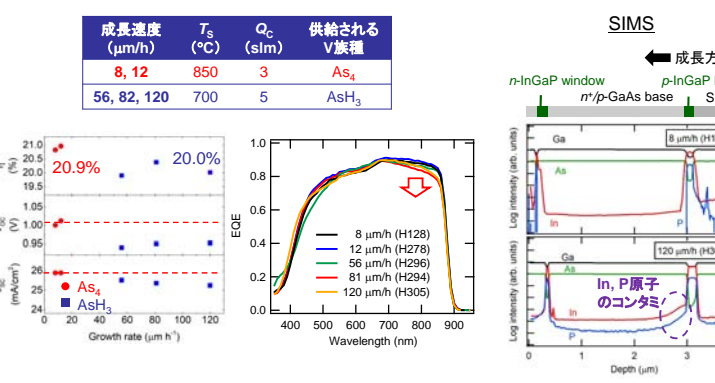
- 基板到達前にAs_xに熱分解
- AsH₃のまま基板に到達
- 反応障壁 (E_{a,As_4}) = 200 kJ/mol^[3]
- 反応障壁 (E_{a,AsH_3}) = 9 kJ/mol^[4]

- 表面反応律速
- 反応速度:遅
- 原料供給律速
- 反応速度:早

- 研究項目**
- 原料領域温度 (T_S), H₂キャリア流量 (Q_C)によるV族原料の供給の制御
 - GaAsセルの超高速成長の実現

超高速GaAsセル特性

- p-GaAsベース層のみ成長速度を8 ~ 120 $\mu\text{m/h}$ で制御



- AsH₃を直接用いた高速セル (> 56 $\mu\text{m/h}$)
- V_{OC} , J_{SC} がわずかに低下
 - EQE感度の低下 (>700 nm)
 - ヘテロ界面でGaAs中にIn, P原子が混入
- ➡ 超高速成長下でのヘテロ界面の制御性に課題

参考文献

- [1] R. Oshima *et al.*, IEEE J. Photovolt. **9**, 154 (2019).
- [2] Y. Shoji *et al.*, Appl. Phys. Exp. **12**, 052004 (2019).
- [3] R. Oshima *et al.*, IEEE PVSC-46, Chicago, USA, 2019.
- [4] W. Seifert *et al.*, J. Crystal Growth **66**, 333 (1984).
- [5] K. L. Schulte *et al.*, Appl. Phys. Lett. **112**, 042101 (2018).

謝辞

本研究は、国立研究開発法人NEDO「超効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発」の委託の下で行われた。

MBE法による0.7 eV帯InGaAs 太陽電池の高性能化

石塚優希^{1,2}・大島隆治¹・岡野好伸²・菅谷武芳¹

¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム

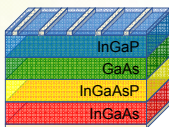
²東京都市大学 総合理工学研究科 情報専攻

研究の目的

ウェハ接合4接合太陽電池

Fraunhofer ISE, SOITEC $\eta = 46.0\%$ (508 suns) [1]

4接合セルの高効率化には、
各サブセルの高性能化が必須



Institute	Method	V_{oc} (V)	η (%)	W_{oc} (V)	補足
NREL [2]	MOVPE	0.40	12.8	0.34	AMO
Univ.Tokyo [3]	MOVPE	0.39	9.7	0.35	TBP
NREL [4]	—	—	—	0.38	IMM4-J
Sony [5]	—	0.31	10.0	0.44	—
Univ.Lyon [6]	MBE	0.35	—	0.38	ELO
AIST [7]	—	0.34	9.5	0.40	Invert

InP基板上InGaAsセル (0.74 eV) に着目

$$W_{oc}(MBE) > W_{oc}(MOVPE) \quad W_{oc} = V_{oc} - \frac{E_g}{q}$$

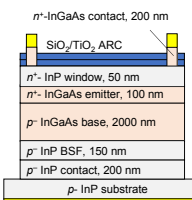
→ MBE法を用いたInGaAsセルに改善の余地

本研究 成長温度、微傾斜基板を用いた結晶成長の検討

実験

手法: 固体ソースMBE法 [7]

デバイス構造



成長条件

成長速度

InGaAs : 1.0 $\mu\text{m}/\text{h}$
InP : 0.8 $\mu\text{m}/\text{h}$

分圧

As_2 : 1×10^{-5} Torr
 P_2 : 1.5×10^{-5} Torr

成長温度

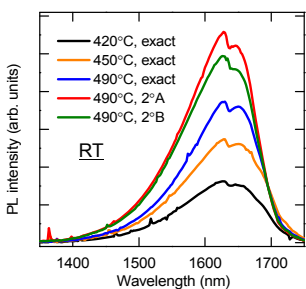
420, 450, 490 °C

基板 InP(001)

Exact, 2° (111)A → (2°A)
(111)B → (2°B)

結果

室温PL



高温成長に伴って;

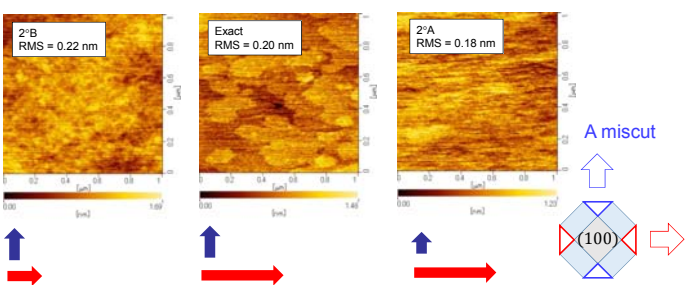
- PL発光強度 **大**
 - MBEチャンパー内に残存する不純物原子の混入が減少
 - 半値幅 **小**
 - 結晶の均一性が向上
 - 490°Cにおいて最小の62.16 meV
- 高温成長により結晶性が向上

微傾斜基板により;

- PL発光強度 **大**
- ピーク波長および半値幅(63 meV)に変化なし
- 組成、均一性に影響なし

ステップを利用した結晶成長によって、結晶性が変化した可能性

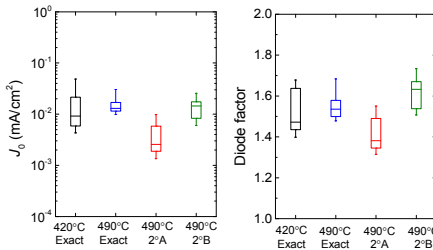
AFM



- Exact ⇒ [1-10]方向の表面拡散は[110]方向よりわずかに大きい
 - 2°A ⇒ [110]方向の表面拡散が抑制
 - 2°B ⇒ [1-10]方向の表面拡散が抑制
 - 2°Aにおいて、ステップフロー成長が促進
- 結晶品質が改善し、PL発光強度が増大

ダイオードパラメータ

(同一ウェハー上の13セルを評価)

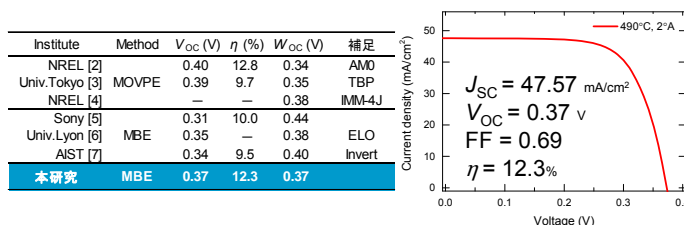
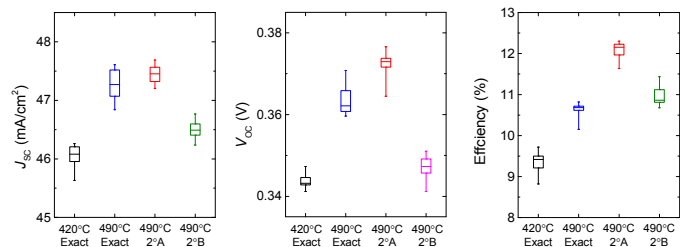


$$J = J_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right)$$

490°C、2°Aの条件で成長したInGaAsセルは J_0 、 n 値が改善

J_{sc} 、 V_{oc} が増大し
最も高い $\eta = 12.3\%$ を実現

セルパラメータ



MBE法を用いたInGaAsセルの中で
最も高い変換効率、最も小さい W_{oc} を実現

結論

- MBE法を用いたInP基板上InGaAsセルの作製における、成長温度と微傾斜基板の影響を調査した。
- 490°Cの高温成長により、結晶性が向上したことによりPL発光強度が増大し半値幅が低減した。
- 2°A基板を用いることにより、ステップフロー成長をより促進できることを明らかにした。
- 2°Aかつ490°Cで成長したInGaAsセルは、MBE法を用いたInGaAsセルで最も高い変換効率12.3%、かつ最も小さい $W_{oc} = 0.37$ Vが得られた。

参考文献

- [1] F. Dimroth *et al.*, IEEE J. Photovolt. **6**, 343 (2016).
- [2] M. W. Wanlass *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **41/42**, 405 (1996).
- [3] H. Sodabanlu *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 08RD09 (2018).
- [4] R. M. France *et al.*, IEEE J. Photovolt. **6**, 578 (2016).
- [5] M. Arimochi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 056601 (2015).
- [6] F. Chancerel *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **195**, 204 (2019).
- [7] R. Oshima *et al.*, Proc. 43rd IEEE PVSC, 2354 (2016).

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人NEDO「超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発」により行われた。

2光子励起フォトルミネッセンスによる InGaAs太陽電池のInGaPバッファ層内の転位観察

小倉暁雄¹, 谷川智之², 高本達也³, 大島隆治⁴, 菅谷武芳⁴, 今泉充¹

¹ 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第一研究ユニット

² 大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻

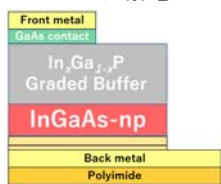
³ シャープ株式会社

⁴ 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム

研究背景・目的

- 逆積み格子不整合型3接合太陽電池 InGaP/GaAs/InGaAs [1]
- GaAs-InGaAs間の組成傾斜バッファ層内で歪緩和
→ 転位の発生・制御[2]
→ 高効率化のために最適化が必要

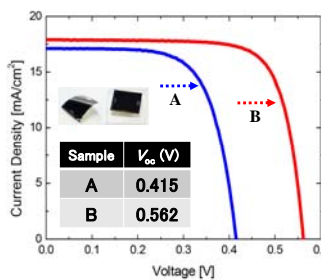
InGaAs太陽電池



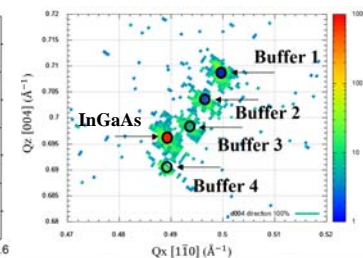
2光子励起フォトルミネッセンス(2PPL)により、バッファ層内の転位直接観察

InGaAs逆積み単接合太陽電池

• IV特性(AM0, 25°C)



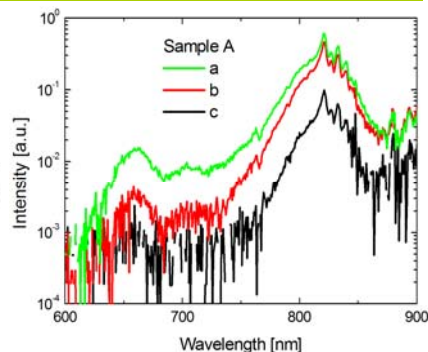
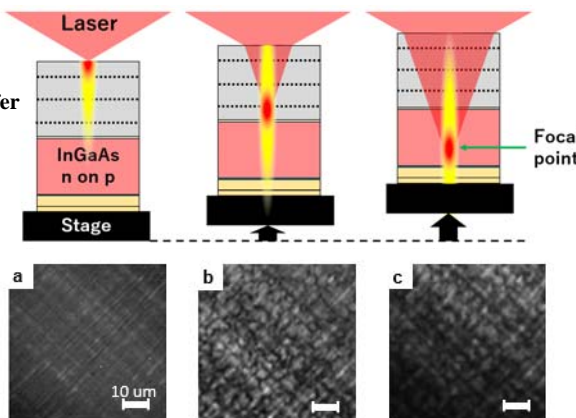
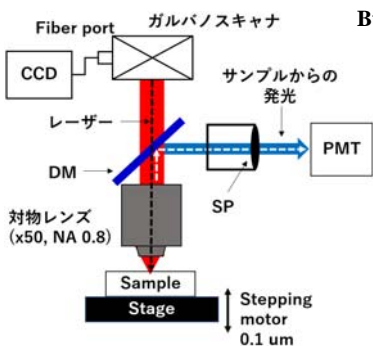
• 逆格子マップ (224)回折



実験と結果1: 深さ方向の2PPL画像

- フェムト秒レーザー
1030 nm, 100 fs, 80 MHz, ~10 mW

光学系[3], [4]

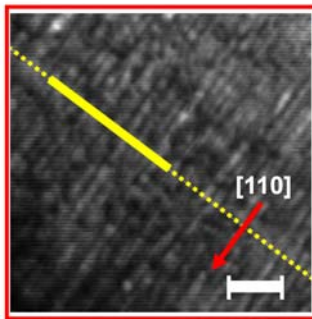
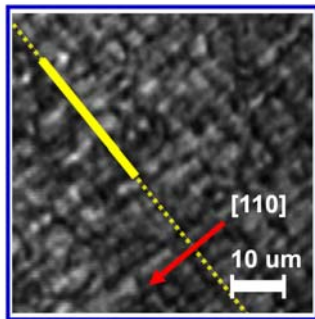


- a 表面上のクロスハッチパターン
- b ヘテロ界面上のダークライン・ダークスポット
- c 焦点位置のずれ

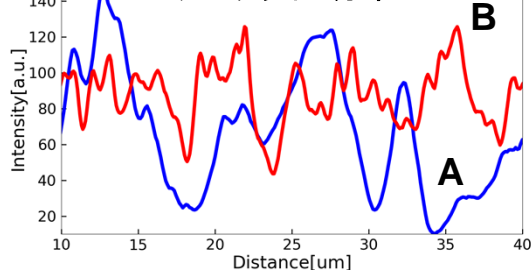
実験と結果2: ヘテロ界面上の2PPL画像

A (V_{oc} : 0.415 V)

B (V_{oc} : 0.562 V)



ダークライン分布



ピーク間距離, ピーク幅が V_{oc} 大小で異なる。

結論

- InGaAs逆積み単接合太陽電池のInGaPバッファ層内を2PPLにより観察した。
- 焦点位置を試料深部へ移動させることで、バッファ層内の緩和状態を直接観察が可能であることを示した。
- [110] 方向のダークライン密度が V_{oc} の大きいサンプルほど大きく、効率の異なるサンプル間でバッファ層内の緩和状態に違いがあることが分かった。

参考文献

- [1] T. Takamoto *et al.*, 40th IEEE PVSC (2014).
- [2] R. M. France *et al.*, J. Appl. Phys. **112**, 023520 (2012).
- [3] T. Tanikawa *et al.*, Appl. Phys. Express **11**, 031004 (2018).
- [4] A. Ogura *et al.*, 46th IEEE PVSC (2019).

高効率低コスト太陽電池に向けたHVPE法によるAl含有化合物半導体の結晶成長

庄司 靖¹、大島 隆治¹、相原 健人¹、牧田 紀久夫¹、生方 映徳²、菅谷 武芳¹
¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム
²太陽日酸株式会社

研究背景

III-V族太陽電池

バンドギャップの異なる材料を接合することで高効率化

最高効率 (集光時)^[1]

- 2接合: 35.5%
- 4接合: 46.0%
- 6接合: 47.1%

現在の主な応用先: 人工衛星

今後期待される応用先: 無人航空機, 電気自動車

課題: 低コスト化

ハイドライド気相成長 (HVPE) 法による成膜

HVPE装置の概要(太陽日酸 H260 system)

HVPEのメリット/デメリット

- 😊 純金属を使用するため原料費が安い (MOVPEの $\frac{1}{10}$)
- 😊 成長速度が速い
- 😞 ガス切り替えに時間を要する
- 👉 対策: 3室構造により、V族ガス供給下での待機と事前の供給ガス雰囲気作りを可能にした^[4]
- 😞 AlCl₃が石英ガラスを激しく還元する
 - ・成長結晶内へのSi混入
 - ・石英反応炉の損傷
- 👉 対策: Al原料の温度を低温(500°C)にすることでAlCl₃の発生を抑制(AICl₃として供給)

Al温度に対する塩化物ガス種の平衡分圧に関する計算結果

原料部の反応

$$\text{Ga}(l) + \text{HCl}(g) \leftrightarrow \text{GaCl}(g) + 1/2 \text{H}_2(g)$$

$$\text{In}(l) + \text{HCl}(g) \leftrightarrow \text{InCl}(g) + 1/2 \text{H}_2(g)$$

$$\text{Al}(s) + 3\text{HCl}(g) \leftrightarrow \text{AlCl}_3(g) + 3/2 \text{H}_2(g)$$

ガス混合部(基板部)の反応

$$\text{GaCl}(g) + \text{PH}_3(g) \leftrightarrow \text{GaP}(s) + \text{HCl}(g) + \text{H}_2(g)$$

$$\text{InCl}(g) + \text{PH}_3(g) \leftrightarrow \text{InP}(s) + \text{HCl}(g) + \text{H}_2(g)$$

$$\text{AlCl}_3(g) + \text{PH}_3(g) \leftrightarrow \text{AlP}(s) + 3\text{HCl}(g)$$

※PH₃が未分解の場合

本研究の目的

ターゲット構造 (効率30%以上、発電コスト7円/kWh)

高効率InGaPセルを作製するには...

- ・Window層
- ・リアヘテロ構造^[2]

を形成するために、AlIn(Ga)Pが必要

高効率・低コスト太陽電池の実現に向けてHVPE法によるAl含有化合物半導体の高品質成膜を実証する

エピタキシャルリフトオフ(ELO)^[3]による基板再利用を行うためにAlAs犠牲層が必要

AlInGaPの結晶成長

GaAs cap	HCl[Al]	0 ~ 2 sccm
AlInGaP	HCl[In]	6 ~ 20 sccm
	HCl[Al]	0 ~ 2 sccm
GaAs buffer	PH ₃	25 ~ 100 sccm
GaAs sub.	H ₂ キャリア (III族供給用)	0.5 ~ 2.8 slm
	基板温度	660°C

HCl[Al]流量の影響

HCl[Al]流量を増加すると平坦性が低下

V/III比の影響

V/III比を下げて成長することでRMS改善 → マイグレーション向上効果

H₂キャリアガス(GaCl, AlCl₃, InCl)の影響

キャリアガス流量が高い状態であれば、HCl[Al]流量を増加しても平坦性良好

- ・不純物の取り込み抑制
- ・境界層の影響

EPMAによるIII族組成分析

Al: 27.5%, In: 50.2%, Ga: 22.3%

室温PLスペクトル

AlInGaPからの発光を確認

AlAsの結晶成長とELO試験

GaAs 2 μm	HCl[Al]	6 sccm
AlAs	AsH ₃	10 sccm
GaAs buffer	H ₂ キャリア (III族供給用)	5 slm
GaAs sub.	基板温度	660°C

RMS: 0.54 nm

AlAs上でもGaAsがステップを形成しており、平坦性も良好

基板とHVPE成膜層の分離に成功 (フレキシビリティあり)

ELOで分離

まとめ

HVPE法においてAl原料温度を500°Cにすることで、AlInGaPとAlAsの成膜を実施

- V/III比を下げ、H₂キャリアガス流量を多くすることで、AlInGaPの成膜品質を改善
- 室温で2.27 eVのPL発光をAlInGaP試料から観測 → 理論値と一致
- AlAs試料においてELOを実施し、基板とHVPE成膜層の分離を実証

謝辞: 本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発」の委託の下で行われた。

参考文献

- [1] M. A. Green *et al.*, Prog. Photovolt.: Res. Appl. **27**, 565 (2019).
- [2] J. F. Geisz *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 041118 (2013).
- [3] M. Konagai *et al.*, J. Cryst. Grow. **45**, 277 (1978).
- [4] R. Oshima *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 08RD06 (2018).

低コスト化を目的とした積層太陽電池構造のエピタキシャルリフトオフ

庄司 靖、菅谷 武芳
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム

研究の目的

III-V族化合物太陽電池は他の材料に比べて、高い変換効率が得られている。これまでは人工衛星への応用がメインだったが、近年ではその性能の高さから「設置面積の小さい場所・物」への応用が期待されている。

新しい応用先例) 成層圏の無人航空機、電気自動車、ポータブル電源など



一方で、コストの高さが課題 (主な要因: 成膜コスト、基板コスト)

コスト低減に向けて検討されているアプローチ (一例)

1. 成膜コスト・装置コスト(減価償却)の低減

低コストな塩化金属を原料としたハイドライド気相成長(HVPE)法^[1,2] スループット向上を目的とした高速有機金属気相成長(MOVPE)法^[3]

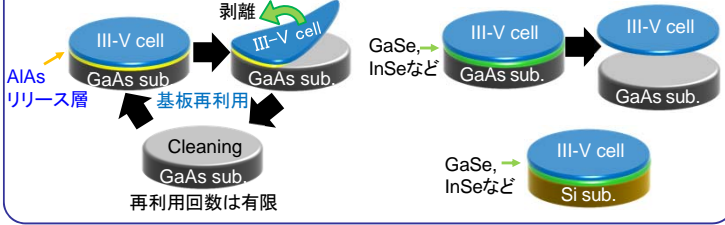


(ポスター発表:P35, P38, P41, P42, P43)

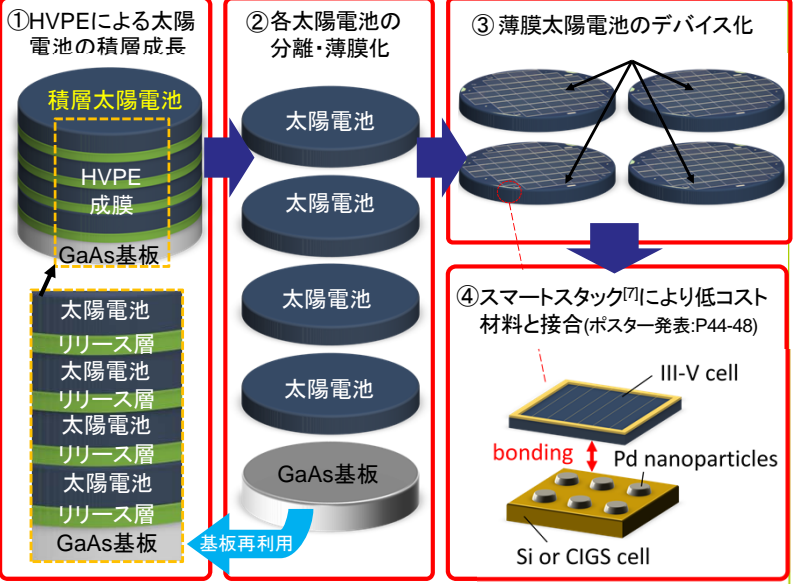
(ポスター発表:P40)

2. 基板コストの低減

選択エッチングを用いたエピタキシャルリフトオフ(ELO)による基板再利用^[4,5] 層状バッファ層を用いたメカニカル剥離や低コスト基板上への成長^[6]



本研究で提案するアプローチ



ポイント:

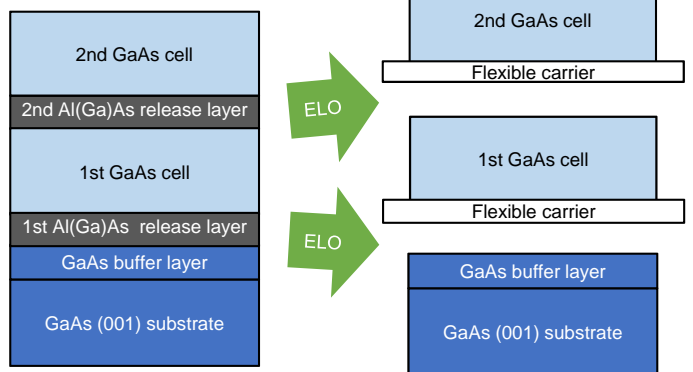
- ・高速成膜が可能なHVPE法により、リリース層を挟みながら太陽電池構造を積層
- ・ELOを応用して各太陽電池を分離させることで成膜回数・基板再利用回数を低減
- ・分離されたセルをスマートスタックにより、低コスト材料と接合することで高効率化

課題:

- ・HVPE法による高性能太陽電池の開発 → ポスター発表:P35, P42
- ・HVPE法によるAl(Ga)As/リリース層の成長 → ポスター発表:P38
- ・積層太陽電池構造の分離技術 → 本研究

実験結果

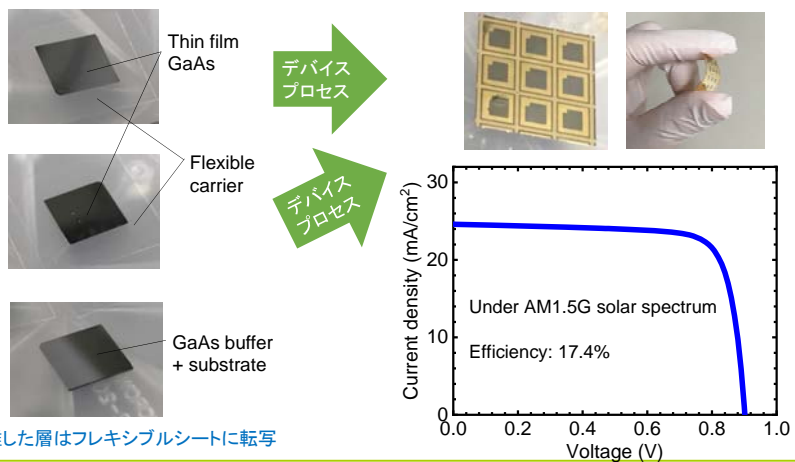
試料構造



※ここでは分子線エピタキシー法で作製

ELOを用いて上層から剥離

剥離した層はフレキシブルシートに転写



まとめ

- III-V族太陽電池を2層積層して成長した構造について分離試験を行った。
- 2層のリリース層に対して、ELO技術を応用することで各層の太陽電池およびGaAs基板の分離に成功した。
- 本分離技術とHVPE法による成膜・スマートスタックによる接合を併用することにより、高効率かつ低コストなIII-V族太陽電池の開発が期待される。

参考文献

[1] J. Simon *et al.*, IEEE J. Photovolt. **6**, 191 (2016).
 [2] R. Oshima *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 08RD06 (2018).
 [3] H. Sodabanlu *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **52**, 105501 (2019).
 [4] M. Konagai *et al.*, J. Cryst. Grow. **45**, 277 (1978).
 [5] E. Yablonoivitch *et al.*, Appl. Phys. Lett. **56**, 2419 (1990).
 [6] N. Kojima *et al.*, Proceedings of the 33rd EUPVSEC, 1295 (2017).
 [7] H. Mizuno *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 025001 (2016).

High speed MOVPE for InGaP/GaAs multijunction solar cells

H. Sodabanlu¹, A. Ubukata², K. Watanabe¹, T. Sugaya³, Y. Nakano⁴, and M. Sugiyama^{1,4}

¹Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

²Taiyo Nippon Sanso Corporation, Ibaraki, Japan

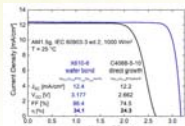
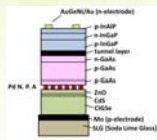
³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Ibaraki, Japan

⁴School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

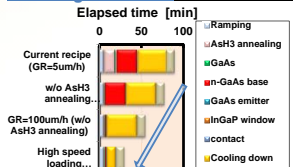
REASERCH BACKGROUND

To decrease cost of III-V semiconductor solar cells

- Substrate cost: substrate reuse and epi-growth on inexpensive substrates

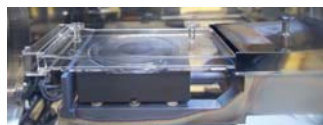


MOVPE growth time for a GaAs cell



- Epitaxial cost: high speed MOVPE and improve material utilization

METHOD

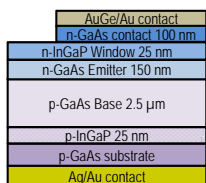


- Taiyo Nippon Sanso, HR3335
 - Horizontal MOVPE reactor
 - Standard precursors
 - Narrow flow channel to enhance the growth rate (GR)



- Standard growth conditions: in this work
 - Total gas flow: 10 SLM
 - Reactor pressure: 15 kPa
 - Our recent study indicates that a slightly high pressure is good for InGaP growth.

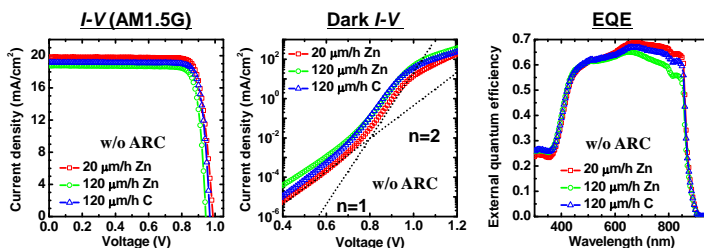
OPTIMIZATION OF 120-μm/h GROWN GaAs 1J SOLAR CELLS



Schematic and details of GaAs 1J

- A reference GaAs cell grown with GR of GaAs base layer at 20 μm/h
 - V/III ratio 20 using Zn dope
- 2 samples of 120 μm/h grown cells
 - V/III ratio 20 using Zn dope
 - V/III ratio 3 using carbon auto-dope

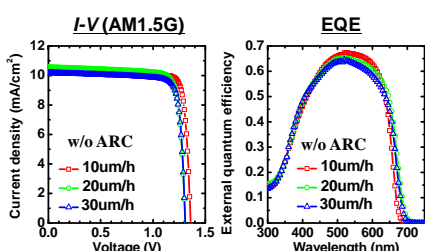
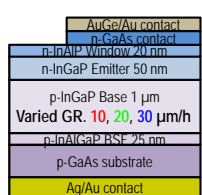
GR (μm/h)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	J ₀₁ (mA/cm ²)	J ₀₂ (mA/cm ²)
20	0.99	19.82	0.836	16.35	4.49×10 ⁻¹⁶	1.41×10 ⁻⁹
120 (Zn)	0.94	18.76	0.852	15.08	1.70×10 ⁻¹⁵	1.64×10 ⁻⁸
120 (C)	0.97	19.15	0.853	15.82	6.38×10 ⁻¹⁶	1.28×10 ⁻⁹



- Increase of J₀₁ and J₀₂ with GR from 20 to 120 μm/h
 - reduce both V_{oc} and J_{sc} because of increase in defect density
 - C dope (low V/III) better than Zn dope for 120 μm/h grown cells
 - Native defect in p-GaAs = As antisite → decrease defect by lowering V/III ratio

EFFECTS OF GROWTH RATE ON InGaP SOLAR CELLS

Schematic of InGaP 1J

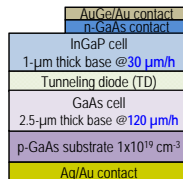


- Increase of W_{oc} with GR
 - Degradation of InGaP quality
 - Shunt-like I-V characteristics
 - Not exist in DIV measurement
 - Issue of poor carrier extraction

GR (μm/h)	V _{oc} (V)	W _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	η (%)
10	1.36	0.518	10.20	11.92
20	1.31	0.529	10.57	11.43
30	1.31	0.543	10.19	11.13

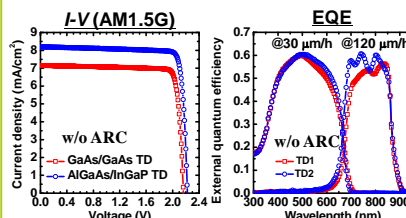
HIGH SPEED GROWN InGaP/GaAs 2J SOLAR CELLS

Schematic of 2J



- Two combinations of TD used in this work
 - p⁺GaAs(Zn)/n⁺GaAs(Si) and p⁺AlGaAs(C)/n⁺InGaP(Si)

TD	Layer	V/III	T _d (°C)	Dopant	[Carrier] (cm ⁻³)
TD1	p ⁺ GaAs	20	550	Zn	9.2×10 ¹⁹
	n ⁺ GaAs	20	650	Si	8.7×10 ¹⁸
TD2	p ⁺ AlGaAs	3	550	C	1.07×10 ²⁰
	n ⁺ InGaP	50	650	Si	1.55×10 ¹⁹



TD	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	η (%)
TD1	2.16	7.15	13.49
TD2	2.22	8.19	15.91
TD2 w/ARC	2.26	11.36	22.30

- Sufficient loss in TD1
 - Absorption loss decreased J_{sc}
 - Voltage drop across TD1 > TD2

CONCLUSIONS

- For n-on-p GaAs single junction solar cell, low V/III ratio during high speed grown GaAs base is beneficial for low defect density and allowing carbon auto-doping.
- For both GaAs and InGaP, high speed growth results in decreasing of cell efficiency, which defects and dislocations are responsible.
- InGaP/GaAs 2J solar cells were successfully fabricated with GR of 1-μm thick InGaP and 2.5-μm thick GaAs base layers at 30 and 120 μm/h respectively.

REFERENCES

- [1] A. Ubukata *et al.*, J. Cryst. Growth **489**, 63, 2018.
- [2] H. Sodabanlu *et al.*, IEEE J. Photovolt. **8**, 887, 2018.
- [3] H. Sodabanlu *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **52**, 105501, 2019.
- [4] H. Sodabanlu *et al.*, in IEEE-PVSC 46th, Chicago, USA, 2019.
- [5] H. Sodabanlu *et al.*, in EU-PVSEC 36th, Marseille, France, 2019.

A part of this study was supported by NEDO project: the research and development of ultra-high efficiency and low-cost III-V compound semiconductor solar cell modules.

HVPE法で作製した2接合太陽電池における各開放電圧の算出

○ 相原 健人¹、太野垣 健¹、大島 隆治¹、庄司 靖¹、牧田 紀久夫¹
 生方 映徳²、菅谷 武芳¹

¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム
²太陽日酸株式会社

研究の背景

HVPE法を用いたDual Junction (DJ)太陽電池の開発

本チームでは、従来型のMOVPE法と比較して高い成長速度と安価な原料の使用が可能なHVPE法^{1,2)}を使用して、高効率なIII-V族化合物太陽電池の開発を実施してきた。これまでにHVPE法を用いて、高効率なInGaP/GaAs DJ太陽電池を実証した³⁾。(左図) 現状ではAl系パッシベーション層を形成することはできていないが21%と高い変換効率を得ている。

✓ DJ太陽電池の基礎特性

J_c (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	$\eta\%$
11.37	2.318	0.83	21.89

DJ太陽電池の構造概略

目的

PV特性の向上には、太陽電池の基礎特性を正確に知ることが重要である。一方で、DJ太陽電池のような多接合型太陽電池では、各サブセルの基礎特性を直接計測できない。

各サブセルの短絡電流 (J_c)
 ⇒ 分光感度測定⁴⁾

各サブセルの開放電圧 (V_{oc})
 ⇒ 分光感度測定とEL測定⁵⁾の組み合わせ。

本研究

太陽電池と発光ダイオードの相関関係^{5,6)}

$$\phi_{em}(E) = Q_e(E)\phi_{bb}(E) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right) \right], \quad (1)$$

上記の相関関係と非発光効率(NRE)の違いを考慮して、各サブセルの V_{oc} を算出。

☞ NRE: Non-Radiative Efficiency

実験手順

NREの違いを考慮した実験方法

- リファレンスセルとして用意した、InGaP, GaAs シングルジャンクション (SJ) 太陽電池、及び、DJ太陽電池のEL測定と分光感度測定を実施
- SJ太陽電池における、EL測定の実験方法を、 δV_{InGaP} , δV_{GaAs} を算出
- DJ太陽電池における、 I - V カーブの算出時に、上記で見積った、 δV_{InGaP} , δV_{GaAs} も使用
- 算出したDJ太陽電池の I - V カーブと従来の I - V 測定で見積った J_c を組み合わせ、個々の V_{oc} を算出

InGaP太陽電池では、表面再結合がより強く生じており、二つの太陽電池間で、NREが大きく異なっている事が予想されている。

✓ I - V 測定から算出した、DJ太陽電池、及び、SJ太陽電池の基礎パラメータ

	SJ InGaP solar cell	SJ GaAs solar cell	DJ solar cell
J_c (mA/cm ²)	10.82	26.78	11.37
V_{oc} (V)	1.358	1.018	2.318
FF	0.841	0.796	0.830
$\eta\%$	12.36	21.70	21.89

EL測定配置図

実験結果 (※手順 1)

EL測定

EQE測定

SJ太陽電池のEQEスペクトル

SJ太陽電池とDJ太陽電池のEL測定とEQE測定を実施。解析には、各太陽電池のELスペクトルのピーク強度とピーク位置を使用。また、ELピーク位置に対応するEQE信号も使用。

解析 (※手順 2~3)

$$V_i(V_{oc}) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{qI_{sc}}{I_0}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{qI_{sc}}{I_0}\right) - 2\frac{kT}{q} \ln(EQE_{EL}) - \frac{kT}{q} \ln(EQE_{EQE}), \quad (2)$$

$$V_{oc}(V_{oc}) = V_{oc, top cell} [1-4] - \delta V_{top cell} + V_{oc, bottom cell} [1-4] - \delta V_{bottom cell}, \quad (3)$$

$$V_{oc} = V_{oc, top cell} + \delta V_{InGaP} + \delta V_{GaAs}$$

- 式(2)の I - V カーブが各セルの J_c , V_{oc} に対応するマーカー(●, ○)に合うようにNREの指標となる δV を調整。
- 算出した δV_{InGaP} と δV_{GaAs} はそれぞれ383.2 mV, 287.5 mV。
 δV は不一致なので、NREに違いが存在していたことを確認。
- 算出した δV_{InGaP} と δV_{GaAs} を用いて、DJ太陽電池の I - V カーブの算出を実施。
- DJ太陽電池の I - V カーブは式(3)を用いて算出。
- 同様にDJ太陽電池の J_c , V_{oc} に対応するマーカー(●)に合うように δV_{DJ} を調整。

結果と考察 (※手順 4)

SJ、及び、DJ太陽電池のEL測定データから算出した I - V カーブと I - V 測定で算出した J_c を組み合わせ、個々の V_{oc} を算出。

✓ EL測定から見積った個々の V_{oc}

	Top sub-cell (InGaP)	Bottom sub-cell (GaAs)	SUM
V_{oc} (V)	1.339	0.978	2.317

matched very well

✓ リファレンスとして使用したSJ太陽電池とDJ太陽電池の V_{oc}

	SJ InGaP Solar cell	SJ GaAs Solar cell	DJ Solar cell
V_{oc} (V)	1.358	1.018	2.318

算出した個々の V_{oc} は、リファレンスセルとよく一致する値を示した。また、電圧降下はトップセルとボトムセルでそれぞれ19 mV, 40 mVであり、ボトムセル側の減少が多く、その理由としてSJとDJとで J_c の値が2倍以上異なっているためと判断。以上、今回実施した手法で正確な各サブセルの V_{oc} の算出を遂行。

結論

EL法を使用した各サブセルの開放電圧の算出

- ◆ 非発光効率の違いを考慮するためSJ太陽電池を用意。
- ◆ EL, EQE測定から各太陽電池の非発光再結合効率を算出。
- ◆ 非発光効率を用いて、DJ太陽電池の各サブセルの V_{oc} を算出。
- ◆ 得られた開放電圧はSJ太陽電池とよい一致。
- ◆ 簡易的な測定条件で正確な個々の V_{oc} の算出を遂行。

参考文献

- 1) R. Oshima *et al.*, IEEE J. Photovoltaics **9**, 154 (2019).
- 2) Y. Shoji *et al.*, Appl. Phys. Express **12**, 052004 (2019).
- 3) R. Oshima *et al.*, IEEE PVSC-46, Chicago, USA (2019).
- 4) T. Tayagaki *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 08MC01 (2017).
- 5) T. Kirchartz *et al.*, Appl. Phys. Lett. **92**, 123502 (2008).
- 6) S. Roensch *et al.*, Appl. Phys. Lett. **98**, 251113 (2011).

謝辞

本研究は(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援を受けて行われました。

HVPE法によるInGaP/GaAs 2接合太陽電池の開発

大島 隆治¹、庄司 靖¹、牧田 紀久夫¹、生方 映徳²、菅谷 武芳¹
¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム
²太陽日酸株式会社

研究背景

- III-V族太陽電池 ☺ 高い変換効率^[1]
- 単接合セル η = 29.1% (1sun)
 - 6接合セル η = 39.2% (1sun)

☹ 高い製造コスト → 応用が限定的

現状 宇宙、集光型

製造の低コスト化、生産能力の向上が課題

⇒ **ハイドライド気相成長(HVPE)法**^[2]

将来 無人航空機、車載PV など

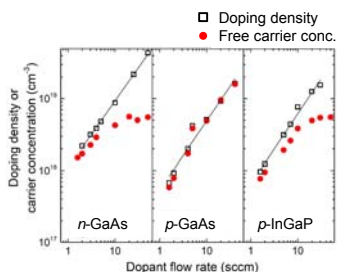
- これまでの開発**
- GaAs 単セル η = 22.1%^[3]
 - InGaP 単セル η = 12.1%^[4]

研究課題 InGaP/GaAs 2接合セルの開発

トンネルダイオードの開発

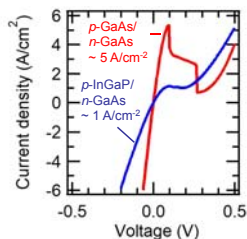
ドーピング特性

成長速度 GaAs: 12 μm/h InGaP: 24 μm/h



- n-GaAs
⇒ 電子濃度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ で飽和
⇒ $S_{\text{As}}-V_{\text{Ga}}$ アクセプター複合欠陥の形成に起因^[5]
- p-GaAs
⇒ 正孔濃度は線形に増大
⇒ 縮退ドーピング可能
- p-InGaP
⇒ 正孔濃度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ で飽和

トンネルダイオード特性



p ⁻ -GaAs, 40 nm	
p-InGaP, 200 nm	ドーピング密度
p ⁺⁺ -tunnel, 40 nm	$2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
n ⁺⁺ -tunnel, 40 nm	$4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
n-InGaP, 40 nm	
n-GaAs, 200 nm	
n-GaAs sub.	

- nmオーダーの極薄膜のヘテロ成長が可能であることを実証
- $>10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の過剰ドーピングにより、良好なトンネルダイオード特性を実現
⇒ 複合欠陥等の局在準位を介したトンネル
- n-GaAs/p-InGaPトンネル接合
⇒ GaAsボトムセルに対してトンネル接合の寄生吸収の低減が期待できるが、ドーピング特性の改善が課題

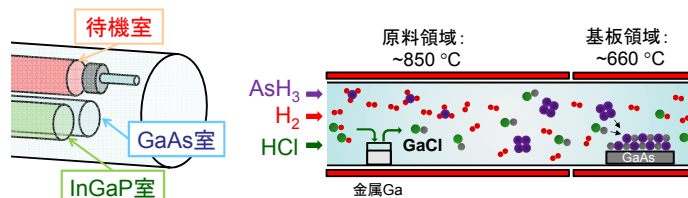
結論

- HVPE法を用いたトンネルダイオード、およびInGaP/GaAs 2接合セルを開発した。
- GaAs, InGaP結晶へのZn, Sドーピング特性を明らかにした。
- 極薄膜のヘテロ成長が可能であることを実証し、5 A/cm²のピークを有するGaAsトンネルダイオードを実現した。
- トンネルダイオードによるV_{OC}の損失はほぼ無視でき、InGaP/GaAs 2接合セルにおいて変換効率21.8%が得られた。

HVPE装置

	MOVPE	HVPE
III族原料	有機金属	金属(塩化物)
V族原料	水素化物	水素化物
V/III比	△ 20	◎ 2
原料利用率	○ ~20%	◎ ~60%
成長速度	○ ~5 μm/h	◎ ~100 μm/h
界面制御	◎	?

従来(MOVPE)と比較して:
原料コスト ~1/10
成長時間 ~1/20 (高スループット性)

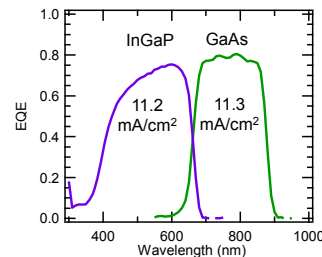
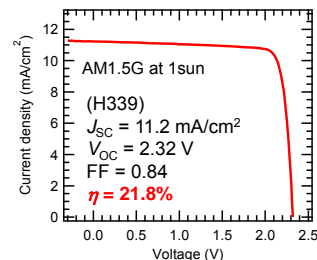
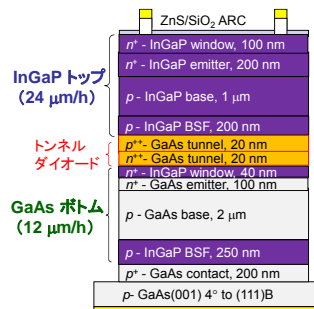


- 特徴**
- ホットウォール型反応炉
 - 多室構造によるヘテロ成長
 - 非真空プロセス
 - ドーパント原料: H₂S (n型), DMZn (p型)

研究項目

- 高濃度ドーピング特性 ($>10^{19} \text{ cm}^{-3}$) の解明
- トンネル接合、2接合セルの試作と評価

InGaP/GaAs 2接合セルの開発



- 単接合セルのV_{OC}:
GaAs = 1.00 V^[2] InGaP = 1.32 V^[3]
⇒ **トンネル接合によるV_{OC}の損失無し**
- 変換効率の向上には**高J_{SC}化**が課題

高J_{SC}化へのアプローチ

- InGaPトップセル ⇒ Al系ワイドギャップ窓層による**表面再結合の低減**
- GaAsボトムセル ⇒ ワイドギャップトンネル層による**寄生吸収の低減**

参考文献

- [1] M. A. Green *et al.*, Prog. Photovolt.: Res. Appl., 27, 3 (2019).
- [2] R. Oshima *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 57, 08RD06 (2018).
- [3] R. Oshima *et al.*, IEEE J. Photovolt., 9, 154 (2019).
- [4] Y. Shoji *et al.*, Appl. Phys. Exp., 12, 052004 (2019).
- [5] E. Veuhoff *et al.*, J. Crystal Growth, 53, 598 (1981).

謝辞

本研究は、国立研究開発法人NEDO「超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発」の委託の下で行われた。

III-V族化合物太陽電池の低コスト化検討

生方映徳¹、小関修一¹、Hassanet Sodabanlu²、大島隆治³、庄司靖³、相原健人³、
 牧田紀久夫³、渡辺健太郎²、菅谷武芳³、中野義昭²、杉山正和²

¹大陽日酸株式会社、²東京大学、

³産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム

研究の目的

UAV・車載応用にセル効率>30%の高効率PVが求められている。社会実装のためには、大幅な大量生産技術に加えて、既存技術とは一線を画した低コストにより実現される

本研究の目的

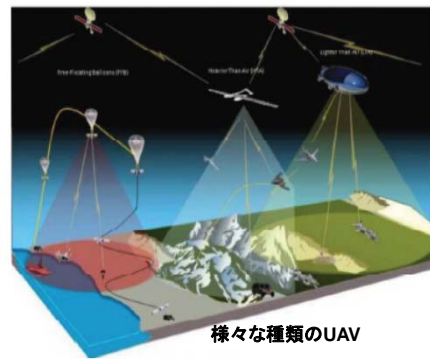
- 成長方法別のコスト分析
- MOCVDならびにHVPEによるスループット改善実証

PVウェハコスト = 装置コスト + 材料コスト + 基板コスト (エピコスト)

スループットによる低コスト化
 プロセス時間の短縮 (高速成長)
 ダウンタイムの短縮

成長機構による低コスト化
 低V/III供給比
 非有機金属原料による原料利用効率

基板再生技術
 ヘテロエピ技術



様々な種類のUAV

ref.: S. H. Alsamhi and N. S. Rajput, Int. J. Electron. & Electr. Eng., Vol. 3 (2015) 134.

成長方法と成膜コスト試算

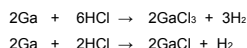
III-V族化合物太陽電池の成長方法比較

	MOCVD	HVPE	MBE
Growth speed	○	◎	×
Material	△ (precursor, AsH ₃ , PH ₃)	○ (metal, HCl, AsH ₃ , PH ₃)	◎ (metal)
V/III	10~50	2~5	2~5
Interface stiffness	◎	?	◎
Easy maintenance	◎	○	×
Mass production	○	?	△

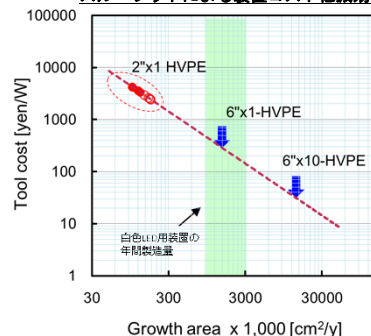
III族原料のコスト試算

	MOCVD	HVPE
Ga material	App. ¥57,000/mol	TMGa x 1/3
In material	App. ¥240,000/mol	TMIIn x 1/10
Al material	App. ¥110,000/mol	TMAI x 1/10

HVPE原料の反応は以下を想定している

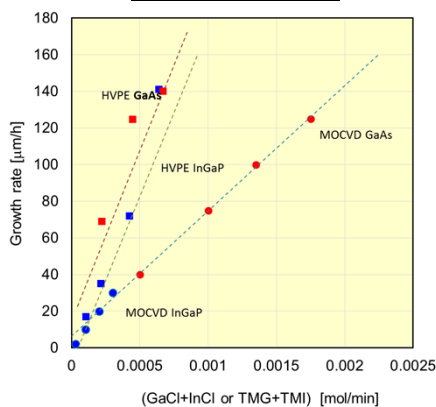


スループットによる装置コスト低減効果

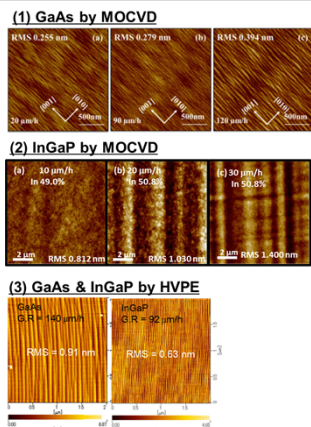


高速成長の検討

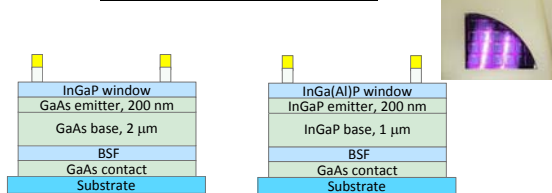
GaAs・InGaPの成長速度



高速成長GaAs・InGaP表面モロロジーの比較



単セル構造による成長方法の比較



GaAs 1-J セル特性の結果

	HVPE	MOCVD
Growth rate	120 µm/h	120 µm/h
J _c	25.0 mA/cm ²	28.1 mA/cm ²
V _{oc}	1.00 V	1.05 V
FF	0.83	0.83
Cell Efficiency	20.1%	24.5%

InGaP 1-J セル特性の結果

	HVPE	MOCVD
Growth rate	40 µm/h	30 µm/h
J _c	11.0 mA/cm ²	10.2 mA/cm ²
V _{oc}	1.32 V	1.31 V
FF	0.83	0.84
Cell Efficiency	12.1%	11.1%

結論

- HVPEのIII族原料コストはMOCVDに比べて数分の一。V族原料は低V/III供給比のHVPEなら1/2~1/5で成長できる。
- 小型HVPEでの試験を通じて、スループットの改善により、MOCVDの1/5程度のコスト改善が見込める見通しである。
- HVPEによる高速成長(120 µm/h)の成膜条件下における成長膜の表面状態・PV特性はMOCVDと遜色ない結果を示している。

参考文献

- [1] R. Oshima et al., IEEE J. Photovolt. **9**, 154 (2019).
- [2] Y. Shoji et al., Appl. Phys. Exp. **12**, 052004 (2019).
- [3] R. Oshima et al., IEEE PVSC-46, Chicago, USA, 2019.
- [4] H. Sodabanlu et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **52**, 105501 (2019).

謝辞

本研究は、国立研究開発法人NEDO「超高効率・低コストIII-V族化合物太陽電池モジュールの研究開発」の委託の下で行われた。

産総研およびFraunhofer ISE連携による GaAs//Si多接合太陽電池の検討について

○ 牧田 紀久夫¹, 水野 英範¹, 太野垣 健¹, 高遠 秀尚¹, 菅谷 武芳¹,
R. Muller², F. Dimroth²

1)産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター, 再生可能エネルギー研究センター
2)Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany

背景

NEDOプロジェクトにおいて、2030年までに**発電効率30%、発電コスト7円/kWh**を実現することが目標とされている。中でも、**III-V//Si 多接合太陽電池**は最も可能性のあるデバイスで、当チームではその開発に注力している。本研究では、**Fraunhofer研究所との連携**のもと、**産総研独自のスマートスタック技術**を用いて**InGaP/ AlGaAs// TOPCon Si 3接合太陽電池**を試作し、**発電効率~30.8%**を達成した内容に関する。

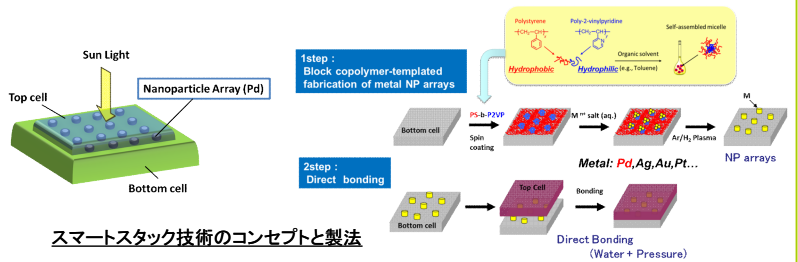
目標(2030年実用化)
モジュール効率 >30%
発電コスト <7円/kWh
(US\$ 0.1/kWh)

産総研の戦略

- 異種材料接合型太陽電池 GaAs//Si (CIGS)
- GaAsセルのコスト削減
Hydride VPE
低倍集光技術

スマートスタック技術

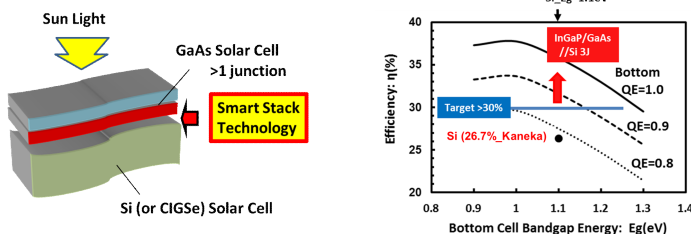
- 接合界面に導電性であるPdナノ粒子アレーを介し接合する技術。
- Pdナノ粒子アレーは、**ブロック共重合体**を用いてセルフアラインで形成。
- 接合界面での**接合抵抗~1Ωcm²以下、光損失~3%以下**であることが実験的に検証。



デバイス概念

GaAs//Si (CIGS) 多接合太陽電池の特長

- 高効率GaAs系トップセルと低コストSiあるいはCuInGaSe (CIGSe)ボトムセルの組み合わせ。
- トップおよびボトムセルは、我々のキーテクノロジーである**スマートスタック技術**を用いたタンデム。
- InGaP/GaAs//Si 3接合太陽電池の**予測効率は30%**を超える。
- さらに**低倍集光技術**の導入により、**高価なGaAsセルのコスト削減が可能**。

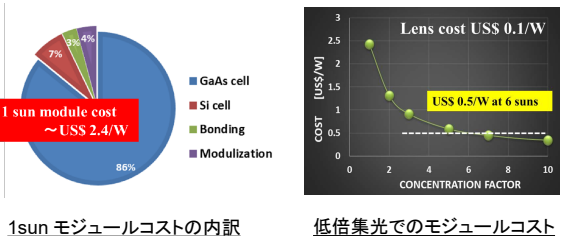


InGaP/GaAs//Si (CuInGaSe) 多接合太陽電池の構造と予測効率

コスト試算

GaAs//Si スマートスタックモジュールのコスト計算

- 計算モデルは、**InGaP/GaAs//Si 3接合スマートスタックモジュール**モジュール効率_30%、GaAs基板再利用回数_10回 GaAs成長技術_Hydride-VPE*
- 1sunでの基本モジュールコストは、**US\$ 2.4/W**。
- 集光下においては**モジュールコスト削減、US\$ 0.5/W以下**が可能。



1sun モジュールコストの内訳

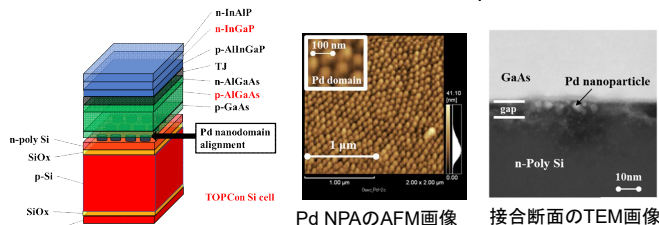
低倍集光でのモジュールコスト

実験と考察

GaAs//TOPCon Si 3接合太陽電池の性能

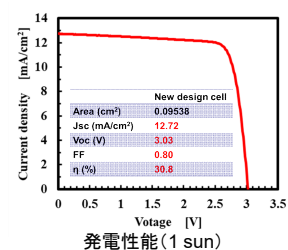
- スマートスタック技術を用いて**InGaP/AlGaAs//TOPCon Si 3接合セル**を試作。
- 1 sun (AM1.5G) 下で、**発電効率~30.8%**(産総研での最高性能)達成。
- 高効率化は、デバイス構造の最適化による。
 - ミドルセルをGaAsからワイドギャップ**AlGaAs**に変更
 - ボトムセルをAl BSF構造から低損失である**TOPCon構造**に変更。

BSF: Back surface field, TOPCon: Tunnel oxide passivated contact

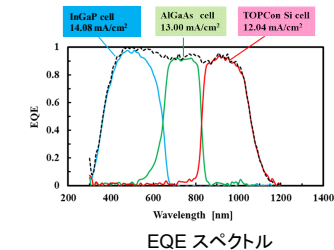


デバイス構造

接合界面の分析

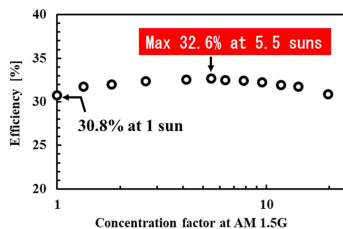


発電性能(1 sun)

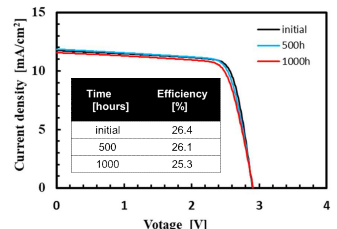


EQE スペクトル

- 低倍集光下において**最大発電効率~32.6%**(5.5倍集光)を達成。
- 低倍集光域(<10倍)において**30%以上の実用発電効率**を維持。
- 初期信頼性試験(ダンプヒート試験)において、**顕著な劣化は観測されず**。
- スマートスタックによるGaAs//TOPCon Siの接合界面は、**長期的な安定性が確認**。



低倍集光性能



信頼性試験(ダンプヒート試験)
ダンプヒート試験: 85°C/85%_1000 h

結論

産総研とFraunhofer研究所の連携により、**スマートスタックGaAs//TOPCon Si 3接合太陽電池**において、非集光下において**発電効率~30.8%**、また低倍集光下においても**最大発電効率~32.6%**(5.5倍集光)を達成した。これらの結果は、GaAs//Si 3接合太陽電池が、2030年のNEDO目標に向け有望なデバイスであることを示唆するものである。本研究は、国立研究開発法人NEDO「超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発」の委託の下で行われた。

Ref.

- H. Mizuno et al., Appl. Phys. Lett., 101, 191111 (2012).
- K. Makita et al., 29th European Photovoltaic Solar Energy Conf., 3A0.4.1, p. 1427 (2014).
- H. Mizuno et al., Jpn. J. Appl. Phys., 55, 025001 (2016).
- H. Mizuno et al., Appl. Phys. Express, 10, 072301 (2017).
- K. Makita et al., Progress in Photovoltaics, to be published.

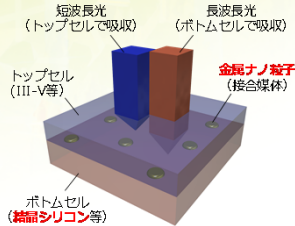
銅を用いた結晶シリコンスマートスタック

水野 英範¹・牧田 紀久夫²・望月 敏光¹・太野垣 健²・菅谷 武芳²・高遠 秀尚¹

産業技術総合研究所 ¹再生可能エネルギー研究センター ²太陽光発電研究センター

スマートスタックとは？

われわれが提案するタンデム型(多接合)太陽電池の作製方法であり、その特徴は金属ナノ粒子配列を異種太陽電池の接合媒体として用いていることである。^[1,2]



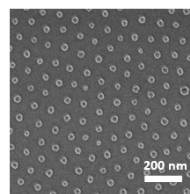
スマートスタック構造 (特許第5875124)

本研究では、さらなる低コスト化を見据え金属ナノ粒子の原料に安価な銅を用いたスマートスタックについて検討を行った。

これまでの実証: Pdを用いたスマートスタック

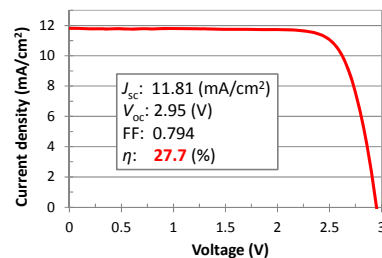
これまで金属ナノ粒子配列の原料としてパラジウム (Pd) を使用することにより GaAs系2接合と結晶Siのスマートスタックで変換効率27.7%等を実証している。^[3]

Pdナノ粒子配列



粒子サイズ: 約40 nm

J-V特性例 (InGaP/GaAs//Si)



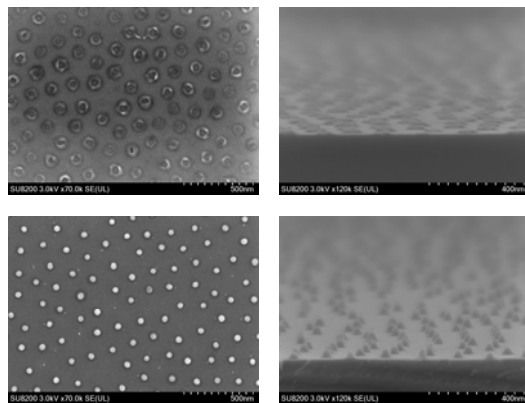
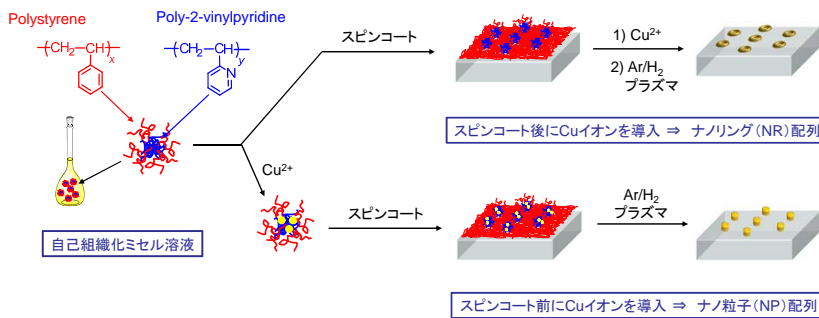
この他、GaAs系2接合+InP系2接合で変換効率33.1%、GaAs系2接合+ClGSe単接合で変換効率24.2%等も達成している。^[4,5]

銅を用いたスマートスタック

1. 銅ナノ構造の作製

これまで用いていたPdナノ粒子配列は、ブロック共重合体 (Polystyrene-block-poly-2-vinylpyridine) の自己組織化薄膜をテンプレートとして作製してきた。しかしながら、同様のプロセスをCuに適用した場合、ナノ粒子ではなくナノリング配列が得られることが判明。Cuナノ粒子配列を得るためにはプロセス変更が必要となった。

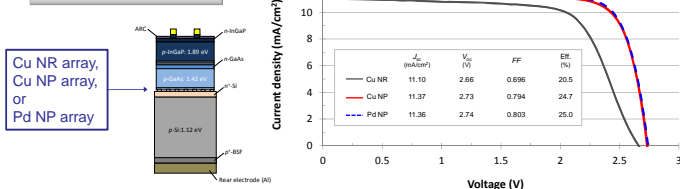
銅ナノ構造作製プロセス



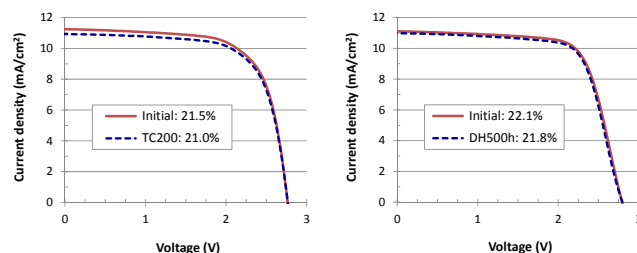
2. 銅ナノリングおよびナノ粒子配列スマートスタックセルのデバイス特性

CuNR、NP配列ともにスマートスタック構造を作製することは可能であったが、NRIはNPIに比べ変換効率が低い(主に接合抵抗が高い⇒FFが低い)ことが確認された。なお、Pd NP配列を用いたスマートスタックセルとの比較では、遜色ない特性であった。長期信頼性に関しては、サーマルサイクル (TC) 試験・ダンプヒート (DH) 試験を行い、顕著な劣化が起こらないことも確認された。

セル構造&特性比較



信頼性検証



参考文献

[1] H. Mizuno, K. Makita, and K. Matsubara, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 191111 (2012).
 [2] H. Mizuno, K. Makita, T. Sugaya, R. Oshima, Y. Hozumi, H. Takato, and K. Matsubara, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 025001 (2016).
 [3] H. Mizuno, K. Makita, T. Tayagaki, T. Mochizuki, T. Sugaya, and H. Takato, *Appl. Phys. Express*, **10**, 072301 (2017).
 [4] R. Oshima, Y. Nagato, K. Makita, Y. Okano, and T. Sugaya, *Grand Renewable Energy 2018*, P-Pv-2-5 (2018).
 [5] K. Makita, H. Komaki, H. Mizuno, H. Sai, T. Sugaya, R. Oshima, H. Shibata, K. Matsubara, and S. Niki, *Proc. 29th EUPVSEC*, 1427 (2014).

まとめ

- ◆ スマートスタックに用いる金属として、高価なパラジウムではなく銅を検討。
- ◆ 銅ナノ粒子配列を用いることにより、Pdの場合と比較しても遜色ないタンデムセル特性が得られることを確認。
- ◆ 銅使用によるデバイス信頼性への影響はTC、DHでは確認されなかった。

謝辞: 本研究は (NEDO) の委託のもと実施されたものであり、関係各位に感謝いたします。

3端子型スマートスタック多接合太陽電池の作製と性能評価

太野垣 健¹、牧田 紀久夫¹、立花 福久²、水野 英範²、大島 隆治¹、高遠 秀尚²、菅谷 武芳¹

¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム

²産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム

研究の目的

- 太陽光発電の利用多様化に向けて太陽電池の高効率化技術の開発が進められており、太陽光の広範なスペクトルを効率よく利用する多接合太陽電池の研究が進められている。
- 多接合太陽電池は、高い変換効率を示す一方で、トップセルとボトムセルの電流マッチが必要であり、太陽光スペクトルの変動によって各サブセルで生成される光電流バランスが崩れた際には効率低下するという問題点がある。
- スペクトル変動による出力低下が抑制できる3端子型多接合太陽電池が提案されており[1]、本研究においては、スマートスタック接合技術を活用して、3端子型のタンデム太陽電池の作製を実証した[2]。

実験

- バックコンタクト型のSiボトムセルとトップセルを接合することにより、3端子型タンデム太陽電池を作製した。

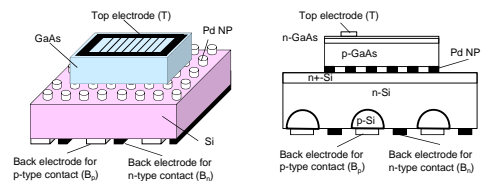


図1:3端子型多接合太陽電池の模式図[2]

結果

- トップサブセルには厚さ2 μmのGaAsを使用し、Au電極を事前に形成した。GaAsサブセルの面積は約0.56 × 0.56 cm²であり、これはボトムSiセルの面積よりも小さい(図2右)
- ボトムセルには、厚さ200 μmのCZ 1~5 Ωcm(100) n型Siウェーハを備えた、研磨された両面ミラーから製造されたバックコンタクト型Siセルを使用した。エミッタとBSFエリアに使用される背面金属電極は、スクリーン印刷と焼成技術によって形成した。

テーブル1:3端子型太陽電池特性[2]

CHARACTERISTICS UNDER OPEN- AND SHORT-CIRCUIT CONDITIONS.				
	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	Fill factor	Power density (mW/cm ²)
T-B _p (B _n -B _p open)	8.81	1.43	0.73	9.22
T-B _p (B _n -B _p short)	8.80	1.04	0.67	6.11
B _p -B _p (T-B _n open)	15.3	0.53	0.54	4.41
B _p -B _p (T-B _n short)	6.5	0.45	0.58	1.69

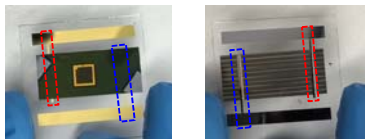


図2:3端子型多接合デバイスの前面(左)および背面(右)のデジタルカメラ画像。破線は、バックコンタクト電極を示す。

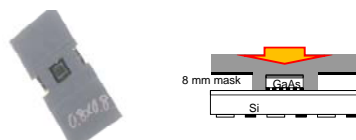


図3:3端子型モジュール(左)と模式図[2]

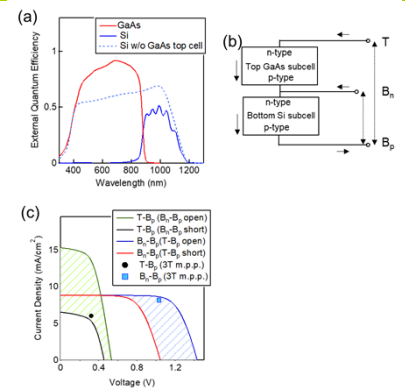


図4 (a) EQEカーブ、(b)3端子型モジュールの等価回路、(c)開放および短絡条件における電流電圧曲線 [2]。

考察

- 照射光スペクトルの変動に対する、発電量の変動を評価した。2端子型と3端子型、4端子型の比較を行った。

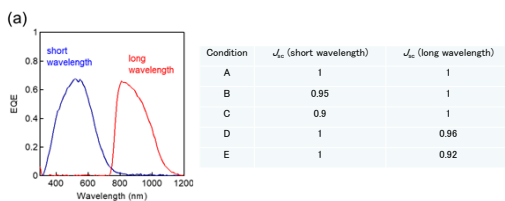
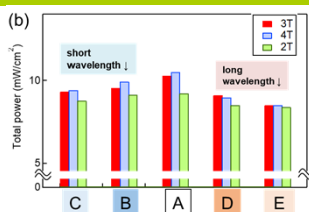


図5: (a) 照射光スペクトルの変動における基準セルの応答スペクトルについて、(b)3端子型、2端子型モジュールの発電量評価[2]



今後の課題:
3端子型モジュールの作製へ向けて

- 通常のモジュール:直列回路 (電流マッチセル間の接続)
- 3,4端子モジュール: 並列回路 (voltage-matched configuration)

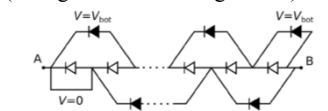


図6:3端子型モジュールの回路[3,4]

- 3端子タンデムの合計電力は、さまざまなスペクトル条件下でもトップおよびボトムサブセルによって生成された電力の合計に等しいことがわかった。

結論

- 導電性ナノ粒子アレイを使用して結合されたIII-Vトップセルとバックコンタクト型Siボトムセルで構成される3端子タンデム太陽電池を実証した。
- 3端子タンデムによって抽出された合計電力を評価したところ、3端子タンデムの合計電力は、さまざまなスペクトル条件下でもトップおよびボトムサブセルによって生成された電力の合計に等しいことがわかった。

本研究は、国立研究開発法人NEDO「超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発」の委託の下で行われた。

参考文献

- T. Nagashima, K. Okumura, K. Murata, and Y. Kimura, "Three-terminal tandem solar cells with a back-contact type bottom cell," Proc. 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1193-1196, 2000.
- T. Tayagaki, K. Makita, T. Tachibana, H. Mizuno, R. Oshima, H. Takato, and T. Sugaya, "Three-terminal tandem solar cells with a back-contact-type bottom cell bonded using conductive metal nanoparticle arrays," IEEE J. Photovoltaics. (under review).
- J. M. Gee, "A comparison of different module configurations for multi-band-gap solar cells", Sol. Cells 24, 147-155 (1988).
- M. Zehender et al., "Module interconnection for the three-terminal heterojunction bipolar transistor solar cell", AIP Conf. Proc. 2012, 040013 (2018).

3端子スマートスタック多接合セルを用いた 光無線給電/通信技術の開発

渡辺 裕¹・青木 優馬¹・中西 明日可¹・馬場 将亮¹・牧田 紀久夫²・菅谷 武芳²・山田 昇¹
¹長岡技術科学大学
²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム

背景・目的

無線電力伝送技術が近年注目されている

光無線給電

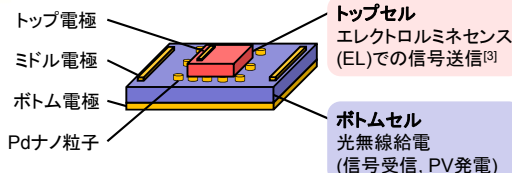
エネルギー伝送距離が長い
装置の小型・軽量化が可能

移動体, 家電, 探査機等への活用

3端子スマートスタック多接合セル^[2]
を光無線給電の受光素子に適用



PV搭載車イメージ^[1]



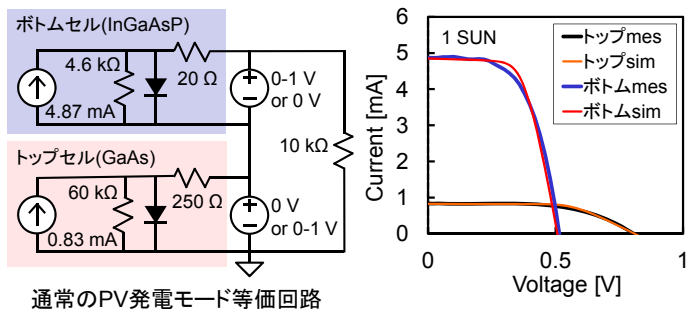
光無線給電(PV発電)と通信を同時に実現

光無線給電/通信デバイス
として利用可能か検証

- ・シミュレーション
- ・実験

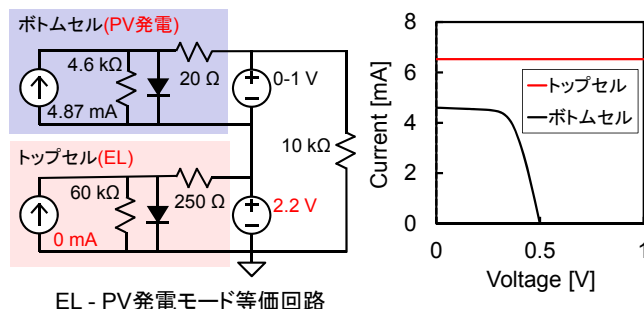
太陽電池の多機能化

回路シミュレーションによる動作検証



通常のPV発電モード等価回路

→ 等価回路のパラメータ同定

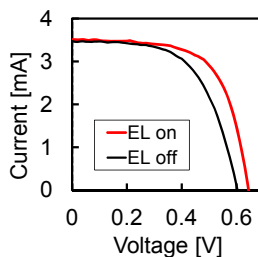
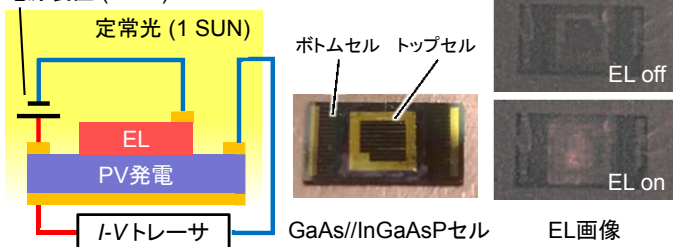


EL - PV発電モード等価回路

→ EL(トップ)とPV発電(ボトム)の同時動作は可能

検証実験1 EL(トップ) - PV発電(ボトム)モード

電源装置 (2.2 V)

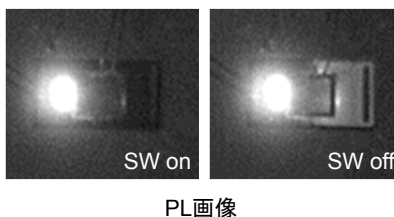
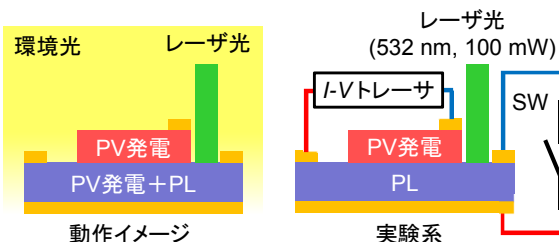


ボトムセルI-V特性

	EL off	EL on
I_{sc} [mA]	3.47	3.51
V_{oc} [V]	0.60	0.64
P_{max} [mW]	1.24	1.46
FF [-]	0.59	0.65

- ・ELとPV発電の同時動作を確認
- 発電+通信, 双方向通信が可能

検証実験2 PV発電(トップ) - PL(ボトム)モード



- ・SWに同期したPL発光を確認
- ・レーザー照度でPL輝度変化
- PLも送信に利用可能

まとめ

- ・トップセルEL状態でボトムセルのPV発電を確認
- 3端子スマートスタック多接合セルを光無線給電/通信デバイスとして利用可能
- ・ボトムセルでのPL発光(レーザー照度, SWに同期)を確認
- 発電しながら, PLによる光通信が可能

参考文献

[1] NEDO, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101114.html (2019).
 [2] H. Mizuno et al., Jpn. J. Appl. Phys. 55, 025001 (2016).
 [3] W. D. Leon-Salas and X. Fan, IEEE Trans. Circuits and Systems-I 66, 1981 (2019).

GaAs 3重構造 on Si スマートスタック 4接合太陽電池の作製

中元 嵩^{1,2}・牧田 紀久夫¹・太野垣 健¹・大島 隆治¹・相原 健人¹・岡野 好伸²・菅谷 武芳¹

- 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム
- 東京都市大学 総合理工学研究科 情報専攻

研究の目的

Siボトムセルへの適用 ⇒ **低電流型のトップセル**

現状：2接合太陽電池の薄膜化で光を透過

課題：トップセルの効率を意図的に下げている



解決策：低電流かつ効率低下させない**3接合太陽電池の開発**

実験例

InGaP/AlGaAs/GaAs ⇒ MBEの場合AlGaAsの特性が悪い [1]

InGaP/InGaAsP/GaAs ⇒ InGaAsPの組成制御が困難 [2]

InGaP/GaAs/GaAs ⇒ 良好な結果 [3]

GaAsを多重化すると更なる有用性がある

GaAs多重化構造

多接合太陽電池の新たなトップセルとして提案

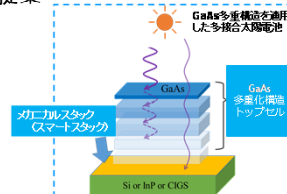
特徴：

・積層構造が単純で**結晶成長が容易**
⇒H-VPE法に適用が可能

・多重数により**電圧・電流値の制御**が可能
⇒様々なケースに対応可能
ex. 太陽電池, 光電力伝送 [4], 太陽光水分解

課題：

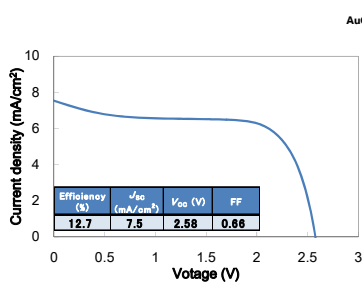
・電流整合条件を満たさないと高効率化が困難



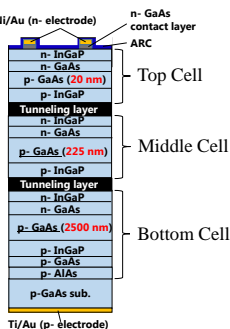
実験

GaAs系トップセルを比較する

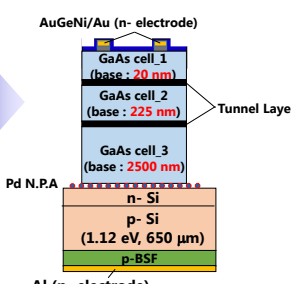
⇒GaAs 3重構造をSiボトムセルに適用 (スマートスタック)



GaAs 3重構造太陽電池のJ-V特性 (トップセル)



GaAs 3重構造太陽電池の構造図

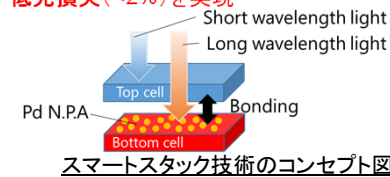


今回作製した GaAs 3重構造 on Siの構造図

スマートスタック技術 [5]

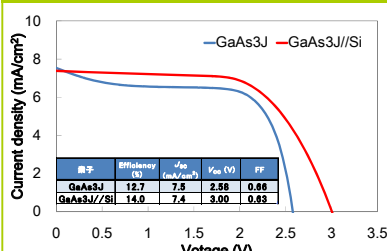
・接合界面に金属ナノ粒子 (Pd.N.P.A) を介在させたセル接合技術
・金属ナノ粒子はブロック共重合体を使用

接合面での**低抵抗 (<1 Ωcm²)**
低光損失 (<2%)を実現

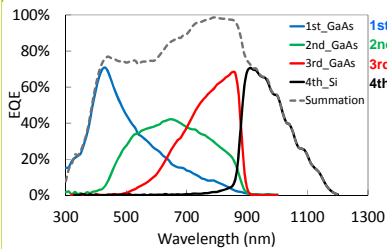


スマートスタック技術のコンセプト図

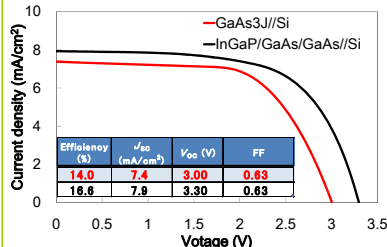
結果と考察



GaAs 3重構造 on SiのJ-V特性



GaAs 3重構造 on SiのEQE特性



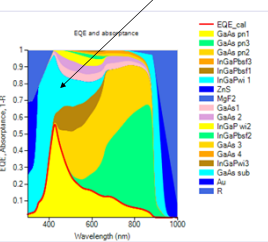
GaAs系トップセル on SiのJ-V特性比較

V_{oc} : 2.6 V ⇒ 3.0 V

スマートスタックによる**多接合化の成功**を確認

η : 12.7% ⇒ 14.0%

短波長側のロス Window層の吸収



GaAs 3J//Si ⇒14.0%
InGaP/GaAs/GaAs//Si ⇒16.6%
GaAs薄膜 (20 nm) による**トンネル層の劣化**か

結論

多接合太陽電池の新たなトップセルとしてGaAs多重化構造を提案

- Siボトムセルに適用を目指した**GaAs 3重構造の作製に世界初の成功**
 V_{oc} : 2.58 V η : 12.7%
- スマートスタックによる**GaAs 3重構造 on Siの作製に成功**
 J_{sc} : 7.4 mA/cm² V_{oc} : 3.00 V FF: 0.63 η : 14.0%
- GaAs 3重構造のEQEにおける**短波長領域の劣化要因**の追求
⇒InGaPを用いたWindow層の吸収
- GaAs系トップセルの比較を実行
GaAs 3J//Si: 14.0% InGaP/GaAs/GaAs//Si: 16.6%

今後の予定：
トンネル層の劣化要因の検証

謝辞

本研究は、国立研究開発法人 NEDO「超高効率・低コスト III-V 化合物太陽電池モジュールの研究開発」の委託の下で行われた。

参考文献

- [1] T. Sugaya *et al.*, Japanese Journal of Applied Physics, 54, 8S1, 08KE02 (2015).
- [2] T. Sugaya *et al.*, Journal of Vacuum Science & Technology B, 35, 2, 02B103 (2017).
- [3] T. Sugaya *et al.*, Applied Physics Express, 11, 5, 052301 (2018).
- [4] T. Nakamoto *et al.*, Applied Physics Express, 12, 10, 102015 (2019).
- [5] H. Mizuno *et al.*, Japanese Journal of Applied Physics, 55, 2, 025001 (2016).

原子層堆積(ALD)法により作製したSiO₂膜の評価

薄 謙志郎^{1,2}・望月 敏光¹・棚橋 克人¹・高遠 秀尚¹・山口 克彦²

¹産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム、²福島大学

研究の目的

- 結晶シリコン太陽電池の発電効率向上のため、表面再結合の抑制のために絶縁膜によるパッシベーション効果の研究が行われてきた。
- 特に、熱酸化法により成膜された酸化膜の研究結果は数多く存在しているが、シリコン酸化膜の成膜法の中でも、Atomic Layer Deposition (ALD)法により成膜された酸化膜の物性評価における研究が少ない。
- 本研究では、ALD法により成膜した酸化膜の物性評価を行い、従来法による酸化膜との性能比較を行った。

実験方法

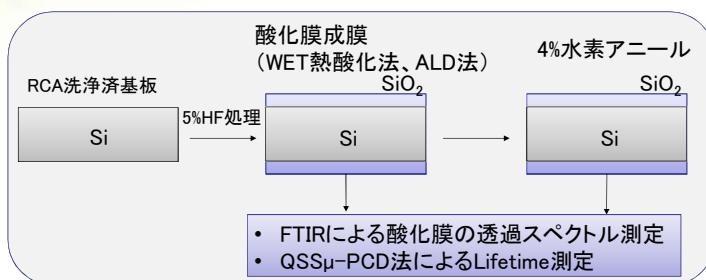


図1 本実験のフローチャート

- 図1に本実験のフローチャートを示す。
- 本実験では、単結晶シリコン基板の両面に、WET熱酸化法、ALD法の2種類の酸化膜を成膜し測定を行った。
- 表1に本実験にて使用した単結晶シリコン基板の物性パラメータについて示す。
- 表2に酸化膜の成膜条件について示す。表2中の酸化膜厚は、酸化膜の屈折率を1.46に固定してエリプソメータにより測定した。
- FTIR測定、Lifetime測定それぞれ、RCA洗浄後の酸化膜成膜処理を行っていない基板をリファレンスとして測定した。

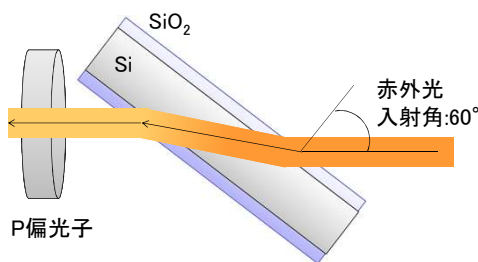


図2 FTIRによる透過法測定概要図

表1 使用した単結晶シリコン基板パラメータ

Type	Polished condition	Thickness [μm]	N _A [cm ⁻³]	Resistivity [Ohm*cm]
CZ	P Mirror/Rapping	625	1.3E+15	10.0

表2 酸化膜成膜条件

SiO ₂ Deposition method	Temp. [°C]	Time [min]	SiO ₂ thickness (one side) [nm]	Temp. [°C]	Time [min]
ALD	300	60	5±0.1	→ 4% H ₂ anneal	450 30
WET	800	30	12±0.1	→ 4% H ₂ anneal	450 30

FTIR測定結果・考察

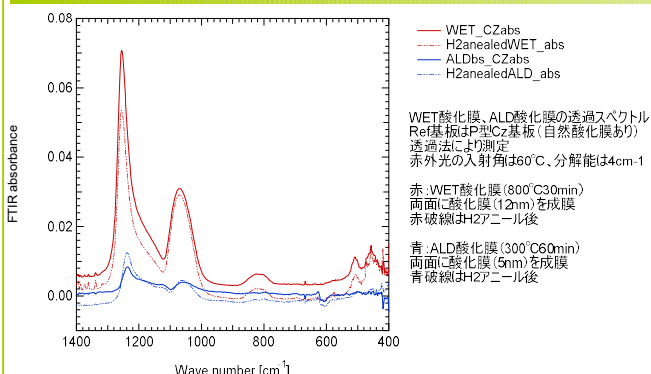


図3 WET酸化膜、ALD酸化膜の透過スペクトル比較

- 図3に示す酸化膜の透過スペクトルでは、酸化膜の振動モードのピークシフトが見られなかった。
- WET酸化膜とALD酸化膜では酸化膜の厚さが約2倍違いがあるが、ピークの大きさは膜厚差以上の違いが見られた。
- ALD法による成膜では、酸化膜の振動モードに対応する結晶構造が熱酸化と比べ少ないと考えられる。

Lifetime測定結果・考察

表3 WET酸化膜、ALD酸化膜のLifetime測定結果比較

Deposition method	Average Lifetime [μs]
ALD	12
ALD H ₂ anneal後	44
WET	39
WET H ₂ anneal後	190
No treatment wafer	12

- 今回の測定結果からは、ALD酸化膜のパッシベーション効果が、従来の熱酸化膜よりも小さいことが見られた。
- 水素アニール未処理段階では、成膜前の値が変化しない結果が見られ、WET酸化法とALD法による酸化膜とシリコン基板との界面での結合状態の違いの影響が考えられる。

結論

- 今回の実験結果からは、従来法の代替案としてALD法により成膜した酸化膜を使用できるほどのパッシベーション効果は見られなかった。
- 測定結果からは、従来の酸化膜との結晶構造の違いによる影響が見られたため、ALD酸化膜の詳細な物性評価を行いたいと考えている。

参考文献

- [1] Vasyli Kuryliuk et al., "A model for predicting the thermal conductivity of SiO₂-Ge nanoparticle composites", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 17, 13429-13441, 2015.
 [2] Sang M. Han et al., "Detection of combinative infrared absorption bands in thin silicon dioxide films", *Appl. Phys. Lett.*, 70, 3269-3271, 1997.

イオン注入結晶シリコン太陽電池の 高効率化に向けた基板の評価と高品質化

棚橋克人・立花福久・森谷正昭・木田康博・宇都宮智・白澤勝彦・高遠秀尚
産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム

研究の目的

- ・結晶シリコン太陽電池の低コスト化に向けたプロセス技術としてイオン注入法がある。
- ・イオン注入法の特徴として、不純物層形成における高い面内均一性やハードマスクの利用による工程数の削減が挙げられるが、活性化のための高温アニールなど課題もある。
- ・結晶シリコン太陽電池のセル作製プロセスにおけるイオン注入法の特徴、課題とその解決法を報告する。

イオン注入プロセスの特徴と課題

(1) 拡散層の面内均一性

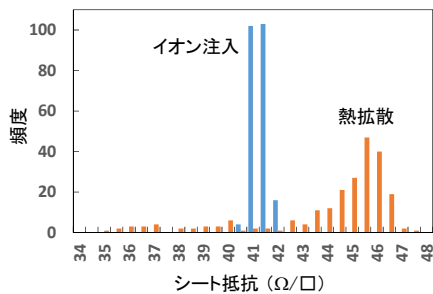


図1 ボロン拡散層のシート抵抗の面内分布

(2) マスク注入

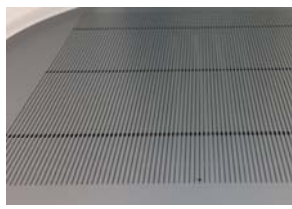


図2 FREAが開発したシリコン製のステンシルマスク

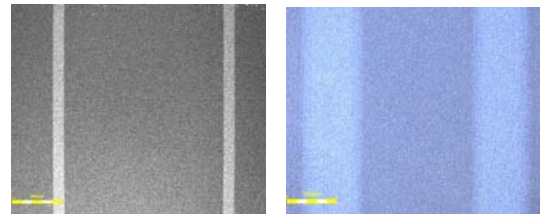


図3 マスク注入像

(3) イオン注入両面受光型太陽電池の特性に対する基板の影響

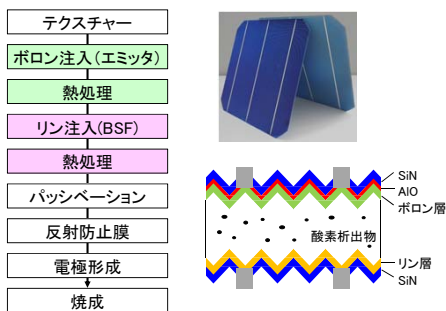


図4 イオン注入両面受光型セルのプロセスフロー

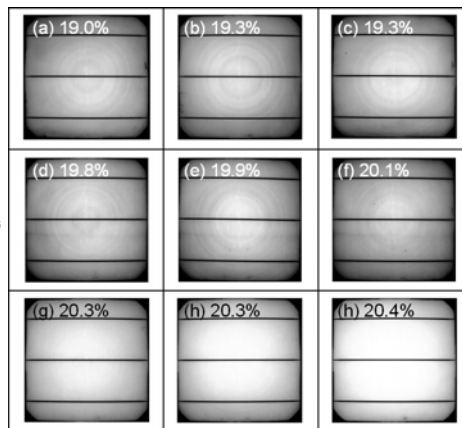


図5 各種変換効率の太陽電池セルのPL像

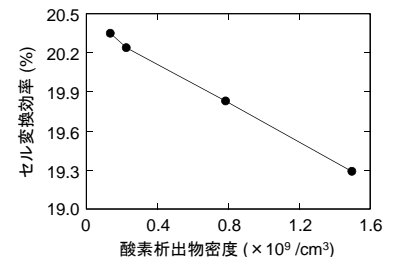


図6 酸素析出物密度と太陽電池セル変換効率の関係

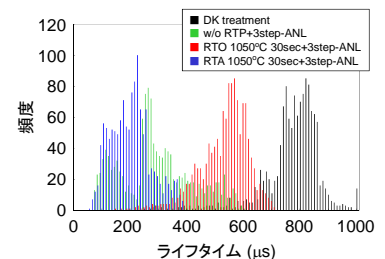


図7 ランプアニールによるライフタイムの変化

結論

- ・イオン注入法によるボロン拡散層の基板面内分布は熱拡散法(BBr₃)のそれに比べて均一性が非常に高い。
- ・FREAが開発したシリコン製のステンシルマスクを用いることにより、従来法(カーボン製マスク)よりも細線な拡散層を形成することが可能である。
- ・マスク注入法によればフォトリソグラフィーを必要としないパターンニングが可能であり、太陽電池セル作製の工程数を大幅に削減できる。
- ・ボロン注入においては高温の活性化アニールが必要であり、基板の酸素析出が課題である。
- ・ランプアニールによってプロセス中の酸素析出を抑制することが可能。

謝辞

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援のもとに実施致しました。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

1. "Impact of Post-Implantation Annealing Conditions on Electrical Characteristics of a Phosphorus-Implanted Emitter Crystalline Silicon Solar Cell," K. Tanahashi, M. Moriya, Y. Kida, S. Utsunomiya, T. Fukuda, K. Shirasawa, and H. Takato, IEEE Journal of Photovoltaics, 7, 741 (2017).
2. "A Novel Approach for Suppression of Oxygen Precipitation in CZ Silicon Wafers of Solar Cells by Pre-Thermal Treatment," K. Tanahashi, T. Fukuda, K. Shirasawa, and H. Takato, AIP Conference Proceedings, 1999, 130018 (2018).
3. "Effect of Oxygen Precipitation in Silicon Wafer on Electrical Characteristics of Fully Ion-Implanted n-Type PERT Solar Cells," K. Tanahashi, T. Tachibana, K. Sueoka, M. Moriya, Y. Kida, S. Utsunomiya, K. Shirasawa, and H. Takato, ECS Journal of Solid State Science and Technology, 8, 596 (2019).

両面受光-裏面電極型結晶シリコン太陽電池の作製と評価

立花 福久、棚橋 克人、望月 敏光、白澤 勝彦、高遠 秀尚
産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム

背景

両面受光-裏面電極型結晶Si太陽電池

- ✓ 受光面に電極の無い、裏面電極構造
- ✓ スクリーン印刷法による電極形成
- ✓ 細線電極により、裏面からの光取り込みが可能(両面受光型)

⇒ 需要の高まりが予想される本構造のこれまでの開発状況について報告を行なう

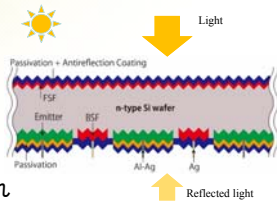
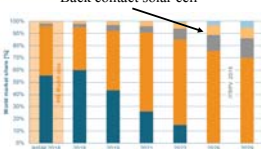
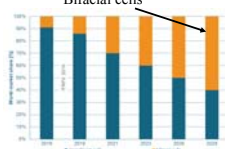


Fig. 1 Bifacial IBC solar cell.



~10% market share in 2019



~60% market share in 2019

Data from ITRPV roadmap, March 2019

実験

セル構造

N型結晶Si基板 (1~3 Ω cm)
基板厚さ: ~160 μm
セル面積: 125 mm²

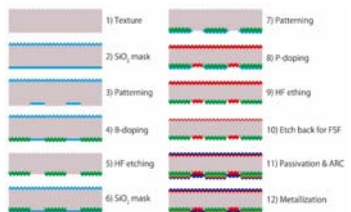
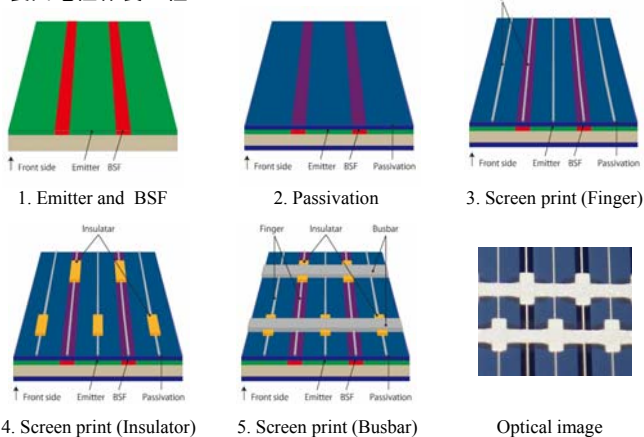


Fig. 2 Process flow.

裏面電極作製工程

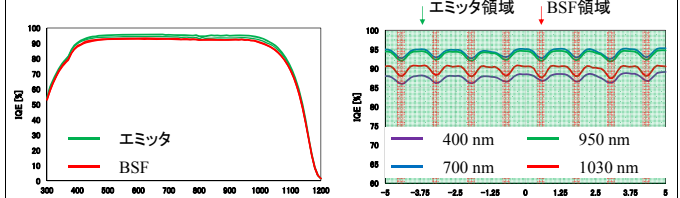


セル評価結果

モニターサンプルを使用した各領域における再結合特性結果

領域 (シート抵抗)	パッシベーション膜	J_0 [fA/cm ²]
エミッタ (~80[Ω/sq.])	AlO _x /SiN _x	50±6
BSF (~100[Ω/sq.])	SiO ₂ /SiN _x	293±10
FSF (~250[Ω/sq.])	SiO ₂ /SiN _x	84±20

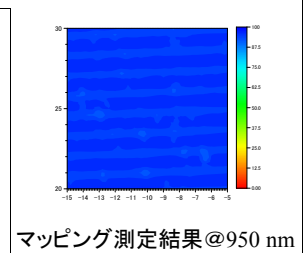
内部量子効率測定結果



各領域におけるスペクトル測定結果

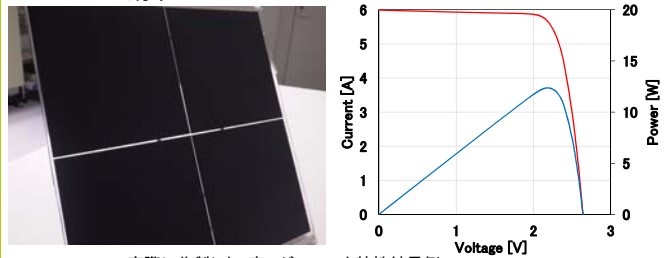
ラインスキャン測定結果

- ✓ 各領域における再結合特性結果から、更なる特性向上のためにはBSF領域における再結合特性の改善が必要である。
- ✓ 内部量子効率測定の結果から、BSF領域の狭小化によるelectrical shading lossの抑制ができていることが確認できる。



モジュール特性

モジュール効率: 19.4%



実際に作製した4直モジュールと特性結果例

- ✓ 4直モジュールの作製、19.4%の効率を達成した。

セル特性結果

- ✓ 多層印刷構造、BSF拡散領域の狭小化、エミッタおよびBSF領域の比率の変更により、セル特性の向上を図った。
- ✓ 両面特性は約0.75を得ている。
- ✓ さらなる高効率化のためには開放電圧の向上が必要となる。

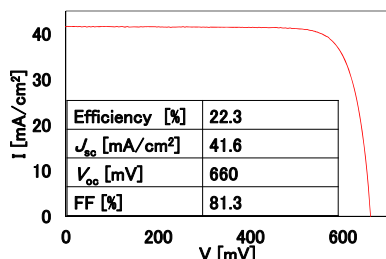


Fig. 3 IV properties of our best bifacial IBC cell (in-house measurement)

Efficiency [%]	22.3
J_{sc} [mA/cm ²]	41.6
V_{oc} [mV]	660
FF [%]	81.3

まとめ

- ✓ 多層印刷構造とすることで、バスバー部分で引き起こされていた特性劣化(electrical shading loss)を抑制した。
- ✓ 両面受光-裏面電極型結晶シリコン太陽電池の開発を進め、現在、変換効率22.3%(セル面積: 156.25 cm²)を得た。
- ✓ 表面再結合特性評価から、BSF領域における再結合特性の改善がセル特性向上には必要であることを確認した。
- ✓ 4直モジュールでモジュール効率19.4%(in-house測定)を得た。
- ✓ 今後、開放電圧の向上を進めることで、更なる高効率化へと繋げる。

謝辞

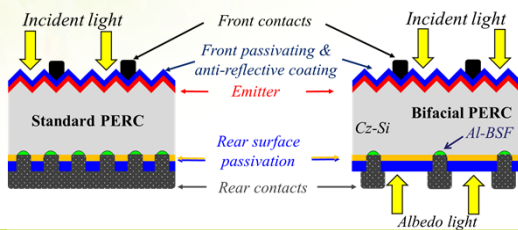
本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援のもとに実施されました。関係各位に感謝申し上げます。

Developed Al rear grids for bifacial PERC concept

Supawan Joonwichien, Yasuhiro Kida, Masaaki Moriya, Satoshi Utsunomiya,
Katsuhiko Shirasawa, Hidetaka Takato
産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム

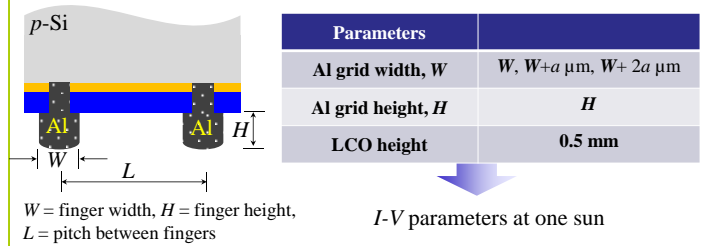
Upgrading standard PERC with bifacial concepts

Bifacial solar cells can absorb irradiance from the front and rear sides, resulting in higher energy yield for the same module area as compared to their traditional solar panels.



Experimental

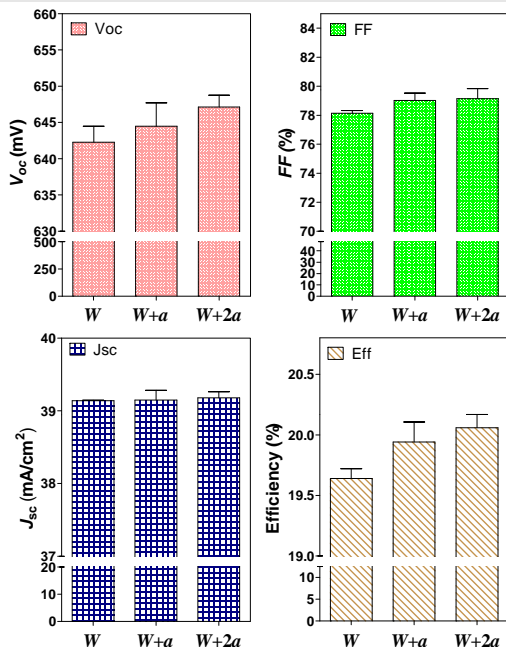
PERC solar cells with different rear Al grid designs were fabricated in order to determine the influence of metallization fraction on $I-V$ parameters.



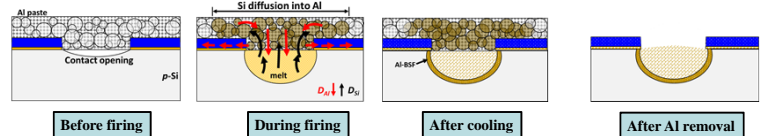
Results • Discussion

One-sun $I-V$ parameters of bifacial PERCs

The observed results clearly show an increase in the open-circuit voltage (V_{oc}), fill factor (FF), and conversion efficiency values with an increase in the Al grid width, and the change in the short-circuit current density (J_{sc}) was negligible. The improved V_{oc} was possibly due to the high quality of surface passivation, which relates to the Al diffusion into passivation stacks mechanism.

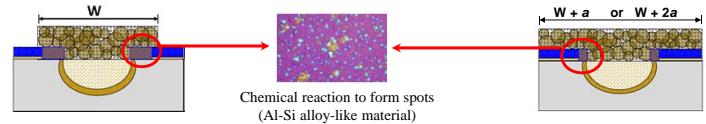


Physical mechanism of the local contact formation of rear-side of PERC



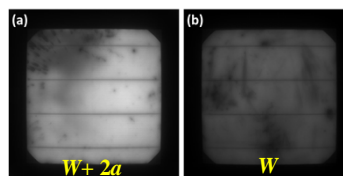
- At the peak firing temp., liquid Al penetrates and comes into contact with the Si surface in the openings, wherein the Al at the interface is saturated by Si first. Then, Si subsequently dissolves into the liquid Al mass from edges of the interface in all directions until the maximum Si concentration of Si in the melt reaches equilibrium or the Al-Si liquid saturates, according to the liquids line in the phase diagram [1]–[3].
- During cooling, the solubility of Si in the Al-Si melt decreases, and Si diffuses back to the contact site; the back-diffusion process is driven by the difference in the Si concentration at the interface. The epitaxial recrystallization of Si heavily doped with Al atoms starts to form the Al-BSF at the bottom of the contact sites.

Possible reasons for different Al grid designs effects on rear surface passivation quality and solar cell performance [4]



- The Al atoms from Al melt diffuse in all directions, either lateral or vertical to the surfaces and react with the Si in the films, resulted in the formation of the Al-Si alloy-like material present in the majority of the Al printed areas.
- The chemically reacted areas were suspected to be decreased as the screen width (W) increased, where the wider screen would result in less time for Al diffusion into passivation stacks.

In order to confirm the recombination activity of sample surfaces, photoluminescence imaging (PL) measurement was used. As a result, PL contrast was diminished and these abundant spots were likely to cause the degradation in the surface passivation quality, leading to a reduced V_{oc} of a cell.



Note that bright and dark regions in the PL images indicate the lower and higher surface recombination activities, respectively.

(a) $W+2a$: Full-area screen-printed PERC with less spots (due to chemical reaction).
(b) W : Full-area screen-printed PERC with spots covering a whole surface area.

References

- [1] J. L. Murray and A. J. McAlister, "The Al-Si (Aluminum-Silicon) system," Bulletin of Alloy Phase Diagrams, vol. 5, p. 74, 1984. doi:10.1007/BF02868729
- [2] S. Joonwichien, S. Utsunomiya, Y. Kida, M. Moriya, K. Shirasawa, and H. Takato, "Improved rear local contact formation using Al paste containing Si for industrial PERC solar cell," *IEEE J. Photovol.*, vol. 8, no. 1, pp. 54–58, 2018.
- [3] S. Joonwichien, M. Moriya, S. Utsunomiya, Y. Kida, K. Shirasawa, and H. Takato, "Metal-induced recombination losses associated with Si present within passivation layers and aluminum paste for PERCs," in *Proc. 46th IEEE PVSC*, 2019.
- [4] S. Joonwichien, M. Moriya, S. Utsunomiya, Y. Kida, K. Shirasawa, and H. Takato, "Understanding metallization-induced losses mechanism in rear-side of fully screen-printed p -type PERC solar cells," *IEEE J. Photovol.*, to be published (2019).

コロナ放電とレーザーテラヘルツエミッション顕微鏡による電界効果パッシベーションの評価法

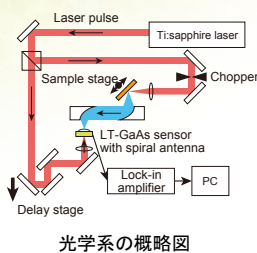
望月敏光、棚橋克人、高遠秀尚

産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム

研究の目的：レーザーテラヘルツエミッション顕微鏡 (LTEM) による素子評価の物理的解釈と発展

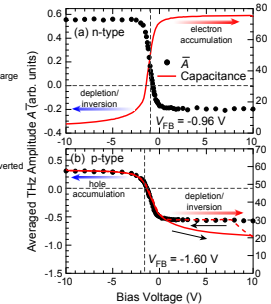
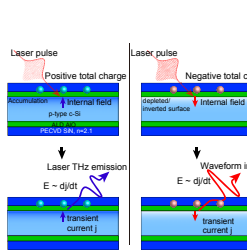


LTEM実証機外観



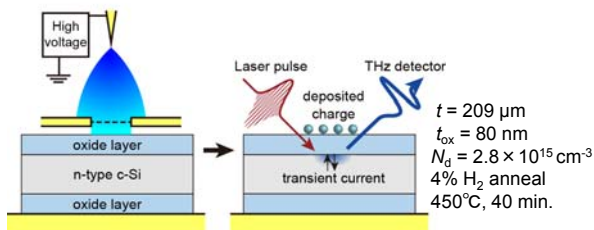
光学系の概略図

レーザーテラヘルツエミッション顕微鏡(LTEM)は、半導体素子にパルス光を照射して出てくるテラヘルツ放射の波形を、時間分解分光法により測定する。さらにその位置依存性をマッピングでき、Si-MOS素子の異常検出などに応用されてきた[1-3]。



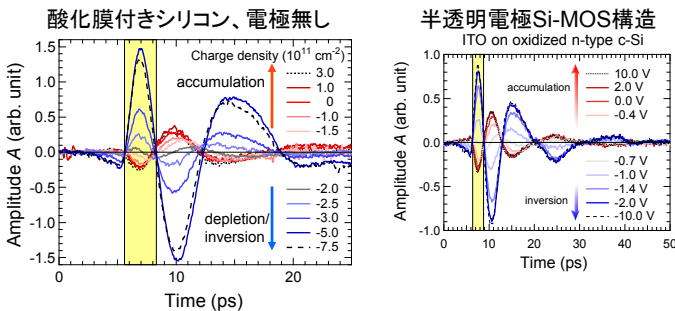
LTEMがSi系で何を見ているのかの定量的・系統的検証が無かったため、異常の原因や性質、そもそもLTEM像の異常が素子の異常なのか不明だったが、以前我々は容量-電圧(C-V)法と同じ情報を読み取っていることを示し、更なる応用のため非接触測定法への展開を試みている[4]。

実験



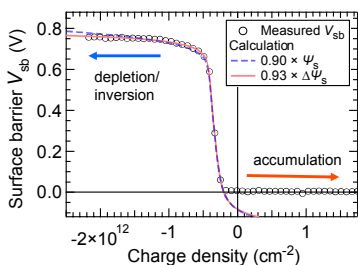
- 電極のない酸化膜付きシリコンの表面電場を、コロナ放電によってイオンを吹き付けることにより操作しつつLTEMで測定
- 表面電場の評価手法として先行するV-Q法とLTEMを定量比較
- ライフタイム測定も併せ、酸化膜についての理論計算と比較

結果

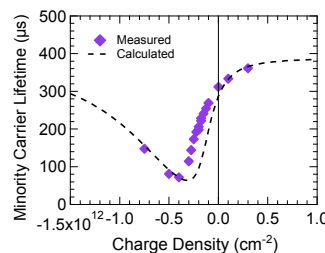
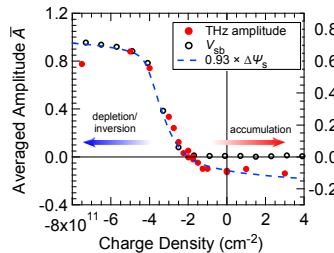


- Si-MOSに外部電圧をかけた時と同様に、THz放射の波形が反転
- 電極が無い分THzの信号はより強くなりS/N比が向上
- 酸化膜中に 2×10^{11} 個/cm²の電荷があると判断できる

考察



ψ_s : 表面電圧そのもの
 $\Delta\psi_s$: $\Delta n = 0$ のときと、 $\Delta n = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のときの差分



- V-Q法は空乏層あるいは反転層のある表面の表面電圧を測定できる
- LTEMは電荷蓄積領域も評価できる
- ライフタイムも表面電圧で変わる
- 電界効果パッシベーションに関する計算と合う

結論

- ◎ 理論的な考察から、今回作製した酸化膜試料について、コロナ放電によるV-Q法が空乏/反転領域の表面電圧をよく測定しており、ライフタイムもそれによく追従している系になっていることが分かった
- ◎ そのうえでLTEMによって測定されるTHz放射が表面電圧とよく一致しており、電荷蓄積領域まで感度が良いことが分かった [5]
- ! トンネル酸化膜やヘテロ接合系などの、非絶縁膜下の表面電圧の評価法として展開していく

参考文献

[1] M. Tonouchi, Nature Photonics, **1**, 97 (2007).
 [2] H. Nakanishi et al., AIP Adv., **5**, 117129 (2015).
 [3] H. Murakami et al., Photonics Res., **4**, A9 (2016).
 [4] T. Mochizuki et al., Appl. Phys. Lett., **110**, 163502 (2017).
 [5] T. Mochizuki et al., J. Appl. Phys., **125**, 151615 (2019).

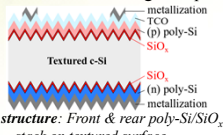
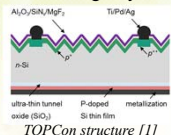
ALD based TOPCon-type solar cells on textured silicon wafer

Mickaël Lozac'h¹, Shota Nunomura¹, Takuya Matsui¹ and Koji Matsubara¹
¹ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Research Center for Photovoltaics (RCPV) – Advanced Processing Team



1 – Purpose

- Main objective:** Fabrication of a **front and rear TOPCon-type structure** using **p-type and n-type Poly-Si/SiO_x stacks** for crystalline silicon solar cells on **textured surfaces**.
- Ultrathin SiO_x layer** realized by **ALD**: precise control of the thickness at **atomic scale** to manage layers **below 2 nm** for the tunneling transport of carriers.



Challenges: Keep **high passivation properties**, especially for the **p-type poly-Si/SiO_x stack** at the front, and on **textured surface**.

This work:

- Underlines the **roles of H atoms** for p-type poly-Si/SiO_x stack, and the **stability**. Method proposed: **cyclic dehydrogenation-rehydrogenation (D-R)**.
- Present **solar cells characteristics** using the target structure.

[1] A. Richter et al., *SOLMAT* 173 (2017) 96-105.

2 – Experimental details

Fabrication processes:

- Wafers:** (n-type) Fz-Si <100>, 280 μm, 1-5 Ωcm.
- Cleaning:** 4-step chemical process [2]
- Texturization:** KOH self-heated at 80°C for 15 min.
- SiO_x layers:** deposited by **ALD**.
- a-Si:H layers:** deposited by **PECVD**.
- High-T annealing (high-TA):** 820 °C for 1 h.
- Hydrogen plasma treatment (HPT):** 300 °C, 1 min

Characterization techniques:

- Minority carrier lifetime (MCLT) measurement at 1 × 10¹⁵ cm⁻³ injection level (quasi steady-state photoconductance, **QSSPC**)
- Thickness and bandgap of the films deposited (Spectroscopic ellipsometry, SE)
- Study of Si-H bindings at wavelength 2000-2100 cm⁻¹, and Si-O bindings at 1050 cm⁻¹ (**FTIR**)
- Stoichiometric ratio x of SiO_x (**FTIR**)
- Crystallinity of amorphous silicon layers after thermal annealing (**Raman** spectroscopy)

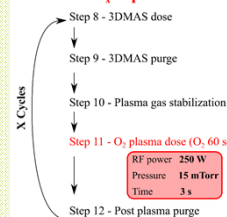
- For D-R cyclic method: characterizations done after **low-TA** (450 °C), **high-TA** (850 °C), and after **HPT**.

Atomic Layer Deposition (ALD) Process: Oxford Instruments FlexAL system

- Substrate holder: **300°C**
- Spectroscopic ellipsometry **in situ** using **Cauchy Model**
- Inductively Coupled Plasma (ICP) with RF frequency: **13.56 MHz**



SiO_x deposition



- Precursor 3DMAS: **Tris (dimethylamino) silane**

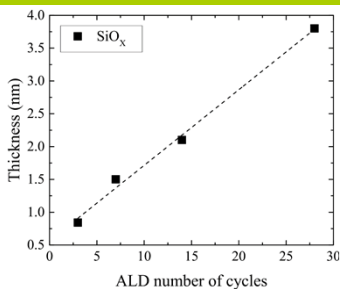


Residuals N-(CH₃)₂ purged

Amorphous layers of: Si / O / Si / ...

[2] S. N. Granata et al., *Energy Procedia* 27 (2012) 412-418.

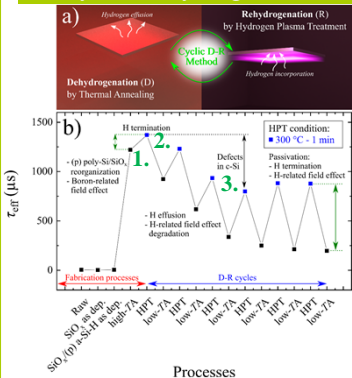
3 – Thickness control at atomic scale



- Precise control of the thickness of SiO_x: **linear dependence** with the **number of cycles** during ALD process [3].

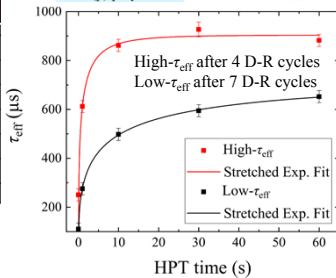
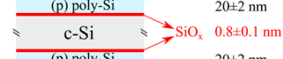
[3] M. Lozac'h et al., *SOLMAT* 185 (2018) 8-15.

4 – Cyclic Dehydrogenation-Rehydrogenation Method (D-R cycles)



M. Lozac'h et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 58 (2019) 050915.

Structure used for cyclic D-R method:

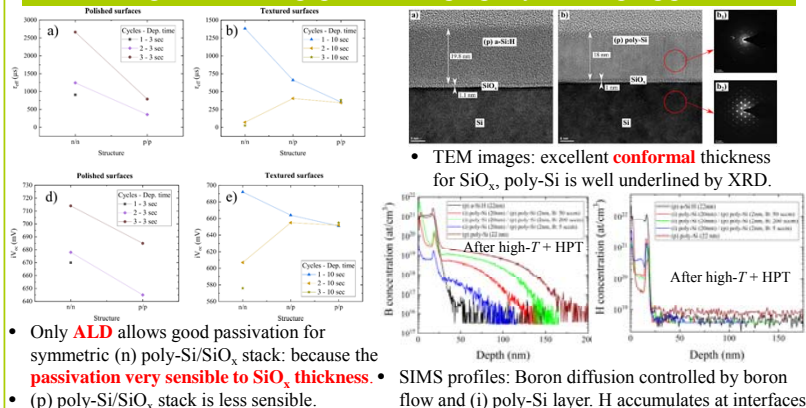


- Low-TA: boron diffusion not activated.
- Depletion and reintroduction of H can not explain the lifetime difference after the 1st HPT and 4th-5th D-R.
- Passivation process involves 2 roles of H: DBs termination and H-related field effect.
- After high-T, **SiO_x stoichiometry is 1.7** [3].
- Lifetime recovery is a stretched exponential [4]: relaxation of a disordered system, i.e. **dispersive nature** of (p) poly-Si/SiO_x stack due to non-stoichiometric ratio.

[3] M. Lozac'h et al., *SOLMAT* 185 (2018) 8-15.

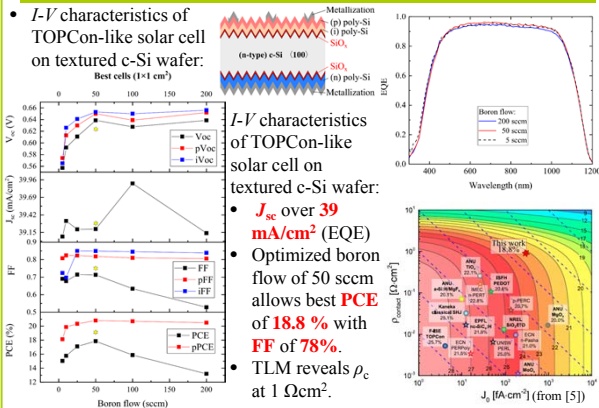
[4] S. De Wolf et al., *Appl. Phys. Lett.* 93 (2008) 032101.

5 – After high-T annealing: passivation property, and doping profile



- Only **ALD** allows good passivation for symmetric (n) poly-Si/SiO_x stack: because the **passivation very sensible to SiO_x thickness**.
- (p) poly-Si/SiO_x stack is less sensible.
- TEM images: excellent **conformal** thickness for SiO_x, poly-Si is well underlined by XRD.
- SIMS profiles: Boron diffusion controlled by boron flow and (i) poly-Si layer. H accumulates at interfaces.

6 – Lifetime recovery



- I-V characteristics** of TOPCon-like solar cell on textured c-Si wafer: Best cells (1×1 cm²)
- I-V characteristics** of TOPCon-like solar cell on textured c-Si wafer:
- J_{sc} over 39 mA/cm²** (EQE)
- Optimized boron flow of 50 sccm allows best **PCE of 18.8 %** with **FF of 78 %**.
- TLM reveals **ρ_c at 1 Ωcm²**.

