

太陽電池モジュールの科学

明確化された現象と解決すべき課題

産業技術総合研究所
太陽光発電研究センター
増田 淳

本講演で引用した成果に関わる共同研究者(引用順)

山本 千津子¹、山口 世力²、大平 圭介²、棚橋 紀悟¹、
坂本 憲彦¹、柴田 肇¹、齋 均¹、松井 卓矢¹、原 由希子¹、
Trang Ngo³、辺田 祐志³、土井 卓也¹、櫻井 啓一郎¹、
小川 錦一¹、富田 仁⁴、Darshan Schmitz⁴、徳田 修二⁴、
秋富 稔¹、井上 昌尚¹、奥脇 経三⁵、奥川 敦雄⁵、
上野 清志⁶、山崎 敏晴⁶、原 浩二郎¹、城内 紗千子¹、
小牧 弘典¹、上川 由紀子¹、仁木 栄¹、川上 雄士⁷

¹産業技術総合研究所、²北陸先端科学技術大学院大学、

³太陽光発電技術研究組合、⁴ソーラーフロンティア株式会社、

⁵菊水電子工業株式会社、⁶長州産業株式会社、

⁷久留米工業高等専門学校 (所属は成果発表時のもの)

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託による。

太陽電池モジュールの劣化

劣化の種類: 外観、出力低下、...

本講では主に出力低下の観点から劣化を扱う

モジュールに与えられる負荷が同じでも、モジュールの種類が異なれば、出力低下の程度は異なる。

出力低下の程度が同じでも、モジュールの種類が異なれば、その原因は異なる。

エレクトロルミネセンスは便利であるが、もう一步踏み込まないと微視的原因に迫ることはできない

太陽電池モジュール研究の課題(1)

屋外劣化事例の観測

- ・モジュールの初期特性が不明な場合が多い。
- ・市販モジュールのため部材や構造が不明で科学的解析が困難。
- ・部材や劣化要因が多岐にわたり複雑。
- ・長期曝露を経たモジュールは現時点で流通しているモジュールとは異なり、成果のフィードバックが困難。

劣化モジュールの評価

- ・太陽電池モジュールが、セラミックス(カバーガラス)、高分子(封止材、バックシート、エッジシール材、ポッティング材)、半導体(セル)、金属(配線、フレーム)等の様々な材料の組合せで構成されるため、劣化現象はこれら部材の界面や相互作用とも関係し、極めて複雑である。様々な分野の専門家の連携が求められる。
- ・モジュールは封止材で強固に固められているため、微小分析用のサンプルの取出しが容易ではない。

太陽電池モジュール研究の課題(2)