[5] J. Melskens et al., *IEEE J. Photov.* 8 (2018) 373-388.

7 – Summary

- Cyclic dehydrogenation-rehydrogenation method** is proposed to underline the roles of H atoms for the passivation of (p) poly-Si/SiO_x stack and show the good thermal stability with τ_{eff} remaining at 1.2 ms after 1 D-R cycle.
- Successive D-R cycles does not modify the bonds configuration, the **stoichiometric ratio of SiO_x remains at 1.7**. It does not activate the boron diffusion. Only the H atoms are involved, which underlines **two roles**: one is the DBs termination, and the H-field effect related. ⇒ H induces positive charging for SiO_x with x < 2 [6].
- ALD-SiO_x double sided TOPCon-like solar cells** efficiency is presented on textured c-Si wafer with best PCE about **18.8 %**, **J_{sc} of 39 mA/cm²** (for front grid) and FF of 78 %.
- The **V_{oc}** is about 639 mV and could be improved by using efficient hydrogen source.
- Further improvements in term of PCE are expected by optimizing the **ohmic contacts**, and decreasing the **saturation current density (J₀)**, still about 300 fA/cm².

[6] W. L. Warren, *Appl. Phys. Lett.* 68 (1996) 2993.

8 – Acknowledgments

The authors acknowledge Aiko Sato, Toshiki Oku, and Yoshiki Sato, for the fabrication process support. This research was supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) Project. The authors would like to thank Masashi Yamazaki for his expertise on ALD system. This work was partially conducted at the AIST Nano-Processing Facility, supported by "Nanotechnology Platform Japan" Program of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan.



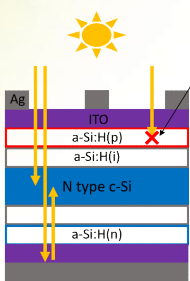
VHF-PECVDを用いて成膜したp型ナノ結晶シリコンのヘテロ接合太陽電池への応用

海汐 寛史・松井 卓矢・齋 均

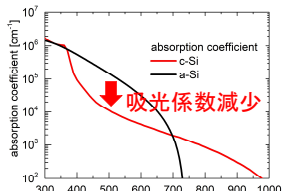
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進プロセスチーム

研究の目的

シリコンヘテロ接合(SHJ)太陽電池の高効率化に向け、a-Si:H窓層の光学的な吸収ロスの低減が課題の一つであるが、その手法としてナノ結晶シリコン(nc-Si:H)の利用が挙げられる[1]。nc-Si:Hはa-Si:Hに比べ短波長領域の光吸収係数が小さいため、寄生吸収ロスを低減することが可能である。また、両面受光による発電量増加やタンデム構造を用いた高効率化にもnc-Si:Hの利用が期待されている。本研究では、SHJ太陽電池窓層への応用に向けたp型nc-Si:Hの品質化を目指し、very-high-frequency plasma-enhanced chemical-vapor-deposition (VHF-PECVD)を用いたnc-Si:H成膜について検討を行った。特に、nc-Si:H(p)膜厚を変化させることで、結晶成長過程がセル特性に及ぼす影響を調査した。

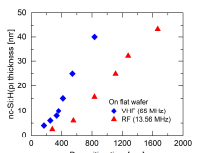
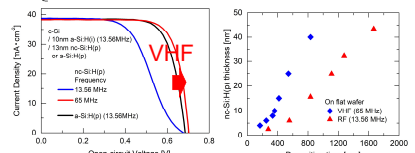


寄生吸収による J_{SC} 減少
 nc-Si:H(p)の利用



Very-High-Frequency(VHF) PECVD [3]
 13.56 MHz (Radio-Frequency) → 65 MHz

原原料ガス分解効率の向上
 多量の水素ラジカルによるパッシベーション
 結晶化促進、高速成膜



実験

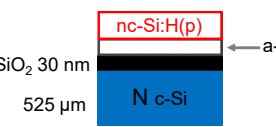
VHF-PECVD (65 MHz) → nc-Si:H(p) : 4 - 40 nm

RF (13.56 MHz) → a-Si:H(p)

両面電極型セル

- Double-side polished
- Textured

① SiO₂ on polished wafer



② ITO/Ag

nc-Si:H(p)

nc-Si:H(i) 10 nm

270 μm

N c-Si

a-Si:H(n) 10 nm

ITO/Ag

図6. 太陽電池特性評価用サンプル構成

• 膜厚評価

(エリブソメトリ, 透過型電子顕微鏡(TEM))

• 結晶化率評価

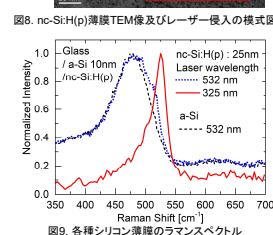
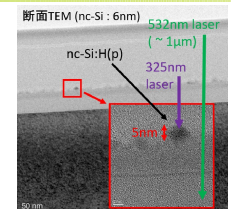
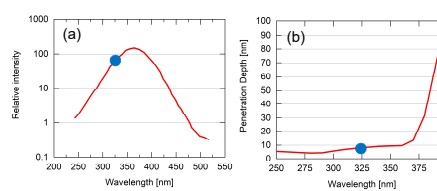
(Raman分光法 : 325 nm(UV), 532 nm laser) • implied V_{OC} , iFF (QSSPC)

- J-V特性(ソーラーシミュレータ)
- EQE

● UV-Raman

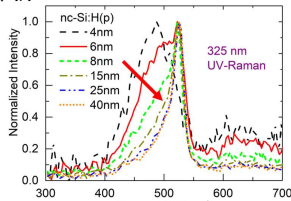
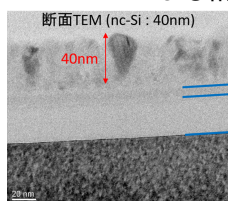
- 325 nm laser →
- c-Si中の侵入長 : ~ 5 nm
- 高強度のラマン散乱光

⇒ 数 nmの極薄nc-Siを評価可能



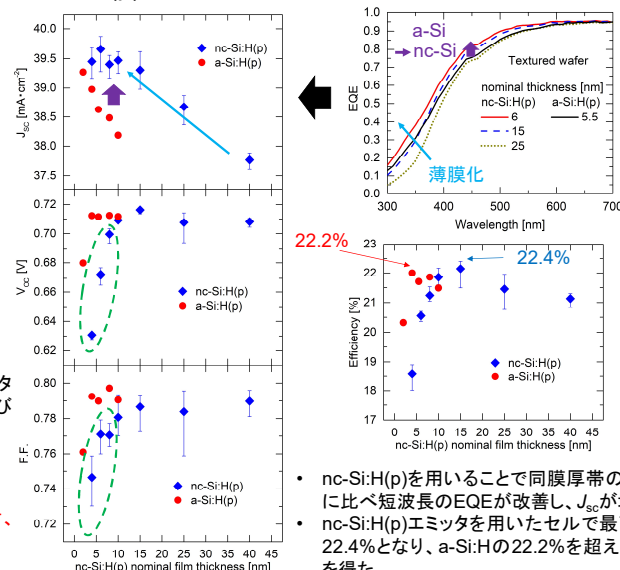
結果及び考察

1. UV-Ramanによる結晶粒解析

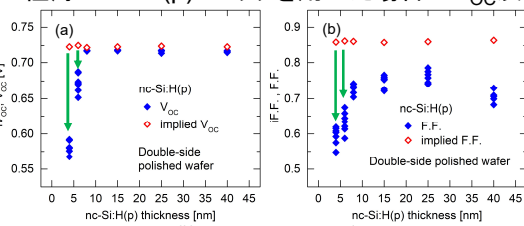


c-Si内への紫外レーザー侵入長は5 nm程度のため、深さ方向のc-Si検出には限界が存在
 ⇒ 深さ方向の結晶成長に加え、膜面におけるc-Siの被覆率の増加を評価

2. nc-Si:H(p)エミッタセルの太陽電池特性



3. 極薄nc-Si:H(p)エミッタを用いた場合の V_{OC} 及びFFの低下



極薄のnc-Si:H(p)エミッタを用いた場合、 V_{OC} 及びFFが大きく低下する。
 更なる高効率化に向け、原因の解明が必要

結論

- VHF-PECVDを用いて成膜したnc-Si:H(p)の品質化を目的とし、nc-Si:H(p)の結晶成長過程が太陽電池特性に及ぼす影響を調査した。
- VHF-PECVDを用いることで、高品質のnc-Si:Hを比較的高速で成膜可能
- nc-Si:H(p)の膜厚が厚くなる程、深さ方向の結晶成長及び結晶による膜表面の被覆率は増加すると考えられる。
- nc-Si:H(p)を用いることで短波長の寄生吸収が減少し、 J_{SC} が上昇する。
- nc-Si:H(p)エミッタで高い V_{OC} 及びFFを得るためにはa-Si:H(p)よりも厚い膜厚が必要となる。更なる高効率化のため、原因の解明が課題となっている。

参考文献

- [1] A. N. Fioretti *et al.*, IEEE J. Photovoltaics **9**, 1158 (2019).
- [2] M. A. Green, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **92**, 1305 (2008).
- [3] I. A. Yunaz *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **93**, 1056 (2009).
- [4] P.-L. Chen *et al.*, WCPEC-7, Hawaii, 2018.
- [5] M. Yoshikawa, BUNSEKI KAGAKU **60**, 533 (2011).

謝辞

この研究はNEDO委託のもと行っております。また、パナソニック株式会社より研究協力を賜りました。関係者の皆様に感謝致します。

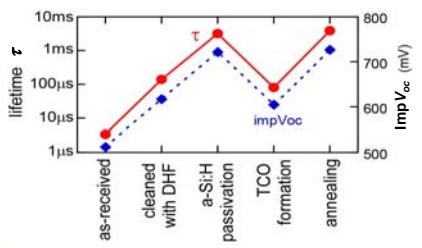
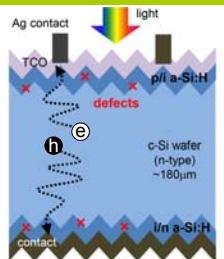
シリコンヘテロ接合太陽電池の 界面欠陥の評価

布村 正太、坂田 功、佐藤 愛子、Mickaël Lozac'h、松原 浩司
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

Abstract

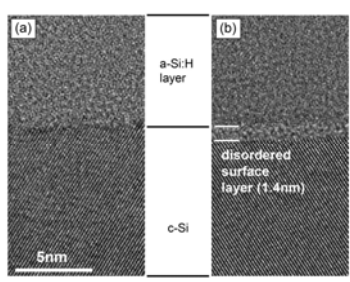
- **Defect kinetics in a-Si:H/c-Si heterojunction** is studied throughout fabrication process, particularly during a-Si:H growth.
- During a-Si:H growth, defects are generated not only in an **a-Si:H layer** but also **c-Si bulk**.
- The defects in a-Si:H are recovered completely by postannealing, whereas defects in c-Si are partially recovered by postannealing. The **residual defects** are formed in c-Si.
- The **a-Si:H/c-Si interface defects** are formed by postannealing.

SHJ solar cell structure & minority carrier lifetime



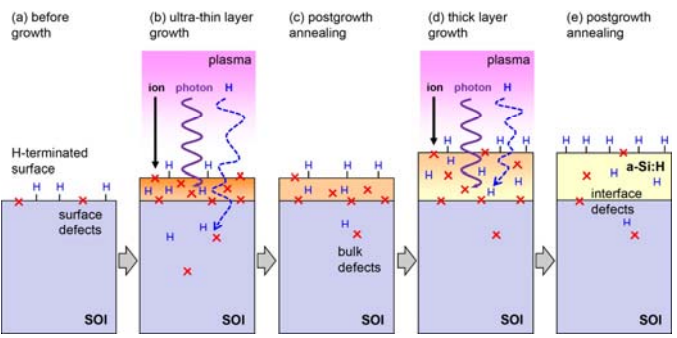
- In SHJ solar cells, a-Si:H layer plays important roles in surface passivation & carrier selection.
- The lifetime, i.e., a measure for the surface passivation, varies throughout the fabrication process of SHJ solar cells

TEM analysis for a-Si:H/c-Si interface



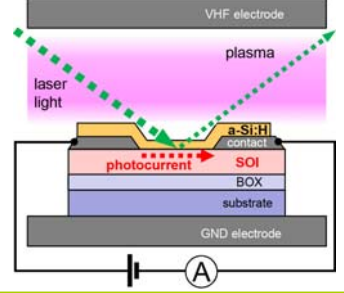
- (a) **Sharp interface of a-Si:H/SOI stack.** The a-Si:H layer is grown over the SOI by SiH₄/H₂ discharges at 147 °C for 60 s, yielding the thickness of 18.0 nm.
- (b) **a-Si:H/SOI interface with disordered surface layer (DSL).** The DSL (≈1.3 nm) is created by a H₂ plasma treatment for 100 s, before a-Si:H growth.

Model: defect kinetics in a-Si:H/c-Si



Defect kinetics in a-Si:H/c-Si stack. (a) *Before a-Si:H growth.* The DHF-treated SOI surface is terminated with H atoms. (b) *Ultra-thin layer growth.* The defects are generated both in the a-Si:H and the SOI by energetic and/or reactive species of radicals, ions and photons coming from plasma. The **bulk defects in the SOI** are generated in this stage. (c) *Postannealing.* The defects in the a-Si:H and the SOI are annihilated. However, a large amount of defects remain in an ultra-thin layer. (d) *Thick layer growth.* The defects are generated mainly in the a-Si:H layer. (e) *Postannealing.* The defects in the a-Si:H layer are annihilated, yielding the surface passivation. A small amount of **the interface defects** are created by postannealing.

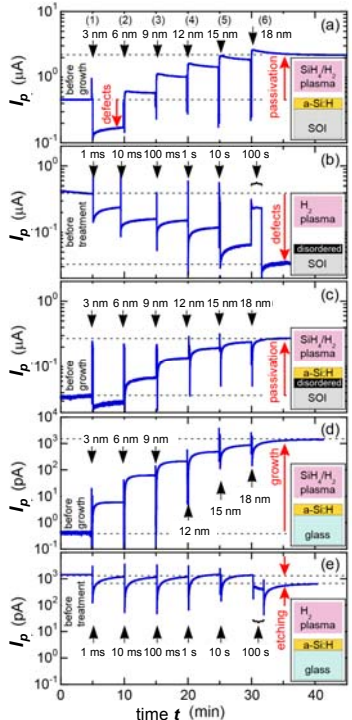
Exp. Setup: In-situ real-time photocurrent measurement



- **Silicon on insulator (SOI)** is used as a sample for the photocurrent measurement.
- SOI is illuminated with a **semiconductor laser** (520 nm, 1 mW) during a-Si:H growth.
- The **photocurrent** is measured during a-Si:H growth and also subsequent postannealing.
- In experiments, the **growth time (Δt)**, i.e., the thickness of a-Si:H passivation layer is varied.

Experimental results

Time evolution of photocurrents



- (a) **a-Si:H growth over SOI.** I_p is increased with the number of growth, i.e., the layer thickness, except for the first growth of an ultra-thin layer. The increase in I_p means the termination of defects over the SOI surface, i.e., the surface passivation.
- (b) **H₂ plasma treatments of SOI.** Each treatment causes a reduction in I_p , indicating the generation of defects in the SOI. The reduction is enhanced for a long-time treatment.
- (c) **a-Si:H growth over SOI with DSL.** The surface passivation is recognized even for the SOI surface with DSL.
- (d) **a-Si:H growth over glass substrate.** I_p is significantly increased with the number of growth.
- (e) **H₂ plasma treatments of sole a-Si:H over glass.** Each treatment causes a reduction in I_p , indicating the generation of defects. During postannealing, I_p returns completely to the initial level, i.e. defect recovery.

S. Nunomura et al., *Appl. Phys. Express* 12, 051006 (2019).
S. Nunomura et al., *AIP Advances* 9, 045110 (2019).

Summary

- The defect kinetics in the a-Si:H/SOI stack is studied via in-situ photocurrent measurements.
- During growth, the defects are generated mainly in the a-Si:H layer. However, these defects are recovered completely by postannealing.
- The **bulk defects in the SOI** are generated by the penetration of H atoms, which is demonstrated by the experiments of the SOI treated with H₂ plasmas. These defects are partially recovered by postannealing; most of the defects remain in the SOI, which deteriorates the passivation quality.
- During postannealing, **the interface defects** are created in the a-Si:H/SOI. The suppression of these interface defects as well as the bulk defects in the SOI, i.e., c-Si, is crucial for high-quality and reliable passivation.

Acknowledgements

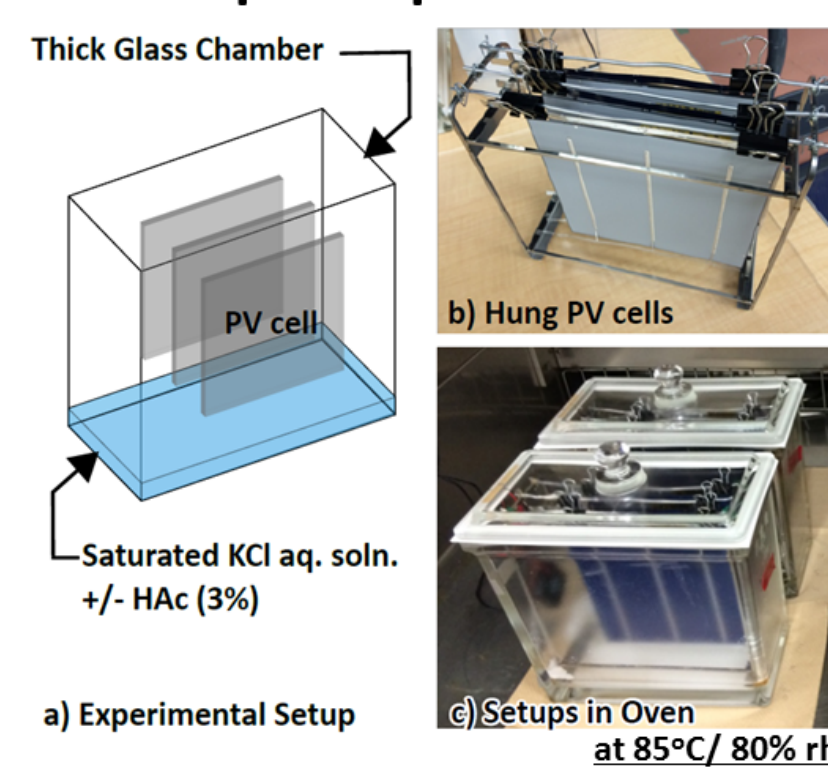
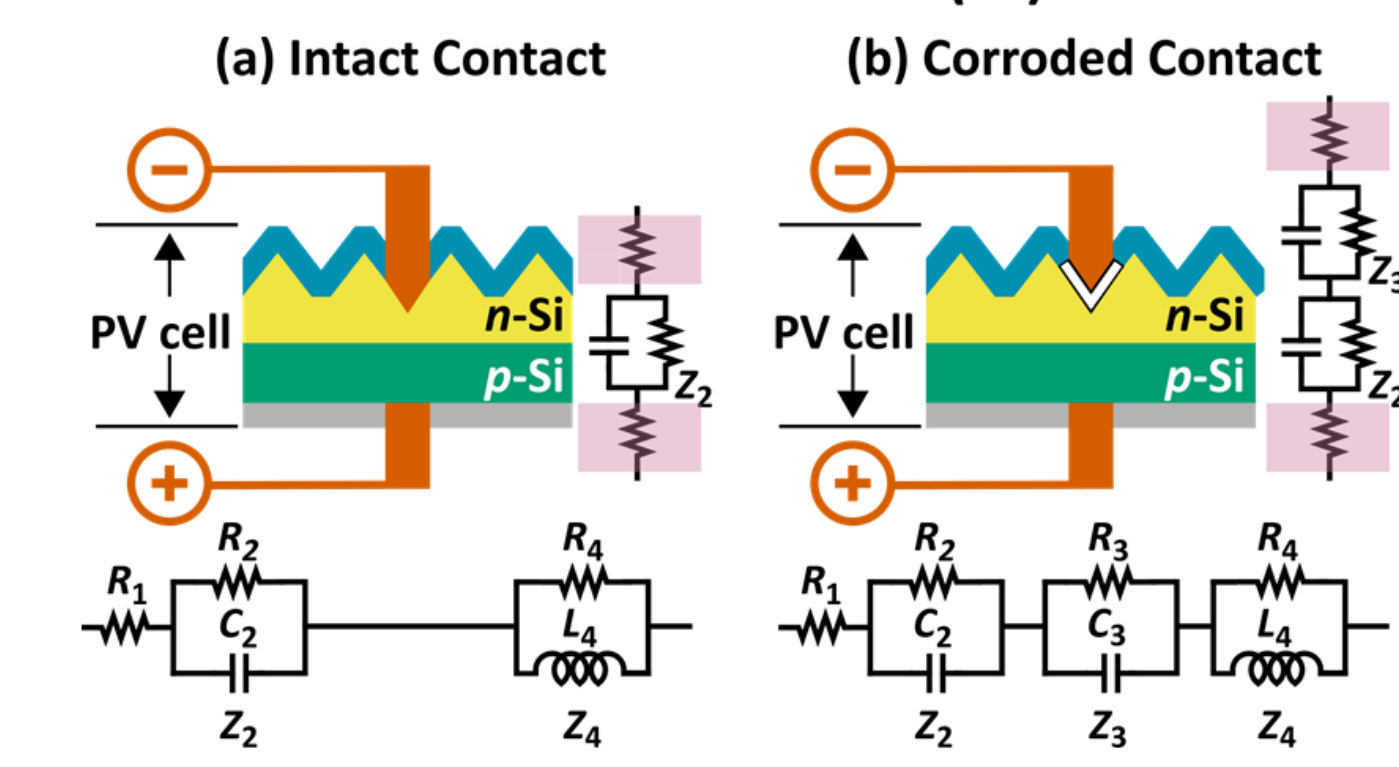
This work was supported by JSPS KAKENHI (Grant Numbers 15K04717 & 18K03603) and New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

c-Si 太陽電池セル裏面の腐食劣化態様

棚橋 紀悟¹・坂本 憲彦²・柴田 肇³・増田 淳¹

産業技術総合研究所 ¹太陽光発電研究センター、²計量標準総合センター

Background & Experimental Procedures

Background (1) (HAc = Acetic Acid) Corrosion in Alumina Paste Layer (APL) 25 °C / 45% rh, 2 months 25 °C / 85% rh, 240 h 25 °C / 85% rh, 240 h with HAc Atmosphere H. Xiong et al., "Corrosion behavior of crystalline silicon solar cells," <i>Microelectron. Reliab.</i> , vol. 70, pp. 49-58, Mar. 2017.	Background (2) (HAc = Acetic Acid) Proposed Corrosion Models Front Side Rear Side H. Xiong et al., "Corrosion behavior of crystalline silicon solar cells," <i>Microelectron. Reliab.</i> , vol. 70, pp. 49-58, Mar. 2017.	Experimental (1) (HAc = Acetic Acid) HAc-Vapor Exposure of Bare PV Cells  Whole planes of both surfaces in a testing PV cell are uniformly surrounded by the applied stressors (temperature, humidity, and HAc vapor). → Spatiotemporally harmonized power-loss and R_s -elevation are supposed to be observed in the testing PV cell. T. Tanahashi, N. Sakamoto, H. Shibata, and A. Masuda, "Localization and characterization of a degraded site in crystalline silicon photovoltaic cells exposed to acetic acid vapor," <i>IEEE J. Photovolt.</i> , vol. 8, no. 4, pp. 997-1004, Jul. 2018.	Experimental (2) Localization of Series Resistance (R_1)  (a) Intact Contact (b) Corroded Contact PV cell PV cell with the respective AC equivalent circuits (under dark conditions). Rectangles colored in pink indicate the assumed locations of R_1 .
---	--	--	--

Summary

To address the origin of the elevated series-resistance (R_s) that is a primary cause of corrosive degradation observed in field-aged photovoltaic (PV) modules*, we evaluated the electrical characteristics of PV cells corroded with acetic acid (HAc) vapor.

The origin in R_s -elevation during corrosion of PV cells is fixed underneath front electrodes, from the following observations.

- (a) Evolution of EL-, R_s -, and visual-images during corrosion (Panel 1 to 3)
- (b) Effects of resistances in the Al bulk and the interconnector-busbar interface on power-loss (Panel 4 to 5)
- (c) Localization of R_1 ($\approx R_s$) in a corroded PV cell with single comb grid-fingers (Panel 6 to 9)

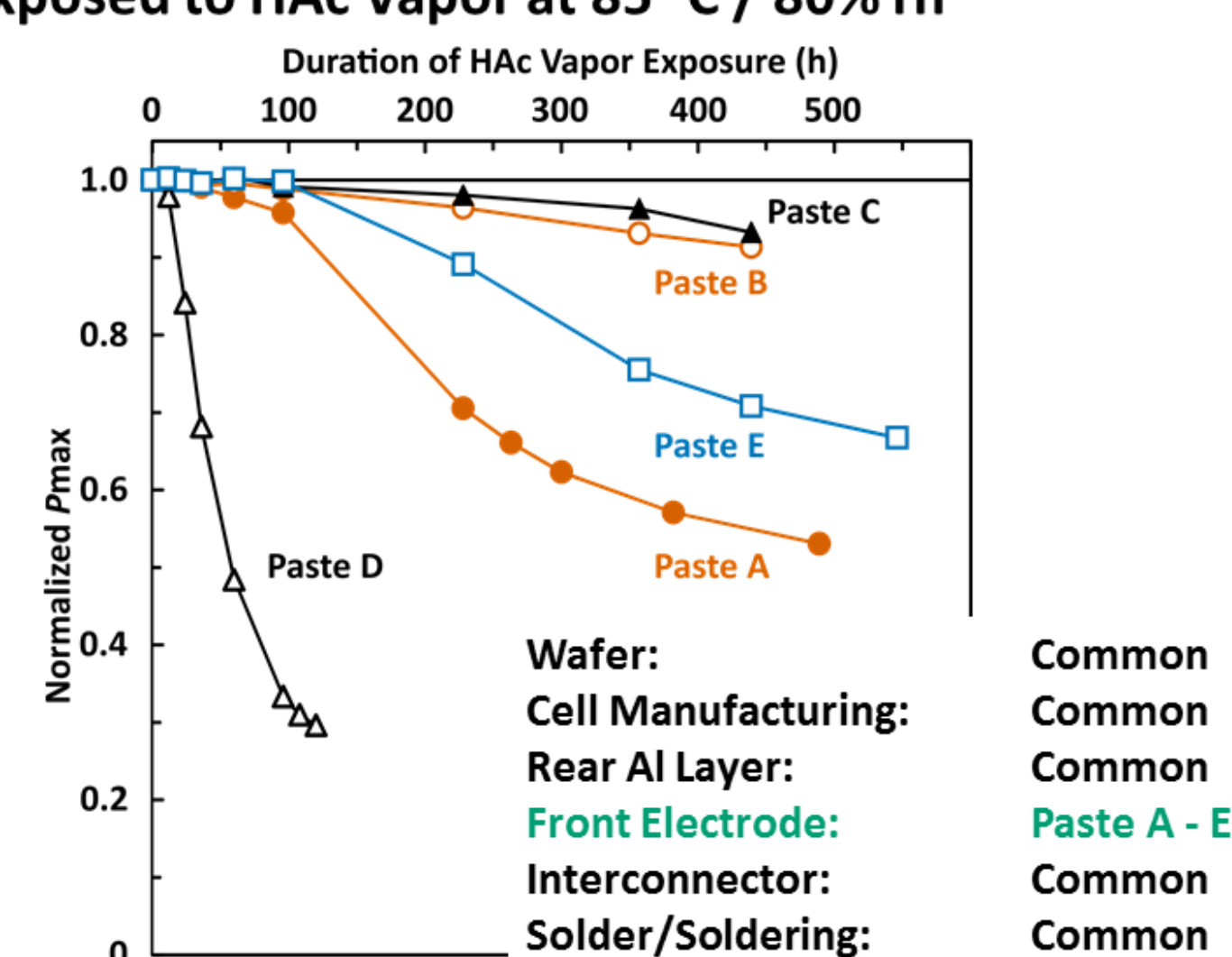
Because we have reported that Z_3 (a novel AC-impedance component that emerges during corrosive degradation) is also localized underneath the front electrodes**, it can be concluded that performance degradation with corrosion is preferentially caused by the evolution of electrical characteristics at this interface, but not at anyplace within a PV cell.

*Tanahashi et al., *IEEE J. Photovolt.*, 9: 741-751 (2019)
 **Tanahashi et al., *IEEE J. Photovolt.*, 8: 997-1004 (2018)



A Convincing Demonstration

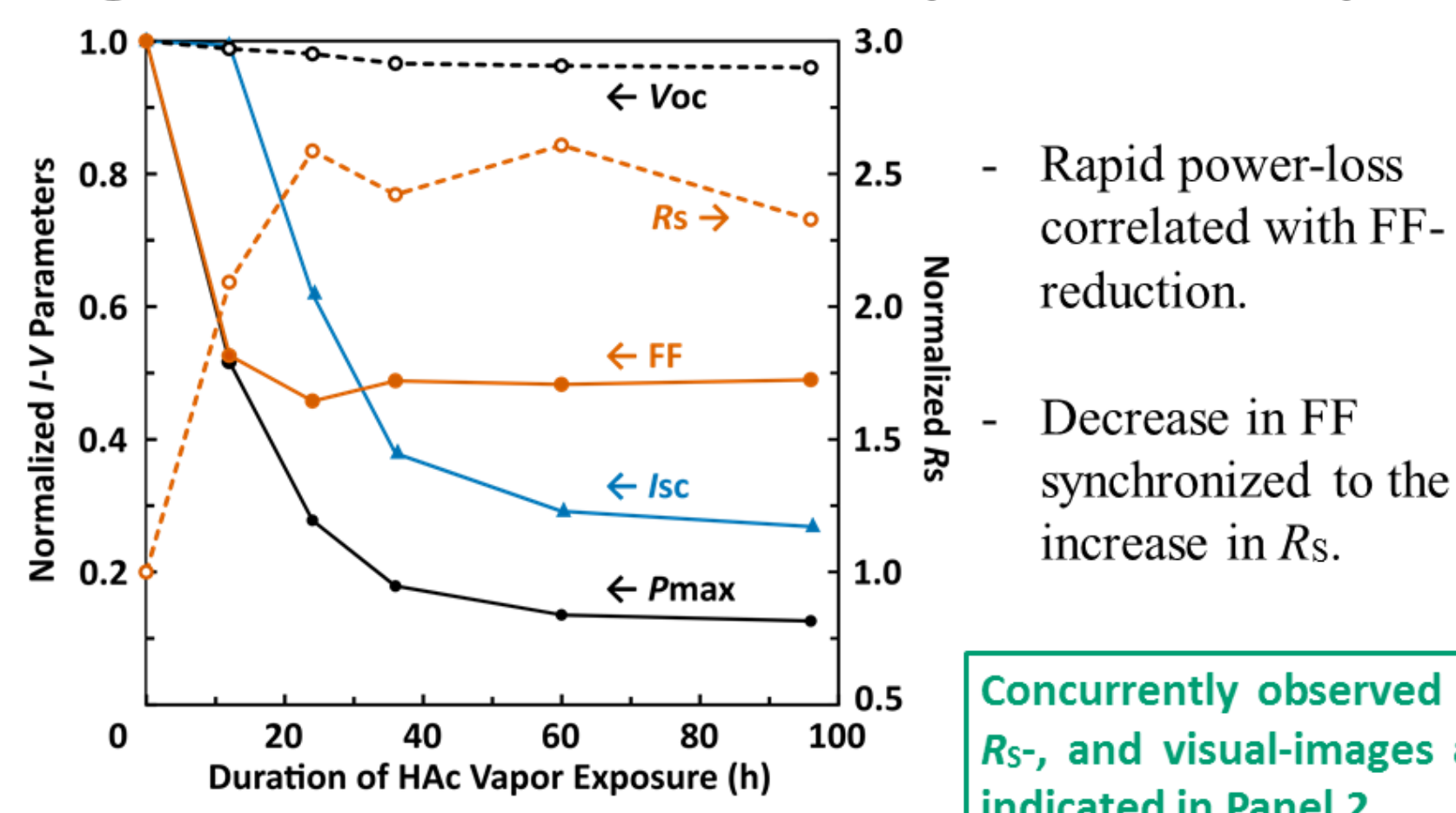
Degradation Profiles of PV Cells (with Different Compositions of Paste) Exposed to HAc Vapor at 85 °C / 80% rh



Results

Panel 1: Degradation Behavior

Degradation Profiles of a PV Cell Exposed to HAc Vapor

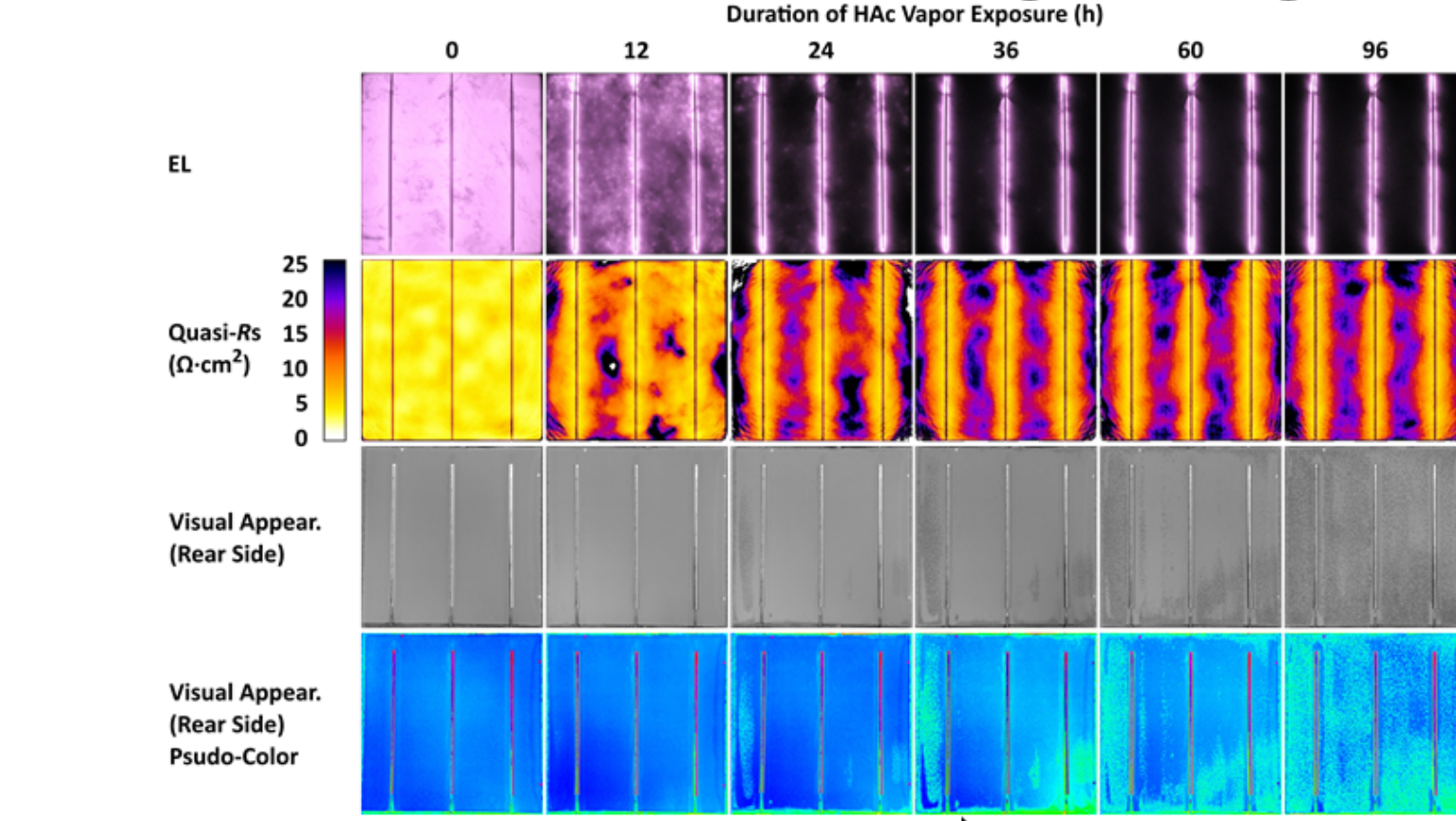


R_s is estimated from I-V data obtained in the dark. Both vertical axes indicate I-V parameters normalized by their initial values.

Concurrently observed EL-, R_s -, and visual-images are indicated in Panel 2.

Panel 2: Degradation Behavior

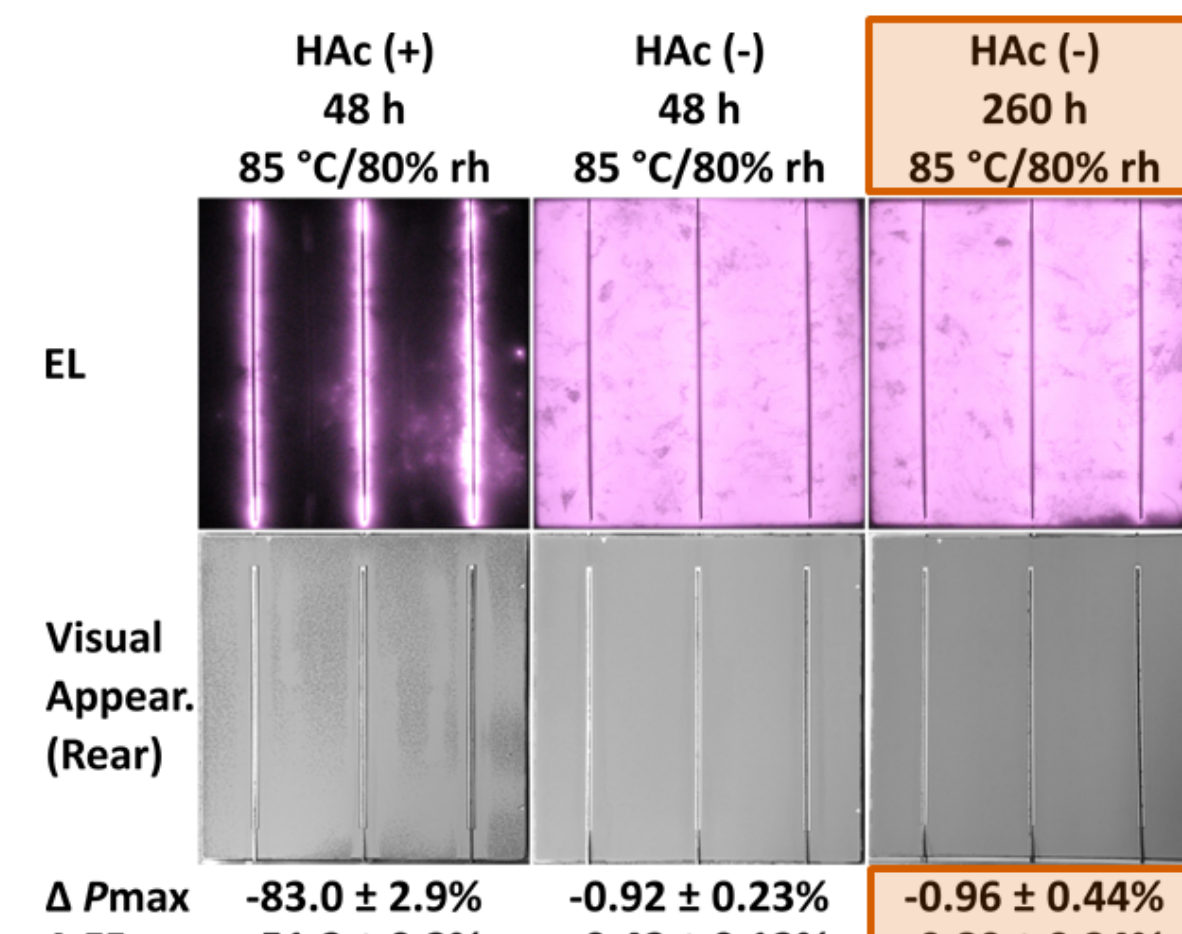
Evolution of EL-, R_s -, and Visual-Images during Corrosion



Power-Loss (see Panel 1)
 R_s Elevation
 Rear Surface Corrosion

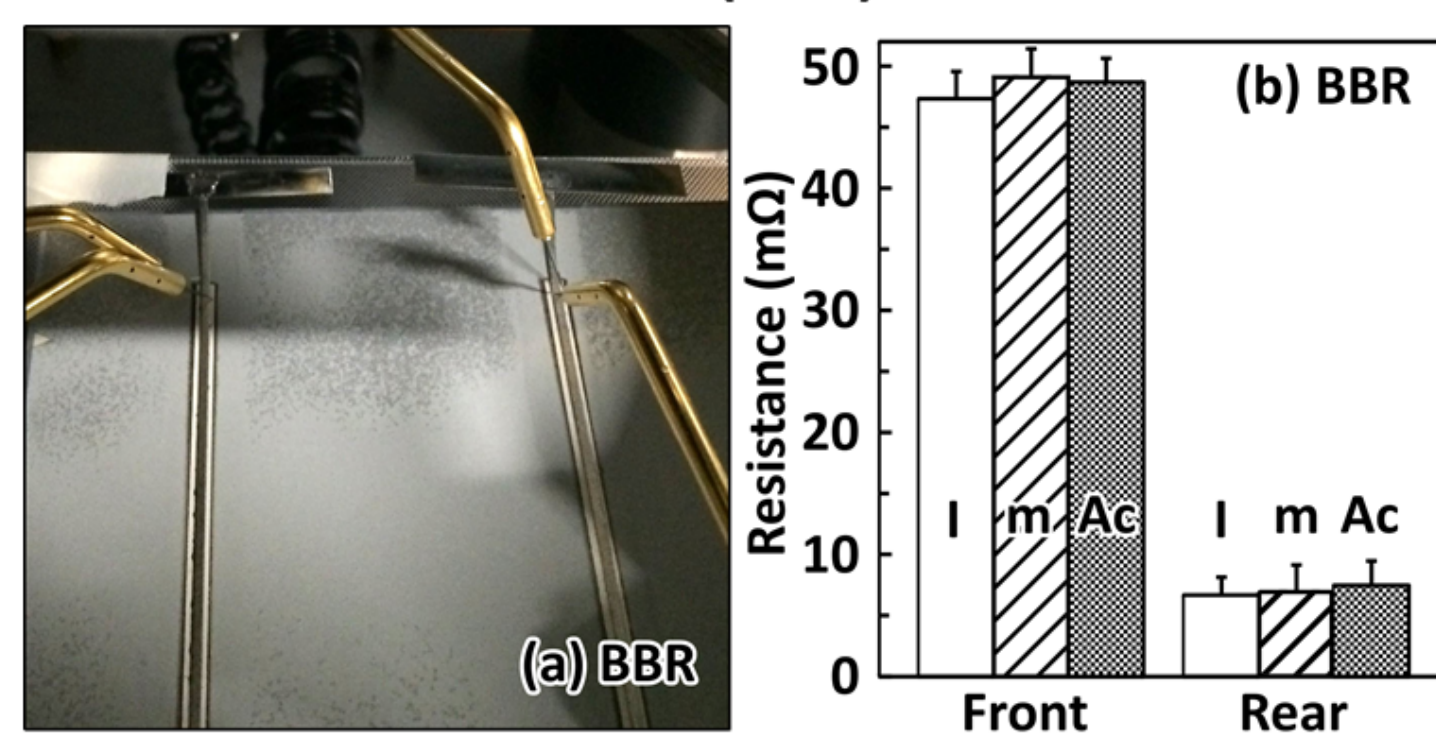
Panel 3: Degradation Behavior

Corrosion in Rear Surface



Panel 4: Bulk Resistance

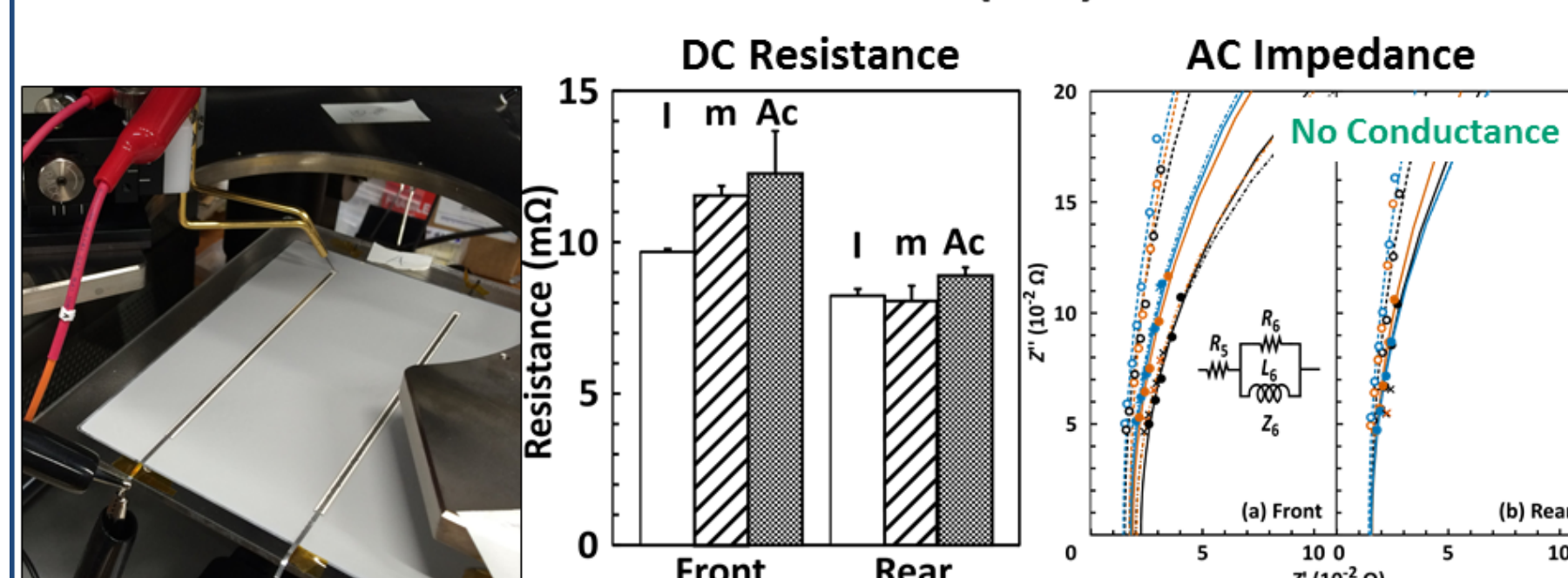
Busbar - Busbar Resistance (BBR)



Bulk resistance of aluminum layer (with rear busbars) does not contribute to the power-loss in the corroded PV cells.

Panel 5: Interface Resistance

Interconnector - Busbar Resistance (IBR)

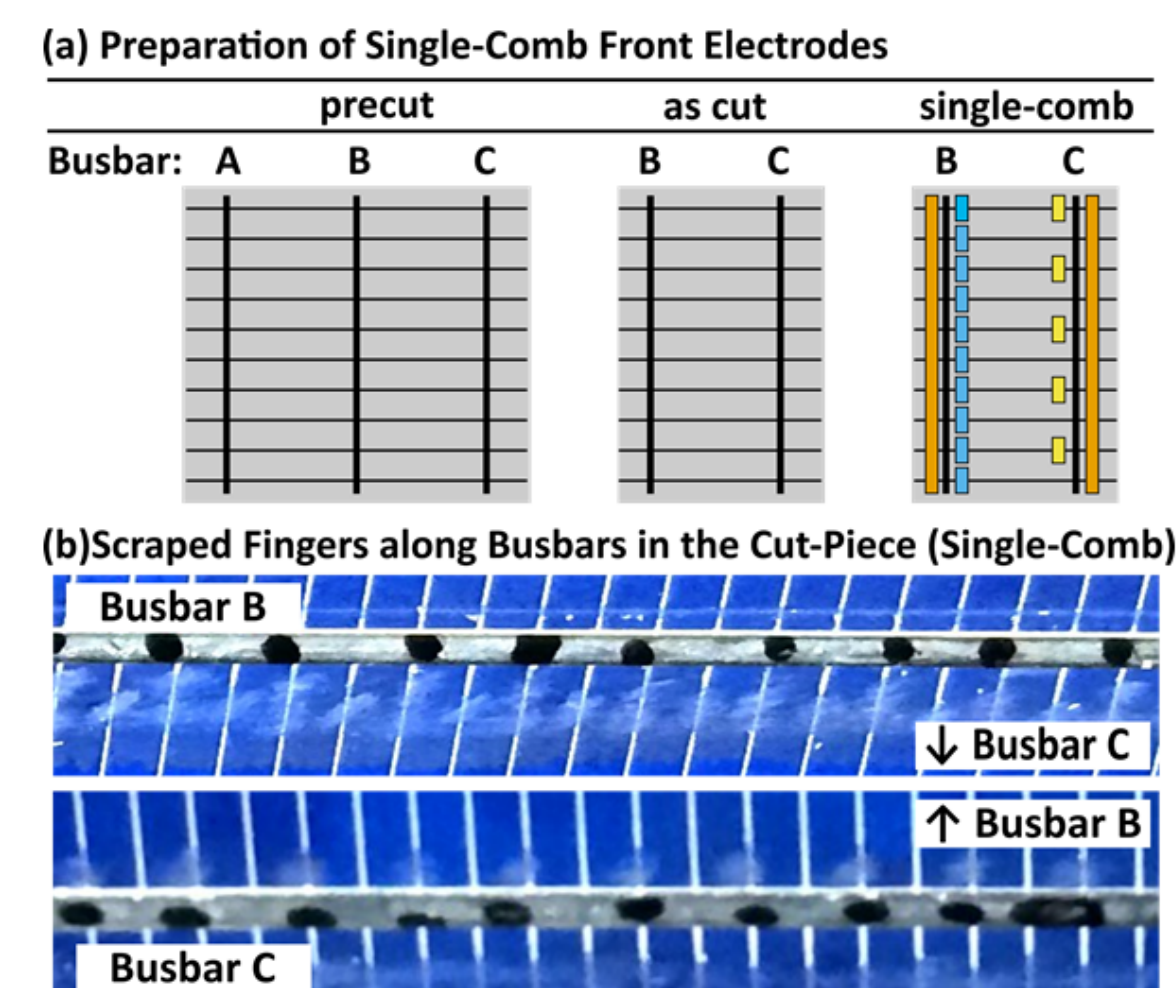


Obvious enhancement of the resistance at solder joint is not confirmed, even when PV cells were nearly completely degraded with HAc vapor.

I, m, and Ac: see Panel 4
 A, B, and C in the right graph indicate the respective interconnector-busbar pairs.

Panel 6: Identification of R_1 -Origin

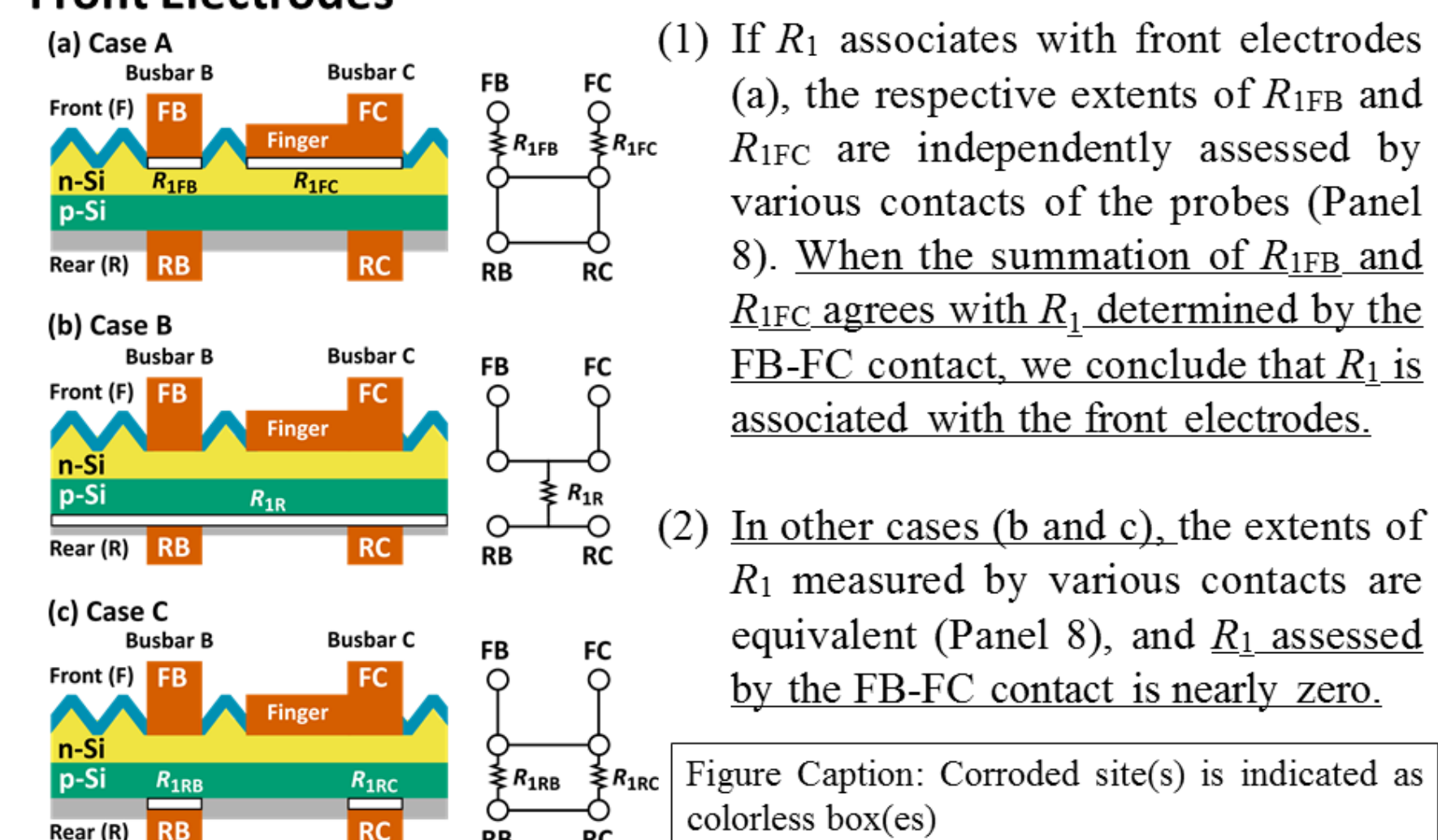
Preparation of a Cut Piece with Single-Comb Front Electrodes



Squares colored in orange, blue, and yellow indicate the scraped positions of the front electrodes.

Panel 7: Identification of R_1 -Origin

Determination of R_1 -Origin in a Cut Piece with Single-Comb Front Electrodes



Panel 8: Identification of R_1 -Origin

Assumed and Measured R_1 at Various Contacts

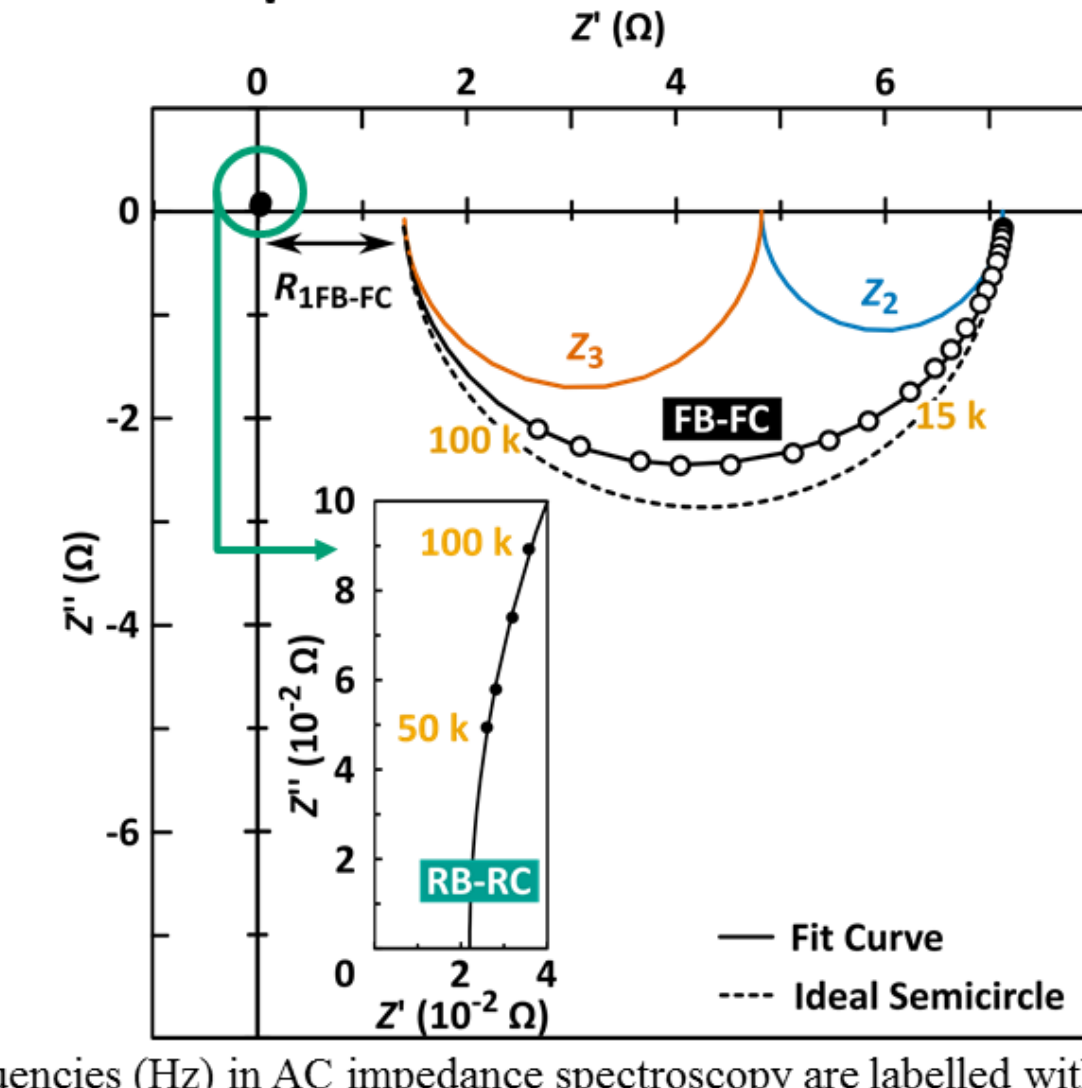
Contacted Terminals	Assumed R_1			R_1 (Ω)	
	Case A	Case B	Case C	Meas.	Case A
FB-RB	R_{1FB}	R_{1R}	$R_{1RB RC}^a$	0.945	0.907 ^b
FB-RC	R_{1FB}	R_{1R}	$R_{1RB RC}^a$	0.868	
FC-RB	R_{1FC}	R_{1R}	$R_{1RB RC}^a$	0.724	
FC-RC	R_{1FC}	R_{1R}	$R_{1RB RC}^a$	0.744	0.734 ^b
FB-FC	$R_{1FB} + R_{1FC}$	≈ 0	≈ 0	1.404	1.641
RB-RC	≈ 0	≈ 0	≈ 0	0.022	0.022

^a $R_{1RB||RC}$ denotes the resistance in a parallel circuit with R_{1RB} and R_{1RC} [i.e., $R_{1RB||RC} = (R_{1RB} \times R_{1RC}) / (R_{1RB} + R_{1RC})$].
^b These values indicate the respective mean resistances in FB-RB/RC and FC-RB/RC contacts.

Actual data completely agree with those assumed in Case A.

Panel 9: Identification of R_1 -Origin

Appendix: AC Impedance Loci of FB-FC and RB-RC Contacts



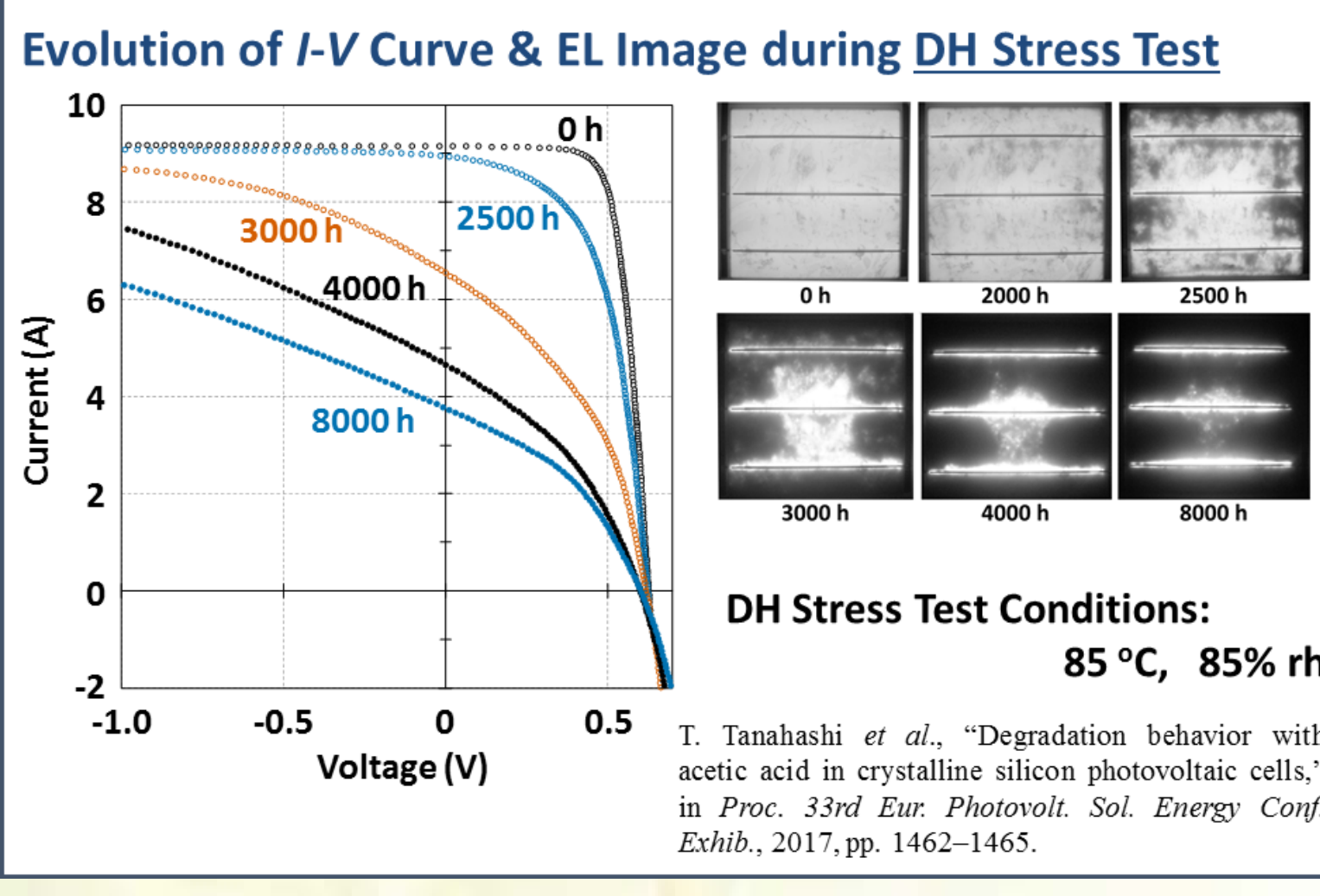
c-Si太陽電池セル/モジュールの腐食過程における交流等価回路の検討

棚橋 紀悟¹・坂本 憲彦²・柴田 肇¹・増田 淳¹

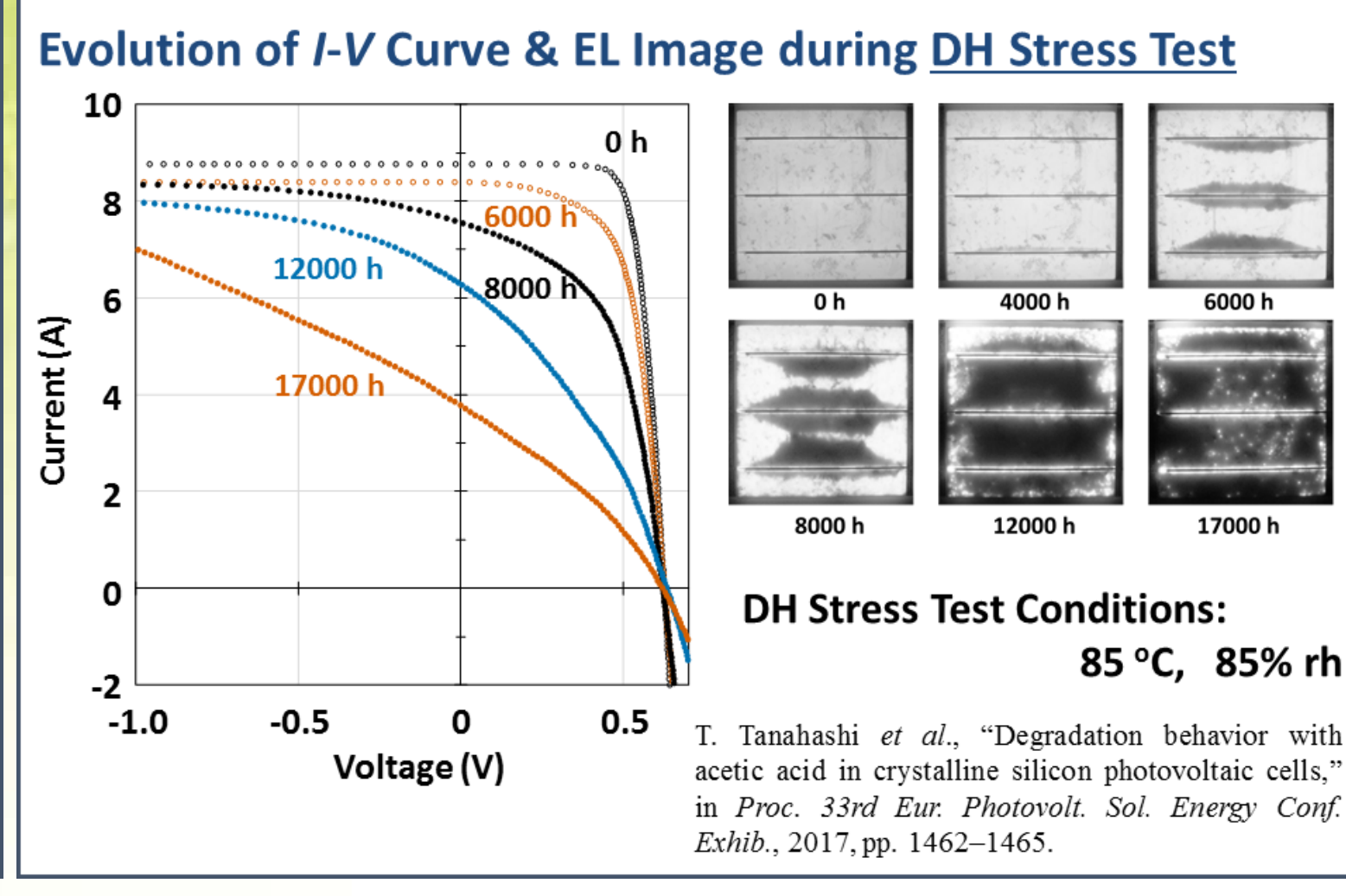
産業技術総合研究所¹ 太陽光発電研究センター、²計量標準総合センター

Introduction / Experimental

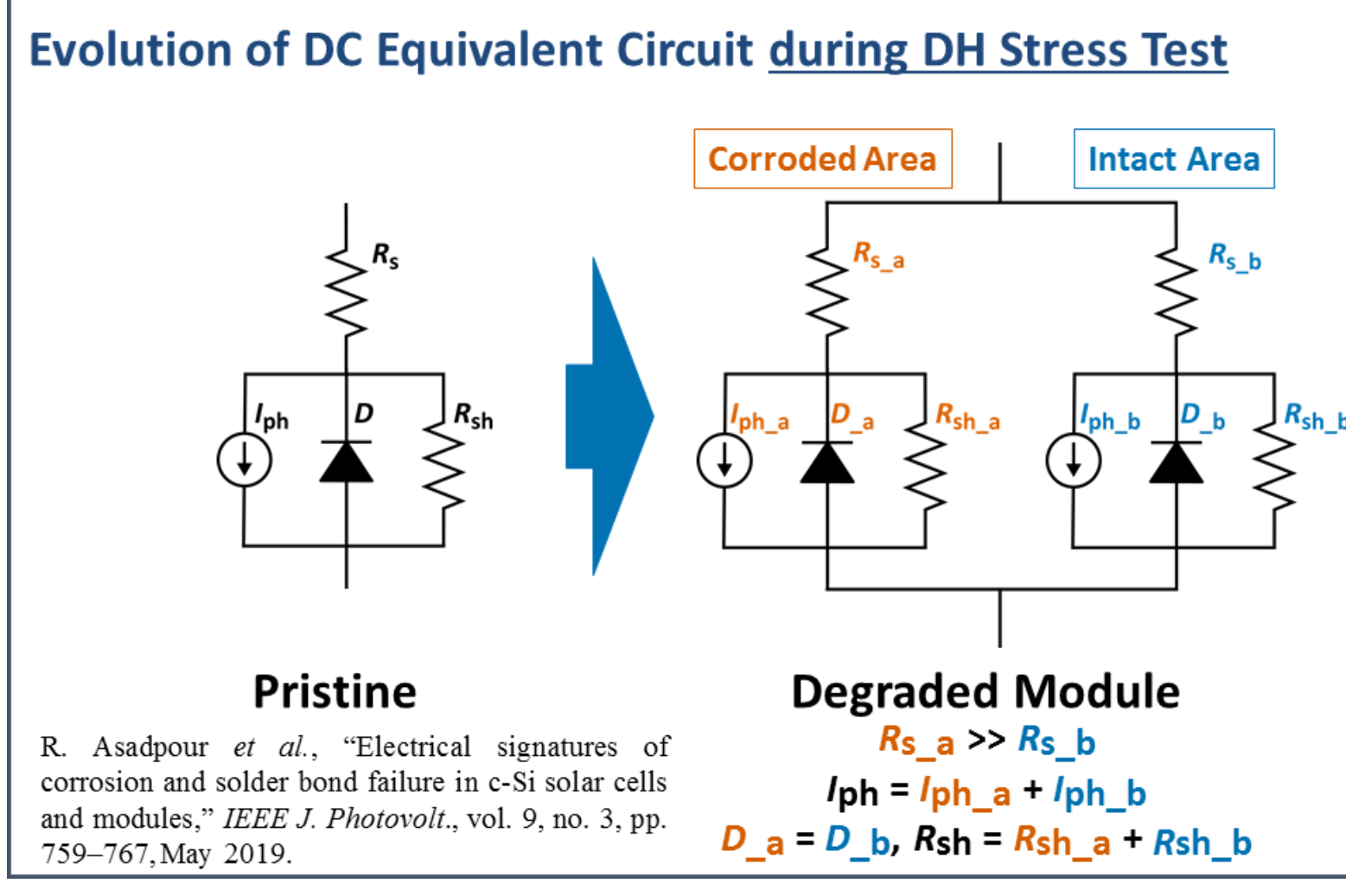
Non-Uniform Degradation (Module)



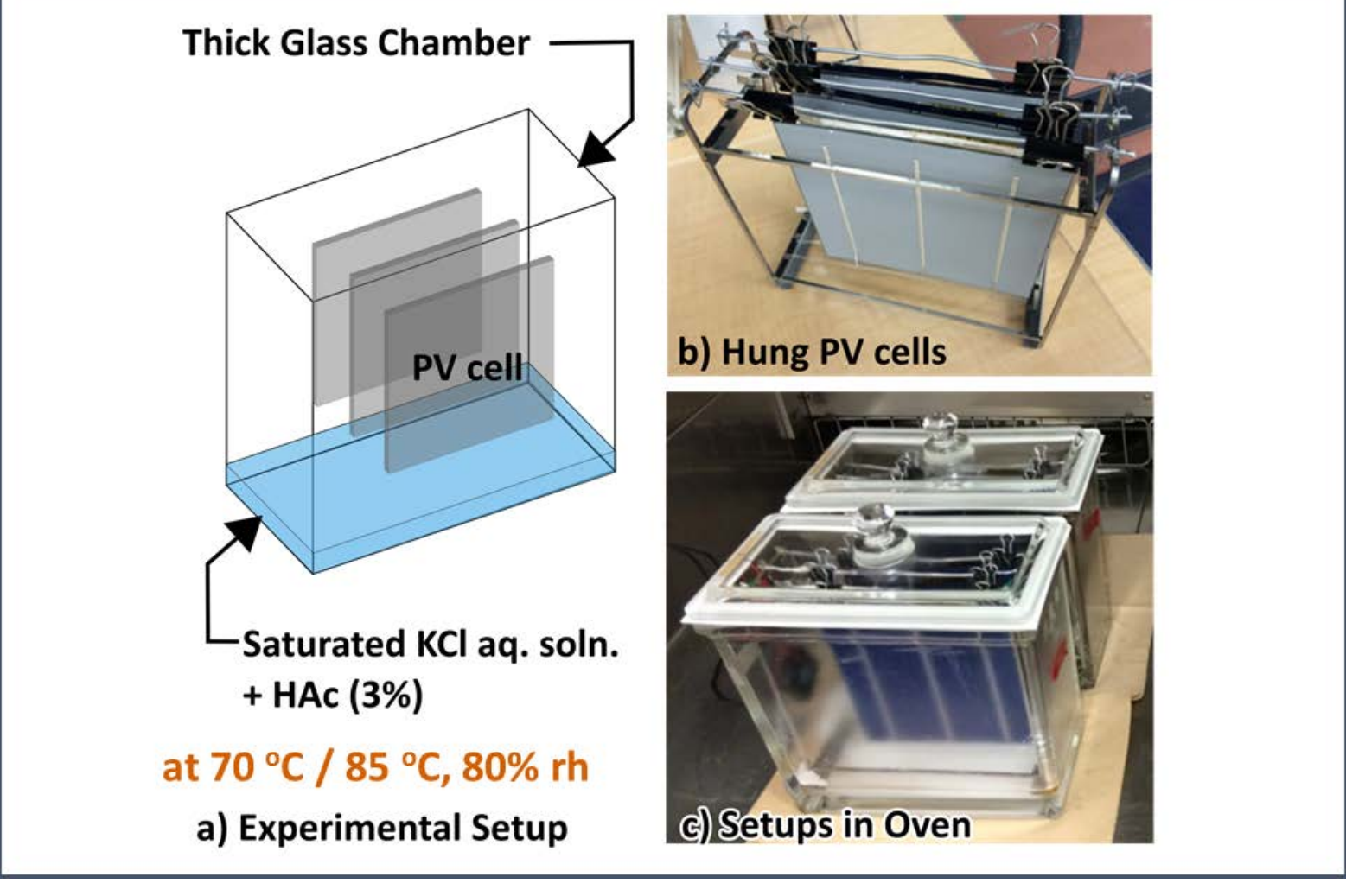
Non-Uniform Degradation (Module)



DC Equivalent Circuit Model



Exp.: Isotropic Corrosion in PV Cells



Summary

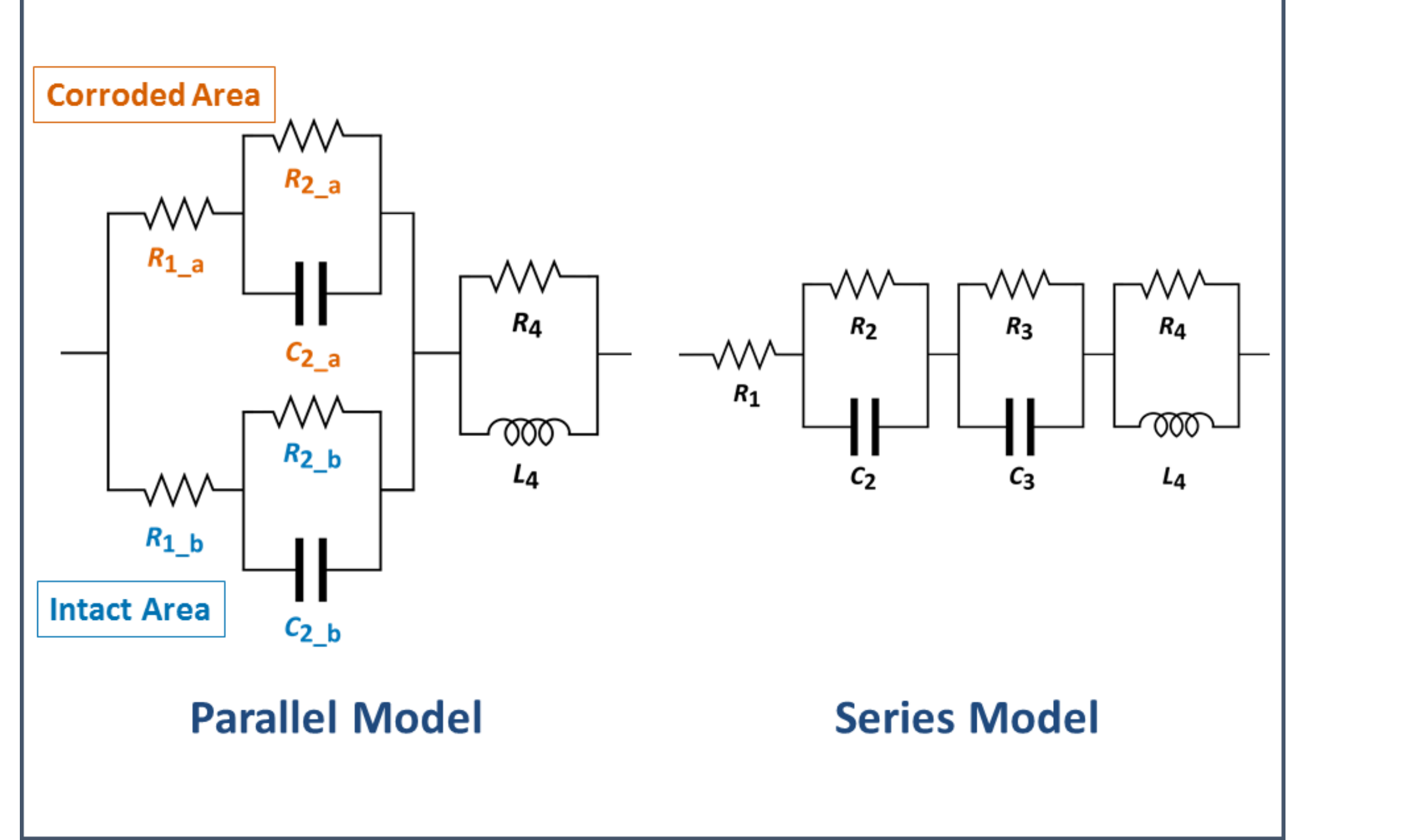
長期屋外曝露されたc-Si PVモジュールなどにおいて、表面電極腐食に起因する交流インピーダンス成分の増大などが出力低下に関連することを明らかにしてきた (Ref)。今回は、これらの解析に用いたPVセル/モジュールの交流等価回路モデルの妥当性を(等方的腐食劣化を惹起できる)酢酸蒸気曝露試験 (Exp.) の特徴を生かして検証した。

c-Si PVセル腐食過程における表面電極腐食面積を推定した (Panels 1 - 4)。これをもとに、腐食初期状態でのパラメータ変化から、腐食が大きく進行した段階の交流インピーダンス変化 (Nyquistプロットにおける高周波域での左側への傾斜) をシミュレートした (直列回路モデル: Panels 5 - 8・並列回路モデル: Panels 9 - 12)。

並列回路モデルでは、腐食の進行とともに上記インピーダンス変化は確認できたが、腐食が大きく進行した場合には、当該変化は減少・消失することが確認できた。一方、直列回路モデルの場合は、腐食が進行しても当該成分は残存しており、交流インピーダンス実測データと合致する変化を示していた。

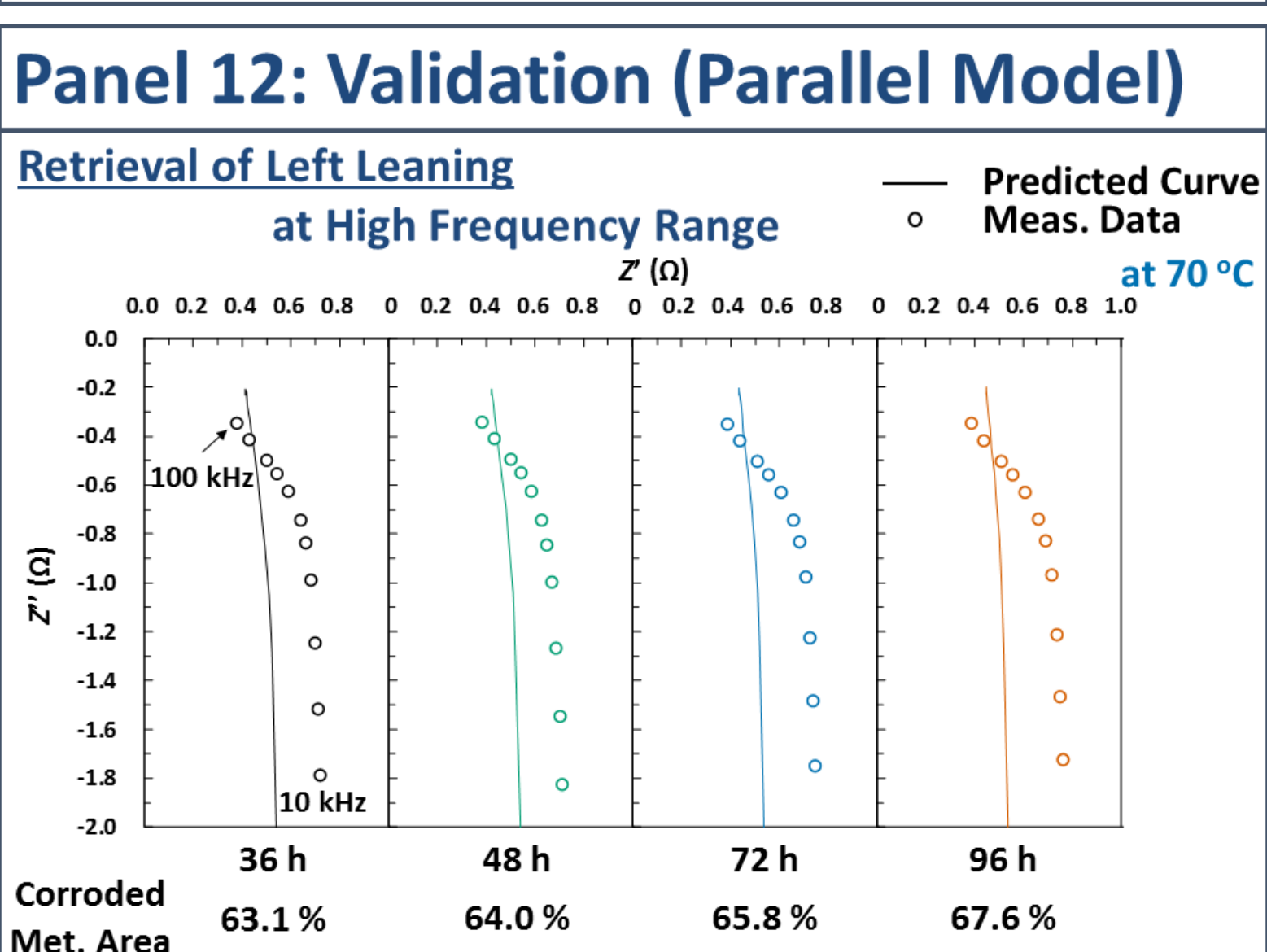
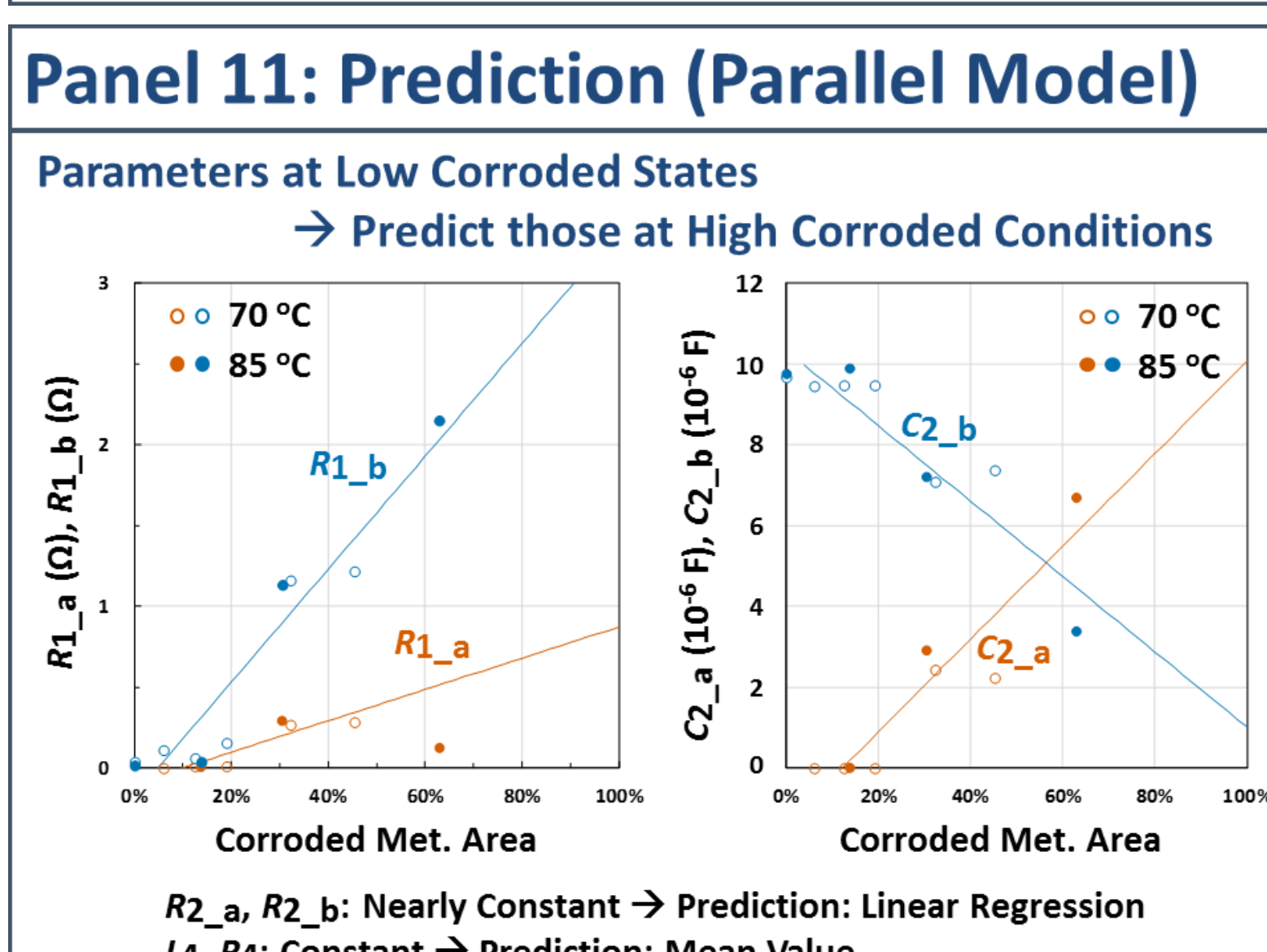
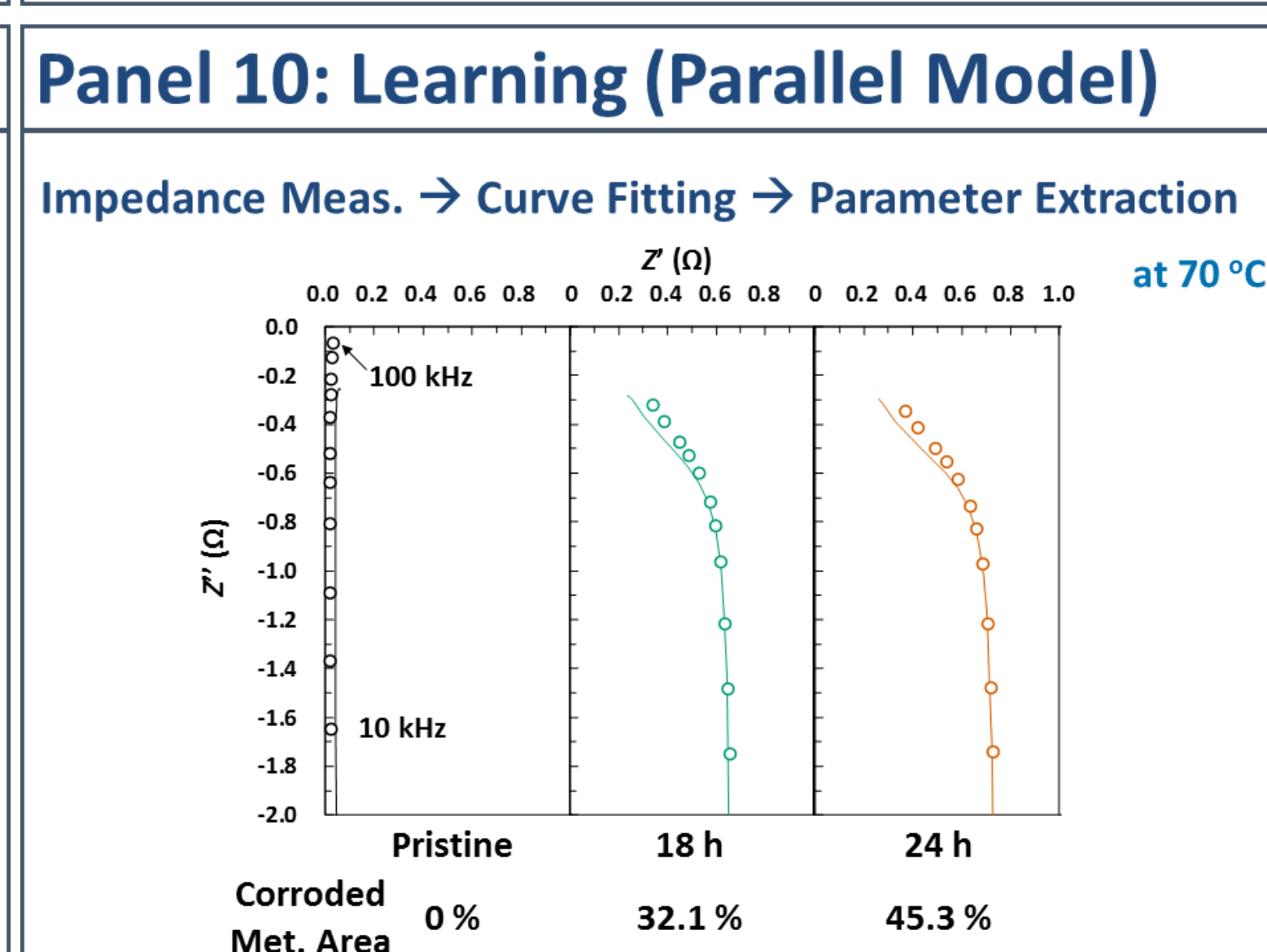
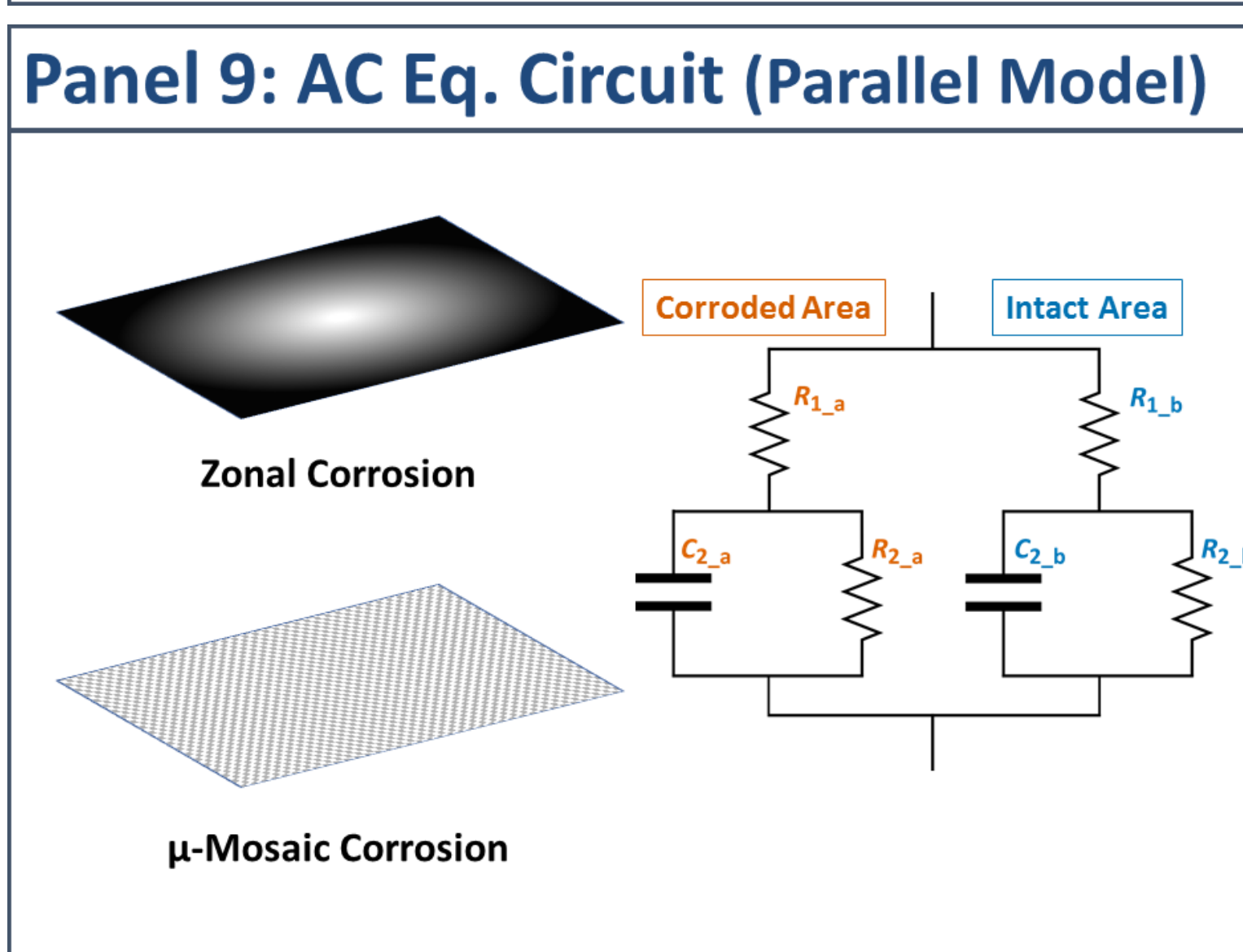
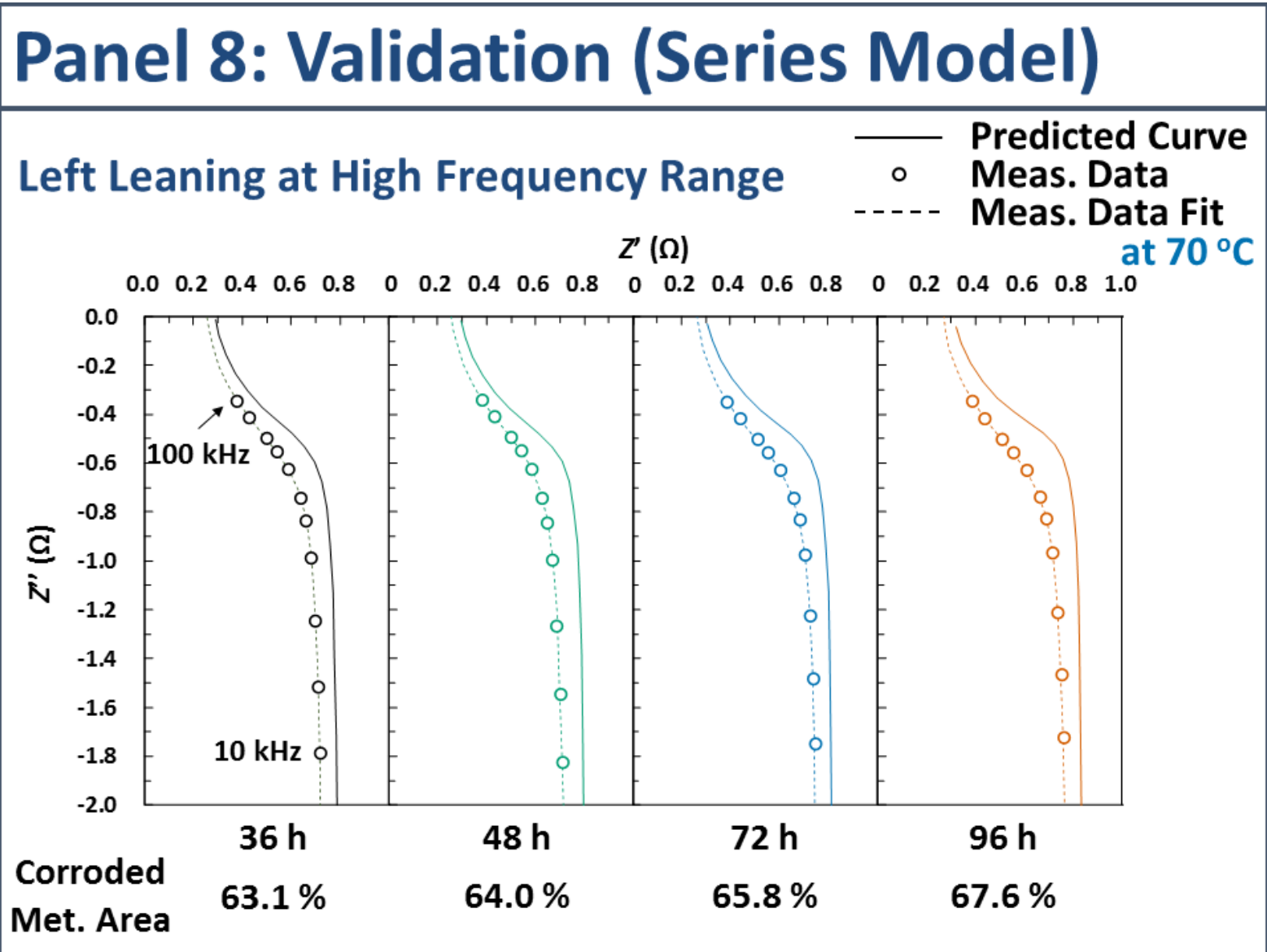
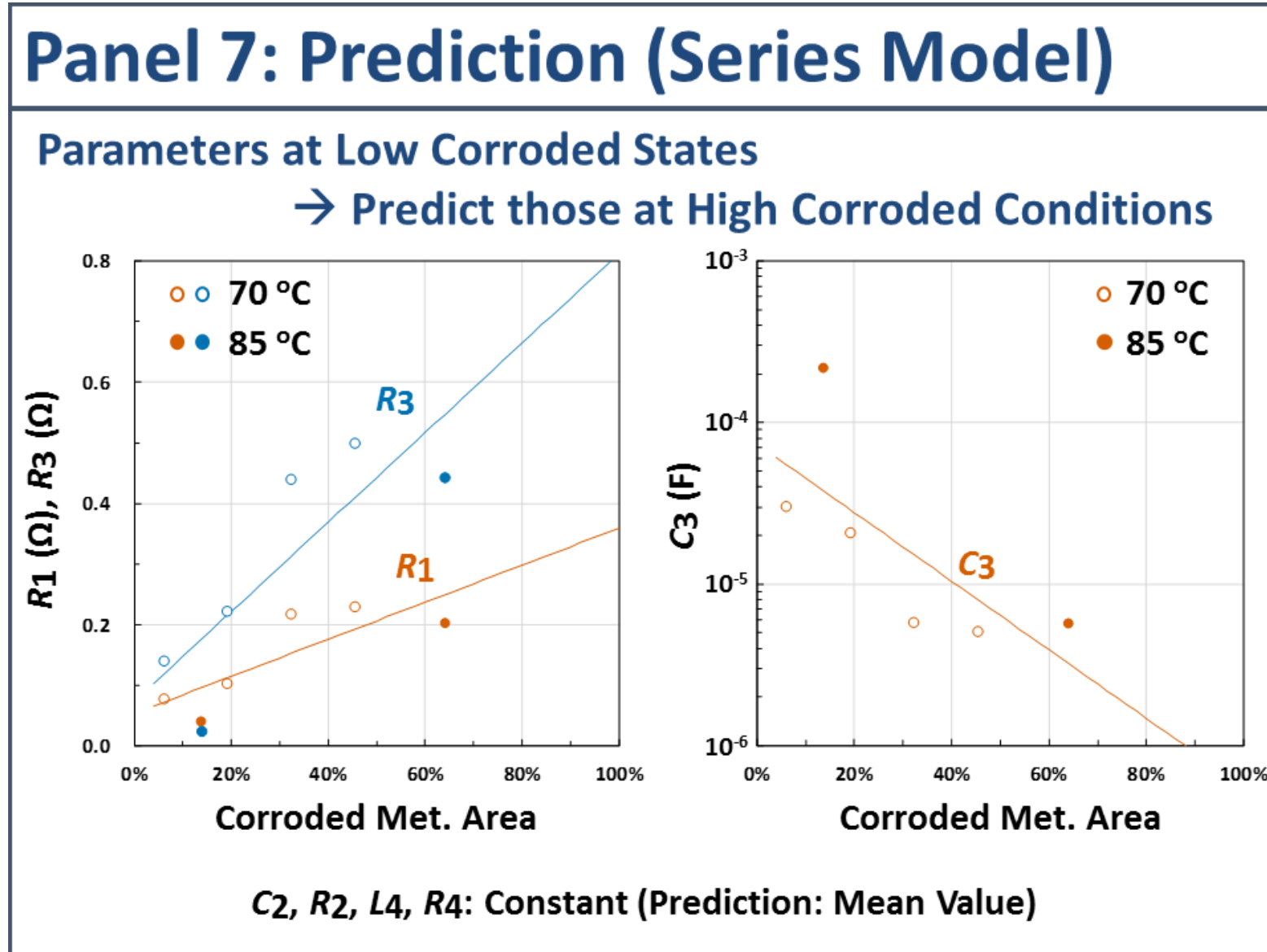
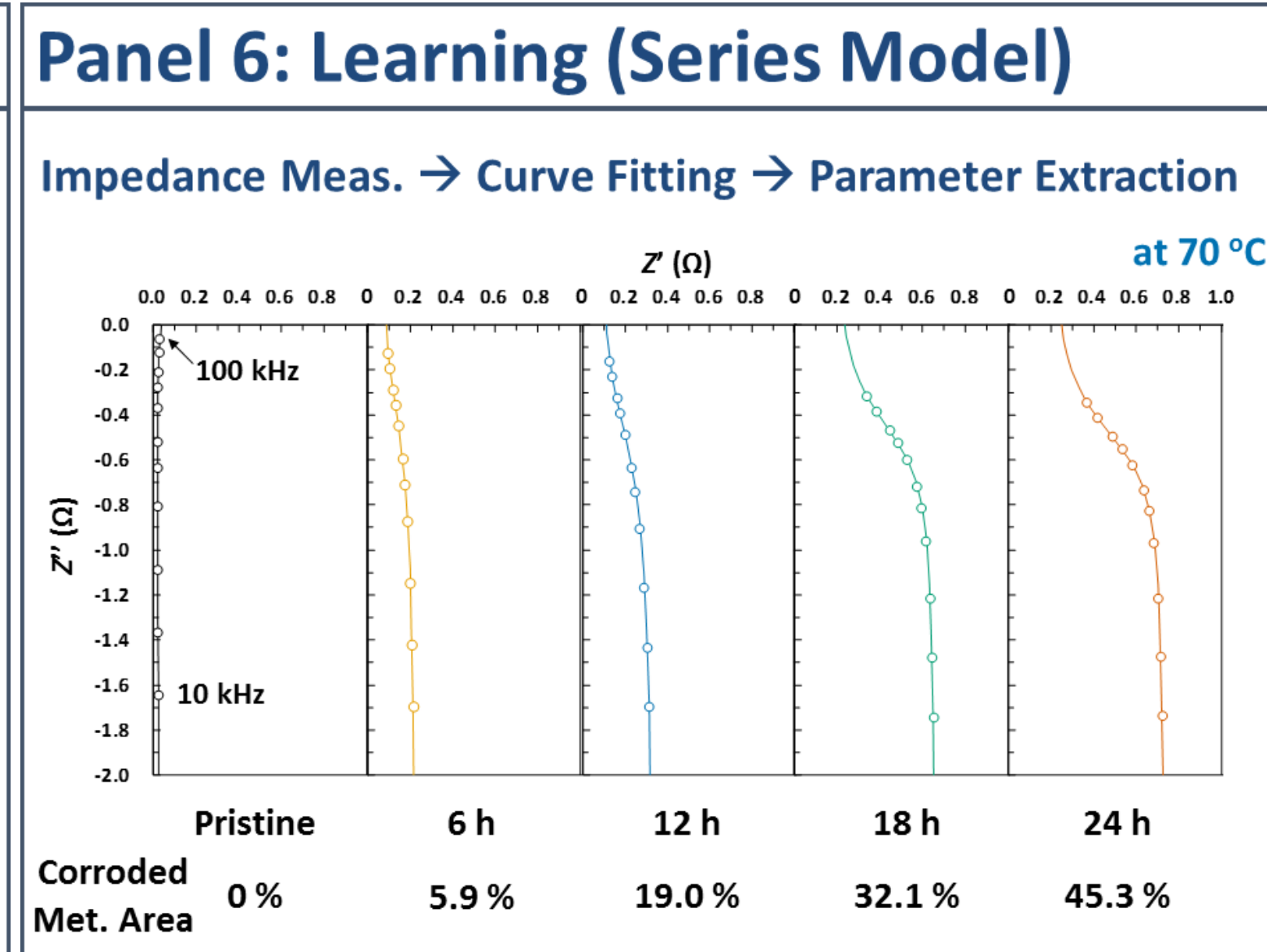
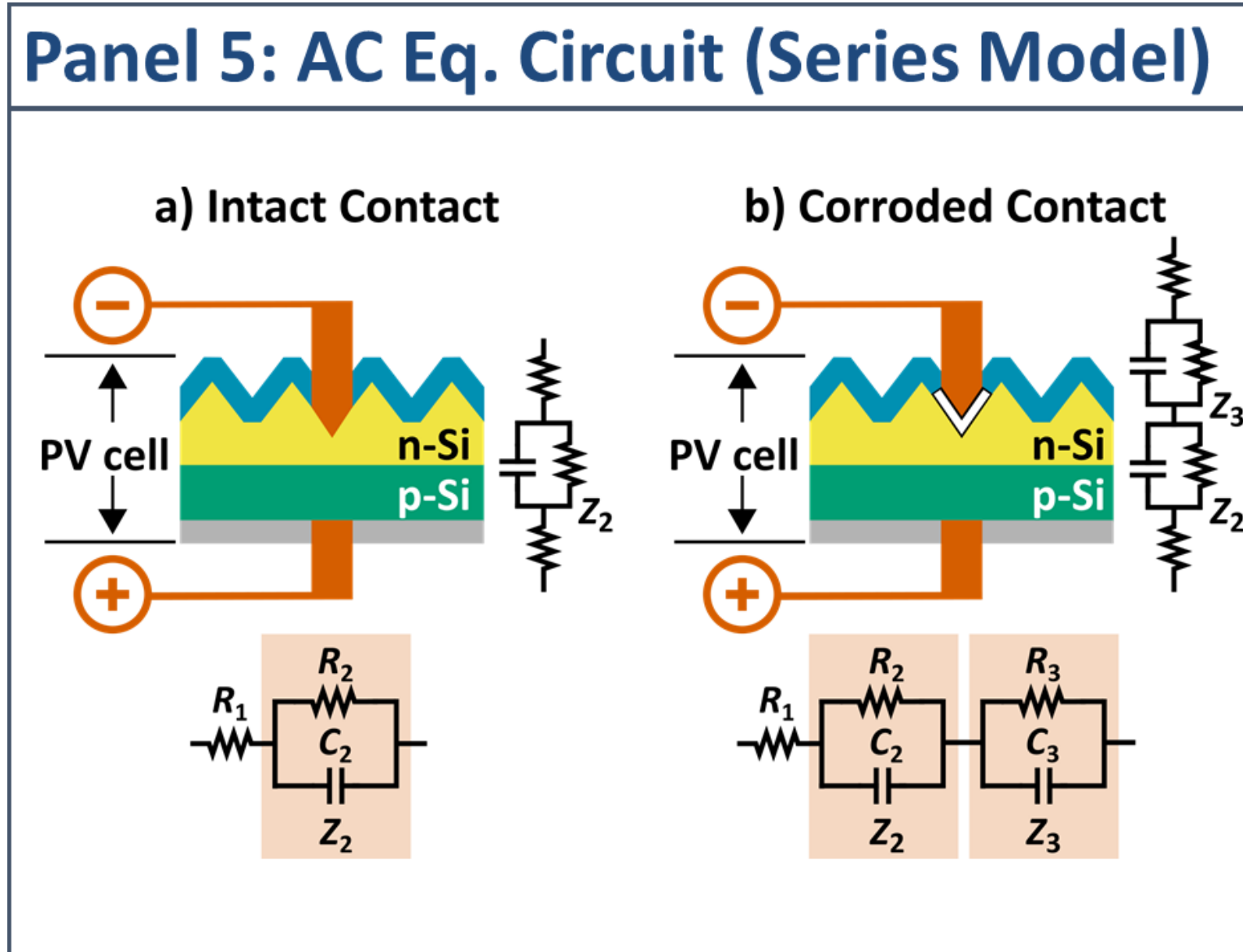
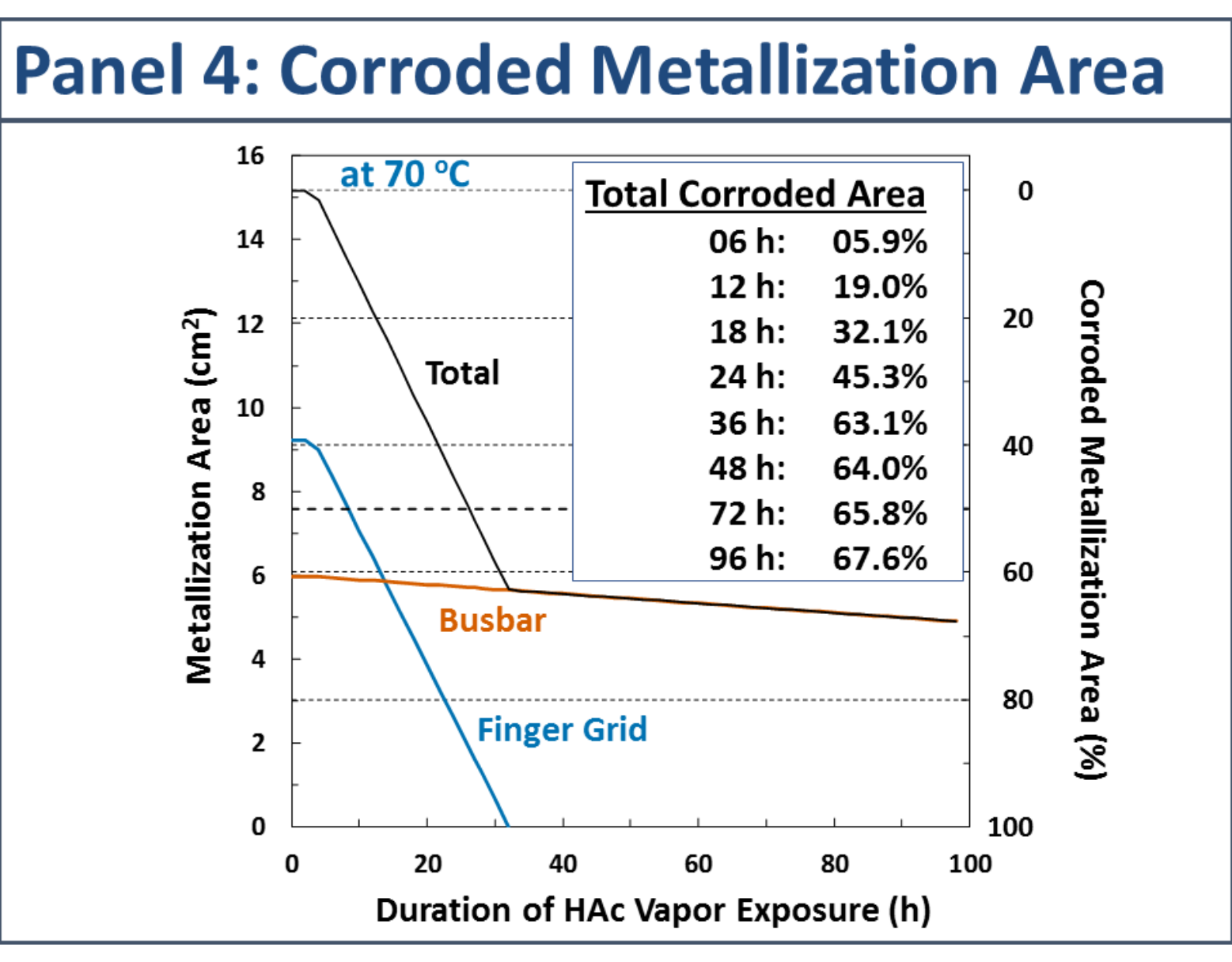
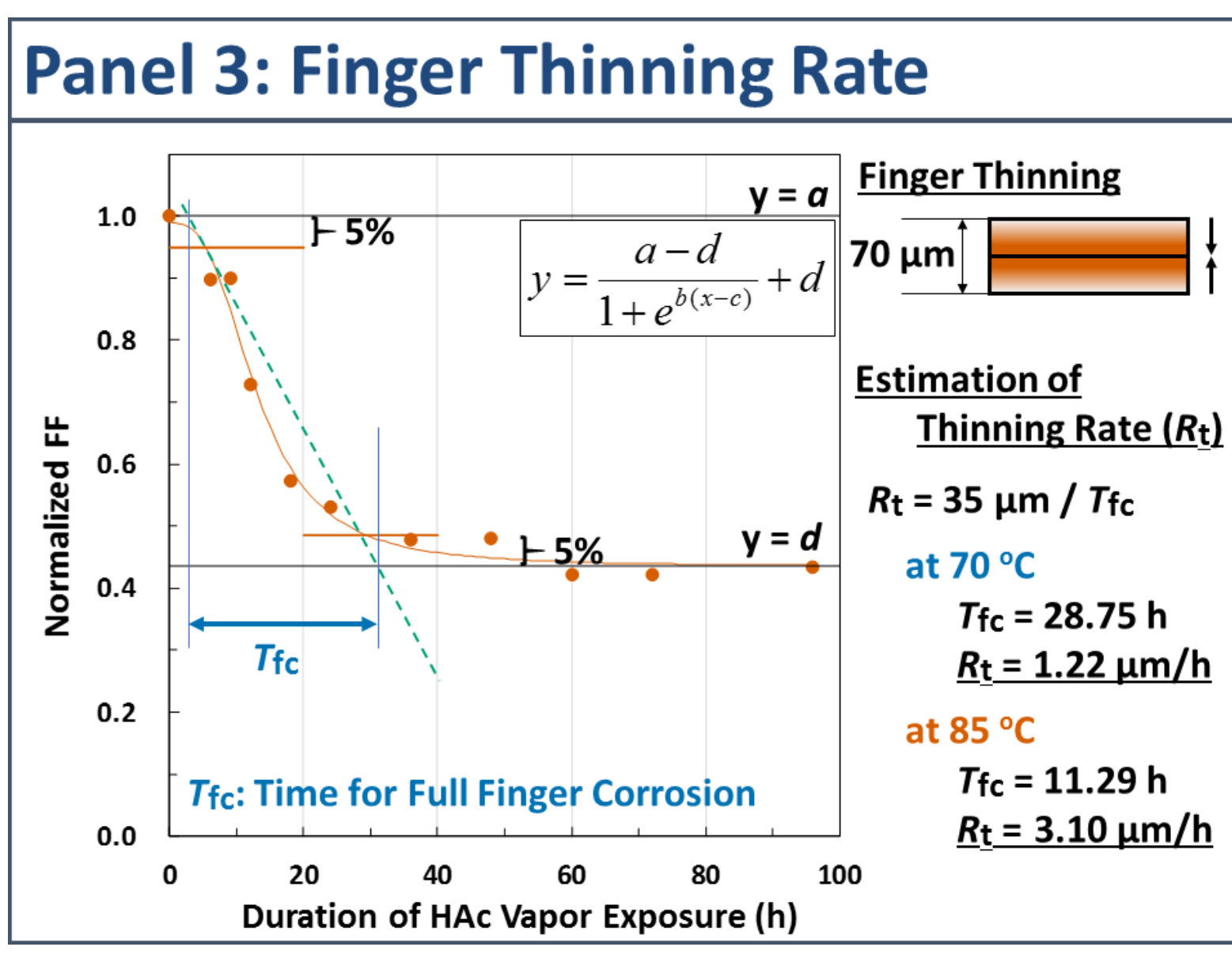
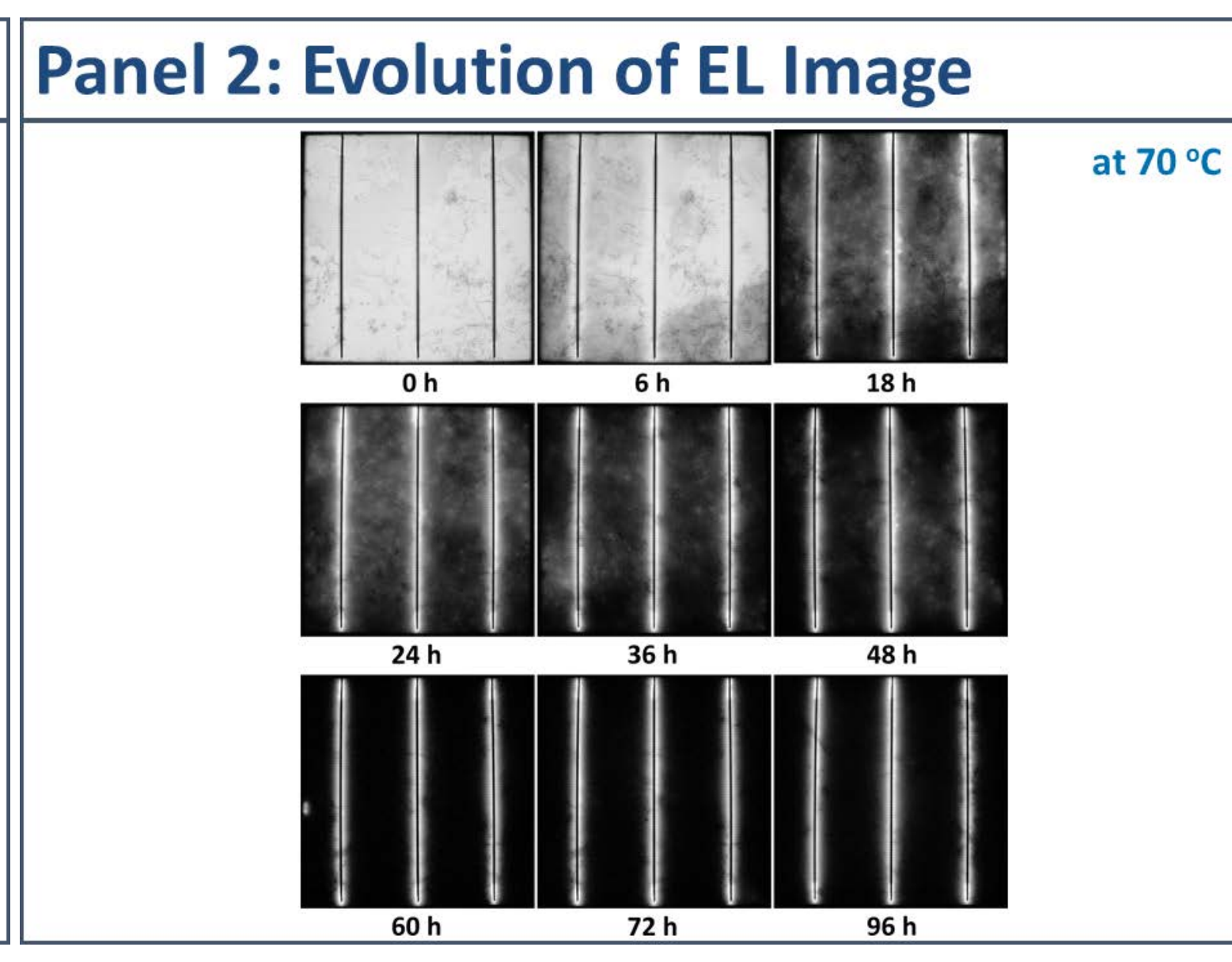
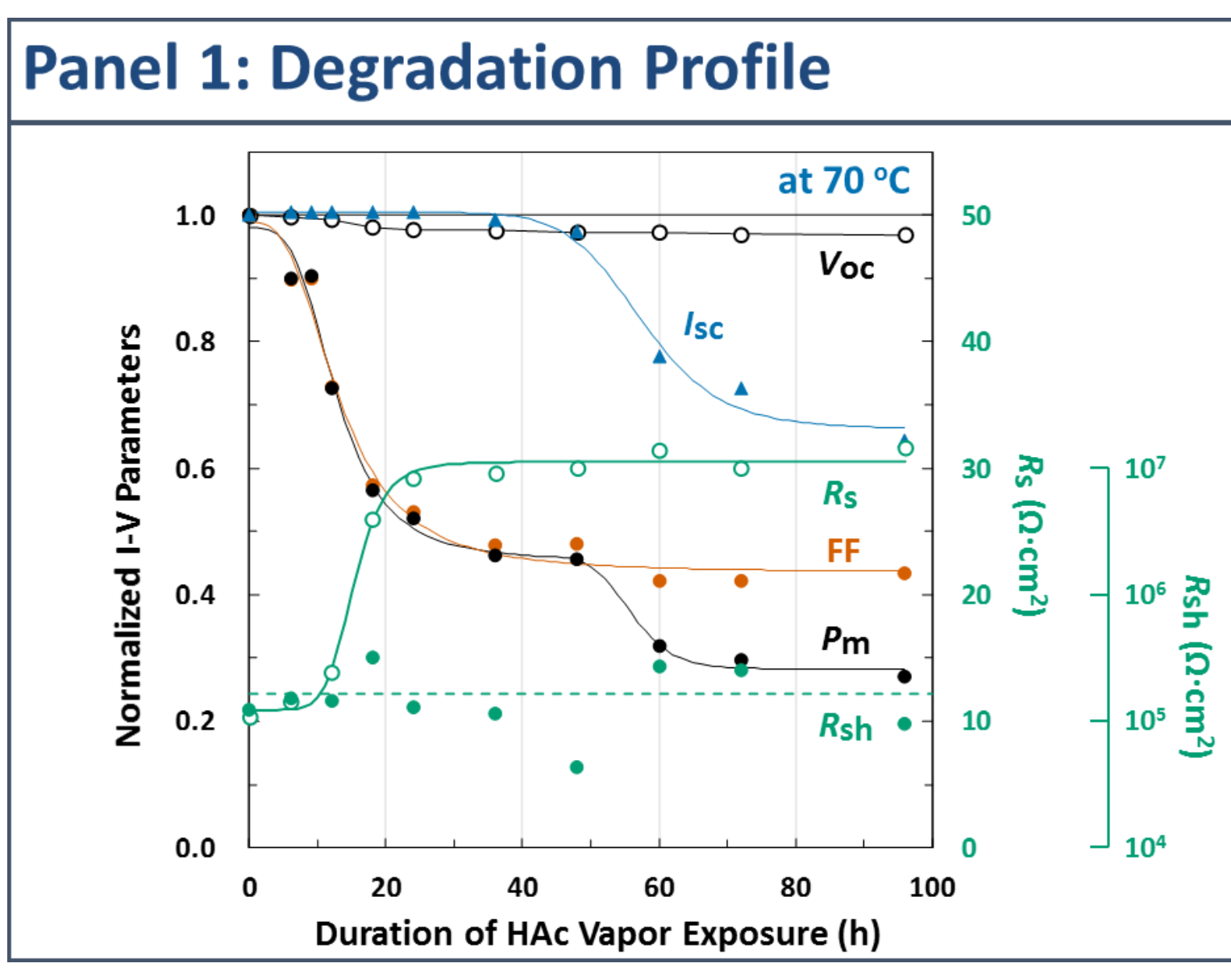
これらの結果は、直列回路モデルが腐食実体を反映するモデルであることを示すとともに、これまでの屋内試験・屋外試験における解析結果が妥当であることを示している。

AC Equivalent Circuit Models



References:
 T. Tanahashi et al., IEEE J. Photovolt., vol. 8, no. 4, pp. 997-1004, 2018.
 T. Tanahashi et al., IEEE J. Photovolt., vol. 9, no. 3, pp. 741-751, 2019.

Results



本検討は、NEDO委託事業「太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発」により実施された。NEDOよりのご支援に深謝申し上げます。

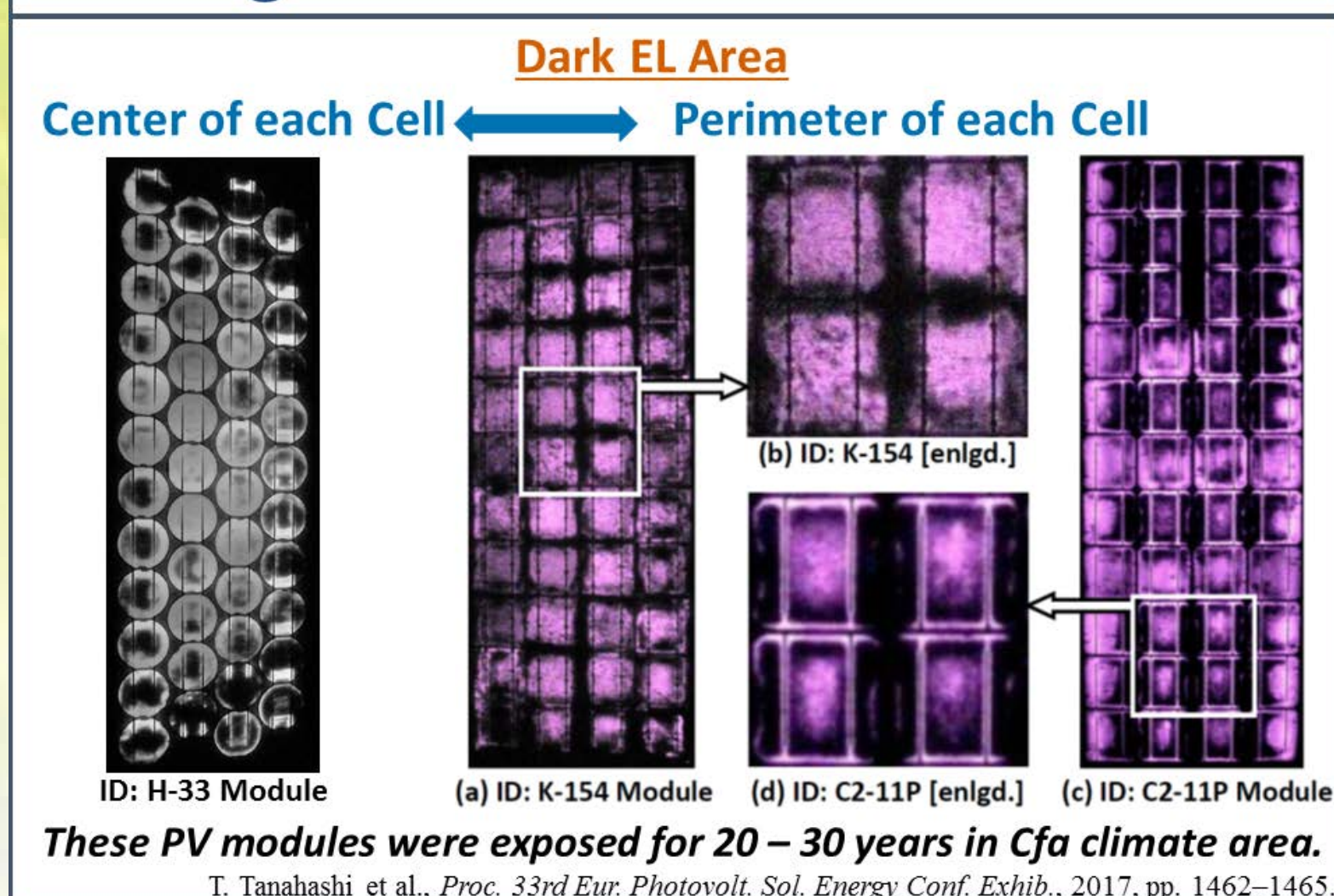
c-Si太陽電池セル／モジュールの腐食過程における交流インピーダンス変化

棚橋 紀悟¹・坂本 憲彦²・柴田 肇³・増田 淳¹

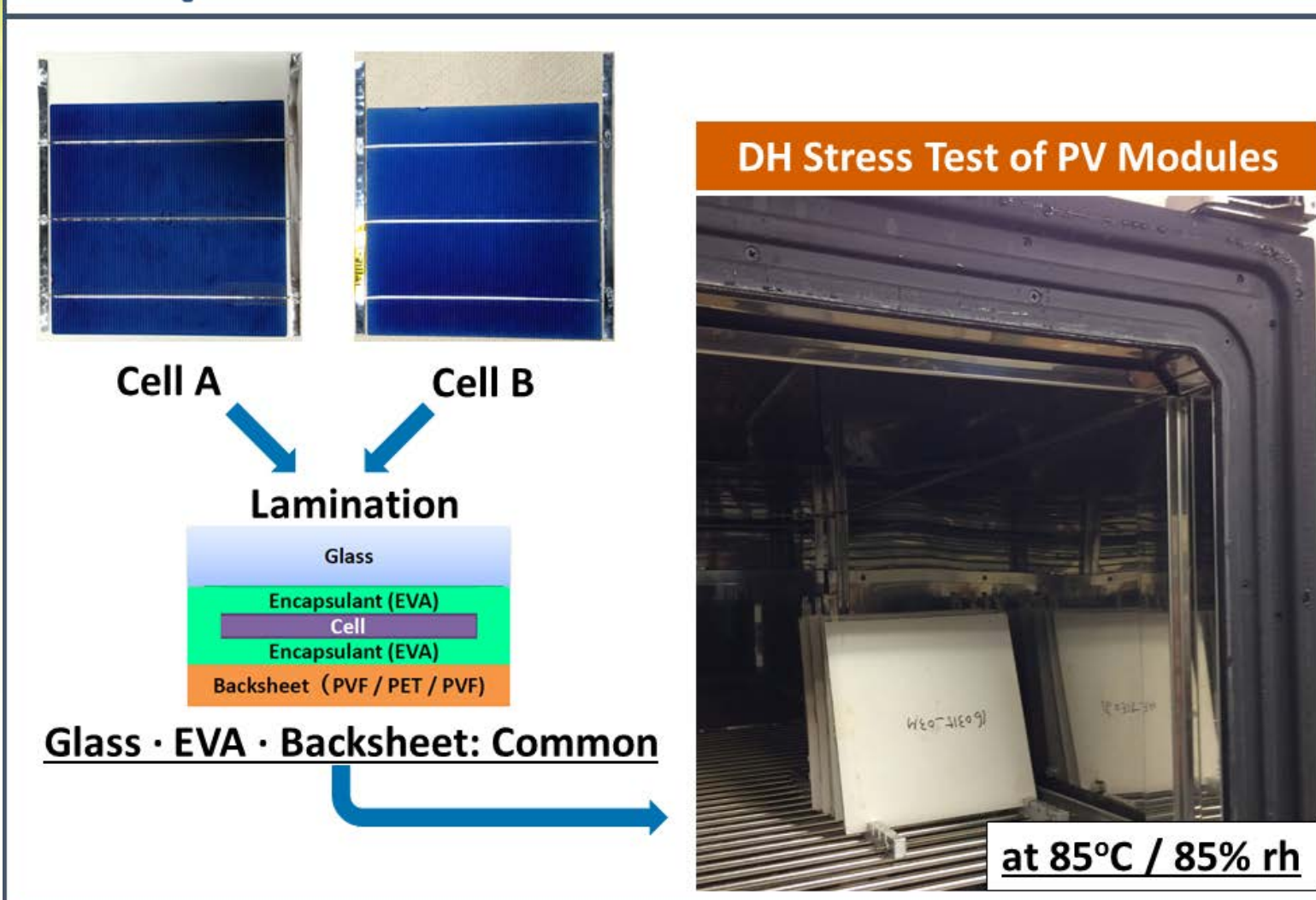
産業技術総合研究所 ¹太陽光発電研究センター、 ²計量標準総合センター

Background & Experimental

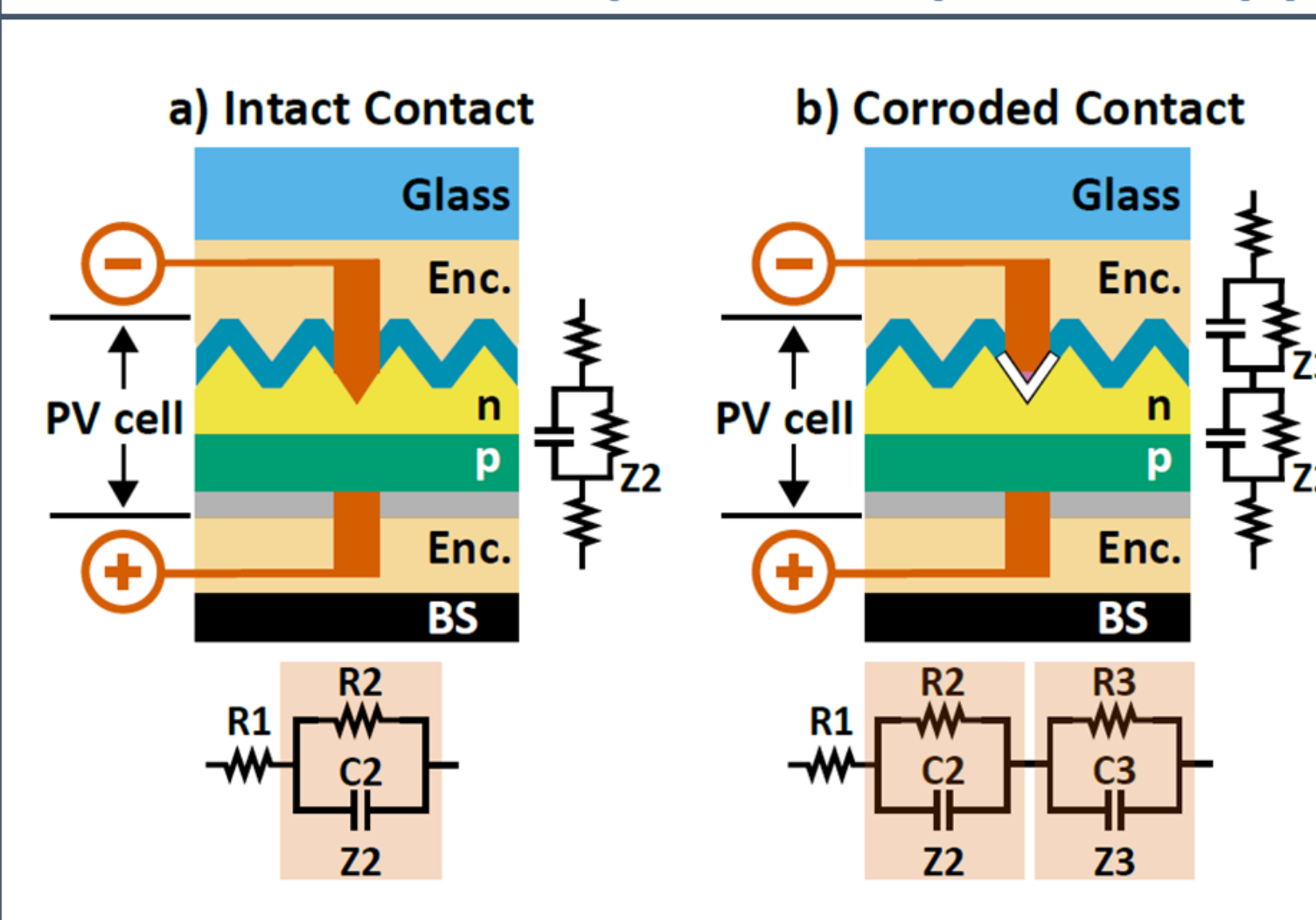
EL Images in the Fielded PV Modules



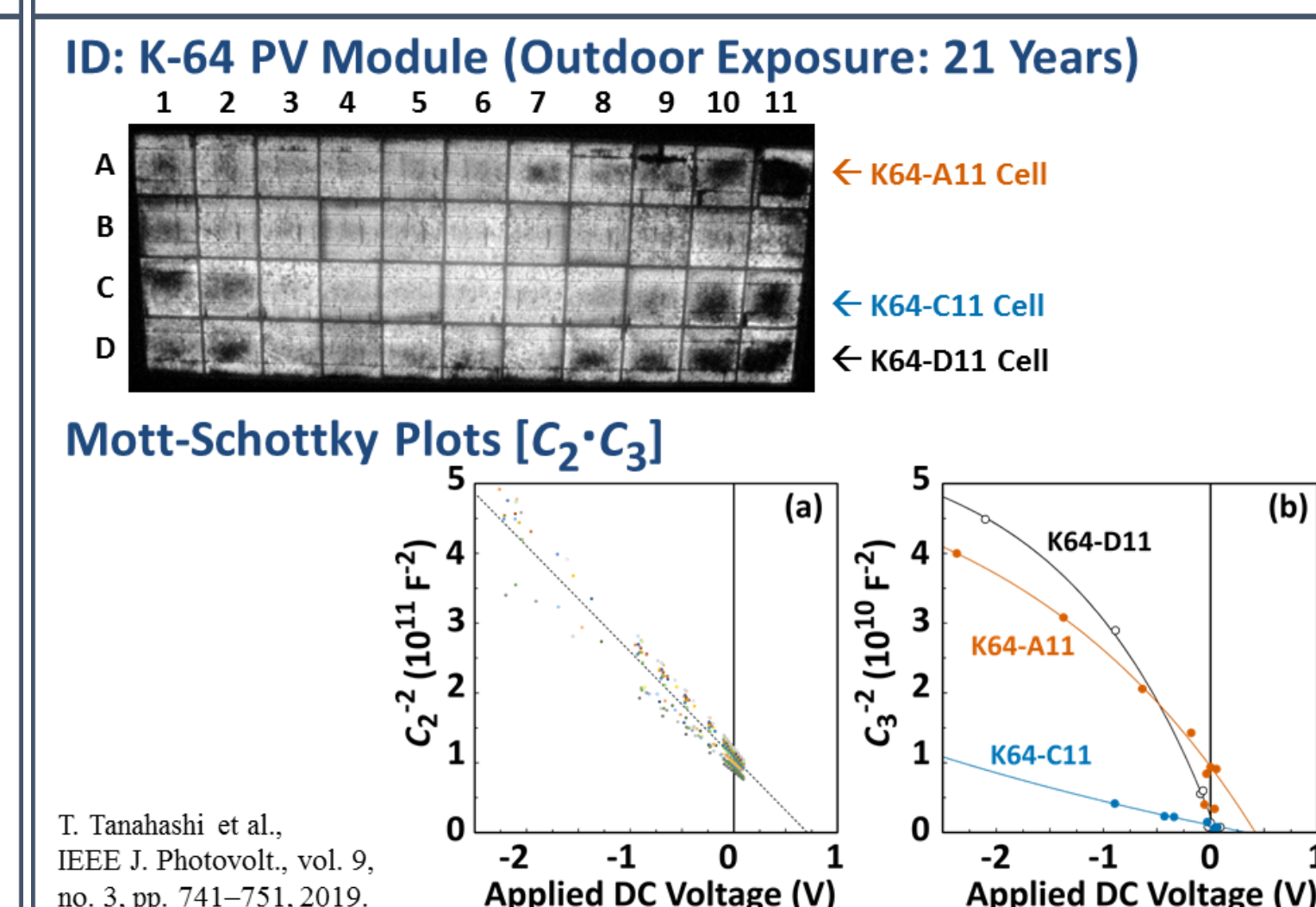
Damp-Heat Stress Test



Evaluation: AC Impedance Spectroscopy



in the Fielded PV Modules

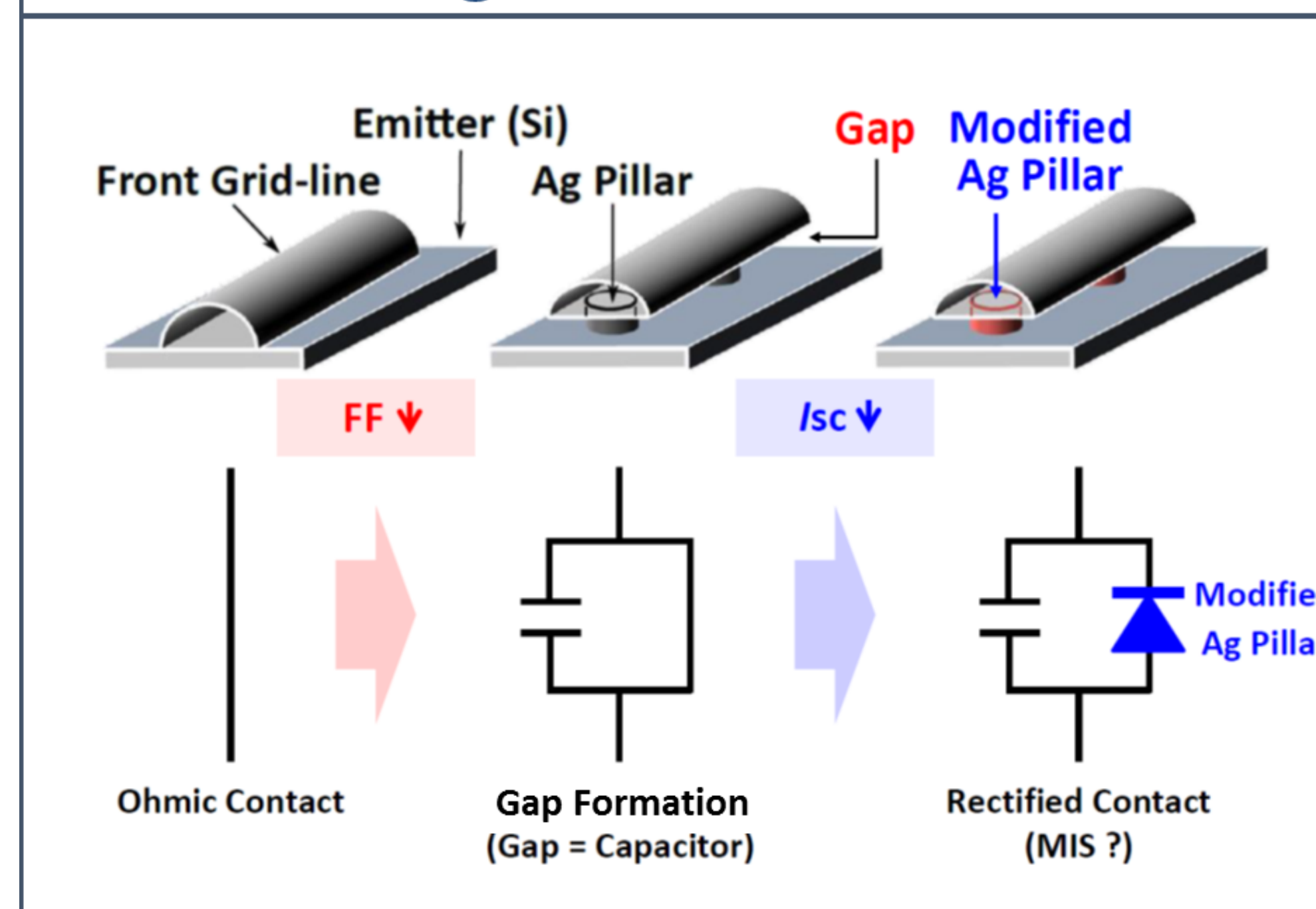


Summary

In this study, we aimed to identify the respective evolutions of AC-impedance characteristics in 2 types of PV modules which is comprised of PV cells with different susceptibility to corrosive stress, during long-term DH stress test. The peculiar characteristics of the newly expressed capacitance (C_3), of which is non-linearly changed in Mott-Schottky plot, were clearly detected in both PV modules with power-loss.

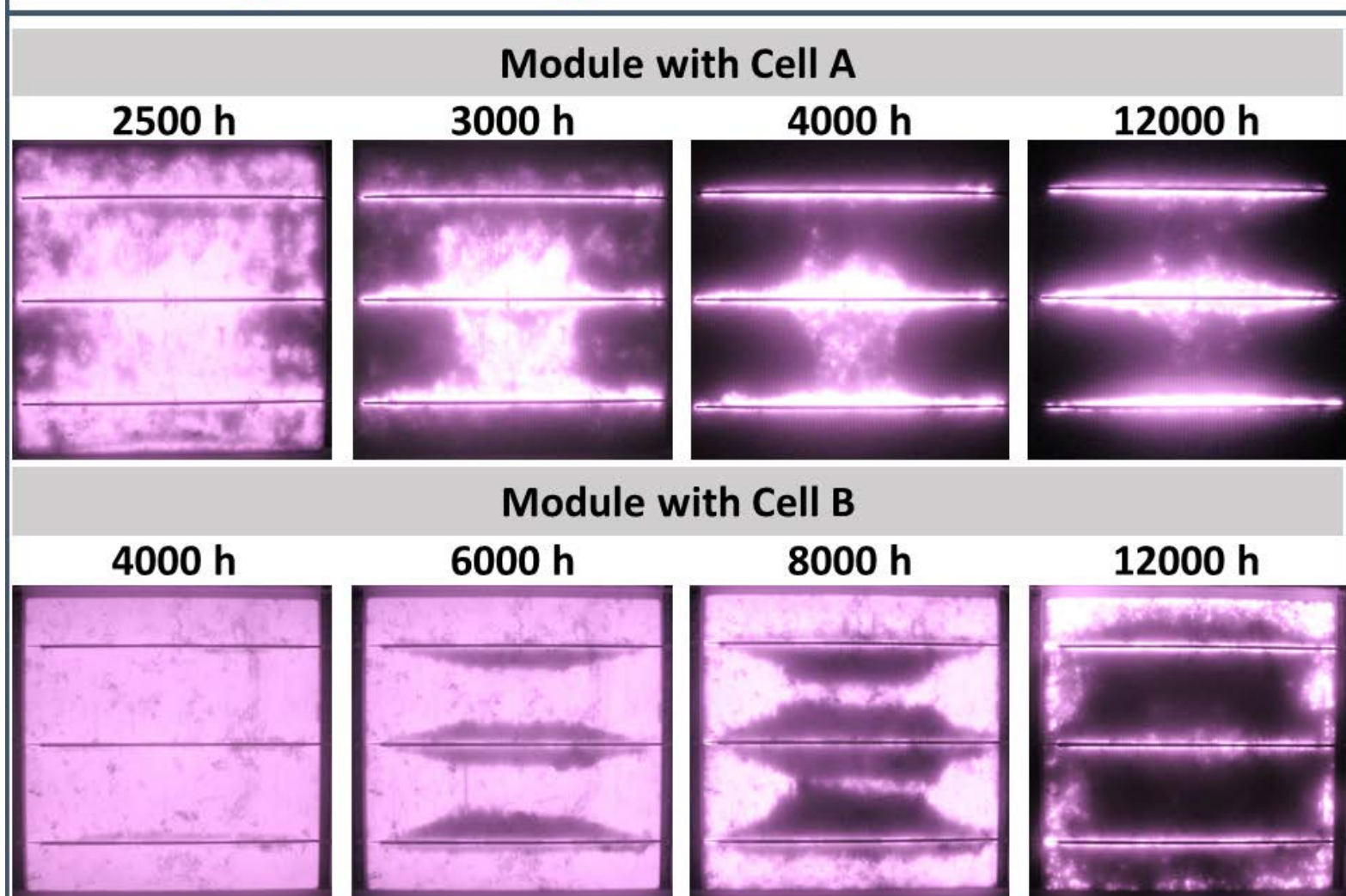
Within the parameters extracted from the fitting to a simple exponential model [$C_3^{-2} = \alpha \times \exp(-\beta \times V) + \gamma$, where α , β , and γ are fitting coefficients], α and γ were obviously correlated with the extent of power-loss. Noteworthy, these parameters from both PV modules were completely overlaid each other. These observations indicate that a common corrosion-mechanism works in both PV modules, although the kinetics of corrosion occurring in the respective PV modules is extremely different.

Common Degradation Mechanism

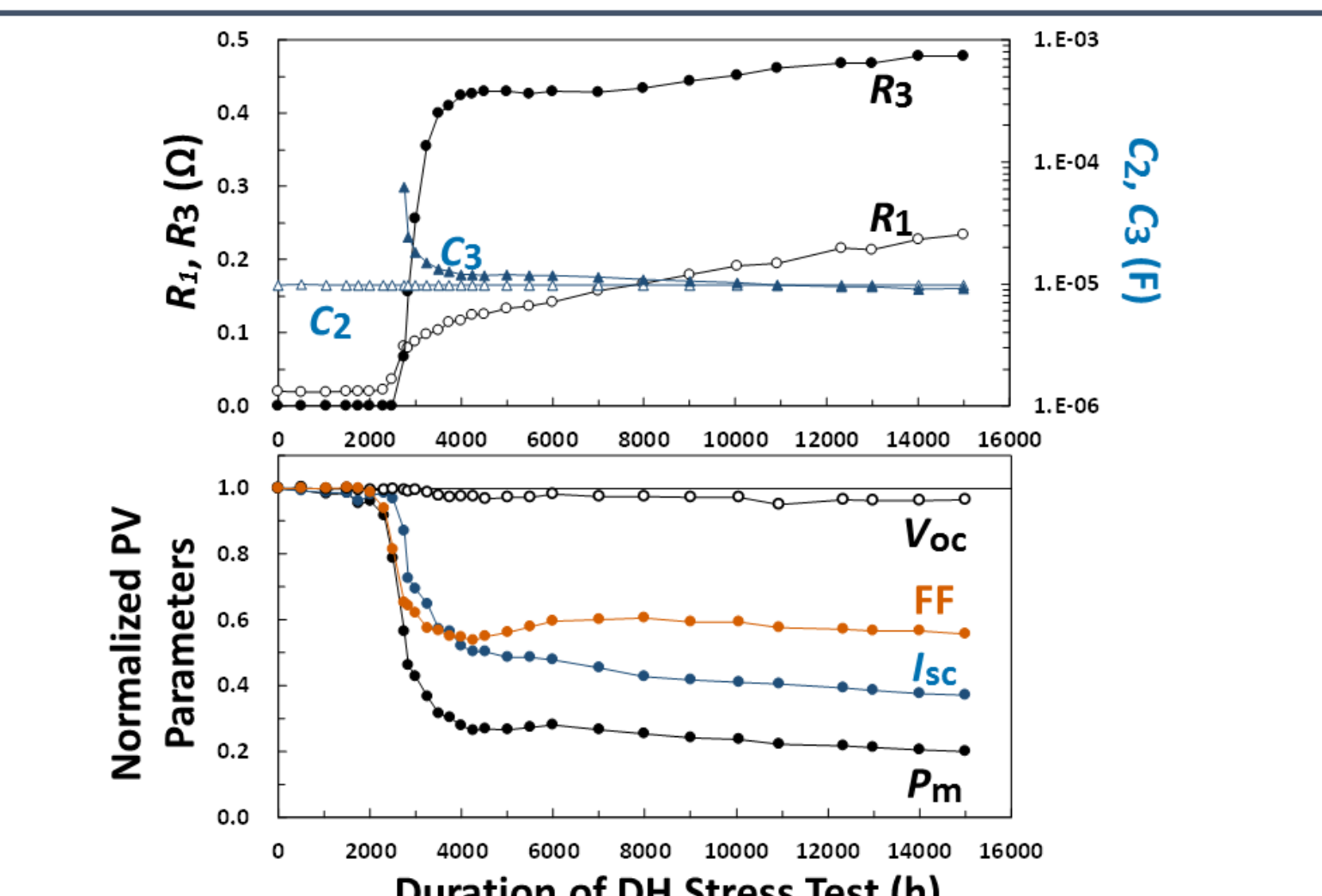


Results

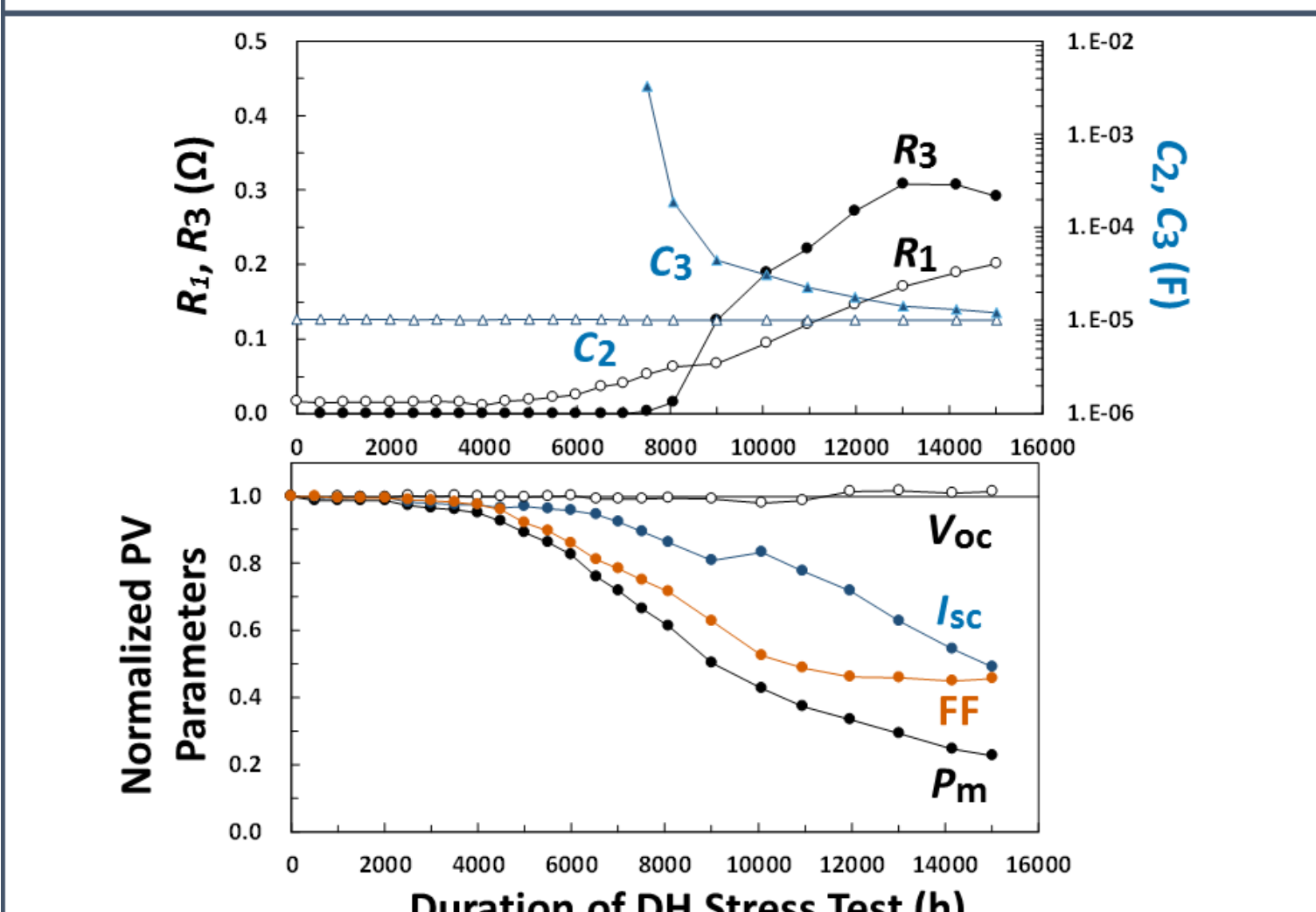
EL Images during DH Stress Test



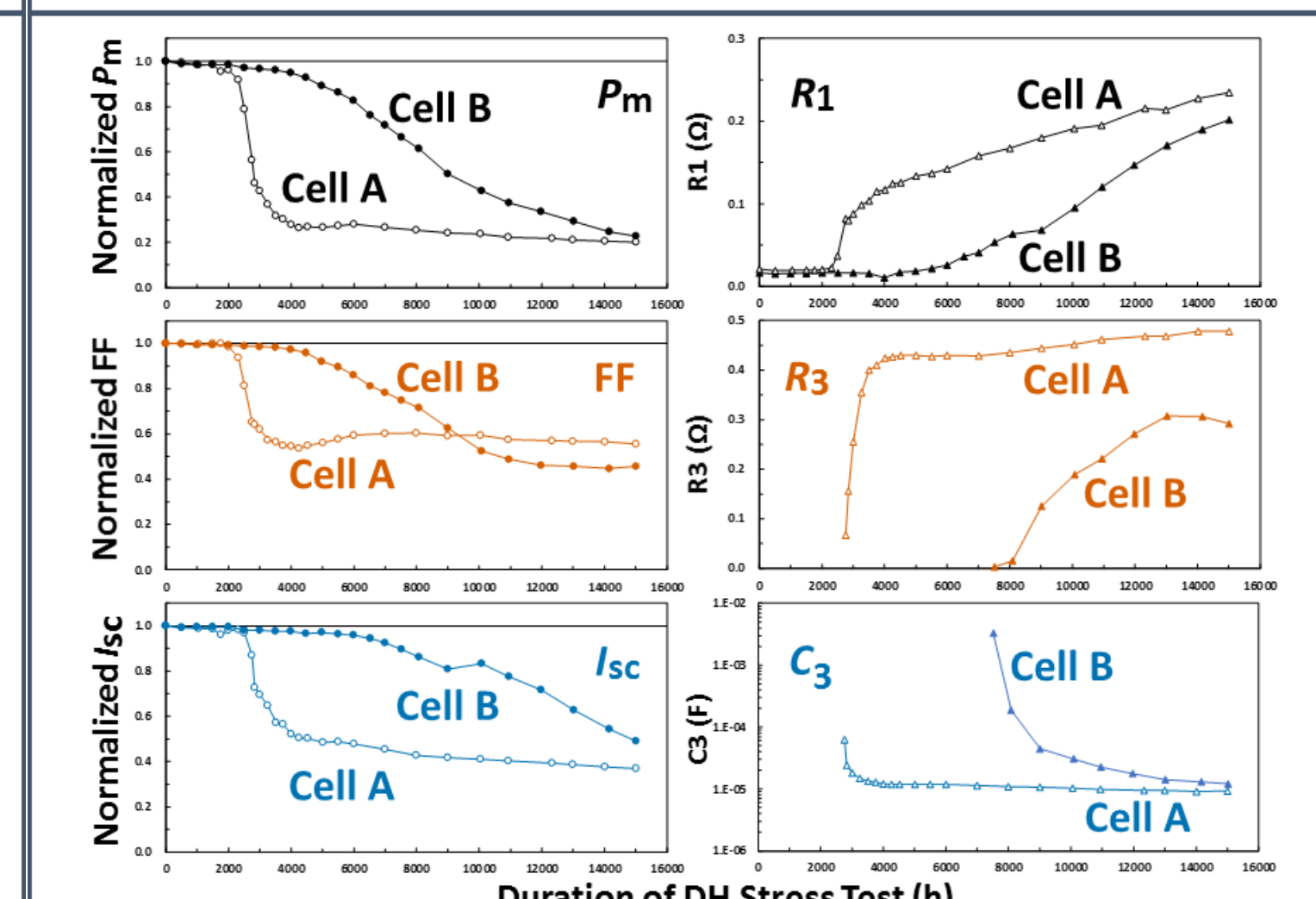
Evolution of Elec. Parameters (Cell A)



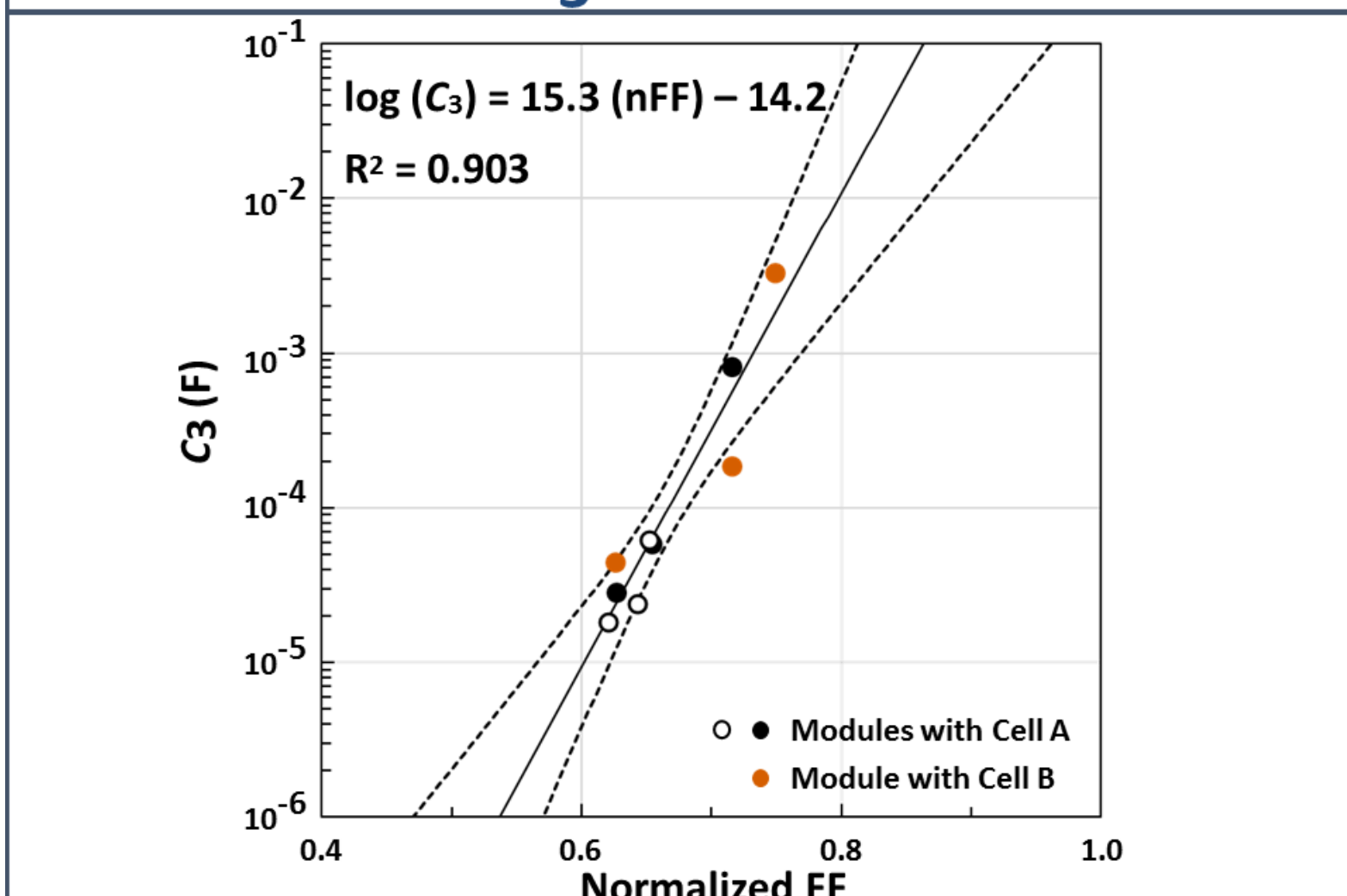
Evolution of Elec. Parameters (Cell B)



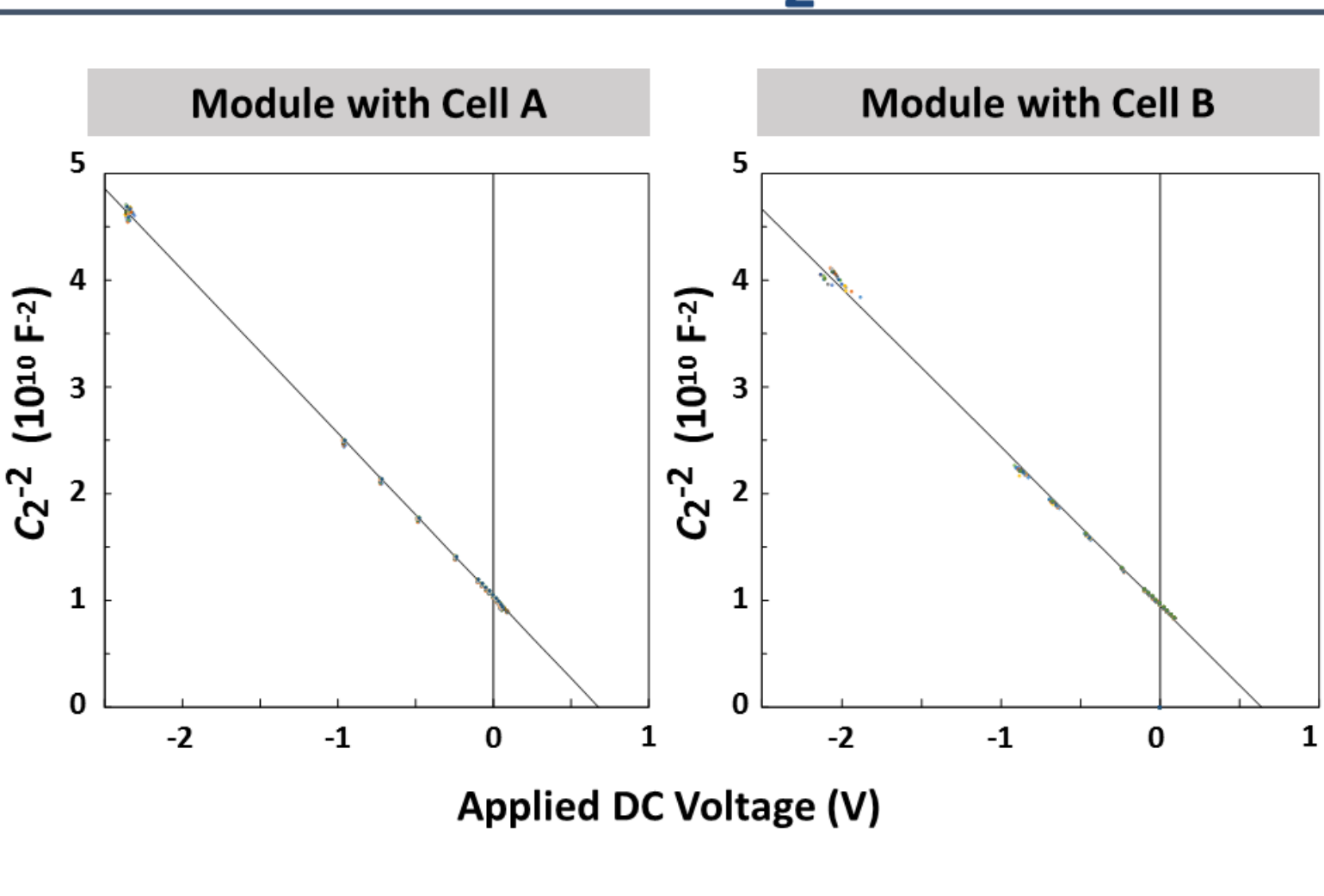
Evolution of Elec. Parameters



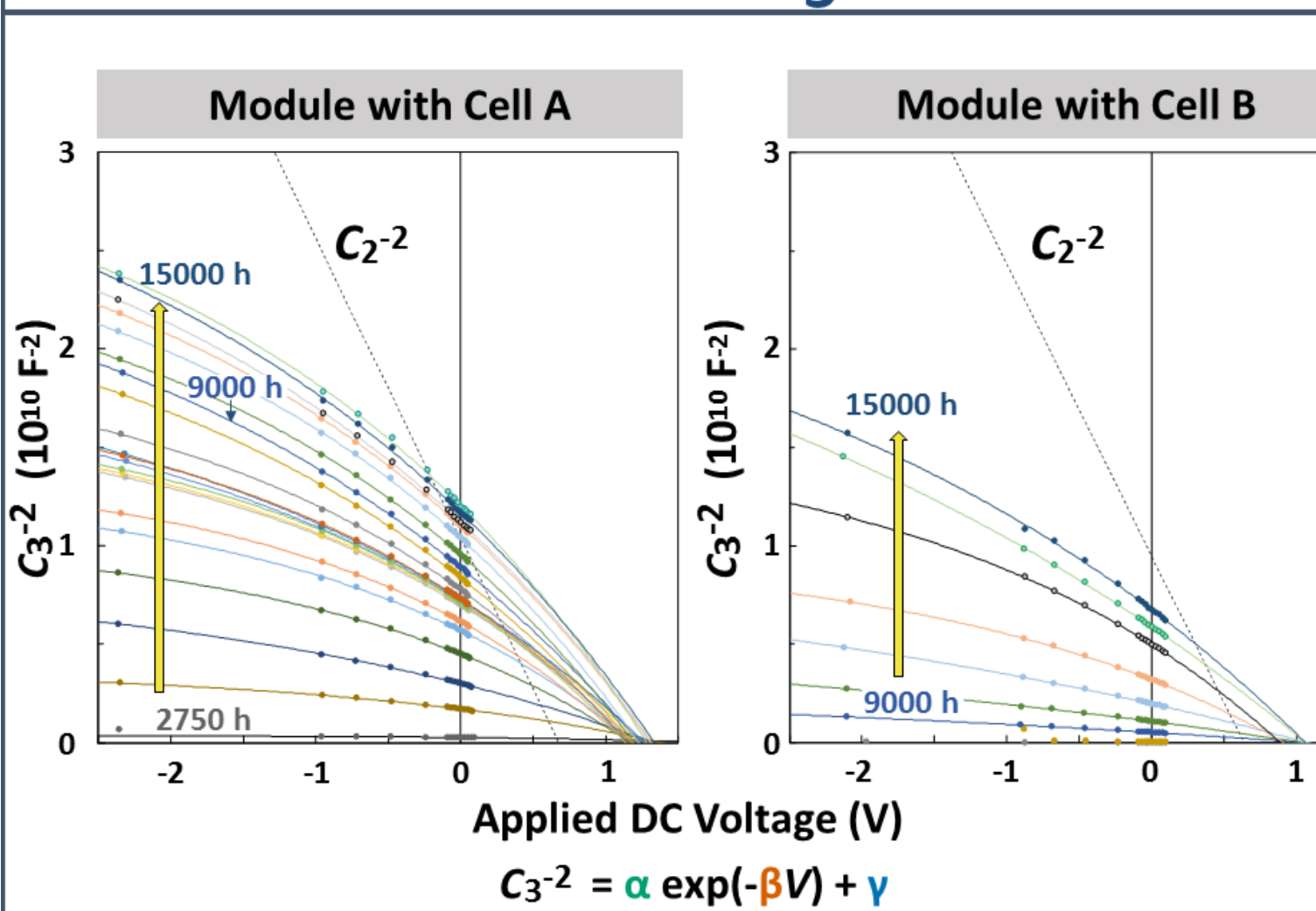
Correlation of C_3 with FF-Loss



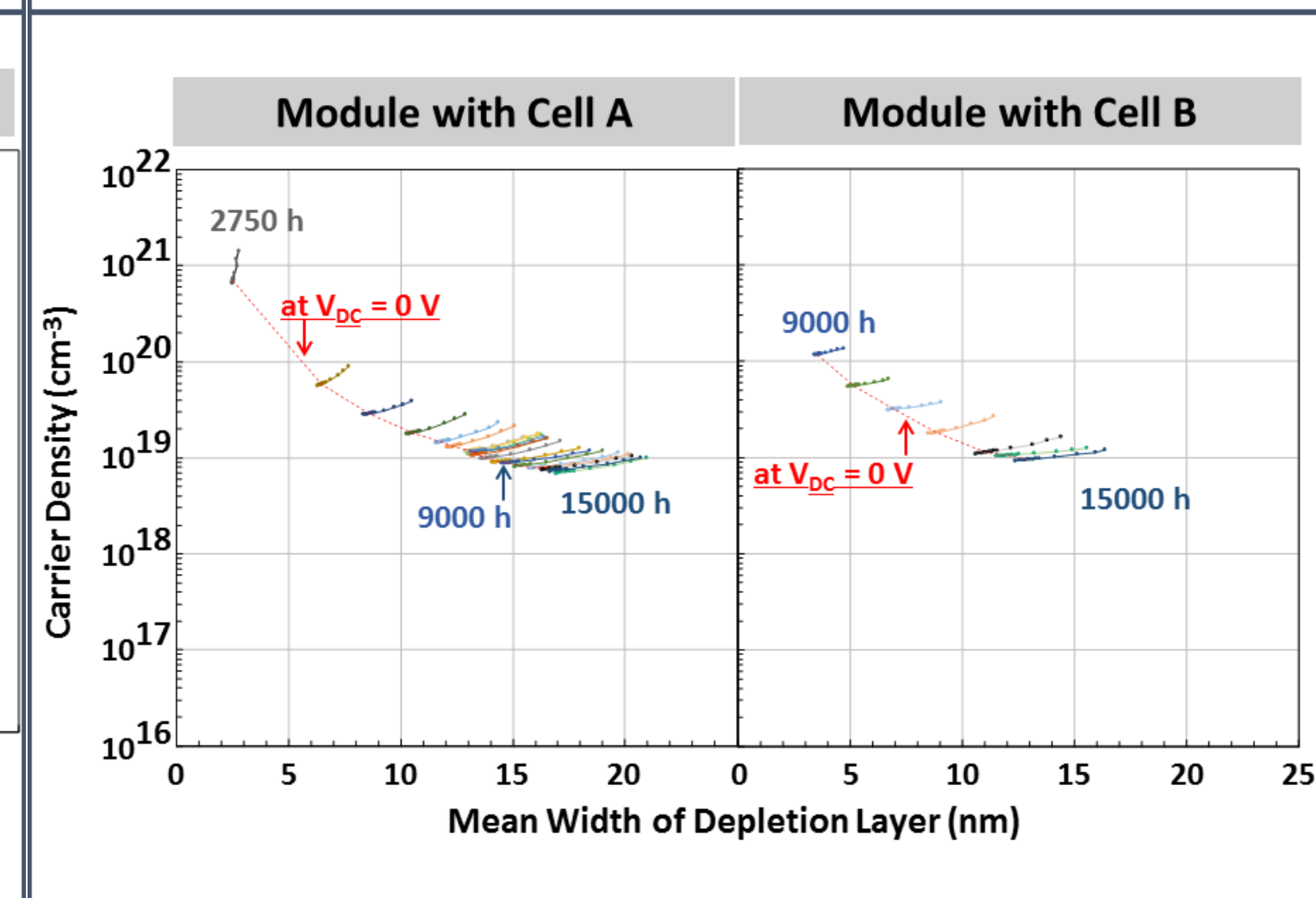
Mott-Schottky Plots [C_2]



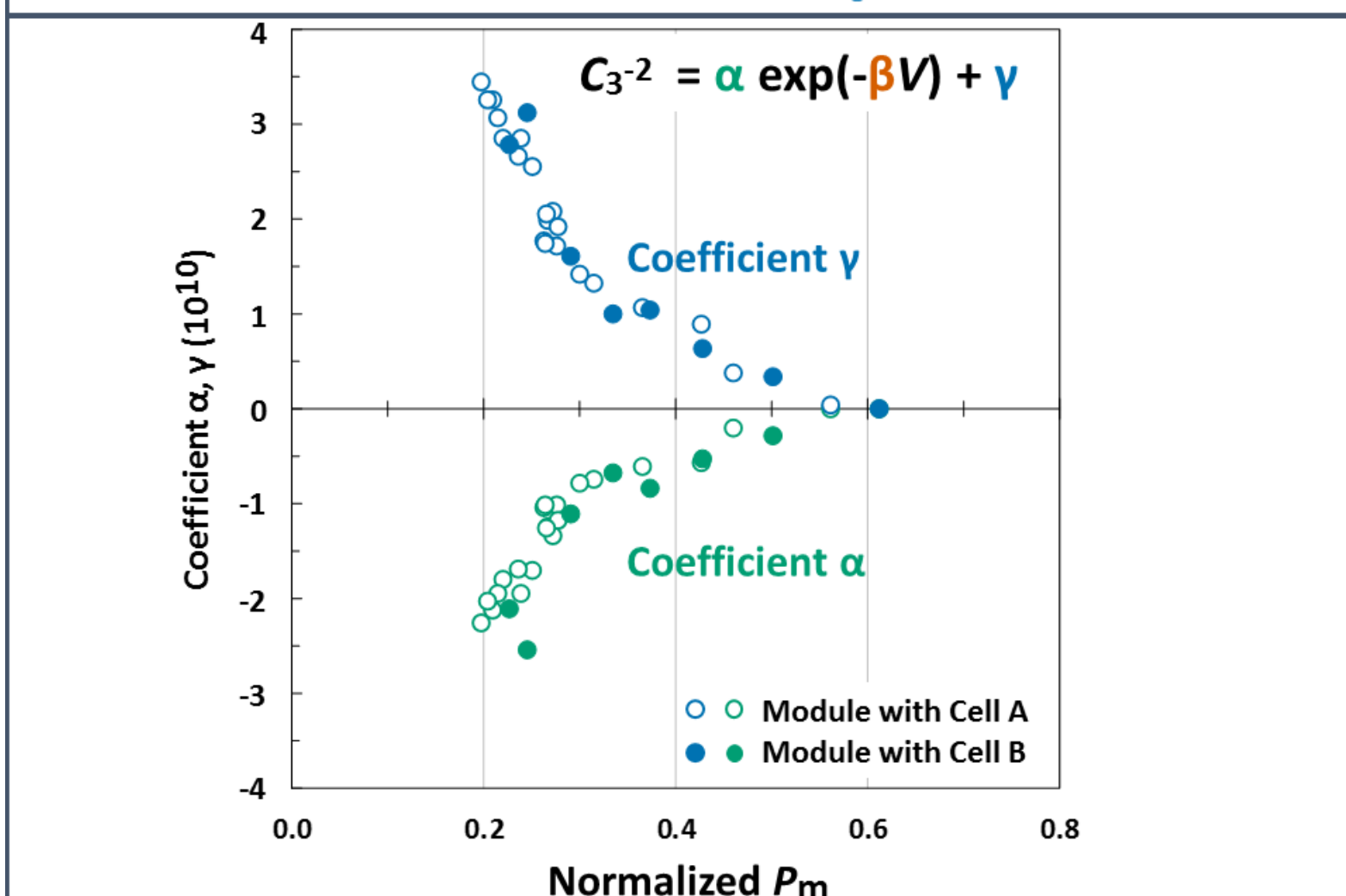
Mott-Schottky Plots [C_3]



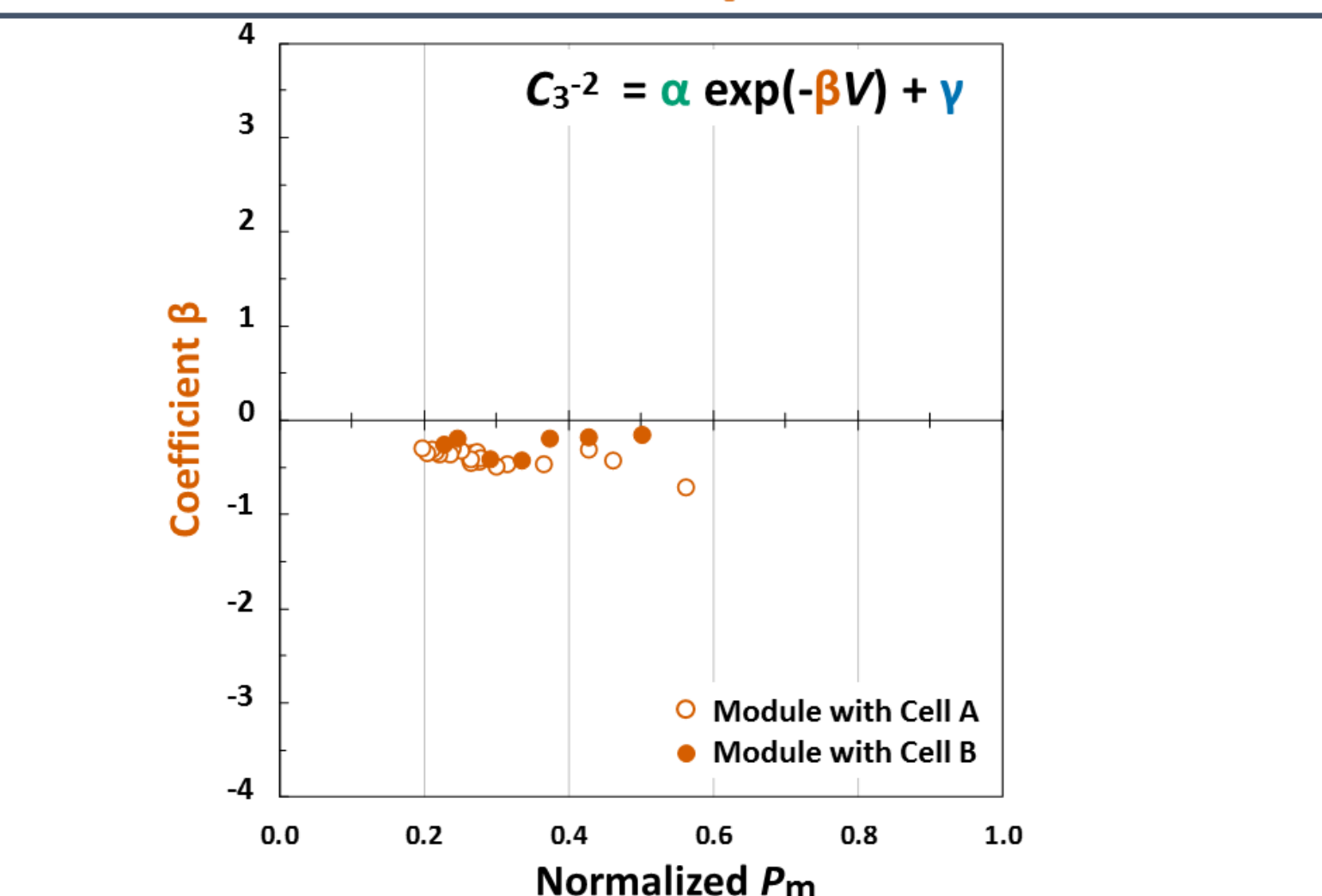
Non-Uniform Degradation (Module)



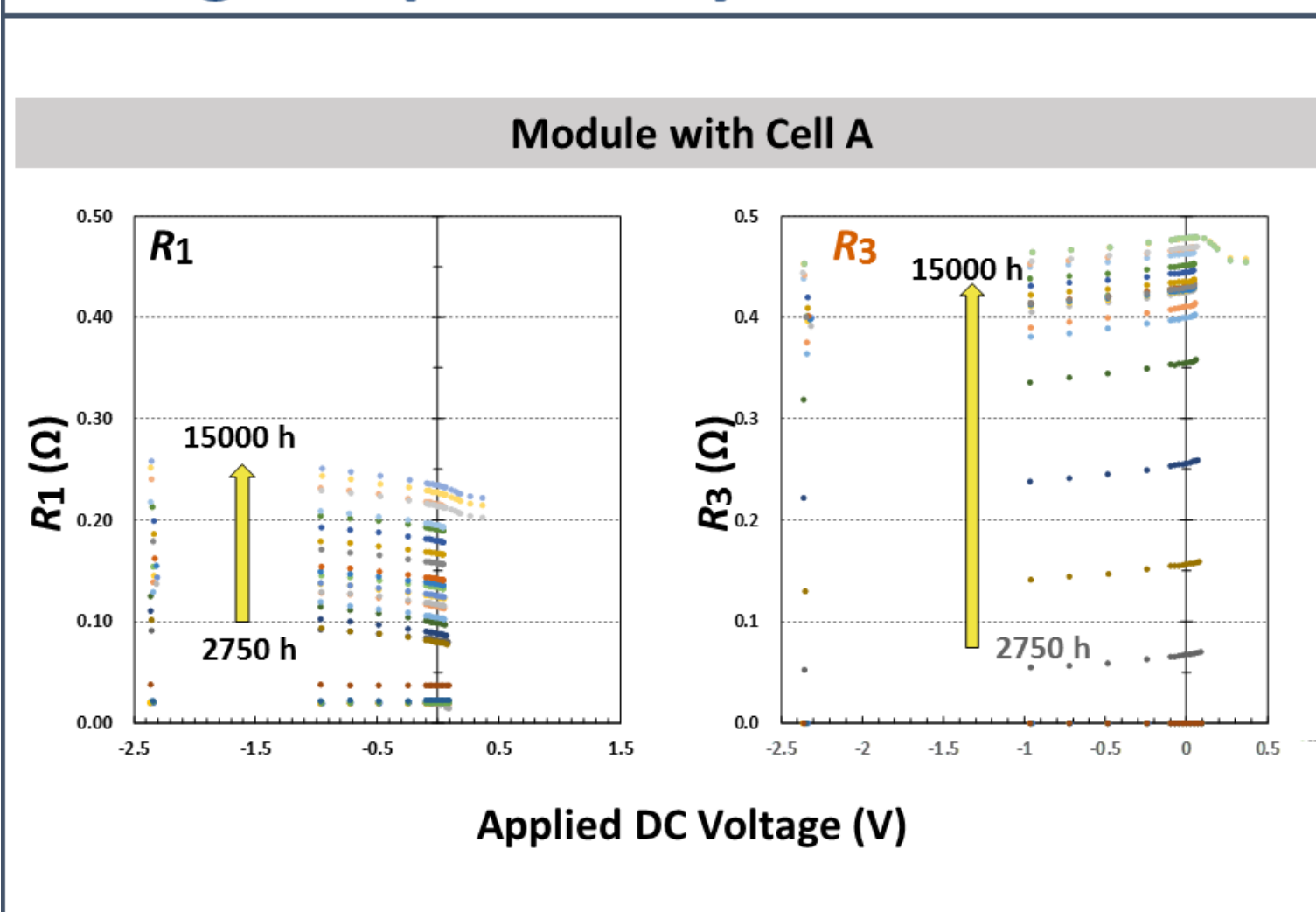
Correlation of Coeff. $\alpha \cdot \gamma$ with P_m -Loss



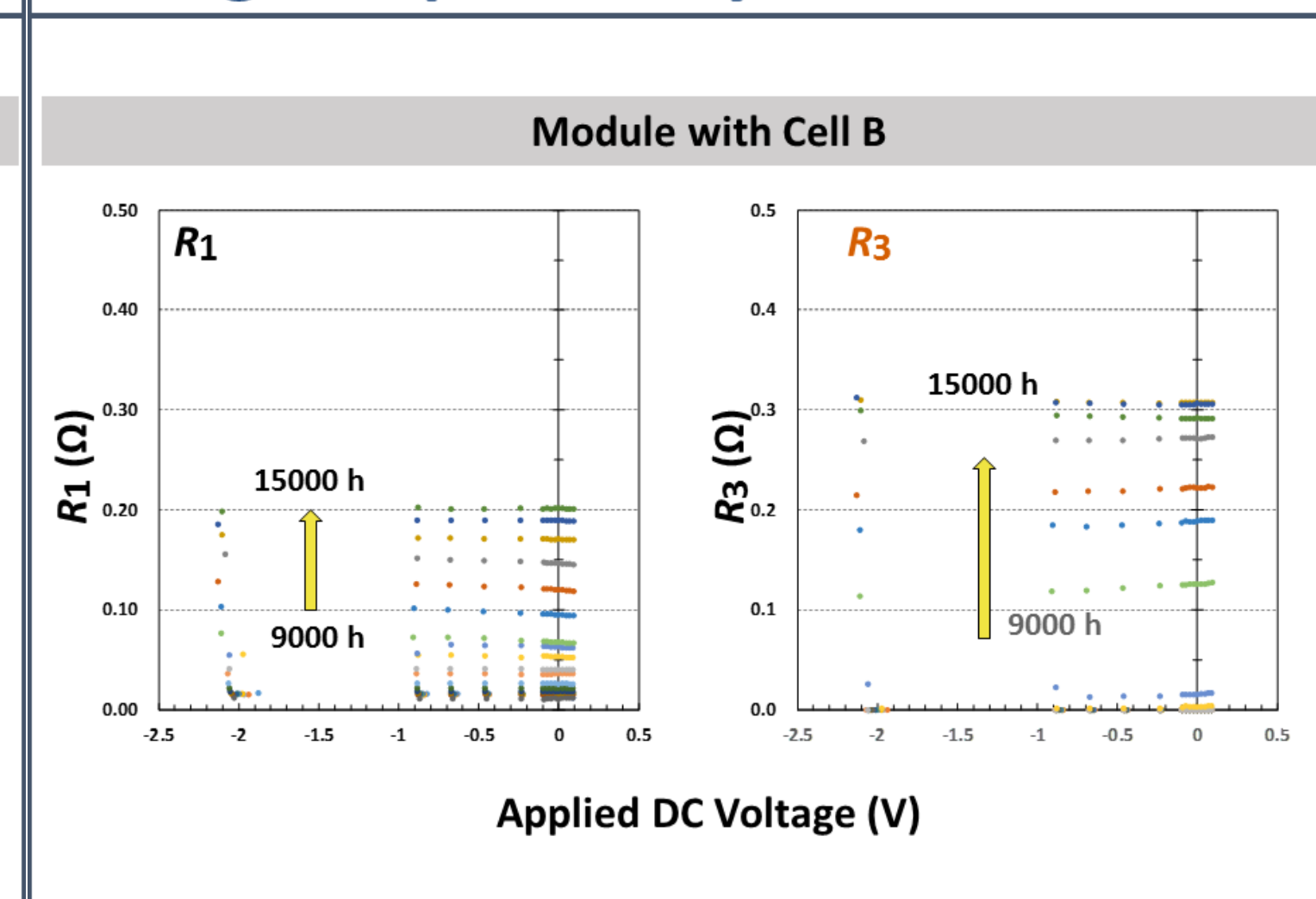
Correlation of Coeff. β with P_m -Loss



Voltage-Dependency in $R_1 \cdot R_3$



Voltage-Dependency in $R_1 \cdot R_3$



PCTによる太陽電池モジュールの劣化挙動の調査

伊野裕司・浅尾秀一・白澤勝彦・高遠秀尚
産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム

研究の目的

- 高効率セルを用いたモジュールで長期にわたって高い発電性能を維持するために、**長期間/高加速条件での信頼性試験による故障モードの把握と高信頼性モジュール技術の研究**を行っている[1-3]。
- ここでは**pressure cooker test (PCT)**により、湿熱劣化による故障モードに対する**モジュール部材の影響の調査**を行った。

実験

● モジュール構造(エッジシーリングなし)

Module type	G/BS		G/G	
	Tempered glass		Tempered glass	
Front cover	Tempered glass		Tempered glass	
Encapsulant (front)	EVA		EVA	
Interconnector	平角銅線 (有鉛はんだめっき) はんだタブ付け	平角銅線 (無鉛はんだめっき) CFタブ付け	平角銅線 (有鉛はんだめっき) はんだタブ付け	平角銅線 (無鉛はんだめっき) CFタブ付け
	Cell c-Si Al-BSF			
Encapsulant (back)	EVA		EVA	
Back cover	PVF/PET/PVF		Tempered glass	
Module busbar ribbon	平角銅線 (無鉛はんだめっき)			



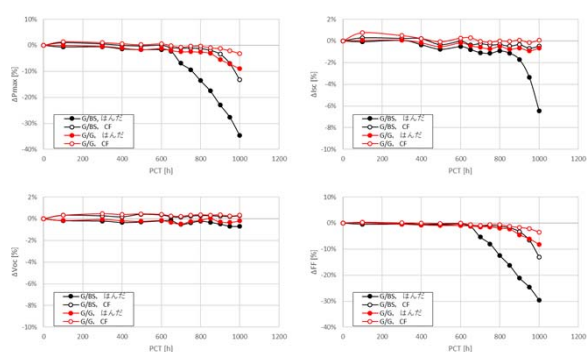
G/G ↓ ↑ G/BS



- PCT条件: 110°C 85%RH ~1000 h
- 測定: I-V測定, EL観察

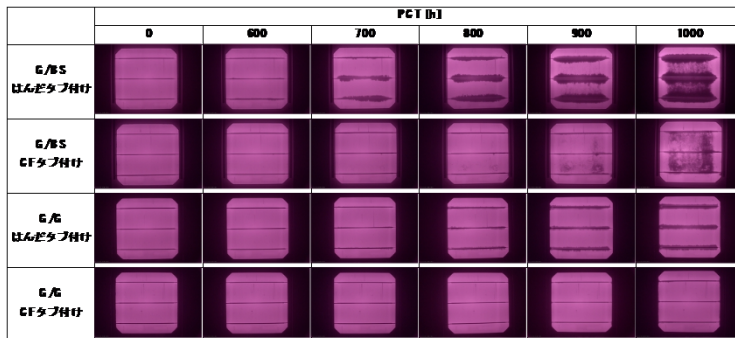
結果^[3]

● I-V測定



- 標準的な構造のG/BS・はんだモジュールは、650 hから P_{max} FFが劣化するのに対し、G/BS・CF、G/G・はんだ、G/G・CFモジュールは劣化の開始が850~900 hに延びた。
- また劣化が始まった後も、G/Gモジュールは、G/BSモジュールと比べて、その劣化レートはより小さい。

● EL観察



- はんだタブ付けモジュールでは、劣化はインターコネクタ沿いから発生したのに対し、G/BS・CFタブ付けモジュールではこの劣化パターンは見られず、代わりにセル中央にまだらな劣化パターンが発生した。
- G/G・CFタブ付けモジュールでは、PCT 1000 hの後でも、明らかな劣化パターンは見られなかった。

考察



2つの劣化モードの組み合わせ?

インターコネクタ沿い劣化

セル中央劣化

- インターコネクタ沿い劣化は、これまでの研究で、モジュール作製時の過剰フラックスと有鉛はんだタブ付けによって劣化が促進され、劣化部のAg電極にSn化合物層の堆積が確認された。このことから、この劣化モードには**電気化学的反応が関与している**と考えられる。
- 一方、CFタブ付けモジュールで見られた**セル中央劣化**は、シミュレーションで見られる湿熱試験後の酢酸濃度分布^[4]に類似しており、**酢酸による電極腐食**に起因すると考えられる。

結論

- PCT試験により、c-Si PVモジュールの湿熱劣化モードの調査を行った。
- G/G構造またはCFタブ付けを用いることで、劣化の抑制が確認された。
- また、CFタブ付けモジュールでは、インターコネクタ沿いの劣化の代わりにセル中央の劣化が確認された。
- これらの2種の劣化パターンは、
セル中央劣化: 酢酸濃度分布のみに基づく劣化
インターコネクタ沿い劣化: 電気化学的反応により促進された劣化と考えている。

参考文献

1. Y. Ino, S. Asao, K. Shirasawa, and H. Takato, "Effect of soldering on the module degradation along bus bar in DH test and PCT for crystalline Si PV modules", in *Proc. WCPEC-7*, (2018).
2. Y. Ino, S. Asao, K. Shirasawa, and H. Takato, "Comparison of glass/glass and glass/backsheet mini-modules by accelerated test", in *Proc. NREL PV Reliability Workshop*, (2019).
3. Y. Ino, S. Asao, K. Shirasawa, and H. Takato, "Investigation of degradation mode spreading interconnectors by pressure-cooker testing of photovoltaic cells", *IEEE Journal of Photovoltaics*, (Accepted).
4. J. Irikawa, T. Nishiwaki, H. Hashimoto, H. Kanno, and M. Taguchi, "Analysis of the acetic acid generation in the PV modules", in *Proc. NREL PV Reliability Workshop*, (2019).

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援のもとに実施された。

太陽電池モジュール内に封入可能な 錫薄膜型酢酸センサの検量線の改善

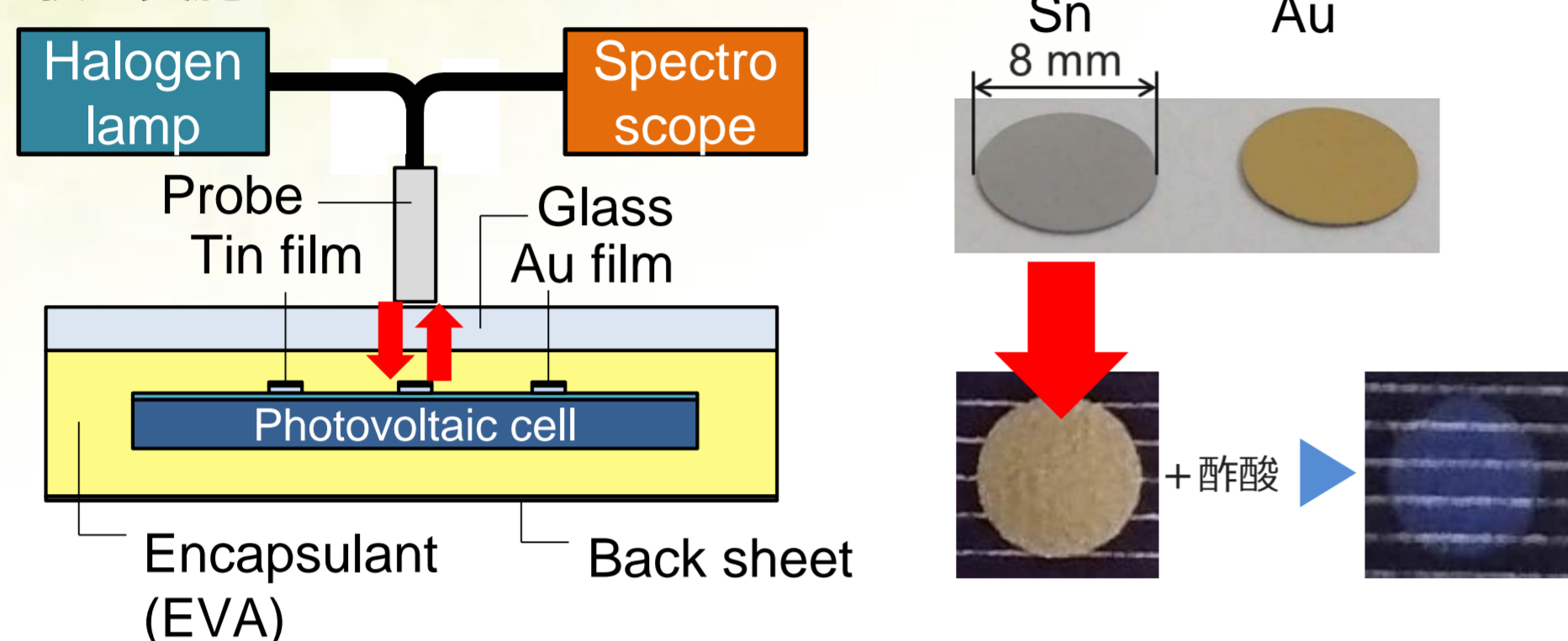
○森本 考紀¹, 浅野 正太¹

城内 紗千子², 原 由希子², 増田 淳², 梅田 倫弘¹, 岩見 健太郎¹

1. 東京農工大学, 2. 産業技術総合研究所

錫薄膜型センサによる酢酸動態の評価

- 太陽電池(PV)モジュール内のEVAの劣化により酢酸が発生^[1]
- 酢酸と反応する錫薄膜型センサの反射光強度変化を利用して, Damp-heat(DH)試験中のPVモジュール内部の酢酸動態を評価^[2]
- 複合加速試験中の酢酸動態評価のために, UV照射試験, DH試験を実施^[3]

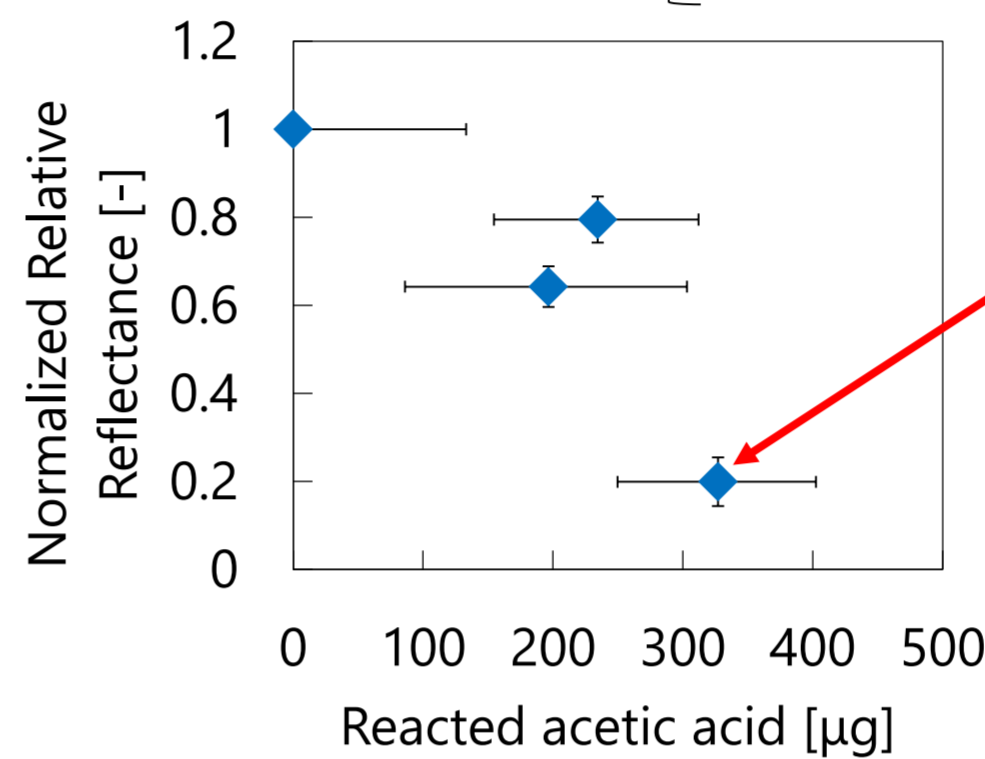


検量線の作成^[4]

錫薄膜の膜厚70 nmにおける最大反応酢酸量 m_{AAmax} を算出

$$m_{AAmax} = \frac{M_{AA}}{M_{Tin}} \rho \pi d^2 t$$

m_{AAmax} : 最大反応酢酸量 d : 錫薄膜センサの直径
 M_{AA} : 酢酸のモル質量 t : 錫薄膜の膜厚
 M_{Tin} : 錫のモル質量 ρ : 錫の密度



予測値: 52.5 μg
 検量値: 327 μg

⇒予測値と検量値との間に大きな誤差が発生

検量線の精度を向上させるために改善が必要

実験手順

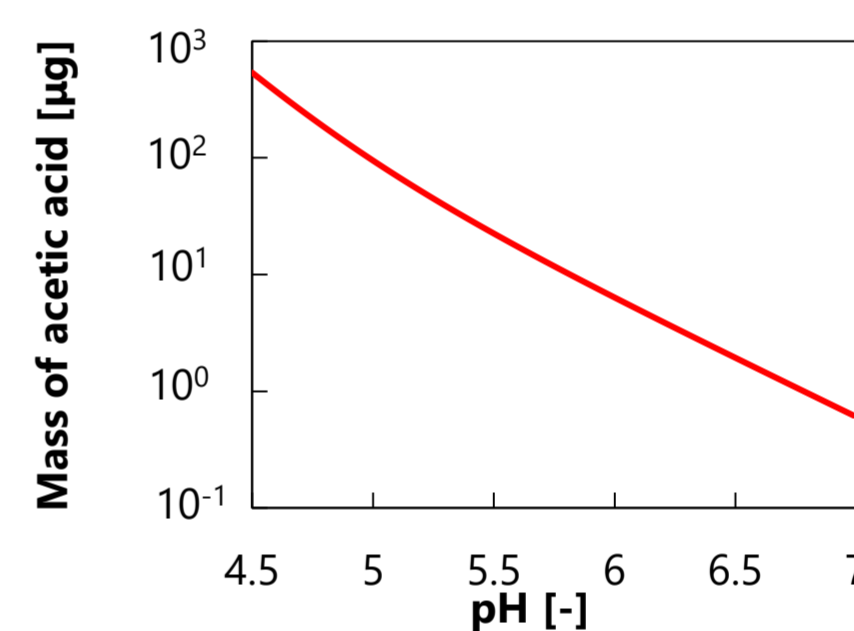
- 酢酸溶液 1 mL をセンサに浸漬し、膜厚70 nmの錫薄膜センサを酢酸溶液(3000ppm, 1 mL)に浸漬。密閉状態のまま85 °Cで保管。時間経過後にセンサを取出し、反射光強度を測定。
- センサを取出した後の酢酸溶液 1 mL から x μL を取り出す。
- 取出し量 x μL の酢酸溶液を純水で 100 mL まで希釈。pH を測定し、酢酸質量を算出。

pH値の誤差が与える影響

以下の式を用いてpHを酢酸質量に換算

$$m_{AA} = V M_{AA} \left(\frac{10^{-2pH}}{K_a} + 10^{-pH} \right)$$

K_a : 酸解離定数
 m_{AA} : 酢酸の質量
 V : 水溶液の体積
 M_{AA} : 酢酸物質質量



pH測定値4.50~4.51で変化する酢酸量の誤差は20 μg

pH測定値5.20~5.21で変化する酢酸量の誤差は1.4 μg

溶液中の酢酸量が少ないほど測定誤差は小さくなる

取出し量の変化による改善

反応酢酸量 Δm の算出

- 測定したpHからx μL中の酢酸量 m_{AA} を算出
- 取出し倍率をかけ1 mL中の酢酸質量を算出。浸漬前, 浸漬後を m_0, m とする

$$m_0, m = m_{AA} \times \frac{1000}{x} \quad \frac{1000}{x} = \frac{\text{浸漬時の酢酸溶液量}[\mu\text{L}]}{\text{取出し酢酸溶液量}[\mu\text{L}]}$$

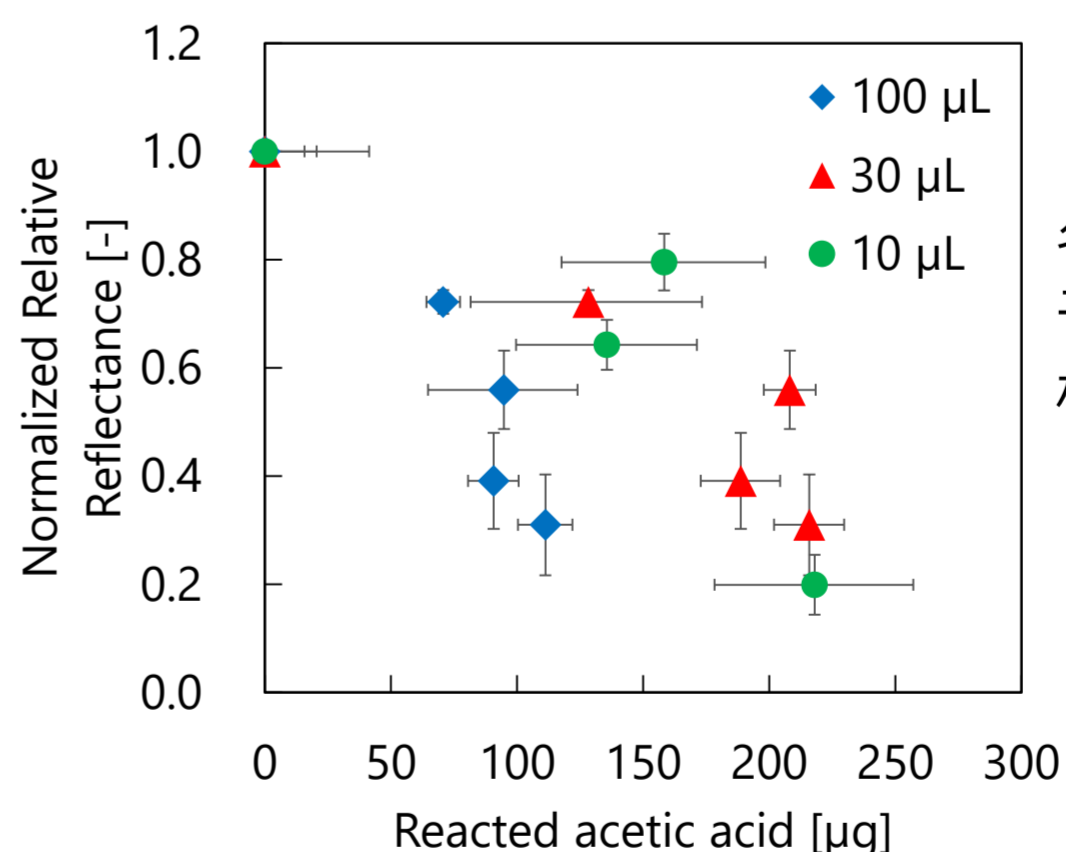
取出し倍率

- 浸漬実験前後の残差により反応酢酸量 $\Delta m = m_0 - m$ を算出

取出し量xの増加で換算時における誤差の低減が可能

実験結果

取出し量毎に検量線を作成



各取出し量における反応酢酸量
 予測値: 52.5 μg
 検量値: 111 μg (100 μL)
 216 μg (30 μL)
 217 μg (10 μL)

取出し量の増加により検量値と予測値の誤差が減少

結論

- 酢酸溶液の取出し量を増加させることで誤差が減少
- 異なる取出し量のパターンが必要
- 希釈倍率を上げたうえでpH測定を実施

謝辞

本研究は, NEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」の委託により実施された。

参考文献

- [1] A. Masuda et al., Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 04DR04 (2015).
- [2] R. Hamaoka et al., Jpn. J. Appl. Phys., **57**, 08RG16 (2018).
- [3] 浅野他. 第80回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-PA4-14 (2019).
- [4] 浅野他. 第66回応用物理学会春季学術講演会, 9p-PB6-13 (2019).

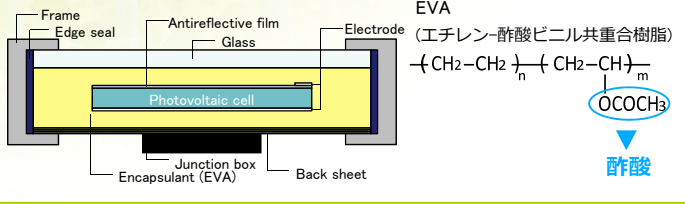
有限要素解析ソフトCOMSOLによる 太陽電池モジュール内酢酸生成・拡散解析

○岩見 健太郎¹, 浅野 正太¹, 森本 考紀¹
 城内 紗千子², 原 由希子², 増田 淳², 梅田 倫弘¹
 1. 東京農工大学, 2. 産業技術総合研究所

背景：太陽電池(PV)モジュール内部に発生する酢酸

- 内部への水分浸入によりEVA封止材が加水分解して酢酸が発生
- 酢酸がセル電極の銀ペーストを腐食し、発電性能が低下^[1]

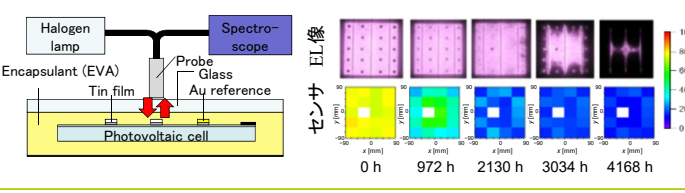
⇒ 錫薄膜センサによる実時間酢酸生成・反応解析方法を提案^[2]



目的：シュミレーションによるセンサ応答の検証

- 酢酸の発生経路・発生量を明確化・定量化したい
- 湿熱劣化試験やUV照射複合試験における酢酸挙動を理解する必要性

⇒ 商用有限要素法ソフトによる解析



解析モデル

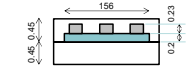
- COMSOL Multiphysics 5.1を利用 (希釈種輸送フィジクス)
- 連立反応拡散方程式を時間領域で解く

$$\frac{\partial c_{H_2O}}{\partial t} = D_{H_2O} \nabla^2 c_{H_2O} - a c_{H_2O} + b c_{HAC}$$

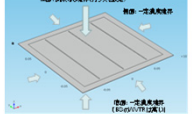
$$\frac{\partial c_{HAC}}{\partial t} = D_{HAC} \nabla^2 c_{HAC} + a c_{H_2O} - b c_{HAC}$$

拡散項 水からの酢酸生成 酢酸から水へ戻り

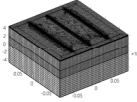
- モデル寸法



- 境界条件



- メッシュ(450k DOF)



- 濃度一定境界

EVAバルク	空気層 (相対湿度RH%)
端部水分濃度 c_{H_2O}	水の飽和蒸気圧 $p_{H_2O}^{sat}$
EVAへの水の飽和濃度 $c_{H_2O}^{sat}$	水蒸気分圧 p_{H_2O}
	全圧 p

ヘンリーの法則から

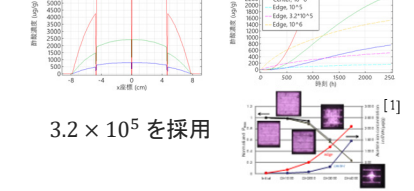
$$c_{H_2O} = c_{H_2O}^{sat} \times \frac{p_{H_2O}}{p} \times \frac{RH}{100}$$

$$= c_{H_2O}^{sat} \times \frac{p_{H_2O}}{p}$$

- 反応パラメータ同定 $a = A[RCH_3COO] \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ と設定
EVA濃度は水濃度に比べ十分高く一定と仮定

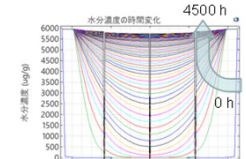
- E_a は 90 kJ/mol [4]
- 逆反応は無視 ($b=0$)

化学反応係数 $A[RCH_3COO]$ の探索

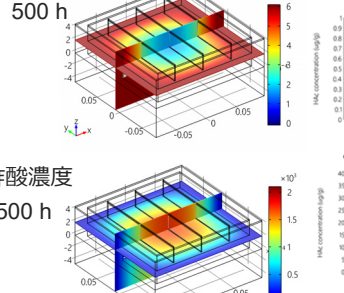


解析結果

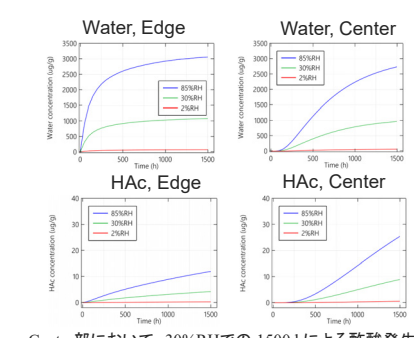
- 85°C/85%RH 湿熱試験4500 hの解析
セル表面の水分濃度



- 酢酸濃度分布の湿度依存性の検討 (85°C, 0~1500 h)



- 水分濃度・酢酸濃度の時間変化に対する湿度の影響



酢酸濃度は当初周辺部から立ち上がり、やがて中央部が高い値となる

1500 hにおける酢酸発生量はおおむね相対湿度に比例
 Center部において、30%RHでの1500 hによる酢酸発生量は、85%RHでの500~700 hと同程度になると思われる。
 UV照射試験(浅野ら、P63参照)における2%RH, 30%RH湿度負荷の影響を示唆

結論

- COMSOL Multiphysicsを用いて、湿熱劣化試験中におけるPVモジュールへの水分浸入と酢酸生成・拡散のシミュレーションを行った
- 水分浸入および酢酸生成量の湿度依存性を計算した
- UV照射試験中の30%RH湿度負荷による劣化加速を裏付ける結果が得られた

謝辞

本研究は、NEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」の委託により実施された。
 解析には東京工業大学TSUBAME 3.0を利用させていただいた。

参考文献

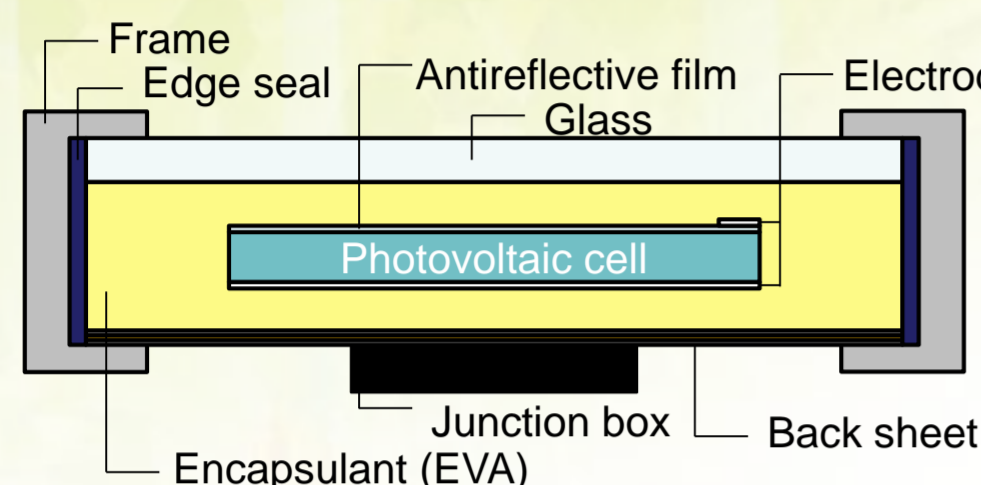
[1] A. Masuda *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 04DR04 (2015).
 [2] R. Hamaoka *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **57**, 08RG16 (2018).
 [3] M. D. Kempe, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **90**, 2720 (2006).
 [4] M. D. Kempe *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **91**, 315 (2007).

UV照射時の湿度負荷がUV+DH複合試験中の太陽電池モジュール内酸生成におよぼす影響の調査

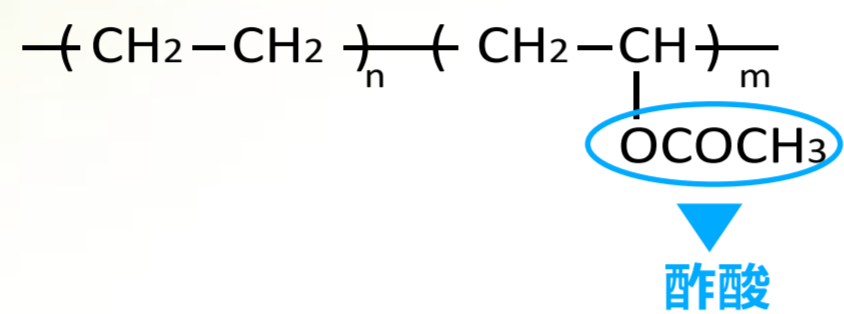
○浅野 正太¹, 森本 考紀¹,
 城内 紗千子², 原 由希子², 増田 淳², 梅田 倫弘¹, 岩見 健太郎¹
¹東京農工大学, ²産業技術総合研究所

太陽電池 (PV) モジュール内部に発生する酢酸

- PVモジュール内部に封止材として使用されているEVAから酢酸が発生
 - 酢酸がセル電極の銀ペーストを腐食し、発電性能が低下^[1]
- ⇒ 太陽電池内酢酸の検出方法として錫薄膜センサを提案

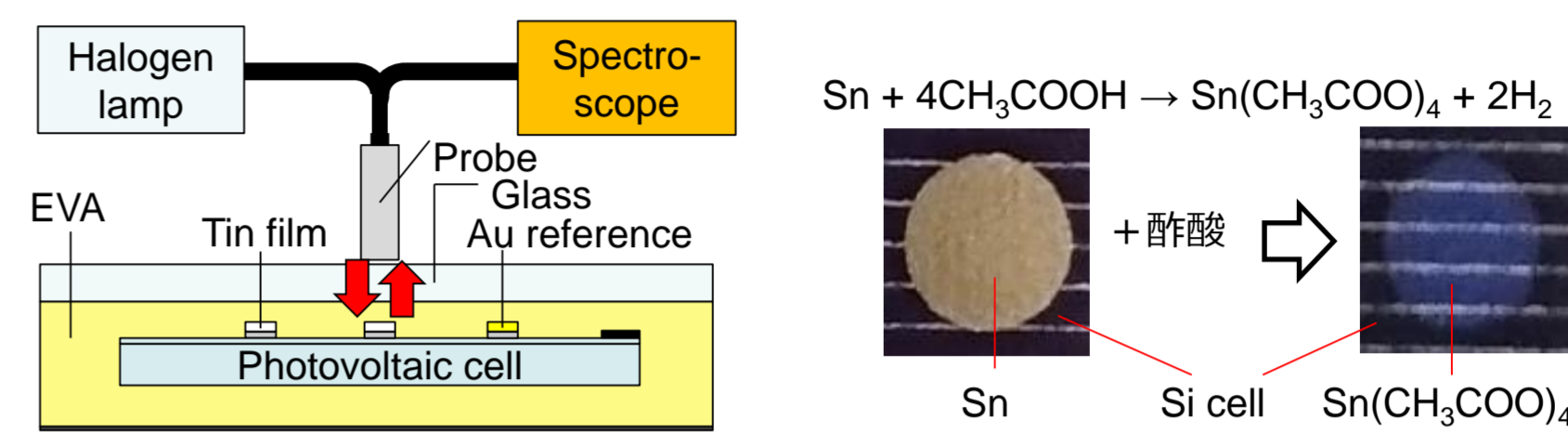


EVA(エチレン-酢酸ビニル共重合樹脂)



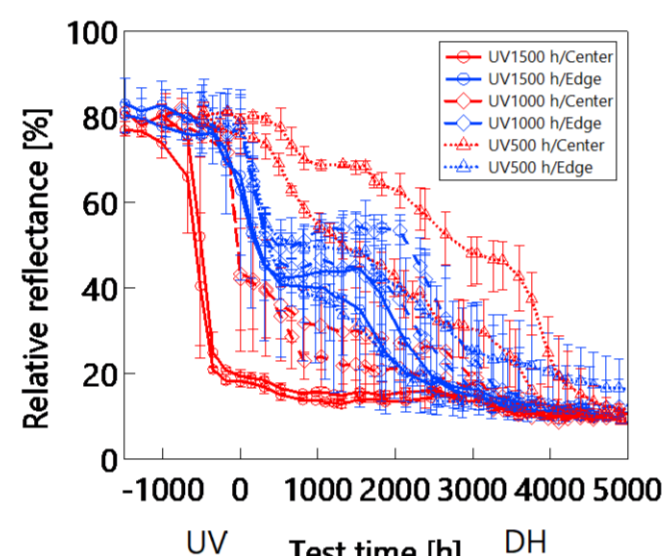
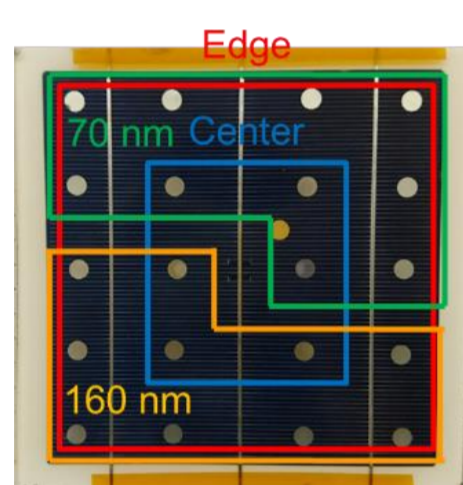
錫薄膜センサによる太陽電池内酢酸検出

- 酢酸と錫薄膜が反応し透明な四酢酸錫が生成
 - 錫薄膜センサの膜厚が減少し、金リファレンスとの相対反射率が変化
- ⇒ 非破壊かつ高い時間分解能で酢酸の評価が可能



UV+DH加速試験中の相対反射率変化^[2]

- 紫外線(UV)照射+湿熱(DH)複合加速試験を実施
 - UV : 75 W/m², 85°C, 30%RH
 - DH : 85°C, 85%RH
- UV試験でCenterの相対反射率が低下
酸生成の原因特定が必要(湿度 or UV照射)

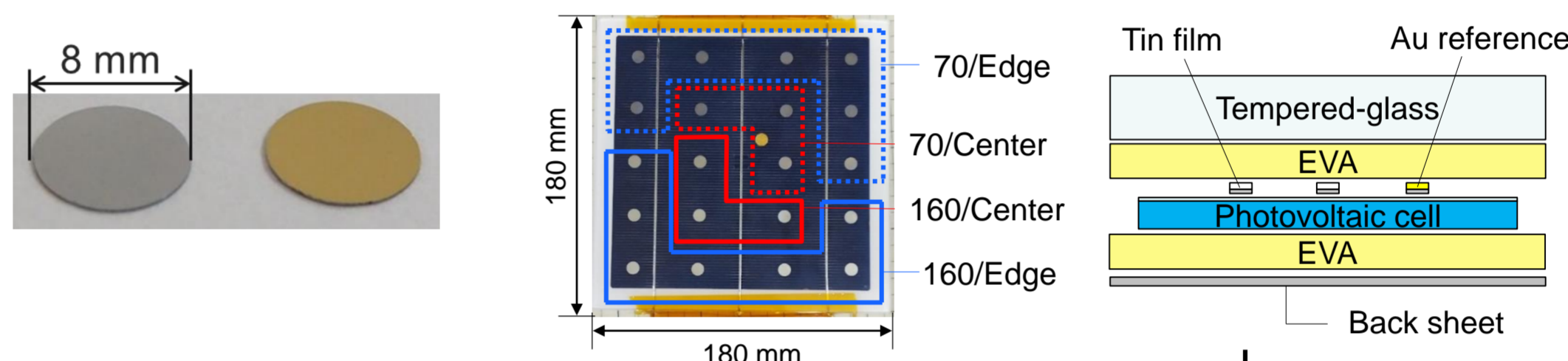


錫薄膜センサを用いたUV照射時の酸生成に対する湿度影響の調査

実験手順

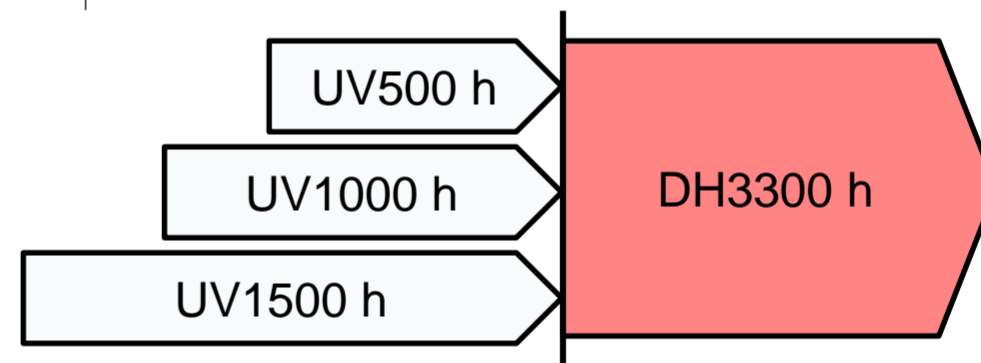
試験モジュールの概要

- 真空蒸着法でカバーガラス上に錫薄膜と金薄膜を成膜
- 錫薄膜は膜厚70 nmと160 nmのものを用意 (異なる酢酸量を検出するため)
- PVモジュール内にセンサを封入



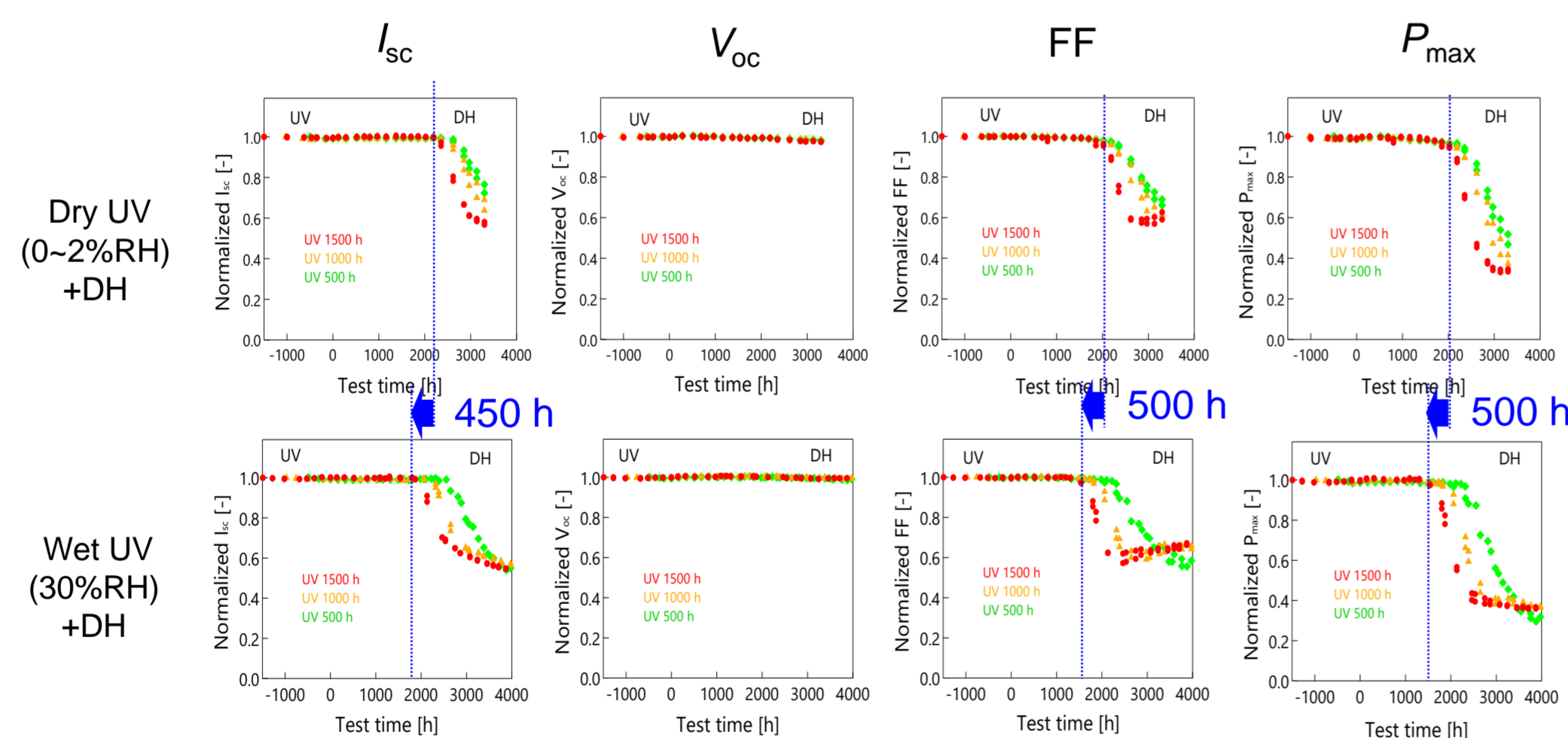
Dry UV+DH複合試験の概要

- UV : 75 W/m², 85°C, 0~2%RH
 - DH : 85°C, 85%RH
- を実施
- I-V特性, 相対反射率を測定



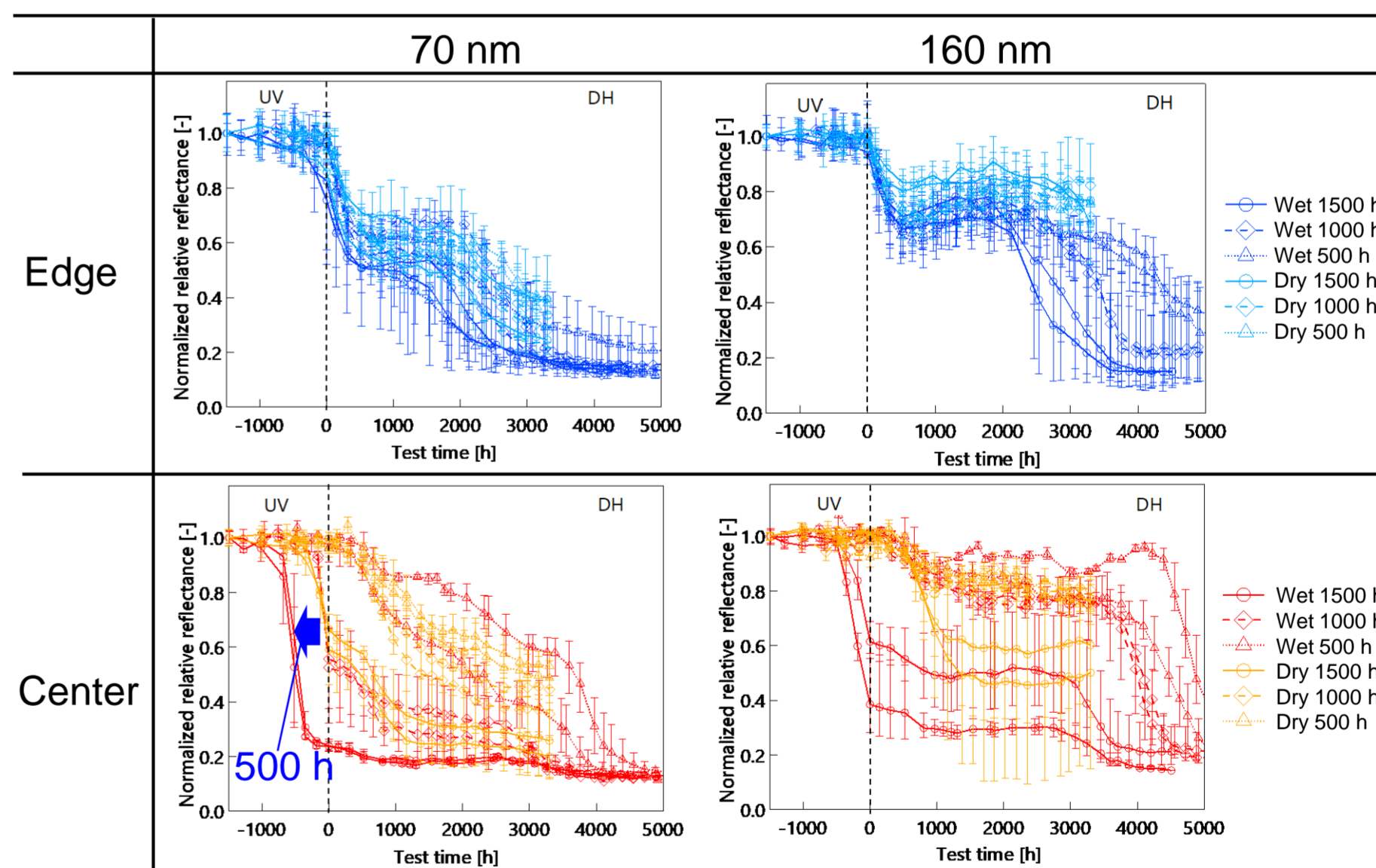
実験結果・考察

I-V特性



- Vocに変化なし
- Wet UVではDry UVに比べIsc, FF, Pmaxが早期に低下
- 加速係数定量化のため劣化が飽和するまで測定する必要あり
⇒ より長期のDH試験を行い、結果を比較

相対反射率



- Center : 湿度負荷により相対反射率低下が500 h加速
- Edge : Wet UVの方が相対反射率が早期に低下
低下の加速度合いはCenterに比べ小さい

UV照射中の湿度負荷によりPVモジュールの劣化が加速

結論

- Wet UVではDry UVに比べIsc, FF, Pmaxが早期に低下
- I-V特性低下の加速係数の定量化のため、さらに長期のDH試験が必要
- 湿度負荷によりUV試験中にEdgeでは相対反射率の低下がわずかに加速、Centerでは500 h程度加速した。

謝辞

本研究は、NEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」の委託により実施された。

参考文献

- [1] A. Masuda et al., Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 04DR04 (2015).
- [2] 濱岡他, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 18p-D101-12 (2018).

p型c-Si太陽電池モジュールのPID計算機モデルの開発

吉田 弘樹¹、亀山 展和¹、大橋 史隆¹、傍島 靖¹、増田 淳²、野々村 修一¹
¹岐阜大学
²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

研究の目的

Si太陽電池モジュールの劣化現象であるPIDについて、Na等の不純物に関するSiN_x膜表面上での分布[1]やテクスチャ構造における電界による移動[2]に関する報告がある。また、PIDのメカニズムに関して、SiN_x膜内の電界による不純物の移動が一つの要因として報告されている[3][4]。しかしながら、機器分析装置等で不純物の分布を評価するには試料を破壊せざるを得ず、同一試料における不純物分布の経時変化を評価するのは困難である。そこで、PID計算機モデルとしてNaイオンの熱拡散と電界ドリフトを扱い[5][6]、Naイオン分布の経時変化をシミュレーションする。シミュレーションとPID試験との結果を比較することで、Naイオン移動の機構を検討する。

実験

以下の式(1),(2)で示すNaイオンの熱拡散と電界ドリフトをPID計算機モデルとして与える。

$$\frac{\partial F_{Na}(z, t)}{\partial t} = -D_{SiN_x, Na} \frac{\partial C_{Na}(z, t)}{\partial z} + \mu_{SiN_x, Na} q C_{Na}(z, t) E(z) \quad (1)$$

$$\frac{\partial F_{Na}(z, t)}{\partial t} = -D_{Si, Na} \frac{\partial C_{Na}(z, t)}{\partial z} + \mu_{Si, Na} q C_{Na}(z, t) E(z) \quad (2)$$

ここで、 F_{Na} はNaイオンのフラックス、 C_{Na} は密度、 E は電界である。 D は拡散係数、 m は移動度であり、それぞれの添え字SiN_x, NaはSiN_x膜中での、Si, NaはSi中での、Naに対する値である事を意味する。また、 z はSiN_x膜表面からの距離であり、Si側を正の向きとする。 t はPID試験開始後の時間である。表1にSiN_xと単結晶Siの D と m を示す。SiIに関しては表中の転位拡散(displacement)を用いた。

表1 SiN_xとSiにおける D と μ の値

	SiN _x [7]	Si [8]		
		Non-defective Si	Dislocation in Si	Stacking faults in Si
D [cm ² /s]	~10 ⁻¹⁸	2.1 × 10 ⁻²²	5.41 × 10 ⁻¹⁷	3.36 × 10 ⁻⁷
μ [cm ² /V·s]	~10 ⁻¹⁵	8.12 × 10 ⁻²¹	2.09 × 10 ⁻¹⁵	1.30 × 10 ⁻⁵

図1に示すのはPID試験前のNaイオンの分布密度であり、横軸で0 ≤ z ≤ 80 nmの領域はSiN_x膜、z ≥ 80 nmはSiである。モジュールのカバーガラス表面に対する電極への印加電圧は0 kV、セル温度は85°Cとし、SiN_x表面(z = 0)における C_{Na} の境界条件を1.0 arb. unitsに固定してある。この状態で24 h経過させたのち、PID試験開始条件としてt = 0 hで電極への印加電圧を0 kVから-1 kVに変える。

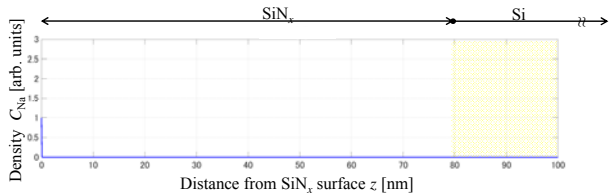


図1 SiN_x膜表面におけるNaイオン分布(境界条件)

結果

図2に示すのは、前述のPID計算機モデルを用いて得たNaイオン分布密度の経時変化である。上から順にPID試験時間t = 0 hから6 h毎の分布を示している。PID試験直後にSiN_x膜近傍に分布していたNaイオンが、PID試験開始と共にSiN_x膜中を拡散しながらzの正方向にドリフトし、Si膜との境界に達し、さらにSi中を拡散している。

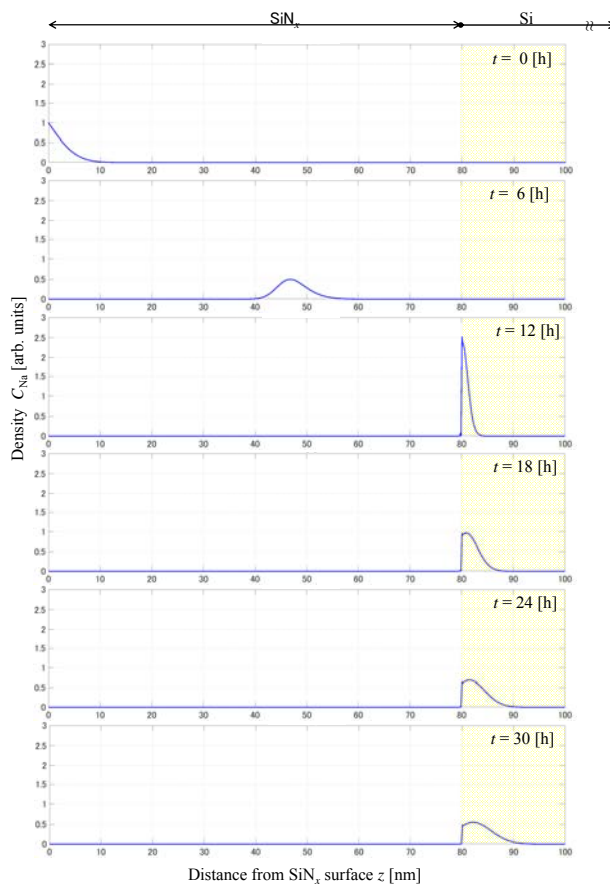


図2 PID試験開始後のNaイオン分布の経時変化

考察

PID試験開始後、Naイオンは数時間のオーダーでSiN_x膜とSiとの境界に達する。SiN_x膜内の高い電界によりNaイオンはSiN_x膜側からSi側に侵入する。逆に、Si側から再びSiN_x膜側に拡散するNaイオンの密度は低く無視できる。したがって、その後NaイオンはSi側のみで熱拡散する。

今回のNaイオンの転位拡散を扱った数値計算では、Si側を転位拡散するNaイオンは数十時間のオーダーでSiN_x膜近傍に分布する事が分かった。一方、PID試験結果[3][4]からNaイオンはより短い数時間のオーダーで発電層に到達すると考えられ、転位拡散では説明ができない。そこで、Naイオンが発電層に到達する機構として拡散係数が10桁大きい格子欠陥中の拡散が示唆される。

結論

PID計算機モデルとしてSiN_x膜とSiにおけるNaイオンの拡散とドリフトを扱い、Naイオンの移動を数値計算した。Naイオンは数時間のオーダーでSiN_x膜とSiとの境界に達する。その後、NaイオンはSi側のみで熱拡散する。PID試験結果と比較し、NaイオンはSi中の格子欠陥を拡散すると考えられる。

謝辞

本研究はNEDOプロジェクトの一環として行われました。関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] F. Ohashi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 08RG05 (2018).
- [2] 橋本, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 10p-W611-8 (2019).
- [3] 城内他, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 10p-W611-5 (2019).
- [4] 増田, 第80回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 19p-B12-8 (2019).
- [5] 吉田他, 第80回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 21p-B12-1 (2019).
- [6] H. Yoshida *et al.*, PVSEC 29, China, 7MoP.40/773 (2019).
- [7] M. Wilson *et al.*, Solar Energy Materials & Solar Cells **142**, 102 (2015).
- [8] J. Yang *et al.*, WCPEC 7, Hawaii, 1081 (2018).

走査型非線形誘電率顕微鏡を用いたPID劣化を 起こした単結晶Si太陽電池のキャリア分布観測

¹長康雄・²城内紗千子・²増田淳

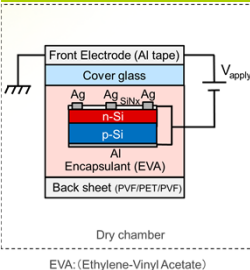
¹東北大学 電気通信研究所

²産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 太陽光発電研究センター

研究の目的

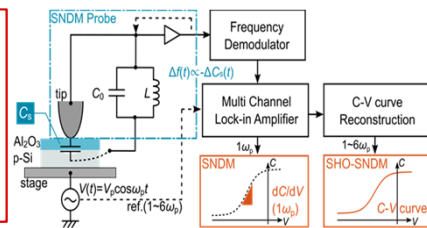
走査型非線形誘電率顕微鏡 (SNDM)を用いてPID無しの単結晶Si太陽電池とPID劣化を起こした単結晶Si太陽電池のキャリア分布を観測しキャリア濃度の比較, 劣化深さの観測, 空乏層厚さの比較を行う。

実験



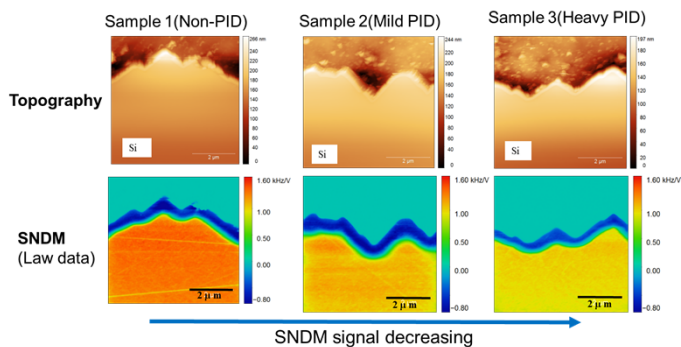
- Sample 1: Non-PID**
 $V_{\text{apply}} = -2000 \text{ V}$
For 1.5 hours (Approx.) @65°C
- Sample 2: Mild Degradation**
 $V_{\text{apply}} = -2000 \text{ V}$
For 1.5 hours (Approx.) @65°C
- Sample 3: Heavy Degradation**
 $V_{\text{apply}} = -2000 \text{ V}$
For 10 hours (Approx.) @65°C

サンプル処理条件[1]

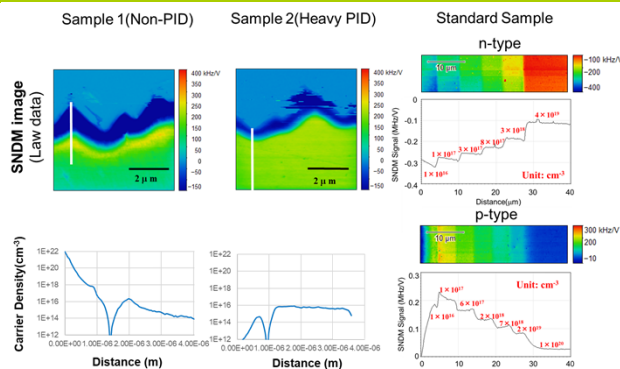


走査型非線形誘電率顕微鏡 (SNDM) [2]と超高速走査型非線形誘電率顕微鏡(SHO-SNDM) [3].