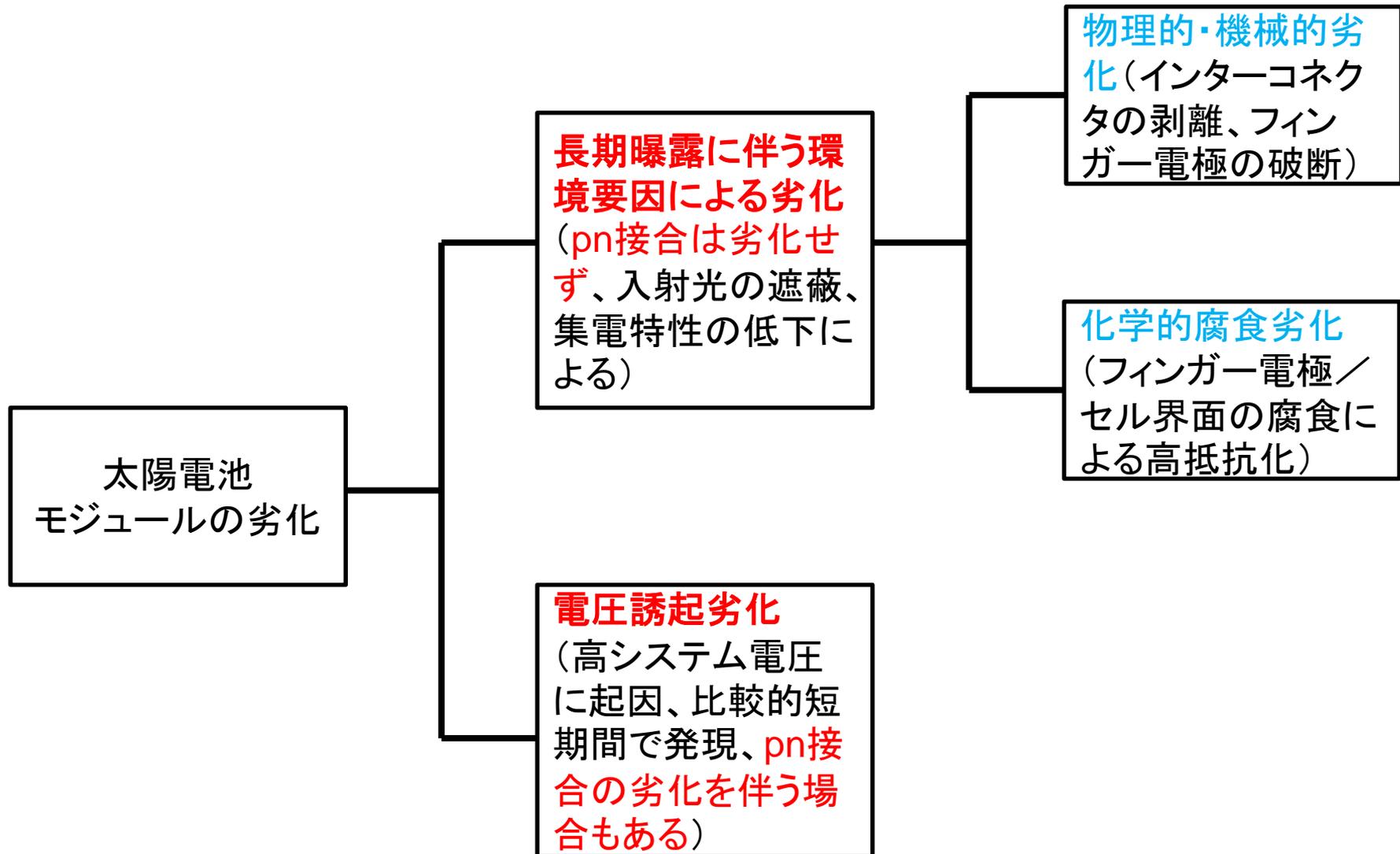
試験法開発

- ・多岐にわたる劣化要因を同時に組合せた試験は現実的でない。
- ・光照射と組み合わせた試験は極めて重要であるが、均一性や温度の安定性の観点で容易ではない。
- ・屋外で生じる劣化と同じ劣化を生じさせることは困難。
- ・屋外曝露に対する加速係数の決定も容易ではなく、どこまで厳しい試験を実施すれば、寿命を保証できるかがわからない。オーバースペックにもなりがちである。
- ・設置地域により求められる試験も異なるはずである。
- ・試験に長時間を要する。

モジュールの信頼性向上

- ・常にコストを問われる。
- ・寿命や信頼性は可視化できず付加価値になりにくい。

太陽電池モジュールの劣化の分類



太陽電池モジュールの構造と部材に起因する劣化要因

酸による電極の腐食にともなう電極／セル界面でのコンタクト抵抗の上昇

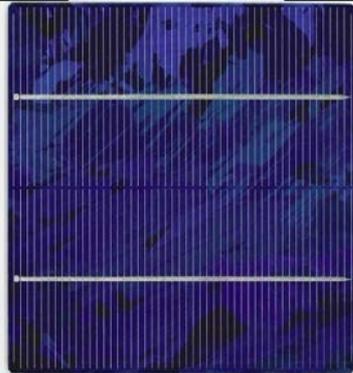
化学的腐食劣化

温度サイクル、風圧、積雪による破断、剥離

物理的・機械的劣化

紫外光による着色に伴う入射光遮蔽

高システム電圧に起因するガラスからのナトリウム拡散による電圧誘起劣化



太陽電池セル



インターコネクタ



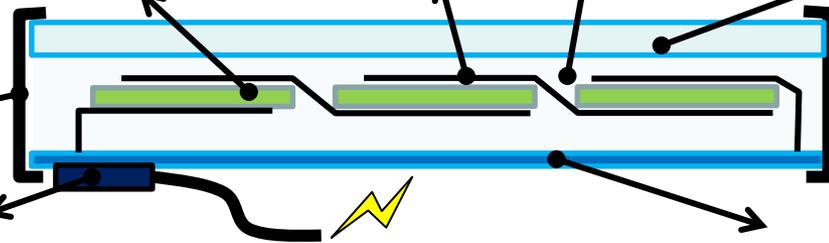
封止材

白板強化ガラス

太陽電池モジュール (結晶シリコン型)

アルミフレーム
周辺シール材

端子箱、ポッティング材



反射紫外光による着色

バックシート

バックシートからの微量水分浸入による封止材からの酸発生

化学的腐食劣化



太陽電池モジュールの構造と部材に起因する劣化要因

酸による電極の腐食にもなう電極／セル界面でのコンタクト抵抗の上昇

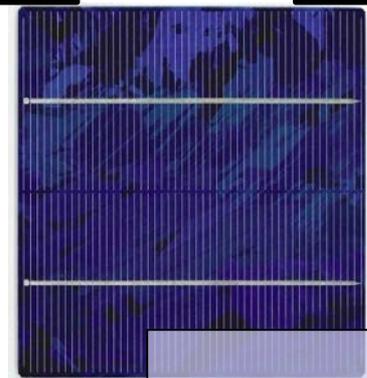
化学的腐食劣化

温度サイクル、風圧、積雪による破断、剥離

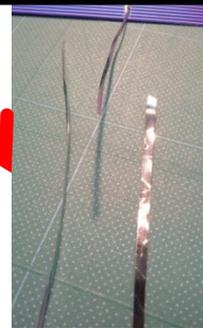
物理的・機械的劣化

紫外光による着色に伴う入射光遮蔽

高システム電圧に起因するガラスからのナトリウム拡散による電圧誘起劣化



太陽電池セル

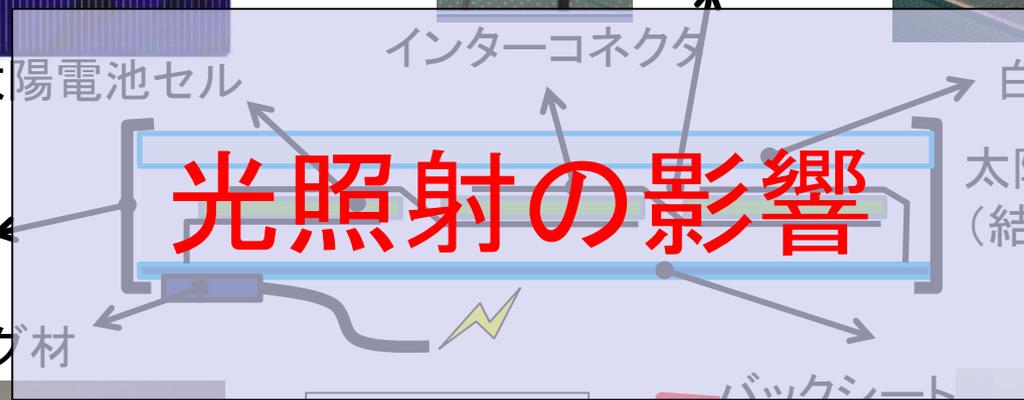


インターコネクタ



白板強化ガラス

太陽電池モジュール (結晶シリコン型)