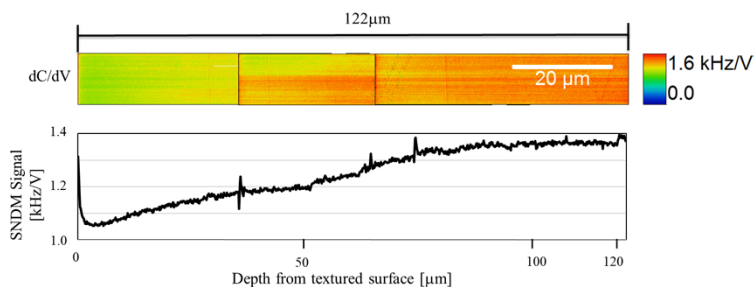
結果



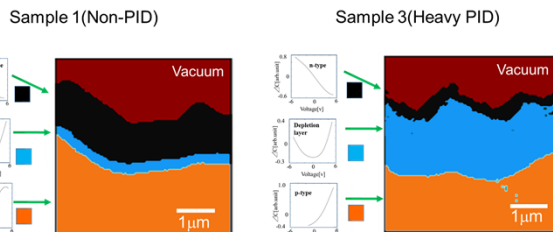
結果1 SNDM観測



結果2 キャリア分布の定量計測 [4]



結果3 深さ方向分布



結果4 SHO-SNDM法により観測された空乏層分布

結論

SNDMとSHO-SNDMを用いてPID劣化を起こした単結晶Si太陽電池のキャリア分布を観測し, キャリア濃度分布, 劣化深さ, 空乏層厚さの観測を行った。

- ・PIDのレベルに応じてキャリア濃度の減少が観測された。
- ・テクスチャー表面から90 μm の深さにまでPIDの影響が及んでいる事が分かった。
- ・SHO-SNDMの計測結果よりPID劣化を起こした太陽電池の空乏層の厚さは劣化しない太陽電池のそれに比べて非常に厚いということが分かった。

参考文献

- [1] S. Jonai and A. Masuda, AIP Advances, **8**, 115311, (2018).
- [2] Y. Cho, A. Kirihara, and T. Saeki, Rev. Sci. Instrum., **67**, 2297-2303, (1996).
- [3] N. Chinone, T. Nakamura, and Y. Cho, J. Appl. Phys., **116**, 084509, (2014).
- [4] K. Hirose, K. Tanahashi, H. Takato, and Y. Cho, Appl. Phys. Lett., **111**, 032101, (2017).

PIDにおける結晶Si太陽電池のARC膜の役割およびPID抑止方法

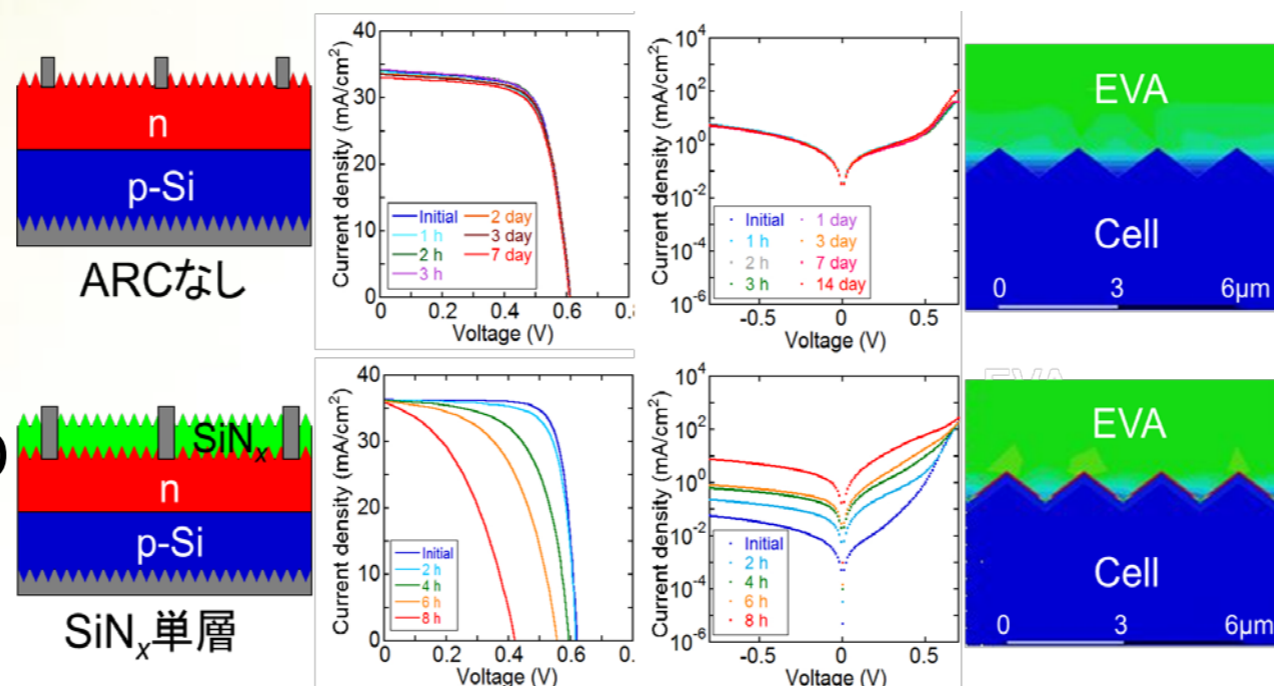
○城内 紗千子^{1,2}・松井 卓矢²・鯉田 崇²・柴田 肇²・中村 京太郎³・石河 泰明¹
 浦岡 行治¹・増田 淳²

¹奈良先端科学技術大学院大学・²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター・³豊田工業大学

研究の目的

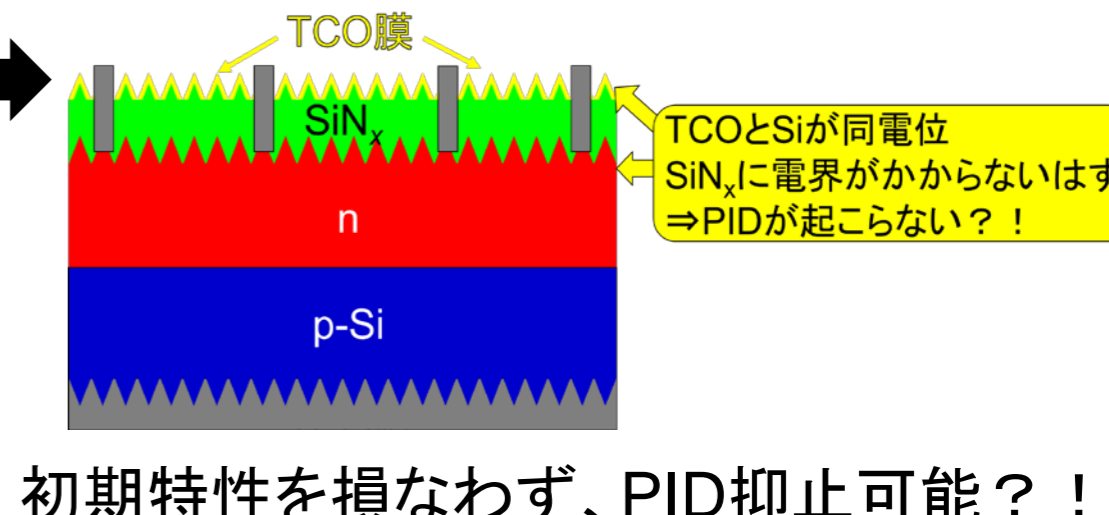
PIDでは、セル表面のARC膜が大きな影響を与えることはすでに知られている。ARC膜の組成を変えるとPIDの振る舞いが大きく変わること[1]やARC膜を持たないセルではPIDが起こらないこと[2]がわかっている。これは、 SiN_x にかかる電界が弱まる、または、 SiN_x に電界がかからないためPIDは起こらないと報告している。しかしながら、このようなPID対策セルは、わずかに初期特性の低下が見られる。

<今までの報告>



<新PID抑止対策?!>

セル表面にTCO膜をコート



初期特性を損なわず、PID抑止可能?!

実験方法

用いた部材

<モジュール>

- 市販のp型結晶Si太陽電池セル
- EVA(封止材)
- 白板強化ガラス
- PVF/PET/PVF(裏面材)

<TCO膜>

- 市販セルにITOをコート

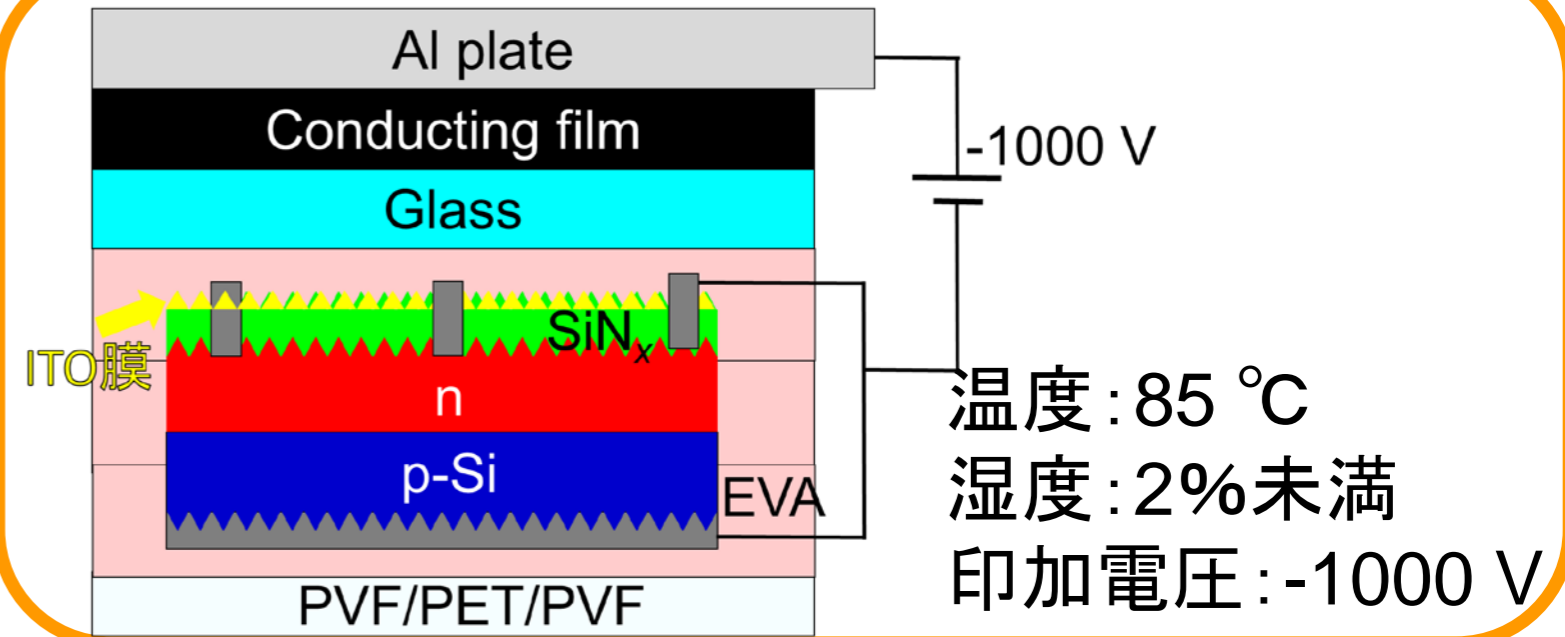
TCO膜(ITO)

市販のセルにITOをスパッタリング
ITOの厚み

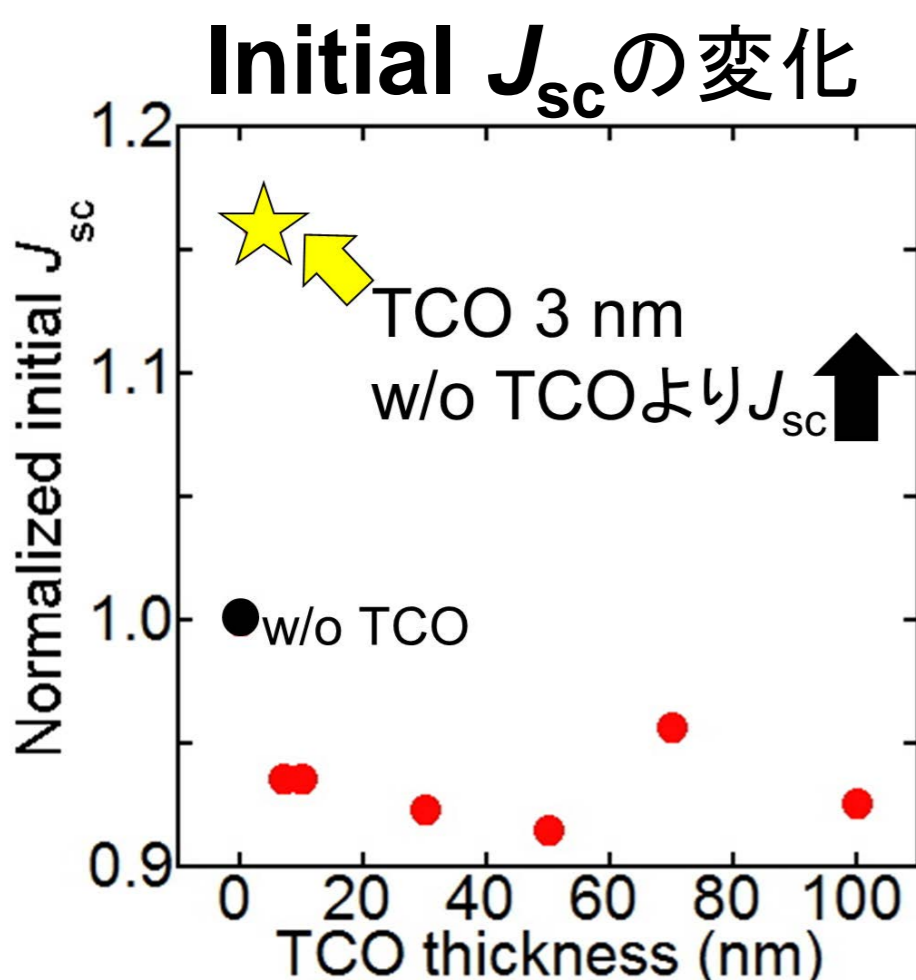
3, 7, 10, 30, 50, 70, 100 nm

スパッタリング後、
150°Cの大気雰囲気中で3時間アニール
モジュール化
ラミネート条件150°C・約20分

PID試験条件



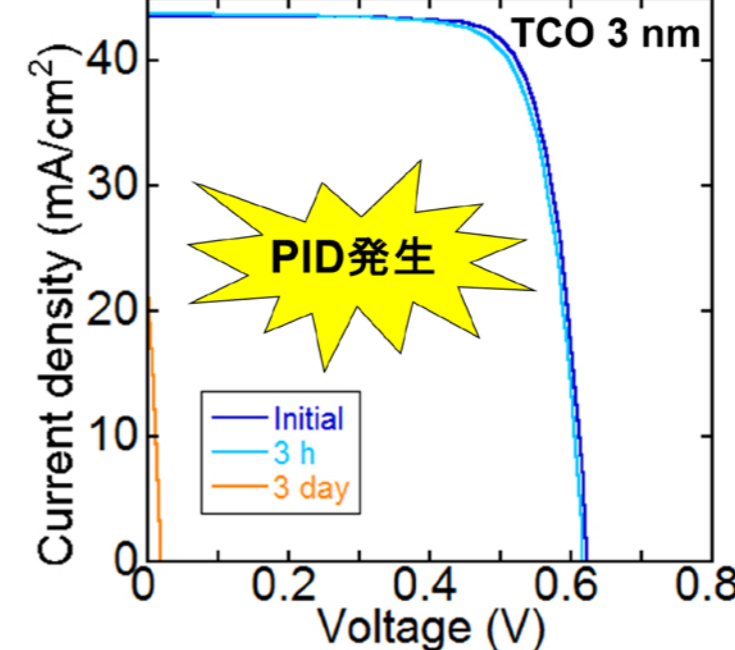
結果



Initial J_{sc} は、
TCO 3 nmコートで最大!
しかし...

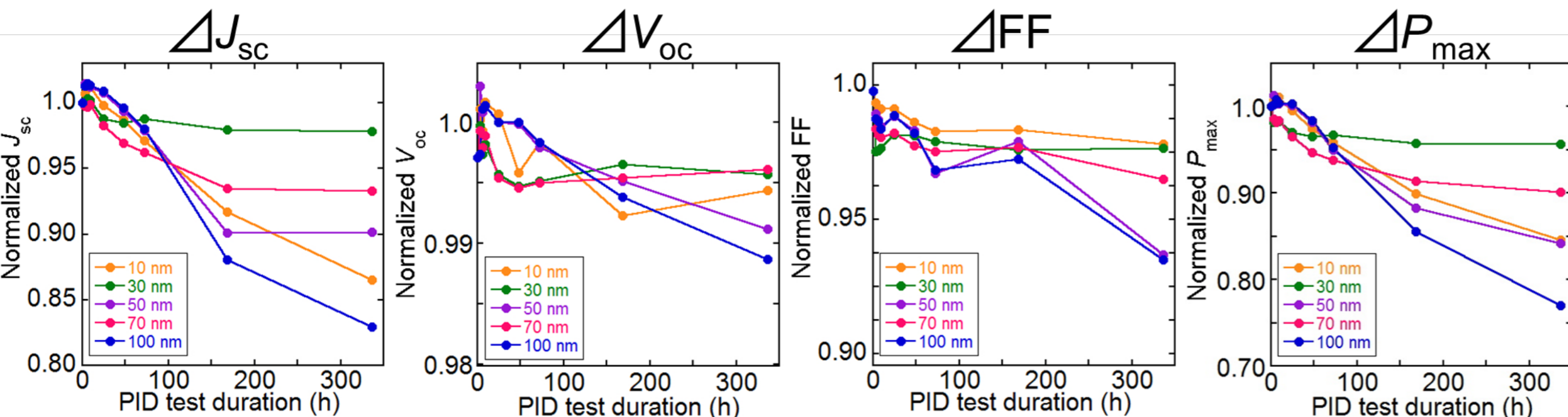
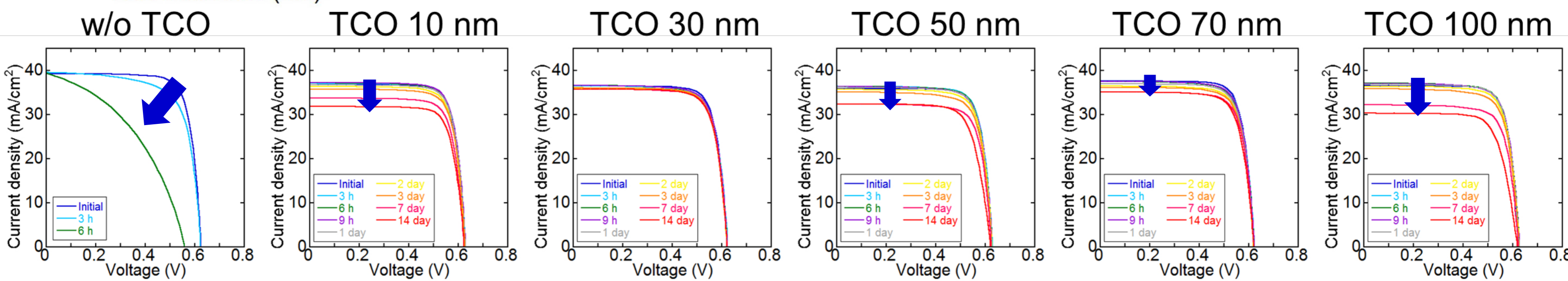
TCOの厚み 10 nm以上で比較

Photo J-V特性



PID発生 ☹️

※TCO 7 nmも同様に
3 dayで大きく劣化

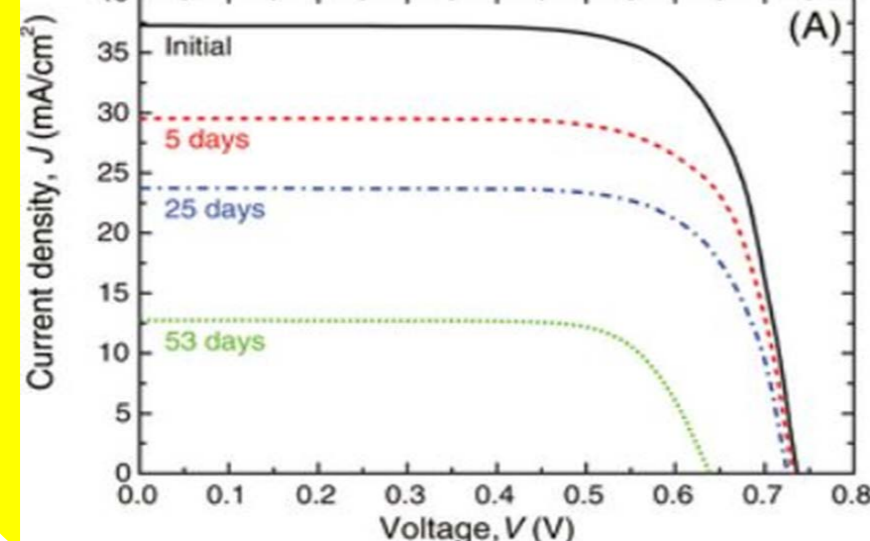


P_{max} の低下⇒ J_{sc} の低下
TCO 30 nm⇒抑制効果大

ヘテロ接合型Si太陽電池のPIDと同じ様な結果

ヘテロ接合型Si太陽電池

TCO膜: $\text{In}_2\text{O}_3:\text{W}$



S. Yamaguchi et al., Prog. Photovolt. Res. Appl. 26 (2018) 697-708.

※金属In形成が電流密度の減少に繋がった可能性あり
⇒ZnOで解決?!

※PID抑止効果には、最適なITOの厚みがある可能性あり

結論

- セル表面上にTCO膜をコートすることでPID抑止効果を確認。
- TCOコート法は、初期特性を損なわずPID抑止対策できることを示唆。

参考文献 [1] K. Mishina et al., Jpn. J. Appl. Phys. 54, 08KD12 (2015). [2] S. Jonai et al., Proc. 46th IEEE PVSC, 2019.

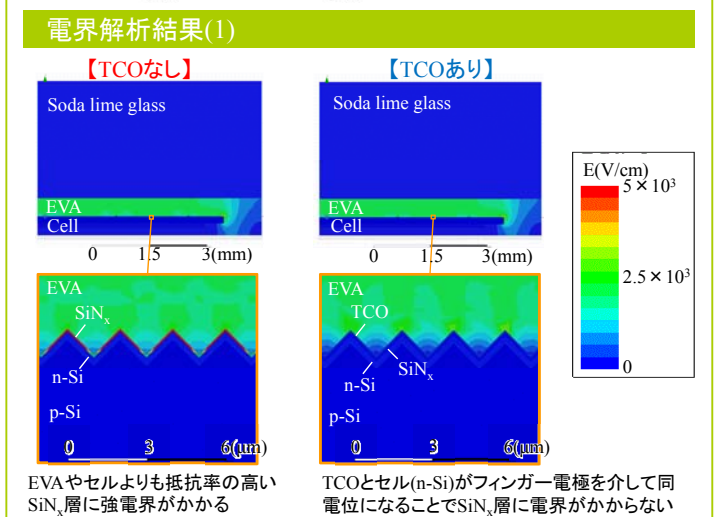
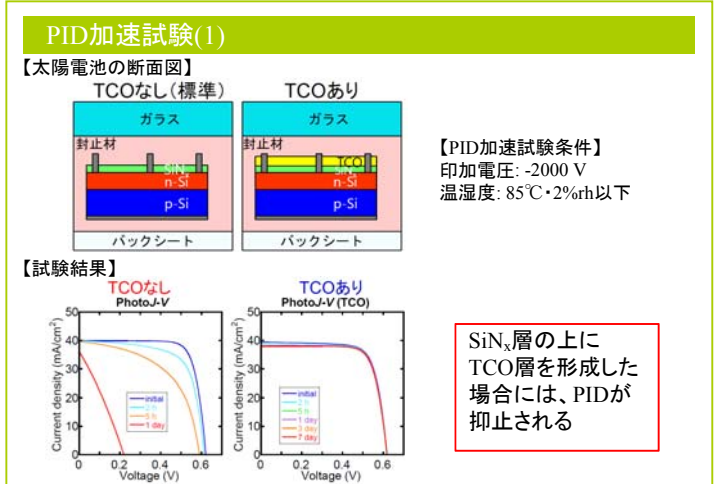
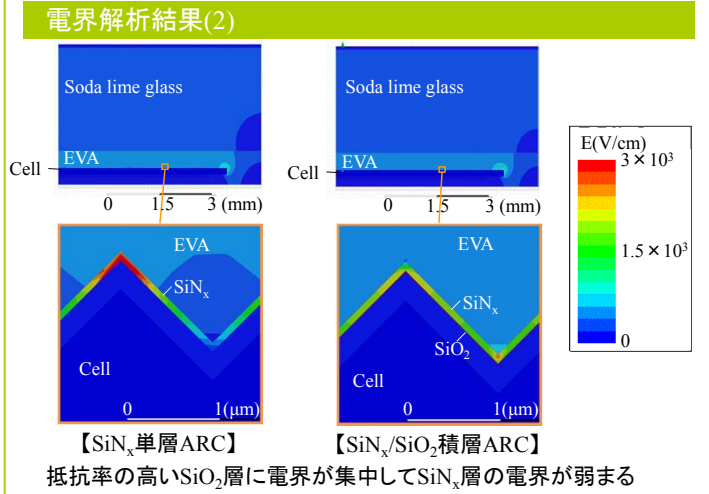
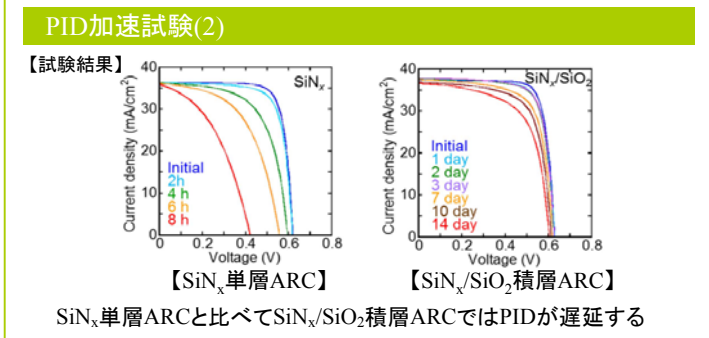
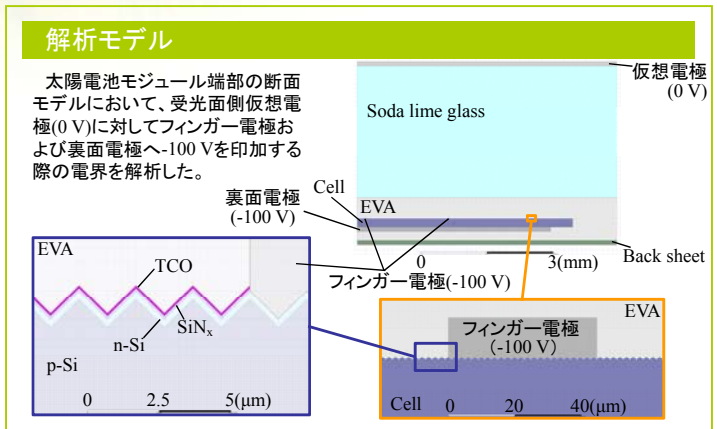
謝辞: 本成果はNEDOの委託のもと得られたものであり、関係者各位に深く感謝致します。

セル表面への導電膜形成によるPID抑制効果に対する電界および電流分布解析

橋泰至¹・豊田文紫¹・城内紗千子²・原由希子²・柴田肇²・増田淳²
¹石川県工業試験場・²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

研究の目的

PID (Potential Induced Degradation) は、太陽電池モジュールのフレームとセルの間に高電圧が印加されることによって発電出力が低下する劣化現象である。これまでに、セル表面のSiN_x層の上に透明導電膜(TCO)を形成することで、PIDが抑止される実験結果が得られた[1]。また、SiN_x直下にSiO₂を積層したARCの場合にPIDが遅延する実験結果が得られた[2]。本研究では、セル表面のTCOやSiO₂層の有無による電界分布の変化を明確化するため、PID試験を模擬した解析を行った。



考察

- 試験(1)(2)いずれの場合も、PIDが抑止されたのはSiN_x層に電界が掛からない(弱まった)場合であった。
- バリア性の高いSiN_x層に強電界が掛かると、Naなどの陽イオンがSiN_x層を通過してセルに到達してPIDが起こる。
- SiN_x/SiO₂積層ARCにおいて、SiO₂層に強電界が掛かるにも関わらずPIDが抑止される理由を次のように考える。
 - ①SiN_x層に掛かる電界がSiO₂層によって弱まり、SiN_x層のバリア性が保たれる。
 - ②バリア性の低いSiO₂層に強電界が印加されてもNaの移動に大きく影響しない。

結論

- SiN_x層直上のTCO膜、SiN_x層直下のSiO₂層は、いずれもSiN_x層に掛かる電界を弱める効果がある。
- これら実験および解析結果は、SiN_x層に掛かる電界を弱めることがPID抑止に繋がることを示唆する。

参考文献

[1] 城内 他, 特願第2019-13756号, 2019.
 [2] S. Jonai et al., Appl. Phys. Express **12**, 101003 (2019).

謝辞

本研究は、NEDO委託研究の一環として行われました。

p型c-Si太陽電池モジュールのPID抑止技術の開発

大橋 史隆¹、伏屋 亮^{*1}、亀山 展和¹、傍島 靖¹、吉田 弘樹¹、増田 淳²、野々村 修一¹
¹岐阜大学

²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター モジュール信頼性チーム

研究の目的

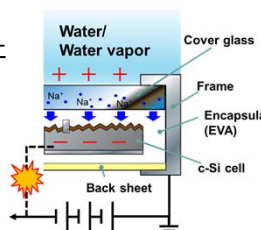
電圧誘起劣化 (Potential Induced Degradation: PID)

高電圧システムにおいて、太陽電池モジュールの出力が大幅に低下する現象

主な原因 電界によりカバーガラス中および汚染物質として存在するNaがセルに移動¹

太陽電池モジュールの性能が劣化

カバーガラスとセルの間に高抵抗材料を挟むことにより、PIDの発生が遅延することが知られている。



ガラス層²

- 出発材料: 液体ガラス(poly-siloxane + organic solution) → 簡単に塗布可能
- 乾燥もしくは焼結により固化
- 自動車などのコーティング材として用いられる
- 高い光透過性
- 高い体積抵抗率 ($\sim 10^{16} \Omega\text{cm}$)
- Na組成比: $< 0.1 \text{ at.}\%$
- 膜厚: $\sim 10 \mu\text{m}$

太陽光発電の信頼性向上を目的として、ガラス層を太陽電池モジュールのカバーガラスおよびEVA間に挿入し、PID抑止効果を評価した。

実験方法

作製方法

カバーガラスに液体ガラスを滴下 → カバーガラス全体に均一に延伸する → 乾燥もしくは焼結により固化 → 真空ラミネート (135°C, 15 min) → PVモジュール化

カバーガラス 液体ガラス

評価方法

- ガラス層有無のカバーガラスおよびカバーガラス+EVAを作製し、電界印加による抵抗値の変化を評価
- ガラス層有無のPVモジュールに対しPID試験を行い、 J - V 特性 ($100 \text{ mW}/\text{cm}^2$, AM1.5)を比較した。

PID test

Climate chamber: 85°C, $< 2\% \text{RH}$
 Bias voltage: -1000 V
 Duration: 1 - 6 h

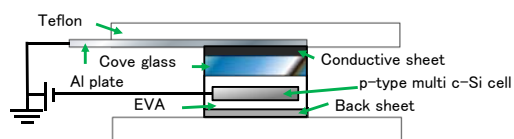


Fig. PID test circuit.

結果と考察

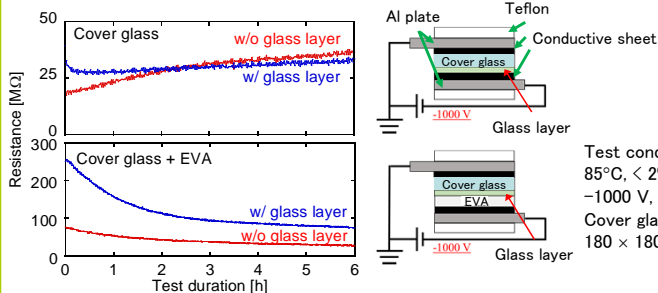


Fig. Resistances of (T) cover glass and (B) cover glass + EVA with and without glass layer as a function of test duration and measured circuits.^{3,4}

- ガラス層有りのカバーガラスおよびカバーガラス+EVAにおいて抵抗値の増加を確認。
- ガラス層無し PVモジュールは1時間のPID試験により約80%に発電効率が低下したのに対し、ガラス層有りの場合は、4時間後も約80%以上を維持している。

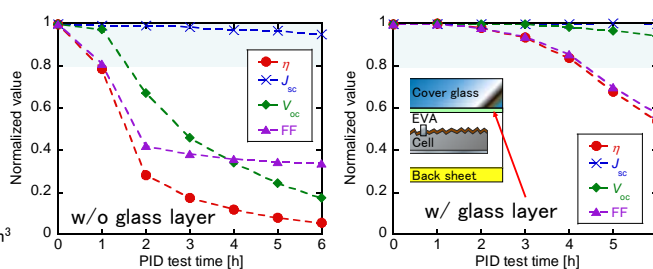


Fig. Photovoltaic performance of PV modules prepared (R) with and (L) without glass layer as a function of PID test time.^{3,4}

ガラス層をカバーガラスおよびEVAの間に形成することにより、PIDの発生を遅らせることが可能である。

結論

- PID抑止技術の開発として、高抵抗材料であるガラス層に注目した。
- カバーガラス - EVA間にガラス層を形成し、抵抗値の増加を確認した。
- ガラス層有無のPVモジュールを比較し、ガラス層有りのPVモジュールにおいて、PIDの発生の遅延を確認した。

高抵抗なガラス層をカバーガラスおよびEVAの間に形成することにより、PID抑止効果が期待できる。

参考文献

- [1] F. Ohashi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 08RG05 (2018).
- [2] 伏屋他, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 10p-W611-7 (2019).
- [3] 伏屋他, 第80回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 21a-B12-4 (2019).
- [4] F. Ohashi *et al.*, PVSEC 29, China, 10ThP.15/419 (2019).

謝辞

本研究はNEDOプロジェクトの一環として行われました。関係各位に深く感謝いたします。

The PID delay effect by UV light irradiation for p-type crystalline Si solar modules based on the different refractive indexes of silicon nitride layer

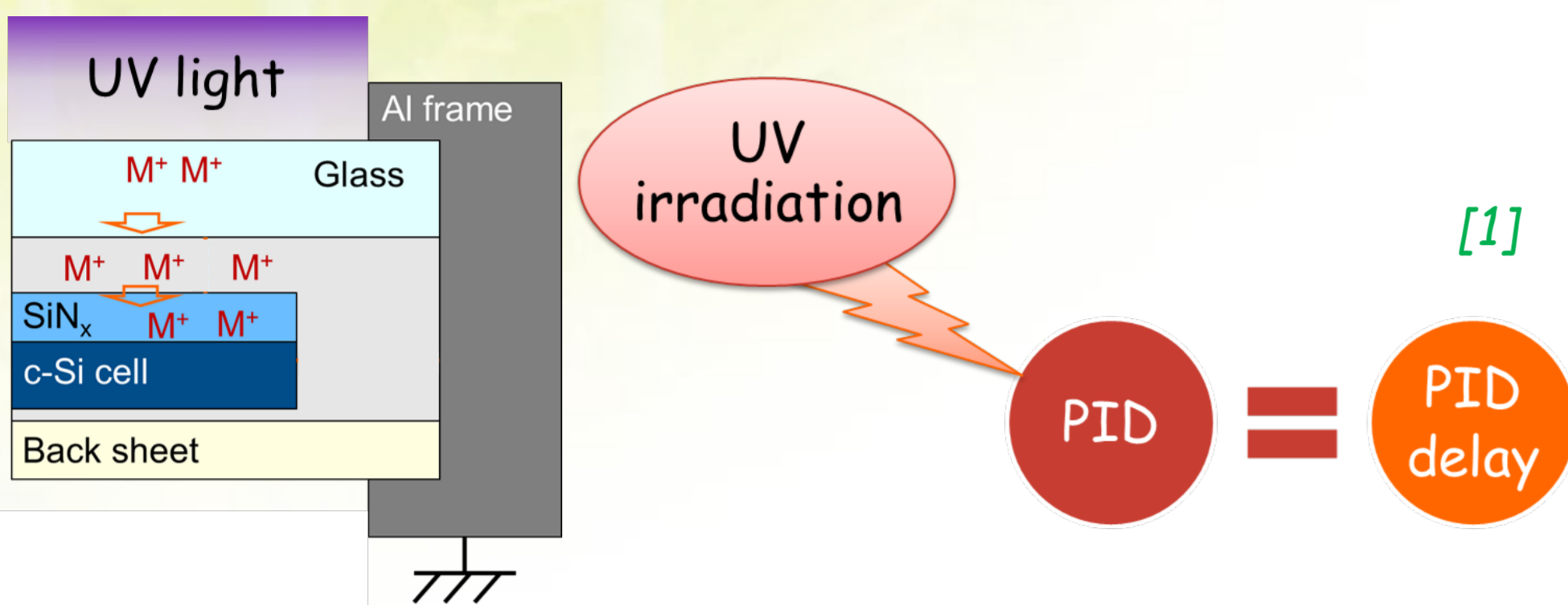
Dong C. Nguyen¹, Yasuaki Ishikawa¹, Sachiko Jonai^{1,2}, Kyotaro Nakamura³, Atsushi Masuda², Yukiharu Uraoka¹

¹Division of Materials Science, Nara Institute of Science and Technology

²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

³Toyota Technological Institute

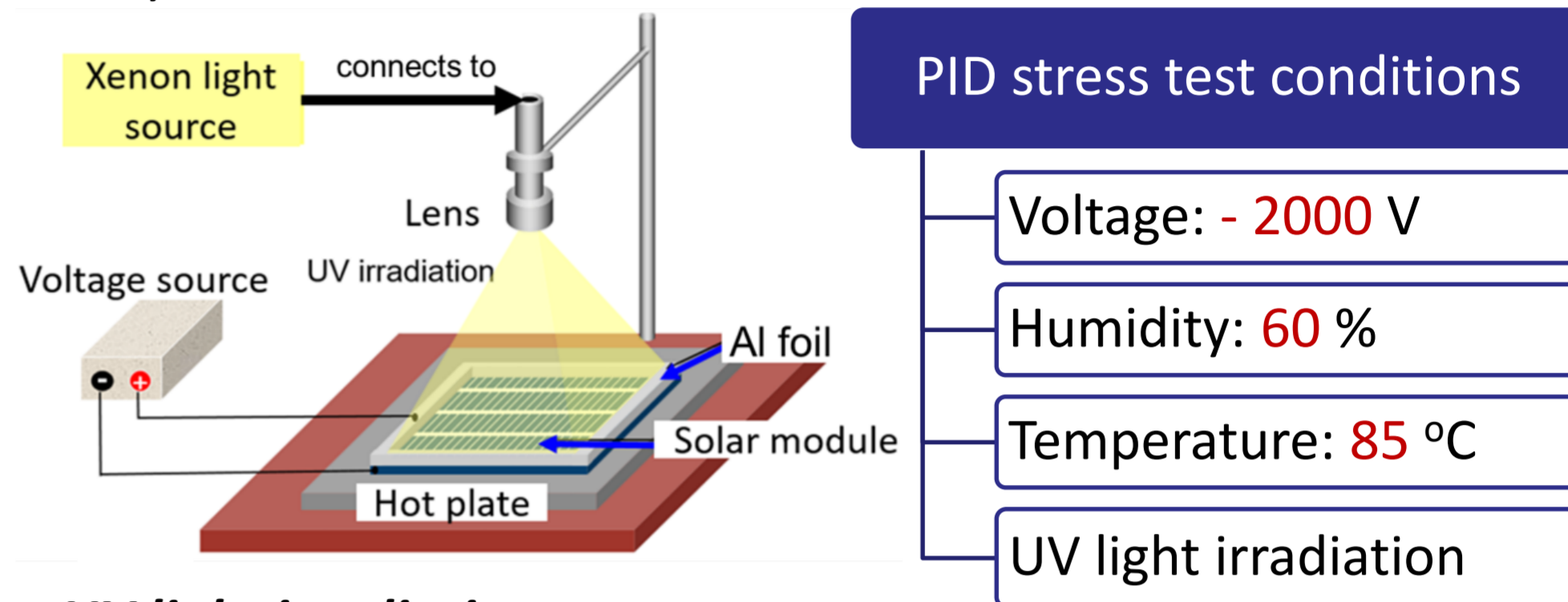
1. Motivation



- ✓ UV light irradiation causes the increased SiN_x conductivity of silicon solar cells [2].
- ✓ How does the PID delay effect occur in Si solar cells with SiN_x layers of different refractive indexes?

2. Experimental procedure

- ✓ Si solar modules with different refractive indexes of SiN_x layer: 1.95; 2.05 and 2.20.

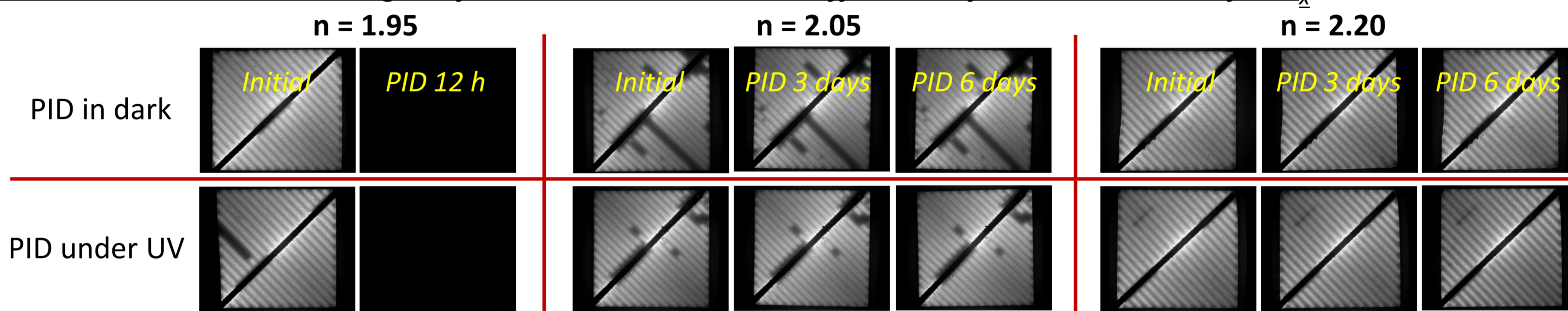


UV light irradiation:

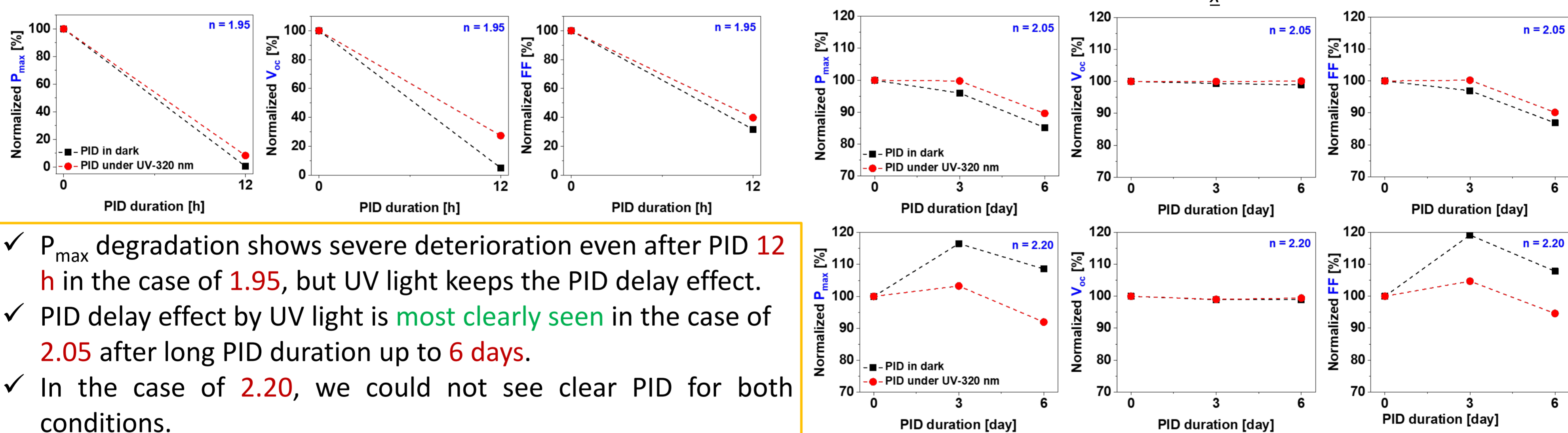
- ✓ Wavelength: 320 nm ± 5 nm
- ✓ Photon flux density: 1.03 × 10¹⁵ cm⁻²s⁻¹

3. Results and Discussion

3.1. Electroluminescence images of Si solar modules with different refractive indexes of SiN_x



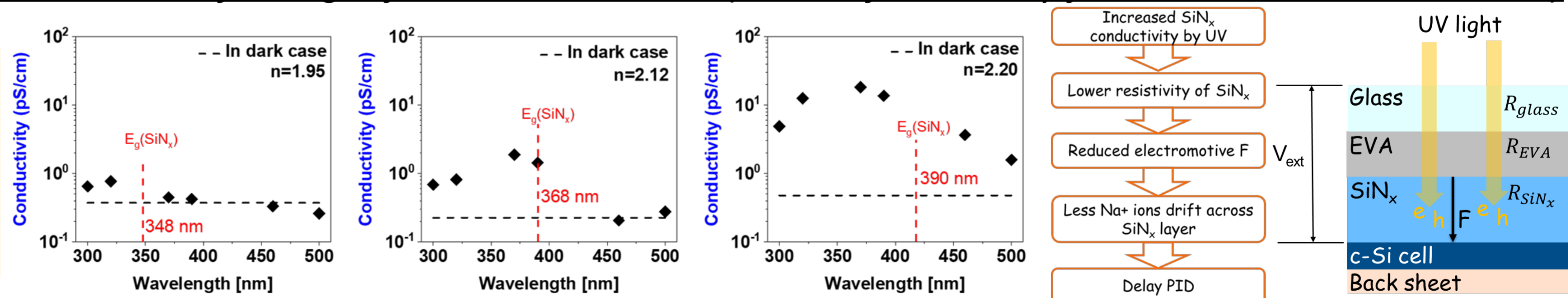
3.2. Comparison of Si solar module performances with different refractive indexes of SiN_x



- ✓ P_{max} degradation shows severe deterioration even after PID 12 h in the case of 1.95, but UV light keeps the PID delay effect.
- ✓ PID delay effect by UV light is most clearly seen in the case of 2.05 after long PID duration up to 6 days.
- ✓ In the case of 2.20, we could not see clear PID for both conditions.

3.3. PID delay effect mechanism of UV light for Si solar modules (Photon flux density for meas.: 9.26 × 10¹⁴ cm⁻²s⁻¹)

The SiN_x conductivity increases due to UV light absorption which is limited by SiN_x band gap.



4. Conclusions

- ✓ Solar cells with the higher SiN_x refractive index is avoidable from PID phenomenon.
- ✓ PID delay effect is most clearly observed in solar cells with a SiN_x refractive index of 2.05 for long PID duration up to 6 days.
- ✓ Conductivity increased by UV light irradiation is responsible for the PID delay effect.

References

[1] A. Masuda, Y. Hara, *Jpn. J. Appl. Phys.* 57, 08RG13 (2018).
 [2] D. C. Nguyen et al., *Proc. 46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA, 2019.*

This work was supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Japan.

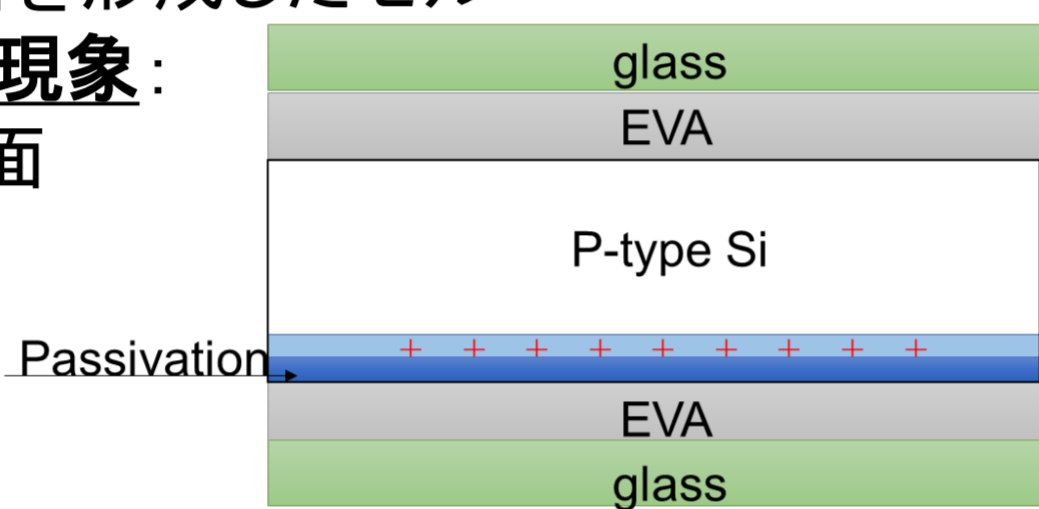
両面ガラス封止されたP型PERCセルの電圧誘起劣化現象

麻下直暉¹、石河泰明¹、Dong Chung Nguyen¹、原由希子²、鈴木紹太³、
Marwan Dhamrin³、増田淳²、浦岡行治¹

¹奈良先端科学技術大学院大学、²産業技術総合研究所、³東洋アルミニウム株式会社

研究の目的

- ◆ **電圧誘起劣化 (Potential Induced Degradation: PID)**
 - メガソーラーにおいて、太陽電池モジュールの性能が大幅に低下する現象
 - ガラス中のNaイオンがセルに移動することが主原因[1]
- ◆ **PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)**
 - 裏面にパシベーション層を形成したセル
- ◆ **Bifacial-PERC特有のPID現象:**
 - Naイオンなどの電荷が裏面パシベーション層に蓄積
 - ➔ 表面再結合増加[2,3]

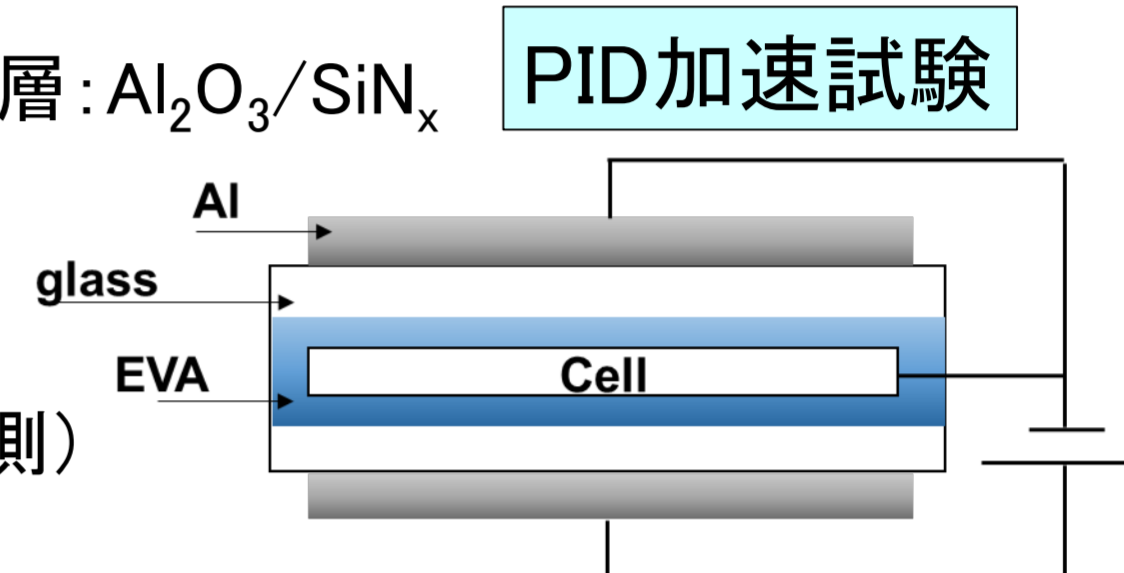


Bifacial-PERCのPID現象

【目的】
Bifacial-PERCにおける裏面PID現象の検証

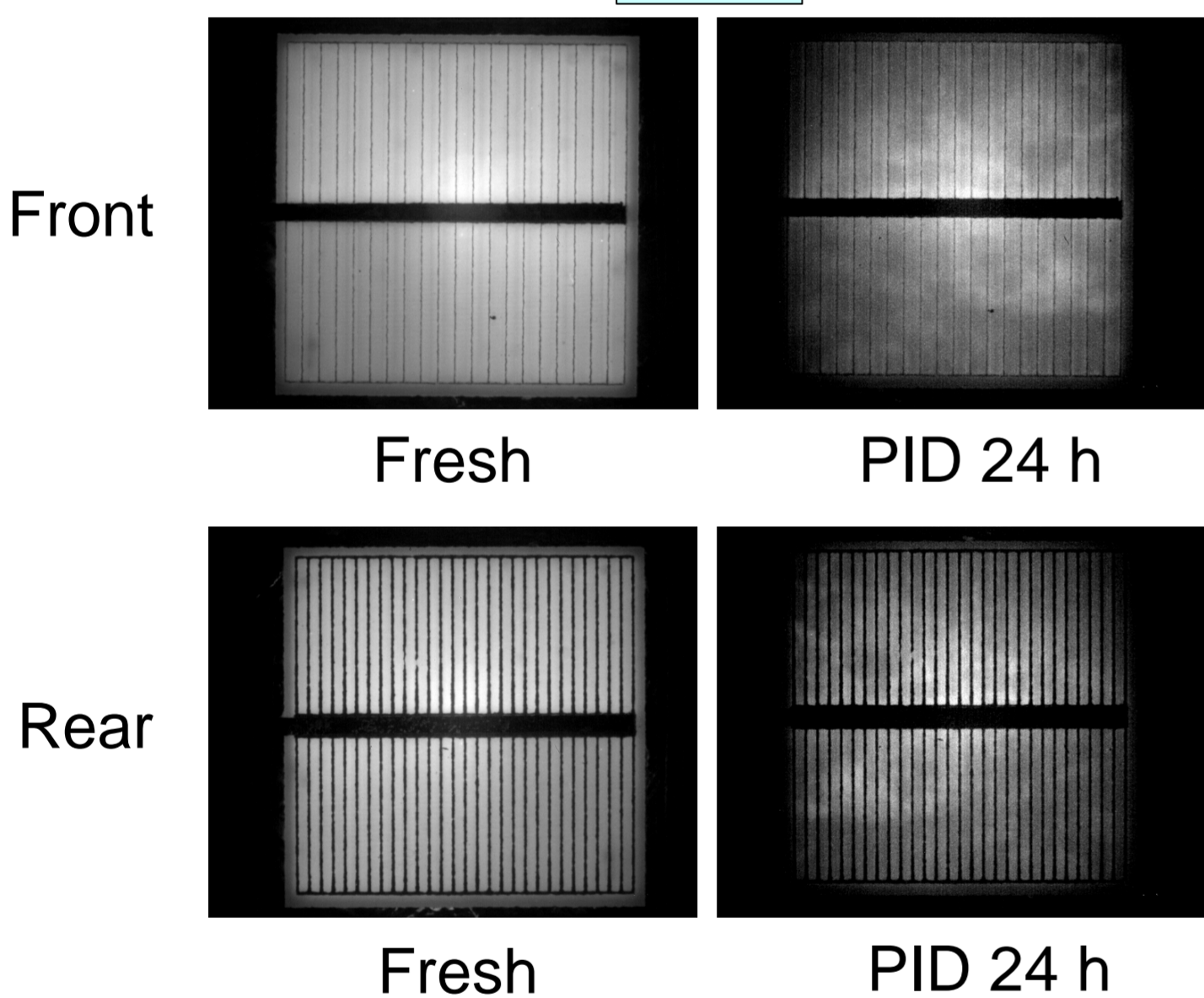
実験

- ◆ **Bifacial-PERC (p型単結晶Si)※**
 - 両面ガラスで封止
 - 裏面パシベーション層: Al_2O_3/SiN_x
 - ◆ **PID加速試験**
 - 温度 85°C
 - 湿度 ~60%RH
 - 電圧 +1000 V (裏面側)
 - ◆ **評価方法**
 - 電流・電圧特性
 - エレクトロルミネッセンス(EL)法
 - 実効的キャリア寿命 (τ_{eff}) 測定 (Semilab WT-1000B)
- ※PID加速試験前に、85°Cで光照射 (AM1.5)を24時間実施 (光・温度誘起劣化の影響を抑制するため)



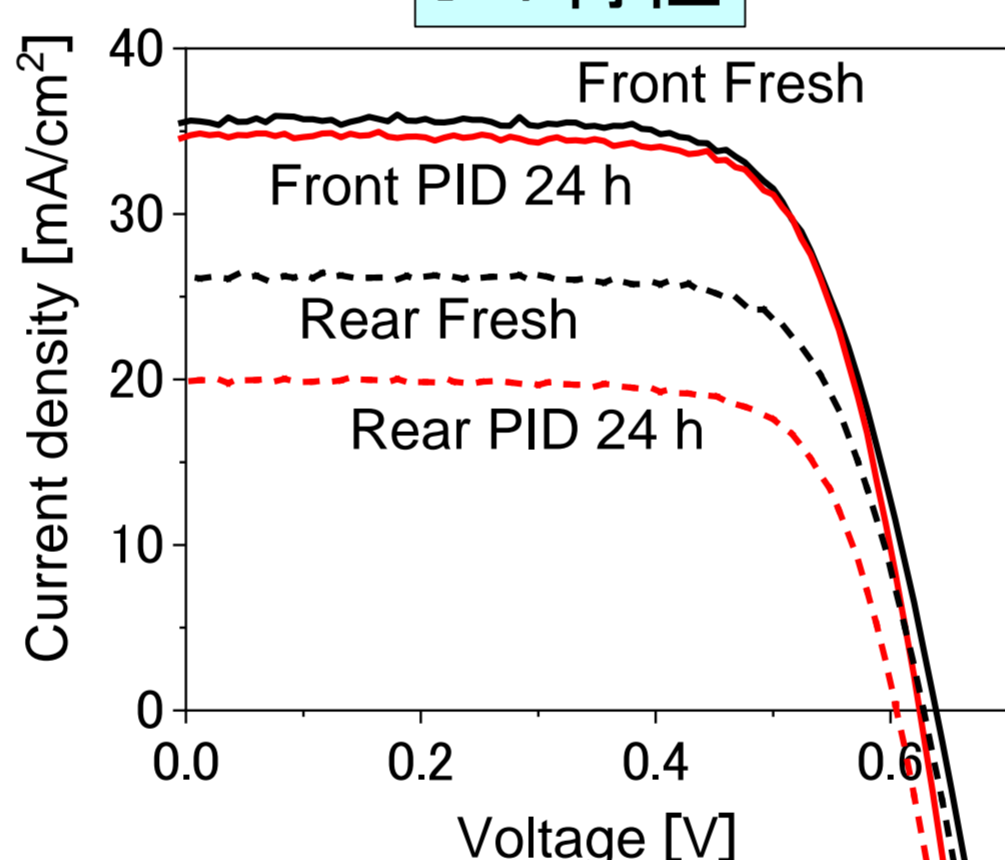
結果

EL像



- ✓ EL強度はPID加速試験後に低下 (セル端部がより低下)
- ✓ 裏面側へのPID加速試験にも関わらず、表面側のEL強度も低下

I-V特性



- ✓ 表面側のセル特性: 24時間のPID加速試験後、性能低下は小
- ✓ 裏面側のセル特性: J_{sc} が大きく低下 (Ref. 2,3と同様)
 - 表面再結合増加による裏面感度の大幅な低下
- ✓ τ_{eff} は表面側、裏面側共に低下
 - 表面再結合増加による τ_{eff} 低下

Front	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [V]	P_{max} [mA/cm ²]	FF	τ_{eff}
Fresh	35.6	0.639	15.8	0.695	11.7
PID 24 h	34.7	0.625	15.6	0.721	5.80
Rear	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [V]	P_{max} [mA/cm ²]	FF	τ_{eff}
Fresh	26.2	0.628	11.9	0.724	11.3
PID 24 h	19.9	0.605	8.84	0.733	4.16

考察

- ✓ 裏面側特性で J_{sc} が顕著に低下 (FFは低下なし) ⇒ 電荷蓄積による劣化 (PID-1) が発生[2,3]
- ✓ 表面側に対してPID加速試験を行わなかったが、 τ_{eff} 、EL強度が低下 ⇒ 裏面側パシベーションへの蓄積電荷による表面再結合の増加が要因。
- ✓ 今後、更に加速試験時間を増やすことで、電荷蓄積以上の劣化が発生するかを検証する必要がある。

結論

- ✓ PID加速試験によって、裏面側では J_{sc} が大幅に低下
- ✓ 表面側では、電気的特性に大きな差はなし
- ✓ 裏面側へのPID加速試験にも関わらず、 τ_{eff} 、EL強度が低下 ⇒ 裏面側の表面再結合増加が要因と推察
- ✓ 加速試験の時間変化による劣化挙動解析、回復試験解析が今後の課題

参考文献

1. W. Luo *et al.*, Energy Environ. Sci., 2017, **10**, 43-68.
2. W. Luo *et al.*, Prog. Photovolt.: Res. Appl. 2018, **26**, 859-867.
3. J. Carolus *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2019, **200**, 109950.

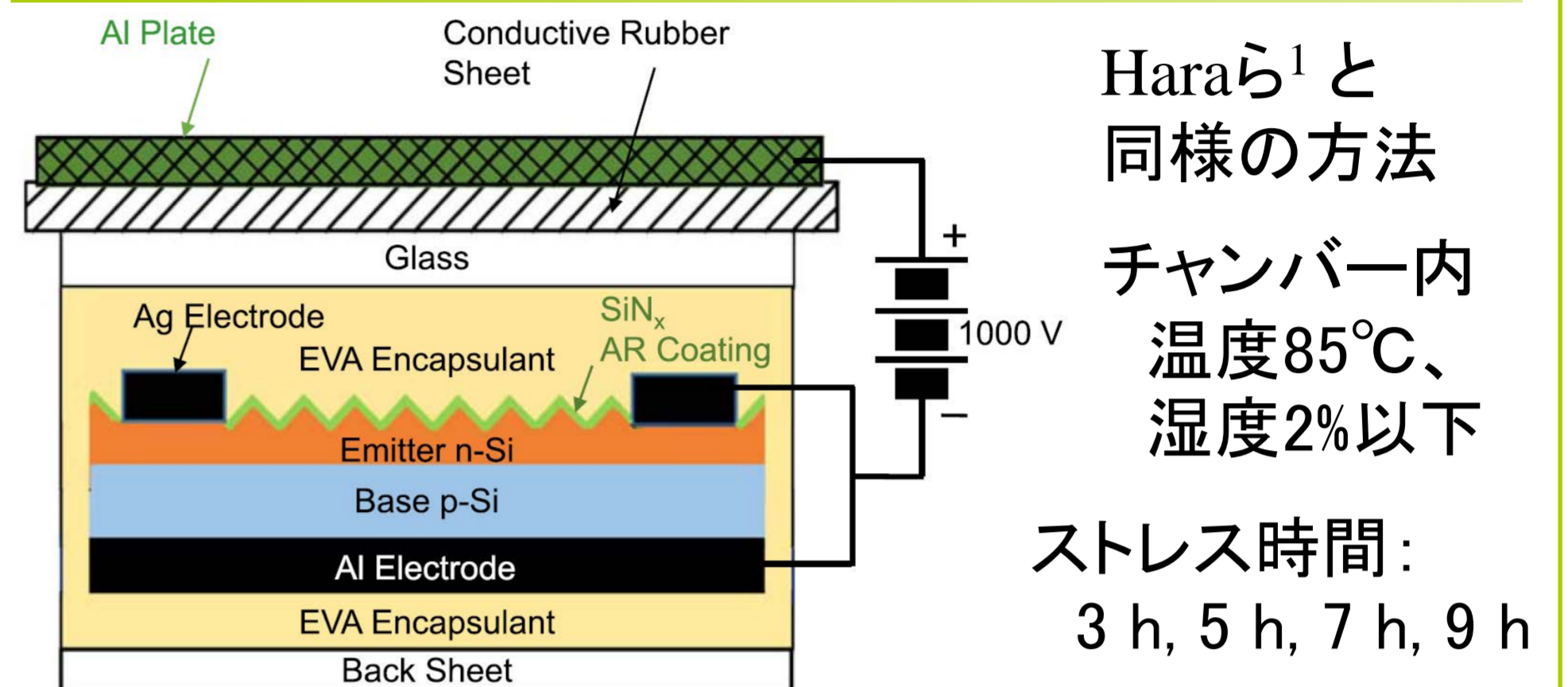
Naイオンドリフトタイプの電圧誘起劣化が生じたp型単結晶シリコン太陽電池の温度特性

Jaffar Abdu¹、嘉数 誠^{1,2}、原 重臣¹、崔 誠佑²、小川 錦一²、千葉 恭男²、増田 淳²
¹佐賀大学 大学院工学系研究科、²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

研究の目的

- 屋外で発電する太陽電池は60°C以上の高温になることもある。高温における太陽電池の特性を明らかにすることは重要。
 - 電圧誘起劣化 (PID) は太陽電池の深刻な劣化。
 - PIDが生じた太陽電池の高温における特性は未解明。
- ➔ PIDが生じたp型単結晶シリコン太陽電池の温度特性を調べる。

実験 (モジュール構造とPIDストレス方法)



実験 (温度特性測定)

PIDストレス後、モジュールを自然冷却
 ↓
 自然冷却中にソーラーシミュレータでI-V測定を繰り返す。
 ↓
 その間、バックシートに添付したT型熱電対で温度計測
 (Kasura²と同じ方法)

結果 (J-V特性、P-V特性)

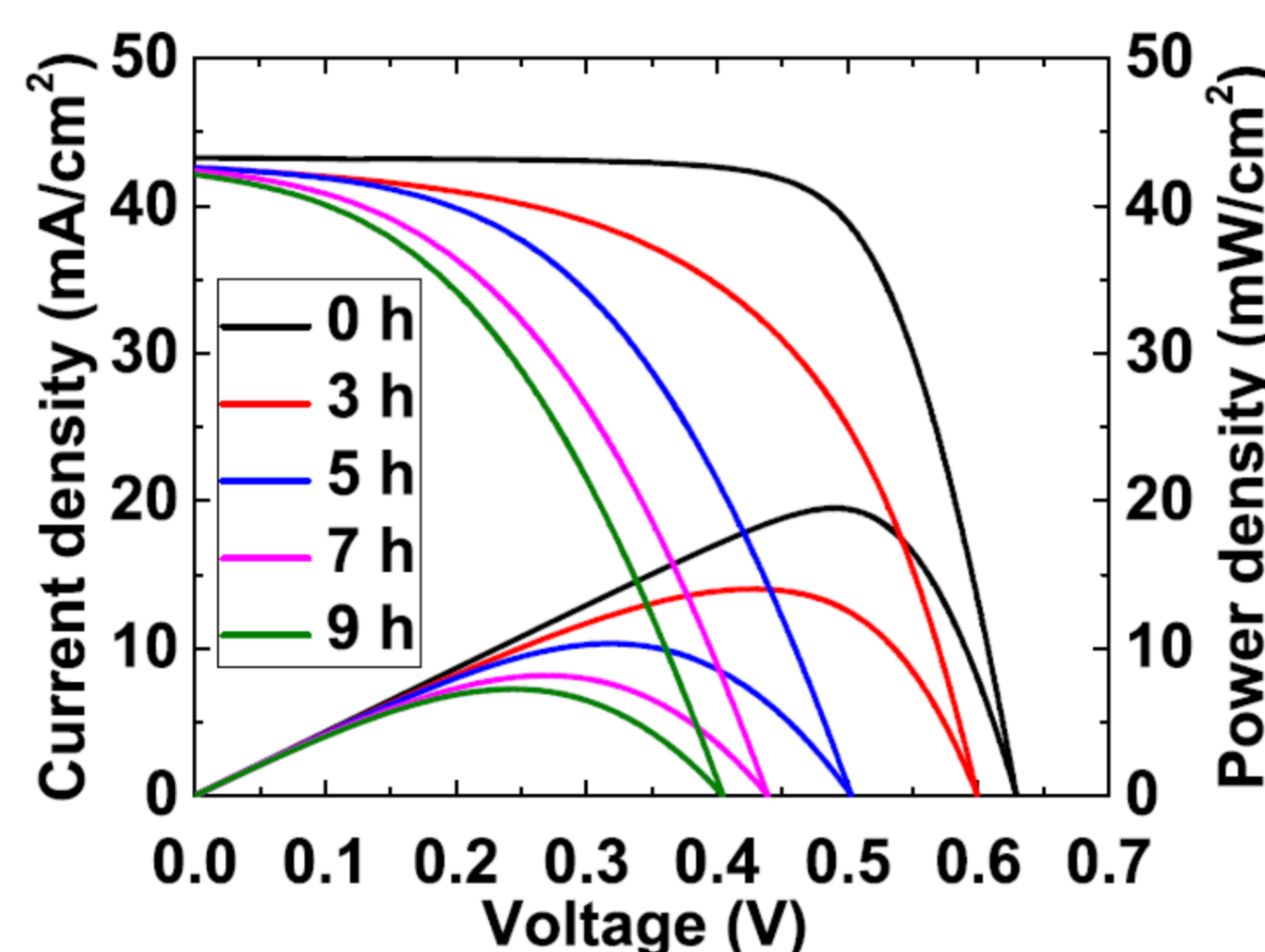


図1 各PIDストレス後の標準試験条件 (STC) におけるJ-V特性、P-V特性

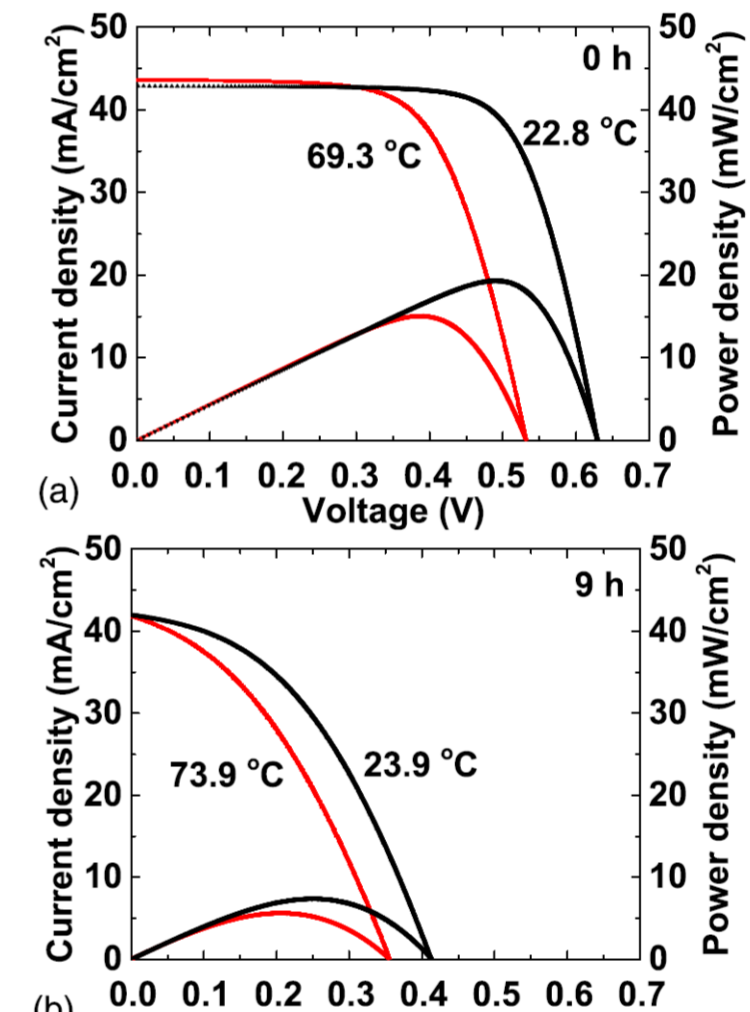


図2 PIDストレス前後の常温と高温におけるJ-V特性、P-V特性

結果 (太陽電池特性パラメータのPIDストレス時間と温度依存性)

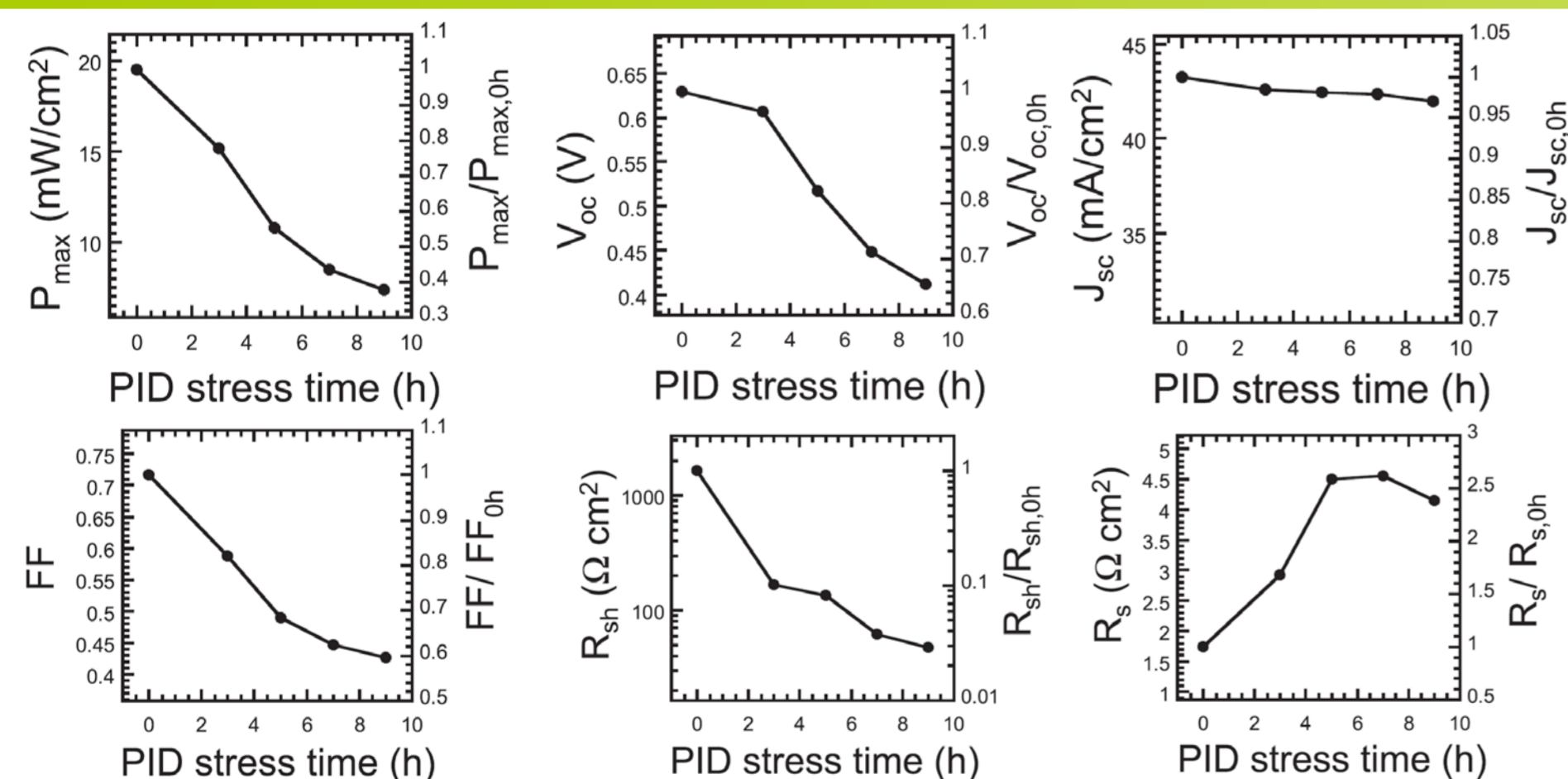


図3 各PIDストレス時間後のSTCにおける特性パラメータ

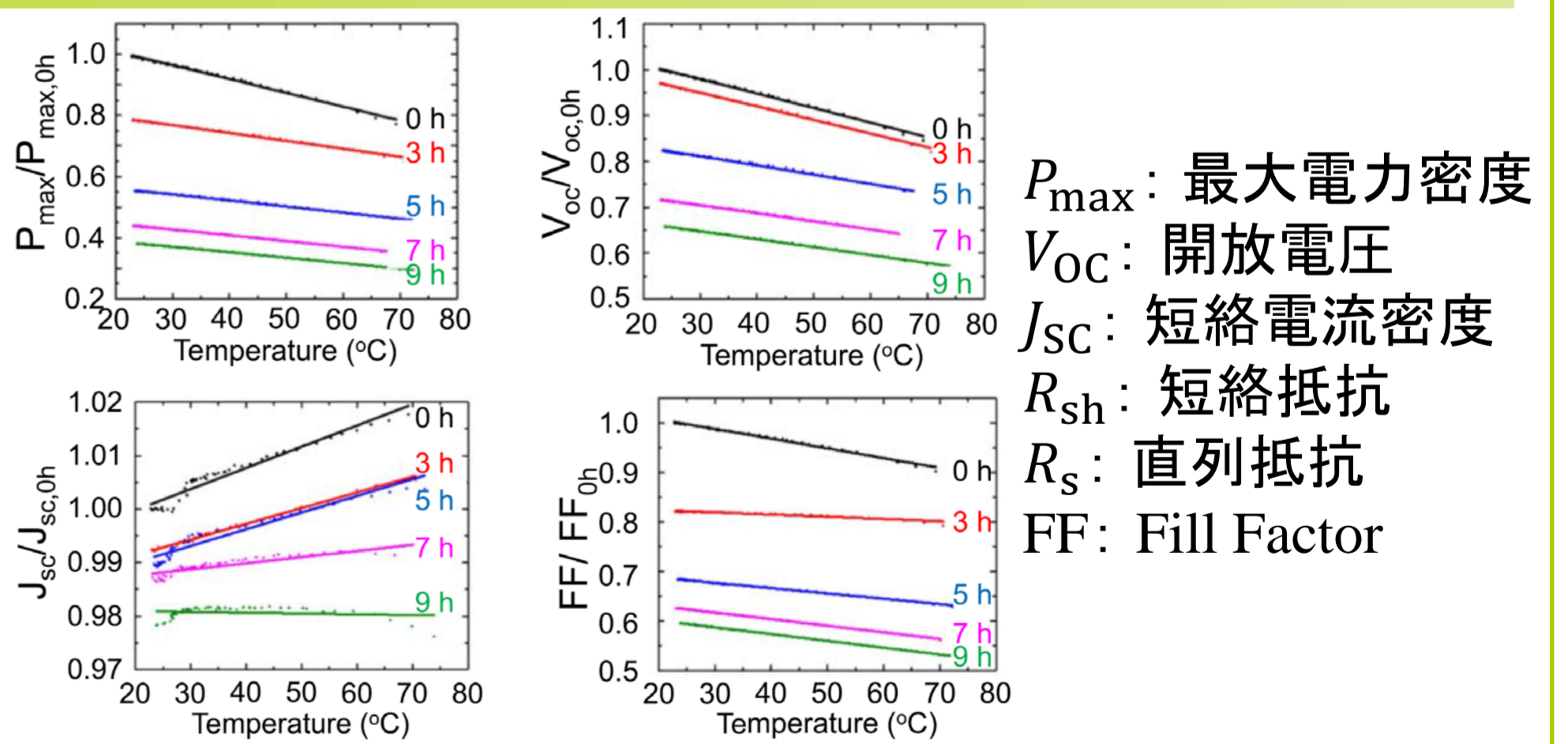


図4 各PIDストレス時間後の特性パラメータの温度依存性

考察 (温度係数)

PID time (h)	P_{max} (%/°C)	V_{oc} (%/°C)	J_{sc} (%/°C)	FF (%/°C)
0	-0.459	-0.318	0.0394	-0.197
3	-0.330	-0.308	0.0278	-0.054
5	-0.360	-0.246	0.0331	-0.158
7	-0.433	-0.250	0.0121	-0.214
9	-0.471	-0.264	-0.0015	-0.232

PID劣化が進行するにつれて、 V_{oc} よりもFFの温度依存性が P_{max} の温度依存性に強く影響するようになる。

結論

PIDストレス時間ごとのp型単結晶シリコン太陽電池の各種特性パラメータの温度依存性を調べた。

参考文献

1. K. Hara, H. Ichinose, T. N. Murakami, and A. Masuda, RSC Adv. 4, 44291 (2014).
2. M. Kasu, J. Abdu, S. Hara, S. Choi, Y. Chiba, and A. Masuda, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 08RG18 (2018).

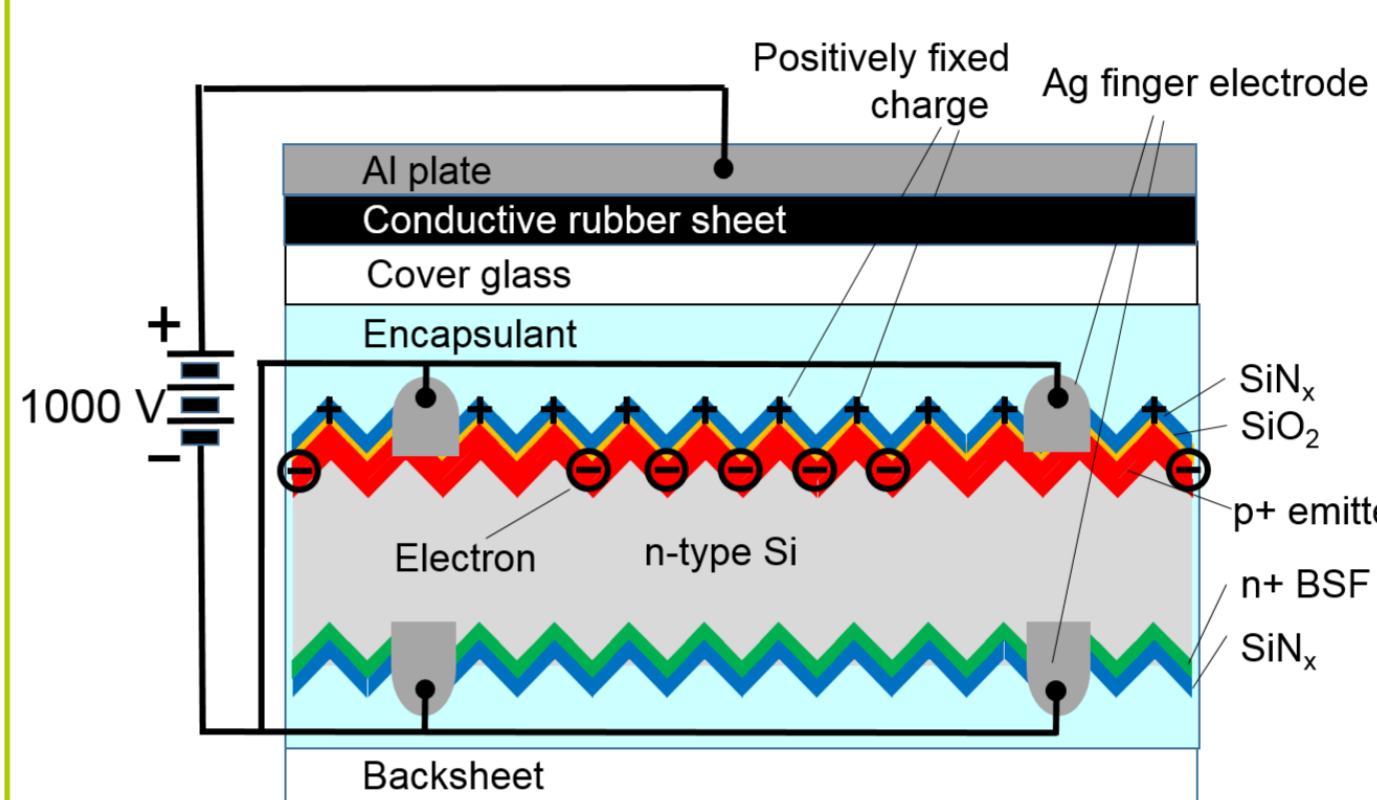
電荷蓄積タイプの電圧誘起劣化が生じたn型単結晶シリコン太陽電池の温度特性

Jaffar Abdu¹、嘉数 誠^{1,2}、原 重臣¹、崔 誠佑²、小川 錦一²、千葉 恭男²、増田 淳²
¹佐賀大学 大学院工学系研究科、²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

研究の目的

- 屋外の太陽電池は60°C以上の高温になることもあり、太陽電池の温度特性は重要。
 - 近年、高効率なn型単結晶シリコン太陽電池が注目される。
 - n型太陽電池も電圧誘起劣化 (PID)する。
 - PIDが生じたn型太陽電池の温度特性は未解明。
- ➡ 電荷蓄積型PIDが生じたn型単結晶シリコン太陽電池の温度特性を調べる。

実験 (モジュール構造、PIDメカニズム、PIDストレス方法)



Komatsuら¹と同様の方法
 劣化を緩やかにするために、室温でPIDストレスを印加
 ストレス時間:
 25 min, 1.5 h, 3 h, 7 h, 13 h, 20 h

実験 (温度特性測定)

PIDストレス後、モジュールの温度を高温装置で約85°Cまで上げる。

モジュールを装置から出し、自然冷却

自然冷却中に、ソーラーシミュレータでI-V測定を繰り返す。

その間、バックシートに添付したT型熱電対で温度計測 (Kasura²と同じ方法)

結果 (J-V特性、P-V特性)

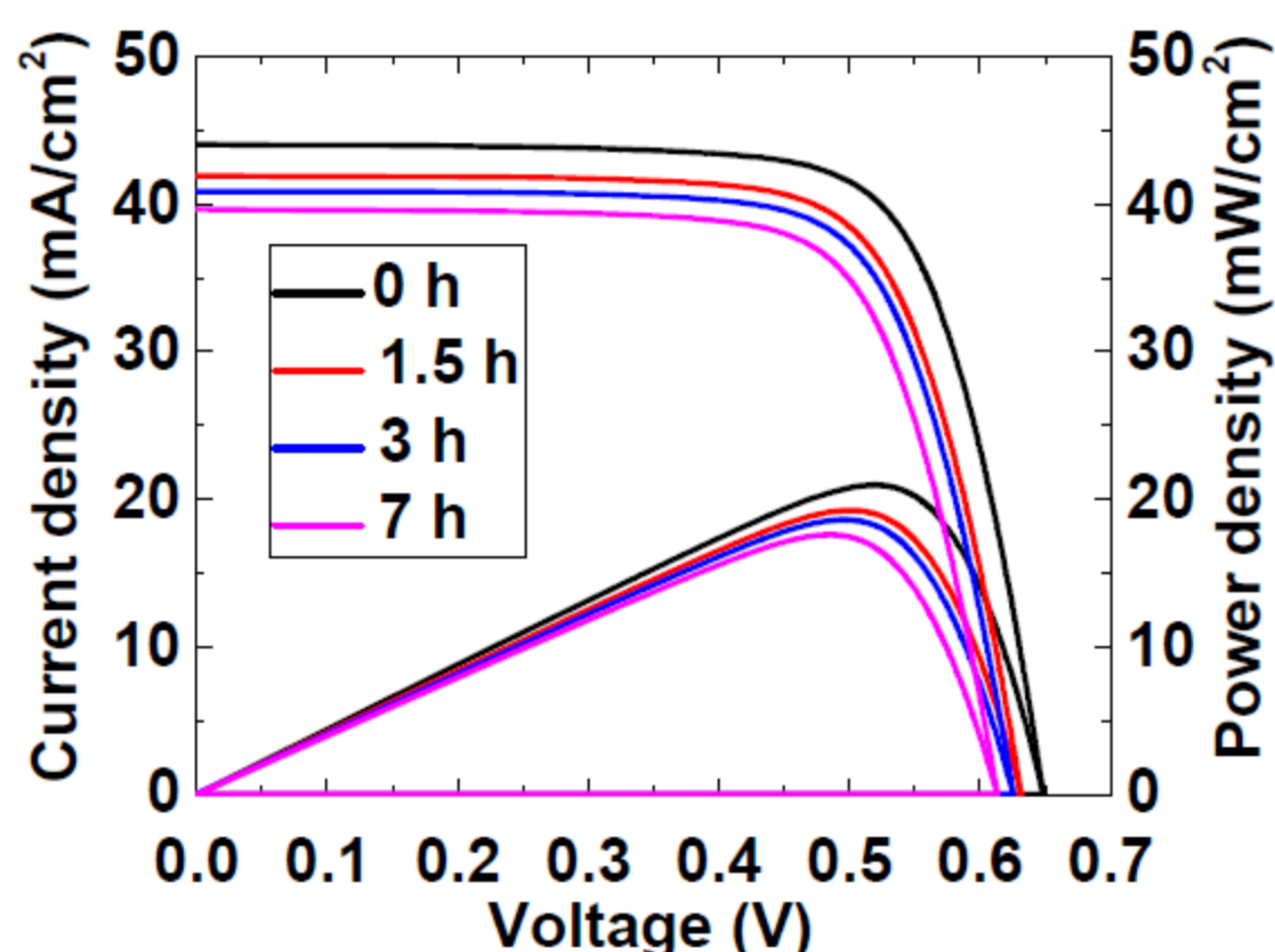


図1 各PIDストレス後の標準試験条件 (STC) におけるJ-V特性、P-V特性

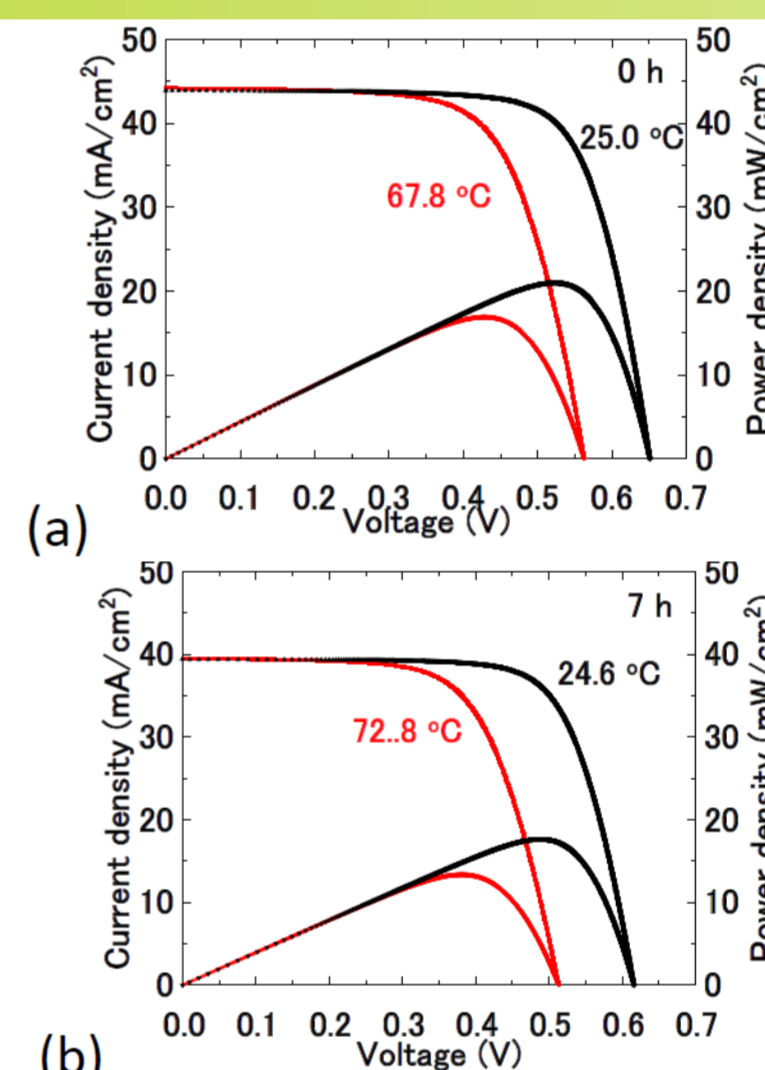


図2 PIDストレス前後の常温と高温におけるJ-V特性、P-V特性

結果 (太陽電池特性パラメータのPIDストレス時間と温度依存性)

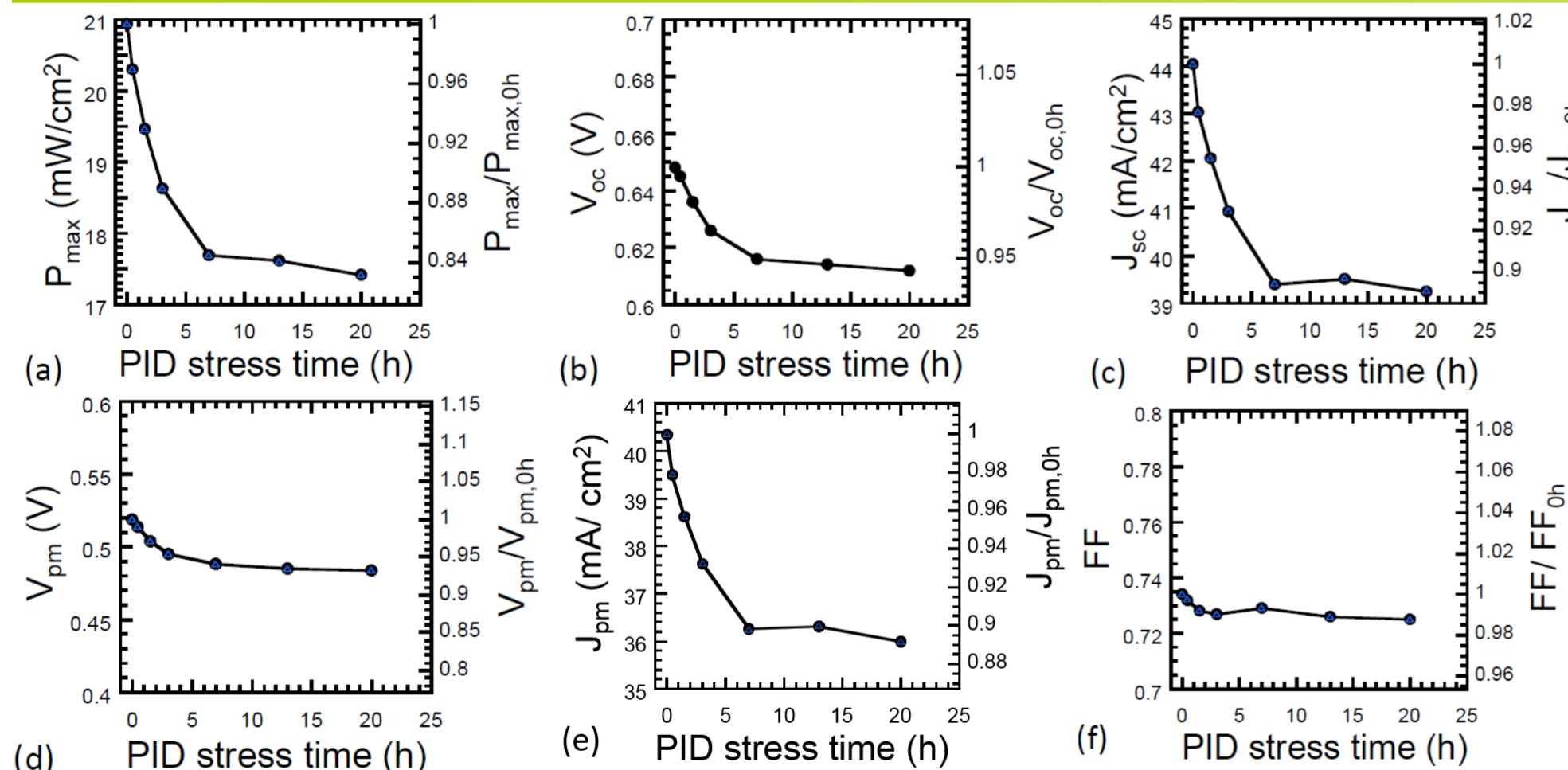


図3 各PIDストレス時間後のSTCにおける特性パラメータ

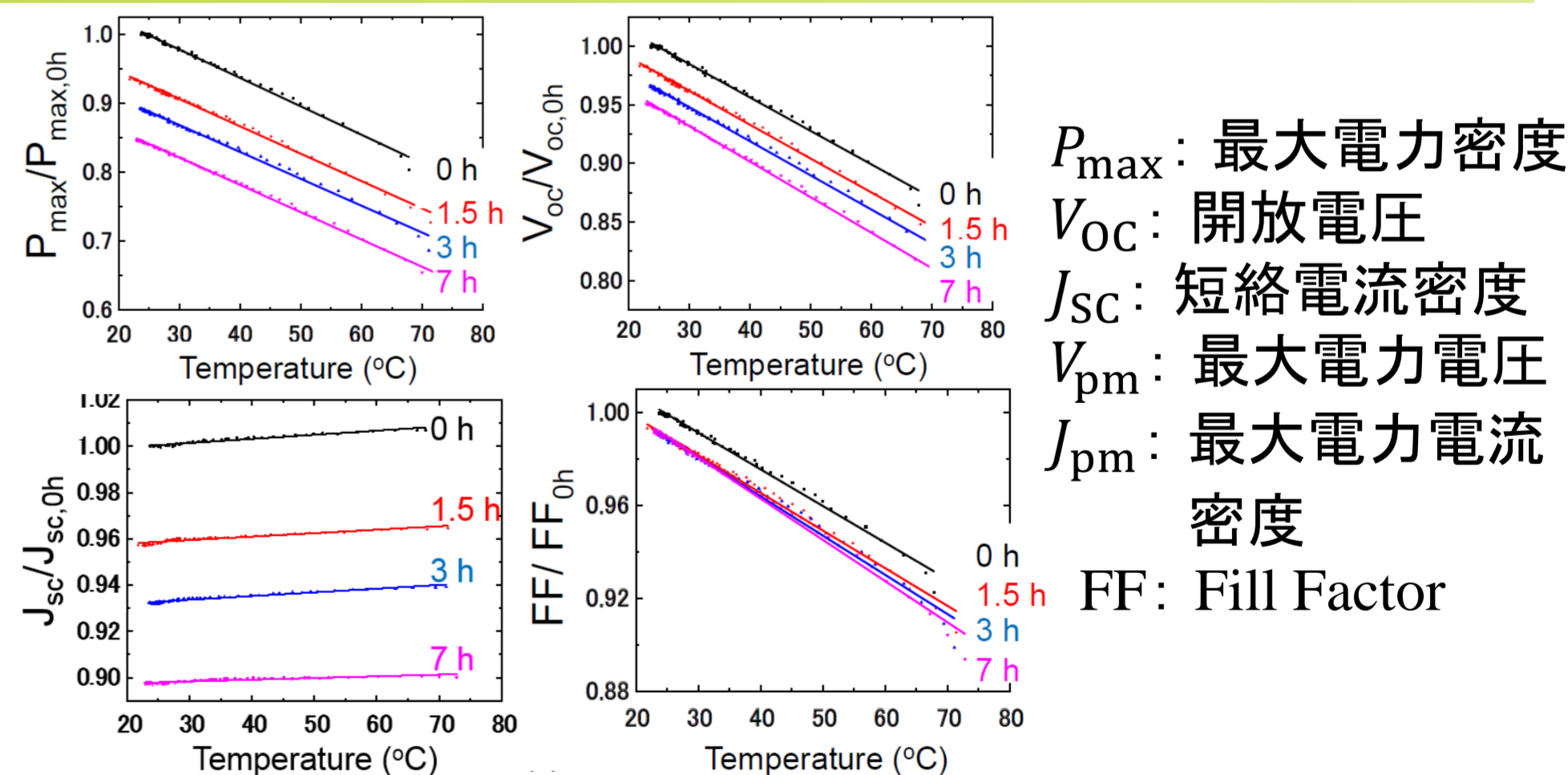


図4 各PIDストレス時間後の特性パラメータの温度依存性

考察 (温度係数)

PID time (h)	P_{max} (%/°C)	V_{oc} (%/°C)	J_{sc} (%/°C)	FF (%/°C)
0	-0.413	-0.286	0.0179	-0.158
0.42	-0.430	-0.296	0.0153	-0.165
1.5	-0.429	-0.296	0.0156	-0.163
3	-0.439	-0.302	0.0172	-0.170
7	-0.471	-0.320	0.0082	-0.180
13	-0.453	-0.306	0.0057	-0.169
20	-0.461	-0.307	-0.0012	-0.168

結論

PIDストレス時間ごとのn型単結晶シリコン太陽電池の各種特性パラメータの温度依存性を調べた。PIDストレス後も P_{max} の温度係数は V_{oc} とFFの温度係数によってストレス前とほぼ同じように決定されており、セルのシャント抵抗低下や再結合電流の増加による劣化ではないことが示唆される。

参考文献

1. Y. Komatsu, S. Yamaguchi, A. Masuda, K. Ohdaira, Microelectron. Reliab. 84, 127-133 (2018).
2. M. Kasu, J. Abdu, S. Hara, S. Choi, Y. Chiba, and A. Masuda, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 08RG18 (2018).

n型フロントエミッター型結晶Si太陽電池 モジュールのPIDにおけるSiO₂膜の影響

鈴木友康¹、山口世力¹、中村京太郎²、増田淳³、大平圭介¹

¹北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科

²豊田工業大学 半導体研究室

³産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

研究の目的

変換効率が高いなどの理由から今後の普及が期待されている
n型結晶シリコン(c-Si)太陽電池だが電圧誘起劣化(PID)に
関する知見はまだ不足している

n型フロントエミッター(n-FE)c-Si太陽電池では^{1,2)}

第1. 表面SiN_x膜への正電荷蓄積により表面再結合が増加してJ_{sc}、V_{oc}低下

第2. 空乏層にNa⁺が侵入し多数の欠陥準位の形成によるFF低下

第3. Na⁺の侵入量が増加し、さらにFF、V_{oc}低下

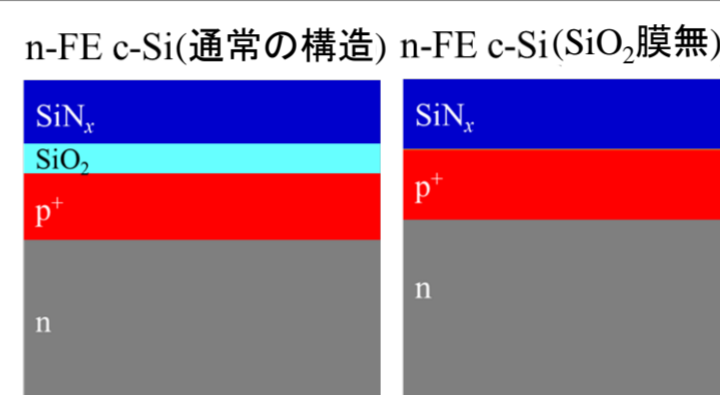
この三段階の劣化が報告されているが、
セルの各膜がPIDにどのような影響を与えているのか明らかではない

➡ **PIDにおけるSiO₂膜の影響を調査**

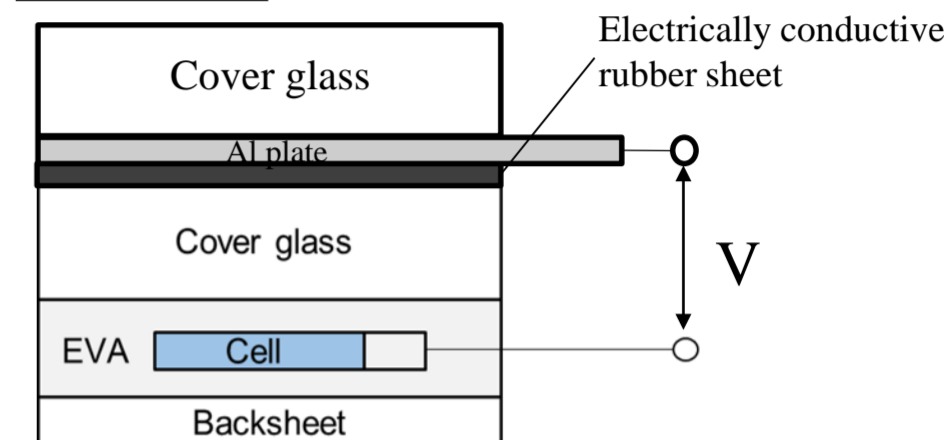
実験

モジュールの作製

セル: 20×20 mm²のSiN_x/SiO₂/p⁺/n/SiN_x
20×20 mm²のSiN_x/p⁺/n/SiN_x
の二種類の構造を有するn-FE c-Si
カバーガラス/EVA/セル/EVA/バックシート
構造のモジュールを作製



PID試験³⁾

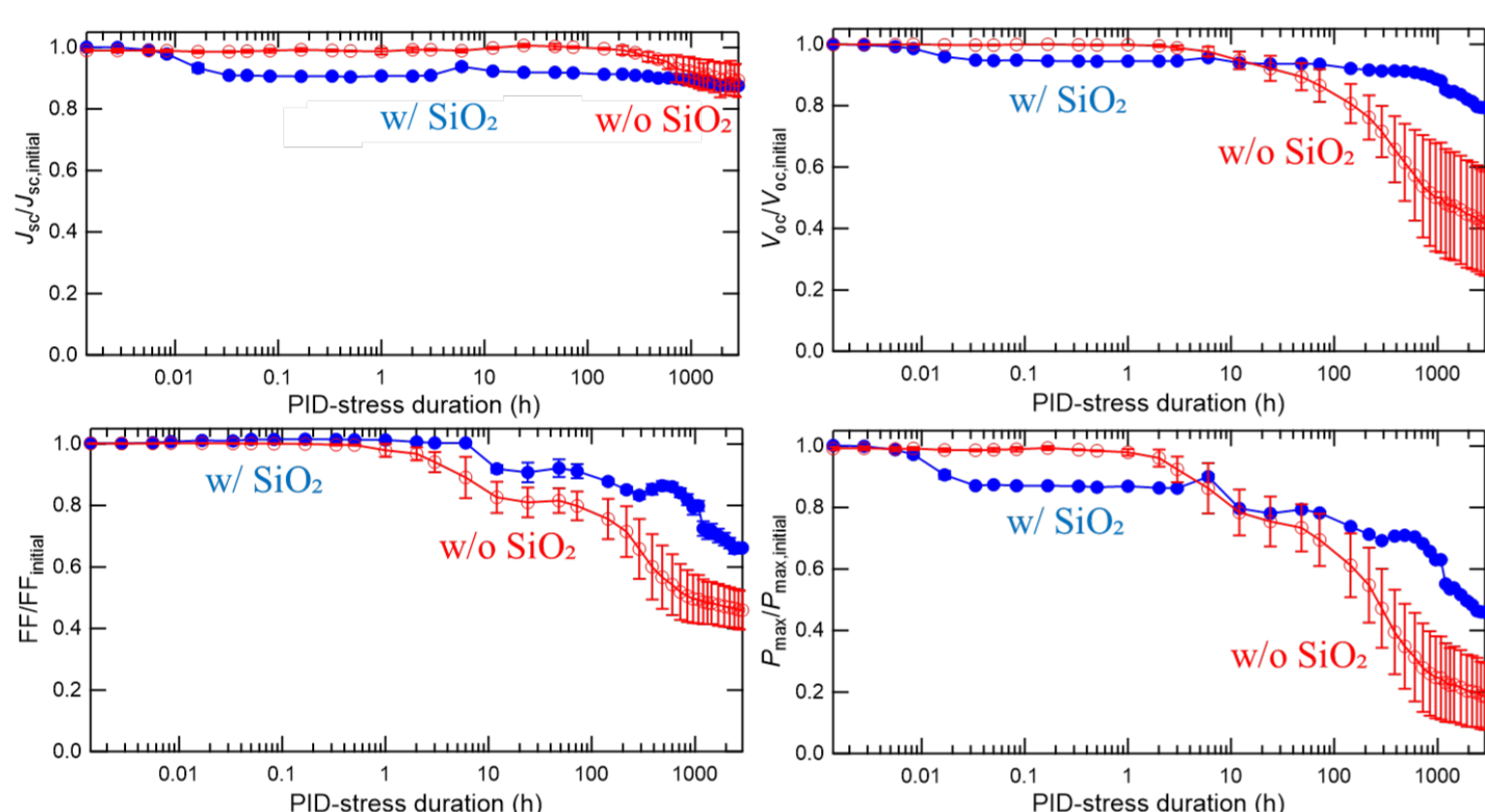


試験条件

T: 85 °C ≤2%RH
アルミ板を接地させてセルに-1000 V
期間: 120日間

結果

120日間のPID挙動



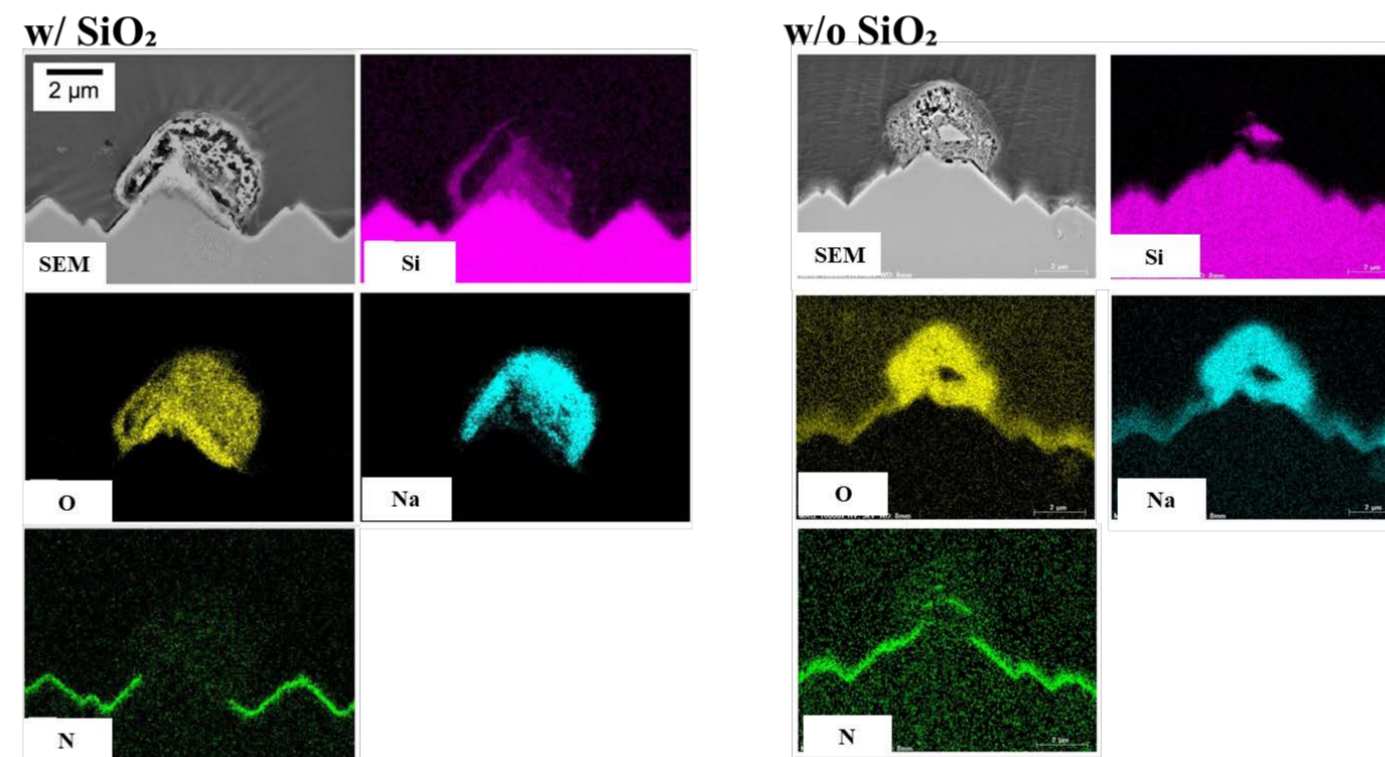
SiO₂有無で異なるPID挙動

- ・第一劣化の有無
- ・FF, V_{oc}の劣化の速さ、大きさ

新たなPID挙動

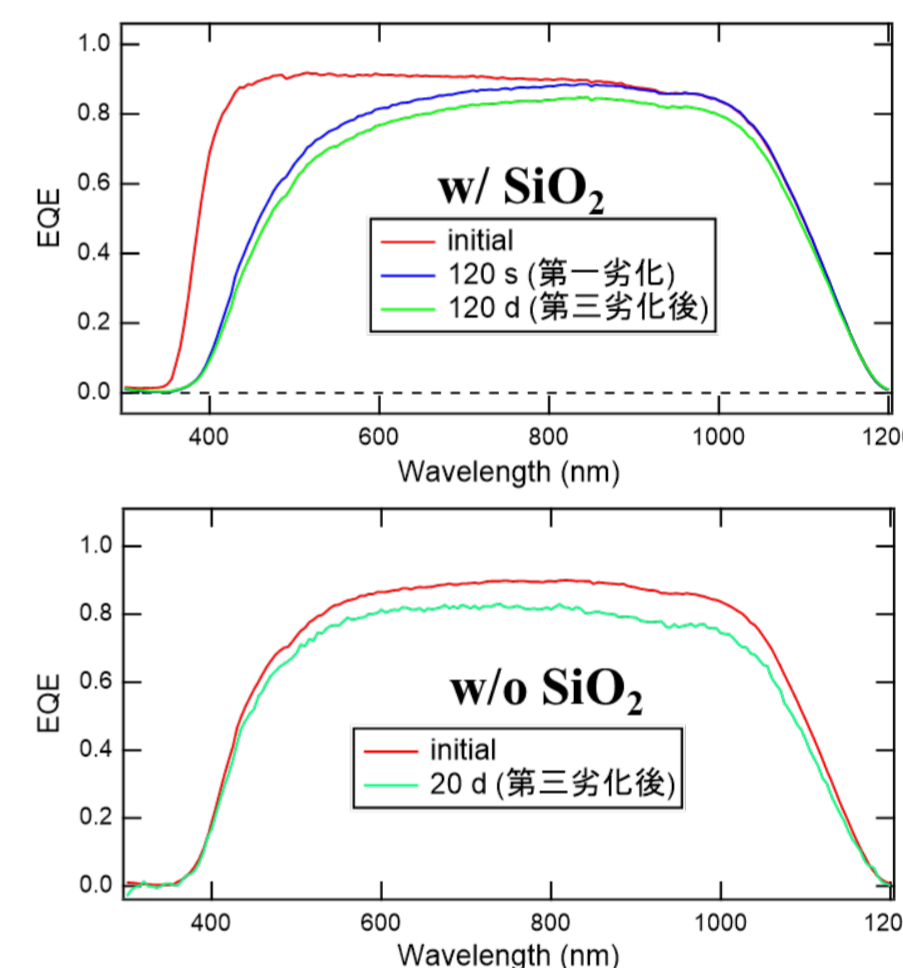
第三劣化後のJ_{sc}低下

セルの断面SEM-EDX像



テクスチャ表面のピラミッド頂上付近のSiN_x膜
が消失し、Naのドーム状構造の形成を確認
SiO₂膜無のセルのみNa層の形成を確認

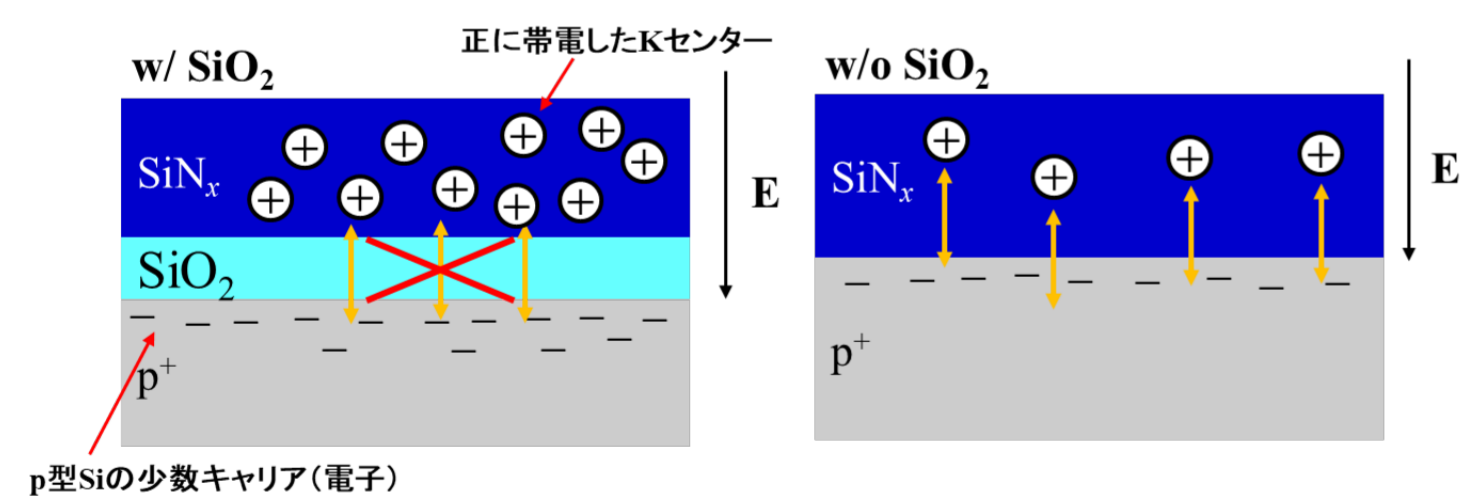
EQE挙動



第一劣化→短波長側の低下
第三劣化後→全波長で低下

考察

第一劣化

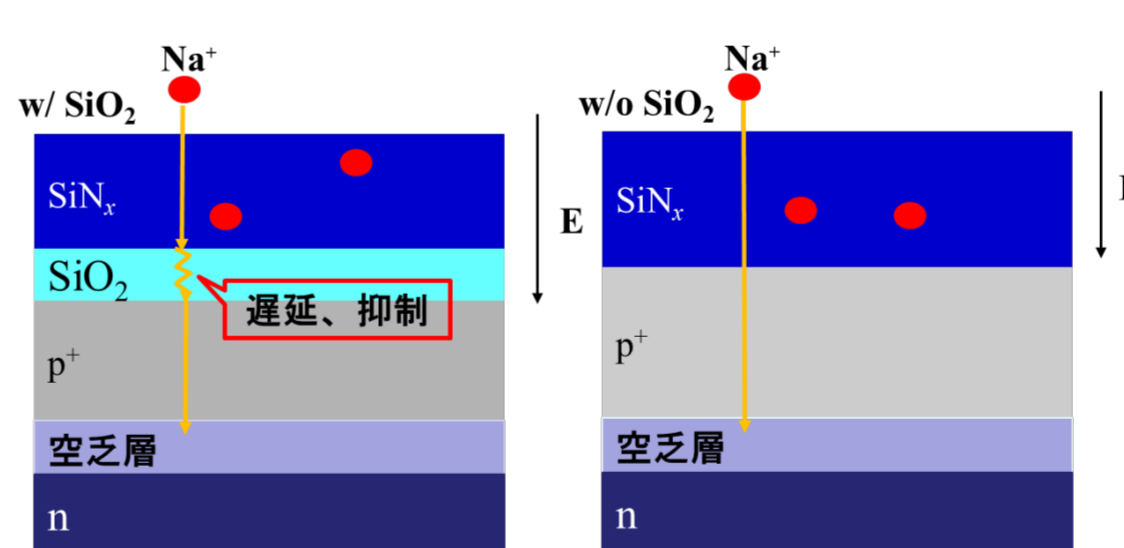


電界印加による漏れ電流が正電荷蓄積を引き起こすことで
Kセンターの電子を引き抜きKセンターが正に帯電

SiO₂膜が防壁となり正電荷が蓄積しp⁺層の少数キャリアの再結合速度が増大

Si側から電子が供給されて正電荷が蓄積しない
SiO₂膜が**第一劣化を誘発**

第二劣化



ガラスなどから電界によってNa⁺が運ばれてくる

SiO₂膜が空乏層内へのNa⁺の移動を**遅延・抑制**

SiO₂膜がない分速くNa⁺が侵入

Na⁺が空乏層内に多数の欠陥準位を形成し再結合電流の増加

第三劣化⁴⁾

テクスチャ表面のピラミッド頂上付近のSiN_x膜が剥がれ、Naのドーム状構造の形成を確認→さらなるFF、V_{oc}低下

その後の劣化(J_{sc}低下)

- ・断面SEM-EDX像よりセルの表面にNa層の形成を確認
- ・このJ_{sc}低下はEQEが全波長で低下している

光学損失によりJ_{sc}が低下した可能性有
SiO₂膜有でも波長全体でEQE低下
→SiO₂膜有でもNa膜形成の可能性

結論

PIDにおけるSiO₂膜の効果

- ・SiN_xに蓄積する正電荷のSi側への放出を抑制
- ・Na⁺侵入の遅延、抑制

第三劣化後のJ_{sc}低下

- ・光学損失によりJ_{sc}が低下した可能性
- ・SiO₂膜有でも波長全体でEQE低下
→SiO₂膜有でもNa膜形成の可能性

参考文献

- 1) Y. Komatsu et al., Microelectron. Reliab. 84, 127 (2018).
- 2) S. Yamaguchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57, 122301 (2018).
- 3) K. Hara et al., RSC Adv. 4, 44291 (2014).
- 4) K. Ohdaira et al., Appl. Phys. Express 12, 064004 (2019).

謝辞: 本研究は、NEDOからの委託を受け実施した

n型フロントエミッター型結晶Si太陽電池モジュールの長時間PIDにおけるNaの挙動

大平 圭介¹、小松 豊¹、鈴木 友康¹、山口 世力¹、増田 淳²
¹北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科
²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

研究の目的

大規模太陽光発電所

多数のセル、モジュールが直列に接続
 フレーム：接地 (0 V)
 セル：数百ボルトの電位



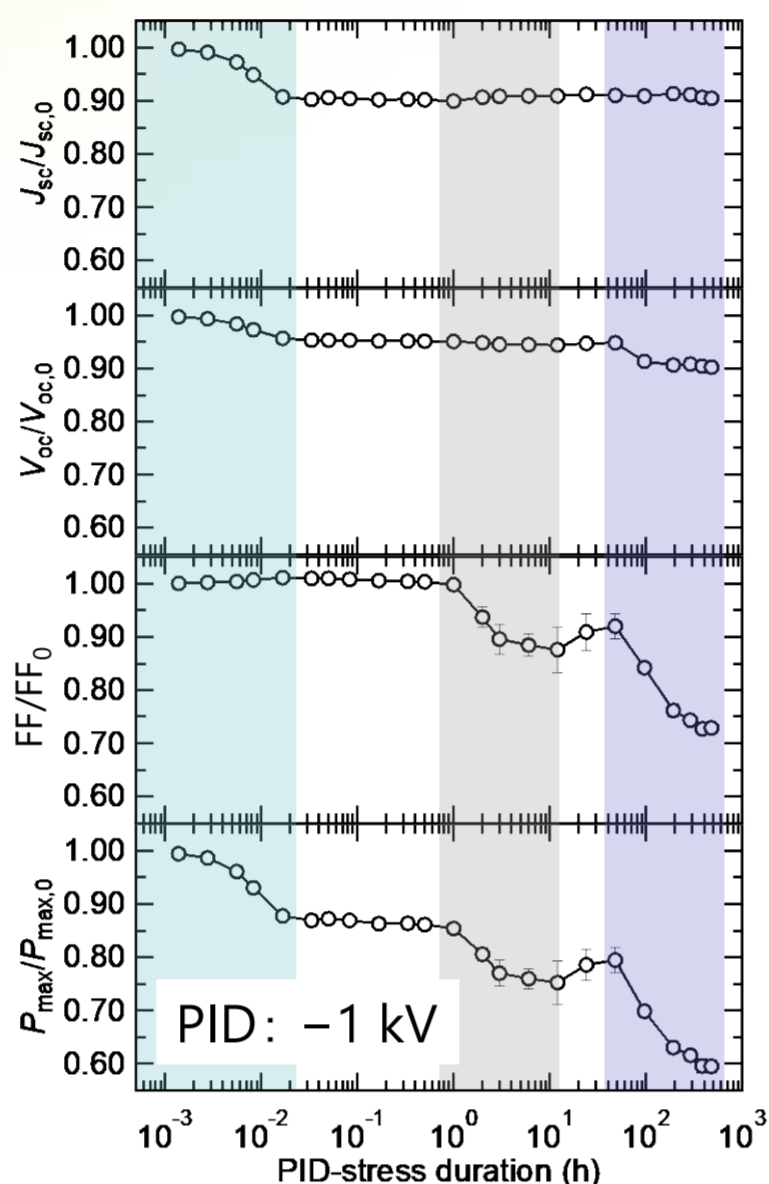
電圧誘起劣化 (PID)

PVモジュールのフレーム-セル間の電位差による発電性能の低下

n型結晶Si太陽電池

- 高効率 → 普及拡大が期待
- 汎用p型モジュールと比べPIDの理解が不十分

n型フロントエミッター型 (n-FE) c-SiモジュールのPID^[1]



第1劣化

~5 s後から J_{sc} と V_{oc} 低下
 1-2 min程度で飽和
 SiN_x への正電荷蓄積

第2劣化

~1 h後からFFが低下
 12 h程度で飽和
 n 値増大→空乏層内に再結合中心が形成

第3劣化

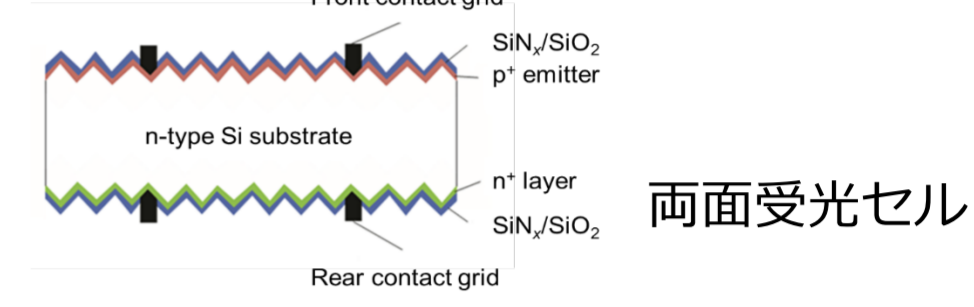
~48 h後から V_{oc} とFF低下
 384 h (16日) 程度で飽和

本研究の目的

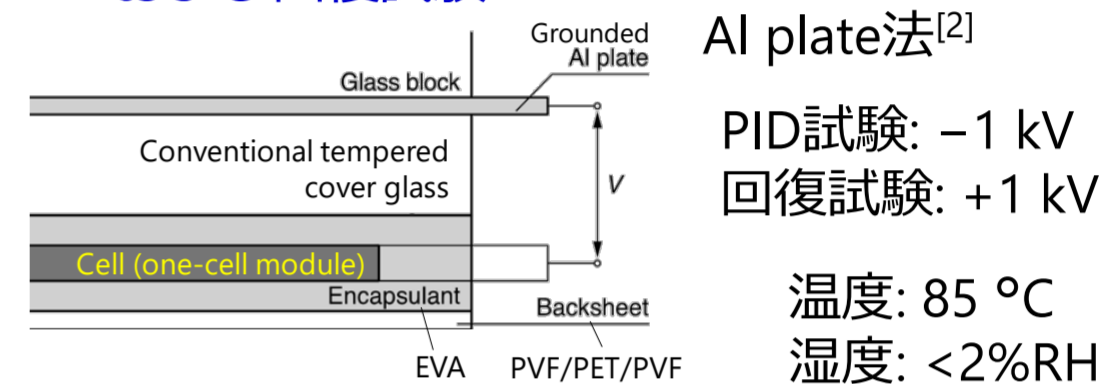
- 長時間PID/回復試験によるNaの挙動
- 第3劣化の機構解明

実験

n-FEセル



PIDおよび回復試験

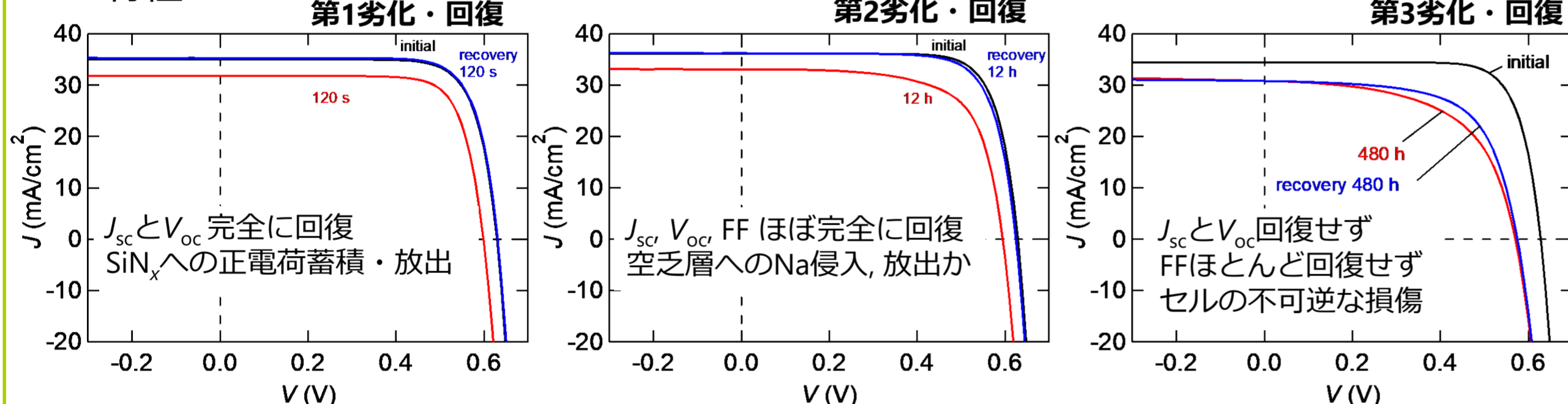


試験時間	PID試験	回復試験
第1劣化	120 s	120 s
第2劣化	12 h	12 h
第3劣化	480 h	480 h

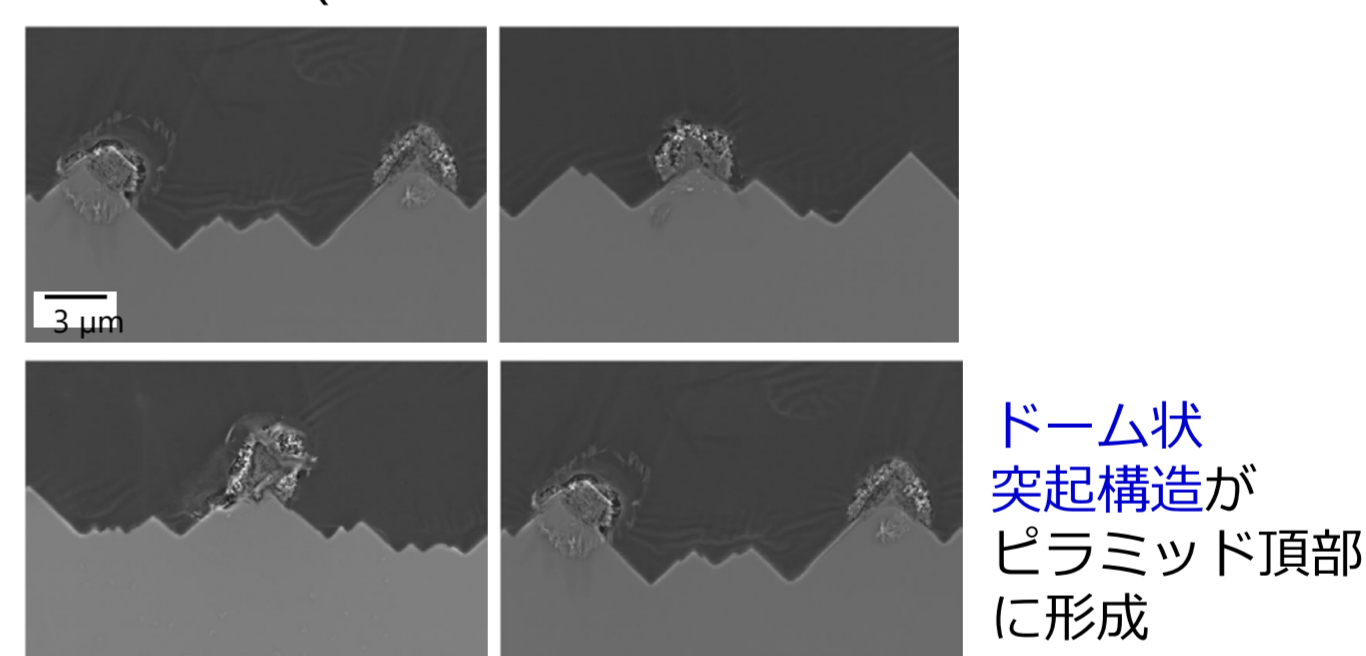
評価手法 J-V, SIMS, 断面SEM-EDX

結果・考察

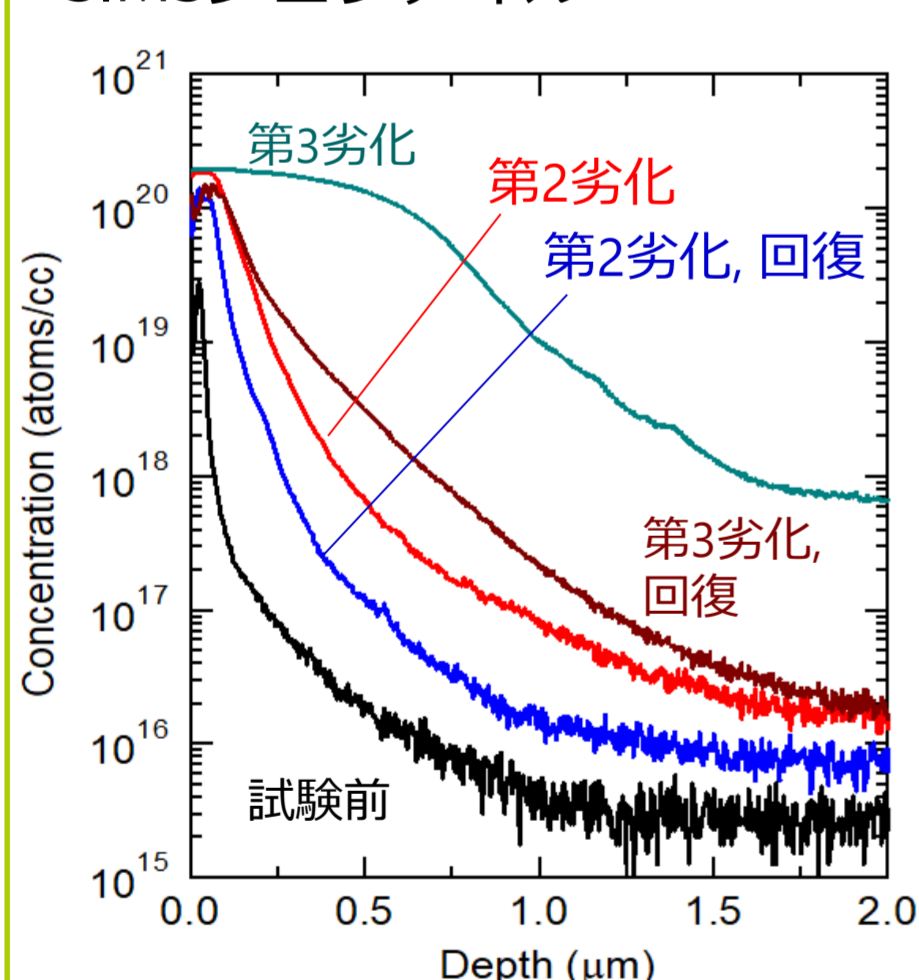
J-V特性^[1]



断面SEM像 (PID試験 480 h後、第3劣化) ^[3]



SIMSプロファイル^[3]



- PID試験により多量のNaが導入
- 回復試験によりNaが外方拡散

Si中のNaの拡散係数 (D)^[4]

$$D = D_0 \exp(-E_a/kT)$$

$$D_0 = 1.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$E_a = 1.28 \text{ eV}$$

$$T = 100 \text{ }^\circ\text{C} (373 \text{ K})$$

$$\rightarrow D = 7.36 \times 10^{-20} \text{ cm}^2/\text{s}$$

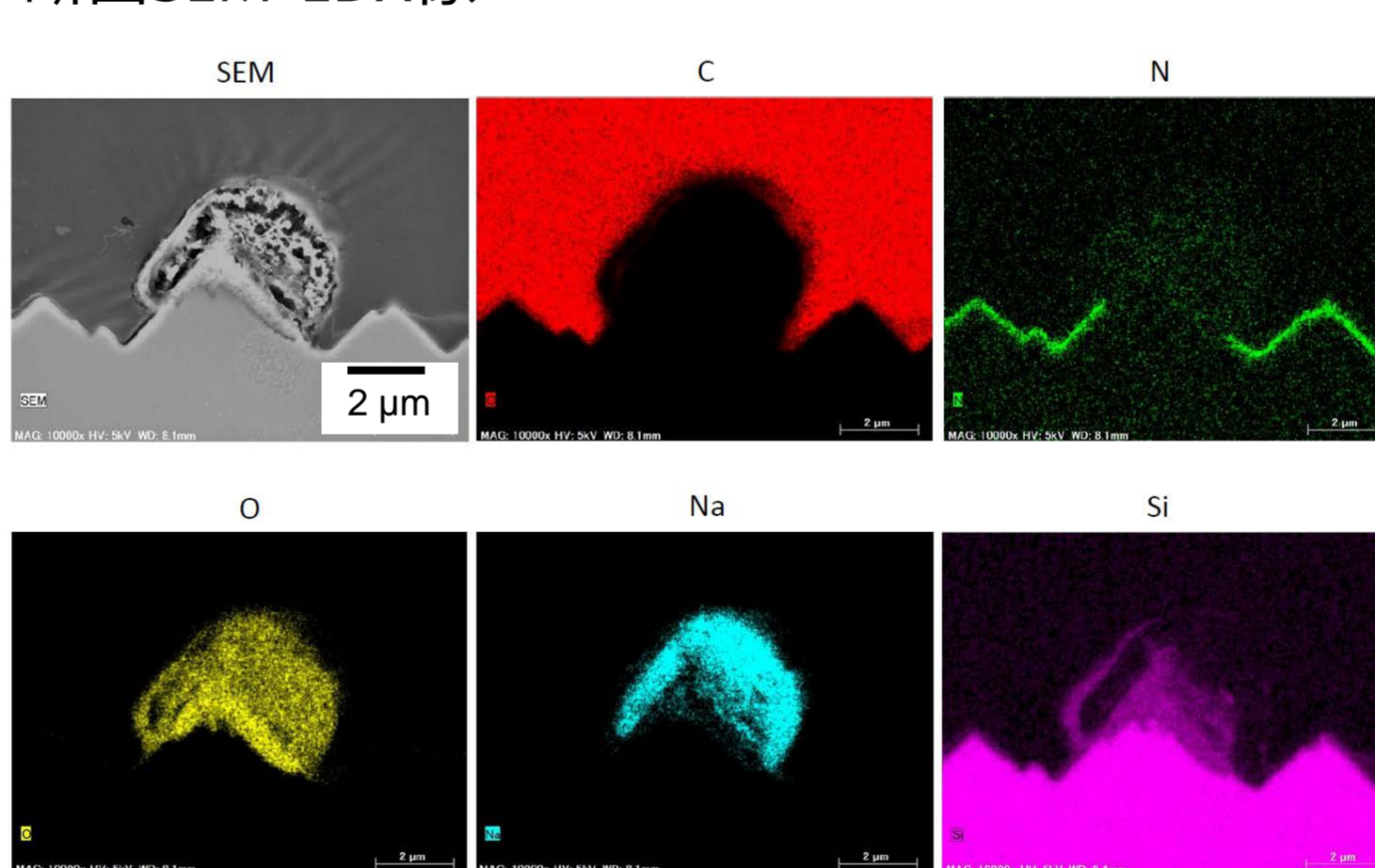
拡散長
 1年: 15 nm
 20年: 68 nm

固溶度^[5]

c-SiをNa溶液に1週間曝露(800 °C)
 \rightarrow Si中Na濃度 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

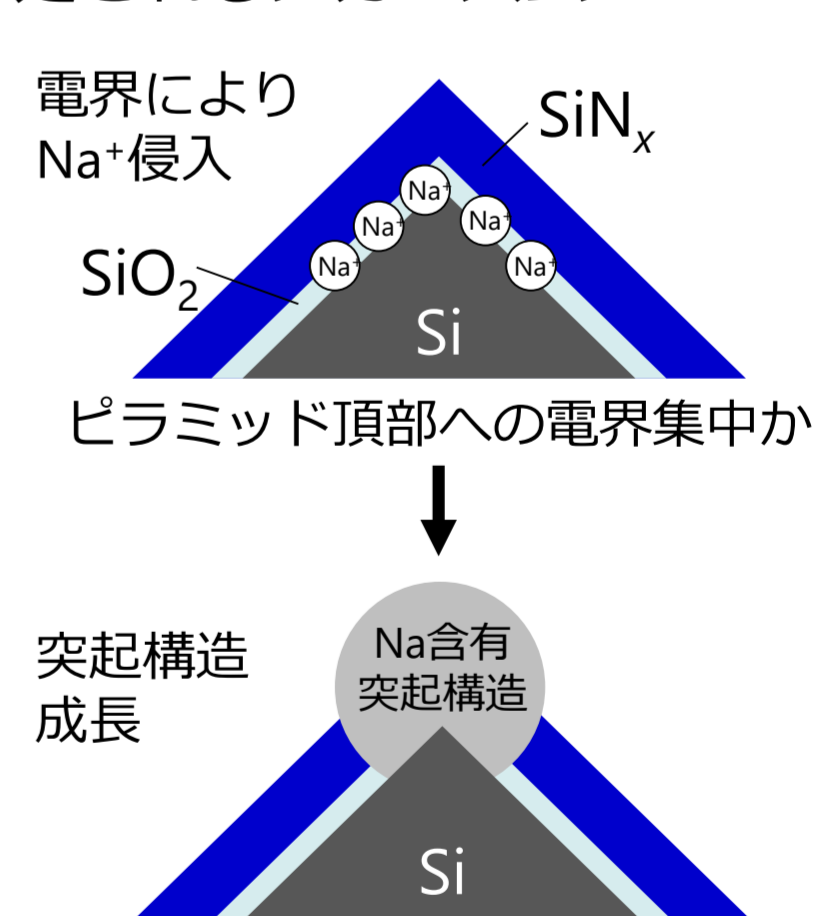
結晶Si内部へのNaの大量侵入は考えづらい

断面SEM-EDX像 ^[3]



- 突起構造はNaを多く含む
- ※Oは断面形成後の大気曝露時に侵入の可能性大
- 突起構造形成部では SiN_x 膜が消失、pn接合へも侵入か

想定されるメカニズム



SiN_x , pn接合の損傷 $\rightarrow V_{oc}$, FF低減
 逆バイアス印加でも損傷箇所は修復しない

結論

n-FE結晶Si太陽電池モジュールの長時間PID/回復試験によるNaの挙動

- J-Vの劣化/回復挙動に対応するNaの増減をSIMSプロファイルにて確認
- テクスチャ頂部にNa含有ドーム状突起構造形成、突起構造形成箇所では SiN_x が消失 \rightarrow 第三劣化のメカニズム

参考文献

- [1] Y. Komatsu, S. Yamaguchi, A. Masuda, K. Ohdaira, Microelectron. Reliab. 84, 127 (2018).
- [2] K. Hara, H. Ichinose, T. N. Murakami, A. Masuda, RSC Adv. 4, 44291 (2014).
- [3] K. Ohdaira, Y. Komatsu, T. Suzuki, S. Yamaguchi, A. Masuda, Appl. Phys. Express 12, 064004 (2019).
- [4] A. V. Zastavnoi, V. M. Korol', Tech. Phys. Lett. 42, 415 (2016).
- [5] J. O. McCaldin, M. J. Little, A. E. Widmer, J. Phys. Chem. Solids 26, 1119 (1965).

謝辞

本研究は、NEDOの委託を受け実施された。
 大野裕先生(東北大)には、Si中のNaの形態についてご議論いただいた。

n型フロントエミッタ結晶Si太陽電池モジュールの電圧誘起劣化挙動に関する屋内及び屋外試験結果の比較

秋富 稔¹・千葉 恭男¹・大平 圭介²・増田 淳¹

¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター モジュール信頼性チーム

²北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科

研究の目的

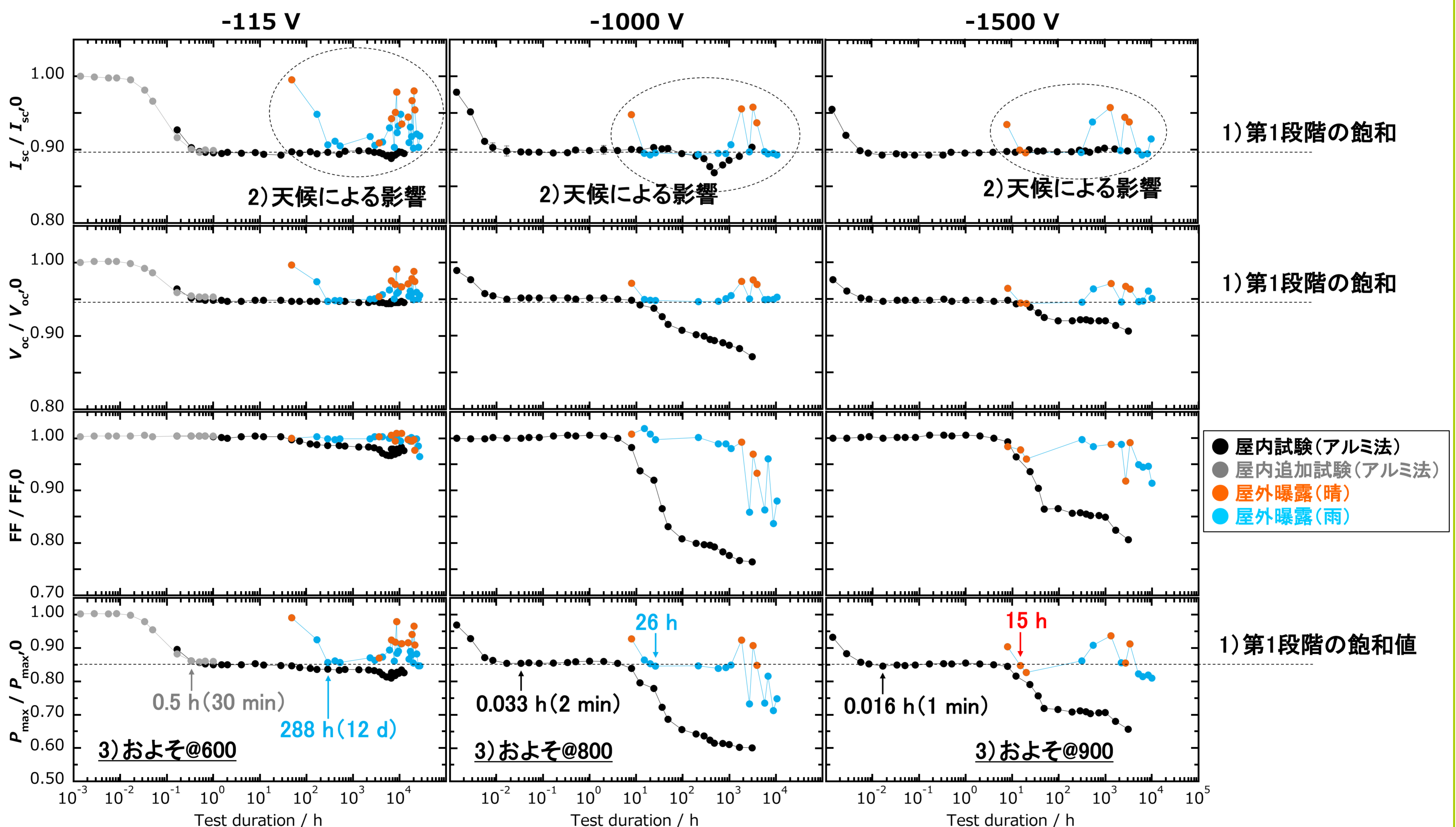
- これまで、屋内試験(アルミ法)による、数週間を要した電圧誘起劣化(PID)試験の観察により、発生メカニズムや劣化の特徴が報告されている【1~4】。
- また、屋外曝露では、数ヶ月間にわたるPIDの挙動観察の結果が報告されている【5】。
- 今回は、1年を経過した屋内試験と屋外曝露のPIDの挙動を観察し、その結果を比較した。

実験

屋内試験 (アルミ法)	屋外曝露	屋外曝露
-115 V -1000 V -1500 V	-115 V	-1000 V -1500 V
<ul style="list-style-type: none"> ~456日間 85°C/2%以下 1セルモジュール 	<ul style="list-style-type: none"> ~1,129日間 佐賀県鳥栖市 42セルモジュール 	<ul style="list-style-type: none"> ~437日間 佐賀県鳥栖市 4セルモジュール

・モジュールは、設置架台から定期的に取り外し、屋内のソーラーシミュレータで測定をした。

結果と考察



結論

- PIDの電圧による影響
 - 電荷蓄積による第1段階の飽和値は、屋内外ともに、電圧には依存せず一定値をとる。
 - しかしながら、電圧値が高くなるほど飽和に必要な時間は短くなる。
- PIDの天候による影響
 - 雨の日にPIDが加速され、晴れた日にPIDからの回復が発生した。
- PIDの屋内試験による屋外曝露に対する加速係数
 - 第1段階の飽和に至るまでの加速係数は約600~900と推定される。
 - ただし、屋外曝露におけるPIDの進行速度は天候に影響される。
 - つまり、屋内試験(アルミ法)は、きわめて過酷な試験方法といえる。

参考文献

- S. Yamaguchi *et al.*, Appl. Phys. Express 9, 112301 (2016).
- Y. Komatsu *et al.*, Microelectron. Reliab. 84, 127 (2018).
- S. Yamaguchi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 122301 (2018).
- K. Ohdaira *et al.*, Appl. Phys. Express 12, 064004 (2019).
- K. Hara *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 117102 (2018).

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託のもとに実施されました。関係各位に感謝致します。
有益なご議論を頂いた北陸先端科学技術大学院大学 山口 世力博士、小松 豊氏に感謝致します。

n型リアエミッター型結晶Si太陽電池 モジュールのPIDにおける光照射の影響

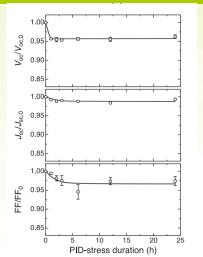
○徐 原松¹、山口 世力¹、中村 京太郎²、増田 淳³、大平 圭介¹

¹北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科

²豊田工業大学 半導体研究室

³産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

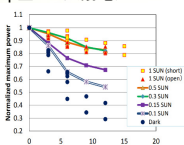
研究の目的



裏面にp⁺層を有するn型リアエミッター型(n-RE)結晶Si (c-Si)太陽電池モジュールの電圧誘起劣化^[1]

- 表面再結合の活性化による主にV_{oc}の低下
- 劣化は飽和する

p型c-Si太陽電池のPIDに対する光照射の効果^[2]



数倍～十数倍の遅延効果

n-RE結晶Si太陽電池モジュールの長時間PID挙動と光照射の影響の調査

実験

モジュール作製

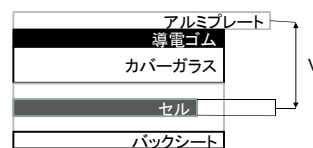
n型両面受光太陽電池
p⁺層を裏面に配置

カバーガラス/EVA/セル/EVA/
バックシート構造でモジュール化

温度	85°C
セル面積	2 cm × 2 cm
電圧	-1000 V
湿度	2%RH以下
光照射	AM1.5, 100 mW/cm ²

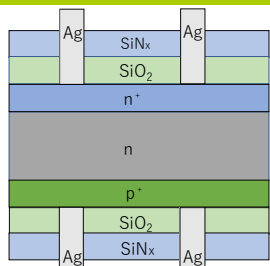
PID試験

接地したAl板を基準として
セル側に電圧を印加
・暗状態
・1 sun光照射下

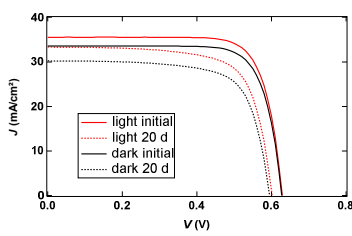


PID加速法^[3]

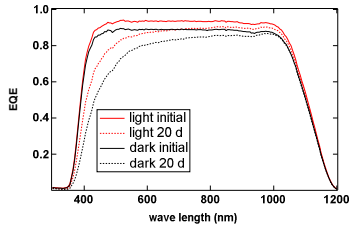
結果・考察



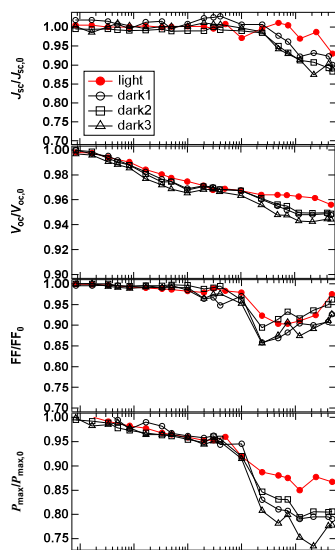
両面受光セル構造



フォトJ-V特性

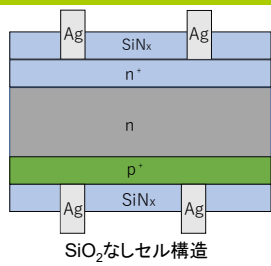


外部量子効率スペクトル



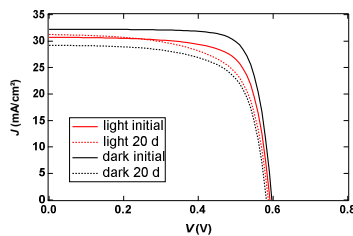
PID試験時間依存性

- カバーガラス等からセル表面へのNaの侵入による表面再結合の活性化に起因するV_{oc}の低下^[1]
- 光照射側の光学損失が原因と思われるJ_{sc}低下、裏面のp⁺エミッター側やセルエッジへのNa侵入によるV_{oc}、FF低下
- J_{sc}とV_{oc}の低下に、光照射によるわずかな遅延効果が確認できるが、汎用p型モジュールほどの明確な効果ではない

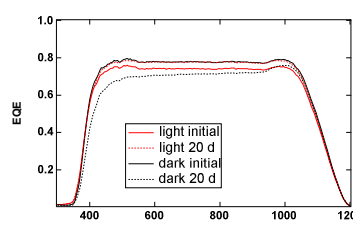


SiO₂なしセル構造

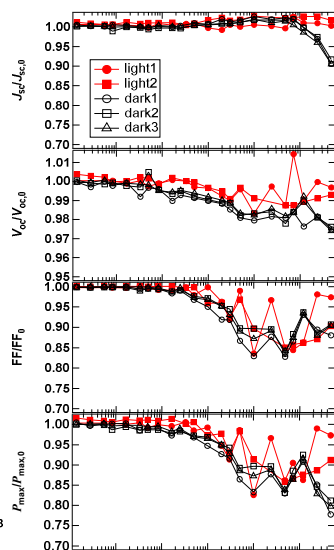
(p型セル製造ラインで作製したセルと似た構造)



フォトJ-V特性



外部量子効率スペクトル



PID試験時間依存性

- SiO₂有りのセルと比べ初期特性が低く、変化が見えにくい
- 光照射によりJ_{sc}の低減に遅延効果が見られる
- Na侵入によると思われるV_{oc}低減における遅延効果は明確ではない

結論

n-RE型太陽電池のPID挙動

- V_{oc}は試験開始後すぐに低下し始め、約1時間で一旦飽和する
- 試験時間10時間以降、J_{sc}、V_{oc}、FFが低下
- J_{sc}の低下は光学損失による
- V_{oc}とFFの低下は裏面のp⁺エミッター側やセルエッジへのNa侵入に起因する可能性

光照射の影響

- SiO₂ありのセルにおいて、J_{sc}とV_{oc}の低下に対しわずかな遅延効果
- SiO₂なしのセルにおいて、J_{sc}に遅延効果
- 汎用のp型モジュールほど明確な遅延効果を示さない

参考文献

- [1] S. Yamaguchi et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells **151**,113 (2016).
- [2] A. Masuda and Y. Hara, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 08RG13 (2018).
- [3] K. Hara et al., RSC Adv. **4**, 44291 (2014).

謝辞

本研究は、NEDOの委託により実施された。

結晶シリコン太陽電池モジュールへの雷インパルス電圧印加による電圧誘起劣化の加速

金子 哲也¹, 田邊 亮太¹, 高野 健太郎¹, Suy Kimsong¹, 原 由希子², 増田 淳², 磯村 雅夫¹
¹東海大学, ²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

研究の目的

- 太陽光発電システムが直撃雷や近傍への落雷による誘導雷を受けると、太陽電池モジュールの各部には高電圧が印加される事が考えられる。
- 本研究では、結晶シリコン太陽電池モジュールに対し、落雷を想定した雷インパルス電圧を印加した際に生じる影響を調査する事を目的とし、今回は電圧誘起劣化(PID)とその回復への影響を評価した。



実験

<被試験モジュール>

- 多結晶シリコン太陽電池単セルモジュール
- 構造: カバーガラス/EVA/p型多結晶Siセル/EVA/PVF/PET/PVFバックシート
- セルサイズ: 15.6 cm角
- モジュールサイズ: 18 cm角
- モジュールの対向する2辺(セル電極を取り出していない側)にアルミテープを貼付してフレームを模擬



図1. 被試験太陽電池モジュール

<インパルス電圧印加>

フレームを模した両アルミテープをアースに接続し、セルの両電極に多段式インパルス電圧発生器から負極性の雷インパルス電圧を印加(セル両電極は短絡し、同電位のインパルスを印加)

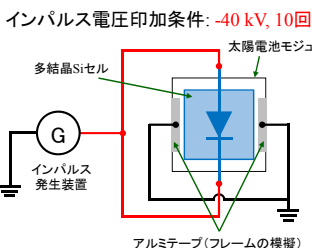


図2. インパルス電圧印加時の結線模式図

<PID試験>

モジュールのカバーガラス表面に導電性ゴムシートとアルミ板を用いてアースに接続し[1]、75°Cの恒温槽内(湿度無制御)において、セル両電極に-500 Vまたは-750 Vを2 h印加

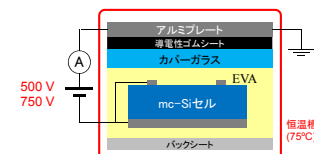


図3. PID試験時の結線模式図

<評価>

印加電圧波形: オシロスコープ(帯域幅 1 GHz)

セル特性評価

- ・ダーク電流-電圧特性
- ・EL画像: デジタルカメラ(赤外透過に改造) IR850フィルタ, 注入電流 4 A

<逆バイアス印加(PID回復)>

ダーク電流-電圧(I-V)測定と同一の接続において、逆方向電圧(-2, -3, -4 V)を2 h印加(室温)

結果と考察

<インパルス電圧印加>

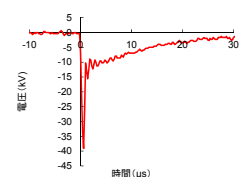


図4. 印加インパルス電圧波形

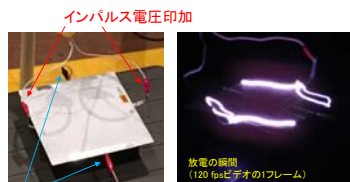


図5. インパルス電圧印加時のモジュール表面での放電

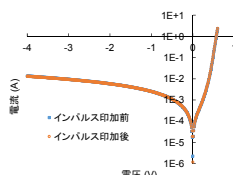


図6. インパルス電圧印加前後のダークI-V特性

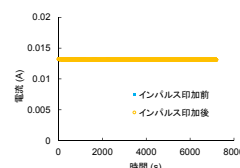


図7. 逆バイアス-4 V印加時の電流変化(図6中で-4Vの状態を保持した事に相当)

- ◆ モジュール外でのスパーク発生により、インパルス電圧は1 μs程度で低下する(図4, 5)。
- ◆ インパルス電圧印加の前後でダークI-V(図6)および逆バイアス印加時の電流(図7)に変化は見られない。→電圧-40 kVで10回のインパルス電圧印加自体では、セル特性の劣化は無い。

<PID試験>

<逆バイアス印加によるPIDの回復>

■ ダーク電流-電圧(I-V)特性

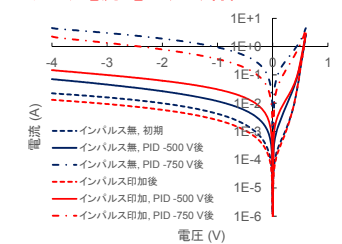


図8. PID試験後のダークI-V特性(図中のPID-500 V後は逆バイアス-4 V印加1回を、PID-750 V後は逆バイアス-2 V印加2回の実行を含む)

■ PID試験 -500 V後

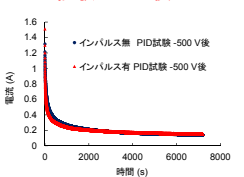


図9. PID試験-500 V後に逆バイアス-4 V印加時の電流変化

■ PID試験 -750 V後

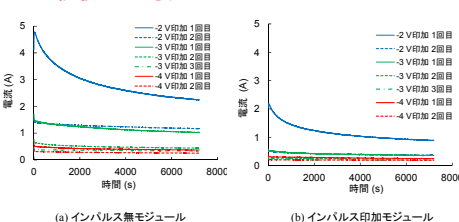


図10. PID試験-750 V後に逆バイアス電圧を繰り返し印加した時の電流変化

■ ダーク電流-電圧(I-V)特性

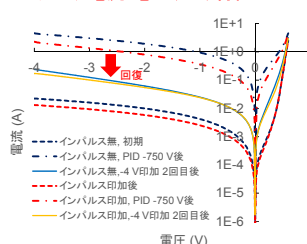


図11. PID試験-750 V後に逆バイアス電圧を繰り返し印加した後のダークI-V特性(図10の測定後のI-V特性)

- ◆ PID試験前はインパルス無モジュールの方が逆方向電流が大きいが、PID試験-500 V後は、インパルス電圧印加モジュールの方が逆方向電流が増加している(図8)。
- インパルス印加によりPID試験の影響が早く現れており、インパルス電圧印加は、結晶シリコン太陽電池モジュールのPIDの進行を速める。
- ◆ PID試験-750 V後は再びインパルス無モジュールの方が逆方向電流が大きいのは、初期I-VからセルのPID耐性の個体差と推測される(図8)。
- ◆ PID試験後は逆バイアス電圧印加中に電流の時間変化がある(図7と図9の比較)。この電流は時間と共に減少し、逆バイアス電圧ごとに飽和傾向を示す(図10)。
- ◆ 逆バイアス印加前後のダークI-V(図11)とEL(図12)から、逆バイアス印加によりPIDの回復が見られる。
- PID試験で到達したNa⁺イオンが、電界によりpn接合近傍から移動していると考えられる。
- ◆ 逆バイアス印加時の電流の時間変化ならびにPIDの回復挙動は、インパルス電圧印加の有無にはよらずにどちらでも生じている(図10~12)。
- インパルス電圧印加がセル特性には影響を与えていない事を示している。

➡ インパルス電圧印加でのPIDの促進は、EVAなどセル以外へのダメージに起因していることが示唆される。

■ EL画像

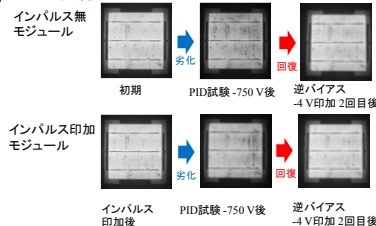


図12. ELの推移(図11の各I-V特性測定時に対応)

結論

- 太陽電池モジュールのフレームと結晶シリコン太陽電池セル間へのインパルス電圧の印加は、PIDの進行を速める。
- インパルス電圧印加によるPID促進の要因は、セル以外の部位にあることが示唆される。

<今後の予定> インパルス電圧印加によるPID促進の要因を明らかにするために、Naの移動状態をTOF-SIMS、EPMA等で分析する。

参考文献

- [1] K. Hara, H. Ichinose, T. N. Murakami, and A. Masuda, RSC Adv., 4, 44291 (2014).

薄膜シリコン太陽電池のPID現象と光照射効果

原由希子・増田 淳

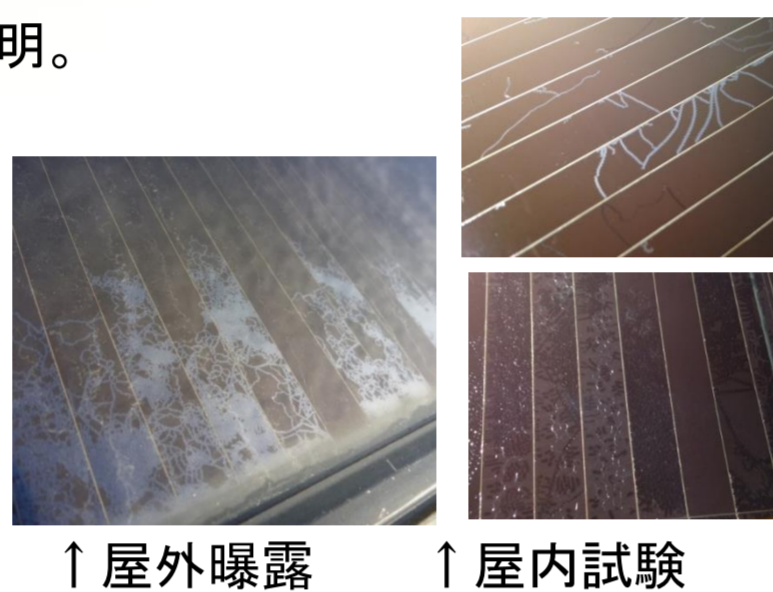
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター モジュール信頼性チーム

研究の目的

- メガソーラーなどで薄膜シリコン太陽電池の剥離が確認されているものの、PIDの実態やメカニズムについて不明な点が多い。
- 以前、屋内PID試験による剥離の再現に成功した[1]。
- 結晶シリコン太陽電池では光照射によりPIDが遅延されることが知られている[2]が薄膜シリコン太陽電池では不明。

以下の調査を行い実態とメカニズムを探る

- 剥離の検証
- TCOとして使用されるSnO₂:F(FTO)膜への直接電圧印加
- 光照射による影響



実験

アルミ法PID試験

受光面ガラスに『①導電性シート、②アルミ板、③重石用ガラス』の順に重ね、クリップで固定し密着させる。
85°Cのドライチャンパー内でアルミ板に対しセルの端子に-1000 Vを印加する。

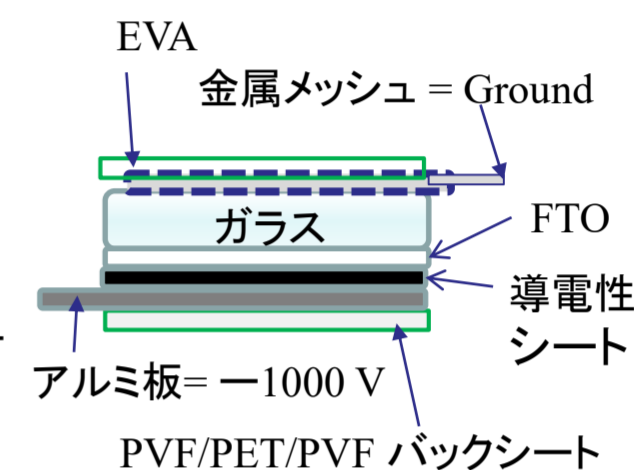
メッシュ法PID試験

受光面ガラスに金属メッシュとEVAを積層・ラミネートし、メッシュに対しセル端子に-1000 Vを85°Cのドライチャンパー内、もしくは室内でキセノンランプによる光照射をしながら印加する。

SnO₂:F(FTO)への電圧印加

印加

ガラス側に金属メッシュとEVAを積層・ラミネートし、FTO側に①導電性シート、②アルミ板、③バックシートを重ね、メッシュに対しアルミ板に-1000 Vを印加。



結果

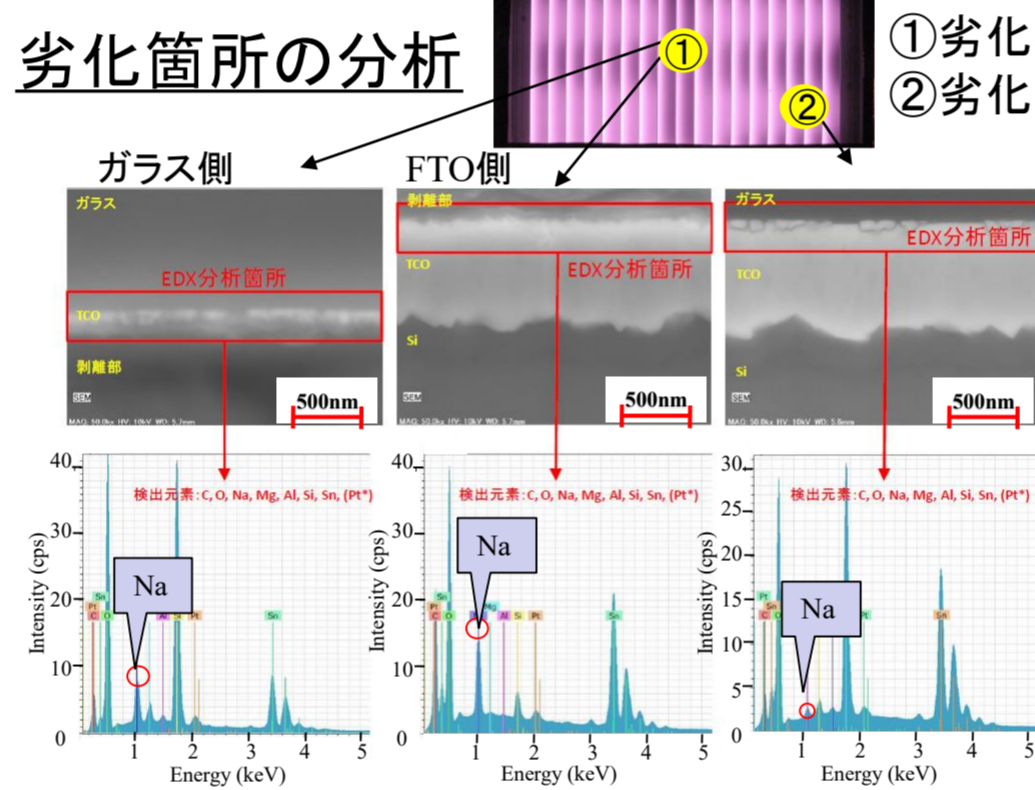
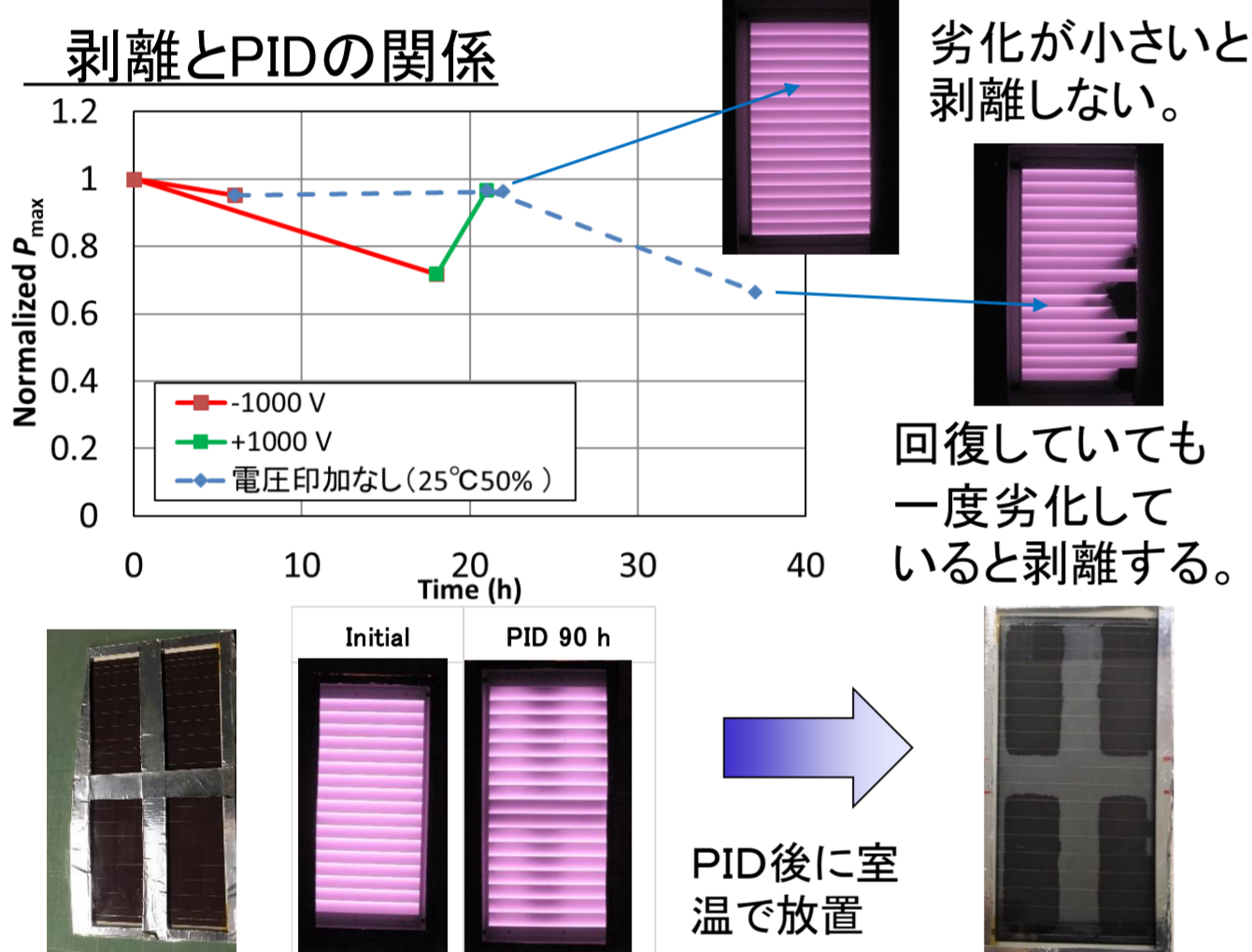
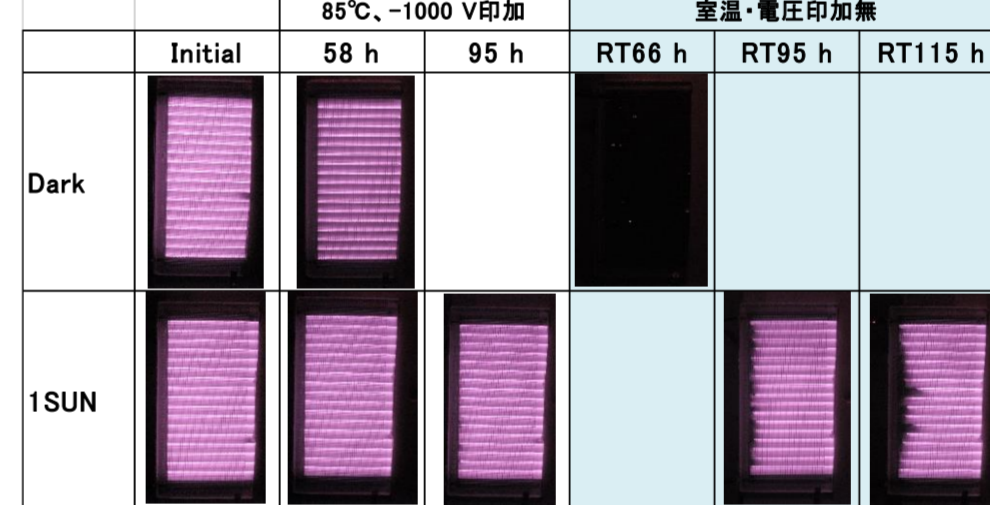
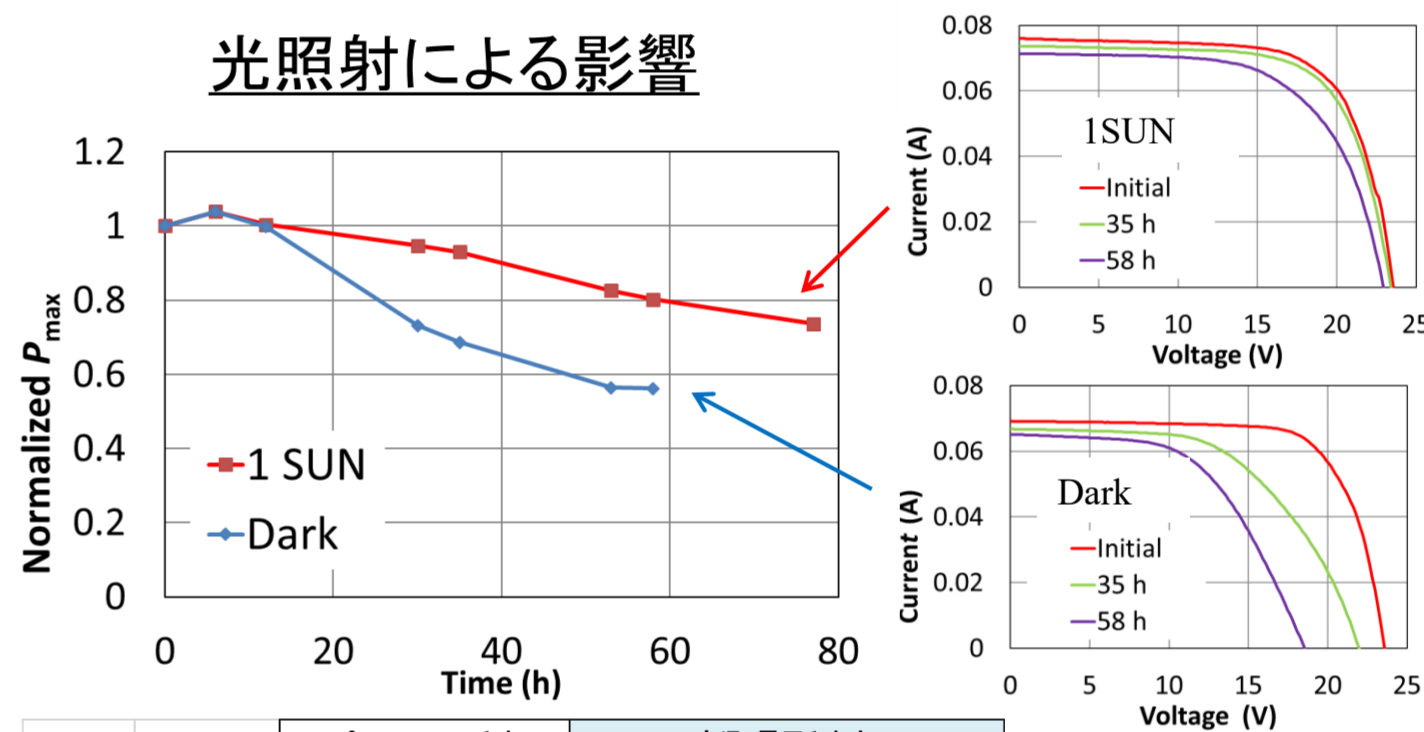


表2 原子数濃度 [at%]

元素	観察箇所① ガラス側	観察箇所② TCO側	観察箇所③ ガラス/TCO界面
C	16.3	31.9	11.1
O	59.5	50.4	54.2
Na	2.8	5.2	0.3
Mg	1.0	0.2	0.7
Al	0.2	0.0	0.2
Si	18.4	1.5	18.3
Sn	5.8	10.9	15.3
合計	100.0	100.0	100.0



PID試験時に光照射すると劣化が遅延し、試験後の剥離の進行も遅くなる。

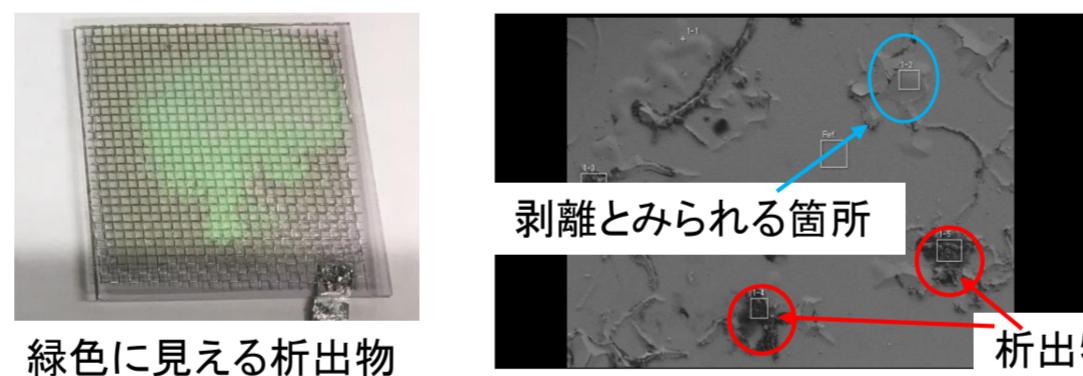
- テープの位置だけ劣化し、劣化箇所だけ剥離する。
- 乾燥状態のPID時には剥離せず、大気中の湿度環境下で剥離する。

- ガラス/FTO界面の剥離を確認。
- 剥離部で未劣化部の10倍以上のNaを検出。

結果の検証と考察

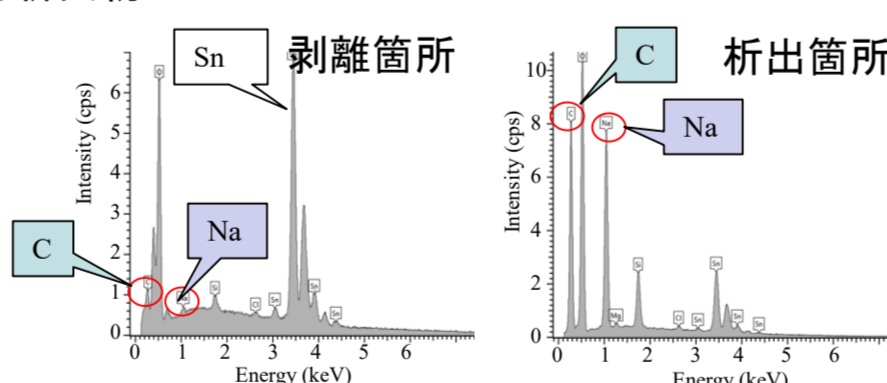
剥離について

- 剥離箇所はガラス/FTO界面
→ 薄膜シリコン太陽電池のPIDはFTOが原因?
→ FTO単体に電圧印加すると析出物が見られ、抵抗の上昇が確認できた。



- 乾燥状態の電圧印加時には剥離は見られない?
→ 分析では、目視で確認できなかった剥離を確認。

- 大気中の湿度により可視的な剥離が進行する。
→ 水分浸入が原因



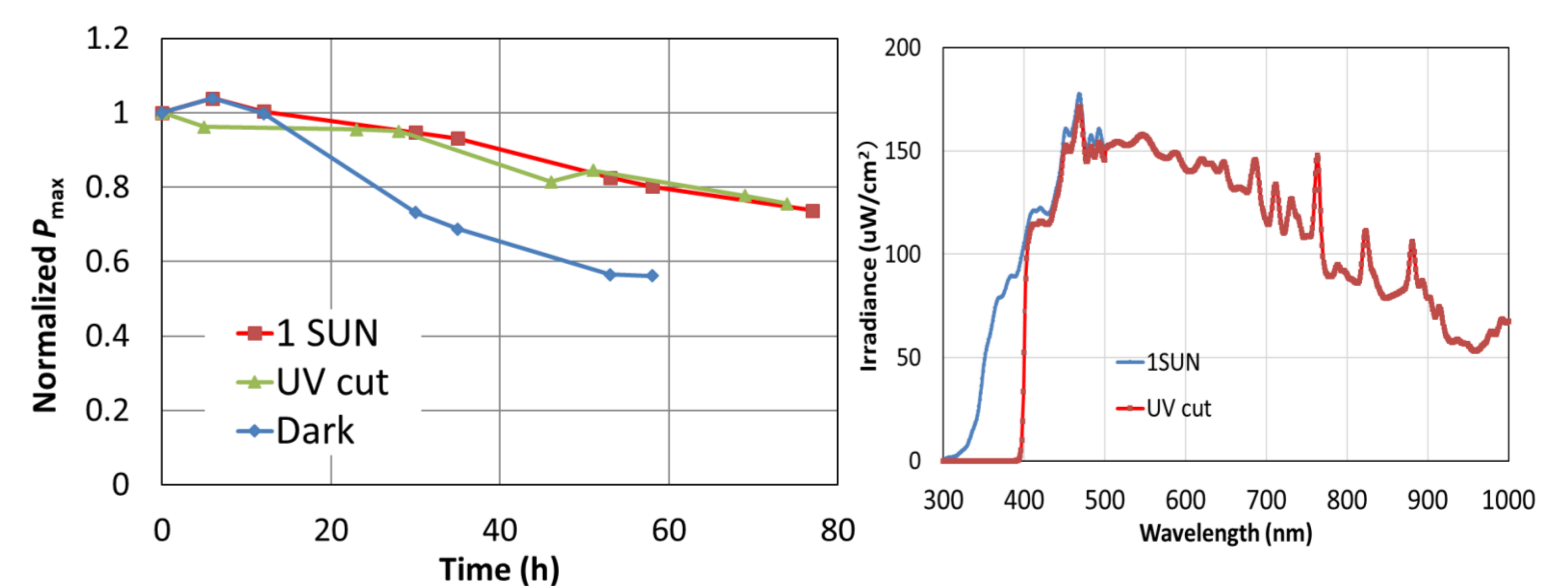
析出箇所にはCおよびNaが多い。NaはFTO膜中を移動しガラス側からFTO膜表面へ貫通したと思われる。

剥離のメカニズム



光照射効果について

- 紫外光が影響を及ぼしているのか?
→ 400 nm以下をカットした光でも抑制効果があり、必ずしも紫外光成分が必要ではない。



結論

薄膜シリコン太陽電池の剥離

- 電圧印加により劣化した箇所のみ剥離し、一度劣化すると回復後でも剥離が進行する。
- 電圧印加により目視できない剥離が起きている。水分浸入により剥離が進行し可視化する。
- 剥離箇所はガラス/FTO界面であり、Naが多く認められた。ガラス基板からのNaの移動が剥離の原因と考えられる。

電圧印加時の光照射効果

- 光照射により劣化の進行を抑えられ、剥離の進行も遅くなる。
- 紫外光を含まなくても電圧印加による劣化が抑制される。
- 光照射がなぜPIDを抑制するのは今後の検討課題。

参考文献

- [1] A. Masuda and Y. Hara, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 04CS04 (2017).
- [2] A. Masuda and Y. Hara, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 08GR13 (2018).

謝辞

本研究はNEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」の委託により実施された。

分光法による太陽電池モジュールの劣化評価

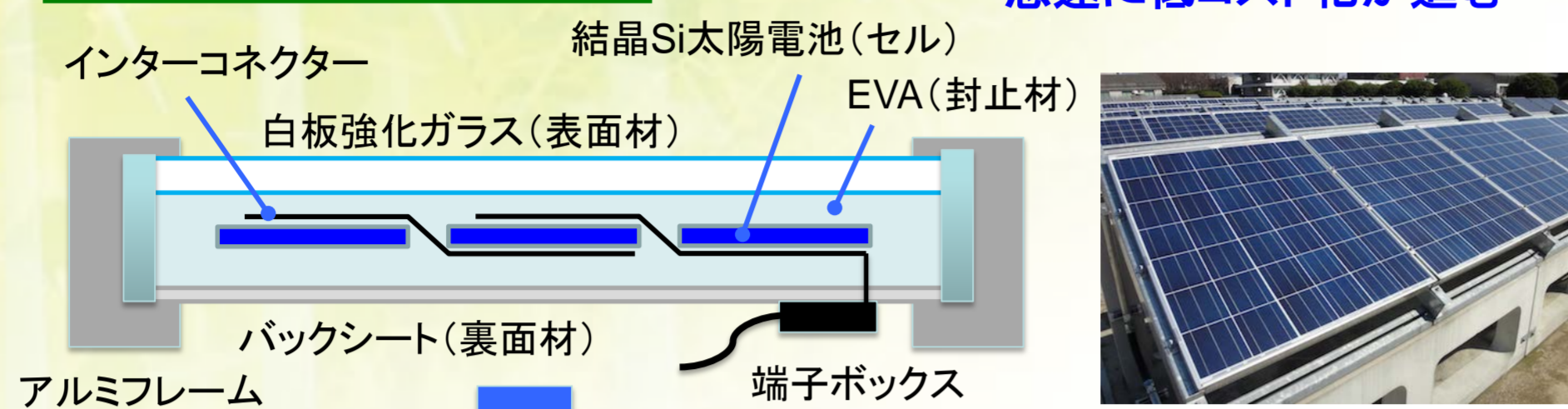
原 浩二郎・千葉 恭男

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター モジュール信頼性チーム

研究の目的

結晶Si太陽電池モジュール

急速に低コスト化が進む



- ・最近のモジュールの長期信頼性(～30年後)はどうか?
- ・さらなる高信頼性モジュールの実現へ向けて

実験

EVA封止材・起因の化学的・光化学的劣化のメカニズム分析

・評価モジュール

- ・屋外曝露モジュール(国内外5社・結晶系6種類、鳥栖・～7.5年)
- ・長期屋外曝露モジュール(国内メーカー・多結晶、鹿児島・約27年)
- ・試作の屋外曝露とDH試験モジュール(結晶系・標準型とサブストレート型)

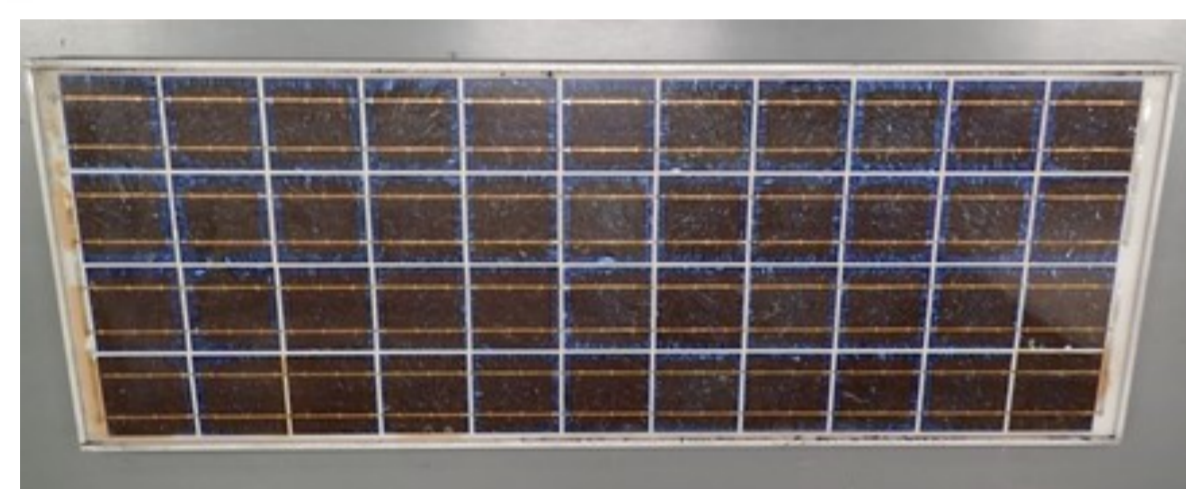
・用いた分光法、分析手法

- ・モバイルラマン分光(非破壊分析)
- ・赤外分光(ATR-FT-IR)
- ・EVA封止材中の残存酢酸量の測定 他

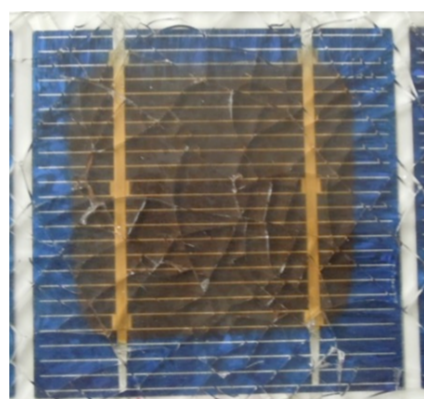


屋外曝露サイト(鳥栖)

結果と考察



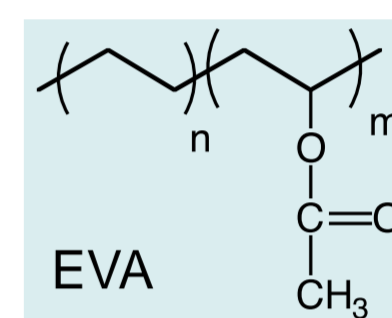
長期屋外曝露モジュール(鹿児島・約27年)



出力 = 45.9 W
(銘板値58.7 Wの78%)

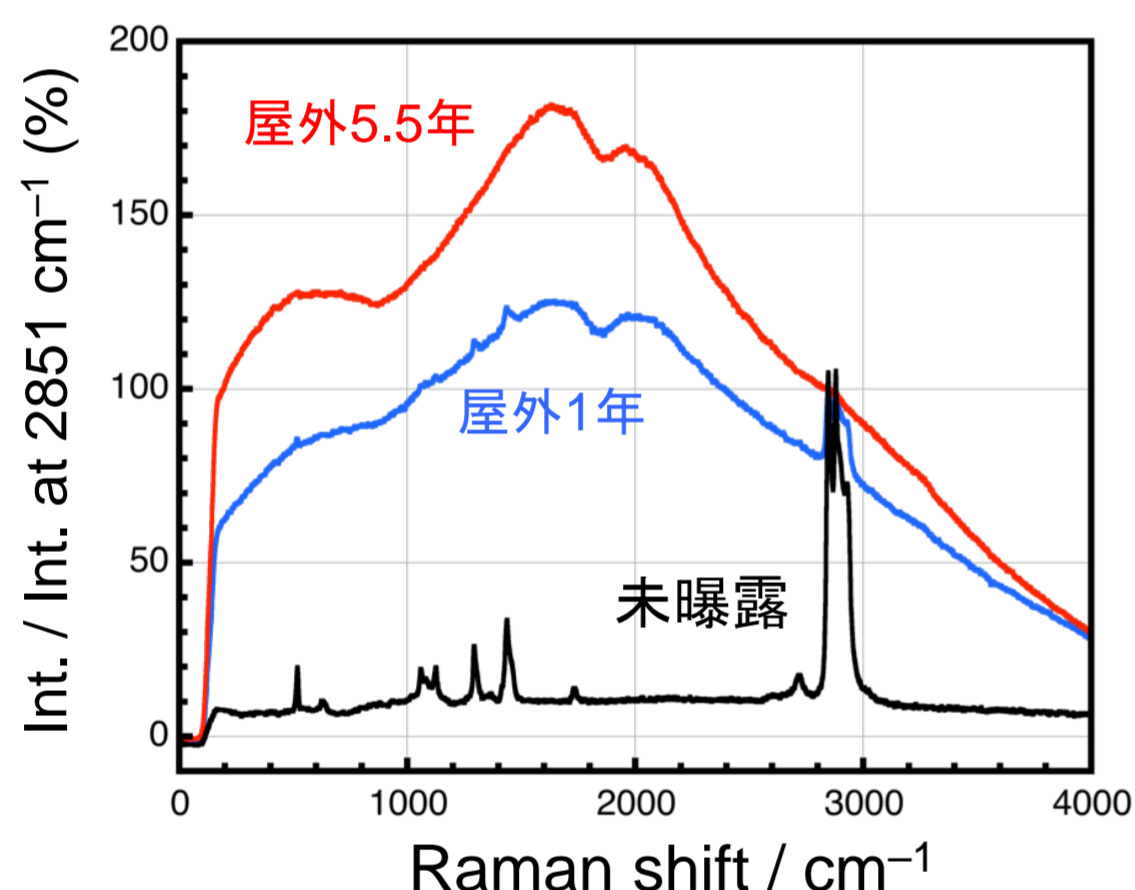
セルの中央部が黄変(周りは無色)
→ 透過率の低下により電流が低下

モバイルラマン測定装置(日清紡メカトロ製)



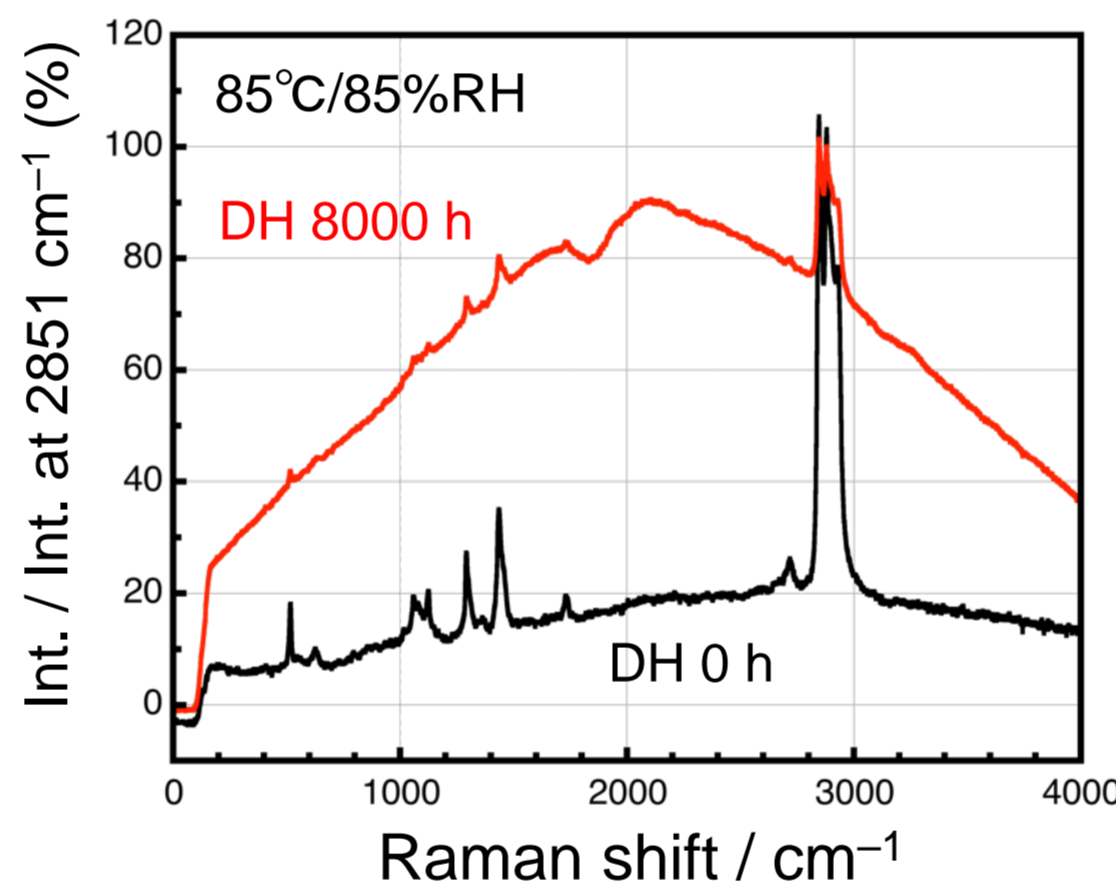
非破壊で測定
評価が可能

ラマンスペクトル・屋外曝露モジュール

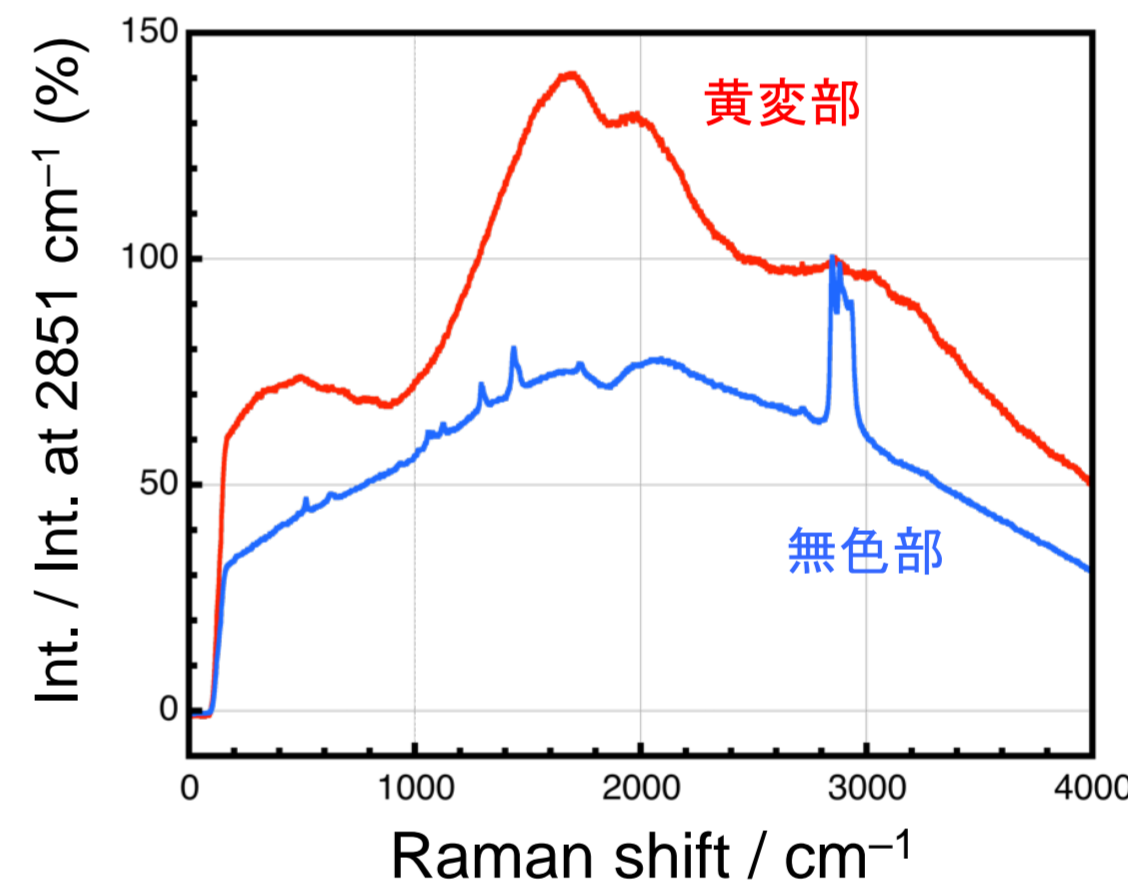


屋外曝露とDH試験によりスペクトルが変化(蛍光強度が増加)

ラマン・DH試験モジュール

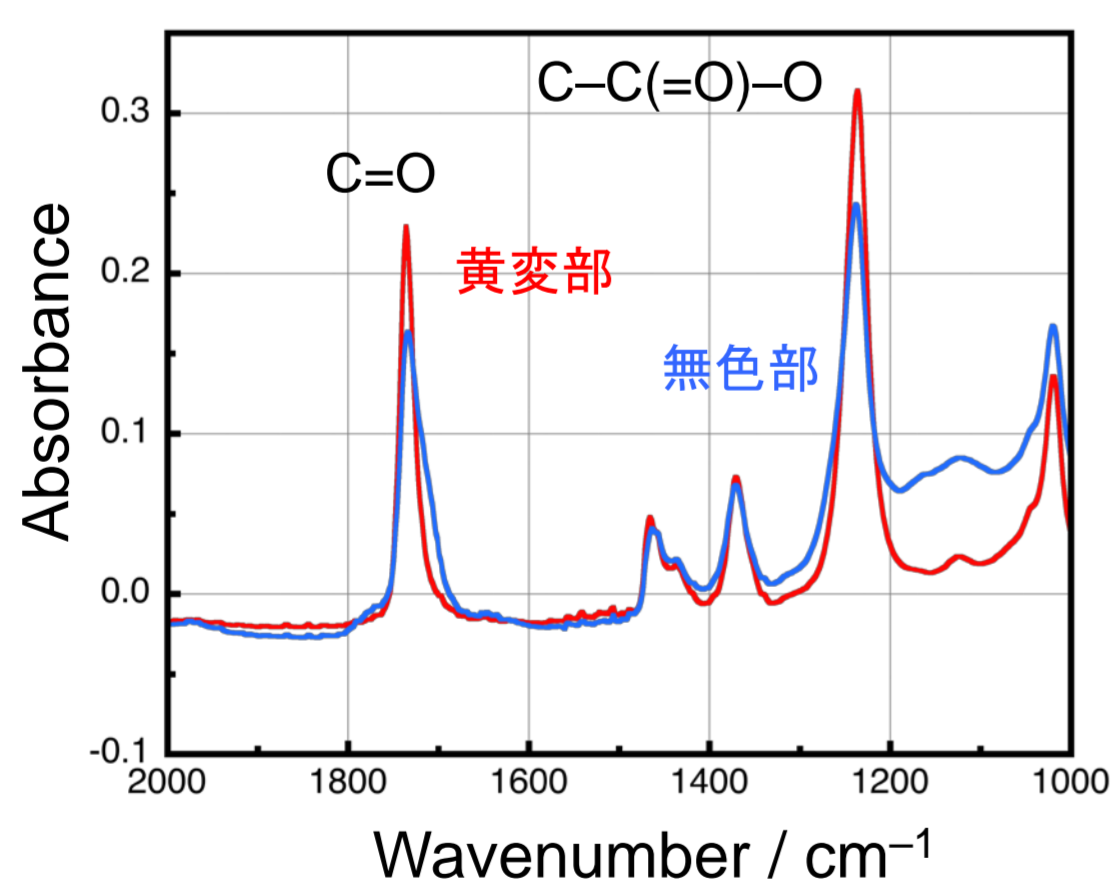


ラマン・鹿児島モジュール



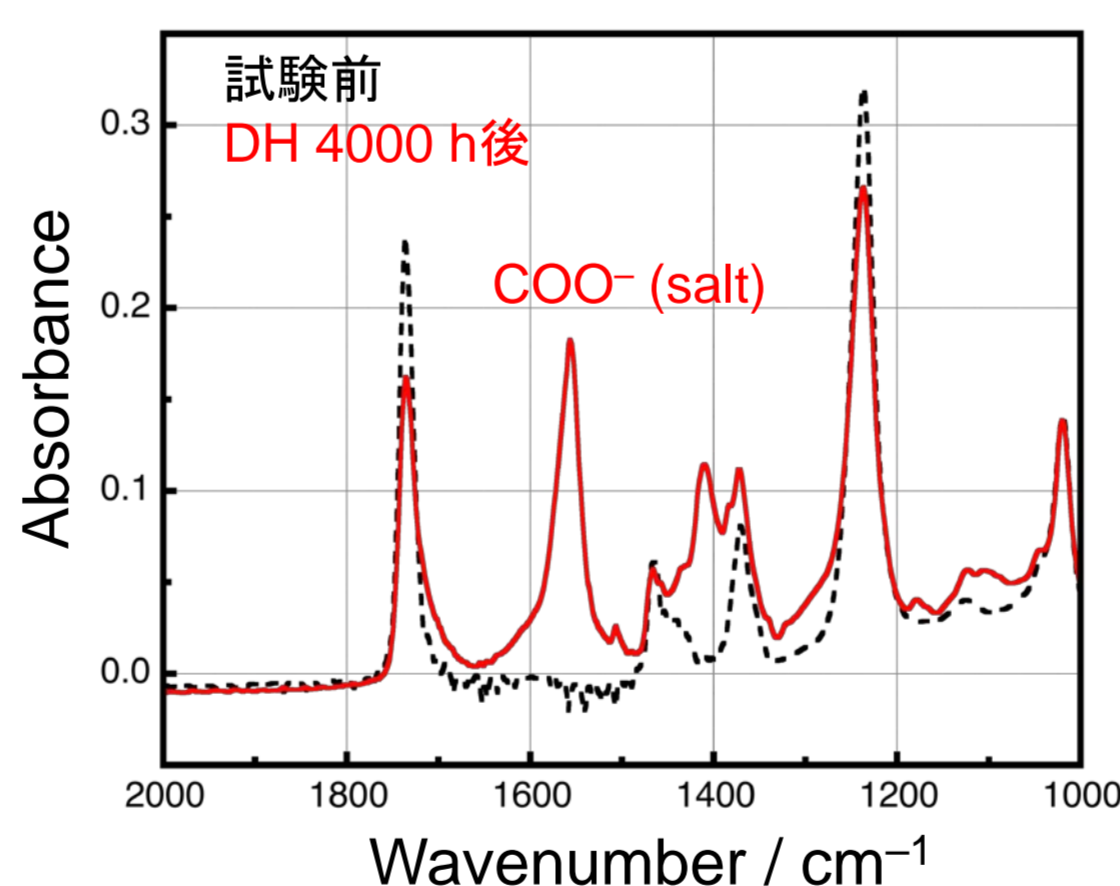
無色部 → DH型のスペクトル

FT-IR吸収スペクトル・鹿児島モジュール



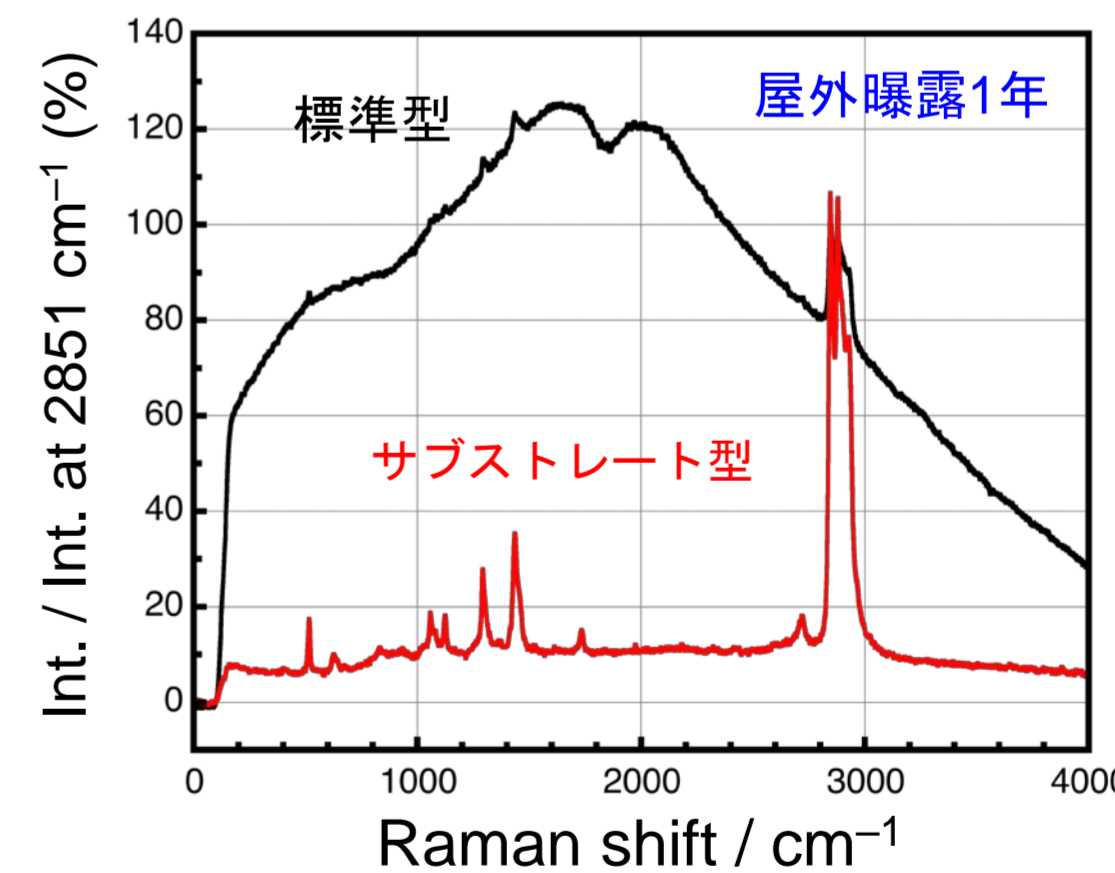
黄変部は劣化微小、無色部は劣化大

FT-IR・DH試験モジュール



DH試験で劣化(カルボン酸塩が生成)

ラマン・サブストレート型



サブストレート型 → 封止材の劣化小

まとめ

- ・モバイルラマン測定(非破壊)
 - ・封止材中の添加剤の変化を観測可能(蛍光強度の増加)
 - ・DH型スペクトル → EVAが劣化、酢酸生成の可能性あり
- ・鹿児島モジュール(→ 屋外曝露・約27年で初期値の78%)
 - ・黄変部 → EVAの劣化は小さい(添加剤が変化)
 - ・無色部 → H₂Oの影響により、EVAが劣化、酢酸が生成
- ・DH試験と高信頼性のモジュール構造
 - ・DH試験 → H₂OやガラスのNaイオン等により劣化が進行
 - ・サブストレート型 → 封止材の劣化が小さい

今後の展望

いまのモジュール(封止材)の長期信頼性はどうか?

- ・封止材の黄変(添加剤起因) → 起こりにくい?
添加剤の最適化、部材変更によりH₂O等の影響を受けやすい
- ・酢酸の生成(電極の腐食) → 起こりやすい?
- ・UV吸収剤・無添加(電流増加のため)の影響は?

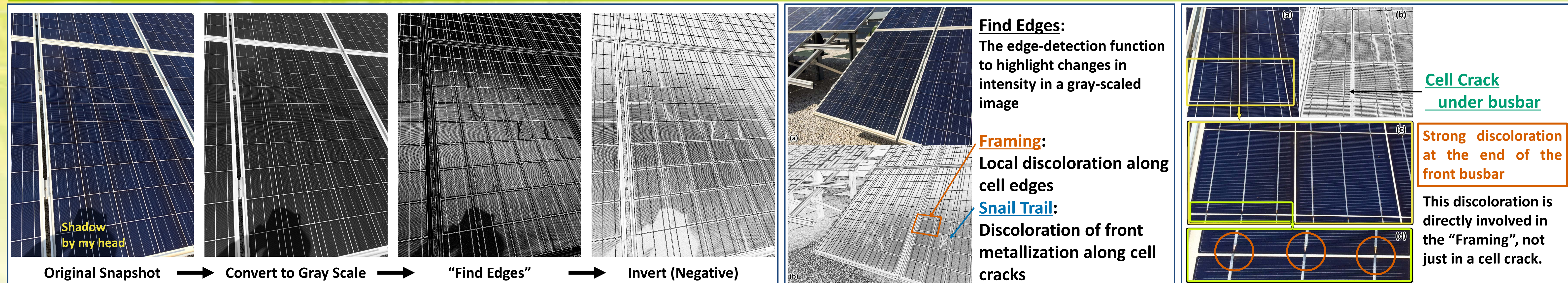
謝辞

- ・日清紡メカトロニクス株式会社 飯田 浩貴 氏、仲濱 秀齊 氏(旧所属)
- ・鹿児島県工業技術センター 吉村 幸雄 氏

連続加速試験によるフレーミング現象の再現

棚橋 紀悟¹, 櫻井 啓一郎¹, 塩田 剛史², William Gambogi³, Nancy H. Phillips³, Kaushik Roy Choudhury³, Sergiu Spataru⁴, David C. Miller⁵, Michael Kempe⁵, Michael Owen-Bellini⁵, Peter Hacke⁵
¹産業技術総合研究所, ²三井化学, ³DuPont Photovoltaic Solutions, USA, ⁴Aalborg University, Denmark, ⁵National Renewable Energy Laboratory, USA

Field Observations

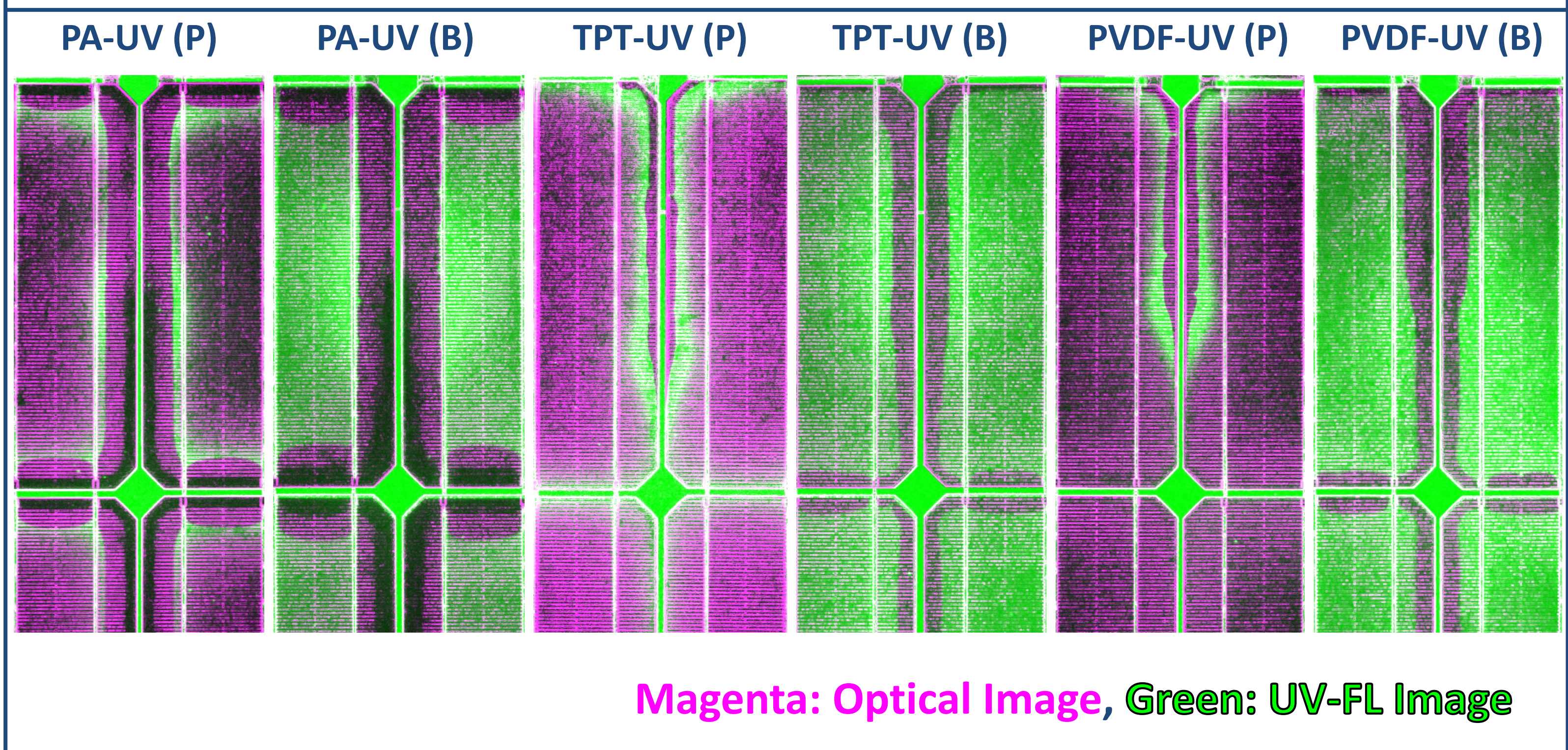


Summary

The "Framing" (local discoloration along cell edges) was induced by a simple sequential accelerated stress test (consisting of hydrothermal- and UV-stressors: **Panel 1**) applied to the PV modules with high OTR (oxygen transmission rate) backsheet, irrespective of the inclusion of UV-absorber in poly(ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) encapsulant.

UV-fluorescence (UV-FL) imaging of the PV modules suggests that the spatially-inhomogeneous degradation of EVA material under UV-irradiating conditions is correlated to this "Framing" indicating an underlying common mechanism. These findings would contribute to the development of test procedures to broadly mimic the actual failures observed in fielded PV.

Overlaid Images



Results

Panel 1: Experimental Procedures

(a) Mini-Module with PERC Cells

(b) Matrix of Material Combination

EVA Backsheet	PA	PVDF	PVF / PET / PVF
- UV absorber	PA-UV (P)	PVDF-UV (P)	TPT-UV (P)
+ UV absorber	PA-UV (B)	PVDF-UV (B)	TPT-UV (B)

(c) Sequential Testing

- DH Stress (85/85) 1000 h
- UV Stress (Xe: 70°C) UV-1
- UV Stress (Xe: 70°C) UV-2
- UV Stress: 60 kWh/m² x 2 (at 300 - 400 nm)

Panel 2: Gas/Moisture Protection

(a) Connection: "String Interconnector" to "J-Box"

(b) PVF-Sheet Position

(c) J-Box

J-Box was glued with a silicone sealant (▲), and a silicone potting agent filled the inside of the J-Box.

Panel 3: UV-induced Degradation (1)

Panel 4: UV-induced Degradation (2)

References (UV-induced degradation in p-PERC / n-PERT modules):
R. Witteck *et al.*, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **25** (6): 409–416, 2017.
R. Witteck *et al.*, *Phys. status solidi - Rapid Res. Lett.*, **11** (8): 1700178, 2017.
F. Ye *et al.*, *Sol. Energy*, **170**: 1009–1015, 2018.

Panel 5: EL Images

Panel 6: Opt. Images (PA Backsheet)

Panel 7: Opt. Images (TPT Backsheet)

Panel 8: Evolution of Framing

Panel 9: Discoloration (One End of Busbars)

Panel 10: Discoloration (One End of Busbars)

Panel 11: UV-FL Images

Panel 12: Appendix & References

References (Framing / Snail Trail / UV-FL...)

- [1] J. Berghold *et al.*, *Proc. 27th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.*, 2012, pp. 3511–3517.
- [2] S. Meyer *et al.*, *Energy Procedia*, **38**: 498–505, 2013.
- [3] N. Kim *et al.*, *Sol. Energy*, **124**: 153–162, 2016.
- [4] J. Fan *et al.*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **164**: 80–86, 2017.
- [5] I. Duerr *et al.*, *Energy Procedia*, **98**: 74–85, 2016.
- [6] J. C. Schlothauer *et al.*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **159**: 307–317, 2017.
- [7] G. C. Eder *et al.*, *Energies*, **11** (5): 1053, 2018.
- G. Oreski *et al.*, *Polym. Test.*, **60**: 374–380, 2017.

The authors wish to thank K. Ogawa, Y. Chiba, and A. Masuda (AIST) for their supports, and the volunteers on Japan team of Photovoltaic Quality Assurance Taskforce (PVQAT) for their helpful discussion. A part of this work was supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization, Japan.

複合加速試験に許容される試験費用推定

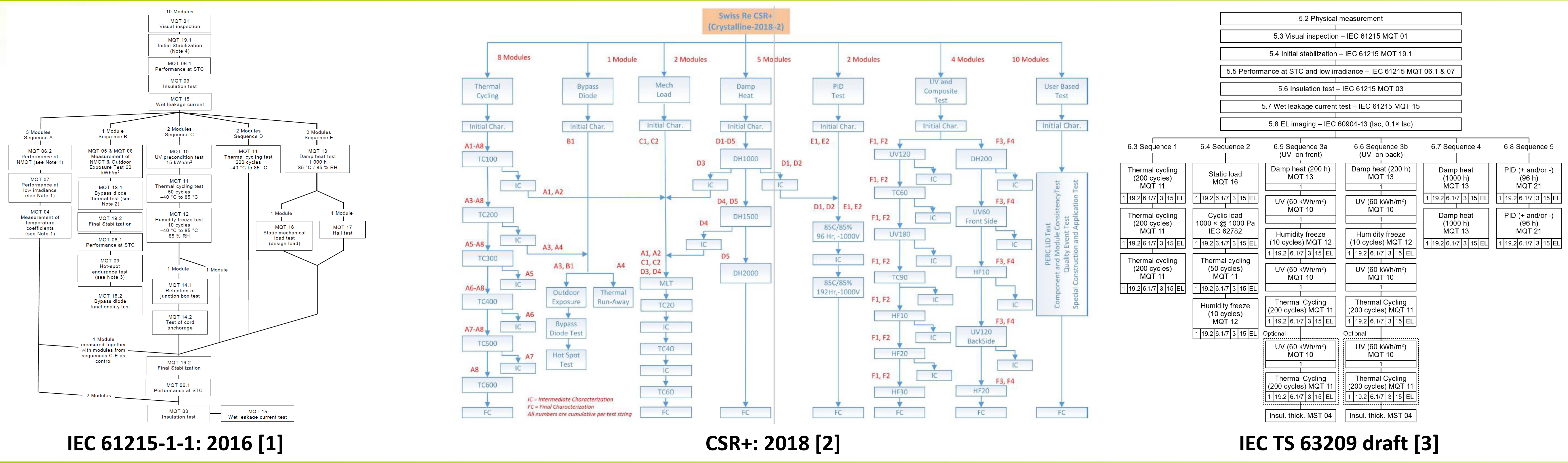
Acceptable volume of investment for "Combined Stress Testing"

棚橋 紀悟¹, Michael Woodhouse², 櫻井 啓一郎¹, Peter Hacke²
¹産業技術総合研究所、²National Renewable Energy Laboratory, USA

Summary

The combined stress tests, in which some kinds of stressors simultaneously applied to the testing PV modules, have several advantages to contribute the risk avoidance on long-term operation of PV modules in fields (find the failure modes which are a-priori unknown in new module designs, reduction of potential risk, acceleration of the time to market of a product, and so on). Through the analyses for the cost-of-ownerships in the conventional qualification test and the proposed extended stress tests for PV modules, we predict that of a combined stress test, to clarify the acceptable level of investment for this novel test system. In this study, we demonstrate that, if we could develop the test equipment with a comparable level of investment to those required in these extended stress tests, the combined stress test would be accepted by all stake-holders in PV industry sector. Furthermore, it is suggested that the market penetration of this combined stress test would be facilitated by the equipment-improvement for the multi-module testing.

Conventional Qualification Test & Proposed Extended Stress Tests



Approach & Results

The cost-of-ownerships of the existing test system (IEC 61215-1-1) and 2 proposed protocol (CSR+ and IEC TS 63209 draft) were calculated, in reference to the total cost-of-ownership guide on PV cell manufacturing [4]–[6] (Tables I, II, III).

Table I: Spread sheet to be input the price and the depreciation period of equipment required in IEC 61215-1-1

Item	Equipment Name	Quantity	Unit Price	Depreciation Period	Annual Depreciation
MOT 01	Visual inspection	1	1000	10	100
MOT 02	Initial Stabilization	1	1000	10	100
MOT 03	Performance at STC	1	1000	10	100
MOT 04	Insulation test	1	1000	10	100
MOT 05	Wet leakage current	1	1000	10	100
MOT 06	Thermal cycling	1	1000	10	100
MOT 07	Bypass Diode	1	1000	10	100
MOT 08	Mech Load	1	1000	10	100
MOT 09	Damp Heat	1	1000	10	100
MOT 10	PID Test	1	1000	10	100
MOT 11	UV and Composite Test	1	1000	10	100
MOT 12	User Based Test	1	1000	10	100

Table II: Annual cumulative tests calculation

In Case of IEC 61215-1-1

Unit Tact: 1,300 h TC 200 (6 h x 200 cycles) + Stabilization + Inspection + else

Productive Time: 8,396 h

Operation Time - Standby Time - else

Annual Turnover: 6.45 = 8,396/1,300 --- (a)

Chamber Capacity: 10 modules/chamber --- (b)

Required Module: 2 --- (c)

in IEC 61215-1-1 Seq. C, D, and E

Max Parallel Test: 5 = (b)/(c)

Safety Factor: 0.95

Practical Parallel Test: 4 (during Unit Tact) --- (d)

Ann. Cumulative Tests: 25.8 = (a) x (d) --- (e)

Unit Modules/Test: 10 --- (f)

(IEC 61215-1-1 Sample Size)

Annual Throughput: 258 = (e) x (f)

Table III: Annual cumulative tests in 3 test-protocols*

Test Protocol	61215-1-1	CSR+	63209 draft
Unit Tact (h)	1,300	3,700	3,700
Ann. Turnover	6.45	2.33	2.33
Parallel Tests	4	1	1
Ann. Cumulative Tests (Tests/Year)	25.8	2.33	2.33
Unit Modules/Test	10	32	50**
Ann. Throughput (Modules/Year)	258	74.6	116.5

* The optional tests (e.g., the user-based tests defined in CSR+) are not included.
 ** Since the major objective of IEC TS 63209 draft is the risk-data collection on the testing PV modules, we assumed that the confidence in the test results would be emphasized by a large sample size (e.g., 10 modules/sequence).

Acceptable volume of investment (AVI) for the increasing in confidence on reliability = ca. 10-times of the unit cost in the conventional qualification test

Table IV: Assumed add-on process costs by cost element

	61215-1-1	CSR+	63209 draft
1 Depreciation	319 k\$/y	26.9 %	0.83 -fold
2 Floor space	444 k\$/y	1.00 -fold	23.5 %
3 Materials/Consumables	41 k\$/y	1.00 -fold	54.9 %
4 Utilities	54 k\$/y	1.00 -fold	1.00 -fold
5 Waste Disposal	81 k\$/y	1.00 -fold	1.00 -fold
6 Labor	245 k\$/y	20.7 %	1.00 -fold
7 Cost of Yield Loss	0 k\$/y	0	0
8 Cost of Ownership	1,183 k\$/y	1,130 k\$/y	1,120 k\$/y
9 Ann. Cumulative Tests	25.8 tests/y	2.33 tests/y	2.33 test/y
10 Unit Cost (Cost / Test)	46 k\$/test	485 k\$/test	480 k\$/test

References

[1] Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1-1: Special requirements for testing of crystalline silicon photovoltaic (PV) modules. IEC 61215-1-1: 2016, 2016.

[2] J. Li and E. Hsi, Solar Panel Code of Practice International guideline on the risk management and sustainability of solar panel warranty insurance. Swiss Reinsurance, 2018.

[3] Extended-stress testing of photovoltaic modules for risk analysis. IEC TS 63209 draft.

[4] D. W. Jimenez, "Cost of ownership and overall equipment efficiency: a photovoltaics perspective," Photovoltaics International, pp. 16–22, 2009.

[5] Guide to Calculate Cost of Ownership (COO) Metrics for Semiconductor Manufacturing Equipment. SEMI E35-0618, 2017.

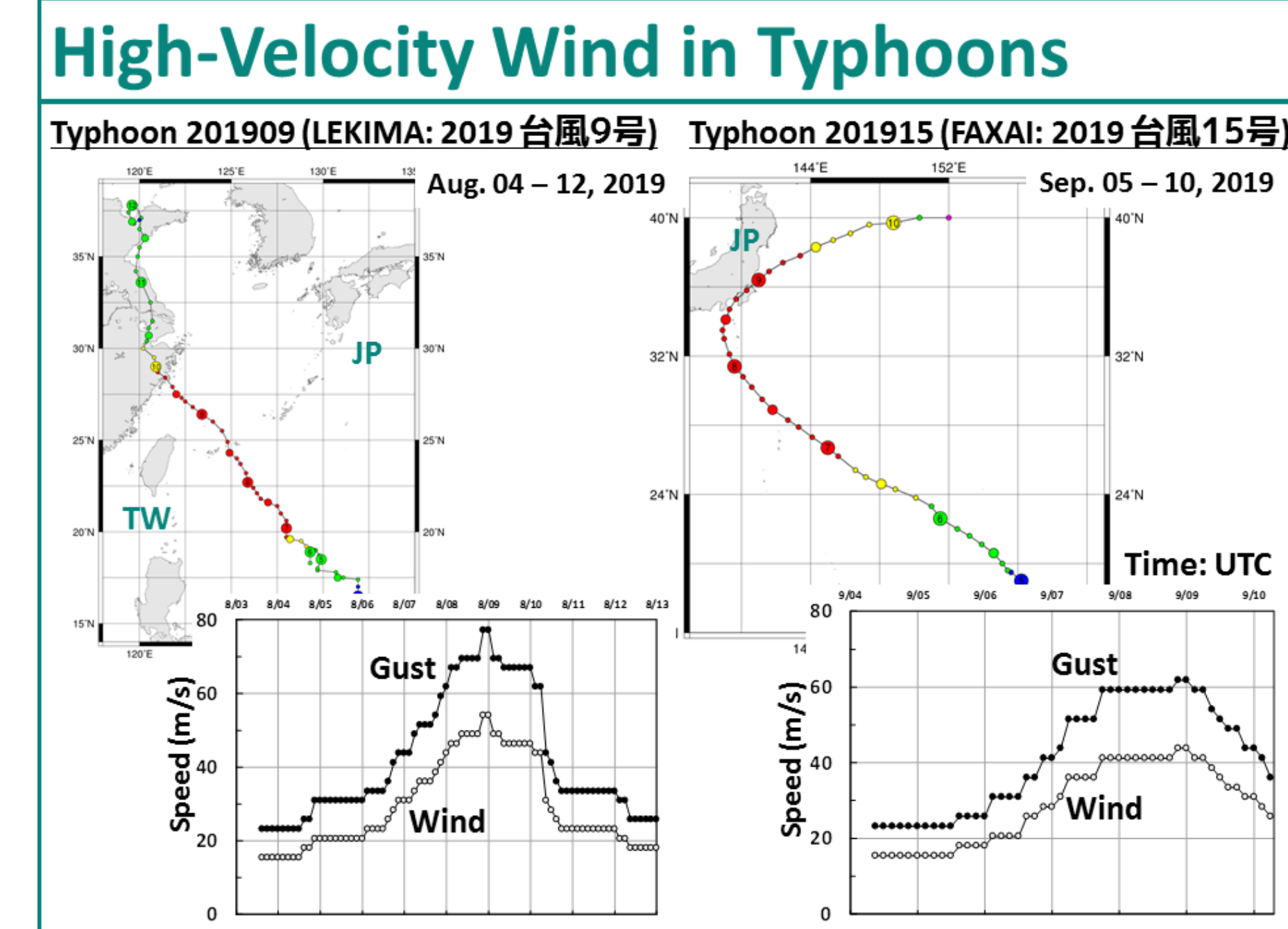
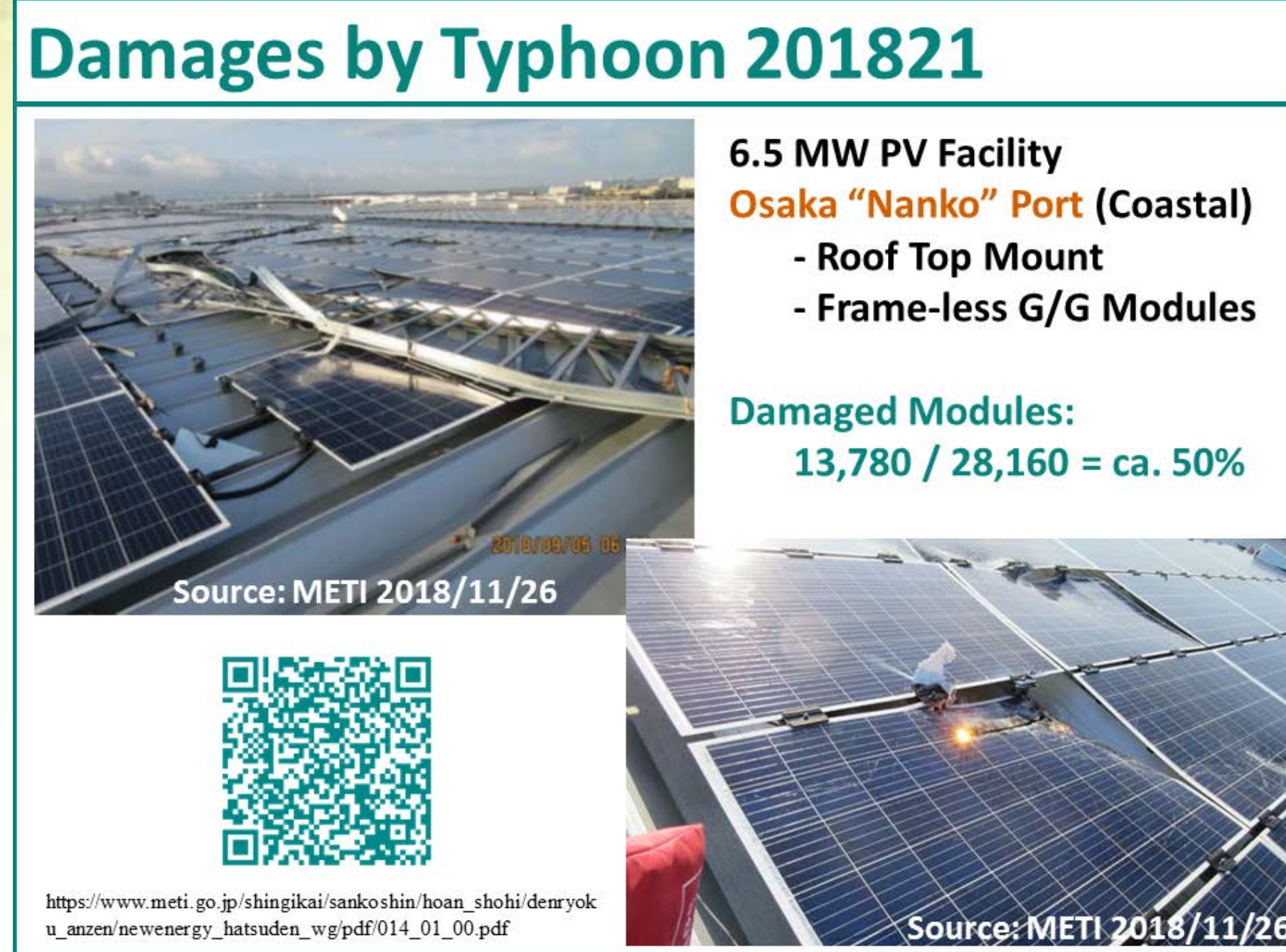
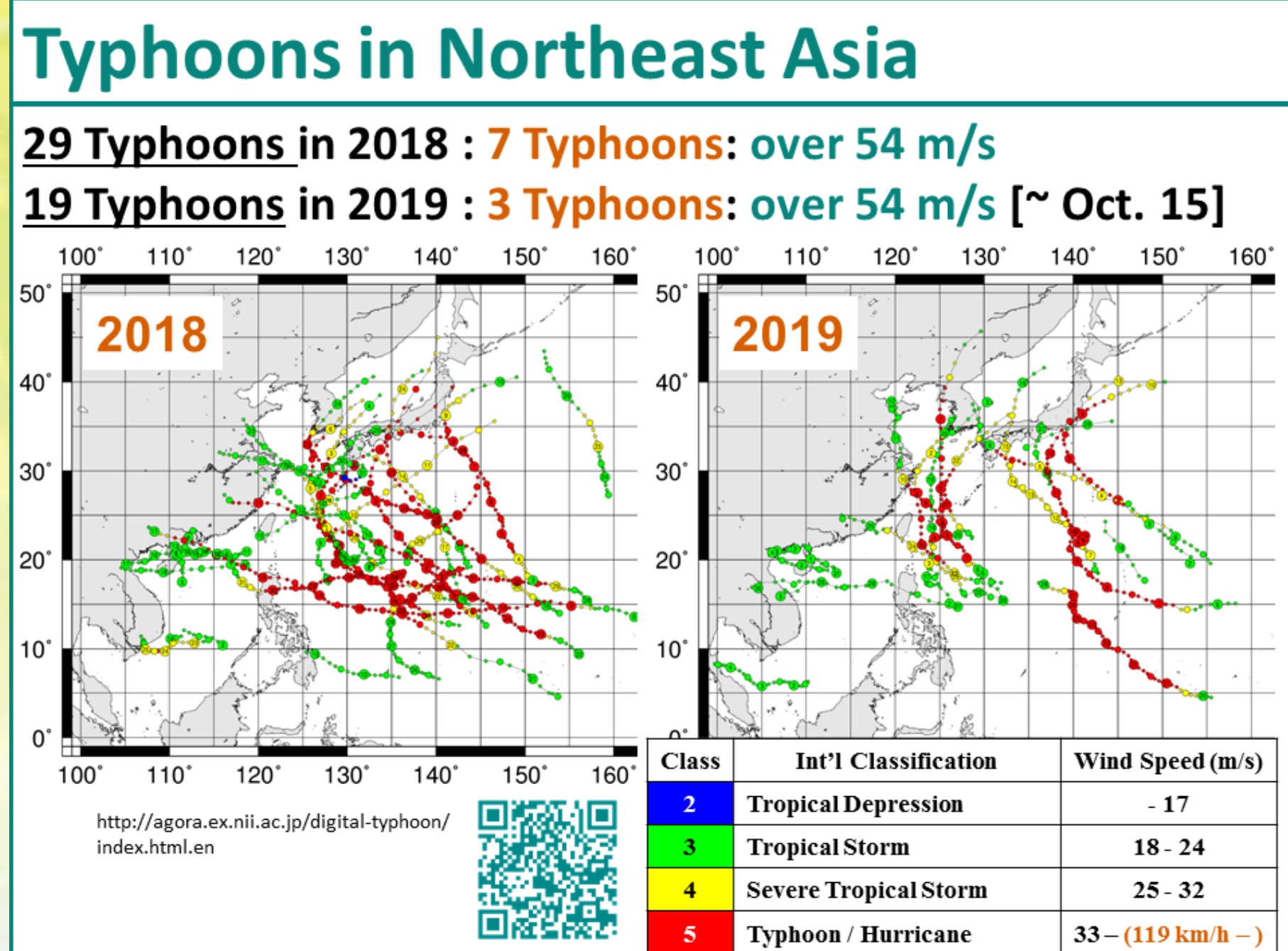
[6] SEMI and VDMA, "Calculate cost of ownership," 2014. [Online]. Available: http://www.itrpv.net/cm4all/iproc.php/SEMI_CoO_Template_20140218.xlsx?cdp=a.

不均一荷重ストレスにより生じる 太陽電池モジュール内個別セルの電気特性変化

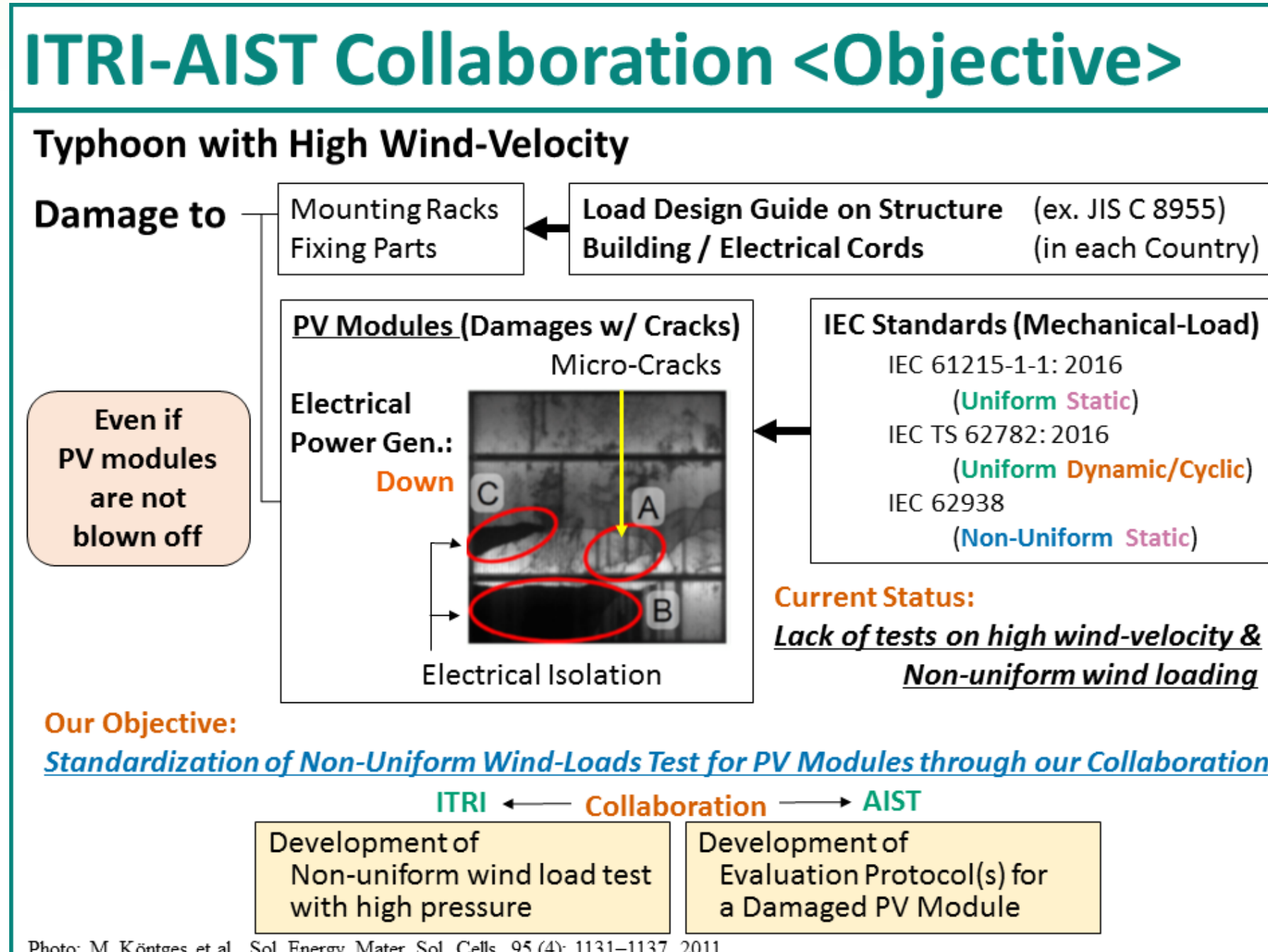
棚橋 紀悟¹、Shu-Tsung Hsu²

¹産業技術総合研究所, ²Center for Measurement Standards,
Industrial Technology Research Institute, Taiwan

Background



Objective & Summary

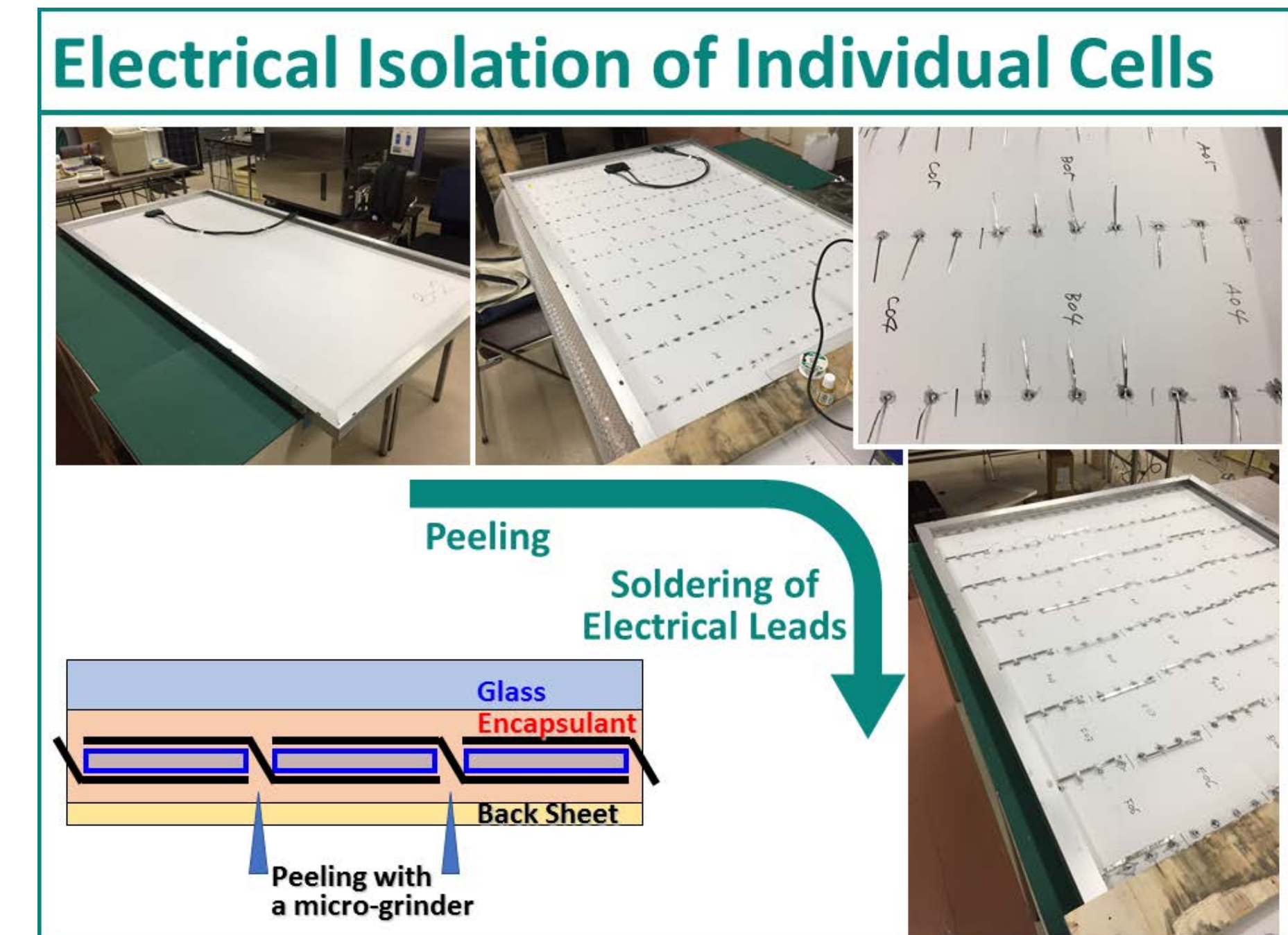
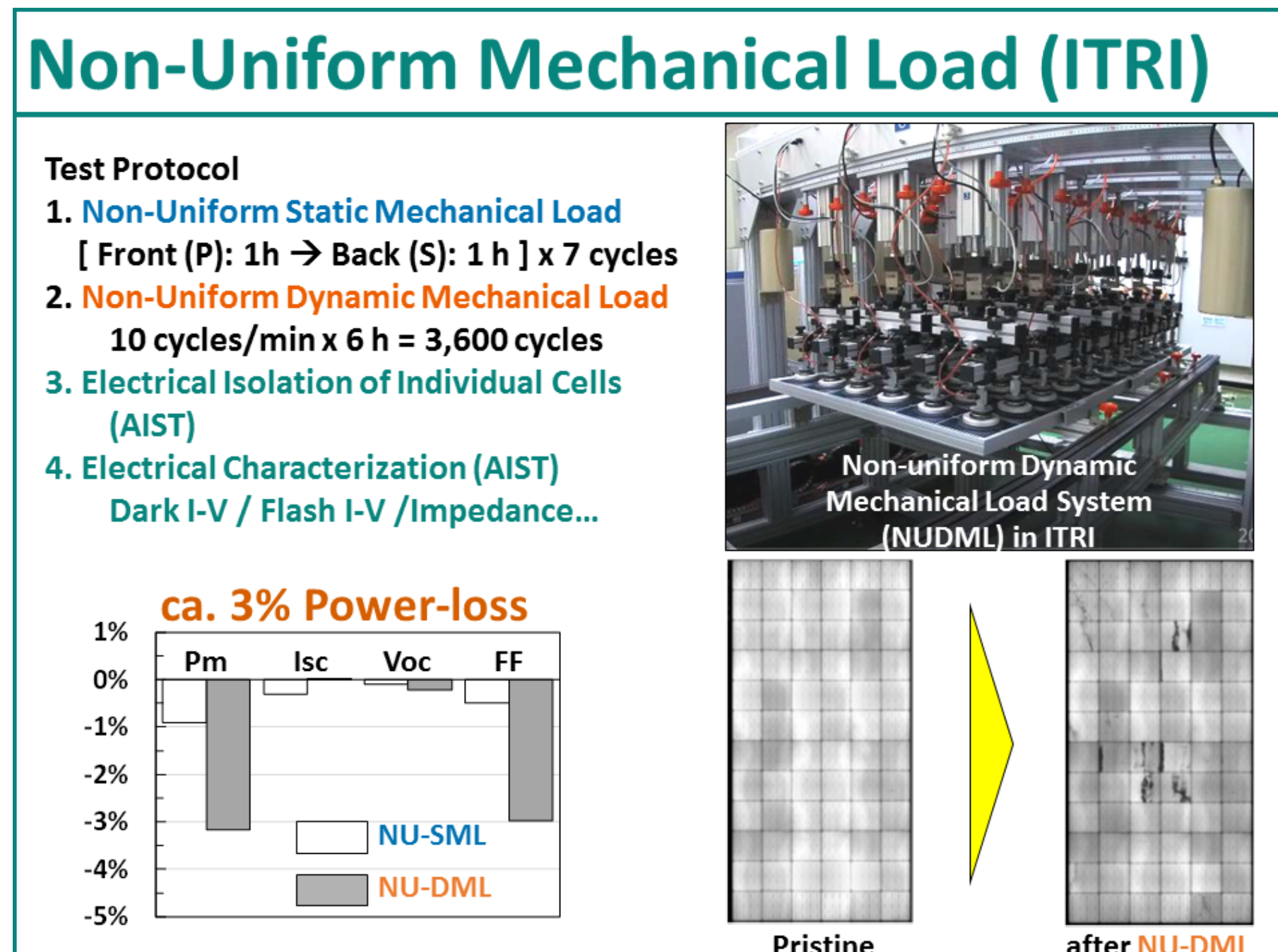
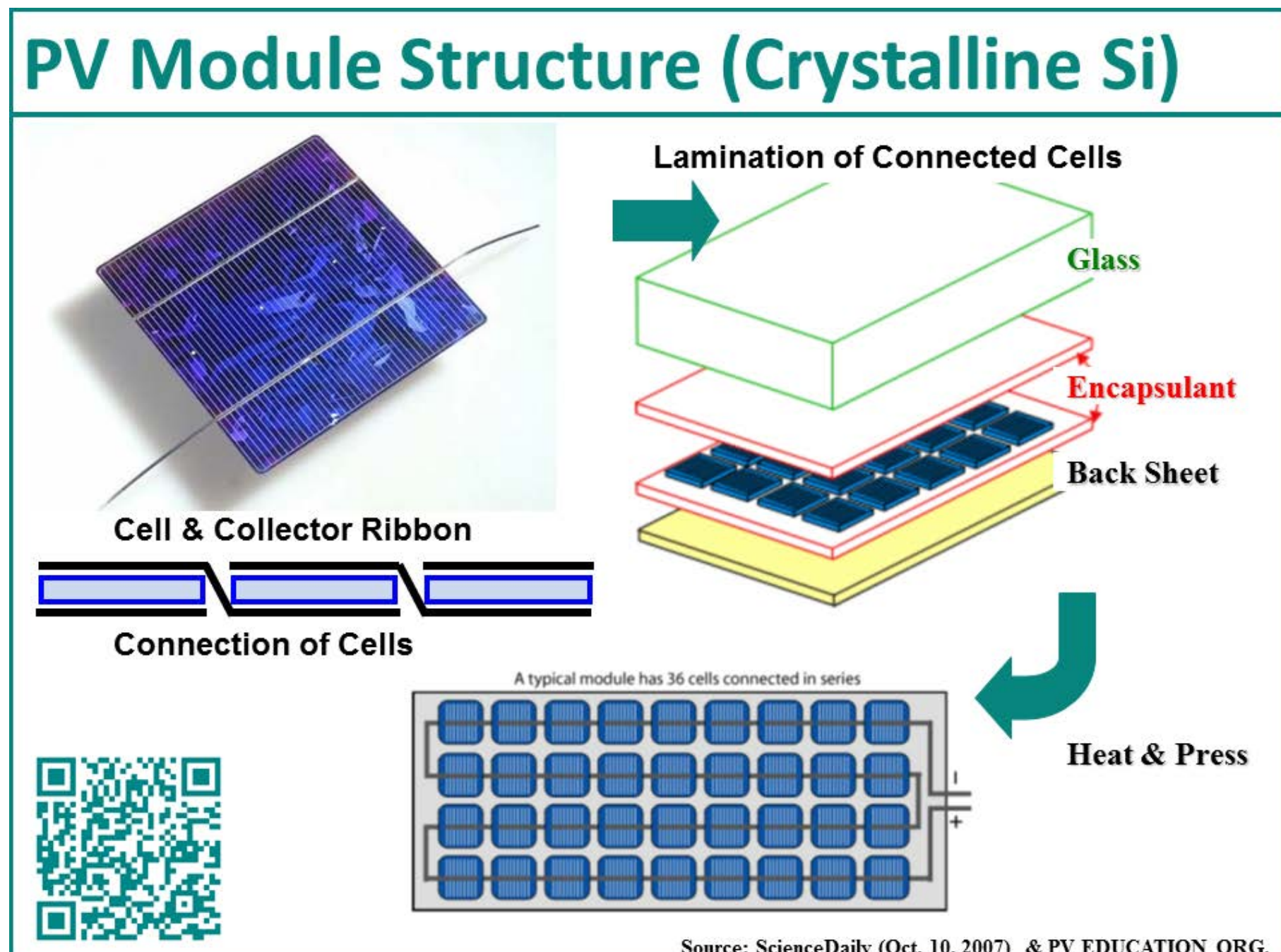


Performance degradation in the individual PV cells within a PV module with cell cracks, which are induced by non-uniform wind load test, was analyzed in AIST.

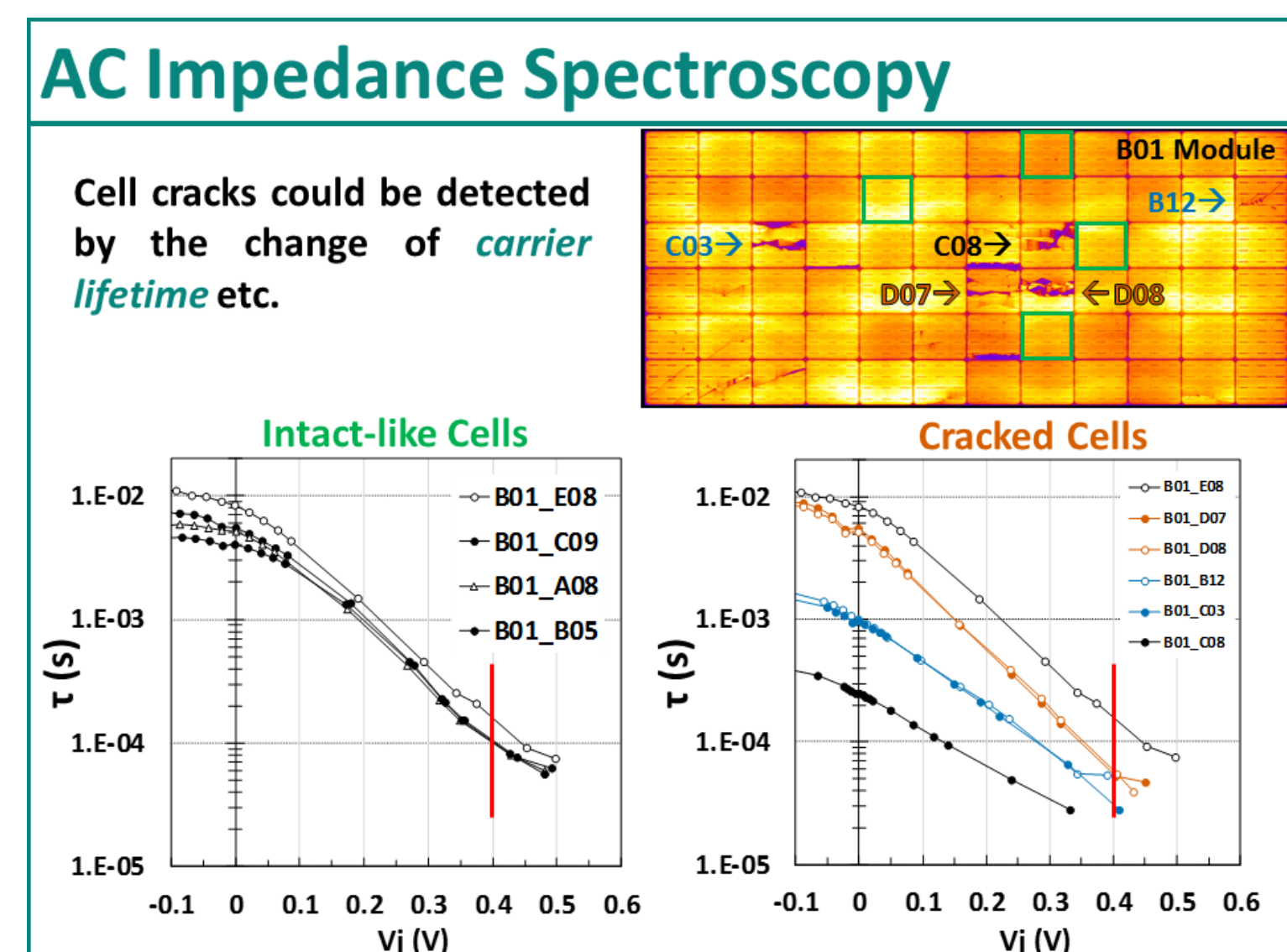
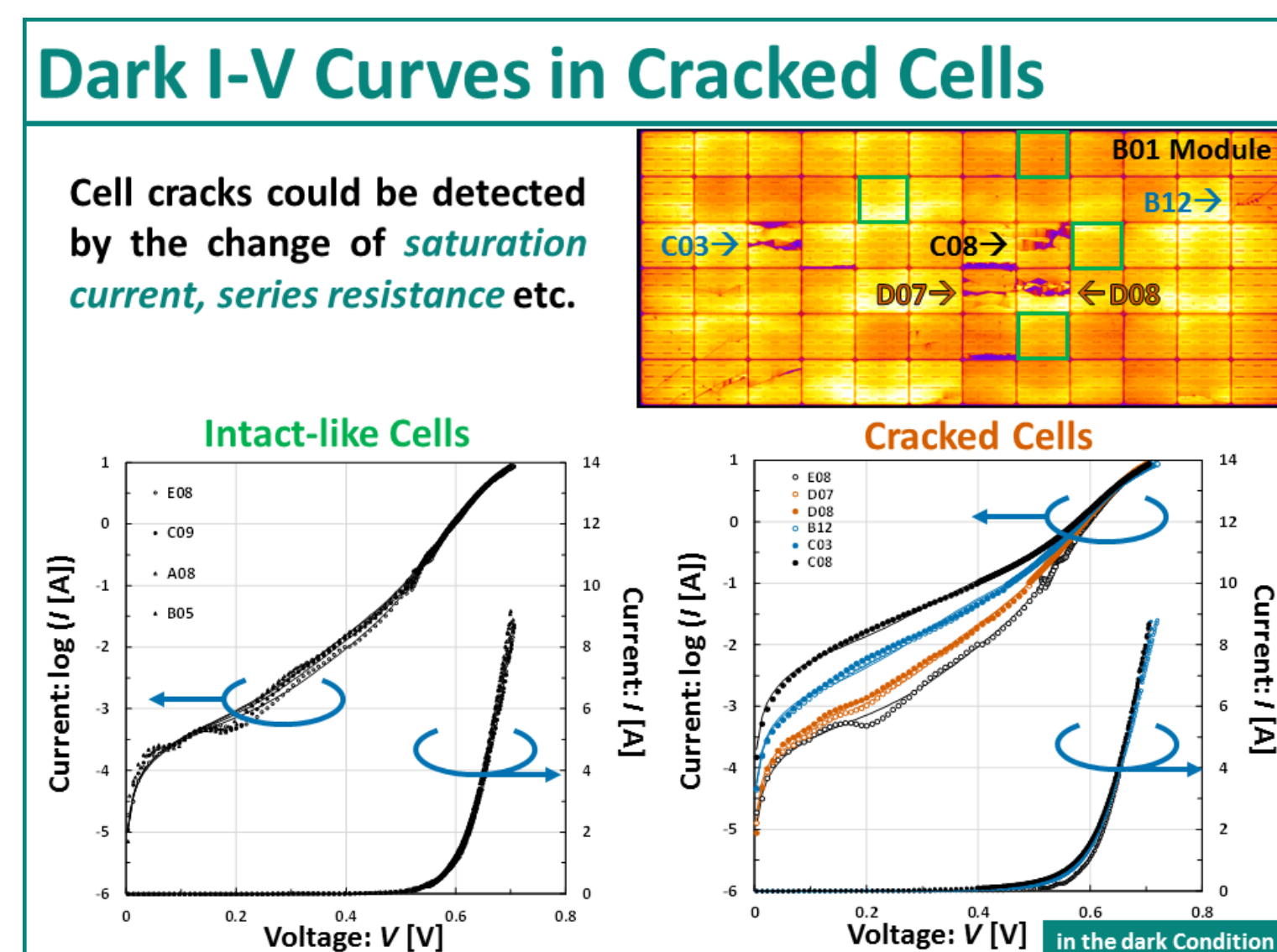
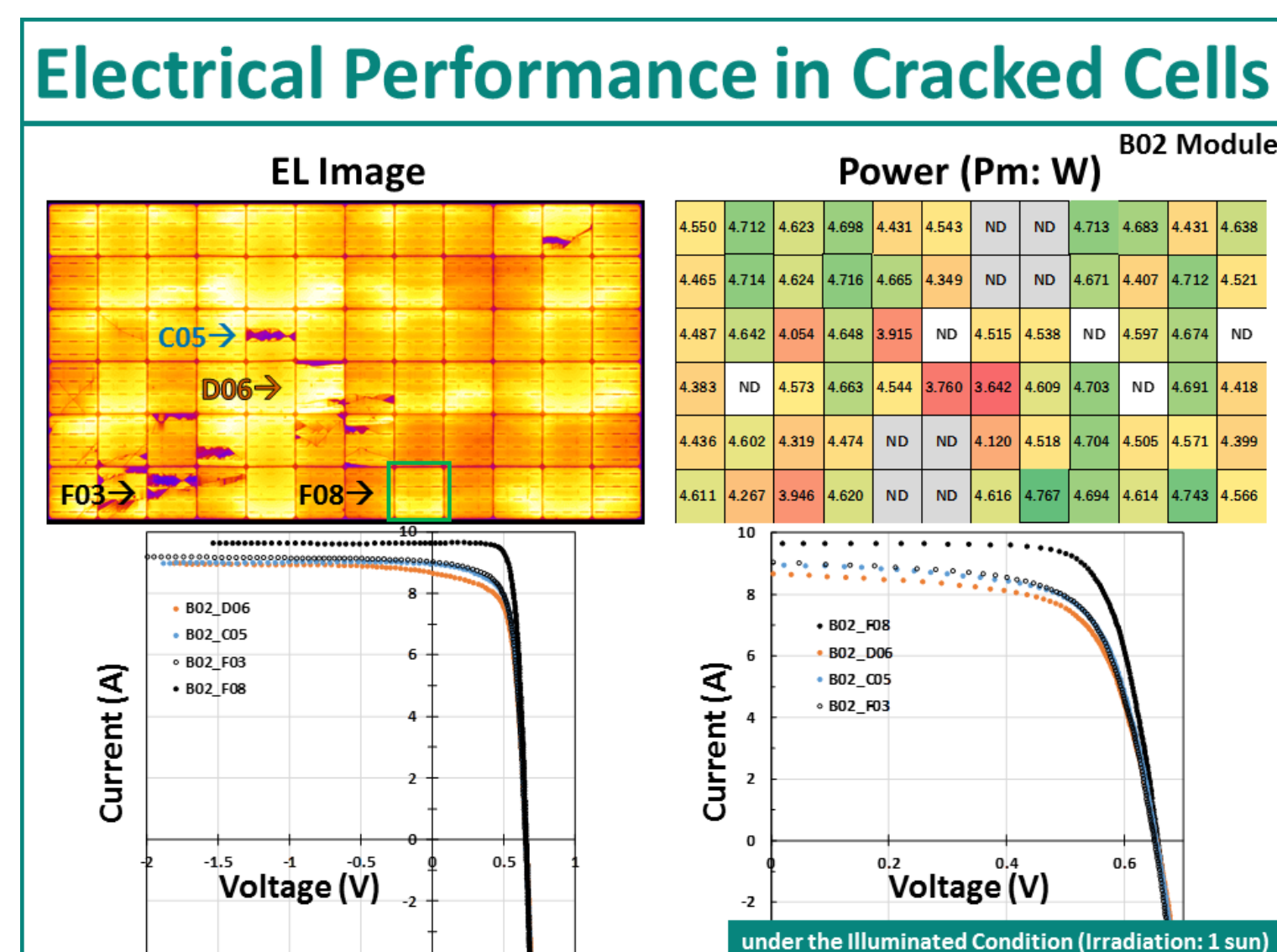
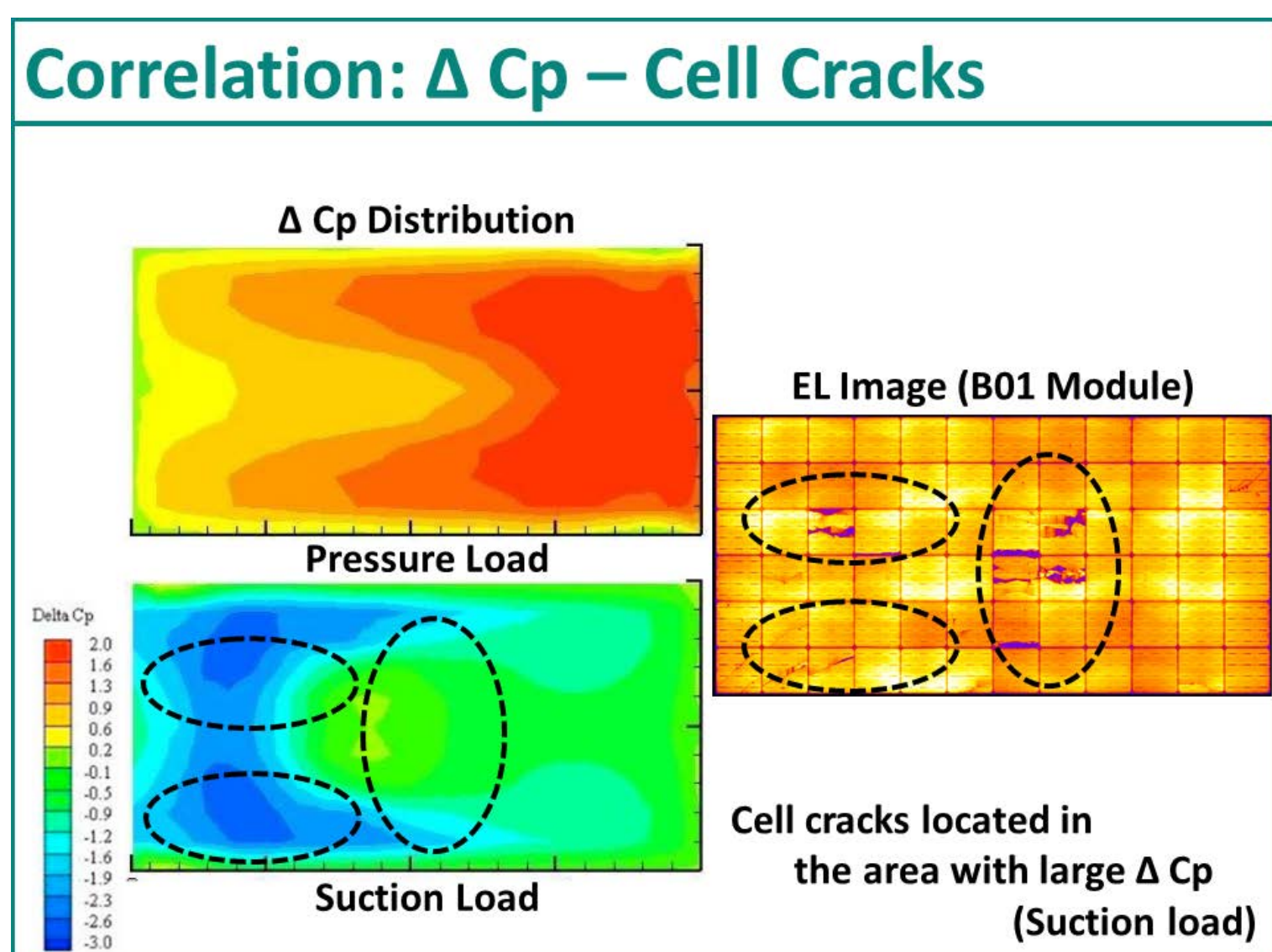
- **A crucial cause of power-loss** in the PV module with cell cracks (which are induced by NUDML) was **the damage at p-n junction** in the individual PV cells.

- The combination of our achievements will be a powerful driver to establish an **international standard (test / evaluation protocols)** for the prevention of damage due to Typhoon / Hurricane / Cyclone with high-velocity wind.

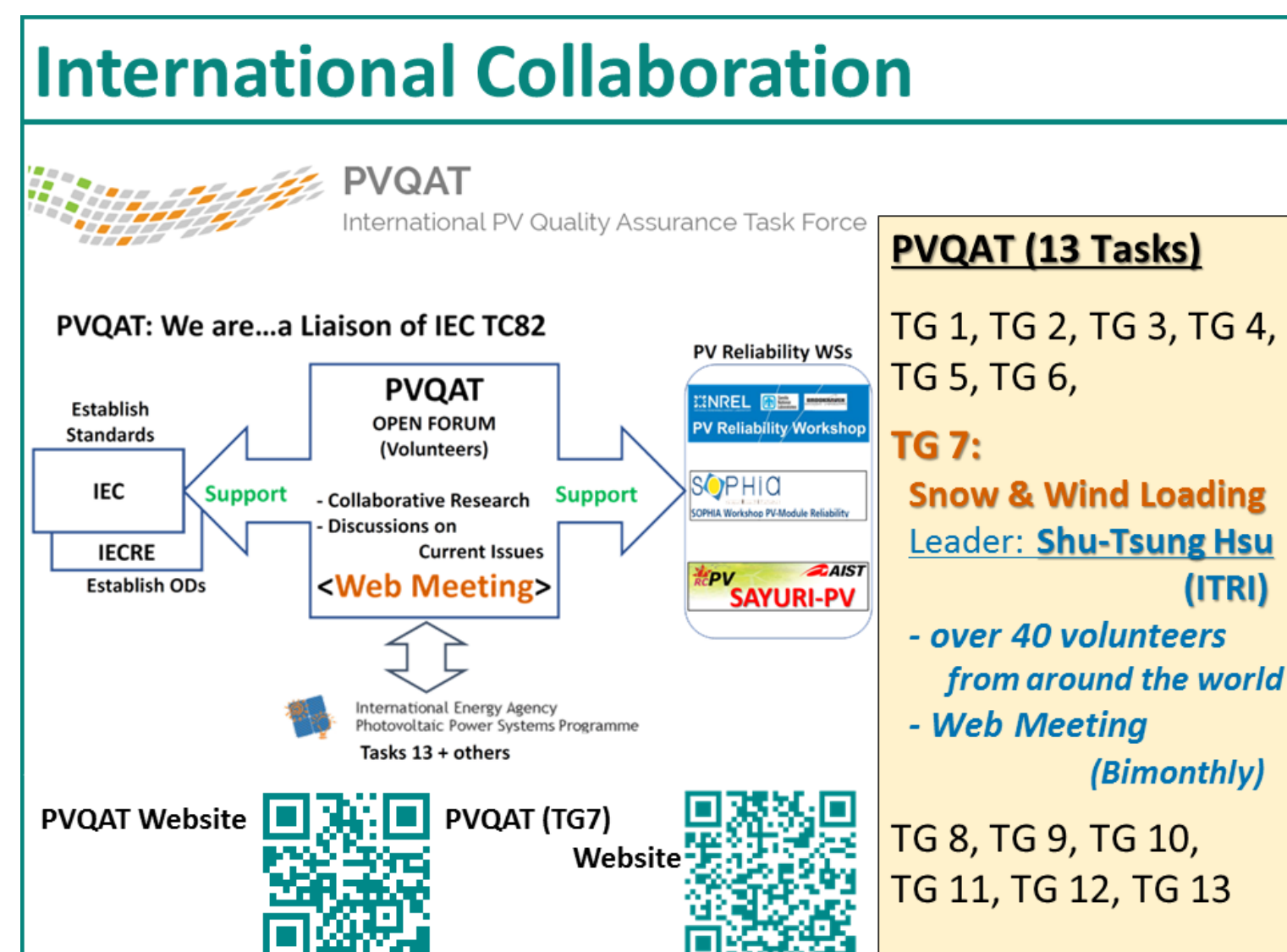
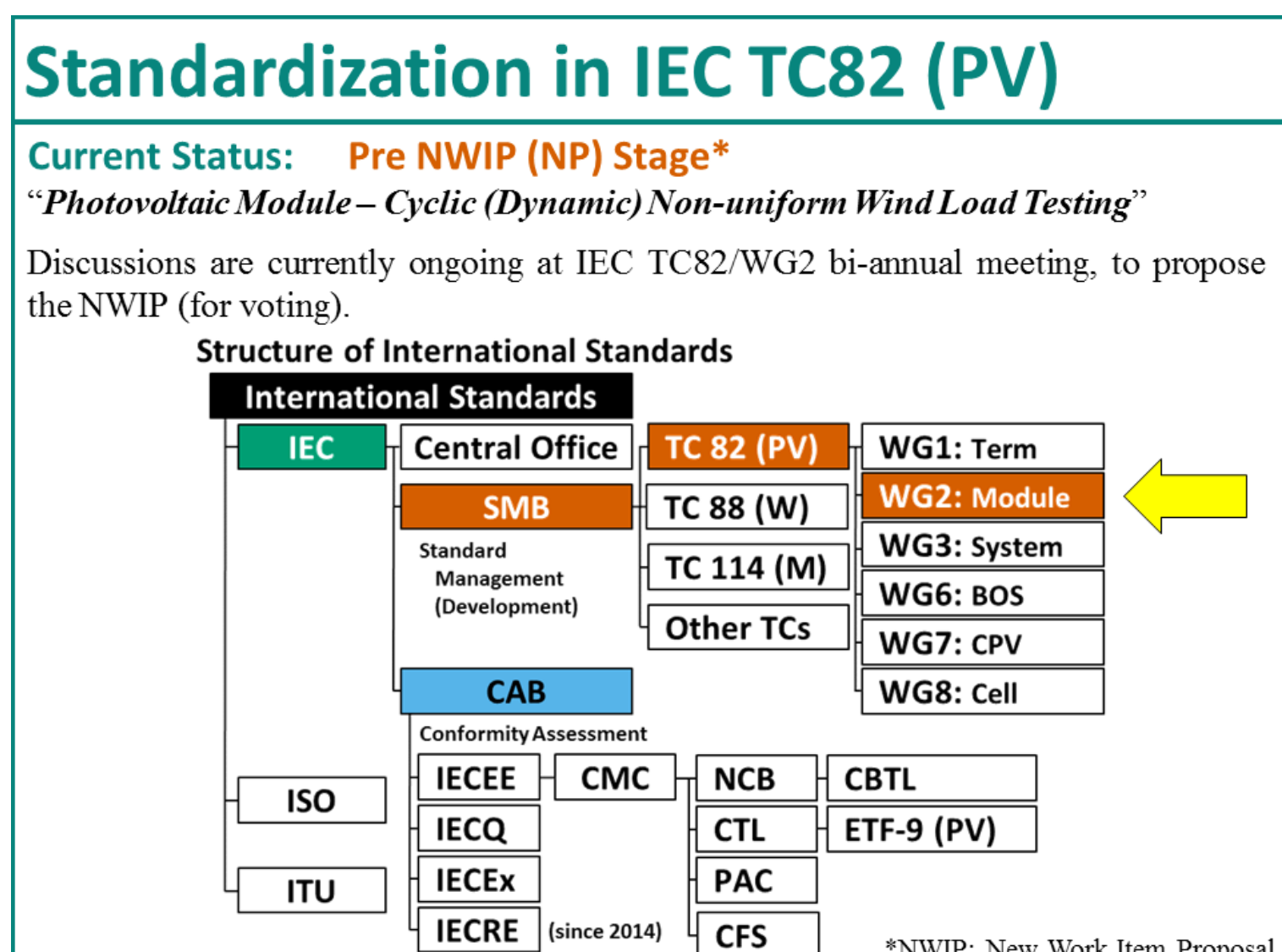
Experimental



Results



Standardization through Global Collaboration



Acknowledgements

We (Tanahashi & Hsu) wish to thank our colleagues in Research Center for Photovoltaics (AIST) and Center for Measurement Standards (ITRI) for their helpful discussions and kind supports.

tadanori.tanahashi@aist.go.jp

AndersonHsu@itri.org.tw

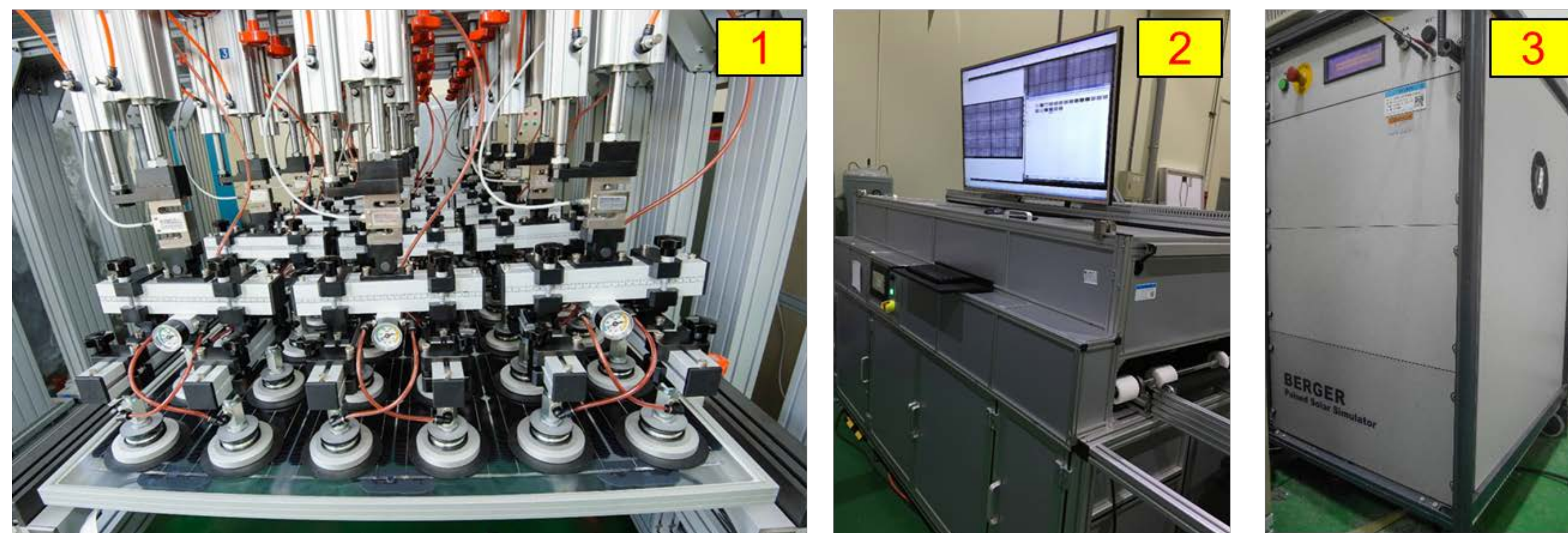
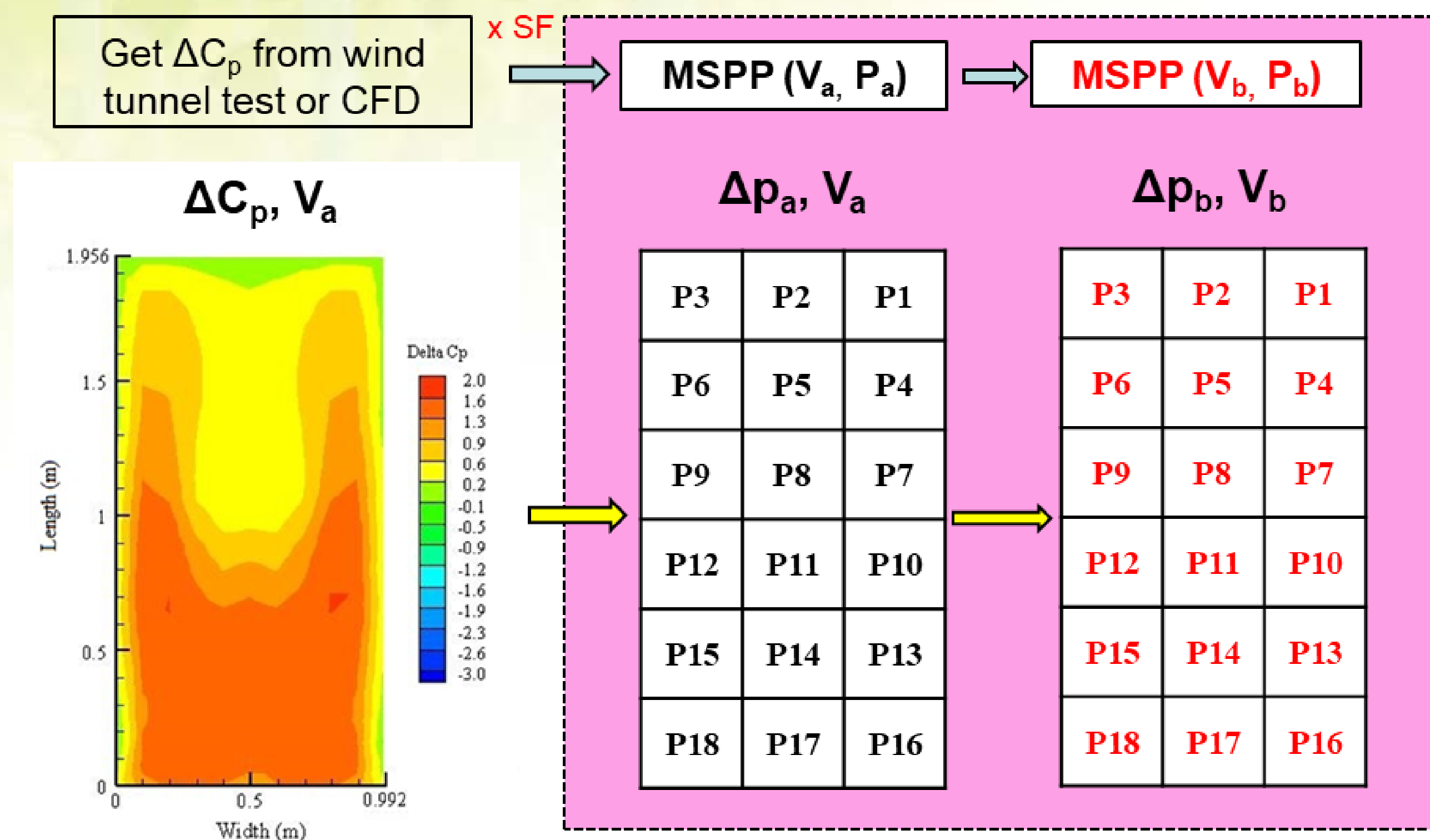


台風などにより生じる不均一荷重ストレスに関する屋内試験条件探索

Shu-Tsung Hsu¹, 棚橋 紀悟²

¹Center for Measurement Standards, Industrial Technology Research Institute, Taiwan, ²産業技術総合研究所

ABSTRACT: This work designed a non-uniform dynamic mechanical loads (NUDML) system and test data of mean surface pressure pattern (MSPP), and successfully defined one severity test on PV module that can fulfil the different wind effect and its environmental factors (e.g., wind velocity V , module tilt α , wind direction angle β). In addition, result also can evaluate the wind resistance capability of PV module and the quality of related fixed brackets (or clamps) as well, and meet the application requirements for PV system installed on land or on water.

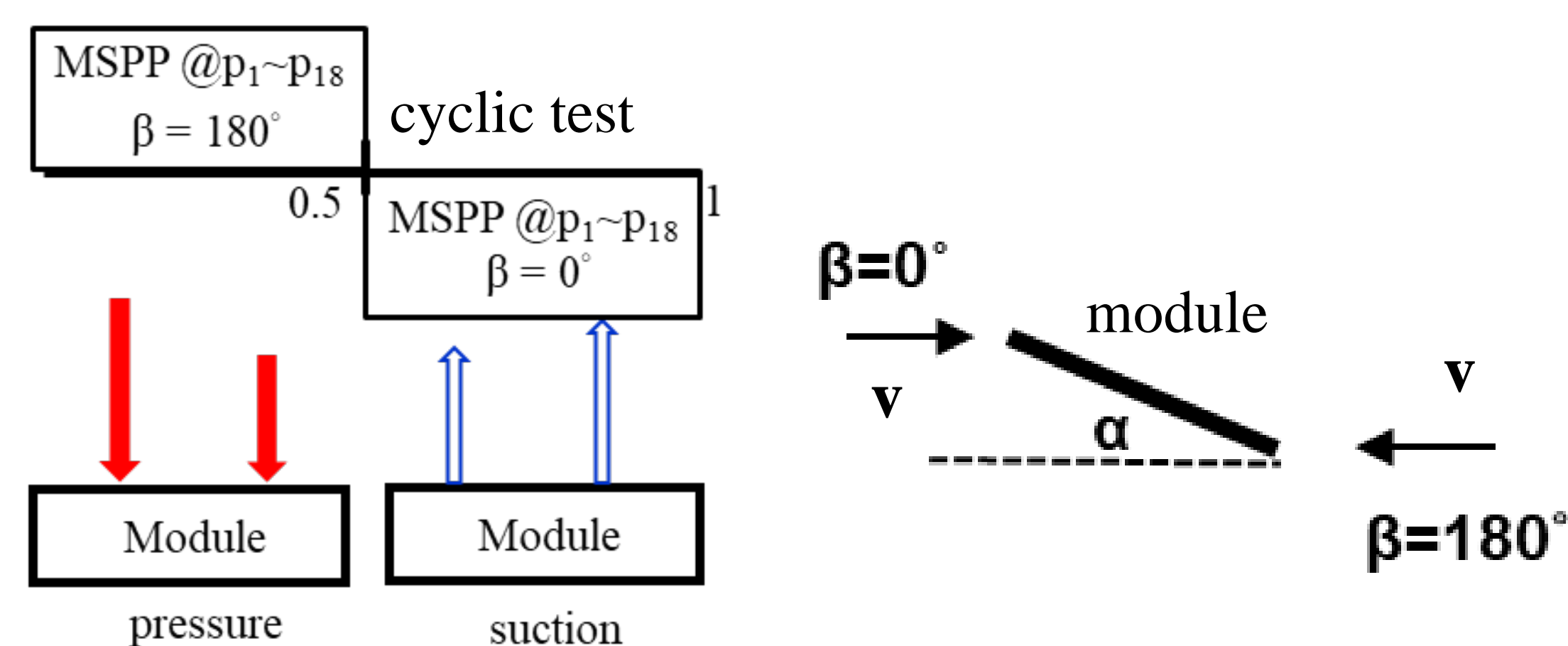


Test Flow = I-V(1)/EL(1) → NUDML test → I-V(2)/EL(2)

When the air flow field followed the independent Reynolds number and fluid similarity formula, then the pressure coefficients (C_p) will keep the same value when wind velocity is different. Then MSPP @ (p_1 - p_{18}) can be obtained by separating the Δp_b distribution on the module surface into 18 zones and averaging them, in addition, multiply by the safety factor (SF).

- 1) **NUDML test system:** owns 18 (3x6) independent loads (max. force $\pm 12,000$ Pa) and fulfils the test requirements of MSPP@ p_1 - p_{18} due to wind effect with different environmental factors (V, α, β).
- 2) **EL system:** EL Z4-PLUS contains 4 high-resolution CCD cameras in NIR technique, biased current 8 A.
- 3) **I-V system:** BERGER Pulsed Solar Simulator, STC: $1000 \text{ W/m}^2, 25^\circ \text{ C}, \text{ AM1.5G}$

I. Characteristic Steps for MSPP@ p_1 - p_{18}



2607	1479	2607
4309	2352	4309
5611	2297	5611
7802	6655	7802
7533	9649	7533
6842	9001	6842

MSPP1 (61.2 / 25 / 180)
AVE(MSPP1) = 5602 Pa

-8054	-10007	-8054
-7285	-7838	-7285
-5269	-4791	-5269
-4972	-3465	-4972
-4332	-3514	-4332
-2436	-2021	-2436

MSPP2 (61.2 / 25 / 0)
AVE(MSPP2) = -5352 Pa

3192	2514	3192
5449	4495	5449
6783	5208	6783
8312	7626	8312
9289	11450	9289
8316	11146	8316

MSPP3 (61.2 / 30 / 180)
AVE (MSPP3) = 6951 Pa

-9710	-11165	-9710
-11091	-8413	-11091
-7511	-1234	-7511
-5953	-4075	-5953
-5622	-5227	-5622
-3220	-3134	-3220

MSPP4 (61.2 / 30 / 0)
AVE (MSPP4) = -6637 Pa

II. Test Capacity and Test Flow



IV. NUDML+ MSPP3 (61.2 m/s, 30°, 180°)



V. NUDML+ MSPP4 (61.2 m/s, 30°, 0°)

III. MSPP@ p_1 - p_{18} (V, α, β)¹; unit: Pa; P⁺; S⁻

Ref. 1: S.-T. Hsu *et al.*, Environmental Factors for Non-uniform Dynamic Mechanical Load Test due to Wind Actions on Photovoltaic Modules, Energy Procedia 150, 50 (2018).

Acknowledgements: We (Hsu & Tanahashi) wish to thank our colleagues in Center for Measurement Standards (ITRI) and Research Center for Photovoltaics (AIST) for their helpful discussions and kind supports.

國際連携活動報告：IEA PVPS Task 13 Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems

°棚橋 紀悟¹, Boris Farnung², Ulrike Jahn³

¹産業技術総合研究所, ²Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Germany, ³TÜV Rheinland Energy GmbH, Germany

The International Energy Agency (IEA): Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS)

<p>The IEA PVPS</p> <p>Mission Statement</p> <p>To enhance the international collaborative efforts which facilitate the role of photovoltaic solar energy as a cornerstone in the transition to sustainable energy systems</p>	<p>The IEA PVPS Programme</p> <ul style="list-style-type: none"> The IEA Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS) is one of the Technology Collaboration Programmes established within the IEA in 1993. Global network of expertise, independent, objective, neutral 32 members: 27 countries, European Commission, SolarPower, SEPA, SEIA, Copper Alliance Activities are carried out collaboratively on a country basis along a number of technical and non-technical subjects Currently, 7 Tasks are active 	<p>IEA PVPS is</p> <ul style="list-style-type: none"> A global reference on PV for policy and industry decision makers A global network of expertise for information exchange and analysis An impartial and reliable source of information <p>All information is available at http://www.iea-pvps.org</p>	<p>IEA PVPS Tasks</p> <ul style="list-style-type: none"> Task 1 - Exchange and dissemination of information on PV power systems Task 9 - Deployment of PV technologies: co-operation with developing countries Task 12 - PV environmental, health & safety activities Task 13 - PV performance, operation and reliability Task 14 - High-penetration of PV systems in electricity grids Task 15 - Acceleration of BIPV Task 16 - Solar resource management Task 17 - PV and Transport Task 18 - Off-Grid and Edge-of-Grid Photovoltaic Systems (new)
--	---	---	---

IEA PVPS Task 13: Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems

Performance and reliability of PV modules and systems are key topics that are attracting more and more attention from various stakeholders every day. Recently, it also comes in combination with the terms of quality and sustainability. Task 13 has so far managed to create the right framework for the calculations of various parameters that can give an indication of quality of PV components and system as a whole. The framework is now there and can be used by the industry who has expressed in many ways appreciation towards the results included in the high-quality reports.

Task 13 aims at supporting market actors to improve the operation, the reliability and the quality of PV components and systems. Operational data of PV systems in different climate zones compiled within the project will allow conclusions on the reliability and on yield estimations. Furthermore, the qualification and lifetime characteristics of PV components and systems shall be analyzed, and technological trends identified.

The IEA PVPS Task 13 Structure

2018 - 2021

- Subtask 1: New Module Concepts and System Designs**
- Subtask 2: Performance of Photovoltaic Systems**
- Subtask 3: Monitoring Operation & Maintenance**
- Subtask 4: Dissemination**

<http://iea-pvps.org/index.php?id=57>

IEA PVPS Task 13 Activities (All Documents can be Freely Downloaded.)

<p>IEA PVPS Task 13 Report (1)</p> <p>Review of Failures of PV Modules</p> <p>Published in 2014</p> <p>http://iea-pvps.org/index.php?id=275</p>	<p>IEA PVPS Task 13 Report (2)</p> <p>Analytical Monitoring of Grid-Connected Photovoltaic Systems</p> <p>Published in 2014</p> <p>http://iea-pvps.org/index.php?id=276</p>	<p>IEA PVPS Task 13 Report (3)</p> <p>Characterisation of Performances of Thin-Film PV Technologies</p> <p>Published in 2014</p> <p>http://iea-pvps.org/index.php?id=277</p>	<p>IEA PVPS Task 13 Report (4)</p> <p>Analysis of Long-Term Performance of PV Systems</p> <p>Published in 2015</p> <p>http://iea-pvps.org/index.php?id=305</p>
<p>IEA PVPS Task 13 Report (5)</p> <p>PV Performance Modeling Methods and Practices</p> <p>Published in 2017</p> <p>http://iea-pvps.org/index.php?id=423</p>	<p>IEA PVPS Task 13 Report (6)</p> <p>Technical Assumptions Used in PV Financial Models - Review of Current Practices and Recommendations</p> <p>Published in 2017</p> <p>http://iea-pvps.org/index.php?id=426</p>	<p>IEA PVPS Task 13 Report (7)</p> <p>Improving Efficiency of PV Systems Using Statistical Performance Monitoring</p> <p>Published in 2017</p> <p>http://iea-pvps.org/index.php?id=427</p>	<p>IEA PVPS Task 13 Report (8)</p> <p>Assessment of Photovoltaic Module Failures in the Field</p> <p>Published in 2017</p> <p>http://iea-pvps.org/index.php?id=435</p>
<p>IEA PVPS Task 13 Report (9)</p> <p>Uncertainties in PV System Yield Predictions and Assessments</p> <p>Published in 2018</p> <p>http://iea-pvps.org/index.php?id=477</p>	<p>IEA PVPS Task 13 Report (10)</p> <p>Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications</p> <p>Published in 2018</p> <p>http://iea-pvps.org/index.php?id=480</p>	<p>IEA PVPS Task 13 Report (11)</p> <p>Photovoltaic Module Energy Yield Measurements: Existing Approaches and Best Practice</p> <p>Published in 2018</p> <p>http://iea-pvps.org/index.php?id=493</p>	<p>IEA PVPS Publications</p> <p>PVPS Annual Reports</p> <p>http://www.iea-pvps.org/index.php?id=3</p> <p>Reports from All Tasks</p>

A part of this work was supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization, Japan.

太陽電池モジュールの温度変化による不具合の顕在化と潜在化

高島 工・池田 一昭

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター システムチーム

研究の背景と目的

背景

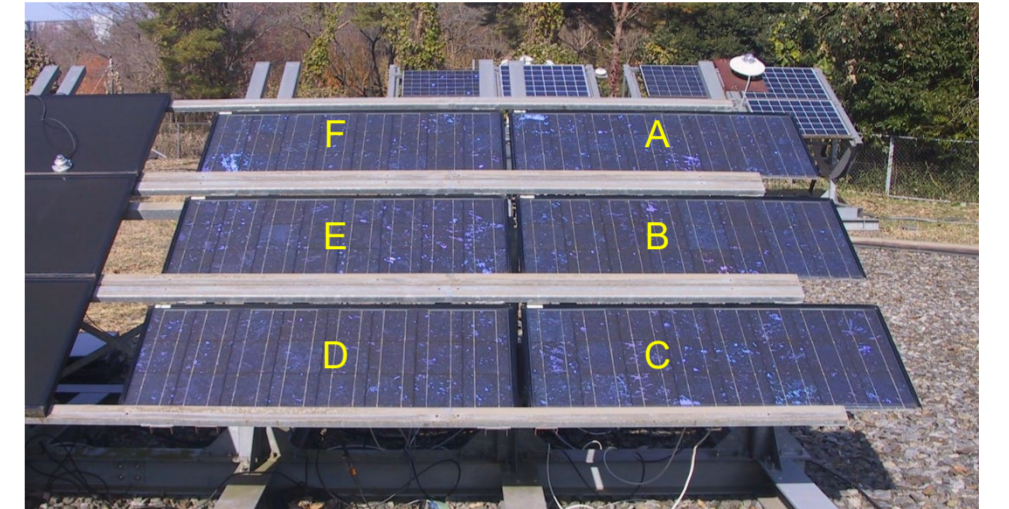
- PVモジュールの健全性評価: 室内測定ベース
 - 室内測定は出力性能評価の最適な手法
- 室内測定で不具合症状が再現しない事例あり
 - 不具合検出(健全性評価)に必ずしも適さない

目的

- オンサイト測定が健全性評価に合理的かつ有用であることを、不具合発症PVモジュールの屋外測定により実証

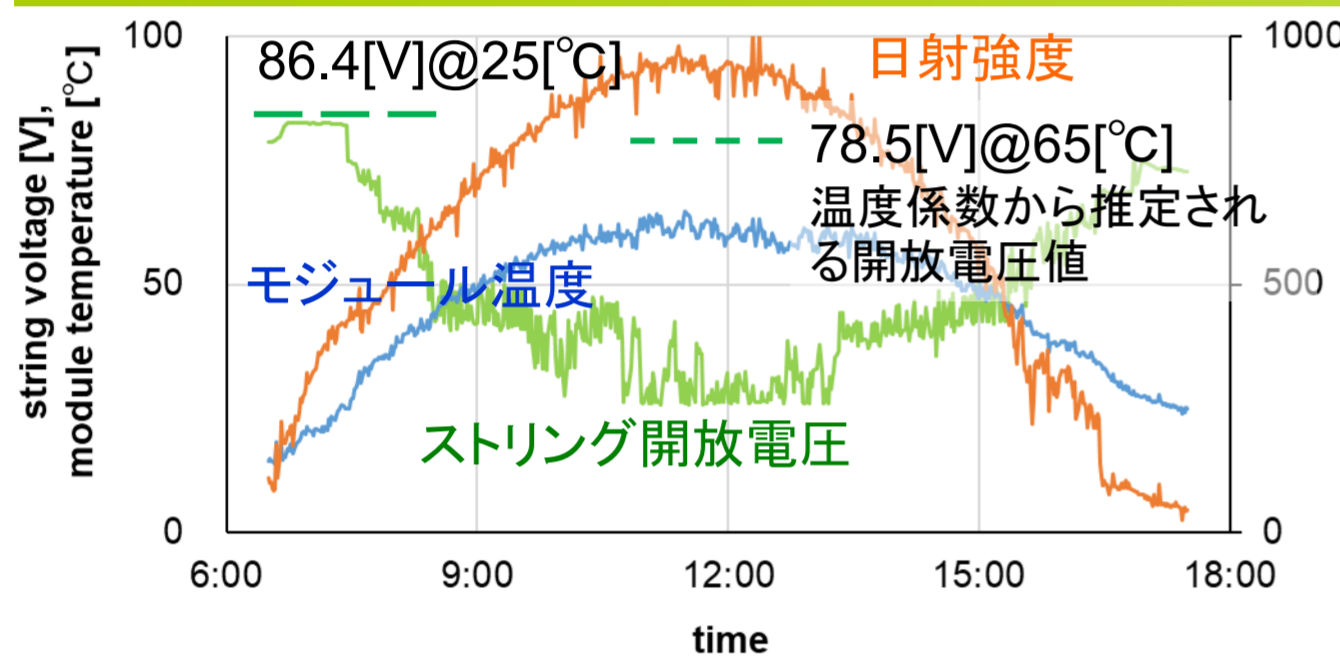
実験

- モジュール: 多結晶シリコン太陽電池。約10年間使用。アレイ出力低下発生
- システム: 6枚直列接続、常時回路開放
- 測定: スtring-I-V特性
 - 代表モジュール温度
 - 日射強度、モジュール開放電圧
- 頻度: 30秒または60秒間隔
- 期間: 2017年12月~2018年6月
- 場所: 産総研つくばセンター

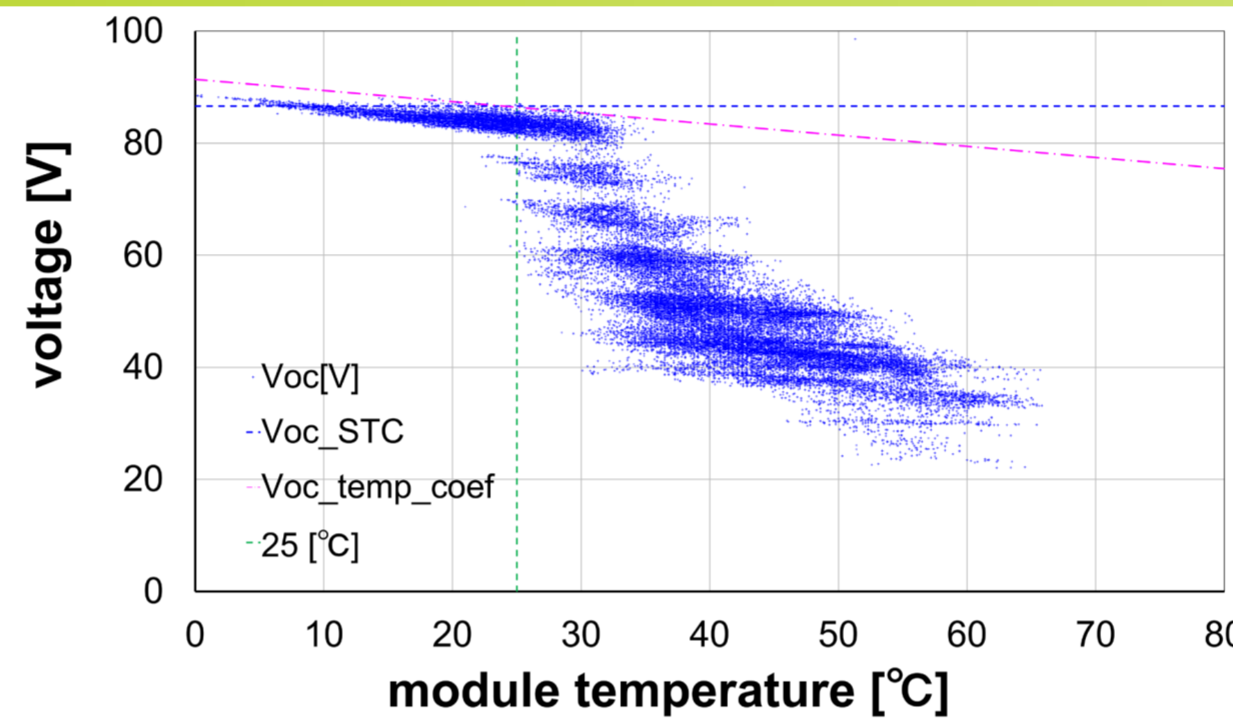


String屋外測定

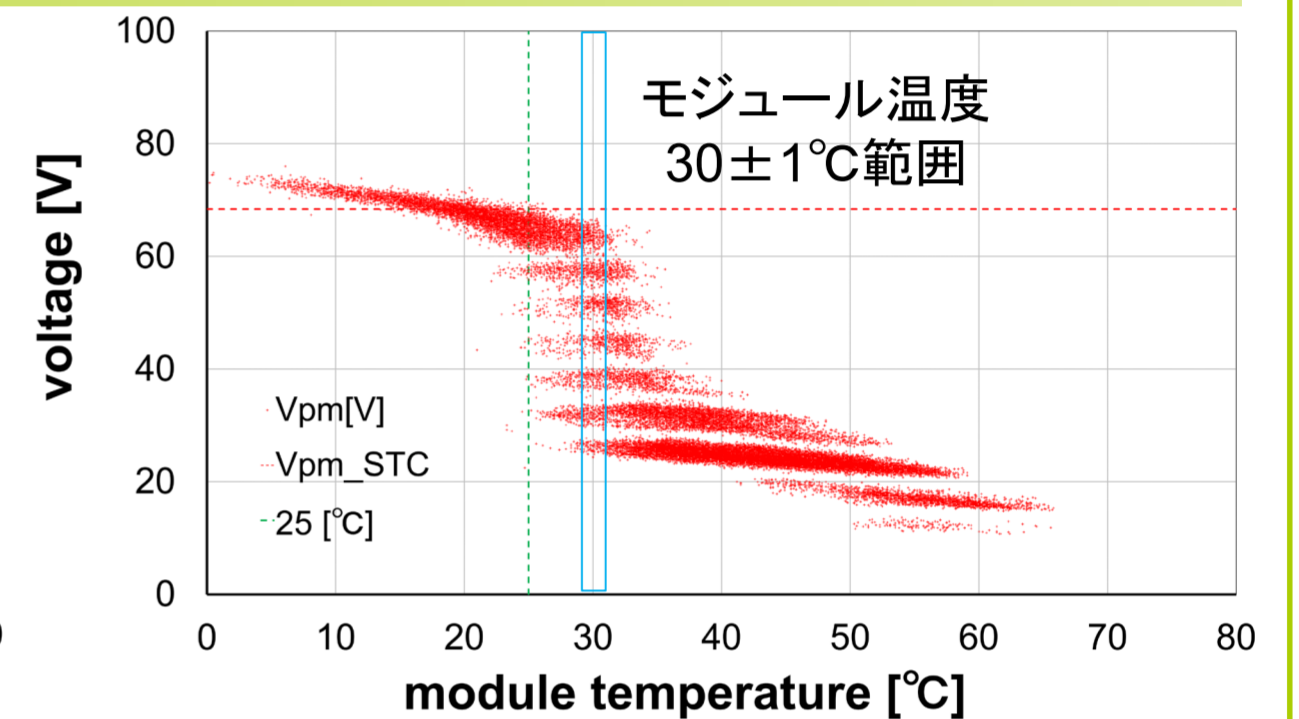
結果



モジュール温度とString開放電圧の経時変化(2018.4.22計測)



String開放電圧vsモジュール温度

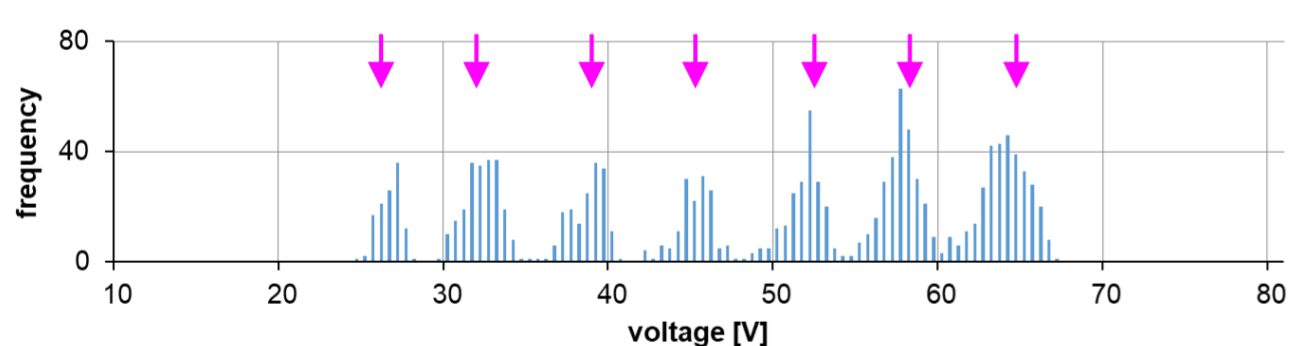


String最適動作電圧vsモジュール温度

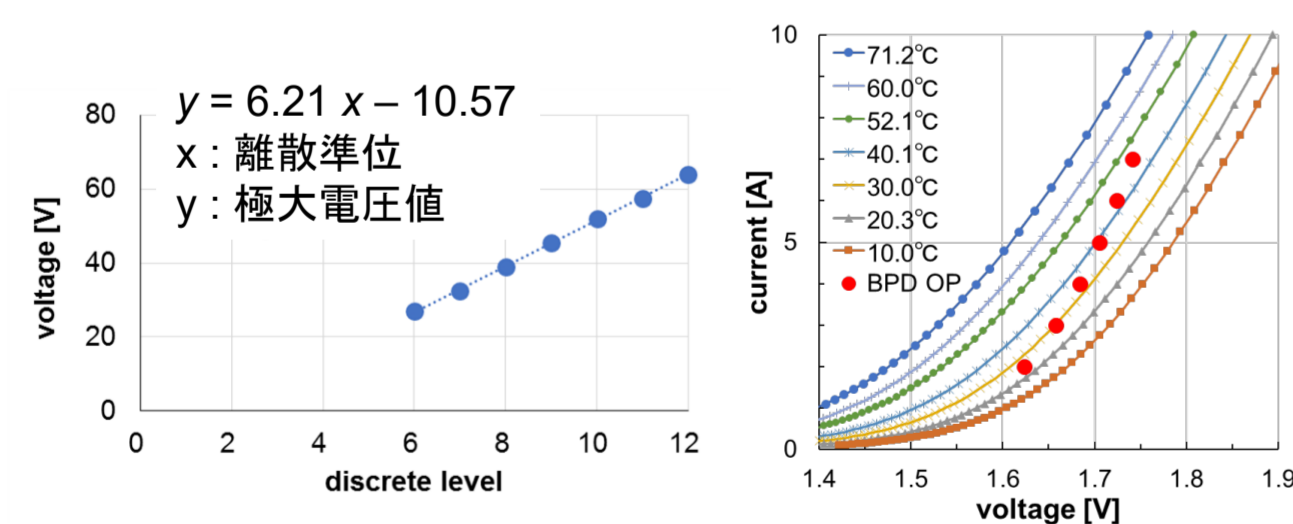
- モジュール温度上昇時にString開放電圧が低下
- 電圧低下は温度係数からの推定値を大きく上回る量
- モジュール温度低下時にString開放電圧が回復
- 計測期間中、モジュール温度上昇日の電圧は同様に変化

- モジュール高温時: String開放電圧 V_{oc} 低下
- V_{oc} 温度係数(-0.23 [%/K])から見込まれる電圧低下を上回る動作電圧の低下
- モジュール低温時: String開放電圧 V_{oc} 上昇
- 温度上昇時に顕在化し、温度低下時に潜在化する不具合の存在を示唆
- 最適動作電圧 V_{pm} は開放電圧 V_{oc} と比べて電圧方向により明確に分散化

考察: 最適動作電圧の分散準位



モジュール温度30±1°C範囲の最適動作電圧頻度分布



頻度極大電圧と分散準位の関係

BPD電流-電圧特性とBPD動作点

頻度が極大となる電圧 y と準位 x の関係

$$y = 6.21x - 10.57 \quad (1)$$

x : 準位(最大準位を12と仮定)、 y : 極大電圧

動作電圧 V と健全クラスタ数 n の関係

$$V = V_c n - V_d (N - n) = (V_c + V_d) n - V_d N \quad (2)$$

N : 全クラスタ数、 n : 断線がないクラスタ数、 V_c : 単位クラスタ電圧、 V_d : BPD動作電圧

BPD特性値と(2)式より

$$V = 6.20n - 10.20 \quad (3)$$

分散準位幅を表す係数[(1)式]と単位クラスタ電圧による係数[(3)式]は0.2%の差で一致

(1)式切片(BPD電圧降下分)と(3)式切片は3.6%程度の差で一致

∴ 分散準位最大値は12 = 全クラスタ数

考察: 不具合検出とモジュール温度

最適動作電圧分布分析による不具合未検出: 12クラスタ中4クラスタ

不具合内包: 8クラスタ → 不具合程度の差によって顕在化する温度が変化

各温度域での動作クラスタ数

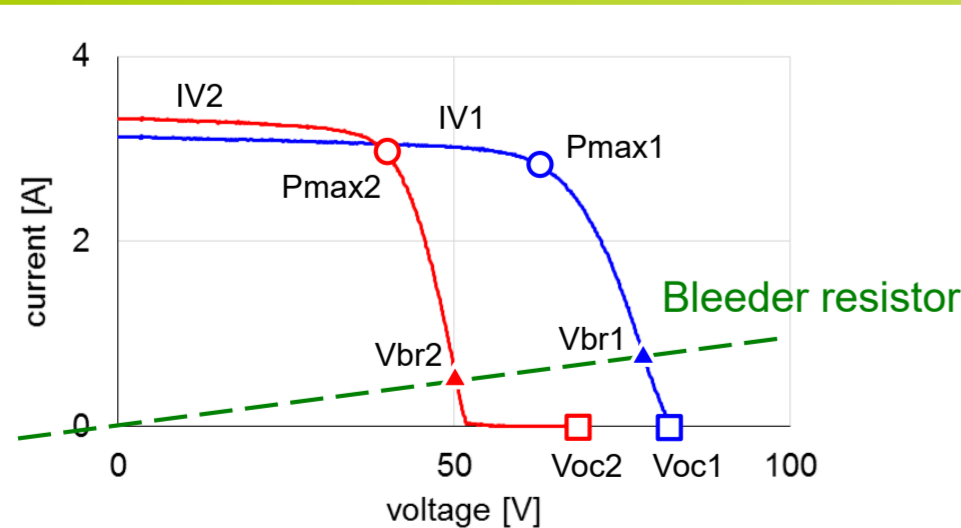
モジュール温度 [°C]	25	30	40	50	60
最大動作クラスタ数	12	12	8	7	5
最小動作クラスタ数	10	6	6	5	4

モジュール温度が高いほど不具合(インタコネクタ断線)が顕在化する割合が上昇

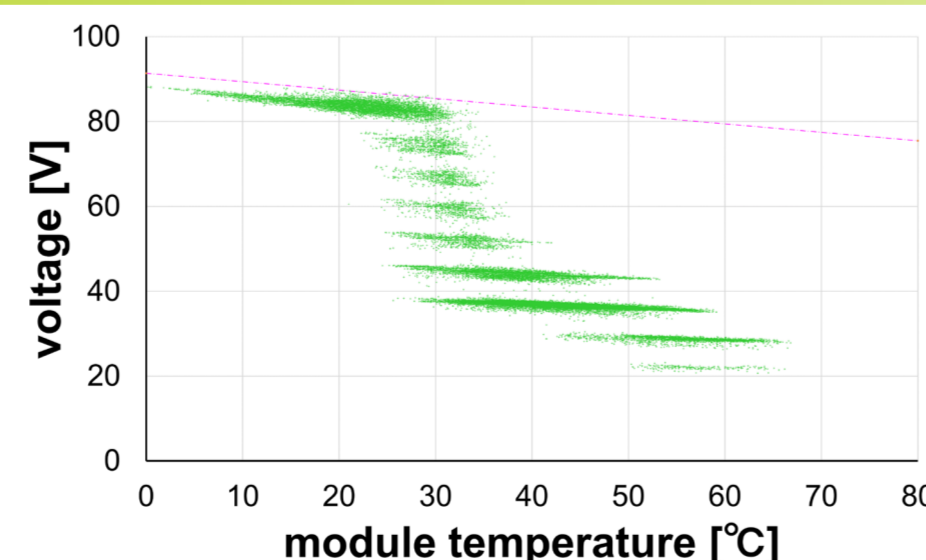
→ モジュール温度高温時にさまざまな不具合症状が顕在化する確率が上昇

→ オンサイト不具合診断に合理性あり

オンサイト点検手法の活用



ブリーダ抵抗法による動作点の移動



ブリーダ電圧vsモジュール温度

ブリーダ抵抗法: PVStringに直列に検出抵抗(ブリーダ抵抗)を挿入してString内に少量の電流を循環させ、ブリーダ抵抗の両端に発生する電圧を測定
ブリーダ電圧分布は最適動作電圧分布と同様に明瞭に分散化 → 不具合検知が可能

結論

1. 温度上昇時に顕在化して開放電圧を低下させ、温度低下時に潜在化して開放電圧を回復させる不具合が存在。
2. 最適動作電圧の温度依存性に関する分布が電圧方向に分散化。分散幅がクラスタ電圧とバイパスダイオード動作電圧に起因すること、分散化した最適動作電圧の測定値から不具合の数を明瞭に区別できることを確認。
3. オンサイトにおける最適動作電圧の測定が正確な不具合検出において合理的。
4. ブリーダ抵抗法や定電流法による測定電圧が最適動作電圧の測定と同等以上に不具合検出可能。

文献

1. T. Takashima, Behavior of Interconnect-Failed PV Modules under Standard Test Conditions and Actual Operation Conditions, IEEE J. PV, 8, 1761, 2018.
2. 高島工、池田一昭、温度変化によるモジュール不具合の顕在化と潜在化、電気学会論文誌B, 139, 584, 2019.

太陽電池モジュールの信頼性に封止材が与える影響: IonomerとPOEの比較

永山 敬¹, 飛永 駿¹, 原 由希子², 増田 淳²

¹三井・ダウ ポリケミカル株式会社, ²産業技術総合研究所

研究の目的

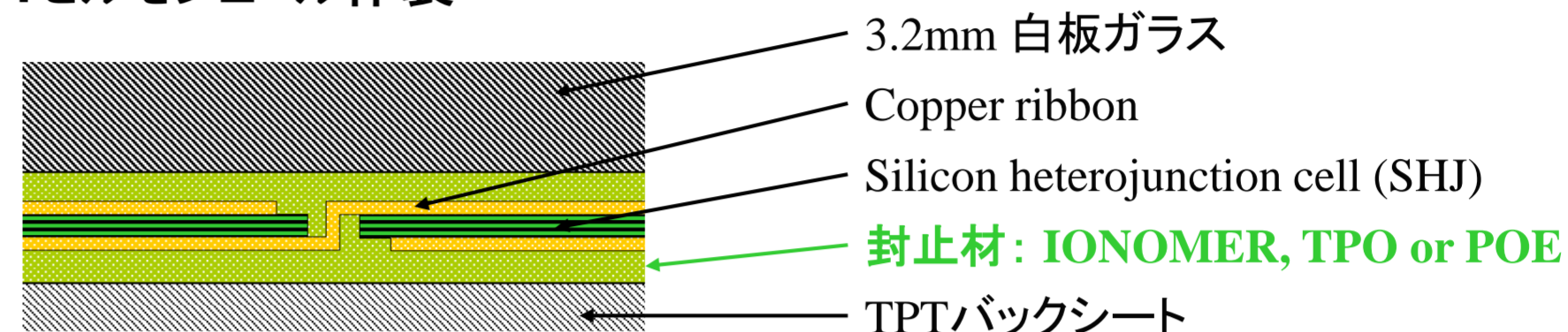
Ionomerは、内部に存在するイオンが凝集して会合体構造を形成するため、同じエチレンコポリマーであるethylene vinyl acetate (EVA)や polyolefin elastomer (POE)と比較して優れた性能を有する; 機械的物性、水蒸気バリア性、絶縁性、接着性、熱伝導率など。特に、他の封止材材料と比較して非常に高い弾性率を持つことは、ionomerの大きな特徴のひとつとして知られている。

一方、太陽電池封止材の弾性率については、高い方が良い^{1,2}、あるいは低い方が良い^{3,4}という両方の説がそれぞれ報告されている。

そこで、ionomer, 熱可塑性POE (TPO), POE封止材をそれぞれ用いて作製したモジュールに対して、ダンプヒート試験(DH)とサーマルサイクル試験(TC)の複合試験⁵を実施し、封止材の物性が実際に太陽電池モジュールの信頼性に及ぼす影響について検討した。

実験

4セルモジュール作製

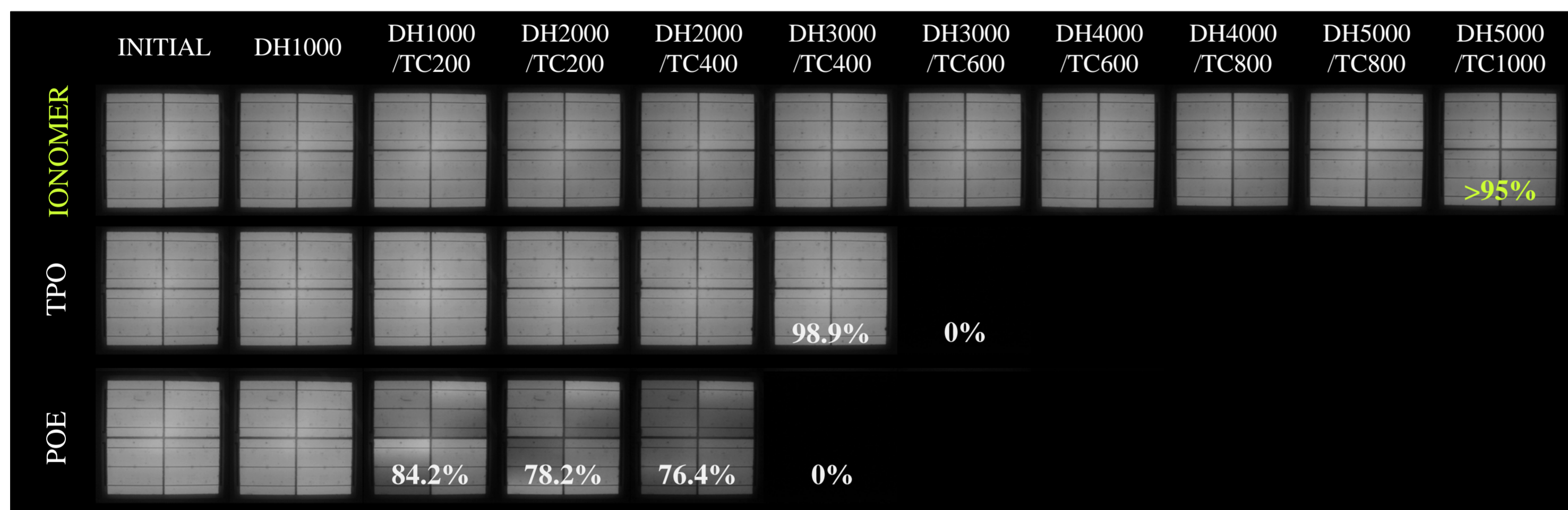


DH/TC複合試験

DH 1000 hおよびTC 200 cyclesを交互に繰り返し、EL, I - V 測定を実施した。

- Damp heat test (DH, 85 °C, 85% RH条件)
- Thermal cycling test (TC, -40 <=> +85 °C, ramp at 1.5 °C/min)

結果と考察



- Ionomer封止材を使用したモジュールにはDH/TC 5サイクル経過後にも劣化が見られなかった。
- 一方、TPO, POE封止材のモジュールについては、DH1000/TC200, 1-3サイクル時点で、 R_s の増加によるものと推測される顕著な劣化が確認され、最終的には発電量が0%となることが確認された。

Figure 1. EL images and P_{max} retentions of four-cell modules fabricated with silicon heterojunction cells and different encapsulants in the cyclic sequential test of DH and TC.

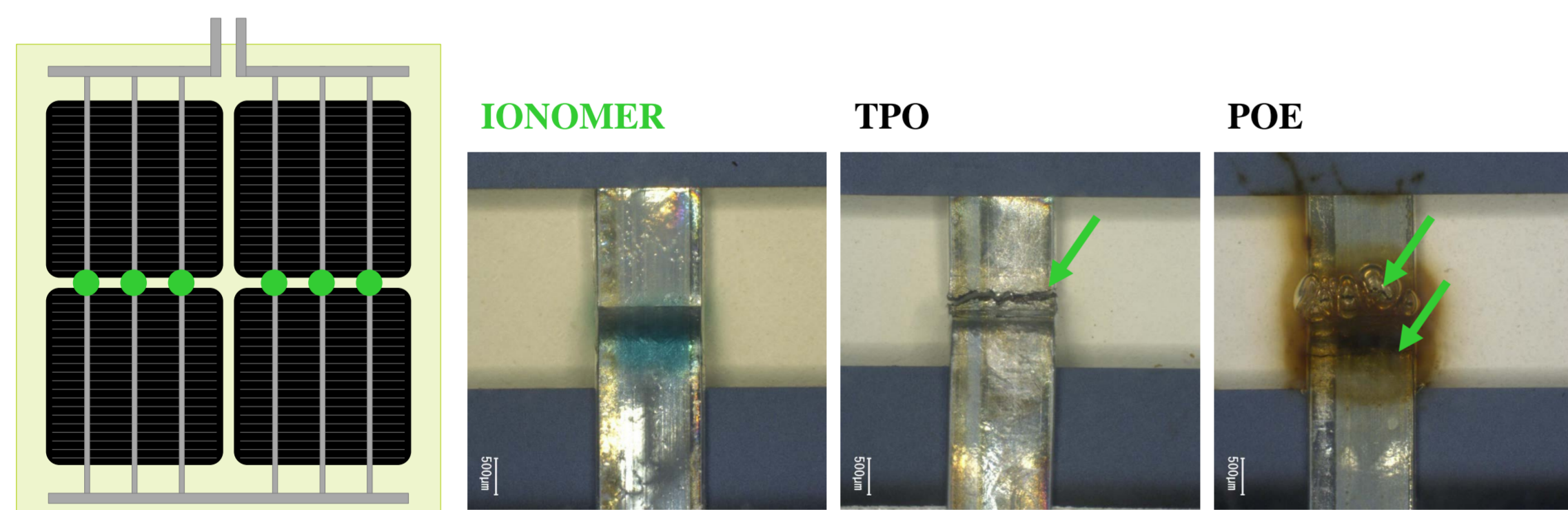


Figure 2. Typical optical microscope image of each module for the copper ribbon between cells (highlighted by ● in the left schematic image) after cyclic DH/TC test. Fractures of the ribbons are clearly seen in the TPO- and the POE-modules (shown by the arrows).

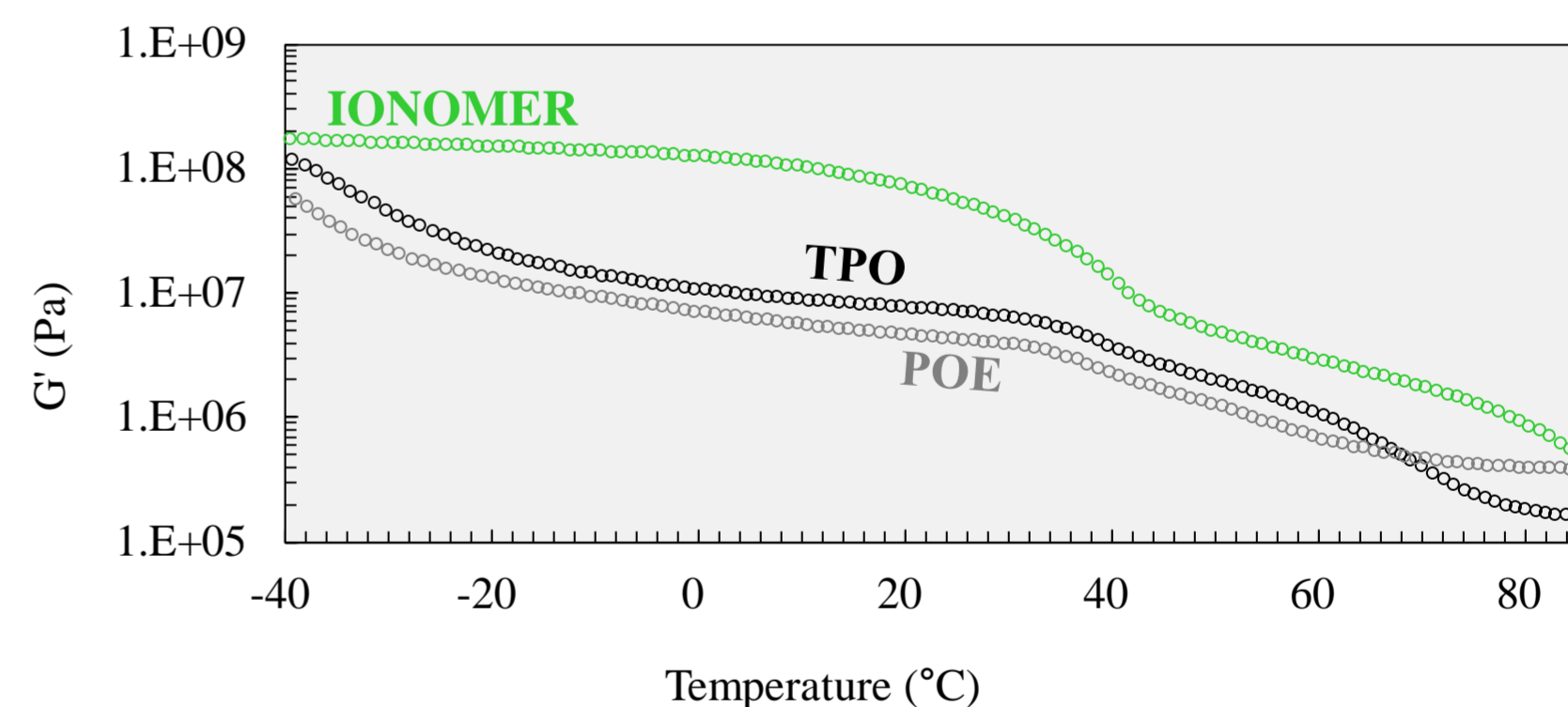


Figure 3. Storage shear modulus measured by dynamic mechanical analysis from -40 to +85 °C. Ionomer consistently shows higher modulus.

- モジュール各部の局所的な電気抵抗を測定し、TPOおよびPOEモジュールでは、セル間のリボン端子部 (highlighted by ● in Figure 2) の電気抵抗がすべて ∞ Ω となっていることを特定した。セル間のリボン端子を顕微鏡で観察したところ、リボンの亀裂が確認された。
- DH/TC試験で確認されたモジュールの劣化進行度合いは、Owen-Bellini *et al.*¹の提唱した通り封止材の弾性率に依存しており、アイオノマーの持つ高い弾性率がセルおよびリボンの位置安定性を高め、サーマルサイクルによって部材間に生じるストレスを軽減したものと考察される。

結論

- ガラス/バックシート構成の4セルモジュールを用いて、封止材の物性がDH/TC試験での信頼性に与える影響について検討した。
- TPOおよびPOE封止材を用いたモジュールでは、DH1000/TC200, 1-3サイクル後に劣化が見られ、発電量が0%となった。
- 発電量が0%となった原因は、リボンの亀裂による R_s の著しい増加と考察された。
- Ionomerのように高弾性率の封止材を用いることで、セル・リボンの位置安定性を高めることができ、サーマルサイクルにより部材間に生じるストレスを軽減可能であることが示唆された。

参考文献

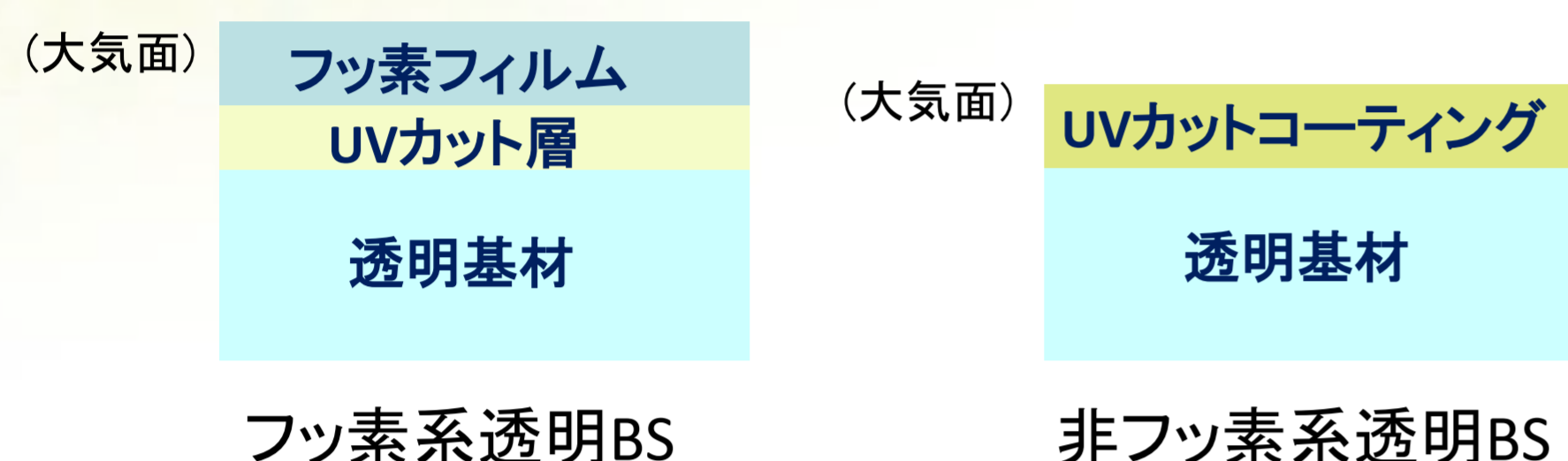
- [1] M. Owen-Bellini *et al.*, *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 1, pp. 183–188, 2018.
- [2] J. Lippiatt *et al.*, *Proc. 2018 IEEE 7th World Conf. Photovolt. Energy Conversion*, pp. 3819–3824, 2018.
- [3] R. Mickiewicz *et al.*, *Proc. 26th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf.*, pp. 3157–3161, 2011.
- [4] K. N. Rengarajan *et al.*, *Procedia Eng.*, vol. 139, pp. 76–86, 2016.
- [5] A. Masuda *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 4S, pp. 04ES10-1-7, 2016.

両面採光モジュール用透明バックシートの信頼性評価

白髭 靖史^a、古吉 亮介^a、在原 慶太^a、中原 敦^a、小川 錦一^b、千葉 恭男^b、増田 淳^b
^a大日本印刷株式会社、^b産業技術総合研究所

研究の目的

フッ素系透明バックシート(BS)と非フッ素系透明BSを用いて両面採光モジュールを作製し、信頼性比較を行う。



実験

● 評価モジュール

4セルモジュール (n型両面採光セル)

● 試験サンプル

1) フッ素系透明BS, 2) 非フッ素系透明BS,

● 信頼性試験条件

DHT: 85°C, 85%RH

UVT: 81 W/m², 光源キセノン, モジュール裏面温度75~85°C, 透明BS側照射

● 評価

・I-V特性 (標準試験条件)

・EL画像観察

・落砂摩耗試験 (ASTM D968)

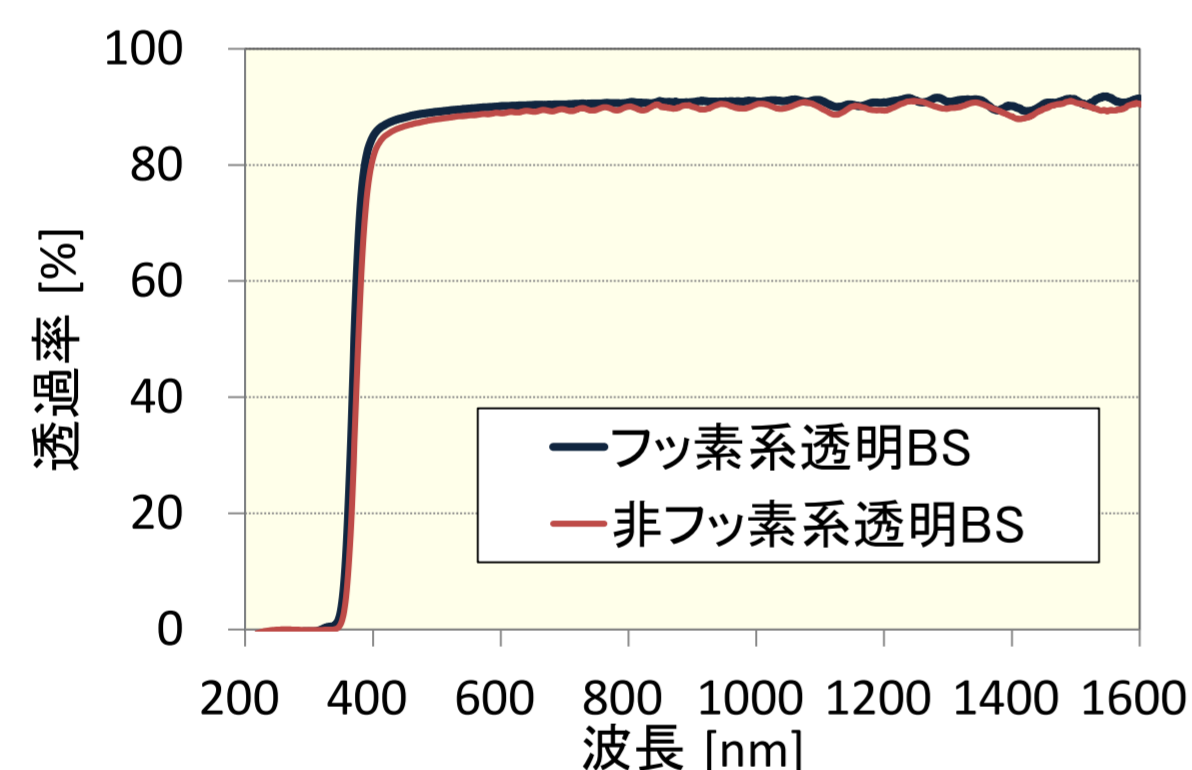
結果

① 4セルモジュール試験結果

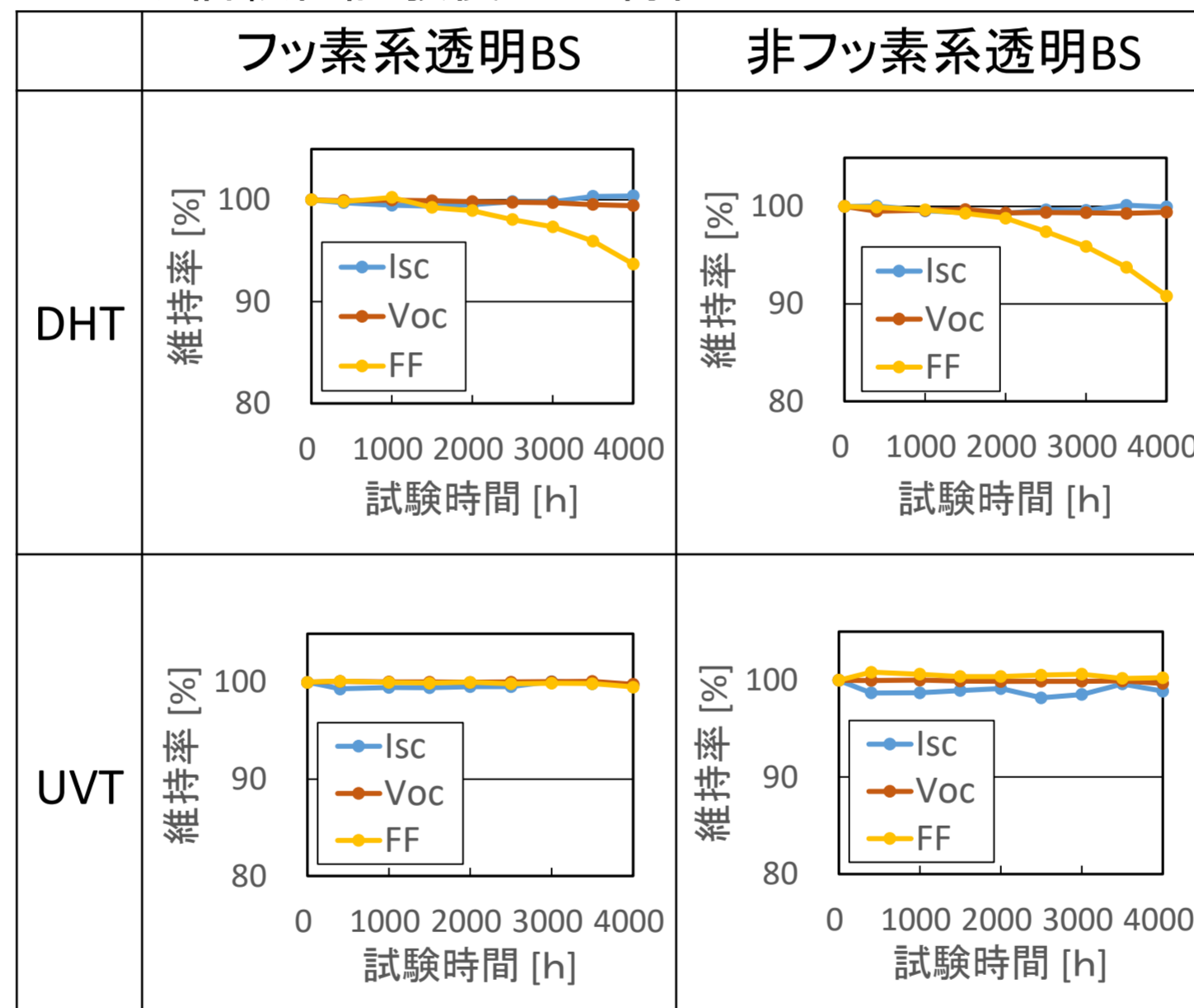
◆初期のI-V特性 (BS面)

	I_{sc} [A]	V_{oc} [V]	FF
フッ素系透明BS	8.84	2.59	0.74
非フッ素系透明BS	8.74	2.60	0.73

◆初期の分光透過率

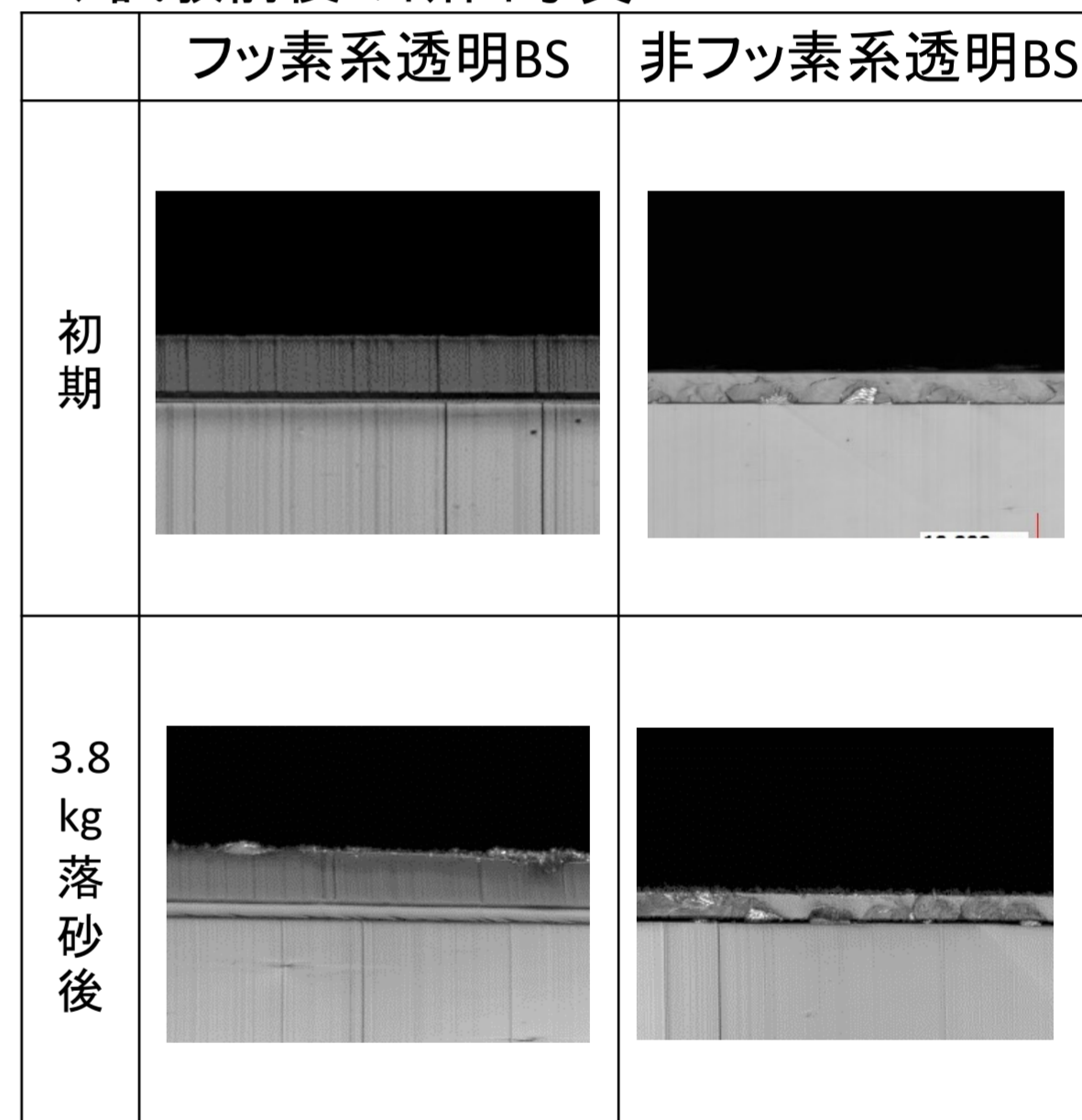


◆信頼性試験後のI-V特性



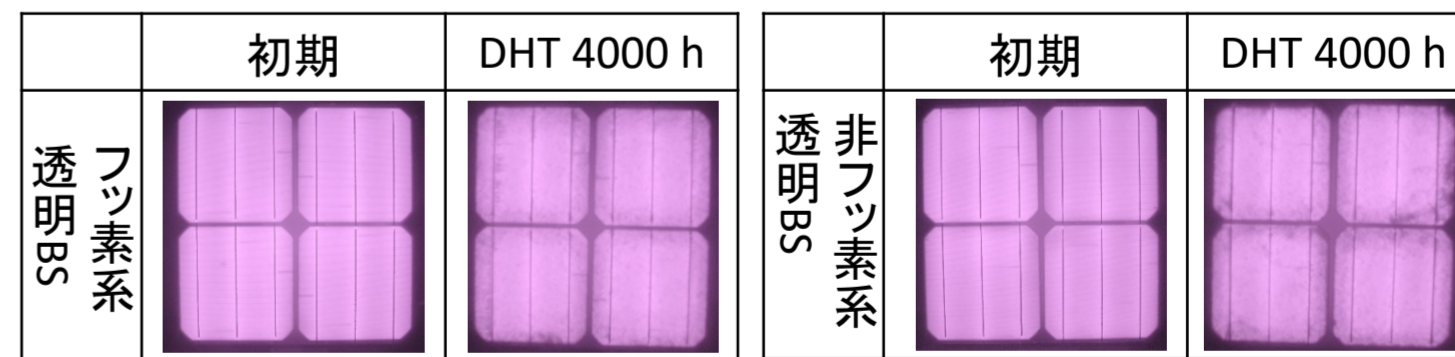
② 落砂摩耗試験結果

◆試験前後の断面写真



考察

- 初期I-V特性において、非フッ素系透明BSの I_{sc} がやや劣るのは、BS単体の透過率が劣ることに起因している。
- 信頼性試験後のI-V特性結果において、維持率推移に大きな差は確認されず、非フッ素系透明BSはフッ素系同等のモジュール信頼性が付与できている。
- DHTにおいて両モジュールでFFの低下が見られる。EL画像より(右図)、両モジュールとも水分起因による酢酸によって発生した配線腐食と想定され、非フッ素系透明BSを適用した影響では無いと考える。
- ともにUVT 4000 hにおいて出力低下が確認されず、実曝35年に相当(Albedo 0.1計算)する^[1]。
- 落砂試験によって最表層の膜厚変化は確認されなかった。本条件は砂漠での実曝100年以上と計算される^[2]。



結論

- 非フッ素系透明BSは、DHT,UVT条件下においてフッ素系透明BSと同等の信頼性を付与することができる。
- 本件で用いた非フッ素系透明BSは、UVTの結果から実曝環境下35年相当においても透過率の低下が発生しない。
- 落砂試験結果から非フッ素系透明BSの最表層は高い耐砂性を有していることがわかる。

参考文献

- [1] ATLAS data
<http://www.atlaswsg-japan.com/accelerated/arizona/>
- [2] IEC 60721-2-5

太陽電池モジュールにおけるバイパス回路の耐久性と故障メカニズム

池田 一昭

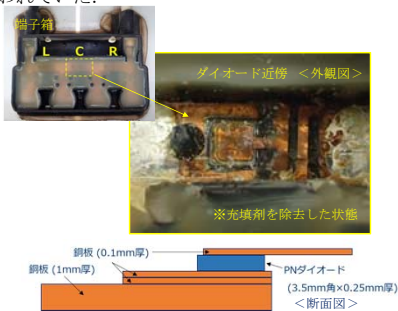
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター システムチーム

研究の背景と目的

太陽光発電システム (PVS) に組み込まれた太陽電池モジュールのバイパス回路 (Bypass Circuit : BPC) が開放状態となって機能しない場合、発電回路側に不具合事象が発生する、あるいは既に発生していると、不具合事象への通電が異常な発熱を引き起こし、モジュールを部分的に焼損させる、さらにはガラス破損に至らしめる例も観察されている^[1-3]。本研究は、実発電設備におけるBPCの故障事例の分析や屋内外におけるBPCの耐久性試験による故障の再現実験を実施することにより^[4-6]、BPCの故障メカニズムを明らかにする。

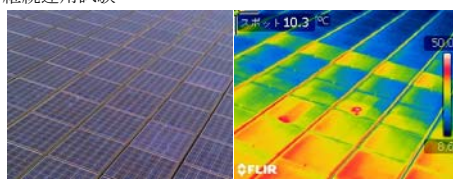
試料

産総研つくばセンターで稼働中の太陽光発電設備の一部に使用されているSHARP製ND-150AMモジュールを試料とした。このモジュールのBPCの構造は、チップ型のPNダイオード (3.5 mm角, 厚さ0.25 mm) が上下から薄い銅板電極 (上側0.1 mm厚, 下側0.1 mm厚×2枚) で挟み込まれ、チップと銅板、更に銅板同士は導電性ペースト材で接着されていた。薄い銅板電極と厚い銅基板 (1 mm厚) ははんだでも接合され、厚い銅基板はセルストリング側のバスバー電極とはんだで接合されていた。また、回路は樹脂により覆われていた。



実験

①セルストリング導通不備に起因したBPC動作状態にあるモジュールの継続運用試験^[2,3]



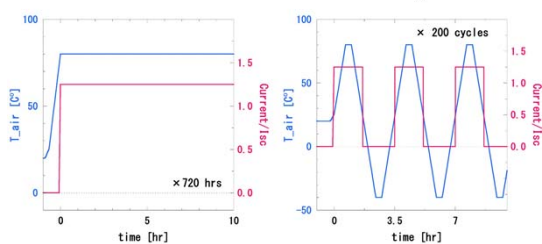
②屋外暴露試験^[4,6]

- 単クラスタ遮光のモジュールを短絡により常時通電 (実システム架台)
- 複クラスタ遮光のモジュールをシステム運転により常時通電 (実システム架台)
- 複クラスタ遮光のモジュールを短絡により常時通電



③屋内耐久性試験^[6]

- HCT: 80 or 60°C, 連続通電, 0.9 or 0.6 or 0.3 I_{cc}
- TCT: -40~80 or 60°C, 3.5 h周期, 1.25 or 0.9 I_{cc} 通電 (25°C以上)

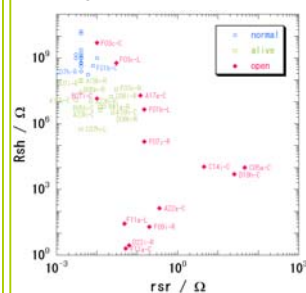


結果

・開放故障までの時間

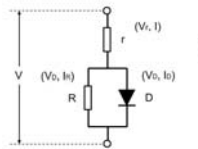
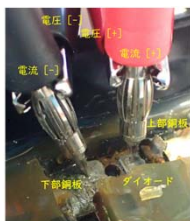
mod-ID	test	time	L	C	R
OSL	C14i		n	3.5y	n
	D18h		n	3.5y	n
	D06e		n	3.8y	n
	D06g		n	4.0y	n
	D08f		n	4.0y	n
	D07f		n	4.0y	n
	A22i		n	4.3y	n
	F09j		n	4.5y	n
	A17a		n	5.0y	n
	D18g		n	5.0y	n
	B07e		n	5.3y	n
	A01i		n	5.5y	n
	C05a		n	5.5y	n
	B01b		n	6.0y	n
	D09g		n	6.5y	n
	A22a		n	7.0y	n
AIST	F01b	22m	n	n	n
	F03c	28m	1m	>36m	n
	F07j	n	n	31m	n
	F11a	41m	42m	>42m	n
	D22i	>4m	2m	4m	n
TRU	A18h	HCT, 0.9I _{sc}	60	>720	>720
	A23h	HCT, 0.9I _{sc}	60	>720	>720
	A24h	TCT, 0.9I _{sc}	40~80	>561	>561
	C09h	TCT, 0.6I _{sc}	40~80	>600	>600
	C06i	TCT, 0.9I _{sc}	40~80	>68	>68
	C07h	TCT, 0.9I _{sc}	40~80	>115	>115
	D06h	TCT, 0.9I _{sc}	40~80	>121	>121
	A17h	TCT, 0.9I _{sc}	40~60	>200	>200
	B05h	TCT, 0.9I _{sc}	40~60	>200	>200
	B07i	TCT, 1.3I _{sc}	40~80	>1	>1
	F09i	TCT, 1.3I _{sc}	40~80	>5	>5

・R vs. r



分析

- ①外観観察 (破壊分析) ^[6]
- ②BPCの電流電圧特性測定^[7]
 - 10 V~+1 V [+1 A] (電圧掃引)
 - +1 μ A~+10 A (電流掃引)
 - ・2端子 or 4端子測定
- ③電流電圧特性の等価回路パラメータ解析^[7]



$$V = Ir + V_D$$

$$I = I_D + \frac{V_D}{R}$$

$$I_D = I_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{n k_B T}\right) - 1 \right\}$$

- R : ダイオードの並列抵抗
- ひびや割れの表面、間隙、周辺物質や生成物による通電
- r : 回路の直列抵抗
- 節点 (はんだ、導電性接着剤) や回路の屈曲部
- I_0 : ダイオードの内部因子1 (逆飽和電流)
- 電荷の拡散性 (格子欠陥、不純物)
- n : ダイオードの内部因子2 (理想係数)
- pn界面の結晶性 (格子欠陥、不純物)

考察とまとめ

通電によりある程度の温度に達した状態が継続したダイオードでは漏れ電流が増大していたが、開放故障を発症した場合ですら、構成要素の破壊等を伴わない場合は1 μ A程度の増加にとどまっていた。一方で、上部電極の破損や溶融、あるいはそれらに関連した可能性の高いダイオード表面のコゲや割れ、さらに素子の割れを伴った場合は、-10 Vの逆バイアス電圧に対して数mA~数Aの漏れ電流が発生していた。これより、回路の開放故障発生時に、開放位置で発生したジュール熱、または放電による熱や衝撃により、ダイオード素子が変質あるいは破壊することで、漏れ電流の増加によりダイオードの低抵抗化が生じたと考えられる。ここで、BPCの回路には開放箇所が存在するため、開放状態が維持されれば低抵抗化したダイオードには通電しないが、温度変化や振動、発電電圧の印加等の何らかの影響により開放箇所が接点が発生すると、低抵抗に電流が通電することにより、ダイオード近傍の延焼や溶融に至ることが考えられ^[8,9]、その結果として、粉々かつ腐食したダイオードが生成され、最終的には再度開放故障に至ると考えられる。

参考文献

- [1] 吉富政宣, 「太陽電池セルの焼損メカニズム-逆電圧象限動作 - 太陽光発電システム (PVS) の安全保護 その2」, 太陽エネルギー, 39, 5 (2013) pp. 73-86.
- [2] 加藤和彦, 「産総研メガソーラタウン-10年の運用実績の概要」, 太陽/風力エネルギー講演論文集2014, 41-44.
- [3] 加藤和彦, 「産総研メガ・ソーラタウンにおける太陽電池モジュールバイパス回路の耐久性に関する事例」, AIST太陽光発電研究成果報告会2015, 51.
- [4] 池田一昭 他, 「太陽電池モジュールのバイパス回路における開放故障事例」, 太陽/風力エネルギー講演論文集2017, 163-166.
- [5] 津野裕紀 他, 「太陽電池モジュールのバイパス回路耐久試験の提案」, 太陽/風力エネルギー講演論文集2017, 161-162.
- [6] 池田一昭 他, 「耐久性試験バイパス回路におけるIV特性の等価回路解析」, 太陽/風力エネルギー講演論文集2018, 141-144.
- [7] 池田一昭, 「太陽電池モジュールにおけるバイパス回路の耐久性と故障メカニズム」, 日本太陽エネルギー学会講演論文集2019, 159-161.
- [8] 桶真一郎 他, 「バイパスダイオードの短絡故障に起因する太陽電池モジュールの過熱」, 太陽/風力エネルギー講演論文集2018, 137-140.
- [9] 桶真一郎 他, 「バイパスダイオードの不規則稼働による故障と過熱」, 日本太陽エネルギー学会講演論文集2019, 15-18.

謝辞

本研究の一部は、NEDO「太陽光発電システム効率向上・維持管理プロジェクト、太陽光発電設備の安全化に関する実証試験および研究」の成果を使用しました。関係各位に感謝申し上げます。

モジュールに内蔵されたバイパスダイオードの放熱設計と評価

三瓶 義之¹、小林 翼¹、小野 裕道¹、本田 剛²、高遠 秀尚³、白澤 勝彦³
¹福島県ハイテクプラザ、²福島双羽電機株式会社、
³産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム

研究の目的

太陽光発電パネル裏面のジャンクションボックス内には安全回路となるバイパスダイオードが設置されている。
 このバイパスダイオードをパネル内にラミネートして内蔵することができれば、ジャンクションボックスの無い両面フラットなパネルが作製でき、施工可能箇所の拡大や製造・廃棄の際の工数削減を期待できる。
 そのためには薄型のバイパスダイオード、および常時通電する状況であっても温度上昇を従来のジャンクションボックスと同等に抑えられる放熱設計が必要となる。

実験

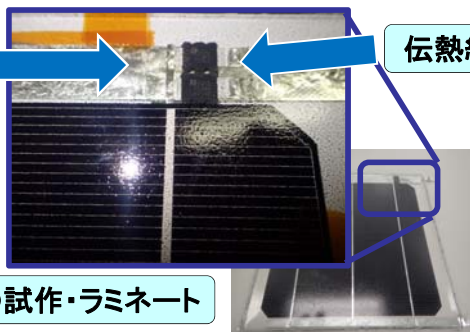
パネルにラミネート可能な薄型バイパスダイオードを試作。発熱量を抑制するためにダイオードの定格電流を増やし、さらに2個並列で使用することで熱源を分散した。
 伝熱を改善するためにバスバーの幅を拡大し、ダイオードのカソード側を接着剤でバスバーに接合した。
 この回路をセルと熱電対とともにラミネートし、ダイオードに通電した際のダイオード近傍の温度を測定した。
 またその際のガラス表面の温度分布についてサーモカメラを用いて測定した。

結果

発熱量抑制

-7.3 K/W

- ・ダイオードの定格増加 (10 A → 15 A)
- ・ダイオードの並列使用 (2個並列)

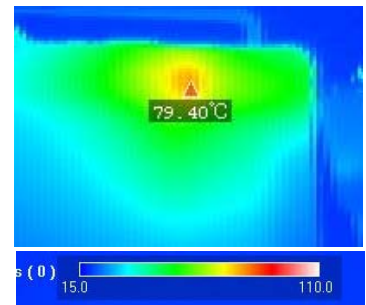


伝熱経路の強化

-8.7 K/W

- ・バスバーの幅拡大 (6 mm → 12 mm)
- ・ダイオードの裏面接合 (導電性接着剤)

サーモカメラで温度分布を観察



薄型ダイオードの試作・ラミネート

ダイオードの熱抵抗を28.4 K/Wから12.4 K/Wに低減
 動作中のダイオードの温度上昇を103.3 Kから68.9 Kに抑制

ダイオードからバスバーへの伝熱を確認

考察

- ・従来のパネル内の回路にバイパスダイオードを入れた場合、その熱抵抗は28.4 K/Wとなり動作時のダイオードの温度上昇は100 Kを超えることがわかった。
- ・この数値は、実使用環境においてはダイオードの破壊温度を容易に超えるため、ダイオードの動作時の発熱を効率よく放熱する必要がある。
- ・今回試験した放熱設計の中でもっとも熱抵抗低減に効果があったものは、ダイオードを並列で2個使うことであり、ついでダイオードからの伝熱強化、バスバーの伝熱強化の順に効果があった。
- ・これは熱抵抗低減には熱源の分散が最も効果があり、熱伝達についてもより熱源に近い部分での改善が効果が大いということを示していると考えられる。
- ・これらを踏まえて設計された放熱設計では、熱抵抗値を12.4 K/Wに低減させることができ、温度上昇についても従来のジャンクションボックス内のバイパスダイオードと同等に抑えることができた。

結論

- ・太陽光発電パネルは放熱に関して過酷な環境であり、バイパスダイオードを内蔵するためには十分な放熱設計が必要であることが確認できた。
- ・放熱設計に重要となる熱抵抗低減のためには、熱源を分散させること、熱源近傍での伝熱の強化が効果が大きいことが確認できた。
- ・これらを踏まえた設計により、パネル内蔵であってもジャンクションボックス内と同等の温度上昇に抑えられることが確認できた。

謝辞

本研究は、福島県が実施した「産総研連携強化型技術開発事業」の一環で行われた。共同研究企業の福島双羽電機株式会社に心から感謝いたします。

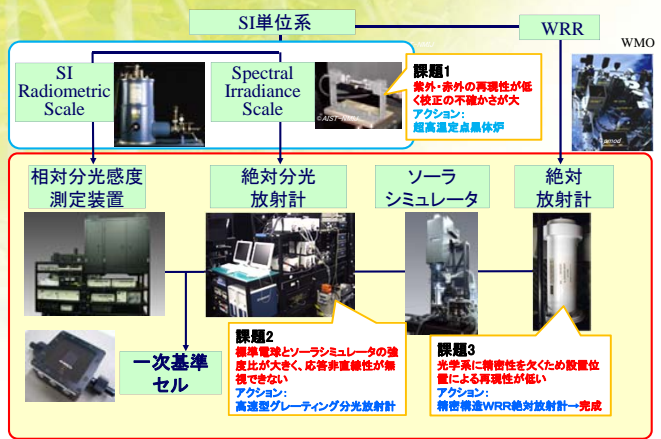


基準太陽電池校正のCMCと今後の技術課題

猪狩 真一、高瀬 滝男、小久保 順一、渡邊 良一、周 泓
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 評価・標準チーム

研究背景・目的

校正の不確かさを改善するためのトレーサビリティ技術開発



課題1: 分光放射照度標準の不確かさ抑制(超高温定温黒体炉の測光標準利用) 標準電球から黒体セルへのトレーサビリティの変更

分光放射照度標準の更新: 金属炭化物-炭素(WC-C)の包晶点 3000 Kの温度定時点の輻射を活用。課題1: 放射シールドφ13, 放射シールドφ8, 放射温度計, 超高温定温黒体炉, 伝送光学系, 積分球, 光ファイバ。課題2: 標準電球とソーラシミュレータの強度比が大きく、応答非直線性が顕著で大きい。課題3: 光学系に精密性を欠いた設置位置による再現性が低い。

課題への取り組み

課題2: 高速型グレーティング分光放射計の応答直線性の評価 積分球とLEDの組合せによる積分球光源法によるディテクタ単体での評価

分光器	ディテクタ
UV (250~390 nm)	光電子増倍管
VIS1 (391~570 nm)	Siフォトダイオード A型
VIS2 (571~750 nm)	Siフォトダイオード B型
NIR (751~960 nm)	Siフォトダイオード B型
IR1 (961~1580 nm)	InGaAs PINフォトダイオード A型
IR2 (1580~2500 nm)	InGaAs PINフォトダイオード B型

積分球光源法と重量法を併用した評価装置

PMT ソーラシミュレータ測定時の応答非直線性が高い

対策: 抵抗型デバイダ回路をアクティブ型に改造して再評価した結果、応答非直線性誤差は+0.1%未満に抑制。分光放射計に実装して特性改善確認済。

課題2: 高速型グレーティング分光放射計の応答直線性の評価 複数光源切り替え型照度可変光源の開発と適用

図1 光源の基本構成: Lamp 1 (0.2sun), Lamp 2 (0.6sun), Lamp 3 (0.4sun), Lamp 4 (0.1sun), キセノンランプ, シャッターユニット, ファイバーユニット, 4分岐ファイバからバンドルファイバへ, Kレンズユニット, 照射レンズ, 照射光。

図2 照度設定と重量による照度の線形性: R²=0.999974

図3 照射面内不均一性(±2%以下): シャッター制御により複数光源の切り替えを瞬時にし、0.025 SUN~1.2 SUNの範囲で照度可変。重量の正確性は、線形性が検証されたコブレンツ型のサーモパイルで検証。

図4 照射面内不均一性(±2%以下): ランプの射出光をファイバーユニットで均一化し、更にレンズ光学系で平行光線にする。

結果

CMC(最高校正能力)を0.72%から0.5%台に改善
 ● 超高温定温黒体炉を標準光源として利用するための技術開発
 ● ディテクタの応答直線性の評価技術とその解消手法の開発

測光標準	拡張不確かさ
標準電球	2.15%
標準電球とWRR	0.72%
超高温黒体炉とWRR	0.51%~0.53%

課題1と課題2の解決により、表1の3を大幅に改善し、拡張不確かさを従来の0.72%から0.5%台に大幅改善
 合成標準不確かさ = 標準不確かさの二乗和の平方根
 $\sqrt{(0.20)^2 + (0.47)^2 + (0.07)^2}$
 拡張不確かさ = 合成標準不確かさ × 包含係数
 包含係数 k=2 で信頼区間95% で推定された誤差となる

表1 不確かさの推定表(概要)

産総研の基準太陽電池セル一次校正の主要な不確かさ要因	標準不確かさ (%)
1 短絡電流 (I _{sc}) の計測不確かさ	0.20~0.21
2 絶対放射計による放射照度補正係数の不確かさ	0.47
3 スペクトルミスマッチ補正係数の不確かさ	0.07~0.13
合成標準不確かさ	0.255~0.265
拡張不確かさ U ₉₅ (k=2)	0.51~0.53

NREL, PTB, ESTIとの基幹比較及び国際比較を実施

ISO/IEC 17043 (2010) の付属書Bに記載された統計手法(E_n数)で整合性を評価する。

$$E_n = \frac{X_{Lab} - X_{Ref}}{\sqrt{U_{Lab}^2 + U_{Ref}^2}}$$

X_{Lab}:各Labの校正値
 X_{Ref}:AISTの校正値
 U_{Lab}:各Labの拡張不確かさ
 U_{Ref}:AISTの拡張不確かさ

E_n ≤ 1: 校正値と不確かさの推定が満足なレベル
 E_n > 1: 不満足なレベル(不確かさの推定に問題)

WPVS基幹ラボ間のE_n数は1未満と良好な一致度を得ている。

結論

- ① 光電子増倍管のデバイダ回路の改造により、長年の課題であった短波長域の応答非直線性を解消できた。
- ② 技術開発の成果を導入して測定したデータに基づく不確かさの推定の結果、CMC(最高校正能力)は0.5%台に向上している。
- ③ 絶対放射計による放射照度補正係数の不確かさを低減することで、CMCの更なる向上が期待され、是が次の開発課題である。

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から受託して実施したものであり、関係各位に感謝する。

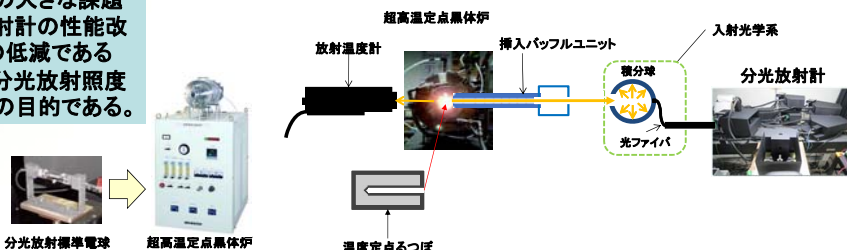
測光標準としての超高温定点黒体炉利用技術

高瀬 滝男、猪狩 真一、渡邊 良一、小久保 順一
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 評価・標準チーム

・基準太陽電池の最高校正能力を更に向上させる上での大きな課題は、ソーラシミュレータのスペクトルを測定する分光放射計の性能改善と、それを校正する分光放射照度標準の不確かさの低減である
・超高温定点黒体炉を上位標準として活用することで、分光放射照度標準の不確かさを従来よりも低減させることが本研究の目的である。

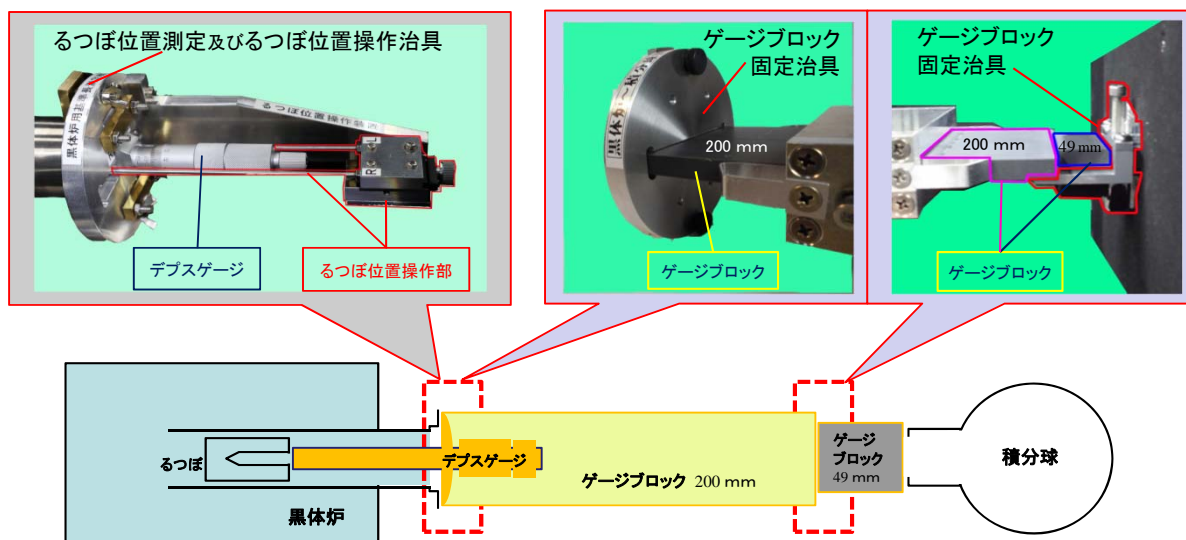
超高温定点黒体炉： 金属炭化物-炭素(WC-C)の包晶点を用いて約3000 Kの超高温で温度定点を実現できる

安定で、相対分光分布の再現性が高い



基本長の設定精度を支える治具の開発

● 黒体炉からの輻射の分光放射照度測定の不確かさを低減するためには、黒体炉と分光放射計の入射光学系間の基本長500 mmの設定精度を上げることが必要である。そのためには、測定機器の保持が重要であり、3つの保持治具を考案し製作した。



黒体炉を測光標準として利用するための運転パターンにおける測定可能時間の延長

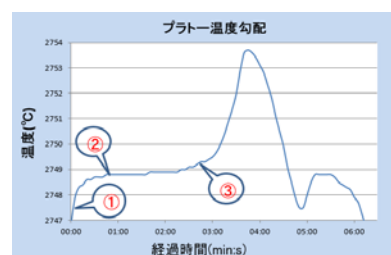


図1 運転操作とプラトー温度勾配について

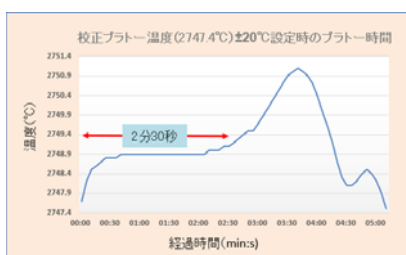


図2 校正プラトー温度(2747.4°C)±20°C設定時の運転特性



図3 校正プラトー温度(2747.4°C)+15°C-25°C設定時の運転特性

● 運転内容(図1参照)

1. プラトー設定プログラムは①の-20°C(2727°C)から+20°C(2767°C)に向かって昇温させる。
2. 放射温度計で校正プラトー温度①(2747.4°C)を確認し、挿入パッフルユニットを挿入する。
3. 分光放射計を移動(①から45秒)し測定を開始②(測定時間55秒)。
測定終了後、分光放射計を移動し、挿入パッフルユニットを取出し、放射温度計をセット(①から2分30秒経過)する。
4. ③:プラトー温度が5秒間に0.2°C上昇した時点:測定を終了しプログラムを進める目安になる。①の-20°C(2727°C)にプログラムで降温させる。

● プラトー設定例(図2、図3)：校正プラトー温度に対して上昇温度差が少ないほどプラトー発生時間が長くなる。

結論

- ①超高温定点黒体炉と各種測定装置間の距離測定装置と固定治具を考案・製作し、今後の安定な運用を可能とした。
- ②校正プラトー温度に対する上昇温度差が少ない運転パターンであるほど、プラトー発生時間(測定可能時間)を延長できる。
引き続き、校正プラトー温度±10°Cの運転パターンの実現可能性を検討する。
- ③最適運転条件での分光放射照度の再現性に係るデータ蓄積と不確かさの評価が課題である。

謝辞 本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から受託して実施したものであり、関係各位に感謝する。

ディテクタの応答非直線性とピコアンメータの非直線領域

渡邊 良一、猪狩 真一、周 泓、武田 俊輔
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 評価・標準チーム

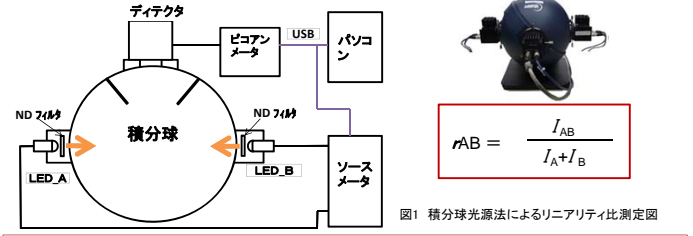
研究背景・目的

- 装置性能の改善と校正手順の高度化により、基準太陽電池デバイス校正の支配的な不確かさ要因をスペクトルミスマッチ補正係数(MMF)に落とし込めた。
- MMFの不確かさは、分光放射計校正光源の不確かさと、校正光源とソーラシミュレータの強度差による分光放射計の応答非直線性が主要因である。
- 本研究の目的は、高速型グレーティング分光放射計の内蔵する各種ディテクタの応答直線性を積分球光源法で評価し、それらの適合性を確認することである。

分光器の分担波長	ディテクタ
① UV分光器: 250 nm~390 nm	光電子増倍管 (PMT)
② UV-VIS分光器: 391 nm~570 nm	Siフォトダイオード A型
③ VIS分光器: 571 nm~750 nm	Siフォトダイオード B型
④ NIR分光器: 751 nm~960 nm	Siフォトダイオード B型
⑤ IR1分光器: 961 nm~1580 nm	InGaAs PINフォトダイオード A型
⑥ IR2分光器: 1581 nm~2500 nm	InGaAs PINフォトダイオード B型

リニアリティ比 $r^{(n)}$ の算出による応答非直線性の評価

- 積分球にLEDの発光を入射し、その光量を制御してディテクタの出力を計測する。



先行研究
Dong-Joo Shin, Seongchong Park, Ki-Lyong Jeong, Seung-Nam Park and Dong-Hoon Lee,
"High-accuracy measurement of linearity of optical detectors based on flux addition of LEDs in an integrating sphere"
Metrologia, Volume 51, Number 1, pp. 25-32, (2014).

- 積分球光源法と重畳法を併用し、均一光照射による安定な評価が可能である。
- リニアリティ比 $r^{(n)}$ は、重畳法を応用したリニアリティ評価指標である。
- LED_A、LED_Bを点灯した時のディテクタ電流を I_A 、 I_B 、LED_AとLED_Bの両方を点灯した時のディテクタ電流を I_{AB} としてリニアリティ比 r_{AB} を算出する。
- 理想的なリニアリティ比は1であり、1から外れた領域が応答非直線領域である。

Siフォトダイオードの非直線性の評価

NIR分光器 ディテクタSi_B型 リニアリティ比 LED中心波長890 nm

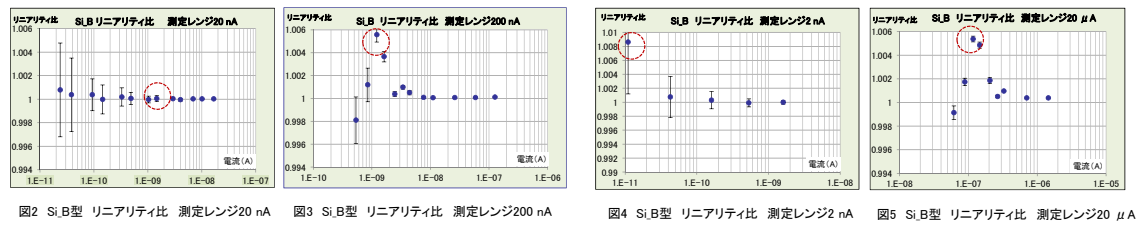


表2 標準電球及びソーラシミュレータ
測定時のディテクタ電流 LED中心波長890 nm

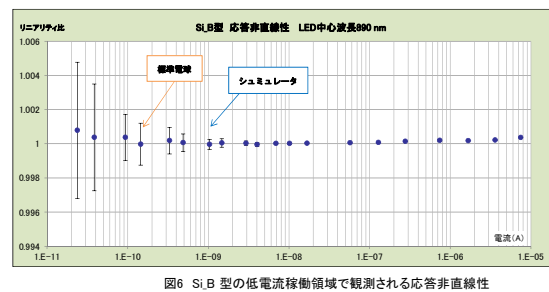
標準電球 500 W 149.90 (pA)	ソーラシミュレータ 1075.49 (pA)
------------------------------	---------------------------

ディテクタ電流1.2 nAのリニアリティ比が測定レンジ20 nAと200 nAで異なる。測定レンジ2 nA、200 nA、20 μAで、リニアリティ比の増加・減少する特異点(応答非直線領域)が存在する。

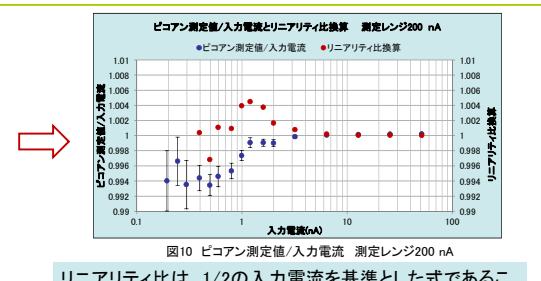
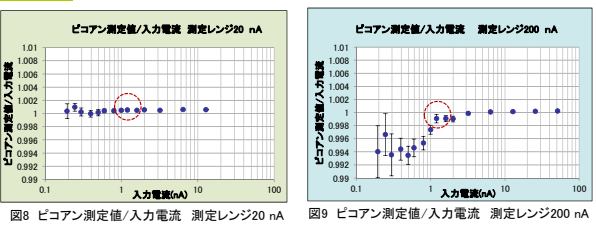
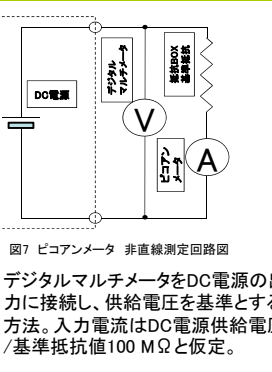
表1 Si_B型のリニアリティ比が増加・減少する特異点

ゲイン切換	測定レンジ(A)	リニアリティ比の特異点(A)	特異点/測定レンジ
ゲイン1	2 n	12 p (1.2E-11)	6.0E-03
	20 n	12 p (1.2E-11)	6.0E-04
ゲイン2	200 n	1.2 n (1.2E-09)	6.0E-03
	2 μ	1.2 n (1.2E-09)	6.0E-04
ゲイン3	20 μ	0.12 μ (1.2E-07)	6.0E-03

ピコアンメータは 2 nAと20 nA、200 nAと2 μA、20 μAと200 μAと二レンジごとにゲインを切り換える。リニアリティ比の特異点と各測定レンジの比を取ると、2 nA、200 nA、20 μAレンジでは6.0E-03、20 nA、2 μAレンジでは6.0E-04と、規則性がある。このことから、ピコアンメータ自身のゲインの入出力特性に非直線領域が存在する可能性を見出した。



ピコアンメータの非直線領域の測定



デジタルマルチメータをDC電源の出力に接続し、供給電圧を基準とする方法。入力電流はDC電源供給電圧/基準抵抗値100 MΩと仮定。

測定レンジ200 nAレンジでは、0.2 nA~1.2 nAの範囲で(ピコアンメータの測定値/入力電流)が1以下に減少していく。この点が、Si_Bのリニアリティ比 $r^{(n)}$ の測定で示した表1のリニアリティ比の特異点1.2 nAと一致する。

リニアリティ比は、1/2の入力電流を基準とした式であることから、測定結果の任意入力電流の(ピコアンメータ測定値/入力電流)の値と、その1/2の入力電流時の(ピコアンメータ測定値/入力電流)の値の比(リニアリティ比換算)をグラフ化すると、Si_Bのリニアリティ比換算のグラフは図10となり、図3のSi_Bでの結果と高近似な曲線を描く。

結論

- ① ピコアンメータの非直線領域の存在を確定できSiフォトダイオードで観測された応答非直線性がデバイスの特性ではなく、ピコアンメータの特性によるものであることを明らかにできた。
- ② ピコアンメータの非直線領域は、0.1 nA以下の電流領域にあるため、この問題を解決する測定にはフェムトピコアンメータの適用が必要である。
- ③ ピコアンメータとフェムトピコアンメータによる測定結果の比較により、評価結果の最終的な妥当性検証を行う予定である。

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から受託して実施したものであり、関係各位に感謝する。

絶対放射計測の歴史的推移と精度向上の為の技術課題

武田俊輔 猪狩真一

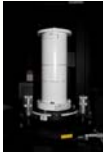
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 評価・標準チーム

研究の目的

- ・ 基準太陽電池の校正の不確かさの低減には、照射光であるソーラシミュレータや自然太陽光の放射照度の絶対測定が不可欠である。
- ・ 産総研における基準太陽電池の校正の不確かさ評価の結果、分光放射計のリニアリティの改善や超高温定点黒体炉の利用技術の実用化により、残る課題は放射照度の絶対放射測定の不確かさの低減であることが明らかとなった。絶対放射計測の歴史的推移と精度向上のための技術課題の抽出が本研究の目的である。



基準太陽電池セル



絶対放射計

内容

絶対放射計の歴史的推移

- ・ 年表によるまとめ
- ・ 年代毎の絶対放射計の比較検討

絶対放射計の基本的な計測原理

- ・ パッシブ型の絶対放射計測の基本原理
- ・ アクティブ型の絶対放射計測の基本原理

精度向上の為の技術課題の抽出

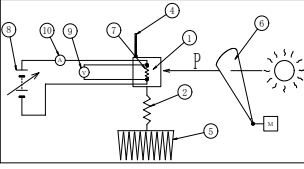
- ・ 絶対放射計の受光センサの構造の検討
- ・ 絶対放射計の計測系の検討

結果

絶対放射計の歴史的推移

年代	機種名等	センサ部	方式	その他	文献
1969	PACRAD	白金線を巻き付けた円錐形	A	凹面で受光 デュワー付き	1)
1985	国際照明学会誌	円盤状基板に金属薄膜パターン	A	平面で受光	2)
1986	PMO-6	白金線を巻き付けた円錐形	A	凸面で受光	3)4)
2004	SIARs	円錐形	A	凹面で受光	5)
2014	Digital Absolute Radiometer (DARA)	円錐形	A	凹面で受光 宇宙機搭載用	6)
2016	AHF	円錐形	P	凸面で受光	7)
2016	MAR-1	円錐形	P	凹面で受光	8)

- ・ 絶対放射計は、放射エネルギーを 熱エネルギーとして捉える点ではボロメータと原理的に等しいが、自己校正が可能であることを特長とする。
 - ・ JPLのPACARD以降、受光効率向上の為、銀箔で作られた円錐に白金線を巻き付け、これに黒色低反射処理を施して円錐の凹面から受光するセンサ構造の機種が多い。
 - ・ 例外的に、エッチングによる平面の受光センサも作られているが、屋外用として採用されていない。
 - ・ WRRの基準でもあるDAVOS INSTRUMENTSのPMO-6とEPPLEYのAHFは、円錐の凸面から受光している。これも、受光効率の向上を考慮しての構造である。
 - ・ Zürich大のDARAは、円錐型センサの凹面で受光するが、1個の参照用センサと2個の受光センサの合計3個を持つ。受光センサの追加の1個は、太陽定数を測定するために宇宙機に搭載する上での受光部の劣化を想定した予備的な構造と考えられる。
 - ・ 中国のSIARsの基本的な構造は従来機種とほぼ同じであるが、小型化・軽量化が実現されている。
 - ・ ロシアのMAR-1は凹面からの受光であり、白金線を4系統具備する複雑な計測系が特徴である。
- *なお、左表中の「方式」「A」はアクティブ型であり受光センサと同等の参照用センサを具備する。「P」はパッシブ型であり、参照用センサを具備しない。



パッシブ型絶対放射計の計測原理

- P放射束
 ①熱容量既知のサーマルマス ②支持材 ④温度センサ
 ⑤ヒートシンク ⑥シャッター ⑦ヒータ ⑧直流電源
 ⑨電圧計 ⑩電流計

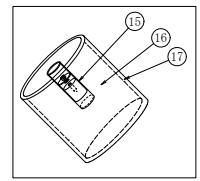
アクティブ型絶対放射計の計測原理

受光用と同等の参照用センサも具備し、バックグラウンドを除去する。パッシブ型に比べて計測時間が長い、ノイズ耐性が強い。

⑥が閉じられ①の温度が元の温度に戻った時点で、それに組み込まれた⑦に⑧により電流が通じられる。その時のヒータの両端の電圧は⑨で、電流は⑩で記録され、④の示す温度が放射束Pの入力された時と同じになった時点までの、⑨、⑩の値から計算されるエネルギーは放射束Pと同じエネルギーである。

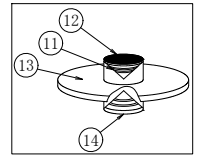
技術的課題

- ・ 既存の受光部が主に円錐形である理由は、黒色塗料の反射率が低いことを前提としたものである。構造が複雑であるため再生産性に難があり、絶対放射計測における機差の原因でもある。
- ・ 従来の絶対放射計の殆どでは、外部との熱の出入が遮断されていない。アクティブ型では受光センサと参照用センサで差分をとり、外部からの熱の出入を計算上は相殺できるが、パッシブ型では無視できない。
- ・ 絶対放射計でも、外部からの熱によるノイズを除去する為に内部にデュワー（真空魔法瓶）を内蔵して、外部との熱の出入を遮断する機種（JPLのPACARD）もあるが、デュワー内部にヒートシンク（放熱器）を設ける必要がある点で構造的な矛盾がある。



内部にデュワーを持つ絶対放射計

既存の絶対放射計のセンサ部は複雑



絶対放射計のセンサ例

- ⑬ 絶対放射計主要部
- ⑭ ヒートシンク
- ⑯ デュワー（真空層）
- ⑫ 銀箔を円錐形に加工し、白金線の抵抗体を巻き付けている。
- ⑬ 低反射率の黒色処理
- ⑭ 外部と熱の出入のあるヒートシンク
- ⑮ 参照用のセンサ

結論

- ・ 既存の円錐形の受光センサは構造上、再生産性に難がある。
- ・ 近年の飛躍的に向上した黒色低反射処理を適用する事で、受光センサ構造の単純化を図ることが必要である。
- ・ 外部との熱の出入を遮断することが不確かさ低減の上で必要である。ボロメータの受光部構造の適用可能性について引き続き検討を行う。

参考文献

- 1) JPL Technical Report 32-1396, Primary Absolute Cavity Radiometer, J. M. Kendall, Sr. (1969).
- 2) Electrically Calibrated Thermal Detectors of Optical Radiation (Absolute Radiometers), Publication CIE, No. 65 (1985).
- 3) Absolute radiometers (PM06) and their experimental characterization, Robert W. Brusa and Claus Frohlich, Applied Optics / Vol. 25, No. 22, p. 4173 / 15 November 1986.
- 4) Calibration of a Solar Absolute Cavity Radiometer with Traceability to the World Radiometric Reference, Ibrahim Reda, January 1996, NREL/TP-463-20619.
- 5) YU Bing-xi, FANG Wei, and WANG Yu-peng, Optics and Precision Engineering, Vol. 12, No. 4, p. 353, August 2004.
- 6) Advances in Solar Radiometry, Markus Suter, 2014, University of Zurich, Faculty of Science.
- 7) Optical reflectance of pyrheliometer absorption cavities: Progress toward SI-traceable measurements of solar irradiance, H. J. Patrick, T. A. Germer, C. J. Zarobila, C. C. Cooksey, and H. W. Yoon, Applied Optics / Vol. 55, No. 23, p. 6346 / 10 August 2016.
- 8) International comparisons of the absolute radiometer MAR-1 with the world radiation standard, M. N. Pavlovich, S. P. Morozova, V. I. Sapritskii, A. A. Stakharnyi, and B. E. Lisyanski, Measurement Techniques / Vol. 58, No. 11, p. 1280 / February 2016.

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から受託して実施したものであり、関係各位に感謝する。

新型太陽電池セル・モジュールの性能評価技術

吉田正裕・志村陽哉・上田孝・山越憲吾・杉本和則・佐々木 あゆ美・菱川善博
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 評価・標準チーム

研究の目的

高効率な発電性能を有する各種新型太陽電池の研究・開発が国内外の研究機関において精力的に進められている。これら新型太陽電池の性能特性を高精度に評価するには、個々の特徴（構造、電気・光の応答性など）に応じた性能評価法の開発が必要である。

当チームでは、新開発される各種新型太陽電池の高精度性能評価法の開発に取り組んでいる。本発表では、その中で結晶シリコンとペロブスカイト太陽電池に関する取り組みを紹介する。

新型太陽電池の特徴・特性に応じた性能評価技術の開発

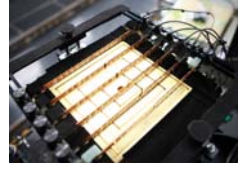
新型太陽電池	特徴・特性	性能評価法開発(実施中)
高効率結晶Si ヘテロ接合、バックコンタクト、特殊バスバー形状	高V _{oc} 化、高容量性 I-Vヒステリシス 各種バスバー構造	I-V測定掃引速度の最適化 多数バスバー対応 プローブ影の影響の検討
両面受光型	Bi-faciality	表面・裏面照度応答性、線形性検証
CIGS、薄膜	過渡応答(高速、低速)	I-V測定掃引速度の最適化 V _{pm} ホールド法の併用
ペロブスカイト 色素増感	遅い応答時間 I-Vヒステリシス 不安定性	低速掃引I-V測定(数秒~数百秒) V _{pm} ホールド法やMPPT法による最適測定手法

各種太陽電池の性能評価技術

結晶シリコン

①ペアセル測定

1. 多数バスバー構造への対応
2. プローブ影による照度(I_{sc})への影響



3~6本まで対応可能

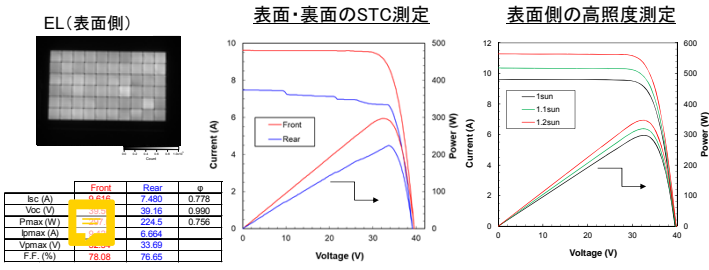


ケルビンプローブを使用した影なし測定^[1]と照度補正

②両面受光モジュール測定 IEC TS 60904-1-2^[2]に準拠

- ◆ 表面(F)、裏面(R) 各面での1 sun, STC測定
⇒ **Bi-faciality coefficients**: Φ_{isc} , Φ_{voc} , Φ_{pmax}
($\Phi_{isc} = I_{sc, rear} / I_{sc, front}$, 他同様)
- ◆ 表面側からの等価照度での高照度測定(一光源測定の場合)^[2]
等価照度として、 $1000 + 100 \times \phi$ (W)
 $1000 + 200 \times \phi$ (W) の2条件での測定

両面受光モジュール測定結果(1例、60セルモジュール)



ペロブスカイト太陽電池

“(Quasi-) steady-state”性能測定・評価^[3, 4, 5]

- **Asymptotic法** (又は、Dynamic I-V法とも)
- **V_{pm}ホールド法**
バイアス電圧をV_{pm}に保持し、P_{max} (I_{pm}) 測定
- **最大電力点追従制御**
(Maximum Power Point Tracking; **MPPT**)

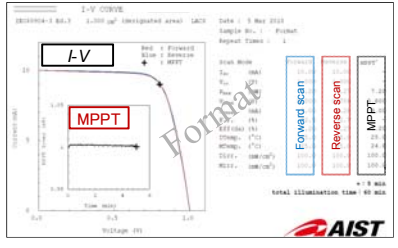
MPPT法による発電性能評価手順の開発(産総研での取り組み)

測定手順

Step 0: 事前測定 (V_{pm}, I_{pm} 概算値の算出)
Step 1: 光照射 & MPPT制御開始(温度制御も)
Step 2: 出力(P_{max})、V_{pm}、I_{pm} をモニター
出力安定性の確認(現状目安として5分間)
→ 安定性確認後、P_{max}測定
Step 3: I-V測定(順方向、逆方向)

測定手順の詳細、過渡応答の影響については、評価・標準チームからの成果報告(ポスターNo.P.25)も参照。

ペロブスカイト太陽電池の場合の報告書(例)



各種サイズのペロブスカイト太陽電池で、MPPT測定法を実施・検証

- セル(面積~1 cm²)
- サブ、ミニモジュール
- モジュール(> 800 cm²)

まとめと今後の展開

- 各種新型太陽電池の個々の特徴に応じた性能評価法の開発を進めた。
- 結晶シリコンペアセルでは、プローブ影の影響を考慮した測定手法として、影なし測定と照度補正を組み合わせた測定法を実施。
- 両面受光モジュールについて、IEC TSに準じた性能評価法の実施可能性を検証した。
- ペロブスカイト太陽電池のMPPT法を用いた性能評価法を開発し、検証した。

今後の展開:

- ・結晶シリコンペアセルでは、マルチバスバー、バスバーレス化が進んでおり、それらに対応した技術開発。
- ・新用途向け太陽電池の性能評価法開発(曲面、低照度、各種設置方法等)。

参考文献

- [1] J. Hohl-Ebinger *et al.*, Proc. of 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 2012-2016 (2008, Valencia).
- [2] IEC TS 60904-1-2:2019, “Photovoltaic devices - Part 1-2: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices”.
- [3] Y. Hishikawa, H. Shimura, T. Ueda, A. Sasaki, and Y. Ishii, *Curr. Appl. Phys.* **16**, 898 (2016).
- [4] R. B. Dunbar *et al.*, *J. Mater. Chem. A* **5**, 22542 (2017).
- [5] IEC TR 63228:2019, “Measurement protocols for photovoltaic devices based on organic, dye-sensitized or perovskite materials”.

<謝辞>本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の受託研究として実施したものであり、関係各位に感謝する。

Temperature and Irradiance Dependences of the Current and Voltage at Maximum Power of Crystalline Silicon PV Modules

Manit Seapan¹, Yoshihiro Hishikawa², Masahiro Yoshita², and Keiichi Okajima¹

¹Department of Risk Engineering, University of Tsukuba

²Research Center for Photovoltaics, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Purpose

This study analytically and experimentally investigated expressions for the temperature and irradiance dependences of current at maximum power I_{mp} and voltage at maximum power V_{mp} of crystalline silicon solar cells. Based on these results, a new formula for temperature correction of V_{mp} was discussed. The simple formula for estimating maximum power point (MPP) P_{max} was presented, which was derived from the corrected I_{mp} and V_{mp} . The correction formulas were investigated without information on current-voltage (I/V) curve parameters or diode parameters.

Formulas of I_{mp} and V_{mp}

The output current I of the PV module can be approximately expressed as follow,

$$I = I_{sc} - I_0 \exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{N_c n k T}\right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

The derivative of V in (1) with respect to I at MPP and the following is satisfied,

$$-\left.\frac{dV}{dI}\right|_{mp} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (2)$$

The I_{mp} can be expressed as follow

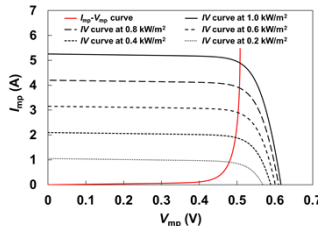
$$I_{mp} = V_{mp} \cdot \frac{\frac{1}{R_{sh}} + \frac{qI_0}{N_c n k T} \exp\left(\frac{q(V_{mp}+I_{mp}R_s)}{N_c n k T}\right)}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}} + \frac{qI_0 R_s}{N_c n k T} \exp\left(\frac{q(V_{mp}+I_{mp}R_s)}{N_c n k T}\right)} \quad (3)$$


Fig. 1. The I_{mp} vs. V_{mp} curve calculated from Eq. (3) and I/V curves at 5 irradiance levels.

Simulation of the temperature and irradiance dependences of I_{mp}

From Eq. (1), we obtain

$$I_{mp} = I_{sc} + I_{sc}(T - T_0) - A \cdot \exp\left(\frac{q(V_{mp}+I_{mp}R_s)}{N_c n k T} - \frac{E_g}{kT}\right) - \frac{V_{mp}+I_{mp}R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

Here, α is the temperature coefficient of I_{sc} which is assumed to be 0.05%/K, $T_0 = 25$ °C (298.15 K), N_c is the number of series-connected cells in the module, and I_0 is assumed to be expressed as $I_0 = A \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$. Here, A is constant parameter and E_g is the bandgap energy. The E_g was assumed to be 1.12 eV [1]. The results show that the temperature coefficient of I_{mp} is within ± 0.015 or 0.02%/K and the nonlinearity of I_{mp}/G is within ± 0.013 .

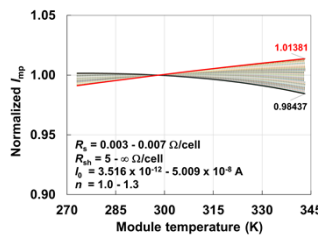
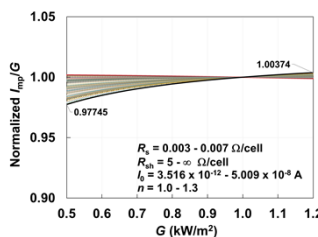



Fig. 2. Normalized I_{mp} vs. module temperatures at 1 kW/m². Fig. 3. Normalized I_{mp}/G vs. G at 25 °C.

Translation equation

As discussed in the previous sections, the I_{mp} is nearly constant for a wide range of temperature variation. Therefore, the translation formula for voltage from [2] can be used as follow,

$$V'_{mp2} = V_{mp1} + \frac{T_2 - T_1}{T_1} \left(V_{mp1} - \frac{nE_g}{q} \cdot N_c \right) \quad (5)$$

Considering the slight temperature dependence of I_{sc} Eq. (5) can be corrected as follows,

$$V_{mp2} - V'_{mp2} = \frac{N_c n k T_2}{q} \ln\left(\frac{I_{sc2} - I_{mp1}}{I_{sc1} - I_{mp1}}\right) \quad (6)$$

$$-\left.\frac{\partial V}{\partial I}\right|_{mp} = \frac{V'_{mp2}}{I_{mp1}} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (7)$$

$$\Delta V = V'_{mp2} \frac{\Delta I}{I_{mp1}} \quad (8)$$

if R_s is small, $\Delta I \cong I_{sc} \cdot \alpha(T_2 - T_1)$. (9)

If we approximate $\frac{I_{mp}}{I_{sc}} \approx 1$,

$$\Delta V \cong V'_{mp2} \times \alpha(T_2 - T_1). \quad (10)$$

The equation for temperature correction of V_{mp} , which does not include I_{sc} , can be expressed as follow,

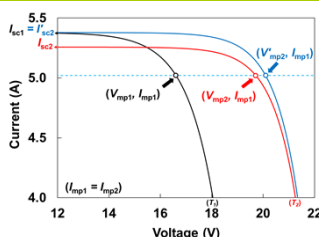


Fig. 4. The V_{mp1} is measured V_{mp} and V'_{mp2} is corrected V_{mp} by Eq. (5).

$$V_{mp2} = V'_{mp2} + V'_{mp2} \times \alpha(T_2 - T_1). \quad (11)$$

The P_{max} at the target temperature can be estimated if the G is known by a separate measurement,

$$P_{max2} \cong V_{mp2} \times \frac{1000}{G_1} I_{mp1}. \quad (12)$$

Equations (5) and (11) were used for the outdoor experimental V_{mp} of a commercial crystalline silicon PV module. Here, the $nE_g/q = 1.2$ V was chosen from the best-fit to experimental data. The N_c of the module is 36.

Experimental results

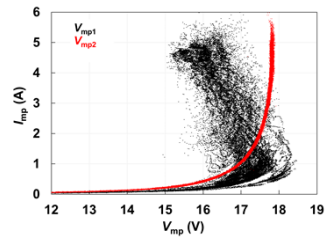


Fig. 5. Experimental I_{mp} vs. V_{mp1} and V_{mp2} plots for 28 days.

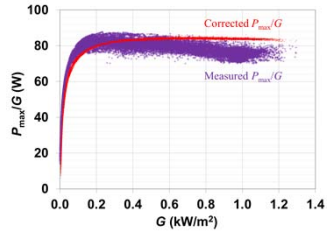


Fig. 6. Corrected P_{max}/G vs. G plot (28 days). Corrected P_{max} was calculated by corrected $P_{max} = V_{mp2} \times I_{mp1}$.

Conclusion

- From the experiments and simulations by using single diode model, the I_{mp} is shown to be nearly constant for temperature range about 0-70 °C. The simulation showed that the I_{mp} is nearly proportional to G in the irradiance range between 0.5 and 1.2 kW/m².
- The I_{mp} - V_{mp} curves corrected to 25 °C by the formula showed good reproducibility for many days.
- The P_{max} also showed good reproducibility with the standard deviation within 3.3% for the irradiance range between 0.2 and 1.2 kW/m².
- These results are useful for characterizing the performance of crystalline silicon PV cells and modules by using the I_{mp} and V_{mp} values.

Acknowledgment

This work is in part supported by NEDO under METI.

References

- [1] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 720-725 (2006).
- [2] Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, T. Takenouchi, and M. Yoshita, "Voltage Dependent Temperature Coefficient of the I - V Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, no. 1, 48-53 (2018).

IV特性の温度・照度依存性に直列抵抗が及ぼす影響

菱川善博、吉田正裕

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 評価・標準チーム

研究の目的

- ・最近重要性を増している、結晶シリコン太陽電池IV特性の温度特性高精度評価技術・補正技術を開発する。
- ・出力電圧、直列抵抗 R_s 、 n 値等、温度係数TCに影響する要素を明らかにして定量化する。

背景

- ・太陽電池の設置稼働量が増加するにつれて、屋外のような温度条件で動作する太陽電池の性能を正確に評価するニーズが高まっている。
- ・ヘテロ接合、裏面電極、PERC等の新構造は、いずれも温度係数が小さく高温動作時の性能低下が少ないメリットがある。この点でも温度係数の高精度な評価が重要である。

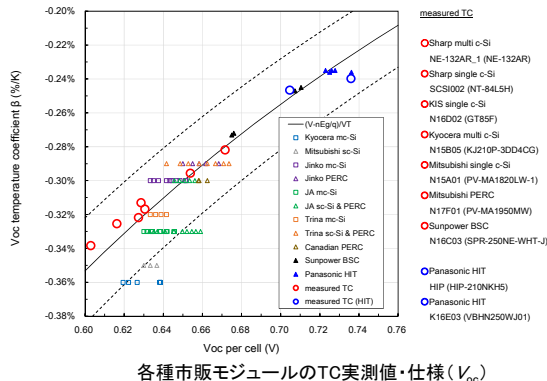
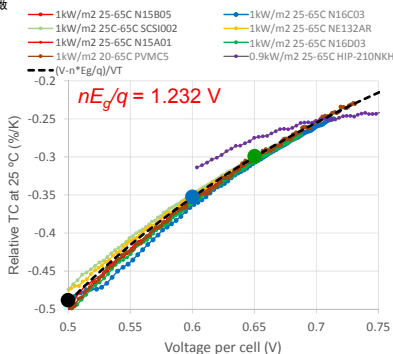
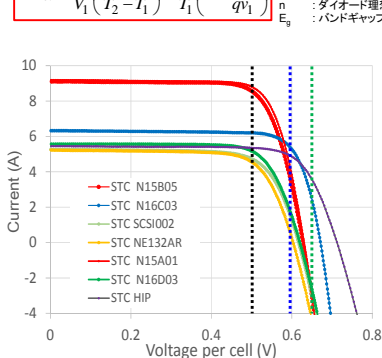
従来の知見

結晶シリコン太陽電池のTCは型式にかかわらずほぼ同一の関係式に従う。しかし、 $R_s=0$ の式が合う理由が不明であった*。

*セル全体の R_s の値は2照度法で求めた値で定義
実測0.1~0.3 Ω/モジュール、2~5 mΩ/セル

$$TC_{rel} = \frac{1}{V_1} \left(\frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1} \right) = \frac{1}{T_1} \left(1 - \frac{nE_g}{qV_1} \right)$$

TC_{cell}: 電圧温度係数/セル
V₁, V₂: 電圧、電圧/セル
n: ダイオード理想係数
E_g: バンドギャップ

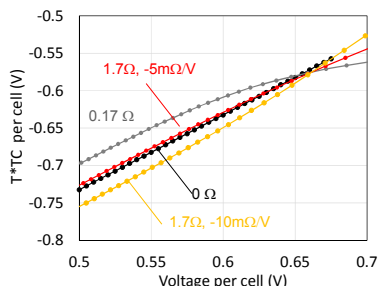


各種市販モジュールのTC実測値・仕様 (V_{oc})

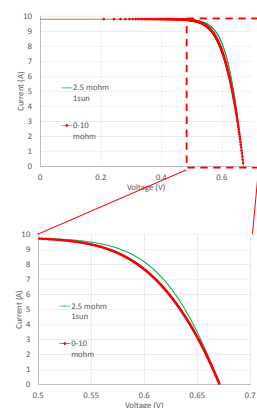
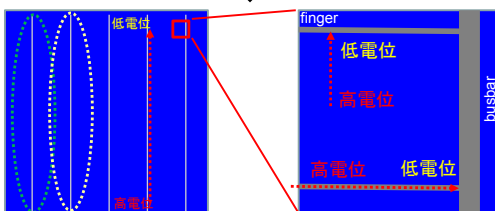
考察

R_s 等のパラメータに電圧依存性を仮定すると実測値に合う(シミュレーション結果)

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}}$$



シミュレーション例: セル内電位の分布 → セル全体の R_s が電圧依存性を示す要因例



結論

- ・結晶シリコン太陽電池のIV特性全体に応用できる温度依存性を考慮したTC式がセル、モジュールともに適用できることを確認できた(高精度)。STC補正としてIECに提案中。
- ・ $R_s \neq 0$ のデバイスでも成立(汎用性)。 R_s の電圧依存。
- ・セル内の面内不均一性(電位、 R_s 等)を考慮すると、セル全体としての R_s の電圧依存、温度特性、照度特性共に実験結果を説明できる。セル内電位の分布等が要因(ただし他の要素も有り得る)。
- ・(応用)IV温度照度補正、シミュレーション高精度化

参考文献

Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, T. Takenouchi, and M. Yoshita, "Voltage-Dependent Temperature Coefficient of the I-V Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules", IEEE J. Photovol. 8-1 (2018) 48-53.

O. Breitenstein, "Understanding the current-voltage characteristics of industrial crystalline silicon solar cells by considering inhomogeneous current distributions", Opto-Electron. Rev. 21-3 (2013) 259-282.

Y. Hishikawa, T. Takenouchi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, and M. Yoshita, "Translation of Solar Cell Performance for Irradiance and Temperature from a Single I-V Curve without Advance Information of Translation Parameters", IEEE J. Photovol. 9-5 (2019) 1195-1201.

謝辞: 本研究はNEDO委託研究の一環として実施したものであり、関係各位に感謝いたします。

PVMSを照度センサに用いた 屋外高精度性能評価技術

菱川善博、比嘉道也、武内貴和
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 評価・標準チーム

研究の目的

- 屋外での電流電圧(I/V)特性等、性能評価技術の高精度化技術を開発し、屋外で移動する太陽電池のO&M等運転コストの大幅な低減と迅速化を可能とする。
- 目標とする P_{max} 測定再現性: 1%以内(σ)

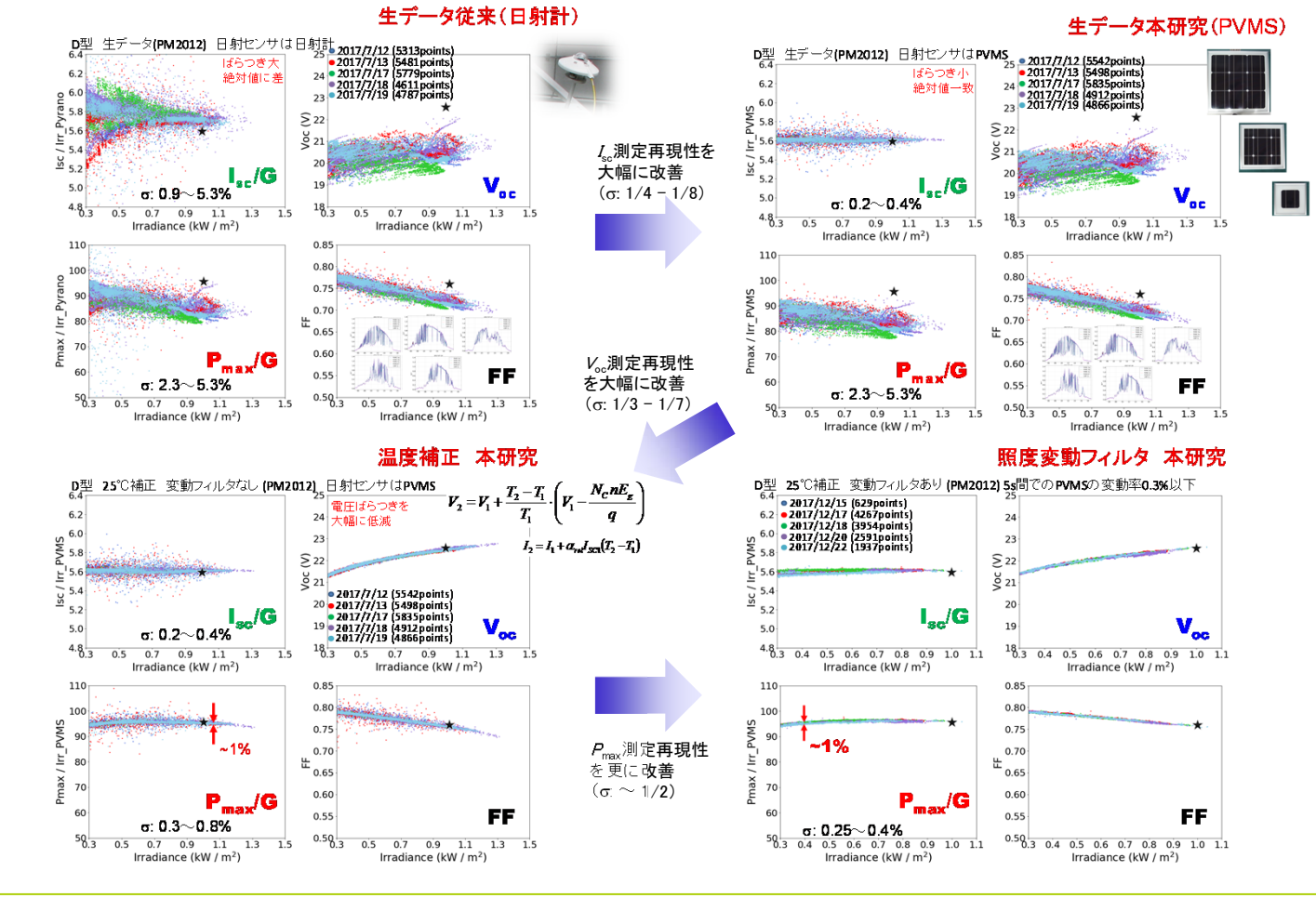
実験

PVMS(PV Module Irradiance Sensor)による日射計測を用いた高精度屋外I/V特性測定技術を開発して、市販結晶太陽電池モジュール(結晶シリコン、SHJ、薄膜)の屋外I/V特性測定を実施して再現性を検証した。

共同研究機関(宮崎大、岐阜大、立命大、東京理科大、JET)と連携して以下の技術開発を行った(ここでは共同研究機関の研究詳細は割愛)。

- モジュール温度測定の高精度化
- スペクトルミスマッチ誤差低減
- 日射時間・空間変動フィルタ技術開発
- システム計測への展開、高能率化

結果と考察



結論

屋外性能評価再現性1%(σ)以内の目標を達成した。以下の要素が特に高精度化に重要であった。

- 日射計測に、応答速度・スペクトル特性がMUTと同じ特長を持つPVMSの採用。
- IV特性新温度補正技術の開発と高精度モジュール温度計測。
- 日射の時間変動、空間むらによる誤差をフィルタする技術開発。
- PVMSと被測定モジュールMUTの設置角、傾斜角の一致。PVMSの構造、材料をMUTと類似とする。

参考文献

Y. Hishikawa et al., "Precise Outdoor PV Module Performance Characterization under Unstable Irradiance" IEEE J. Photovol. 6-5 (2016) 1221-1227.

菱川他「屋外における太陽電池性能高精度測定の要素技術」日本太陽エネルギー学会/日本風力エネルギー学会合同研究発表会講演論文集(2017) 197-200.

Y. Hishikawa et al., "Voltage-Dependent Temperature Coefficient of the I-V Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules" IEEE J. Photovol. 8-1 (2018) 48-53.

謝辞: 本研究はNEDO委託研究の一環として実施したものであり、関係各位に感謝いたします。

太陽電池セルに到達する 太陽光スペクトル分布に火山灰が及ぼす影響

西澤 徳紘¹、平山 齊¹、川畑 秋馬¹、吉村 幸雄²、増田 淳³

¹鹿児島大学、²鹿児島県工業技術センター、³産業技術総合研究所

研究背景と目的

【研究背景】鹿児島地域は日照量が豊富であるが、桜島火山降灰による太陽電池(PV)モジュールの直接的な発電量低下が懸念されており、降灰環境下における発電量の定量的評価や降灰対策技術の開発が必要である。

【研究目的】PVモジュール上への積灰を抑制し発電量最大化を実現するために、降灰環境下に適したモジュールの表面加工条件や設置条件を明らかにすること並びに降灰環境下に適したPVセルに関する知見を得ることである。

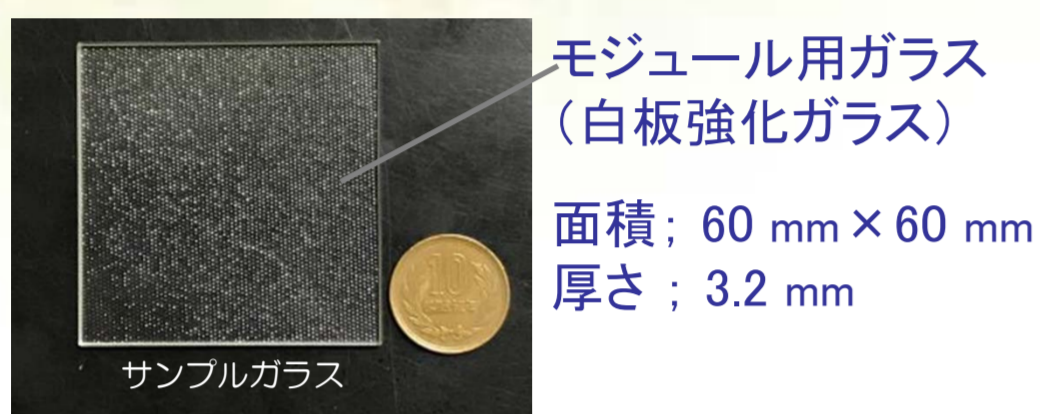
実施内容

これまで、PVモジュールの設置条件と火山灰付着量の関係や降灰によるPVモジュールの出力低下特性などを測定してきた^{[1]-[3]}。

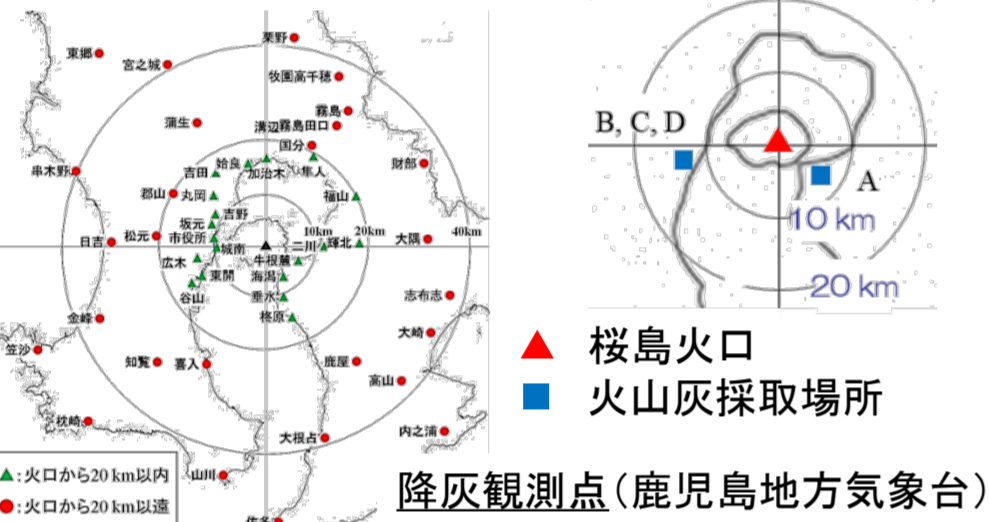
今回は、桜島火山灰を用いた降灰模擬実験により、火山灰がPVセルに到達する太陽光スペクトル分布に及ぼす影響について詳細に調べたので、その結果について報告する。

サンプルガラスと使用した火山灰

【サンプルガラス】

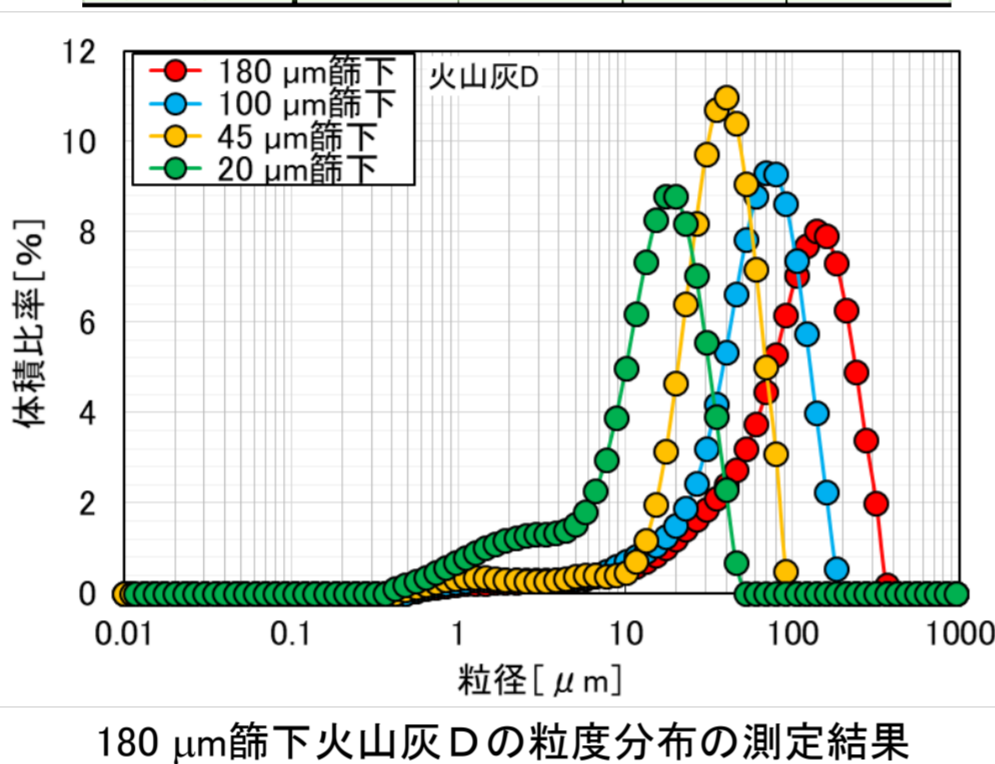


【桜島火山灰採取場所】



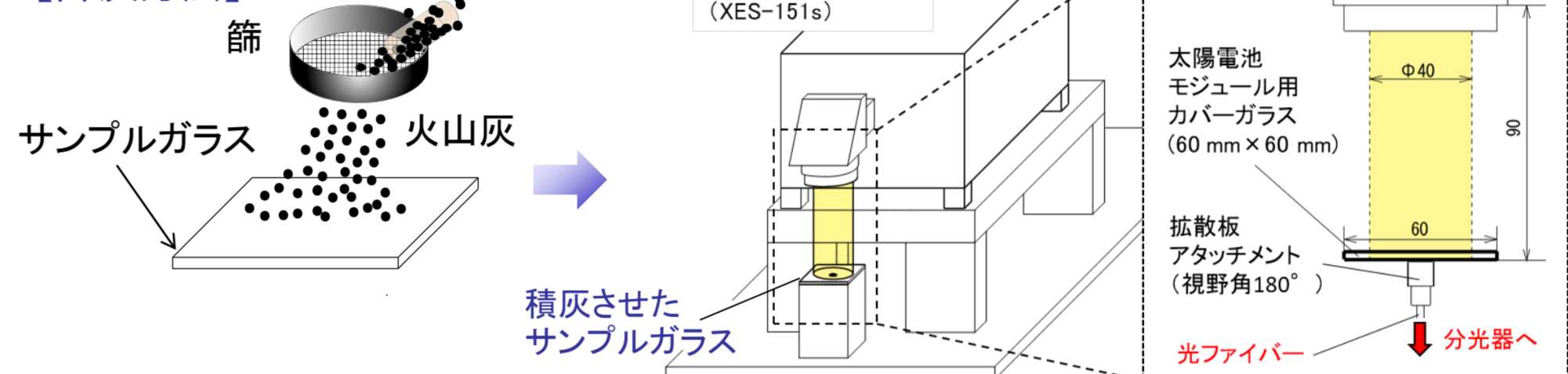
【使用した火山灰の粒度分布】

	篩による分類 [μm]			
	180以下	180~250	250~500	500以上
火山灰A	74%	10%	12%	4%
火山灰B	76%	14%	9%	1%
火山灰C	54%	16%	27%	3%
火山灰D	60%	28%	12%	0%



降灰模擬実験と透過スペクトル分布の測定方法

【降灰方法】



【測定手順】

1. サンプルガラスを水平に設置し、一様に降灰
2. 積灰量を0.10 g刻みで0.10~0.50 gまで増やし、その都度スペクトル分布を測定

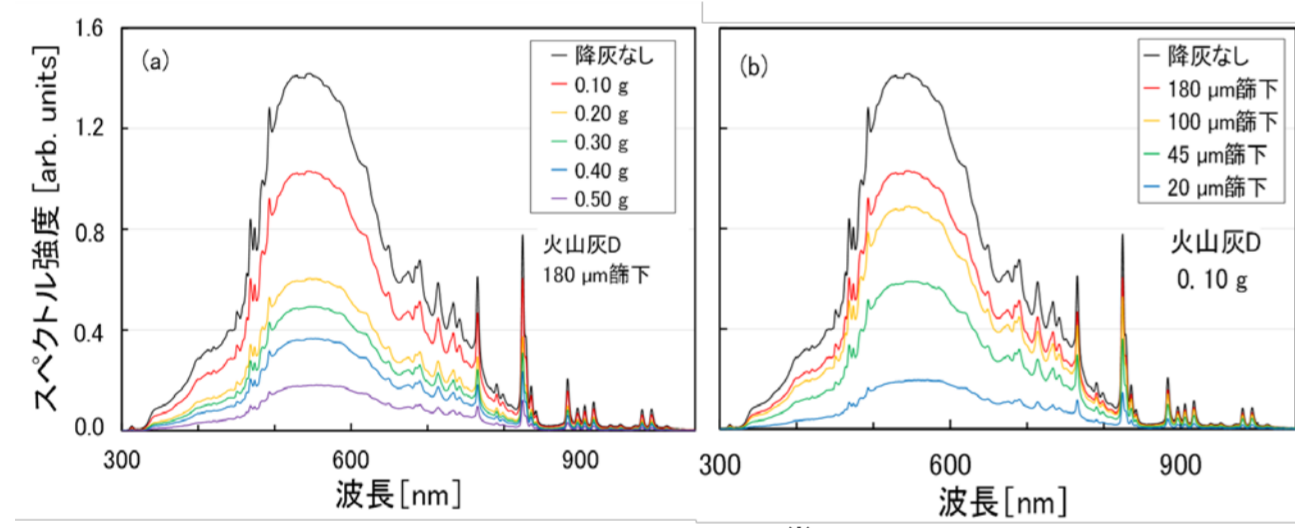
積灰量とサンプルガラス上の積灰状況 (180 μm篩下 火山灰D)

堆積量	0.00 g	0.10 g	0.20 g	0.30 g	0.40 g	0.50 g
単位面積当たり積灰量	0 g/m ²	約28 g/m ²	約56 g/m ²	約83 g/m ²	約111 g/m ²	約139 g/m ²

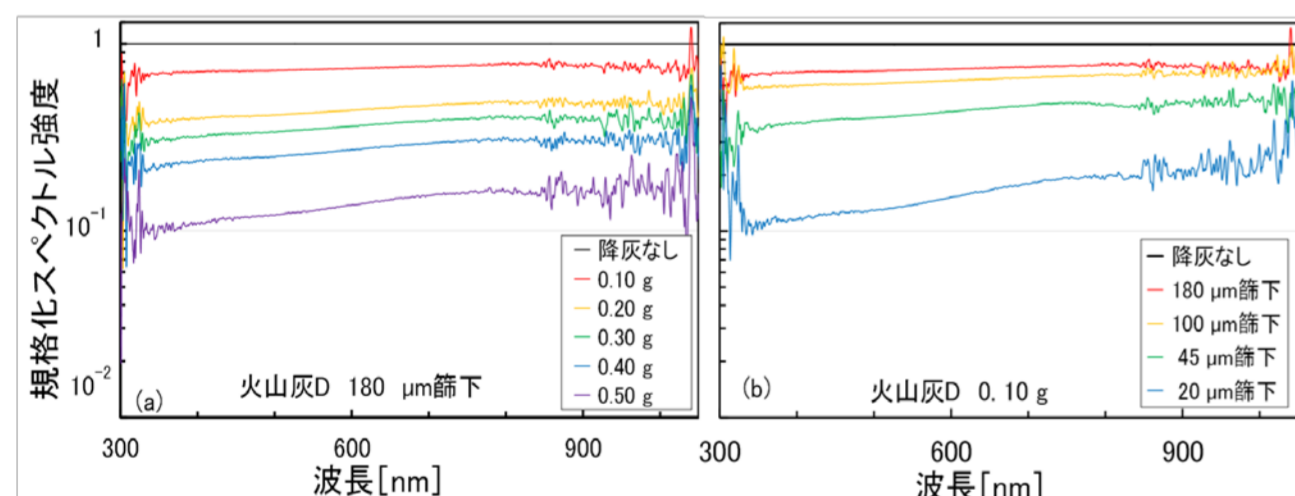
鹿児島市内の月間降灰量
約10 ~ 約300 g/m²

透過スペクトル分布の測定結果

積灰によるスペクトル強度の変化



積灰による規格化スペクトル強度^{*}の変化

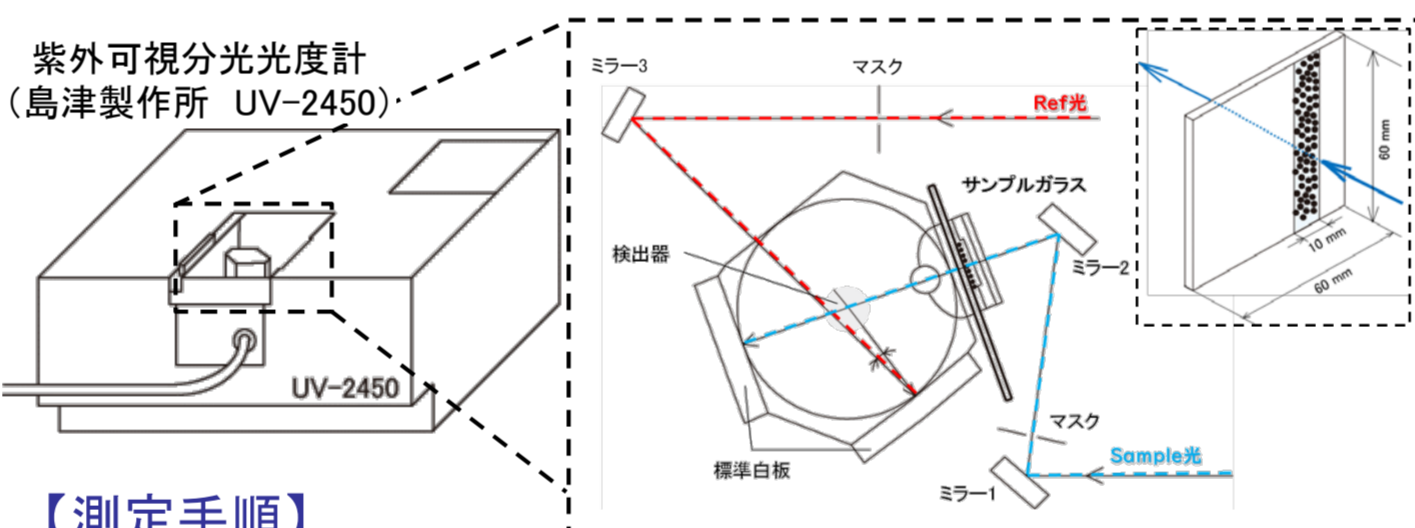


^{*} 降灰無し時のデータで積灰時のデータを規格化

可視光領域では、積灰量が増加するほど、粒径が小さくなるほどスペクトル強度の低下率がそれ以外の波長領域の値に比べ大きくなった。

積分球を用いた透過及び反射スペクトル分布の測定

【透過スペクトル分布の測定方法】



【測定手順】

1. サンプルガラスは測定上、垂直に設置する必要あり
2. スプレーのりをガラスに塗布^{*} (図中の10 mm x 60 mmのエリア)
3. 積灰量を0.02~0.05 gまで増やし、その都度スペクトル分布を測定

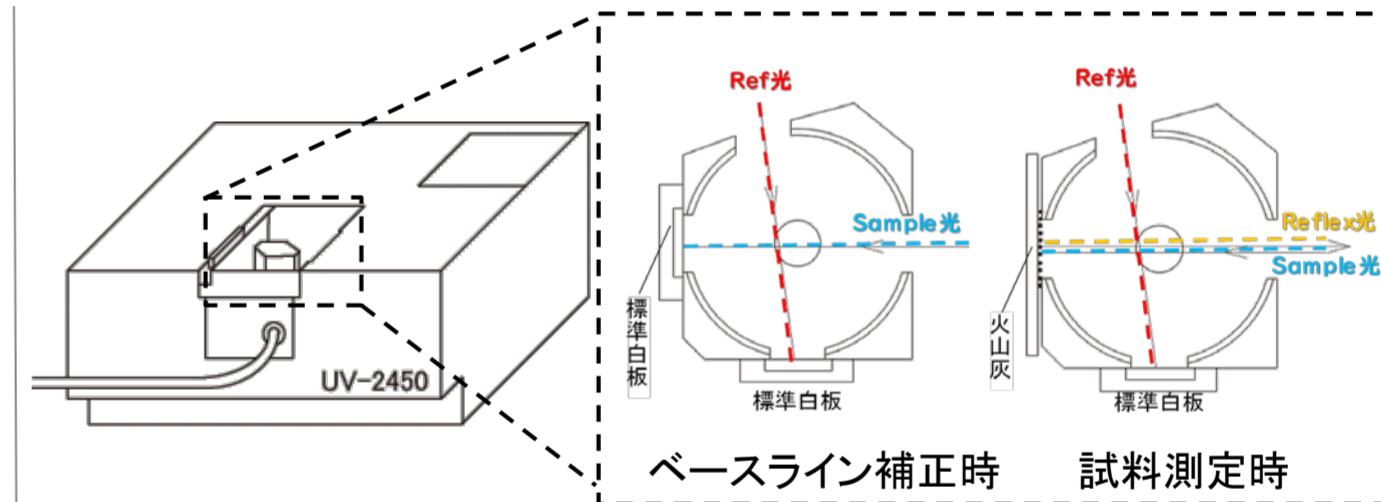
^{*} スプレーのり塗布の有無でスペクトル分布に変化がないことを事前に確認済

積灰量とサンプル上の積灰状況 (45 μm篩下 火山灰D)

堆積量	0 g	0.02 g	0.03 g	0.05 g
単位面積当たり積灰量	0 g/m ²	約33 g/m ²	約50 g/m ²	約83 g/m ²

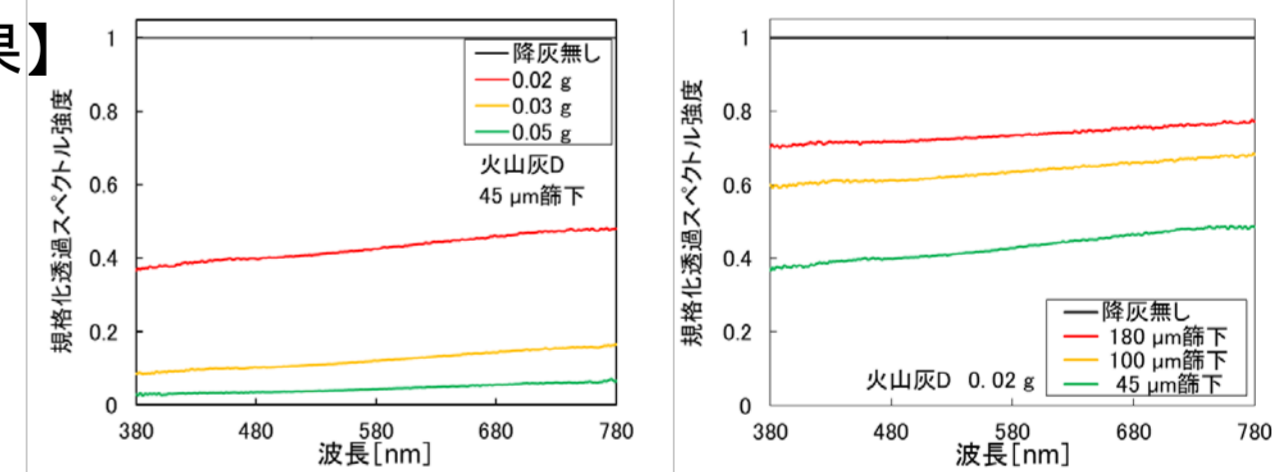
鹿児島市内の月間降灰量
約10 ~ 約300 g/m²

【反射スペクトル分布の測定方法】



上図のようにサンプルガラスをセットする必要がある。
→ 積分球の内部に火山灰が落ちる可能性があるため、この測定は困難
→ 別の簡易的な方法での測定を実施

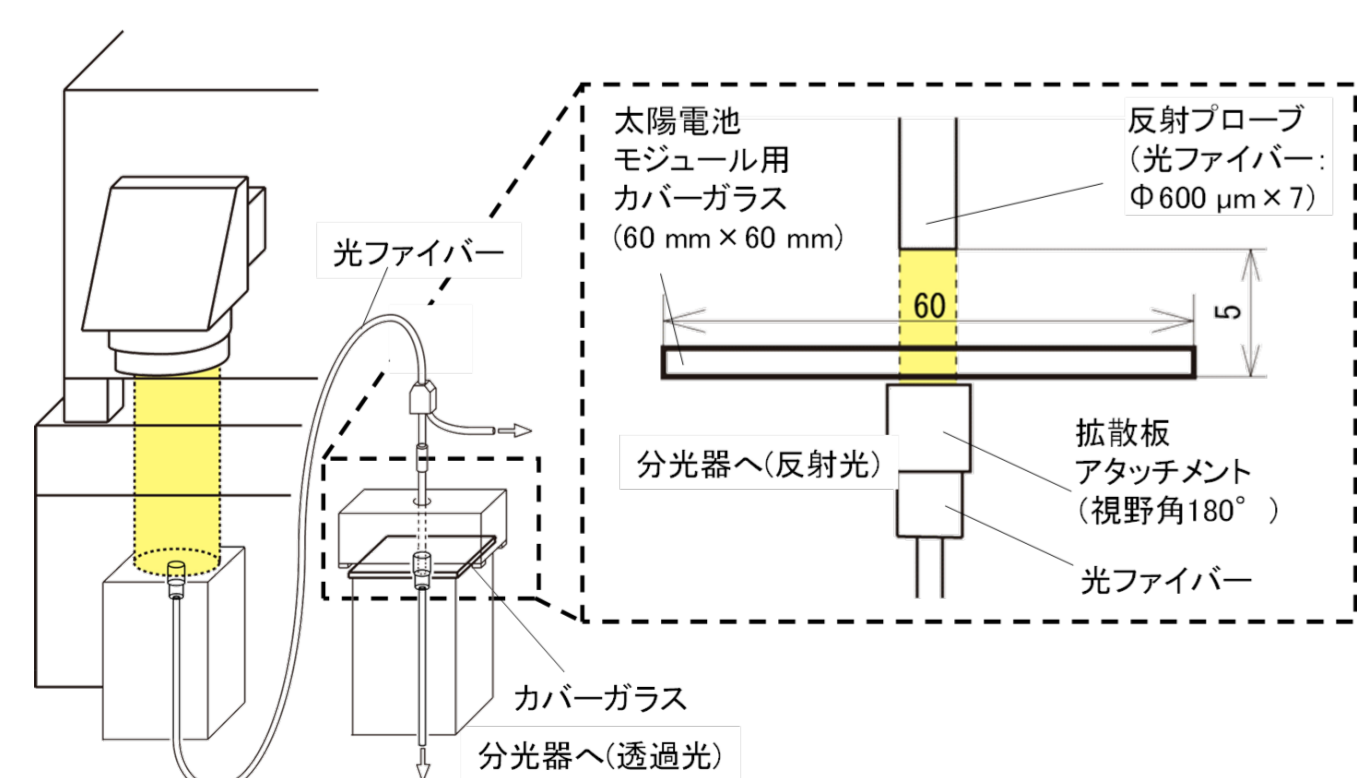
【測定結果】



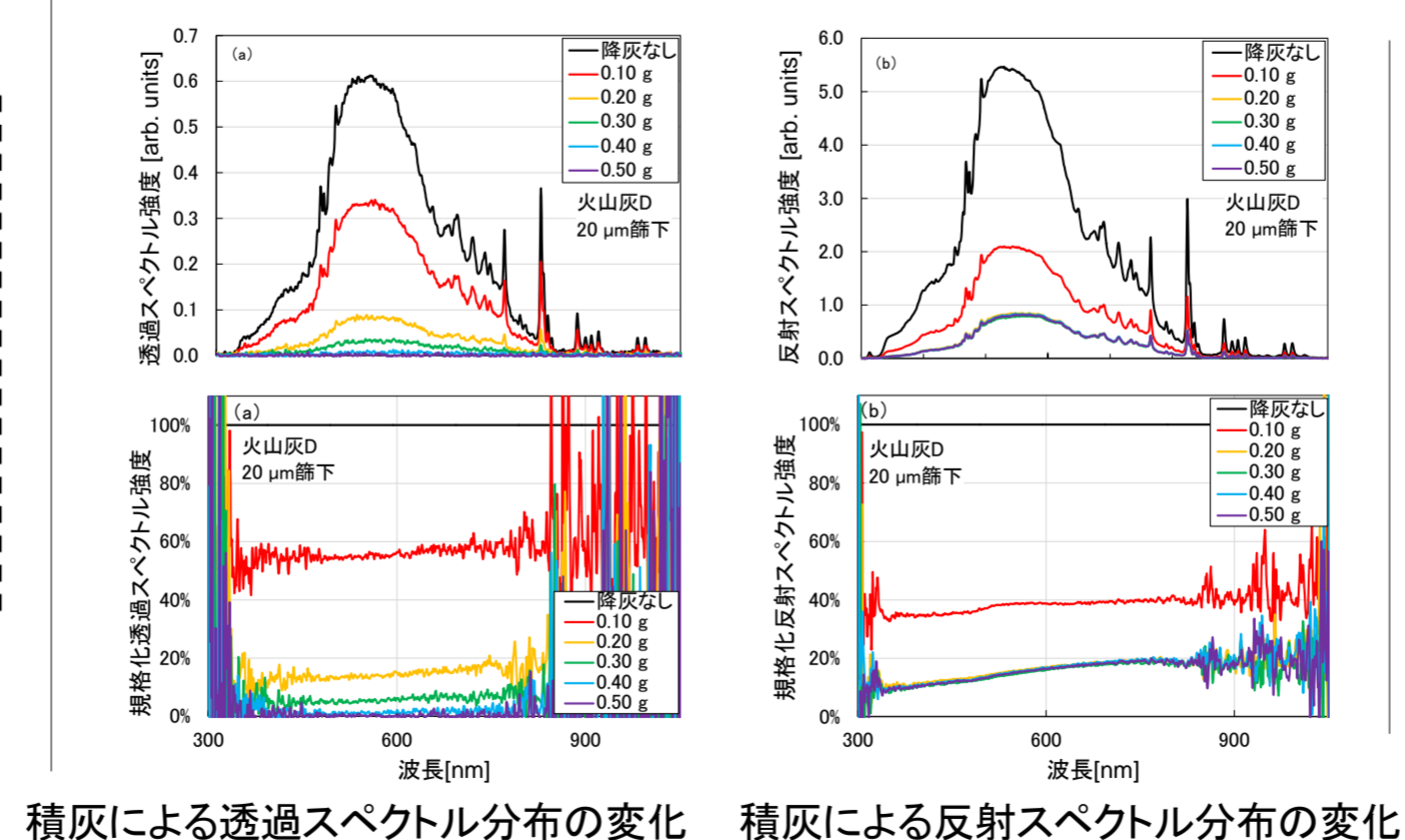
積分球での測定でも、積灰により透過スペクトル分布が同様に变化する結果が得られた。

透過及び反射スペクトル分布の簡易測定

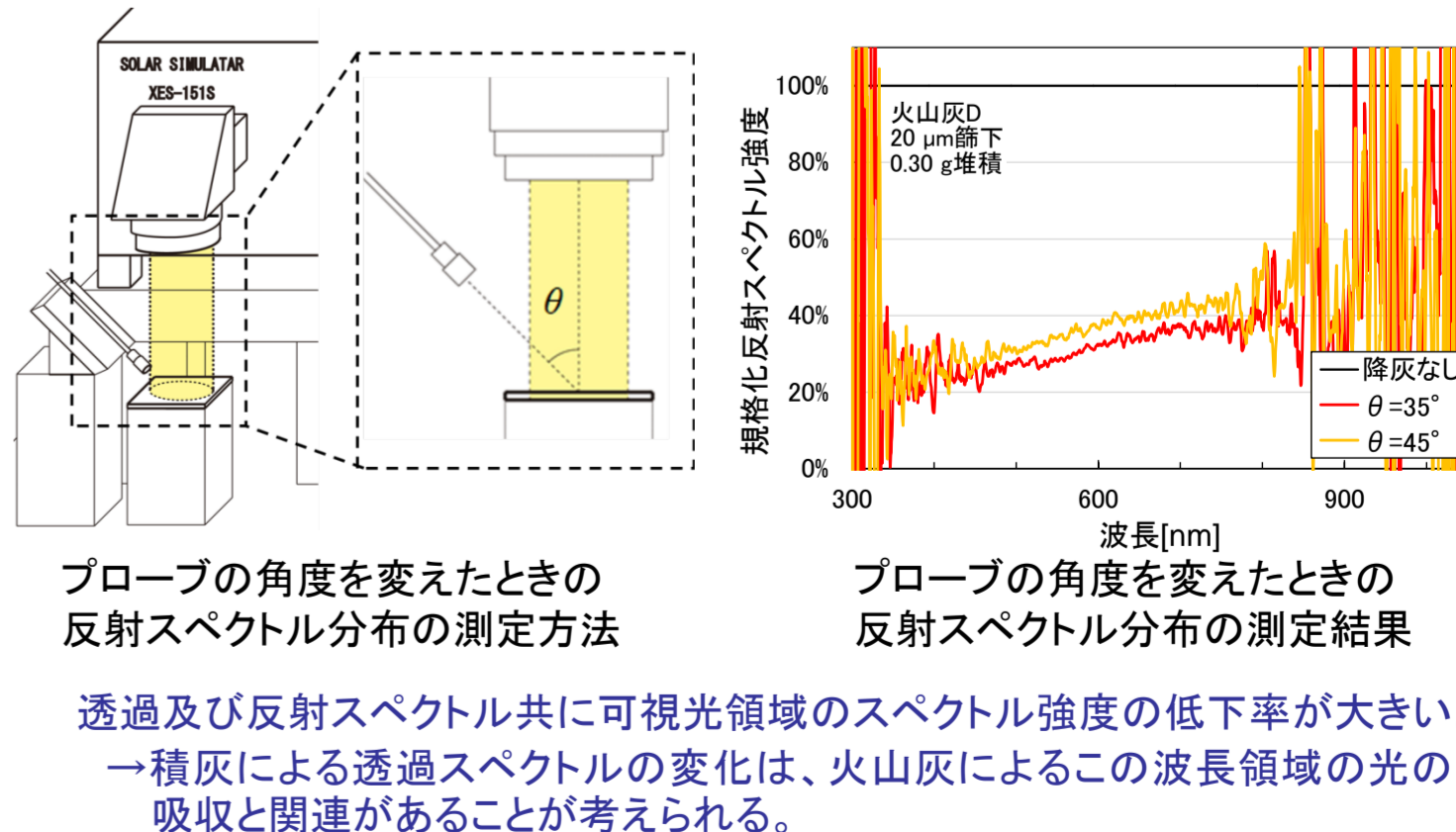
【透過及び反射スペクトル分布の測定方法】



【透過及び反射スペクトル分布の測定結果】



【プローブの角度を変えたときの反射スペクトル分布の測定】



透過及び反射スペクトル共に可視光領域のスペクトル強度の低下率が大きい。
→ 積灰による透過スペクトルの変化は、火山灰によるこの波長領域の光の吸収と関連があることが考えられる。

まとめ

- PVモジュール上への積灰により透過スペクトル強度が低下する。
- 積灰量が増加するほど、粒径が細かいほど可視光領域のスペクトル強度の低下率がそれ以外の波長領域の値に比べ大きくなった。
- 積分球での測定でも、積灰により透過スペクトル分布が同様に变化する結果が得られた。
- このスペクトル分布の変化は、火山灰によるその波長領域の光の吸収と関連があることが考えられる。
→ 今後、積灰時の透過、反射、吸収スペクトルの関係を詳細に調べていく。

参考文献

- [1] 平山 他:平成 28年 電気学会全国大会, No.7-066.
- [2] 川畑 他:平成 29年 電気学会全国大会, No.7-035.
- [3] T. Hirayama *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **57**, 08RG06 (2018).

高効率結晶シリコン太陽電池の実使用条件下の発電性能の経時変化

石井 徹之^{*1}・崔 誠佑²・佐藤 梨都子²・千葉 恭男²・増田 淳²

¹電力中央研究所 材料科学研究所 電気材料領域

²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター モジュール信頼性チーム

【謝辞】本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により行なわれました。

研究の目的

近年、p型PERC型結晶シリコン太陽電池の高効率化が目覚しく、今後の太陽電池市場において主流になると予想されている。また、n型基板を用いるSHJ型太陽電池やIBC型太陽電池は、極めて高い変換効率を有する。しかし、これらの高効率な結晶シリコン太陽電池の年劣化率は、従来型のp型Al-BSF型太陽電池と比較して高いことが指摘されている^[1,2]。産総研九州センターでは、様々な種類の太陽電池の実使用条件下の長期信頼性の調査を行っている^[1,3-8]。本研究では、2016年6月よりおよそ3年間実運用されている高効率結晶シリコン太陽電池の発電性能の経時変化について調査した。

実験

Table 1 Configuration of PV arrays.

Section	Kinds	Nominal P_{MAX} (kW)	Array Configuration	Installation Month/Year
E-1A	p-type sc-Si	5.04	7S × 1P × 4A	09/2010
E-1B	p-type sc-Si	4.90	5S × 1P × 4A	12/2012
E-2A	p-type mc-Si	5.00	6S × 1P × 4A	09/2010
E-2B	p-type mc-Si	5.00	5S × 1P × 4A	12/2012
W-2A	n-type SHJ	4.80	5S × 1P × 4A	12/2012
W-2B	n-type IBC	4.68	6S × 1P × 4A	12/2012
M-3C	n-type SHJ	1.55	5S × 1P × 1A	06/2016
M-3D	n-type sc-Si	1.89	7S × 1P × 1A	06/2016
W-1A	n-type SHJ	1.25	5S × 1P × 1A	06/2016
W-1B	n-type IBC	1.05	5S × 1P × 1A	06/2016
W-1C	p-type PERC	1.48	5S × 1P × 1A	06/2016
W-1D	p-type PERC	1.45	5S × 1P × 1A	06/2016

- 高周波絶縁トランス方式を採用しているマルチストリング式パワーコンディショナーを使用。
- 太陽光発電システムの直流電路側は非接地。
- 屋内測定出力/初期屋内測定出力の推移、及び、標準試験条件に換算した屋外出力 ($PR_{T=25}$) の推移を調査。

結果と考察

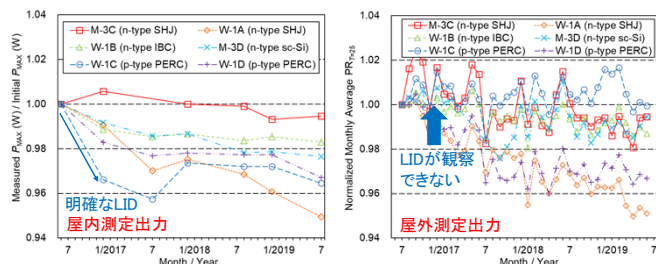


Fig. 1 Change in normalized power outputs measured by a solar simulator.

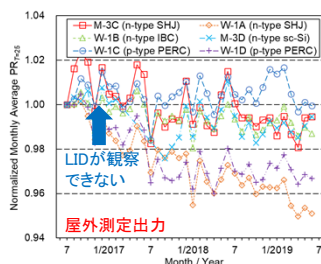


Fig. 2 Change in $PR_{T=25}$, where $PR_{T=25}$ is corrected PR from various module temperature to 25°C.

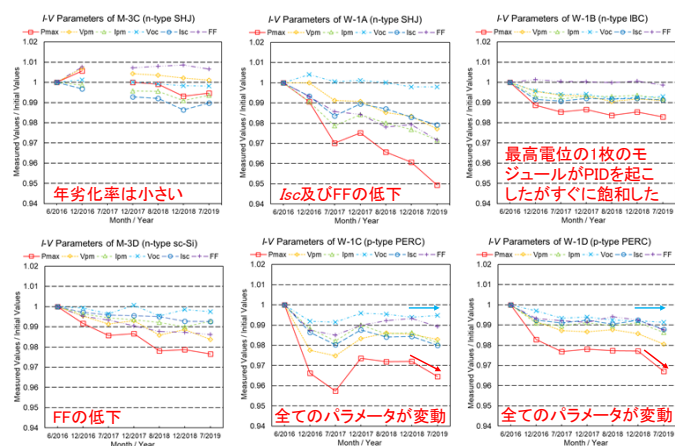


Fig. 3 Change in parameters of $I-V$ curves of the six types of the PV modules.

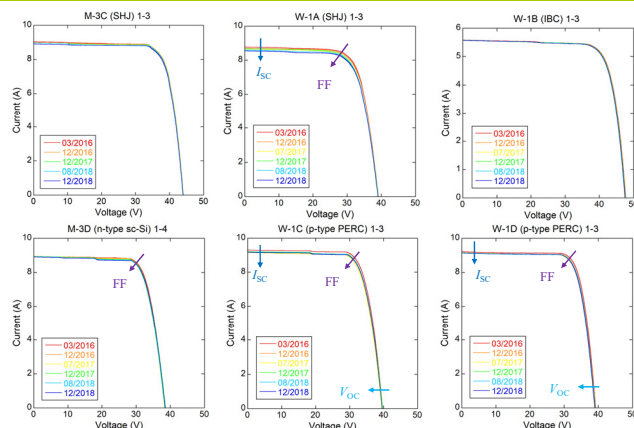


Fig. 4 Change in $I-V$ curves of the six types of the PV modules.

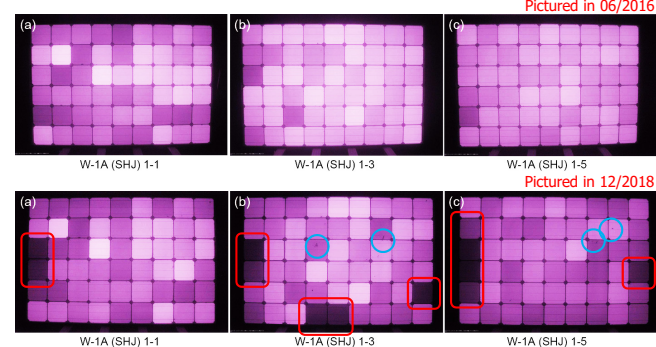


Fig. 5 Change in EL images of the n-type SHJ (W-1A) modules.

結論

Table II Annual degradation rates calculated for three years.

Index (%/year)	M-3C (n-type SHJ)	W-1A (n-type SHJ)	W-1B (n-type IBC)	M-3D (n-type sc-Si)	W-1C (p-type PERC)	W-1D (p-type PERC)
P_{MAX} Under STC	0.2	1.6	0.6	0.8	1.2	1.1
Outdoor $PR_{T=25}$	0.9	1.5	0.4	0.6	0.0	1.2

- 2型式の太陽電池を除いて、ソーラシミュレータによる屋内測定出力と屋外測定出力から算出される年劣化率はほぼ一致した。
- W-1CのPERC型太陽電池の屋内測定出力は明確なLIDを示したが、屋外測定出力は設置時にLIDが起こり既に低下していたと推察される。
- W-1AのSHJ型太陽電池は最大の年劣化率を示し、 I_{SC} とFFの低下が顕著であった。EL画像は外周部のセルの発電性能の低下を示唆する。

参考文献

- [1] T. Ishii and A. Masuda, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* **25**, 953 (2017).
- [2] D. C. Jordan *et al.*, *IEEE J. Photovolt.* **8**, 177 (2018).
- [3] T. Ishii *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 08MD05 (2017).
- [4] S. Choi *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 08MD06 (2017).
- [5] Y. Chiba *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 08RG04 (2018).
- [6] S. Choi *et al.*, *Thin Solid Films* **661**, 116 (2018).
- [7] R. Sato *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 052001 (2019).
- [8] R. Sato *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 106510 (2019).

佐賀県鳥栖市における太陽電池モジュールの劣化率を加味した推定発電量と実発電量の比較

千葉 恭男¹, 石井 徹之², 佐藤 梨都子¹, 崔 誠佑¹, 増田 淳¹

¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター モジュール信頼性チーム, ²電力中央研究所

研究の目的

我々は、産総研九州センター(佐賀県鳥栖市)にて、系統連系された太陽電池アレイの実発電量の評価を実施してきた。また、ソーラーシミュレータを用いた屋内での標準試験条件(STC)における測定などによりモジュールの劣化率の評価を行ってきた[1-4]。今回、結晶シリコン系太陽電池モジュールについて屋内測定値から算出した劣化関数 $f(t)$ を加味した推定発電量と実発電量の比較を行ったので報告する。

推定発電量と実発電量の比較方法

実発電量の算出 10分おきに計測されているアレイでの最大出力 (P_{max}) から計算

推定発電量の算出

- Case A** 1. 屋内測定で得られた出力: $P_{MAX(STC)}$
 毎年定期的に測定を実施している⇒劣化率
 2. 10分おきに計測している屋外のモジュール表面の温度: T
 3. 10分おきに計測している日射量: G
- Case B** 1. 劣化関数 $f(t)$ を用いて算出

$$P_{MAX} = P_{MAX(STC)} \times \frac{G}{G_{STC}} \times \{1 + \gamma(T - T_{STC})\} \times f(t) \dots (2)$$

$$P_{MAX} = P_{MAX(STC)} \times \frac{G}{G_{STC}} \times \{1 + \gamma(T - T_{STC})\} \dots (1)$$

この計算式を用いて、1年ごとに推定発電量を算出
 ・実発電量が欠測した日の推定発電量は加算しない

$P_{MAX(STC)}$: STCで計測したモジュールの出力
 G : 10分おきに計測される日射計の日射強度
 G_{STC} : STCの光源の放射強度 (1000 W/m²)
 γ : 出力の温度係数 (設置後1年間の屋外曝露時の P_{max} から算出)
 T : 10分おきに計測される曝露時のモジュールのバックシート表面で計測した温度
 T_{STC} : STCの温度 (25 °C)



図1. 産総研九州センターの太陽電池モジュール屋外曝露サイトの南東から見た全景。(佐賀県鳥栖市 [33.2 °N and 130.3 °E, 気候区分: Cfa]).

結果と考察

表1. ヘテロ接合単結晶シリコン太陽電池(SHJ)の推定発電量と実発電量の比較。

屋外曝露期間	推定発電量算出に使用した計算式	屋内測定した $P_{max(stc)}$ あるいは算出した $P_{max(stc)}$ (W)	温度係数 γ (%/°C) (実発電量から算出)	推定発電量 (kWh)	屋外実発電量 (kWh)	推定発電量と屋外実発電量の差 (%)
2014年 1月~12月	(2)	4,648.2 (2014年1月測定, t=0)	-0.437	4,938.8	4,983.9	-0.90
	(1)	4,648.2 (2014年1月測定)		4,938.8		
2015年 1月~12月	(2)	4,614.3 (平均劣化率 0.73%/year, t=1)	同上	6,149.6	6,167.9	-0.30
	(1)	4,613.5 (2014年12月測定)		6,148.3		
2016年 1月~12月	(2)	4,580.6 (平均劣化率 0.73%/year, t=2)	同上	5,776.0	5,791.6	-0.27
	(1)	4,583.3 (2015年12月測定)		5,779.2		
2017年 1月~12月	(2)	4,547.1 (平均劣化率 0.73%/year, t=3)	同上	6,131.6	6,141.1	-0.16
	(1)	4,534.5 (2016年12月測定)		6,117.2		
2018年 1月~12月	(2)	4,514.0 (平均劣化率 0.73%/year, t=4)	同上	6,411.3	6,314.2	1.54
	(1)	4,490.7 (2017年12月測定)		6,379.0		
計(5年間)	(2)	-	同上	29,407.3	29,398.7	0.03
	(1)	-		29,362.5		

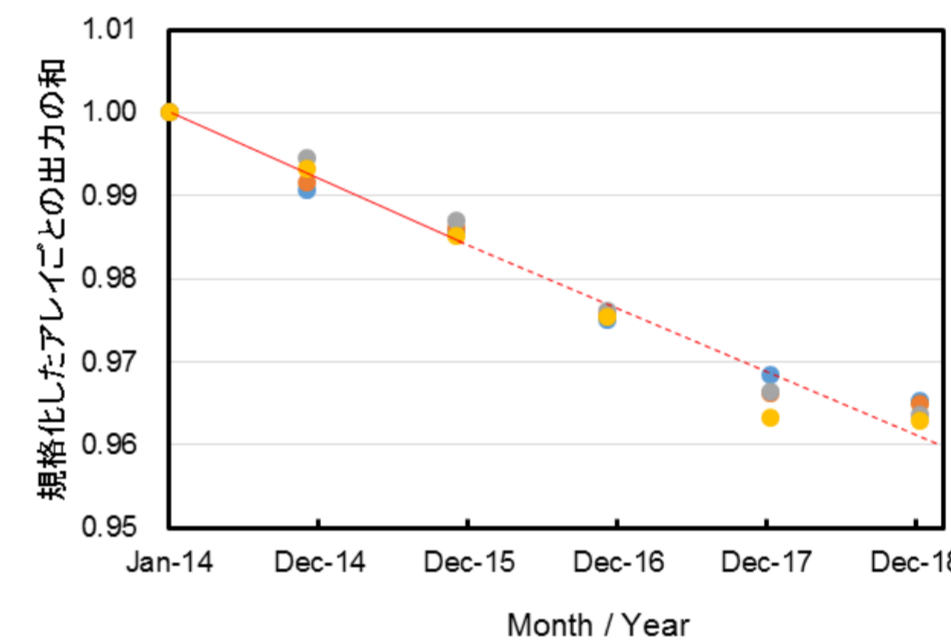


図2. 規格化したSHJアレイ毎の屋内測定の出力の和。(2014年1月から2015年12月までの屋内測定から最小二乗近似で算出した平均劣化率は0.73%/year)

●2014年1月から2015年12月までの屋内測定値から得た劣化関数 $f(t)$ を用いて算出した推定発電量は、実発電量に近い値が得られる。

●2015年12月以降の屋内測定値は、2014年1月から2015年12月までの屋内測定から得た劣化関数 $f(t)$ を用いて算出した値と概ね一致している。したがって、式(1)と式(2)を用いて算出された結果に相違がない。

●2014.1の屋内測定の出力を基準に、2014年1月~2015年12月の屋内測定から導出した劣化関数 $f(t)$ 、日射量データ、モジュール温度データを用いて推定発電量を算出し、実発電量と比較した。今回の場合、 $f(t) = (100 - 0.73 \times t) / 100$, ($t=0-4$)とした。

表2. PERC(W-1C、W-1D)およびn-type mono-Si(M-3D)の推定発電量と実発電量の比較。

屋外曝露期間	モジュールの種類	2017年12月に測定した屋内測定値(W)	2016年3月と2016年12月に測定した屋内測定値から劣化率を加味した $P_{max(stc)}$ (W)	温度係数 γ (%/°C) (実発電量から算出)	推定発電量 (kWh)	屋外実発電量 (kWh)	推定発電量と屋外実発電量の差 (%)
2018年 1月~12月	PERC (W-1C)	-	1,274.9 (劣化率 5.63%/year)	-0.343	1,796.2	1,850.2	-2.92
		1,360.3	-		1,916.2		
	PERC (W-1D)	-	1,340.2 (劣化率 2.94%/year)	-0.299	1,891.7	1,853.7	2.05
		1,374.2	-		1,939.7		
n-type mono-Si (M-3D)	-	1,804.7 (劣化率 0.85%/year)	-0.321	2,553.3	2,422.3	5.41	
	1,803.1	-		2,551.0			5.31



図4. ドローン撮影による曝露サイトの全景。(W-1C、W-1D、M-3Dおよび日射計の位置)

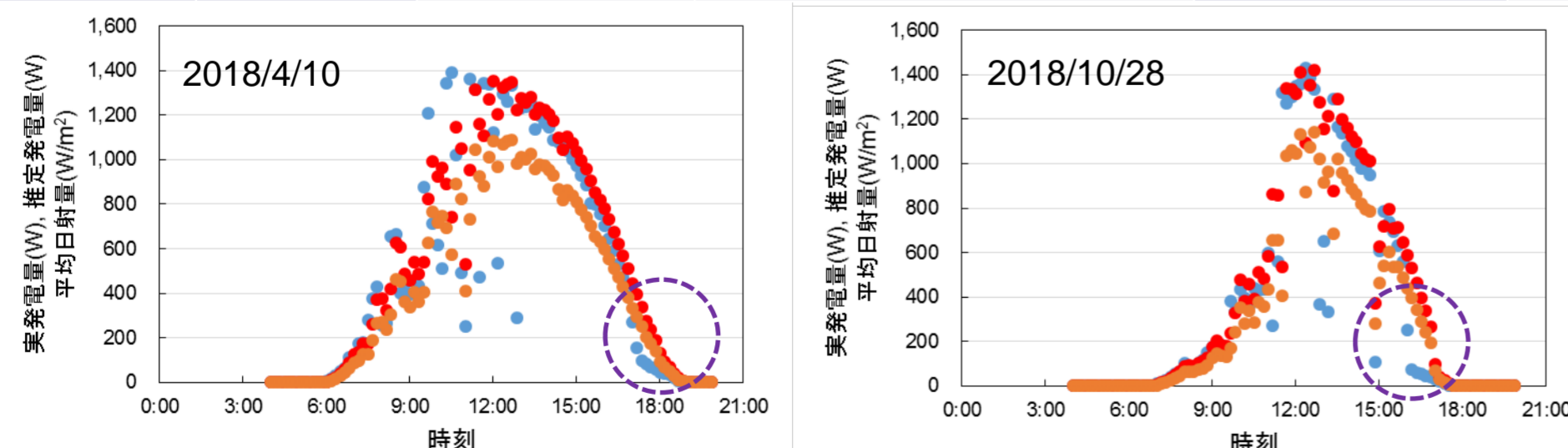


図3. PERC(W-1C)における2018/4/10および10/28の一日の実発電量、推定発電量、平均日射量の推移。

●実発電量(W), ●推定発電量(W), ●平均日射量(W/m²)

●2018年の曝露期間において、推定発電量と実発電量の差が大きい傾向が見られた。
 ●図1ならびに図4より、W-1Cについて、日の入り時刻での曝露サイト西側からの影の影響があることが示唆される。
 ●図4から、M-3Dについて、南側の木々の影の影響も示唆される。
 ⇒影の影響を加味した状態でも3~5%程度の差で推定発電量を見積もることが出来ることが示唆される。

結論

- SHJについて、劣化関数を用いて算出した推定発電量は、実発電量に近い値が得られることがわかった。
 - 曝露サイト周辺からの影の影響があることが示唆されるが、影の影響を加味した状態でも3~5%程度の差で推定発電量を見積もることが出来ることが示唆される。
- 【謝辞】本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により行った。

参考文献

- [1] T. Ishii et al., Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, p. 08MD05 (2017).
- [2] S. Choi et al., Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, p. 08MD06 (2017).
- [3] S. Choi et al., Thin Solid Films, vol. 661, pp. 116-121 (2018)
- [4] Y. Chiba et al., Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, p. 08RG04 (2018).

桜島火山降灰地域に設置された太陽電池モジュールの発電特性

平山 斉¹、川畑 秋馬¹、吉村 幸雄²、佐藤 梨都子³、千葉 恭男³、増田 淳³
¹鹿児島大学、²鹿児島県工業技術センター、³産業技術総合研究所

研究の目的

【研究背景】日照量豊富な鹿児島地域は太陽光発電に適した地域であるが、桜島火山降灰による太陽電池(PV)モジュールの直接的な発電量低下や火山灰によるモジュールの信頼性低下が懸念されており、降灰環境下での発電量の定量的評価や降灰対策技術の開発が必要である。

【研究目的】降灰地域で屋外の実環境下に設置されたPVモジュールの発電特性を計測し、桜島火山降灰がPVモジュールの発電量に及ぼす影響を明らかにすることである。

発表内容

- 鹿児島県工業技術センター(以下、工技センター)屋上に設置された4種類のPVモジュール(mono-Si, multi-Si, CIGS, a-Si)の発電特性を2016年4月から計測中である。今回はCIGS PVモジュールの2017年2月から2019年9月までの測定データを解析し、散水の有無がPVモジュールの発電量に及ぼす影響を調べた結果について報告する。
- 鹿児島大学(以下、鹿大)電気電子工学科の屋上に設置されたPVモジュールの発電特性を計測し、桜島火山降灰がPVモジュールの発電特性に及ぼす影響を調べた結果について報告する。

PVモジュールとデータ計測内容

【桜島とPVモジュールの位置関係】



【工技センターのPVモジュール】

種類: mono-Si, multi-Si, CIGS, a-Si 設置角度: 30°
 (散水装置ありとなしの2枚ずつ)
 CIGS PVモジュールの公称最大出力: 160 W



【鹿大電気電子工学科のPVモジュール】

種類: mono-Si
 設置角度: 20°
 公称最大出力: 250 W × 40枚



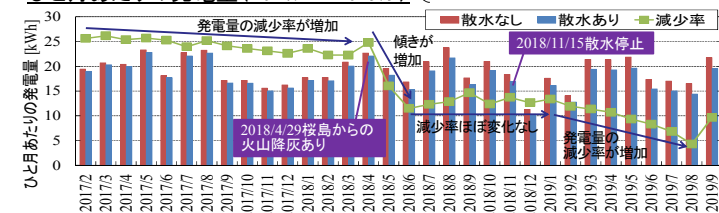
- 2014年7月からの発電データ、日射データを計測
- 2018年8月からPVモジュール表面を1時間間隔で撮影
- 2019年7月から雨量を計測

結果

【工技センターのCIGS太陽電池モジュール】

発電量の減少率: 散水なしに対する散水あり PVモジュールの発電量の減少率

●ひと月あたりの発電量(2017/2～2019/9)

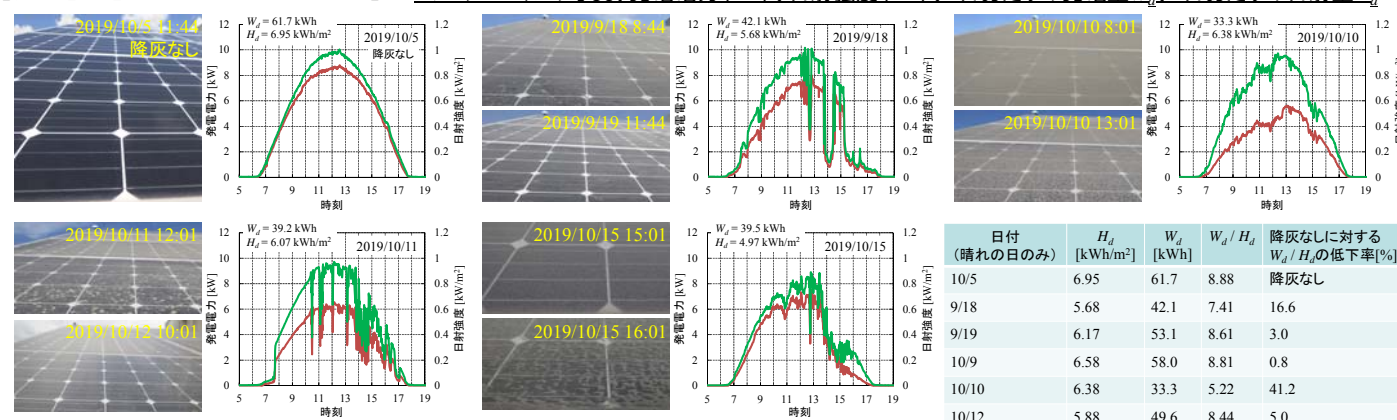


●PVモジュールの写真 上: 散水なし、下: 散水あり

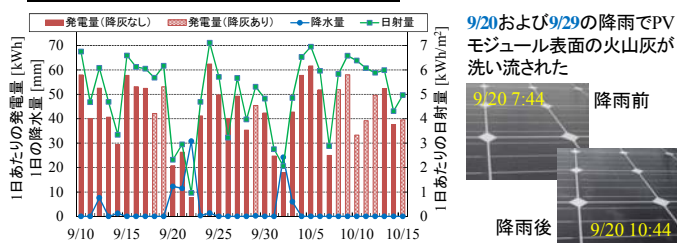


【鹿大電気電子工学科のPVモジュール】

●PVモジュールの写真、発電電力(—)、日射強度(—)、1日あたりの発電量 W_d 、1日あたりの日射量 H_d



●1日あたりの発電量(2019/9/10～10/15)



結論

- 工技センターのPVモジュールで、散水したものは散水停止後も散水しなかったもの比べて発電量が減少し続けることが観測された。
 →今後、汚れ付着の原因および散水停止後も発電量が低下し続ける原因を検討する。
- 鹿大のPVモジュールで、桜島火山降灰による発電電力、発電量の低下および降雨によるPVモジュール上の火山灰の洗い流しを観測した。
 ・降灰により1日あたりの日射量に対する発電量の割合が最大で40%程度減少
 →今後、降灰量と発電電力が低下する量の関係性を評価していく。

桜島噴火時の降灰による太陽光発電量の減少率評価

宇野史睦^{1,2}・新堀敏基²・橋本明弘²・小長谷瑞木³

1, 産業技術総合研究所(AIST), 太陽光発電研究センター (RCPV)
2, 気象庁/気象研究所, 3, イー・アンド・イーソリューションズ株式会社

1. 研究背景

- 鹿児島県において桜島の噴火による降灰によって、数日に及ぶ発電量低下が確認された (Fig.1)
 - 火山灰の堆積により日射量が遮られることを利用し、発電量低下率から降灰量を推定することを検討した。
- 鹿児島県内における太陽光発電施設のモニタリングデータを用いた発電量低下率を評価し、定式化を行う。
- ⇒太陽電池モジュールに火山灰を堆積させ、降灰量と発電量低下率の関係を評価した。

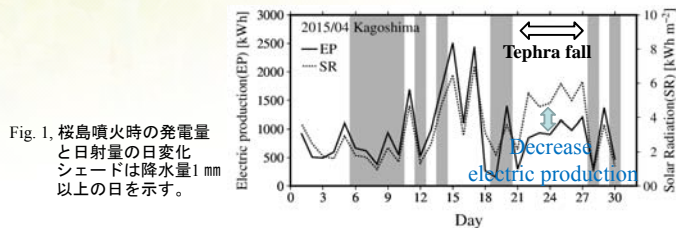


Fig. 1. 桜島噴火時の発電量と日射量の日変化。シェードは降水量1mm以上の日を示す。

3. 結果

3.1. 測定結果

- 火山灰堆積量と発電量低下率に明瞭な関係が見られた。
- 降灰量が少量 (4 g/m²以下) と多量 (60 g/m²以上) では変化率が小さく、6 g/m²以上から60 g/m²まで感度が高い。
- 火山灰減少率は先行研究と同程度。
- 60 g/m²以上では、火山灰による日射量の遮蔽による効果が飽和していることが考えられる。

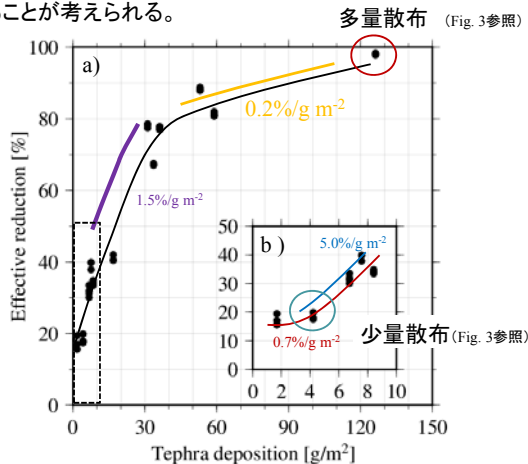


Fig. 7. 太陽電池モジュール上の火山灰堆積量と発電量低下率。各色の線はその範囲における発電量低下率を示す。b) 降灰量0-10 g/m²の範囲における発電量低下率であり、Fig. 5aにおける黒点線の範囲を示す。

3.2. 実際の太陽電池上への降灰時の状況

2017/9/6 堆積事例(桜島の東21kmの地点)

爆発番号:40, 噴火発生時刻:2017/9/5, 18:52 量3, 高:1900, 流向E, 火口S
爆発番号:41, 噴火発生時刻:2017/9/6, 09:49 量3, 高:1100, 流向SE, 火口S



Fig. 8. 鹿児島県内における太陽電池上への火山灰の堆積状況 (6, Sep., 2017)

EP, SRは良く一致。

- 火山灰が堆積した午前中はSRに対してEPが小 ⇒降灰による発電量低下 ⇒午後は風による灰の吹き飛ばしにより増加

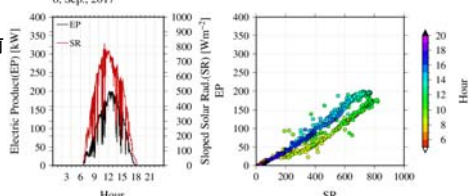


Fig. 9. 2017年9月6日における発電量 (EP) と日射量 (SR) のそれぞれの日変化 (左図) と EP, SR の関係 (右図)

2. 測定概要

2.1. 火山灰堆積実験

- 100 μm, 45 μm の篩で、均一に火山灰をモジュールに堆積
- 1の観測要素(発電量・日射量・モジュール温度)を測定 (3回)
- モジュールに堆積している火山灰を回収し、重量を測定

※実験の前・後で降灰無し実験(対照実験も実施)



Fig. 2. 観測装置外観

2.2. 測定風景

多量散布 126 g/m² (15 g) 少量散布 4.2 g/m² (0.5 g)

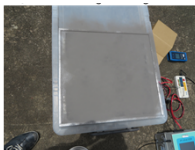


Fig. 3. 降灰時の太陽電池モジュール外観

Fig. 4. 現地における火山灰回収前の火山灰堆積状況

2.3. 降灰量減少率

火山灰堆積時発電量 (P_{max3}) 基準発電量 ($\overline{P_{max3}}$)

$$d_g = \frac{P_{max3}}{\overline{P_{max3}}} \quad \overline{P_{max3}} = 11.64 \text{ W}$$

$$P_{max} \text{ を日射量 } (G_A) \text{ 補正 [1 SUN: } 1000 \text{ Wm}^{-2}] \quad P_{max2} = \frac{1000}{G_A} P_{max1}$$

$$P_{max2} \text{ を表面温度 } (T_{PA}) \text{ 補正 } [\alpha_{P_{max}} \text{ : 最大出力温度係数}] \quad P_{max3} = \frac{P_{max2}}{1 + \alpha_{P_{max}} / 100 (T_{PA} - 25)}$$

2.4. 火山灰の粒径分布測定 (走査電子顕微鏡: SEM)

SEMにより粒子サイズを8回測定し、その画像より円相当半径を評価

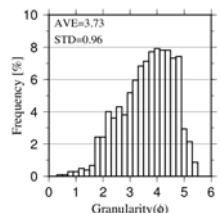


Fig. 5. 火山灰粒度分布

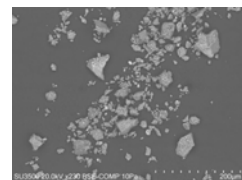


Fig. 6. SEMによる火山灰測定

4. まとめ

- 屋外測定により、火山灰堆積量と発電量低下率に一定の関係が見られた。

⇒ 降灰量から発電量低下率の推定式の構築を行う。

今後の方針

- 実際の太陽光発電施設 (鹿児島県内5カ所) における火山灰堆積事例において、本研究で構築する推定式の精度検証を行う。
- 常松ほか (2016) の手法 (Fig. 10) を用いて、太陽光発電所の降灰量をタイムラプス動画より推定し、その検証を実施する。
- 発電量低下率・降灰量の推定式の適用可能な気象条件を現地のモニタリングデータ等より評価する。

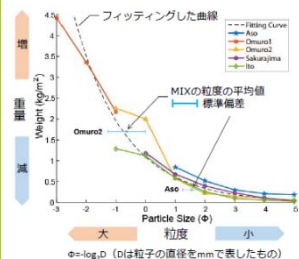


Fig. 10. 火山灰粒度による重量推定

※実験に使用した火山灰の粒度 (Fig. 5) は常松ほか (2016) (左図) と良く一致

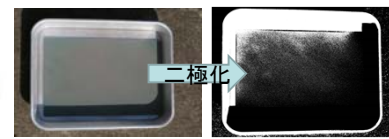


Fig. 11. カットティングボードを用いた火山灰粒度評価

参考文献 & 謝辞

常松ほか (2016) 画像解析を用いた火山灰堆積量の推測手法の開発, 日本地球惑星科学連合2016年大会
本研究は科研費 (若手B) 「火山灰による太陽光発電量の減少を利用した降灰量推定モデル開発と降灰予測モデル検証 (17K13008)」の一環で行われた。また、SEMの利用において気象庁気象研究所の財前祐二氏には機材の使用法から解析方法まで多くの指導を頂いた。ここに記して御礼申し上げます。

JST CREST HARPSにおけるPV発電データと異分野連携

大竹 秀明^{1,2}・宇野 史睦^{1,2}・大関 崇¹・井村 順一³

¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター システムチーム

²気象庁気象研究所 客員研究員

³東京工業大学



研究の目的

はじめに

- 太陽光発電 (PV) システムの導入加速 (約49.5 GW: 2019年3月現在)
- 再エネ主力電源化 (エネルギー基本計画) ⇒ **PVの利用用途の拡大**が必要
- そのためには、**PVと各種分野との異分野連携** (送配電、蓄電池・EV、ネットワーク制御など)

CREST HARPSの取り組み

- 次世代のエネルギーシステムについて学術サイドから研究を推進
- 気象・電力需給・需要家・送配電・市場取引・制御理論・数理科学の各専門分野との連携
- PV発電の大量導入の将来、予測とネットワーク・制御の観点から分析
- 将来のPV大量導入 (2050年以降で300 GW) を見据えたシステム理論構築



異分野連携の例

用途1: 火力発電の起動停止計画 (前日、当日予測)
(前日夕方までに計画を確定)

用途2: 揚水発電の運転計画・制御 (週間、当日予測)
⇒ 太陽光発電が多くなれば揚水運転、少なければ発電運転

用途3: 蓄電池・EVの充電放電制御 (当日予測)
⇒ 太陽光発電が多くなれば蓄電池運転、少なければ放電運転

用途4: 送電線の熱負荷の制御 (前日、当日予測)
⇒ 日射が多くなれば送電線が受ける熱が大きくなる。気温や風情報も有効 (送電線の温度管理)



北海道電力・南早来変電所の大規模蓄電池 (大竹撮影)

用途5: 太陽電池の出力推定、故障診断 (衛星)
⇒ リアルタイムモニタリング、曇って発電しない? 故障で発電しない?

PV × 送電 (送電線の熱負荷計算に気象予測データの活用)

気温、日射量、風の情報 ⇒ 送電線の熱負荷

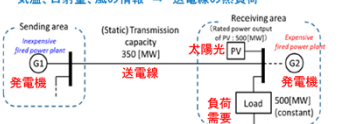


Figure 4. A sub-transmission network test system.

Table 1. Ambient meteorological conditions

Parameter	Typical Value
Atmospheric temperature	40 (°C)
Solar irradiation	0.1 (W/cm ²)
Wind speed	0.5 (m/s)
Wind direction	45 (°)

Sugihara et al., (2017)⁽²⁾
(ライセンスはCC BY 4.0に基づき引用)

(送電線の温度管理)

- 送電量: 多 (PVの逆潮流) ⇒ 送電線の温度が上昇 ⇒ 送電線が壊れる
- どの程度PV出力があるのか把握
- 日射は送電線を温める働き
- 風が吹くと送電線を冷やす働き

⇒ 気象やPV発電の情報が送電管理には重要

送電線の熱負荷シミュレーション: 気象条件の最悪シナリオで設定

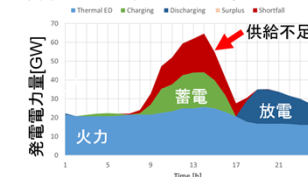
従来: 気温40度を想定
現在: 国内最高気温は熊谷41.1°C
⇒ 将来の気候変動・温暖化が進んだ場合のシナリオの再考も必要

PV × 需給 (蓄電池) (電力余剰時の蓄電池の活用に予測を活用)

- 気象予報から発電予測
- 停電、電力余剰の影響評価
- 蓄電池の導入効果 (インバクト評価)
- 予測の信頼度情報の活用 ⇒ 蓄電池 (充・放電計画) の変更

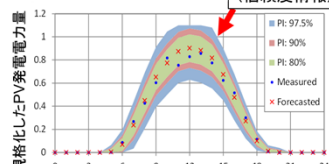
(前提)

- 太陽光の過大予測の事例
- 関東エリア (太陽光: 100GW導入ケース)



ケース1 蓄電池+予測区間なし ⇒ 供給不足 (停電) が多く発生

ケース2 蓄電池+予測区間 (80%利用) ⇒ 予測区間を使うことで、供給不足を減少
Udawalpolo et al., (2018)⁽⁴⁾



予測値に対して予測区間 (信頼度情報) を付加

電気自動車 (EV) の充電にPV予測の活用 (案)

- ✓ 将来: PV発電 > 電力需要 (余剰電力の発生)
- ✓ PV発電の出力の抑制
- ✓ PV発電予測の活用

(ケース1) 翌日のPV発電: 多いと予測

PV発電の余剰 ⇒ EV充電料金を下げる ⇒ 充電: 多

(ケース2) 翌日のPV発電: 少ないと予測

PV発電の不足 ⇒ EV充電料金を上げる ⇒ 充電: 少

⇒ PV予測を活用して、充電 (人間行動) を制御し、電力需給に役立てる

HARPS成果関連ポスター

- P105 冬季の大気循環場を考慮した日射量予測の大小し事前検出指標の改良
○宇野 史睦, 松枝 未遠 (筑波大), 大竹 秀明, 大関 崇, 山田 芳則 (気象研)
- P118 PV大量導入に向けた発電プロダクト作成
○大竹 秀明, 宇野 史睦, 大関 崇, 井村 順一
- P120 太陽光発電大量導入時の電力系統調整力確保の経済影響評価
○水野 碩人, 柴田 皓元, 山口 順之 (東京理科大), 大竹 秀明, 大関 崇
- P121 太陽光発電大量導入時の連系線増強による経済的及び環境的価値評価の基礎検討
○柴田 皓元, 水野 碩人, 山口 順之 (東京理科大), 大竹 秀明, 大関 崇

参考文献

1. R. Udawalpolo et al., Demand and Supply Operations of Power Systems with Battery Energy Storage System Using Photovoltaic Forecasting with Prediction Intervals, Proc. of International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST2018), (2018).
2. H. Sugihara et al., Evaluation Method for Real-Time Dynamic Line Ratings Based on Line Current Variation Model for Representing Forecast Error of Intermittent Renewable Generation, Energies, Vol. 10, 4, 503 (2017).

情報公開サイト

3. HARPS OPEN Database
URL <https://harps.ee.kagu.tus.ac.jp/login.php>
4. HARPS OASIS
URL <http://psel01.ee.kagu.tus.ac.jp/harps/oasis/>



謝辞 本研究はJST CREST「太陽光発電予測に基づく調和型電力系統制御のためのシステム理論構築」(代表 東京工業大 井村順一教授、JPMJCR15K1)の中において実施された。

太陽光発電のモニタリングデータを利用した短時間予測

海崎 光宏¹、宇野 史睦¹、大関 崇¹、Joao Gari da Silva Fonseca Junior²、宇田川 佑介^{2,3}、西辻 裕紀³、荻本 和彦²

¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター システムチーム
²東京大学 生産技術研究所、³株式会社構造計画研究所

研究の背景と目的

- PVの大量導入時には、需給運用・制御が必要であり、それらのベースとなる発電予測、把握技術の研究を実施。
- 数時間先予測の一つの可能性として、PVシステムにおいて計測されているモニタリングデータを利用した短時間予測技術の開発を行なった。
- 併せて、PVシステムのサンプリングによる広域予測のアップスケーリング手法も検討した。

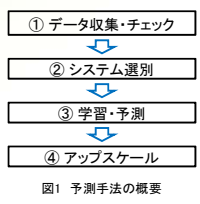


図1 予測手法の概要

Short-cut

まとめ

- PVの発電データを活用して、短時間予測技術を開発した。
 - 予測モデル: 数値予報と持続モデルとを融合し、直近のデータを用いて予測値を補正。
 - 結果: 1~3時間先までの予測誤差低減を実現
 - 課題: 午前における予測誤差低減
- サンプリングによる広域予測のアップスケーリング手法を検討した。
 - 結果: 低圧、高圧はサンプリング、特別高圧は全数に近いモニタリングを行うことが望ましい結果を示唆。

使用データ

- 実測値(期間: 2016/04/01 - 2017/03/31)
 - 九州管内に設置されたPVシステムの定格容量50 kW未満の低圧サイト, 50~2000 kW未満の高圧サイト, 2000 kW以上の特別高圧サイトについて, 合計6033サイト(1607 MW)
 - 発電電力量: 30分値
- 予測値(予測モデル)
 - 前々日予測・前日予測・当日予測(GPV-SVM)
 - 短時間予測(広域予測補正モデル)

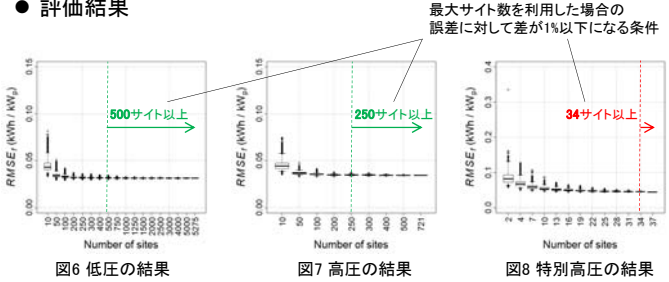
アップスケーリング手法の検討(図1の②)

- 評価手法
 - 電圧階級毎にrサイトの無作為抽出を10000回試行
 - ✓ 低圧: r = 10, 50, 100, 200, 250, 300, 400, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000
 - ✓ 高圧: r = 10, 50, 100, 200, 250, 300, 400, 500
 - ✓ 特別高圧: r = 2, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34
 - 抽出毎にアップスケーリングによる予測誤差を計算

$$RMSE_f \equiv \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(\frac{\sum_{i=1}^r \hat{E}_i(t)}{\sum_{i=1}^r E_{i,max}} - \frac{\sum_{i=1}^m E_i(t)}{\sum_{i=1}^m E_{i,max}} \right)^2}$$

n: 評価期間のデータ数 $E_i(t)$: 時刻tにおけるサイトiの発電電力量
 $E_{i,max}$: $E_i(t)$ の期間最大値 $\hat{E}_i(t)$: $E_i(t)$ の予測値

● 評価結果

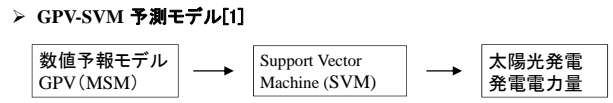


最大サイト数を利用した場合の誤差に対して差が1%以下になる条件

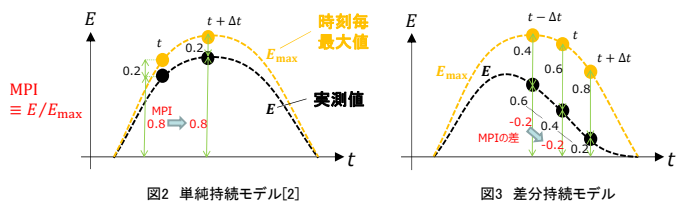
低圧・高圧はサンプリング、特別高圧は全数に近いモニタリング

短時間予測技術開発(図1の③)

- 広域予測補正モデル
 1. 数値予報ベース(GPV-SVM)と持続モデル(単純持続モデル・差分持続モデル)を融合
 2. アップスケールして得られた広域予測を実測値で補正



➢ 持続モデル



➢ 実測値による補正

$$\tilde{E}_{RT=t_0}(t) = \hat{E}_{RT=t_0}(t) E(t_0) / \hat{E}_{RT=t_0-\Delta t}(t_0)$$

$\tilde{E}_{RT=t_0}(t)$: 補正後の予測値 $\hat{E}_{RT=t_0}(t)$: 時刻 t_0 に配信された予測値
 Δt : 予測の配信間隔(30分) $E(t_0)$: 時刻 t_0 での実測値

● 予測誤差の評価

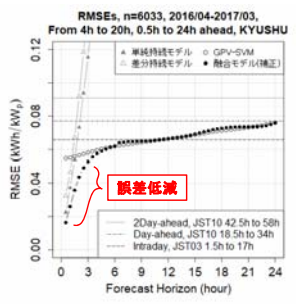


図4 Forecast Horizon毎の予測誤差

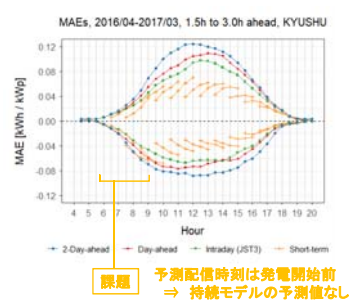


図5 時刻毎のMAE(1.5-3時間先予測)

参考文献

1. Fonseca, Jr. J. G. S. et al., PROG. PHOTOVOLTAICS, 23, 1203 (2015).
2. 海崎光宏 他, 太陽エネルギー, 44, 6, 67 (2018).

冬季の大気循環場を考慮した日射量予測の大外し事前検出指標の改良

宇野 史睦^{1,2} (uno.fumichika@aist.go.jp)・松枝 未遠³・大竹 秀明^{1,2}・大関 崇¹・山田 義則²

1, 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター (AIST/RCPV), 2, 気象庁気象研究所 (JMA/MRI), 3, 筑波大学

1, Purpose

- 数値予報 (NWP) モデルは、数時間から数日先の日射量・太陽光発電予測に利用される。
- 極端な予測誤差 (予測の大外し) は電力の需給運用に支障をきたし、経済性を損なう。
- NWPを用いた気象予測は、完全な予報はできず、誤差があるものとして運用する必要があるため、誤差の事前把握や、大外しの程度を事前の評価したい。

本研究は、全球アンサンブル予測の日射量の予測のばらつき (スプレッド) と大気循環場の分類から、予測の大外しの事前検出手法を開発した

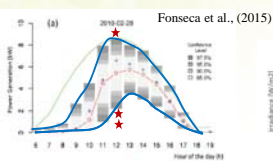


Fig. 1. 予測大外しの概念図。

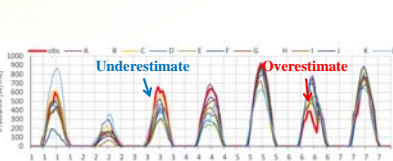


Fig. 2. 日射量予測コンペの結果 Kato 2015[1]

3, Results

3-1 各循環場の発生頻度

- 大外し時の出現頻度 (>5%, >10%, 15%, 20%) と大外し以外を含む出現頻度 (>All%) に大きな違いはない (Fig. 8a)
- HP のパターンは大外しの出現頻度は少ない。(Fig. 8b >5%, 5-10%)
- 中程度の予測誤差 (Fig. 8b >15-20%) は LP と WM のパターン時に発生する。

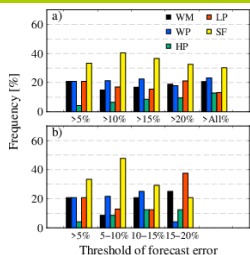


Fig. 8. 予測大外しと各循環場の出現頻度。a) 大外しの4つの閾値と全事例の出現頻度。b) 5%毎の大外し閾値における循環場出現頻度。

3-2. 各循環場における検出力評価

- MCGE (グランドアンサンブル) と単一の NWP センターで検出力が大きく異なる。
- WP が最も検出力 (Area Under the Curve: AUC) が高い。(HP は事例数が1つのためここでは除外する。)

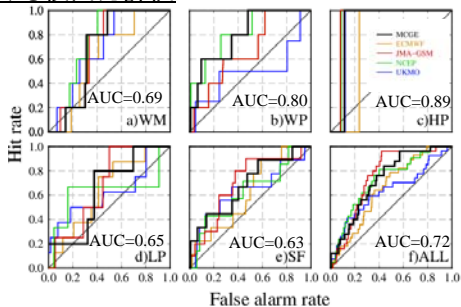


Fig. 9. 循環場毎に評価した日射量予測の上位5%の大外しの検出力評価 (a-e) と循環場を考慮しないときの検出力 (f)。図内のAUCはMCGEでの値を示す。

3-3. 最適な閾値決定手法を用いた検出力の改善

- Youden Index の改善は最大0.15程度であるがほぼ全ての NWP センターや MCGE において改善を示した (図省略)。
- Youden Index と比べて FPH での改善率が大きく、特により上位の大外し事例 (Fig. 10a) において改善率が高い。

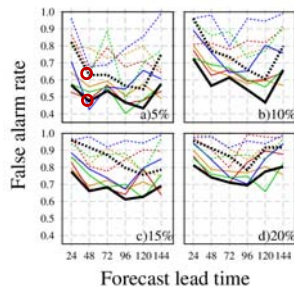


Fig. 10. Same as Fig. 9, but cut-off method used Youden index.

Table 1. 的中率1.0における誤検出 (FPH) 日数比較図10aの赤丸のケース

		大外し	
		あり	なし
大外しアラート	あり	26 (26) 的中	229 (301) 誤検出
	なし	0 (0) 見逃し	255 (179)

4, Summary

新しく大気循環場を考慮して日射量予測の予測大外しの事前検出指標を改良し、最適な閾値決定方法について検討した。

- 500 hPa の高度場を利用して冬季を5つの循環場に分類した。
- 最適な指標の閾値を循環場のパターン毎に評価した結果、検出力が改善した。
- 2つの最適な閾値の決定手法の両方で、検出力が改善した。

4つの世界の予報機関が提供する全球アンサンブル予測を利用することで気象庁MSMの日射量予測の大外しの事前検出が可能となった。
また、大気循環場を考慮することでより検出力が改善した
 ⇒ 今後は冬季以外への適用可能性を検討
 ⇒ この手法を利用することによる経済効果を評価する。

2, Data and Method

地上観測

AME-DAS (JMA)
 関東平野 (7 地点) Fig. 5b

予測

領域: JMS-MSM: 水平解像度: 5 km 予測時間=24
 全球: TIGGE: 水平解像度: 125 km, 予測時間=24-144
 ヨーロッパ, 日本, アメリカ, イギリス
 (ECMWF, JMA, NCEP, UKMO)

再解析データ

ERA-interm (ECMWF) 2014/1-2017/3 冬季 (1, 2, 3, 11, 12月)
 ジオポテンシャル高度, 海面更正気圧 (SLP)

期間

Detection method (LINES) and Forecast error (F_c)

$$LINES_g = \ln \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{NES_k}{NES_{m,k}} \right) \quad F_c = I_f - I_o$$

$N = 4(\text{center}), m = \text{month}$ $NES_{m,k}$: Normalized monthly mean ensemble spread

最適な閾値決定方法

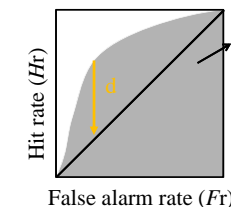


Fig. 3. ROCカーブの概念図

Youden Index

$$Y = \max(d_2)$$

$$d = Hr - Fr$$

FPH (Fr under Perfect Hr)

$$FPH = \begin{cases} \min(Fr), & \text{When } Hr = 1.0 \\ 1.0, & \text{if } \max(Hr) < 1.0 \end{cases}$$

5つの循環パターン

主成分分析による大気循環場の分類 (Matsueda and Kyoda 2016)

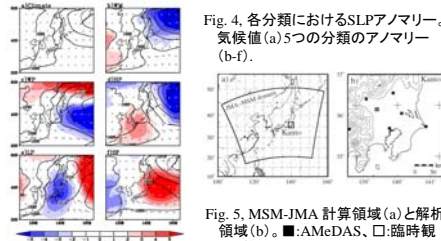


Fig. 4. 各分類におけるSLPアノマリー。気候域 (a) 5つの分類のアノマリー (b-f)。

WM: Winter Monsoon
 WP: Winter Pacific
 HP: High Pressure
 LP: Low Pressure
 SF: Southwesterly Flow

大外し指標LINESと予測誤差 (F_c) との関係 (previous study, Uno et al., 2018)

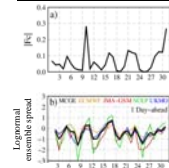


Fig. 6. |Fc| と LINES の時系列, 2015年10月。

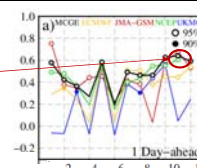


Fig. 7. |Fc| と LINES の月ごとの相関係数の季節変化。

References & Acknowledgements

- [1] Kato, F., 2015. Report on Competition of Day-ahead Forecasting of Irradiance and Wind Power Output, Annual Meeting IEEJ, (in Japanese).
 Uno, F. et al. (2018). A diagnostic for advance detection of forecast busts of regional surface solar radiation using multi-center grand ensemble forecasts. Solar Energy, 162, 196-204. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.060
 This study is supported by the Japan Science and Technology Agency (JST) Core Research for Evolutional Science and Technology (CREST) project. (Grant番号: JPMJCR15K1)

太陽光発電の出力制御における翌日予測の重要性に関する考察

João Gari da Silva Fonseca Júnior¹・西辻裕紀²・宇田川佑介^{1,2}・海崎光宏³・大関崇³・荻本和彦¹・

¹東京大学 生産技術研究所、²株式会社構造計画研究所

³産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター システムチーム

研究の背景と目的

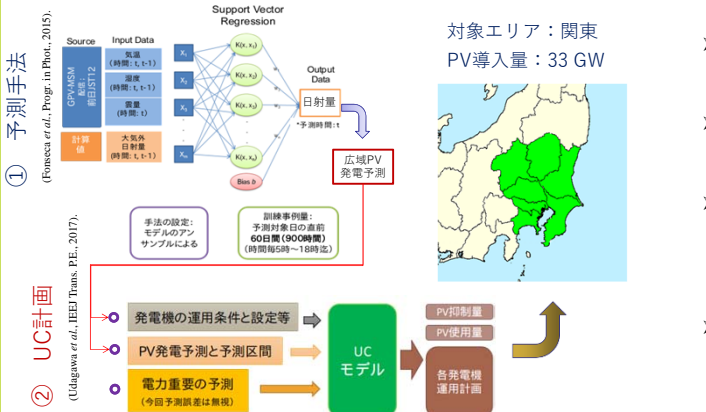
- 2015年に再エネ特措法が改正され、指定されたエリアで接続を申請した太陽光発電 (PV)システムが無制限無補償出力抑制の対象となった。
- 実現しているPV出力抑制システムにおいて抑制を行う予定がある時に、電力会社が場合によるPVシステムの所有者への出力抑制を前日まで予告しなければならない。その状況に翌日PV出力予測の技術が重要な役割を果たすのが期待される。
- 一方、いずれの翌日予測技術が連続的に精度が高い予測を出来ないのでもPV出力抑制に対して予測誤差の影響及び予測技術の価値を検討する必要がある。
- 本研究でその課題を取り組んで翌日PV出力予測の重要性を考察する。

考察

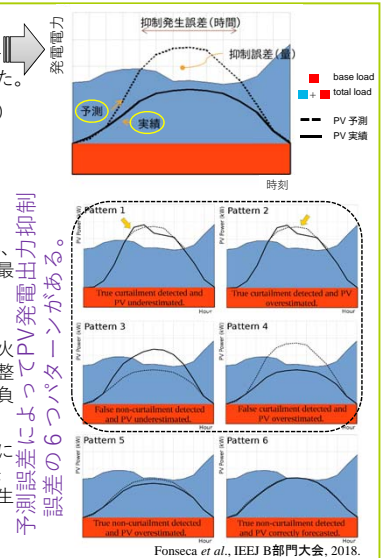
- 予測誤差のパターンによる抑制への影響がないことがわかり関東エリアに3.3GWのPV導入量をシミュレーションによる9月～2月の間予測誤差の7割抑制に影響がないことが分かった。
- 予測誤差の影響が6月～8月に抑制に一番強くパターン3 (PV出力が低いので抑制発生する予定ない) 一番多いことが分かった。
- 従ってPV抑制の観点で関東エリアへの予測が6月～8月とパターン3を改善するのが一番大切と考えられる。
- 予測手法の重要性に関して同じシナリオに最低限界を表す持続予測と比較して従来より良い精度を持つ予測手法が必要なPV抑制量を年間50%を減らすことが分かった。一方、完全予測の抑制量の2倍であるので十分な改善余地があることも確認した。

シミュレーションの条件とPV発電出力抑制の誤差について

PV出力抑制と予測誤差の関係について翌日PV出力予測誤差のパターンを分析し、PV出力抑制計画における各誤差のパターンの影響に着目する。

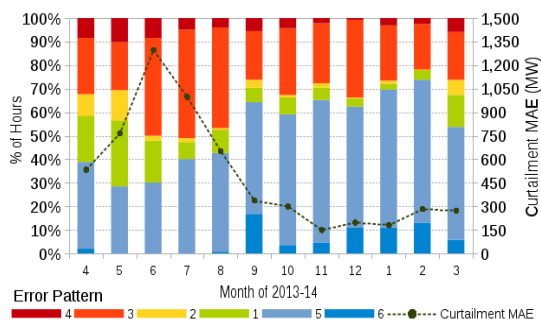


- UCモデルで発電機起動停止計画問題を混合整数計画問題として扱い定式化した。
- 目的関数は火力発電機の発電 (燃料費) と起動コストを最小化する。
- PV出力の予測誤差と抑制を考慮するため最適PV出力制御量を算出できるように定式化。
- 本モデルでPV出力は変数として扱われ、各制約条件を満たしながら目的関数を最小化するPV発電量を求める。
- PVから出力を用いると、周波数制御に必要な調整力が増加する。その結果、火力発電機が各時間ステップで必要な調整力を提供するために出力を下げて部分負荷運転を行い発電効率が低下する。
- 一方で、必要な調整力を減少するためにPV出力を制御することで、効率的な発電機運用を行うのか、トレードオフが生じる。



結果 ①

月々の各PV出力抑制誤差のパターンの発生率



- 抑制誤差のパターン3が6月～8月に全体の誤差の中に約50%。
- 9月から2月まで抑制に影響を与える予測誤差が少ない(30%)。多くの予測誤差が抑制誤差に影響がない。
- 最大抑制誤差が6月と7月に発生、その月にパターン3が多く、抑制量を強く過小評価していることが考えられる。

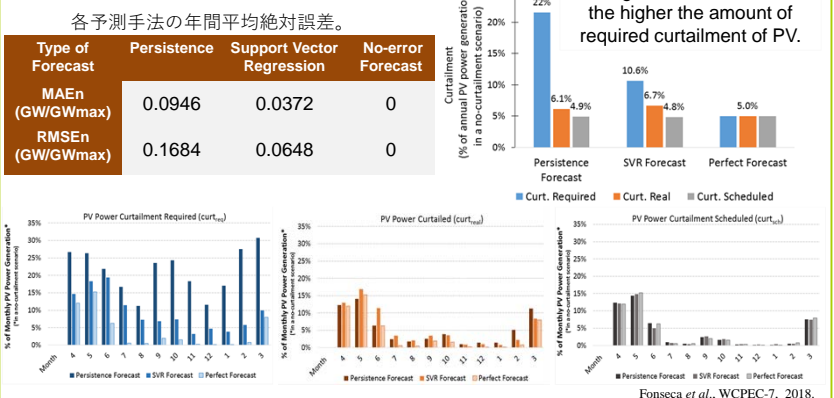
Fonseca et al., IEEE B部門大会, 2018.

結果 ②

翌日PV出力予測を用いてUC計画モデルがPV出力抑制量とPV出力使用量を算出する。そのPV予測によって対象日为实现する時にUC計画どおり電力システムを運用したらPV出力抑制に誤差が発生し、その誤差が3つ抑制に関する変数のミスマッチとして現れる。

❖ $(curt_{req})$ 必要なPV出力抑制量 : ❖ $(curt_{real})$ 実現したPV出力抑制量 : ❖ $(curt_{sch})$ 計画したPV抑制量 :
 実際PV発電量の状況でUC計画通り電力 実際のPV発電量と計画されたPV出力 UC計画によるPV出力抑制量
 システムを運用した場合のPV出力抑制量 出力抑制発生時間によるPV出力抑制量

PV出力抑制に関する変数のミスマッチによる従来の予測手法と予測精度の限界を表す2つ予測手法に対して評価した。



この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです。

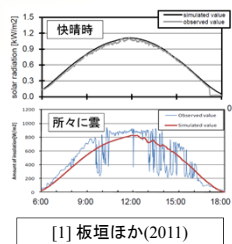
深層学習技術を用いた、全天カメラ画像からの短時間太陽光発電量予測の試み

神山徹¹・太田裕貴¹・今井正堯¹・中村良介¹・岩田敏彰¹

¹産業技術総合研究所 人工知能研究センター 地理情報科学研究チーム

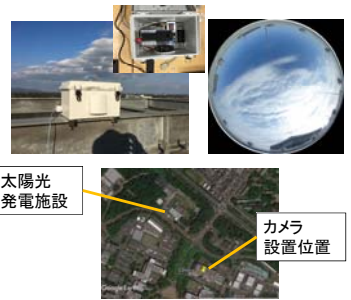
研究の目的

- 電力売買自由化を念頭に、30分や1時間先といった短期の太陽光発電量予測の需要が高まっている
- 短期発電量予測では、小さな雲の通過による瞬間的な変動の影響が大 → 未だその予測は困難
- 本研究ではこの局所的な変動を正しくとらえることを目的に、全天雲カメラによる雲画像と深層学習を使った予測モデルの構築を目指す。



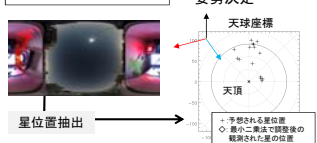
実験

- 全天画像取得の機材
 - 市販広視野カメラ(RICHO Theta)の利用 = 安価
 - 省コスト位置・姿勢計測手順
 - 位置: GPS+衛星画像
 - 姿勢: 星を用いた計測
- 建物屋上に全天カメラを設置
太陽光発電量計測値の取得

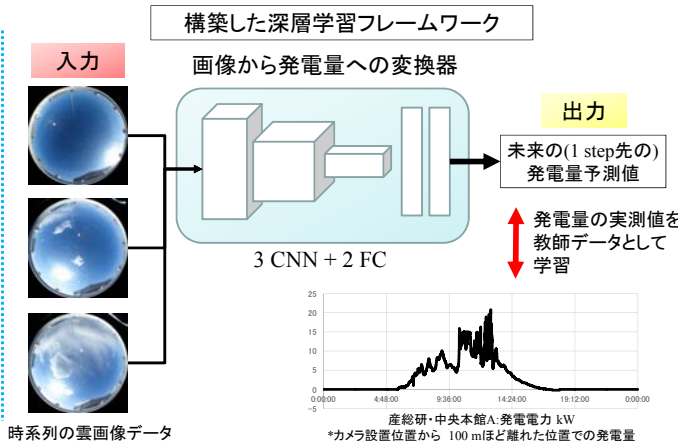
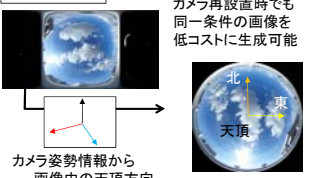


結果

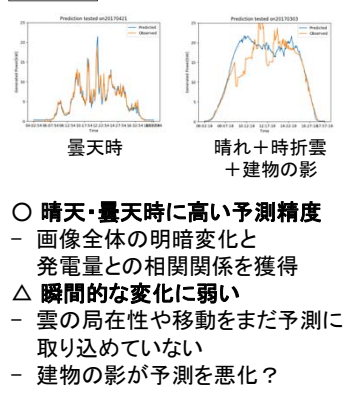
カメラ姿勢計測



画像変換



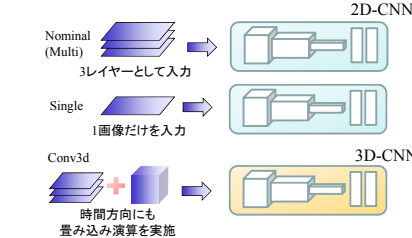
予測例



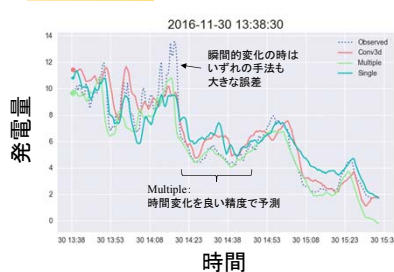
- 晴天・曇天時に高い予測精度
 - 画像全体の明暗変化と発電量との相関関係を獲得
- △ 瞬間的な変化に弱い
 - 雲の局在性や移動をまだ予測に取り込めていない
 - 建物の影が予測を悪化?

考察

- 精度の高いモデル構築のために
- 入力データの構造依存性調査
- ネットワーク構造依存性調査

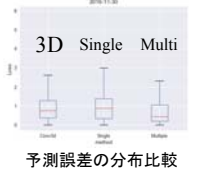


手法比較



- 単一画像よりも、時系列画像を入力することで精度が向上することを改めて確認
- 時間方向の情報も一度に畳み込む手順を行っても精度改善は見られない → ネットワーク構造 そのものに工夫が必要?

Recurrent 構造に気象情報を取り入れることで予測を改善できる可能性が海水移動調査から示唆 ([2] Kawashima et al., in prep.)



結論

- モデル・スキームの構築**
時系列で取得された全天雲画像から将来の太陽光発電量を出力可能なモデルを構築、一連のスキームを整備
- 予測精度**
晴天・曇天時に高い予測精度を示す。
瞬間的な変化に弱い。
- 精度向上のために**
雲の局在性・移動を取り込むモデル構築を実施中
データクレンジングの実施(建物の影の影響を除くなど)

参考文献

- 板垣他 (2011), CReSS(雲解像モデル)を利用した局地気象予測の多地点評価, 電気学会, 6-022.
- Kawashima et al., Short-Term Prediction of Sea Ice Concentration Using a Recurrent-Type Neural Network with Multiple Data Sources (in prep.).

謝辞:
本研究成果の一部はNEDO「人工知能技術適用によるスマート社会の実現」の助成を受けたものです。

電力システム運用における太陽光発電出力の予測技術の価値検証

宇田川佑介^{1,2}・荻本和彦¹・Joao Gari da Silva Fonseca Junior¹・大関崇³・海崎光宏³・西辻裕紀²・請川克之²・福留潔⁴

¹東京大学 生産技術研究所、²株式会社構造計画研究所

³産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター システムチーム、⁴株式会社J-POWERビジネスサービス

研究の目的

電力システム運用を模擬するモデルにPV予測データを適用し、PV出力予測技術が電力システム運用(電力需給運用)へ与える影響を経済性、信頼性の観点から考察した。

【必要性】

- 一般に予測技術はME, RMSEなどを用いて評価されるが、予測技術の適用先である電力システムへ与える影響は見えない。

【ゴール】

- 電力システム運用に役立つPV出力予測技術とは？を考え、さらなるPVシステム導入、効率的な電力システム運用へ貢献する。

シミュレーション対象(入力データ)

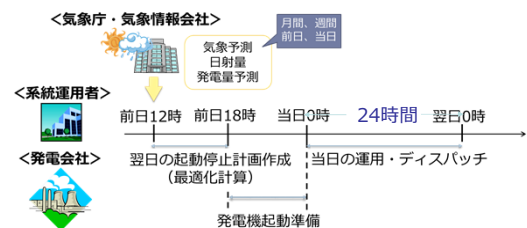
- 2030年を想定した九州電力エリア
- PVシステム設備導入容量は10 GWと想定
 - 2016年度公開PV出力時系列データをアップスケーリング
- 需要は2016年度公開時系列データを30分値に補間

供給力	合計定格容量	機数	内訳
火力(内生)	12[GW](3.5 GW, 4.4 GW, 4 GW)	25	石炭: 5, LNG: 19, 石油: 1
揚水(内生)	2.30 [GW]	6	可変速型: 4, 定速型: 2
ベース(外生)	最小 1.68[GW] 平均 5.78[GW] 最大 7.82[GW]	1	自流式水力, 調整池式水力 原子力, 地熱, バイオマス コジェネ, 連系線潮流

モデル(定式化)

- 電力システムを運用する電気事業者は、起動時間の要する火力電源の効率的運用、安定供給のための必要十分な予備力確保を目的として、日々発電計画の策定を行っている。この策定において発電機の起動停止スケジュールを作成するユニットコミットメント(UC)と呼ばれる最適化モデルが用いられている。
- UCモデルにPV予測を入力し、シナリオシミュレーションを行うことで、予測技術が電力システム運用に与える影響が考察可能となる。

【運用イメージ】



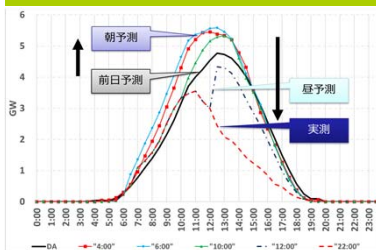
【目的関数】

$$\text{minimize } \sum_{t=1}^{24} \left[\sum_{n=1} \left(\text{燃料費}_n \times \text{出力}_{n,t} + \text{起動費}_n \times \text{起動変数}_{n,t} \right) \right]$$

【主な制約条件(24時間48タイムステップを対象)】

- 需給均衡
火力発電 + 正味の揚水発電 + 出力制御後PV + ベース電源 = 需要
- 短時間変動制約(Load Frequency Control調整力)
 $\sqrt{(\text{需要}_t \cdot 3\%)^2 + (\text{PV}_t \cdot 10\%)^2} \leq \text{LNG火力} \cdot \text{LFC調整力} + \text{揚水発電} \cdot \text{LFC調整力}$
- 発電出力上下制限制約, 上げ代下げ代制約
火力上げ代 + 揚水上げ代 $\geq 1\% \times$ 日最大需要 火力下げ代 + 揚水下げ代 $\geq 1\% \times$ 日最大需要

シミュレーション結果(6月24日)



[GWh]	供給力不足	PV出力制御量
DAUC	0.0	0.06
当日朝UC	0.0	1.24
運用結果(予測更新あり)	0.26	0.33
運用結果(予測更新なし)	1.21	0.00

短時間PV予測を考慮することで運用の経済性、信頼性の改善が期待可能

- LNG火力発電機の稼働台数・出力
 - 予測を更新しないと、各時間断面で揚水、LNGなどの火力の上げ代・下げ代で対応するが、その影響が一日の終わり時刻に及ぶ
 - 揚水の貯水量がなくなり、貯水量を戻すためにLNGが稼働し、1日で数百万～数千万円程度のコストが増加する
- 短時間で起動可能な火力発電機があると、予測誤差の影響は緩和
 - 予測が随時更新されると、早い時間に誤差が生じてその誤差に対応するために起動してしまうことがある。
 - その結果、最短稼働時間により必要以上に稼働してしまうため、予測誤差に細かく対応するには、制御できる需要の活用が効果的と考えられる。

図1. 需給均衡

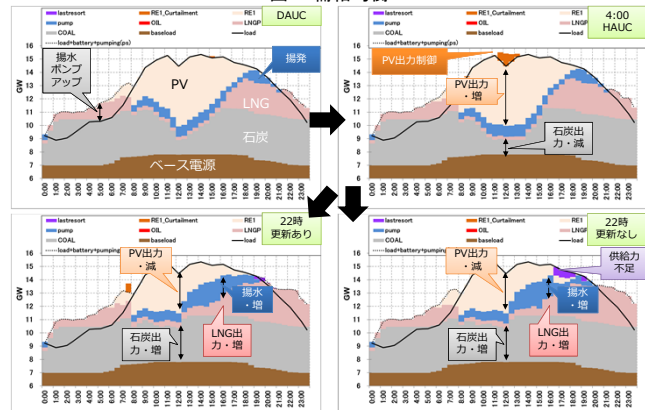
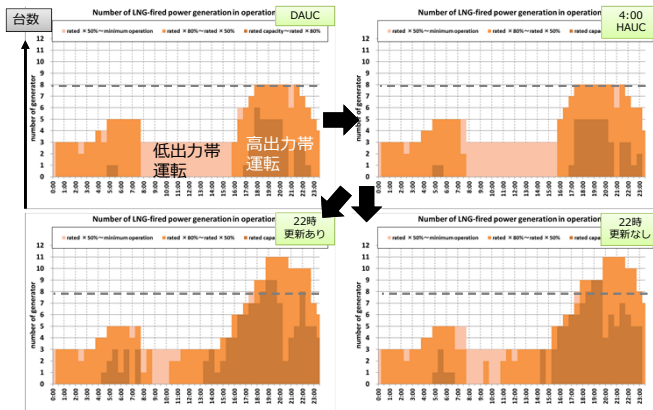


図2. LNG火力発電機稼働台数と運転出力帯



この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです。

太陽光発電の積雪荷重設計に関する研究

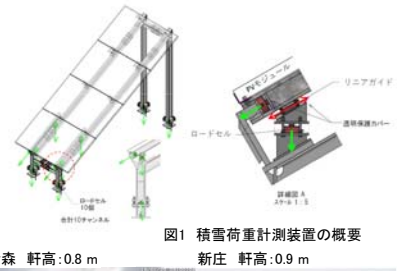
大関 崇¹・加藤 和彦¹・宇野 史睦¹・千葉 隆弘²・伊高 健治³・小杉 健二⁴・安達 聖⁴
¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター システムチーム・
²北海道科学大学・³弘前大学・⁴防災科学技術研究所

研究の目的

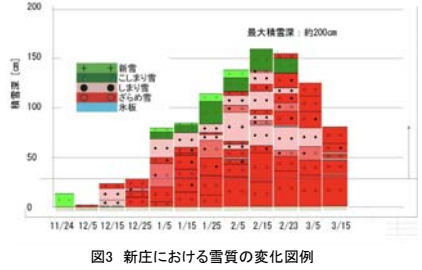
- 積雪荷重については、JISC8955^[1]において設計指針は存在するが、これまでも事故は発生しているのが現状。
- 特にモジュールフレームにかかる荷重への対応、沈降圧の影響への対応が課題となっている。
- 事故発生しているが、そのメカニズム解明に必要な実フィールドでの荷重データが測定されていないため、ベースにある設計指針の改良、対策の検討が進んでいない。
- 本プロジェクトでは、国内の複数の積雪地域に屋外積雪荷重測定装置を設置し、冬期間における上記荷重データを収集し、分析を実施する。
- これにより、既存の設計指針につなげることができる。分析の主な視点は次のとおりである。
 - アレイに堆積する積雪の性状や深度などと、太陽電池モジュールや太陽電池アレイ用支持物に及ぼす荷重との間にどのような関係性があるのか。
 - 現在の太陽電池モジュールの機械的荷重試験は、わが国の積雪地域に設置する太陽電池モジュールの機械強度の適合性の判断基準として適切であるのか。
 - 建築基準法における「屋根形状係数」(すなわち、JISC8955^[1]における「勾配係数」)は、太陽電池用アレイ支持物にも適用可能であるのか。

実験方法

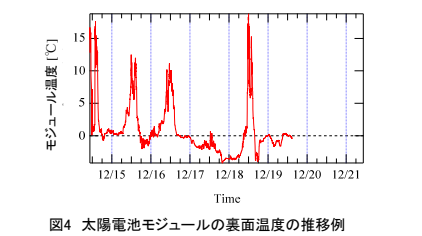
- 積雪による加重をロードセルにより観測する装置を作製。
- 3地点に設置:札幌、青森、新庄、傾斜角を3種類:10、20、30度。



【新庄の追加観測】
 観測露場にて10日毎に断面観測を行い、雪質の判別および積雪深の計測。
 観測露場にて5日毎に神室式スノーサンプラーを用い積雪重量の計測。

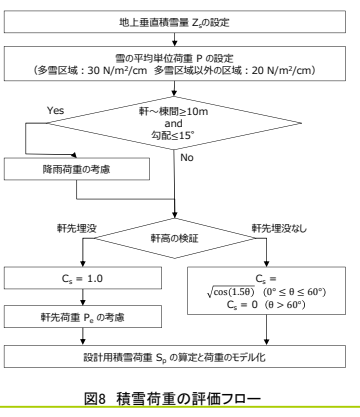
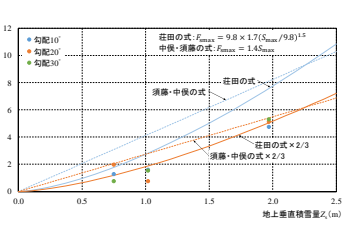
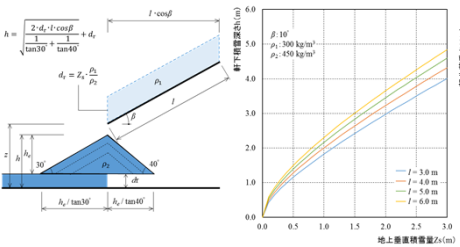
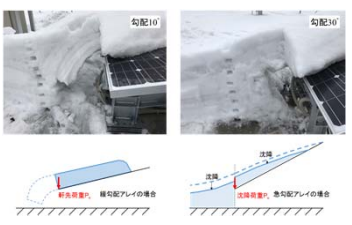


【青森の追加観測】
 気象計およびモジュール表面に温度センサーの設置。
 (4箇所×3パネル)。



実験結果・考察

- 北海道、青森、山形に導入した測定装置により、積雪加重の測定が可能なことを確認。
- 軒側に大きな荷重が作用することを実測し、設計用荷重モデルの素案を作成した。



設計支援ツールの作成

- 設計用垂直積雪量のデータベース表示ソフトの作成、公開。
- QGIS(フリーソフト)上で動作するアプリを開発。地図上でクリックすることで、緯度経度・標高(250mメッシュデータ)・海率を取得し、垂直積雪量を計算・表示する。緯度経度・標高は利用者が直接入力することも可能。
- https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/service/PV_Electrical_Safety/index.html



結論

- 太陽電池アレイの架台にかかる積雪荷重の実測を行い、沈降圧による軒先にかかる荷重を観測。積雪荷重の設計方法を提案した。
- 本事業の成果を反映:「太陽光発電の直流電気安全のための手引きと技術情報(第2版):2019年7月掲載」
https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/service/PV_Electrical_Safety/index.html

参考文献

- [1] JIS C 8955 : 2017 太陽電池アレイ用支持物の設計用荷重算出方法。
- [2] 千葉 隆弘 他、「積雪地域における太陽電池アレイの軒先に作用する積雪荷重」、平成30年度日本太陽エネルギー学会/日本風力エネルギー学会合同研究発表会講演論文集, 2018。

謝辞:この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られた。関係者に感謝する。

太陽光発電設備の ヒヤリハット・インシデント情報収集

高島 工・大関 崇・加藤 和彦

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター システムチーム

研究の目的

太陽光発電設備の安全に関する実態を把握し、今後の太陽光発電システムの安全対策の参考とするために、全国の太陽光発電システムにおけるヒヤリハット・インシデント事例を情報収集した。

調査方法

ウェブサイトにて、太陽光発電システムユーザー、設計業者、施工業者、保守業者等に、太陽光発電設備の計画、設計、施工、運転、保守、廃棄時における事例を収集。
調査期間：2017年2月～2019年2月

まとめ

収集した61事例をカテゴリ別、原因別に整理した結果、電気事故、機器破損、部材関連、作業員関連で全体の7割、原因別では、作業員不注意と設置方法の問題で全体の6割以上を占めた。

調査結果：全61事例のうち代表的なものを以下に示す。

凡例：事例番号、事例カテゴリ、原因カテゴリ、システム構成、システム規模、経緯・被害、対応、写真

事例番号	事例カテゴリ	原因カテゴリ	システム構成	システム規模	経緯・被害	対応	写真
5	電気事故	設置方法	地上設置	1,000 kW～2,000 kW未満	U相の端子台に端子が2つ抱き合わせて締め付けてあり、端子の間に絶縁キャップが挟まっていた。絶縁キャップが噛んでしまい端子の間に隙間が発生しそこから発火。パワコン1台分の発電が停止。	オーナーからのご要望で現状復帰という形で是正工事を実施。ケーブルに余長があった為端子のみを交換し、PCSの端子台を新品交換。	
6	電気事故	設置方法	地上設置	1,000 kW～2,000 kW未満	保護管内で1対のソーラーケーブルが何らかの原因で短絡してアークが発生し、同一保護管に挿入されていた6対のケーブルもすべて焼損。モジュールと接続箱間の28 mのケーブルが導火線のように燃えた。	+ケーブルとケーブルを別々の保護管に挿入して隔離し短絡防止。	
13	電気事故	設置方法	屋根設置	10 kW～50 kW未満	ストリングの負極の電線が架台とパネルに挟まれ電線芯線が露出、架台と接触し完全地絡。PCS側で地絡エラーは検出されず運転が継続されていた。点検時に絶縁抵抗を測定して発覚。それまでの運転時に触れる人がいなかったため被害はなかった。	露出箇所を防水絶縁テープで補修。	
24	機器破損	不注意	地上設置	10 kW～50 kW未満	除草作業中の不注意で埋設管に気づかず、埋設管に傷をつけてしまった。	埋設管の補修・目印の設置を行った。事前に除草作業範囲を確認し、作業員全員で位置を確認して作業を行うようにした。	
31	部材	設置方法	地上設置	10 kW～50 kW未満	縦横にダクターチャンネル、横横との接続にダクタークリップを使用。ダクターチャンネル、ダクタークリップとも配管を支持する用途の電材で、架台としての強度があるとは到底考えられず、強風により金具が破損し、モジュール飛散の危険性が非常に高い。	発電事業者経由で施工店に連絡。強度の確認をするよう指摘。	
41	作業員	不注意	屋根設置	10 kW未満	7月中旬の除草作業時。昼休憩時に若干左手に違和感があったが、機械操作の影響でこわばっているのだらうと思っていた。しかし午後3時半過ぎに、次第に全身がつって自分では身動きがとれないようになってしまった。救急車で搬送後、点滴などで無事回復。	慣れによる安易な考えを改め、高所での危険作業である事を現場にて全員に周知。安全対策の足場がない場合は、棟側にロープを張り、ヘルブロックとベストを装着して作業に従事する。	
44	作業員	作業環境	地上設置	10 kW～50 kW未満	7月中旬の除草作業時。昼休憩時に若干左手に違和感があったが、機械操作の影響でこわばっているのだらうと思っていた。しかし午後3時半過ぎに、次第に全身がつって自分では身動きがとれないようになってしまった。救急車で搬送後、点滴などで無事回復。	施工のスピードを頭に入れず、余裕を持った工程と、適度な小休憩をより多く取り入れる事を徹底するよう心がける。1人作業を絶対しない。	
50	小動物	小動物	地上設置	高圧案件(規模不明)	小動物によりケーブルとコネクタが破損されていた。漏電や火災の原因になる可能性があった。	小動物が侵入できないよう、フェンスの設置を行い、ケーブルの結線を改めた。	
53	環境	設置方法	地上設置	50 kW～500 kW未満	基礎フレームが杭のスパン毎で区切られているために、杭の高さの影響を直接受ける設置方法になっている。所々の杭が沈下をしてしまったためにアレイが波打っている。栗畑を整地して太陽光発電を設置したと思われ、埋戻しをした場所だけが沈下をしている。	経過観察のみ(他社案件のため)。	
58	環境	設置方法	地上設置	不明	土砂流出にて基礎の埋設部分が露出し強度に不安。下流に被害あり。	経過観察のみ。	
61	盗難	盗難	地上設置	高圧案件(規模不明)	PVケーブルが切断され、感電の恐れがあった。警察の事情聴取や、保険会社等のやりとりが生じた。お客様の売電事業にも影響があった。	監視カメラや、防犯ライトの設置、警備員の見回り、監視を促す看板の設置を行った。	
8	電気事故	設置方法	地上設置	50 kW～500 kW未満	架台上で作業をしていたところ体に電撃が走った。作業後にPCSを確認したところ接地線が未設置であった。後日、施工業者が接地線を設置。		
17	機器破損	不注意	屋根設置	10 kW未満	リフトを使ってモジュールの荷揚げをしているときに、モジュールを縛るゴムバンドをしていなかったため、風にモジュールが煽られて落下し傷が入った。ガラス割れはなかった。		
49	小動物	小動物	地上設置	10 kW～50 kW未満	架台に蜂の巣があり、作業により蜂を刺激して刺された。事前に調査し、防護服や殺虫剤を持参。アナフィラキシーショック等に対応できるよう、応急処置の方法を学んだ。		



太陽光発電設備の絶縁抵抗測定の大範囲化

高島 工・池田 一昭・大関 崇
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター システムチーム

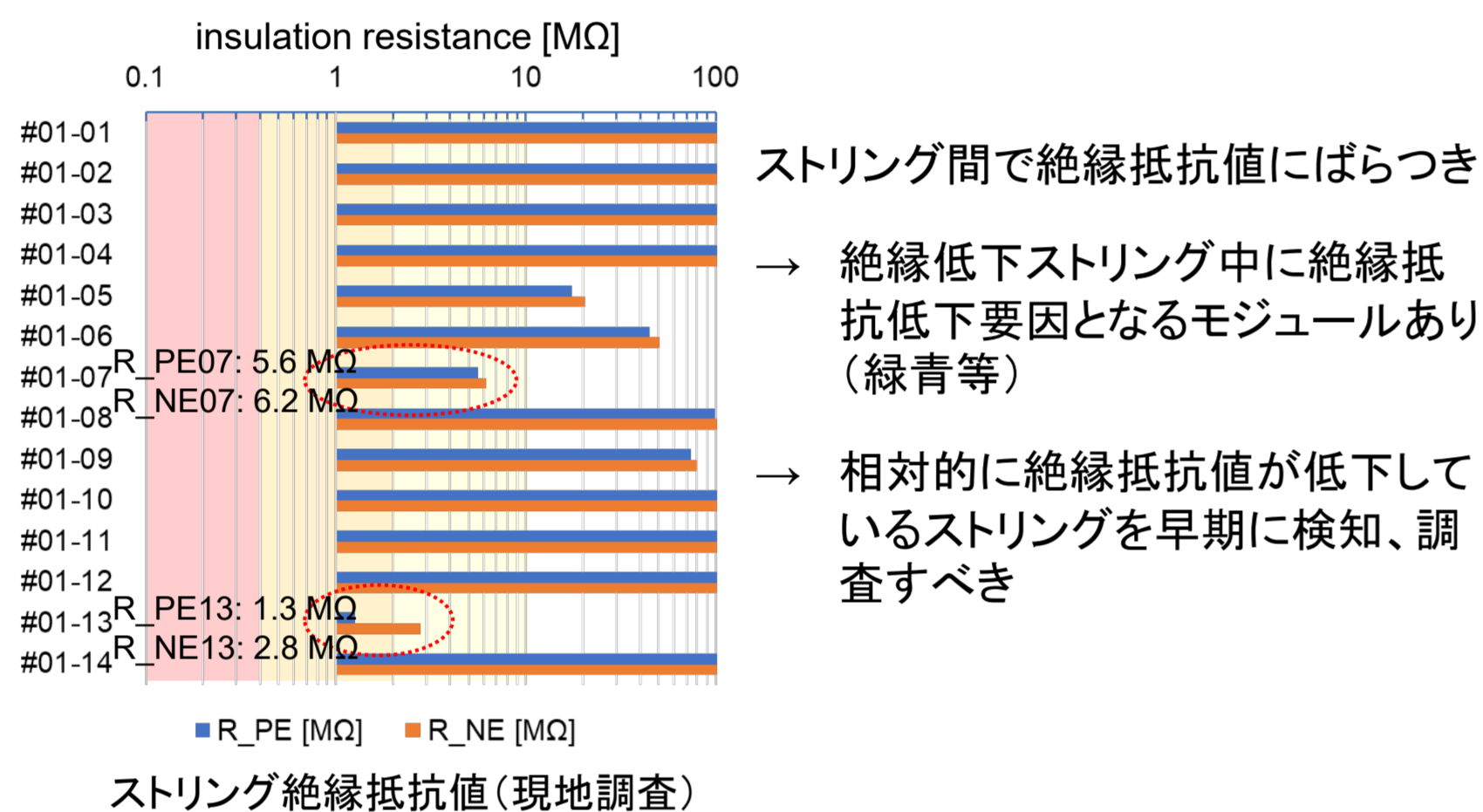
絶縁抵抗監視領域拡大の意義

太陽光発電システムの絶縁抵抗低下による感電や火災を未然に防止するために、太陽光発電システムの電路と非充電部間の絶縁抵抗低下の検出は重要

地絡検知：現状の主たる絶縁抵抗低下検出
300 Vを超える電路：絶縁抵抗要件0.4 MΩ(漏洩電流1 mA)
(電気設備に関する技術基準を定める省令第58条)

太陽光発電システム保守点検ガイドライン(JEMA、JPEA)、2016年12月28日制定：

“ほかの太陽電池サブアレイ及びストリングに比べて異常に低い値(例えば、数100 MΩ又は数10 MΩに対し、数MΩまたは1 MΩ以下)がある場合は切り離すなどして原因を調査する。”



→ ストリング間で絶縁抵抗値にばらつき
→ 絶縁低下ストリング中に絶縁抵抗低下要因となるモジュールあり(緑青等)
→ 相対的に絶縁抵抗値が低下しているストリングを早期に検知、調査すべき

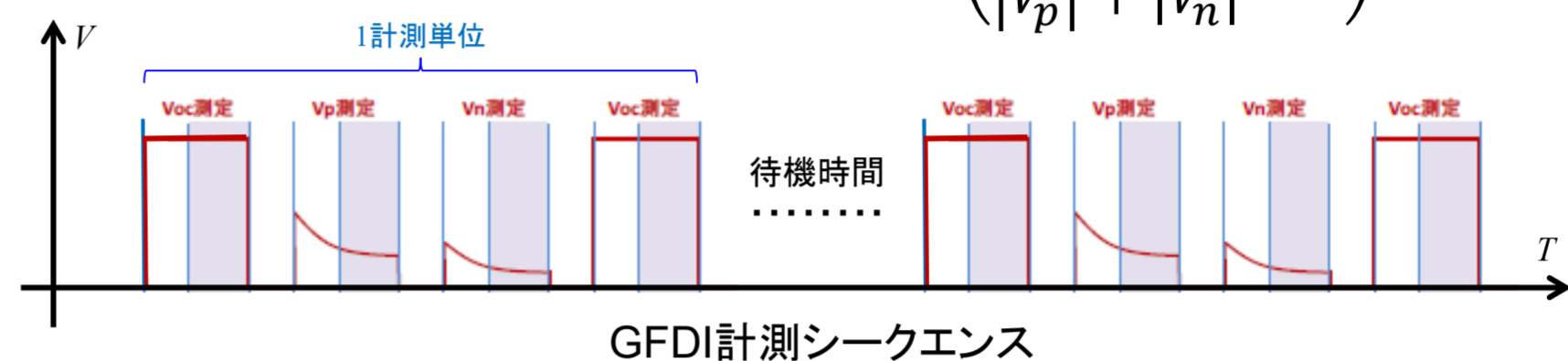
絶縁抵抗常時監視：地絡事故予防保全に有益

本報告：予防保全に向けて絶縁抵抗測定範囲を拡大した装置の性能評価

絶縁抵抗測定範囲の拡大

試作装置(GFDI: Ground Fault Detection Interrupter)測定方式：自己バイアス方式
測定：開放電圧 V_{oc} 、正極対地電圧 V_p 、負極対地電圧 V_n

$$R_{ins} = (R_d + 2R_g) \left(\frac{V_{oc}}{|V_p| + |V_n|} - 1 \right)$$



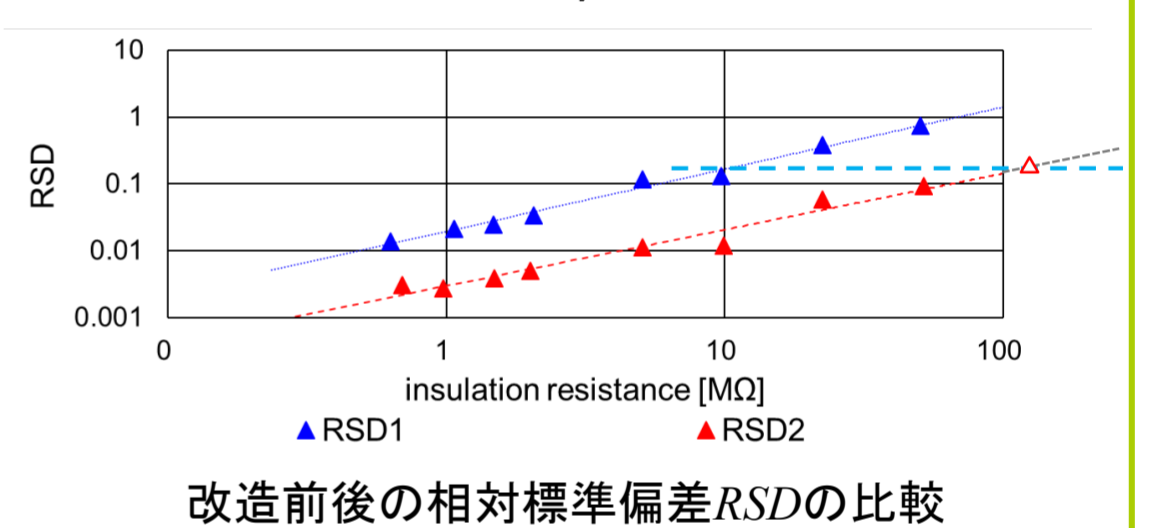
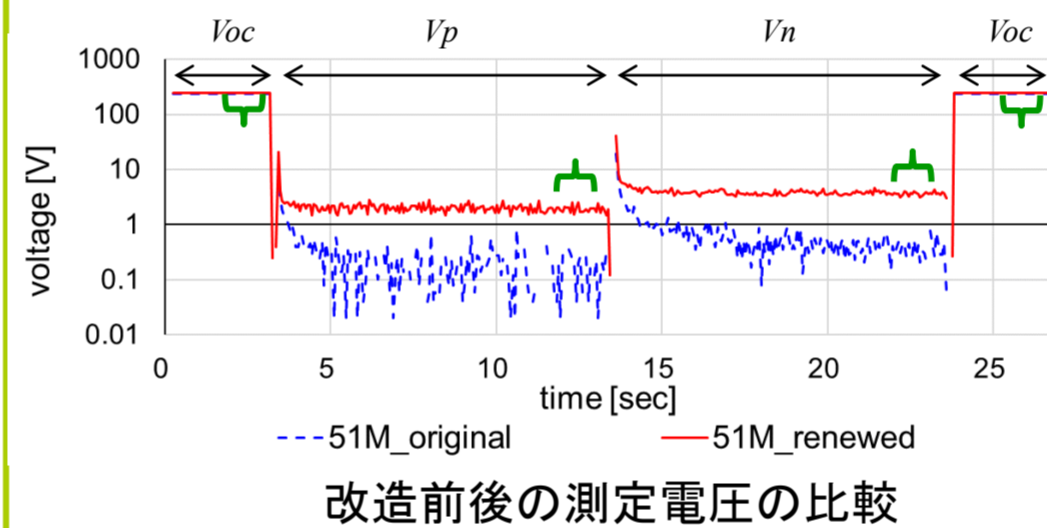
対象：単結晶シリコンモジュール8枚直列ストリング(1枚は表面ガラス割れ)

回路パラメータ：改造前(100 kΩ~数MΩ)： $R_d = 0.27 \text{ k}\Omega, R_g = 56 \text{ k}\Omega$
改造後(20 MΩ~100 MΩ)： $R_d = 2.7 \text{ k}\Omega, R_g = 560 \text{ k}\Omega$

評価パラメータ 各極対地電圧平均値の和 $V = |V_p| + |V_n|$

各極対地電圧標準偏差の和 $\Delta V = \sigma_{V_p} + \sigma_{V_n}$

相対標準偏差(測定のばらつき) $RSD = \frac{\Delta V}{V}$



測定精度の許容範囲の拡大：

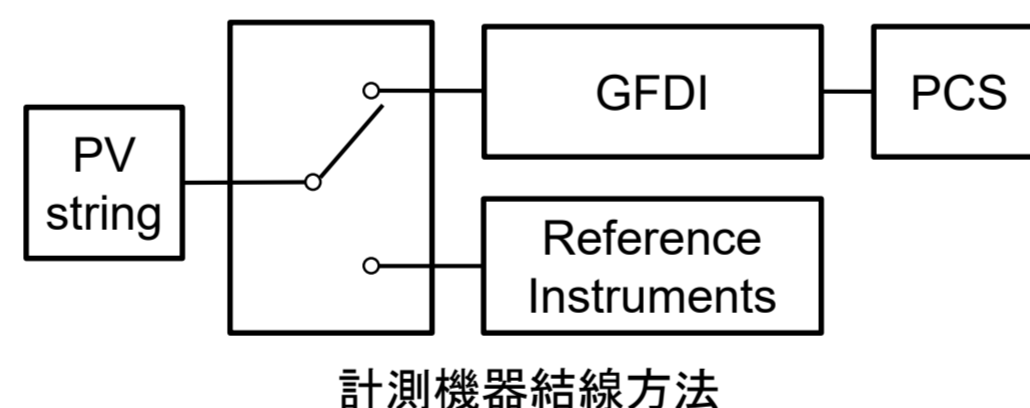
改造前機器による10 MΩ測定時のRSD： 0.166

改造後機器において同等精度の測定→絶縁抵抗118 MΩ程度まで測定可能

異種計測器による同ストリング絶縁抵抗同時測定

●測定の目的：

- 試作機と市販機(測定範囲：~10 MΩ程度)の絶縁抵抗推定値を比較
- 高絶縁抵抗領域(10 MΩ以上)の測定能力を比較



●測定方法：

- 同ストリングの絶縁抵抗
- (ほぼ)同じ環境条件下
- 異種計測機器で(ほぼ)同時に測定

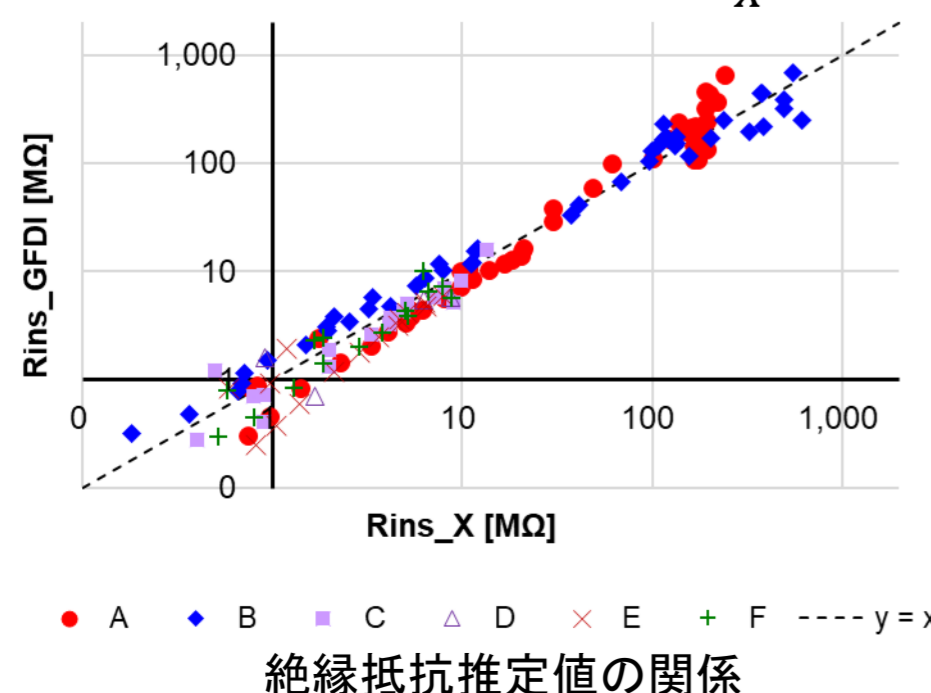
●使用機器： 試作機(GFDI)、市販機

●絶縁抵抗推定値の関係：

市販機に対し試作機はほぼ同等に絶縁抵抗を推定

●規格化誤差による評価

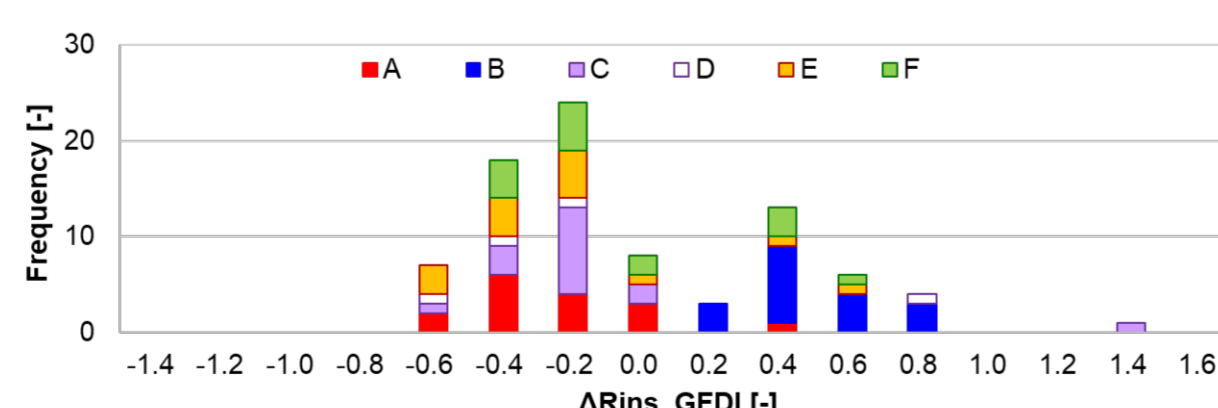
$$\Delta Rins_{GFDI} = \frac{Rins_{GFDI} - Rins_X}{Rins_X}$$



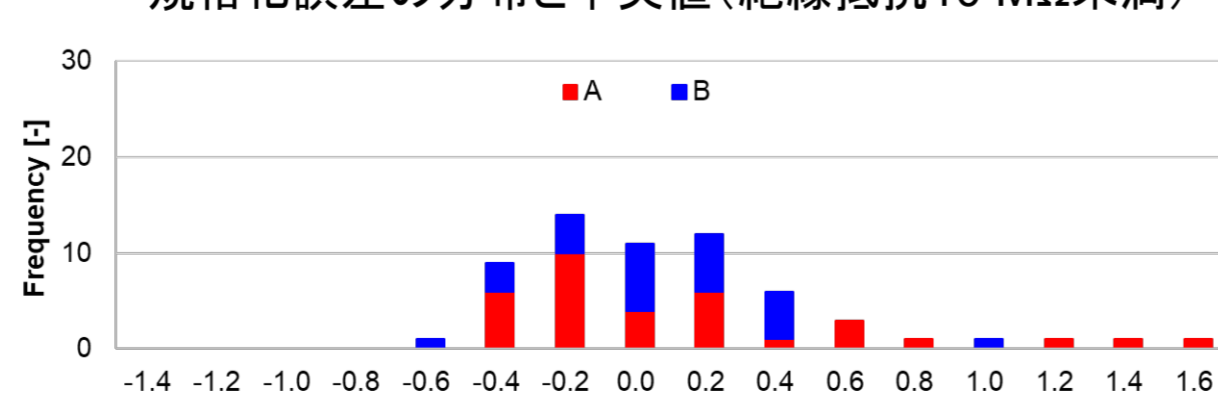
絶縁抵抗同時測定計測シーケンス

使用機器仕様

機器	GFDI	A	B	C	D	E	F
方式	自己バイアス	PVΩ	自己バイアス	自己バイアス	PN短絡	自己バイアス	自己バイアス
測定範囲	0.1 MΩ~	~2000 MΩ (500 Vレンジ)	~2 MΩ(画面表示) (~1000 MΩ:内部)	~99 MΩ	~199 MΩ	~19.99 MΩ	~9.99 MΩ
計測時間	10秒 (設定可変)	4秒以上	10秒	約30秒		30秒、180秒、300秒、600秒、900秒	10秒 (設定可変)



	A	B	C	D	E	F	All
median	-0.30	0.39	-0.17	-0.23	-0.26	-0.24	-0.15



	A	B	All
median	-0.07	0.07	0.05

結論と今後の課題

- 太陽電池ストリングの絶縁抵抗測定範囲を拡大した装置の性能を評価
 - 数MΩ程度までを測定範囲としていた既存機を改造し、既存機と同等のばらつきで100 MΩ程度まで測定可能
 - 実ストリングを試作機と市販機で同時測定し、市販機に対して試作機がほぼ同等に絶縁抵抗を推定していることを確認

- アレイ単位の絶縁抵抗測定を行い、アレイ内の絶縁低下の検出性能を評価
- 絶縁抵抗常時監視の技術課題の明確化

謝辞：本研究成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものである。

インターコネクタ接続不良に伴うセル発熱のシミュレーション分析

加藤亮輔¹・岡島敬一¹・加藤和彦²・宮本裕介³

¹筑波大学 大学院システム情報工学研究科

²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター システムチーム

³株式会社 関電工

研究背景

■ 実運用システムでセル焼損事例が発生

- ✓ BPC故障に起因するセル焼損プロセス
バイパスダイオードの開放故障の発生
不良部への電流の流入, セルの過熱・焼損

実際の焼損セル



✓ 本研究の対象事例

- バイパス回路が正常なPVモジュール
インターコネクタ接続不良に起因すると考えられるセル焼損が発生

研究目的, 概要

研究目的

バイパス回路に異常のないPVモジュールのインターコネクタ接続不良に起因するセル焼損を対象とした発熱分析

研究概要

回路シミュレーション

接続不良部における
抵抗値・発熱量の算出

伝熱シミュレーション

セル構成部材の温度上昇と
PVセル内の温度分布を分析

分析手法

回路モデルの構築 (LTspice)

✓ セルモデル

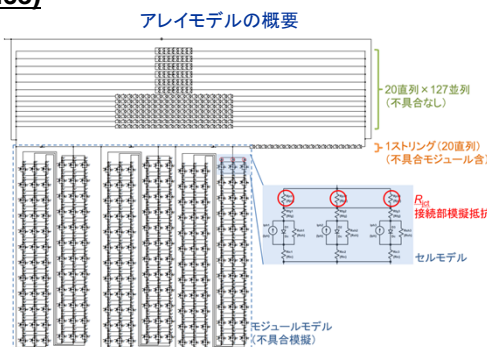
インターコネクタでの発熱算出のためセルを3分割

✓ モジュールモデル

セルを72直列接続し
295 Wモジュールを構築

✓ アレイモデル

モジュールを20直列・
128並列に接続し構築



➤ 回路モデルにおける発熱の計算

STC下において P_{max} で動作する場合における一つの接続部抵抗のジュール発熱を算出

1. 1セル内の3つの接続部抵抗が等しく増大する場合
2. インターコネクタが1本もしくは2本断線する場合

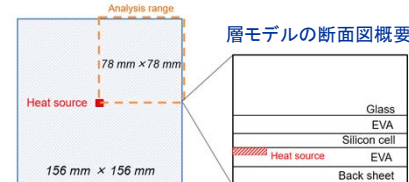
伝熱シミュレーションモデル (ANSYS)

- ✓ 回路シミュレーションで算出したジュール熱がPVセルの中心一点で発生することを仮定

→ モデルの対称性を考慮して, セルの1/4モデルを設計

- ✓ ガラス, EVA, セル, バックシートで5枚の層によるPVモジュールモデルを構成

熱解析モデルの概要



➤ セル構成部材への伝熱シミュレーション

表面温度25°C風速1 m/sにおいて回路シミュレーションで算出したジュール発熱を与えた場合の熱分布を算出

結果, 考察

回路シミュレーション結果

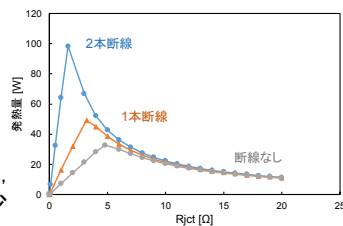
抵抗増大に対する, 接続不良一箇所における発熱量

✓ 発熱がピークを迎えるまで

→ バイパス回路への電流迂回せずセル回路へ流入

✓ 発熱がピークを超えた後

→ バイパス回路へ電流が流入, セル回路へ流入する電流値減少

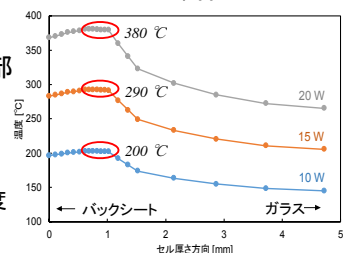


伝熱シミュレーション結果

発熱10~20 W 時のセル中央部厚さ方向の温度分布

✓ 10 W発熱時, セル中心温度は

200 °Cに達し,
20 W発熱時には, セル中心温度は380 °Cまで到達



抵抗増大に対する, セル中心温度の推移

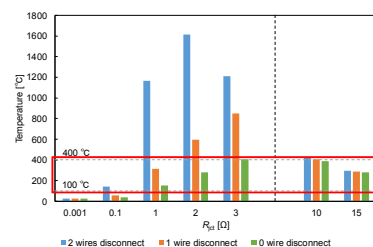
✓ EVAの分解温度に着目

- 酢酸ビニル系: 約 100 °C
- ポリエチレン系: 約 400 °C

✓ 抵抗値範囲: 0.1 - 3 Ω

→ 電流が分流しない範囲

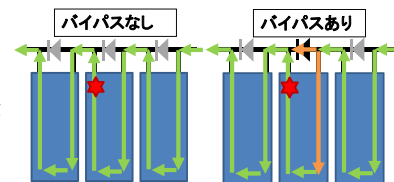
→ 初期不良および接続部劣化による発熱の可能性



✓ 抵抗値範囲: 10 Ω 以上

→ 電流が分流する範囲

→ 初期不良などの大きな接続部抵抗による発熱の可能性



電流がバイパスされるケースにおいても焼損に繋がる発熱可能性が示唆

まとめ

- ✓ 接続部抵抗が0.1-3 Ω : バイパス回路へ迂回せずセル回路へ電流が迂回
- ✓ 接続部抵抗が10 Ω 以上: バイパス回路へ電流が迂回しセル回路電流が減少

セル温度が100~400 °Cまで到達
→ EVAの分解が開始
→ セル焼損リスクの増大

➤ バイパス回路に異常がなく, 電流が分流する場合においてもセル発熱に繋がる可能性が示唆された

PVシステムのリスク評価とリスク軽減手法の検討

岡島敬一¹・小林 樹¹・大関 崇²

¹筑波大学 大学院システム情報工学研究科

²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター システムチーム

研究の目的

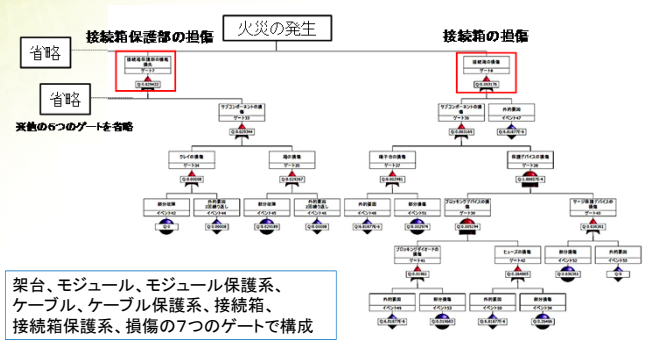
PV火災に対する状況

- 実際の事故に基づくインシデント報告がみられ始めてきている
- 火災発生メカニズムの解明・対策検討が始まってきている
- PV設置ガイドラインは各国で強化されつつある

しかしながら費用対効果の高いリスク軽減措置が確認されていない

目的：リスク軽減措置の費用対効果の定量的評価

フォルトツリーの構築



対象としたリスク軽減措置

①軽減措置の有無による評価(Group A)



②構成要素の補強による評価(Group B)



リスク軽減措置の費用対効果評価

指標Q, MCを以下の通り定義し、費用対効果を評価

○ 信頼性対策効果 Q 単位対策費用あたりの損失軽減額の期待値

$$Q = \frac{\text{Benefit}}{\text{Prevention Cost}} = \frac{(F_0 - F_1) \times \text{Loss Cost}}{\text{Prevention Cost}} \quad (1)$$

○ 単位改善費用 MC 措置によって軽減された単位故障数あたりの対策費用

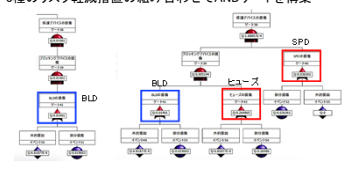
$$MC = \frac{\text{Prevention Cost}}{n_0 - n_1} \quad (2)$$

Prevention Cost: 対策費用
 F_0 : 措置未適用時の不信頼度(基準となる不信頼度)
 F_1 : 措置適用時の不信頼度
 Benefit: 損失軽減額
 Loss Cost: 経済的損失
 n_0 : 措置未適用時の故障数(基準となる故障数)
 n_1 : 措置適用時の故障数

評価手順、設定と前提条件

▶ 最小単位として20 kWのシステムを想定

①軽減措置の有無による評価(Group A)
 3種のリスク軽減措置の組み合わせでANDゲートを構築



○対策費用 Prevention Cost

リスク軽減措置	対策費用[万円]
BLD付コネクタ	7.3
ヒューズ	1.0
SPD	3.2
ケーブルカバー	2.5-6.0
接続箱	0.5-2.0
モジュールコネクタ	1.0-5.0

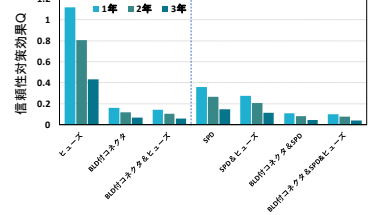
②構成要素の補強による評価(Group B)
 各要素の故障率を25, 50, 75, 100%に設定し評価

故障軽減率[%]	故障率[FPMH]	不信頼度
0(基準)	0.3411	0.6205
25	0.2558	0.6182
50	0.1705	0.6160
75	0.0853	0.6136
100	0	0.6113

○経済的損失 Loss Cost
 $\text{Loss Cost} = \text{総発電ロス} \times \text{売電価格}$
 1年間運用時に火災が発生した場合
 $\text{Loss Cost} = 1258 \times 20 \times 19 \times 32 \approx 1530 \text{万円}$
1258 kWh/year: 1kWシステムの年間発電量
 20 kW: モデルのシステム容量
 19 year: 火災発生時の本来の残り耐用年数 32円/kWh: 売電価格

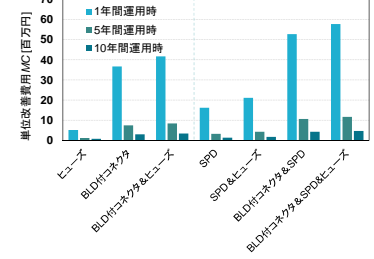
措置の有無による評価 Group A

信頼性対策効果Q (1年、2年、3年運用時)



- ヒューズの信頼性対策効果Qが1.1と最も高い(1年間運用時)
- ヒューズのQはBLD付コネクタの約5倍となる
- 組み合わせることで信頼性は向上するが、Qの向上には結びつかない
- 対策費用の影響を強く受ける
- ヒューズの費用対効果が相対的に高い

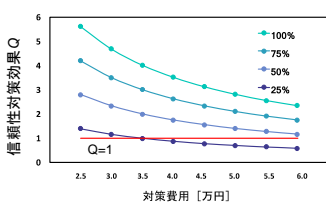
単位改善費用MC (1年、5年、10年運用時)



- BLD付コネクタ&SPD&ヒューズに代表されるように、対策費用の高い組み合わせほど単位改善費用が高い
- 運用年数1年の時の単位改善費用を1とすると、およそ5年運用時は0.2、10年運用時は0.1となる
- 運用年数の増加に伴い故障数が増加するため、Qは逆に減少する
- 対策費用の影響を強く受ける

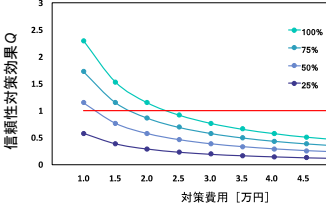
構成要素の補強による評価 Group B

ケーブルの軽減率別信頼性対策効果



- 100%軽減かつ対策費用2.5万円の時、信頼性対策効果Qが約5.5と高い
- 50%故障軽減の時 対策費用に依らず閾値を上回る
- 50%以上の故障軽減を見込める時リスク軽減措置として効果的

モジュールコネクタの軽減率別信頼性対策効果



接続箱の軽減率別信頼性対策効果

- 安い対策費用と高い軽減率両方の実現が必要
- 0.5万円から1.0万円程度の対策費用で50%以上の軽減率が必要

結論

- 信頼性対策効果Q、単位改善費用MCを定義・導入し、定量的評価を実施した。対策費用DBの構築により、各軽減措置へ展開可能。
- ヒューズの信頼性対策効果はBLD付コネクタの約5倍で費用対効果が相対的には高いが、Qは最大で1.1と小さい。
- ケーブル、接続箱、モジュールコネクタの中ではケーブルの信頼性対策効果が最も閾値を上回る点が多い。
 ⇒ 50%の故障軽減の実現で、費用に依らず閾値を上回る可能性が見込める。
- 接続箱、モジュールコネクタは安価な対策費用と高い故障軽減率の両方を実現できれば、リスク軽減措置として有用となる。

AIを用いた太陽光発電システム 異常検知アルゴリズムの開発

本田 智則・小澤 暁人
産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会とLCA研究グループ

研究の背景

- FIT制度の後押しにより家庭用太陽光発電システムは2017年末時点で国内234万世帯(全戸建住宅の8.3%)に設置されている。
- 2019年1月末、消費者庁より「消費者安全法第23条第1項の規定に基づく事故等原因調査報告書-住宅用太陽光発電システムから発生した火災事故等」に関する報告書が発行され、安全監視が求められている。
- 設置者が長期的に経済的損失を被ることなく、安全に太陽光システムを運用するためには、定期点検や遠隔監視が不可欠である。

課題

- 家庭用太陽光発電システムは小規模であり、採算性の観点から新たな異常検知装置等を設置することが困難。
- 太陽光発電システム設置角度や方位、パネル種類等の情報が必要であり、また、日射条件等を考慮する必要があり、監視コストが高くなる傾向がある。

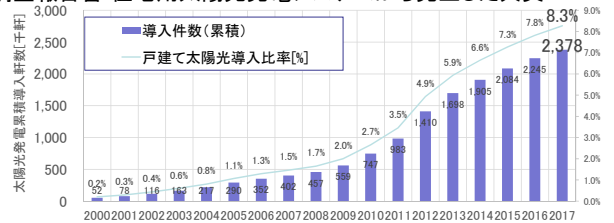


図1 国内家庭用太陽光発電システムの導入件数推移

近年急速に発展を遂げているAI技術を用いることで、設置形態やパネルの種類、気象情報等を使用せず、**1時間毎発電力量データのみから太陽光発電システムの異常を検知する手法を開発した。**

方法

- 太陽光発電電力量は天候、雲の動きによって大きく変動するため、「異常」を検知することが困難(図2)
- 多数の太陽光発電システムが設置されていることを利用し、評価対象住宅と周辺住宅の発電電力量を比較することで、気象データを使わず日射条件を把握することとした(図3)

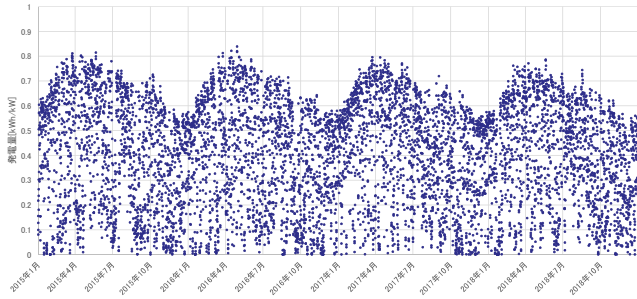


図2 過去4年間の1時間毎発電電力データ(発電時のみ)

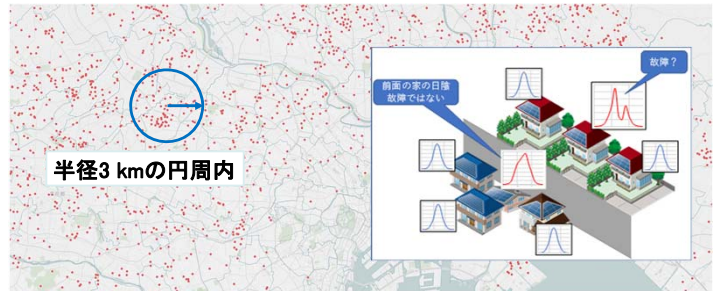


図3 周辺の太陽光発電システム発電実績との比較イメージ

- 実際には近隣であっても雲の動きや屋根形状・方位等により発電量が大きくことなる(図4)
- 近隣住宅の発電データから、評価対象住宅の発電量を推定するAI・機械学習アルゴリズムを開発【産総研にて特許出願】。
- これにより天候、住宅の屋根傾斜、住宅方位の違い等様々なノイズ要因を除去し高精度に故障検知を実現(図5)

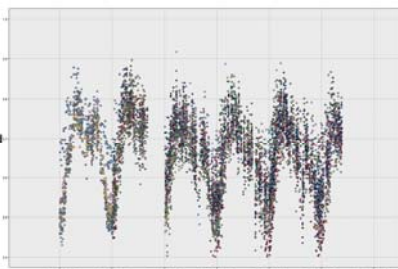


図4 近隣であっても発電量は大きくばらつく

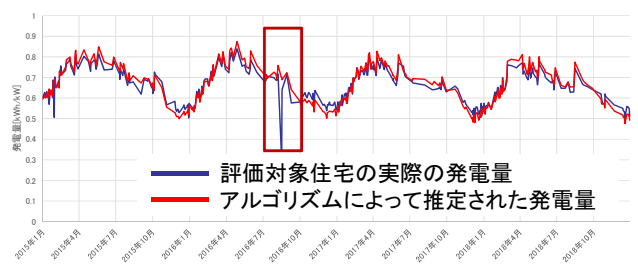


図5 機械学習・AIを用いてノイズを除去して比較を可能にした

精度の検証

パワーコンディショナー製造元の修理・問い合わせ記録を元に異常検知性能の検知性能検証を試みた。本来であれば、誤検知率も検証すべきであるが、修理記録に記載されていない故障も発生しているため、誤検知率の検証には至っていない。

- 検証対象世帯数
 - 故障またはそれに類する問い合わせが行われた住宅数: 1110世帯、述べ1260件
 - 実際に太陽光発電システムが故障していた世帯数: 373世帯
- 開発アルゴリズムによる検知力
 - アルゴリズムによって出力低下が検知できた世帯: 325世帯
 - **認識精度: 87.1%**

結果

- 太陽光発電システムの発電実績データのみから、高精度に異常を検知可能なAI・機械学習アルゴリズムを開発した。
- 今後は、深層学習を用いることによって故障検知だけでなく、故障予知を実現するための手法を開発していく。
- これによって、家庭用太陽光発電システムの低コストな故障検知・予知を実現し、設置者の安全性と経済性を担保する手法を提案する。

謝辞

本研究成果の一部は下記の助成による研究成果を含みます。
 • HEMSデータに基づく創制的社会システム形成のための消費者インセンティブの解明
 代表: 本田智則、基盤研究A[18H04155]、2018～2021年度
 • 分散型エネルギー取引市場制度設計に関する理論構築、経済実験及び社会実装
 代表: 本田智則、基盤研究A[26241033]、2014～2017年度
 • 生活行動パターン・高解像度気象予報による住宅電力需要・PV出力予測手法の開発
 代表: 小澤暁人、若手研究[18K14171]、2018～2020年度

太陽光発電システム搭載自動車への電力配分回路の適用に関する検討

山田 隆夫・大関 崇

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター
システムチーム

研究の背景・目的

○PVの1TW導入⇒脱炭素なXaaS実現におけるPV導入形態(利用用途、多様性)

○移動体へのPV導入(VIPV: Vehicle Integrated PV)

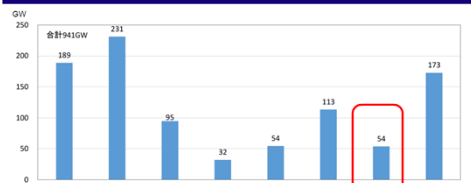
IEA PVPS 17 "PV for Transport"開始、IEC Standard WG7でも議論開始。

○運輸部門のエネルギー、CO₂削減。

日本全体での2030年におけるCO₂排出削減効果は最大227万t-CO₂/年。

(2030年に向けた乗用車におけるCO₂排出削減量の11%相当)

2050年の物理的導入ポテンシャル



出典: 平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査「再生可能エネルギー固定価格買取制度における経路金半値算定の精緻化に向けた分析等調査報告書」2018.3.

VIPVの可能性

プリウスをはじめ、海外での検討も活発化。



出典: TOYOTA
https://toyota.jp/priusphv/performance/charge/?padid=ag341_from_priusphv_top_performance03#



出典: Hyundai
<https://electrek.co/2018/10/31/hyundai-kia-solar-roof-electric-vehicles/>



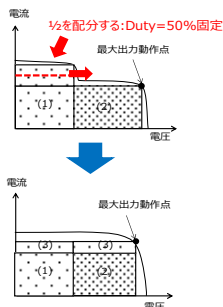
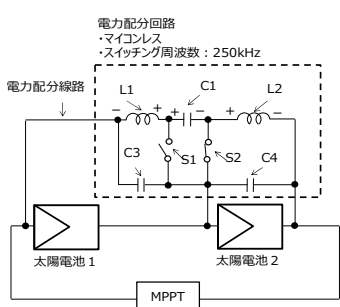
出典: Hanergy WEB
<http://en.hanergy.com/channel/fullySolarPoweredCars.html>

技術的課題のひとつに
曲面によるミスマッチ

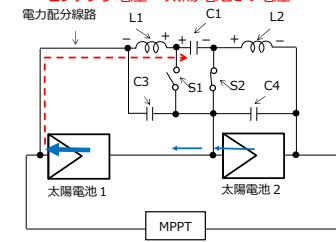


ミスマッチ損失の低減が必要

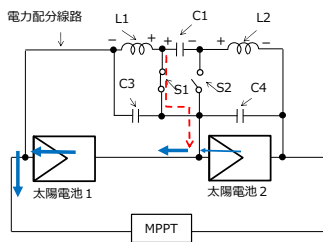
原理



- 出力の大きい方からコンデンサに充電
- 太陽電池1(出力大)は、律速される側のため動作電圧は、太陽電池2より高い。
⇒コンデンサ電圧 = 太陽電池1の電圧

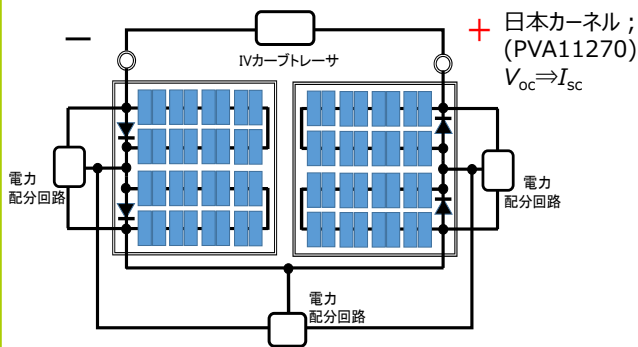


- 出力が小さい方は、動作電圧がP_{max}付近。
⇒コンデンサ電圧 > 太陽電池2
- コンデンサから出力の小さい方へ並列に放電

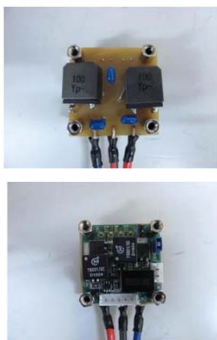


実験

- 電力配分回路をON/OFF時のP_{max}を比較
- IVカーブトレーサにより計測

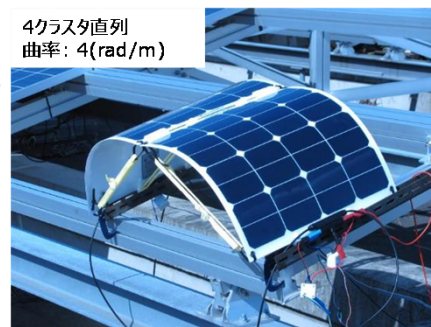


電力配分回路



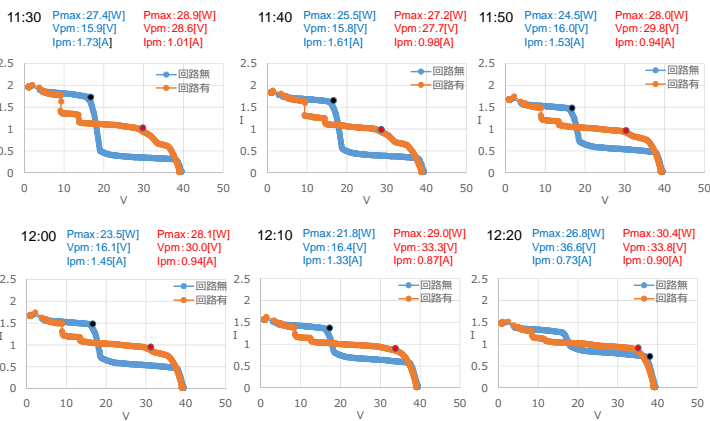
- 太陽電池1枚のスペック
- 2クラス
 - P_{max}: 50W
 - V_{pm}: 18V
 - I_{pm}: 2.7A
 - I_{sc}: 2.9A
 - V_{oc}: 20V

4クラス直列
曲率: 4(rad/m)



ALLPOWERS ソーラー
パネル P_{max}:
50W×2枚

結果

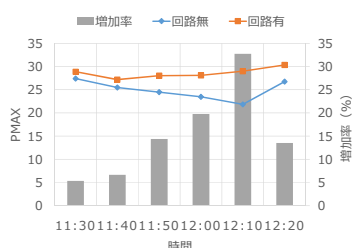


まとめ

太陽光発電システム搭載自動車への電力配分回路の適用に関して、基礎実験を実施。

○電力配分回路無ではモジュール間に出力電力差があると損失、電力配分回路有ではあまり変化がない。

○電力配分回路有は電力配分回路無に対し最大32.7%の増加があった。



車載太陽光発電の発電量における非平面パネル効果

太野垣健¹、荒木建二²、山口真史²、菅谷武芳¹

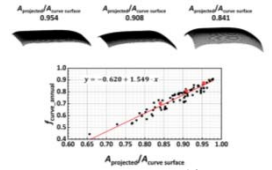
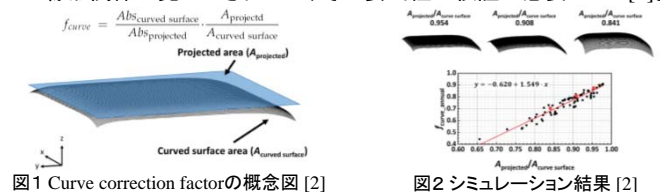
¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム、
²豊田工業大学

研究の目的

- 輸送部門における低炭素化技術の一つとして高効率太陽電池の車載利用が検討されている。車載においては、定置型への利用と異なる状況のため、発電量評価の技術確立が課題となっている。
- 自動車に搭載するには、平面部分のみならず側面や、ボンネット部など、曲面パネルの搭載も検討されている。太陽光発電パネルを車載利用する際に、曲面パネルを搭載することによる発電量の評価モデルを構築すること、またそれを実験的に評価するための指針を得ることが必要である [1]。
- 本研究の目的は、曲面パネルにおける発電量を評価する際に導入する“Curve correction factor”の特性を理解することである。

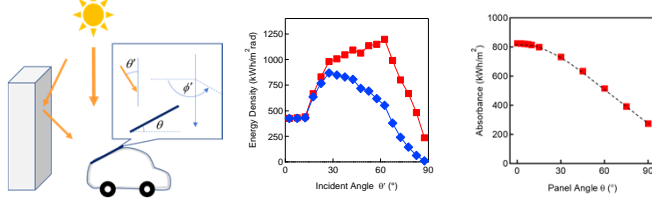
Curve correction factorについて

- 曲面太陽電池パネルの発電量の評価に向けて、平面パネルと比較する“Curve correction factor”が提案された[2]。
- モンテカルロシミュレーションにより、曲面/平面の面積比との間に線形関係が見いだされたが、その妥当性の検証が必要だった[2]。

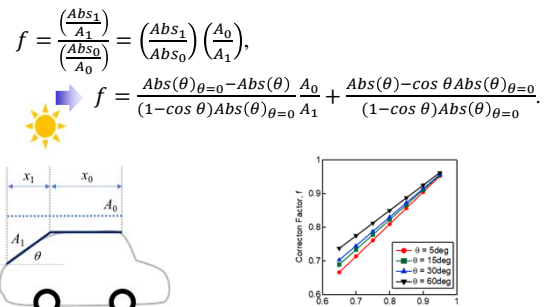


計算モデルと計算結果

- 傾斜した太陽光パネルが車載された場合について、入射光の角度分布(日本全国の平均値)と幾何学的光学モデルを用いて、発電量を計算した。 $Abs(\theta, \phi) = \frac{1}{2\pi} \int d\theta' \int d\phi' I_{AD}(\theta') \cos \theta$ 。
- 自動車の真横に設置したパネルにおいても屋根に取り付けたパネルの1/4以上の出力が得られることがわかった。

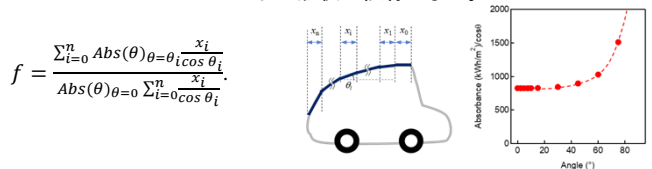


- パネルの設置角度に依るものの、Curve correction factorは面積比に線形の関係があることを幾何学的計算により確認した。



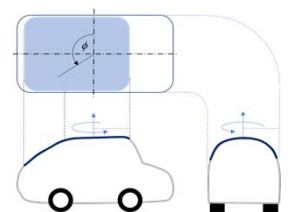
考察

- 曲面が40°以下である場合については、発電量 $Abs(\theta) \frac{1}{\cos \theta}$ はパネルの傾斜角度に依らない(±5%以内)。
- Curve correction factorがパネル形状に依存しない。



今後の課題: 3次元モデルの導入

- 地面に垂直な軸を中心とした極座標の導入により、非曲面パネルの傾斜角度分布を計算することができる。
- 任意の太陽電池パネル形状と発電量の計算モデルを構築することが今後の課題である。



結論

- 本研究では、自動車に搭載した太陽電池パネルにおける発電量の計算を行った。
- Curve correction factorの基礎特性を計算により見出した。
- 傾斜が40°未満の曲面パネルにおいては、Curve correction factorを用いた発電量評価が妥当であることを見出した。
- 任意の曲面パネルにおける発電量予測の3次元モデルを提案した。

本研究は、国立研究開発法人NEDO「超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発」の委託の下で行われた。

参考文献

- K. Araki, L. Ji, G. Kelly, and M. Yamaguchi, "To Do List for Research and Development and International Standardization to Achieve the Goal of Running a Majority of Electric Vehicles on Solar Energy," *Coatings*, vol. 8, no. 7, p. 251, 2018.
- Y. Ota, T. Masuda, K. Araki, and M. Yamaguchi, "Curve-Correction Factor for Characterization of the Output of a Three-Dimensional Curved Photovoltaic Module on a Car Roof," *Coatings*, vol. 8, no. 12, p. 432, 2018.
- T. Tayagaki, K. Araki, M. Yamaguchi, and T. Sugaya, "Impact of Nonplanar Panels on Photovoltaic Power Generation in the Case of Vehicles", *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 9, no. 6, p. 1721, 2019.

PV大量導入に向けた発電プロダクト作成

大竹 秀明^{1,2}・宇野 史睦^{1,2}・大関 崇¹・井村 順一³

¹産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター システムチーム

²気象庁気象研究所 客員研究員

³東京工業大学



研究の背景・目的

太陽光 (PV) 発電が大量に導入拡大が進んでいる。PV 発電を含めた、電力需給の一致のためにも、リアルタイムに PV 発電量の把握・予測が必要。

【課題】

- 電力事業者であってもリアルタイムにエリア内の PV 発電出力を正確にモニター出来ていない。
- メガソーラはテレメータによるデータ集約可能。住宅はスマートメータの普及が進んでいる最中。
- PV 導入量を加味した PV 予測データは公開可能な研究用データがない。

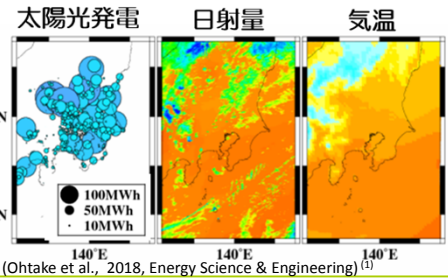
【研究】

気象衛星ひまわり8号・9号を用いて、リモートセンシング技術から地上の PV 発電出力を推定・検証を行う。気象予報モデルからの日射量予測値から PV 発電予測値を算出する。

気象衛星：2.5分毎、1 kmメッシュで日射量推定が可能 ⇒ **市町村毎に出力推定**

【開発プロダクト】 HARPS 専用ページからデータの公開

公開プロダクトの例 (市町村別にPV発電量を計算)



手法・データ

【各要素の設定】

- 気象庁メソモデル (MSM) の気温データから PV モジュール温度を加味
- 市町村別 PV 導入容量 (新規認定分+移行認定分) (広域エリア PV 発電量)
- $\alpha \cdot P_{max} - 0.485$
- PCS 損失: 0.95
- PV 導入量* ⇒ 市町村毎に考慮
- PV モジュール温度 (推定値) ⇒ 考慮
- PV モジュールの角度、方位、PCS 積増率などは考慮せず
- PCS 容量 ⇒ 仮定
- システム損失、モジュール温度損失 ⇒ 仮定

*PV 導入量情報: 固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト⁽²⁾

- 市町村別で PV 導入量 (現在稼働分や認定容量) の情報公開
- **太陽光発電**、風力発電、中小水力発電、地熱発電等

日射量 (入力データ)

- AMATERASS データセット (太陽放射コンソーシアム提供)

気象衛星ひまわりから推定した日射量データセット (Takenaka et al., 2011, JGR) ⁽³⁾

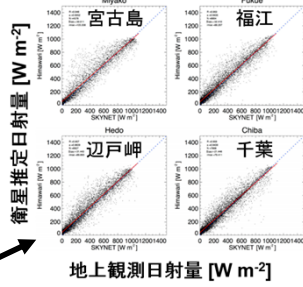
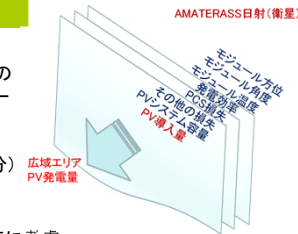


図1. 地上日射量と衛星から推定した日射量の比較

(Damiani et al. 2018, AMTD, ライセンスはCC BY 4.0 に基づき引用し、講演者が一部加筆したもの)

- ✓ 日本付近は 1 kmメッシュで 2.5分毎に推定値を計算・アーカイブ
- ✓ 地上の日射量データとの検証からも概ね気象衛星からの推定値は妥当であることを確認 (図1) (Damiani et al. 2018, AMTD) ⁽⁴⁾

検証結果とデータ公開

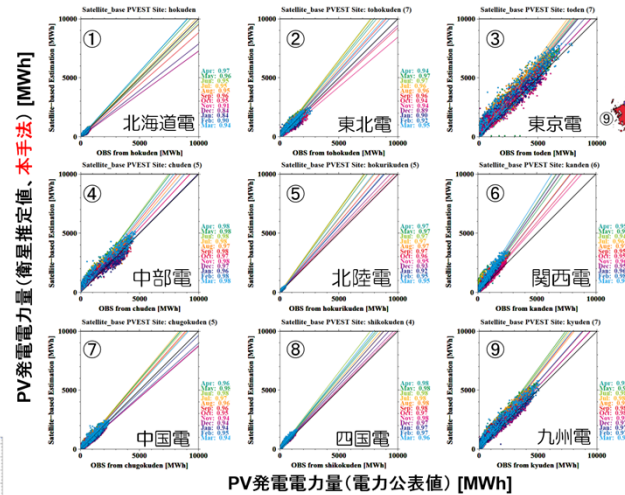


図2. 国内9電力エリア毎 (沖縄電力エリアを除く) に各電力会社から公表されるエリア合計値 (実測推定値で一時間値) と比較。

⇒ 季節毎に推定値のばらつきはややあるものの、概ね推定値は公表値に近い。

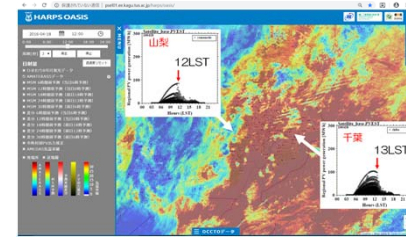


図3. 市町村毎に PV 出力の推定値を日射量マップ (HARPS OASIS) ⁽⁵⁾ と比較した例 (2016年4月18日)。関東地方は、西から雲が広がりが始め、関東西部の山梨県では12時頃から PV 出力が低下。関東東部の千葉県では、1時間後に出力低下を確認。⇒ 時間・地域的な詳細な PV 発電出力の変動分析が可能



図4. HARPS OPEN DATABASE ウェブページ ⁽⁶⁾。PV 発電出力実績データ及び PV 発電出力予測データを研究用途に限り、2019年4月より公開開始。

まとめ

- ✓ 開発プロダクト(1): PV 発電出力推定値 (実績相当) **2.5分毎に市町村別に推定**。電力会社から公表されている PV 発電実績値 (1時間値、電力エリア) と比較 ⇒ **概ね一致** (やや過大)。
- ✓ 開発プロダクト(2): PV 発電予測データ (30分値) の作成。
- ✓ 研究用プロダクトとして **公開** **HARPS OPEN Database** ⁽⁶⁾
- 異分野連携: **気象・PVデータ+** ⇒ PV、蓄電池、EV、送電・配電、EMS など
- ✓ システム理論構築: HARPS の研究活動成果を解説書として公開⁽⁷⁾ (開発プロダクトについての日本語解説あり)

参考文献

1. H. Ohtake, F. Uno, T. Ozeki, Y. Yamada, H. Takenaka, and T. Y. Nakajima, 2018: Estimation of satellite-derived regional photovoltaic power generation using a satellite-estimated solar radiation data. Energy Science & Engineering, Vol. 6, pp. 570-583.
2. PV 導入量情報: 固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト (経済産業省) <https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary>
3. H. Takenaka et al., 2011: Estimation of solar radiation using a neural network based on radiative transfer. J. Geophys. Res., Vol. 116, D08215.
4. Damiani, A., Irie, H., Horio, T., Takamura, T., Khatri, P., Takenaka, H., Nagao, T., Nakajima, T. Y., and Cordero, R. R., 2018: Evaluation of Himawari-8 surface downwelling solar radiation by ground-based measurements, Atmos. Meas. Tech., Vol. 11, pp. 2501-2521.
5. HARPS OASIS <http://psel01.ee.kagu.tus.ac.jp/harps/oasis/>
6. HARPS OPEN DATABASE <http://harps.ee.kagu.tus.ac.jp/other.php>
7. 太陽光発電のスマート基幹電源化 -IoT/AIによるスマートアグリケーションがもたらす未来の電力システム- (日刊工業新聞社)

謝辞 本研究はJST CREST「太陽光発電予測に基づく調和型電力系統制御のためのシステム理論構築」(代表 東京工業大 井村順一教授、JPMJCR15K1)の中において実施された。気象衛星から推定された地上の日射量データは、特定非営利活動法人 太陽放射コンソーシアムから提供されているAMATERASSデータを利用した。

HEMS最適運用に向けた 家庭エネルギー需給予測のためのAI活用

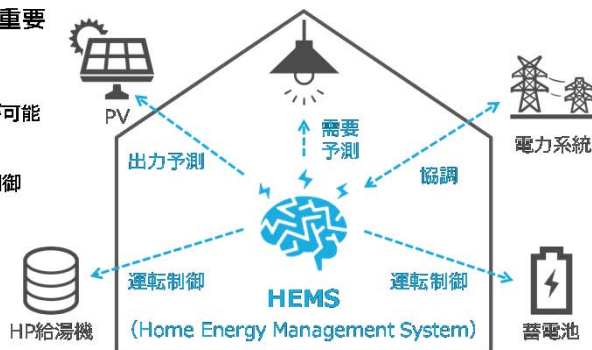
小澤 暁人・本田 智則

産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会とLCA研究グループ

研究の目的・背景

目的 住宅エネルギーマネジメントの実現に向けた電力需要・PV出力予測手法の開発

- 背景**
- 住宅用PVを活用するために、余剰売電から自家消費への転換が重要
 - ✓ 既設PVの買取期間終了(卒FIT)や、新設PVの買取価格低下によって、自家消費が居住者の経済的メリットになる機会が増えている
 - ✓ GHG削減に向けて、PVの自家消費を増やすことで出力抑制を減らすことが可能
 - 自家消費の増強策として、住宅エネルギーマネジメントが注目
 - 住宅の電力需要・PV出力に合わせて、蓄電池・HP給湯機・家電などを運転制御

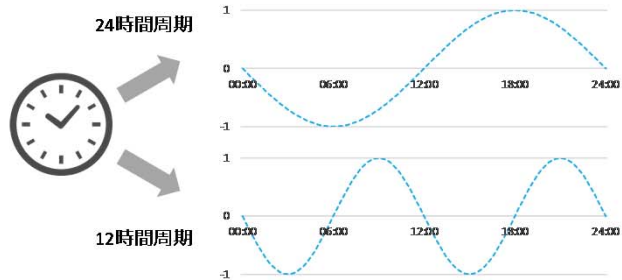
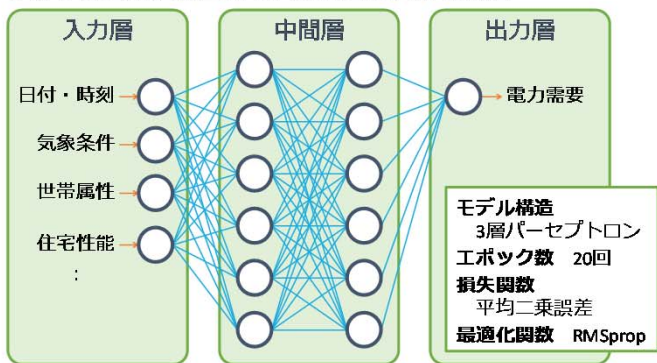


居住者の**生活リズム**を考慮することで、
電力需要の予測精度が向上できるか検討

手法

手法 深層学習のニューラルネットワーク

- 住宅に関する様々な条件を入力することで、電力需要などを予測するために最適なモデル構造を自力で決定
- 時刻データを周期関数形式で入力することで、居住者の生活リズムをモデル内で表現し、予測精度を比較
 - ✓ 住宅電力需要の12時間周期・24時間周期成分を比較することで、居住者の生活リズムが、朝型か夜型か判別できる (Ozawa et al., 2016)



Ozawa A., Furusato R., Yoshida Y., Determining the relationship between a household's lifestyle and its electricity consumption in Japan by analyzing measured electric load profiles, Energy Build., 2016; 119, 200.

実験・結果

試行 標準的な戸建住宅1世帯を対象にモデルを実装

計算条件

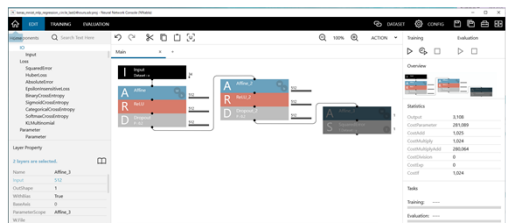
- 予測対象**
 - 主幹電力使用量 (1時間値)
 - 居住地: 大阪府
 - 学習期間: 2年間 (2015/04~2017/03)
 - 予測期間: 7か月間 (2017/04~2017/11)

入力データ

日付、曜日、時刻、気温、日射量、
前日同時刻の需要、前週同時刻の需要

モデル開発

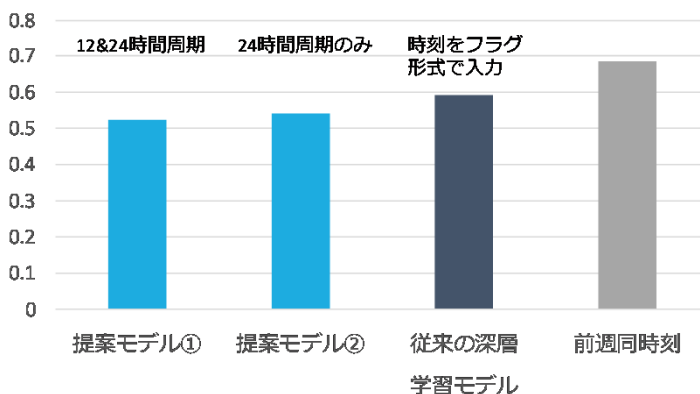
Sony 「Neural Network Console」 を使用



予測結果 正規化平均絶対誤差 (小さいほど高精度)

- 時刻データを周期関数形式で入力することで、予測精度は20~23%向上 (対ベンチマーク)
 - ✓ 従来の深層学習モデルと比較した場合、予測精度は9~12%向上

➡ 居住者の生活リズムを考慮することで、
電力需要の予測精度を向上できる



太陽光発電大量導入時の 電力系統調整力確保の経済影響評価

水野 碩人・柴田 皓元・山口 順之
東京理科大学
大学院 工学研究科 電気工学専攻

大竹 秀明・大関 崇
産業技術総合研究所
太陽光発電研究センター システムチーム

研究の目的



大きな変革期であり今後の電力系統がどのようになるのか不透明 **将来の電力系統の詳細解析が必要不可欠**

本研究では、太陽光発電と風力発電の大量導入時の調整力確保の経済影響を**発電機起動停止計画(UC)**を用いて評価する。

実験

2016年度と再エネが大量導入されたと仮定した2030年度の連系線を考慮した**全国UCモデル**※によって解く。
※沖縄を除いた9地域

	2016年度	2030年度
PV	42.3 GW	100 GW
WF	3.4 GW	29 GW

文献[3]

各年度代表日のコストと調整力確保量を比較することで影響評価

結果

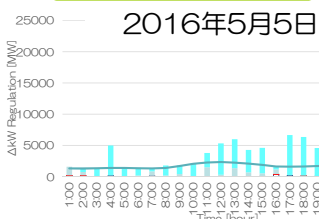
コストとCO₂排出量

2016年5月5日
751 [千万円]
931 [kt-CO₂]

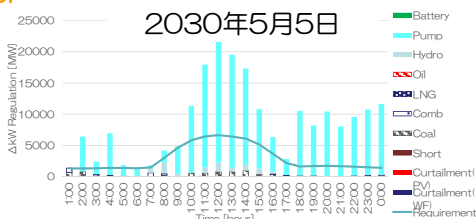
Down

2030年5月5日
388 [千万円]
556 [kt-CO₂]

上げ調整力確保量



再エネUPで 確保要求量UP



Good

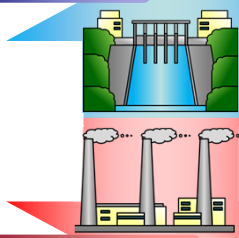
揚水発電所による確保増加
ピーク電源による確保が減り
ベース電源による確保増加

Bad

火力による確保量は増加

考察

揚水使用 UP



火力出力 DOWN

- ▶ 朝夕の使用の増加によりコストとCO₂排出量が減少
- ▶ 余剰を充電することでより調整力で使用可能になり確保UP

- ▶ 特に日中の出力が減りコストとCO₂排出量も減少
- ▶ 安価なベース電源に余力がで調整力として使用可能になり確保UP

火力の確保量UPについて

再エネの不安定な出力に対応するため要求量が増加し、火力による確保が増加してしまった。

揚水と同様な動きをする蓄電池の導入により火力での確保を減少させ、よりコストとCO₂排出量を抑えることができると考えられる。

結論

- ✓ 再生可能エネルギーが大量導入されることによって、発電コストとCO₂排出量が減少
- ✓ 調整力確保は再エネによる余剰電力により充電した揚水発電所と、安価なベース電源によって確保

これらのことから再エネの大量導入における調整力確保は**経済的かつ環境的にもメリット**があることがわかった。また、蓄電池の導入によってメリットがより大きくなる可能性がある。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁：“電力システムに関する改革方針”、参考資料、(2013)。
- [2] 経済産業省：“長期エネルギー自給見通し”、(2015)。
- [3] 一般社団法人 太陽光発電協会：“JPEA PV OUTLOOK 太陽光発電2050年の黎明〈脱炭素・持続可能社会実現にむけて〉”、(2017)。

太陽光発電大量導入時の連系線増強による 経済的及び環境的価値評価の基礎検討

柴田 皓元・水野 碩人・山口 順之
東京理科大学
大学院 工学研究科 電気工学専攻

大竹 秀明・大関 崇
産業技術総合研究所
太陽光発電研究センター システムチーム

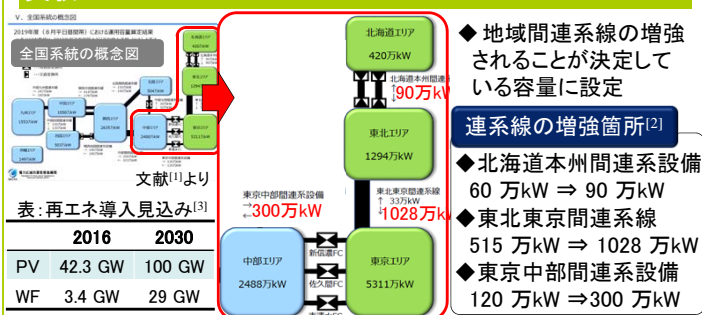
研究の目的

- ◆ 太陽光発電(PV)、風力発電(WF)のさらなる導入
- ◆ 地域間連系線の増強

地域間連系線の増強が再エネ大量導入時に、余剰電力量の最小化や火力発電所の燃料費、CO₂排出量削減にどれだけ効果があるか

地域間連系線を考慮した日本全国UCモデルを用いて、連系線増強の価値を評価

実験



結果

2030年5月8日の結果

表: 一般送配電者ごとの火力発電所での燃料費

億円/日	北海道	東北	東京	中部	北陸	関西	四国	中国	九州	合計
増強なし ^①	8.8	27.0	181.1	46.5	13.1	73.2	26.5	20.9	56.8	454.0
増強あり	9.4	43.9	125.1	58.9	12.0	73.5	26.5	22.4	56.2	427.9

➡ ① 9.9% 減

➡ ② 5.9% 減

➡ ③ 1.96倍

表: 地域間連系線ごとの電力融通量

MWh/日	北海道	東北	東京	中部	中部	北陸	関西	中国	中国	中国	九州
増強なし ^③	566	67,500	13,725	2,457	1,831	8,159	8,015	8,686	16,771	8,983	
増強あり	2,542	121,852	36,000	3,297	2,536	4,647	5,673	10,853	18,326	7,932	

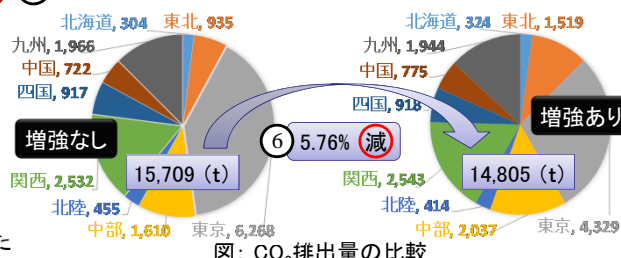
表: PV余剰電力量及びWF余剰電力量

MWh/日	北海道	東北	東京	中部	北陸	関西	四国	中国	九州	合計
増強なし(PV余剰) ^④	192	9,361	0	0	0	0	0	0	0	9,553
増強あり(PV余剰)	621	1,471	0	0	0	0	0	0	0	2,093
増強なし(WF余剰) ^⑤	2,603	9,635	0	0	0	0	0	0	0	12,238
増強あり(WF余剰)	1,430	0	0	0	0	0	0	0	0	1,430

➡ ④ 78.1% 減

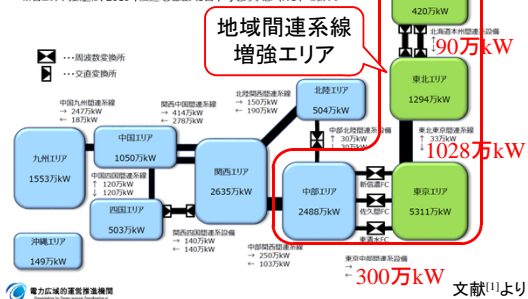
➡ ⑤ 88.3% 減

※供給支障は発生しなかった



考察

2019年度(8月平日昼間帯)における運用容量算定結果
※各エリア内数値は、2019年度送電容量最大3日平均電力予想(H3)を表す。



1. 北海道～中部エリアでの火力発電所の燃料費が9.9%減(26.2億円減)
2. 北海道～中部エリアの連系線増強では、西日本エリアでの火力発電所の燃料費には、あまり影響を与えなかった
3. 北海道～中部エリア間の地域間連系線融通量は78,602 [MWh/日]増加(増強前の1.96倍)
4. PV余剰では、北海道エリアで余剰量が増加した一方、東北エリアでは大きく減少しており、北海道・東北エリア合計で7,500 [MWh/日]の減少
5. WF余剰では、北海道・東北エリア合計で約11,000 [MWh/日]と大きく減少
6. 連系線増強により、一層の再エネ活用が行われ、1日で約1,000 [t]のCO₂排出量減

結論

地域間連系線の増強は

- ✓ エリアを超えた火力発電所の更なる最適運用が可能
- ✓ PVやWF等の再生可能エネルギーの余剰電力の最小化
- ✓ 増強エリア以外(西日本エリア)では、あまり変化がない

地域間連系線の増強が、PVやWF等の再生可能エネルギーのより一層の活用へ貢献し、火力発電所にかかる燃料費やCO₂排出量を抑制するが、その影響は増強エリア以外では限られていた。

参考文献

- [1] 電力広域的運用推進機関(OCCTO) 第6回運用容量検討会 資料1-2「2019～2028年度の連系線の運用容量(年間計画・長期計画)」、2019年2月15日。
- [2] 電力広域的運用推進機関(OCCTO) 第6回運用容量検討会 資料1-1「運用容量算出における今年度の主な見直し事項」、2019年2月15日。
- [3] 一般社団法人 太陽光発電協会:「JPEA PV OUTLOOK 太陽光発電2050年の黎明(脱炭素・持続可能社会実現にむけて)」、(2017)。