光照射の影響

アルミフレーム 周辺シール材

端子箱、ポッティング材

封止材

反射紫外光による着色

バックシートからの微量水分浸入による封止材からの酸発生

化学的腐食劣化

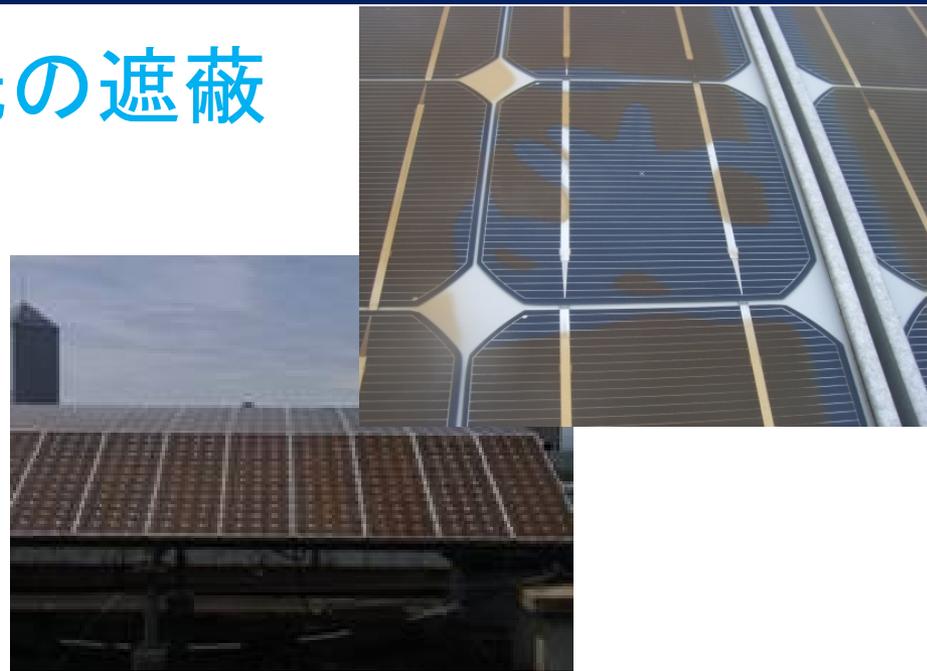


太陽電池モジュール劣化（出力低下）の 要因はさほど複雑ではない

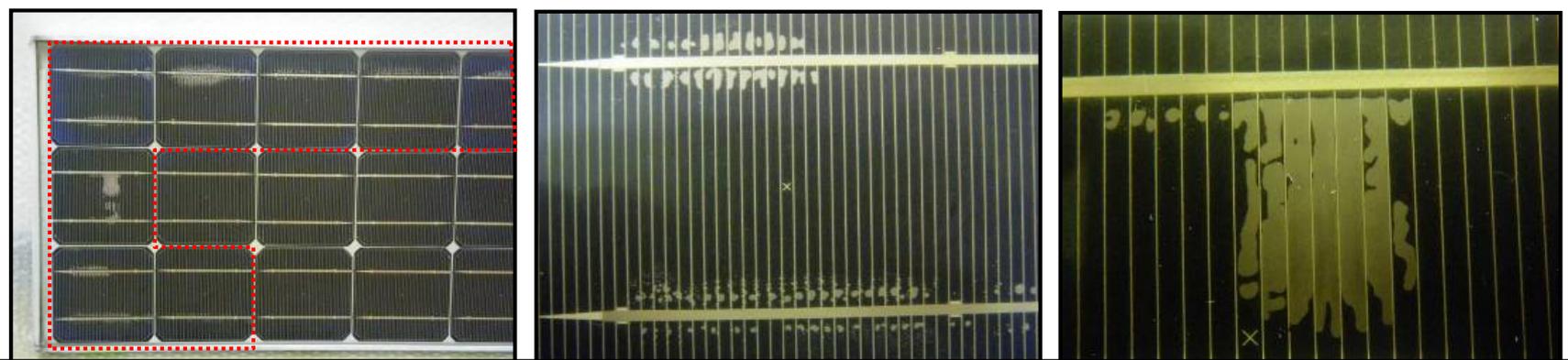
- 1) 入射光の遮蔽（セルに届く光の量が低減する）
- 2) 集電劣化（発電しても集電できない）
- 3) 発電劣化＝起電力低下
（発電能力そのものが低下する）

入射光の遮蔽

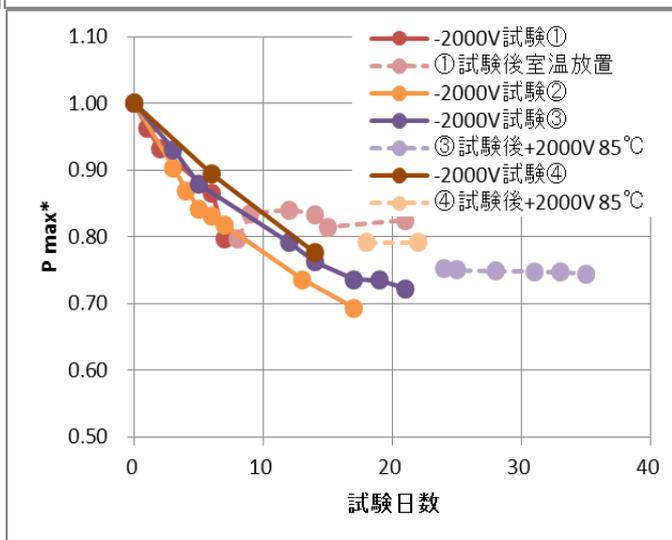
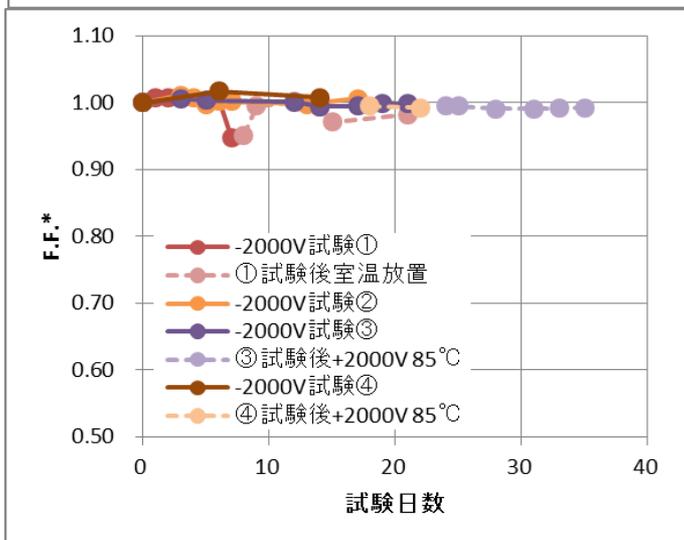
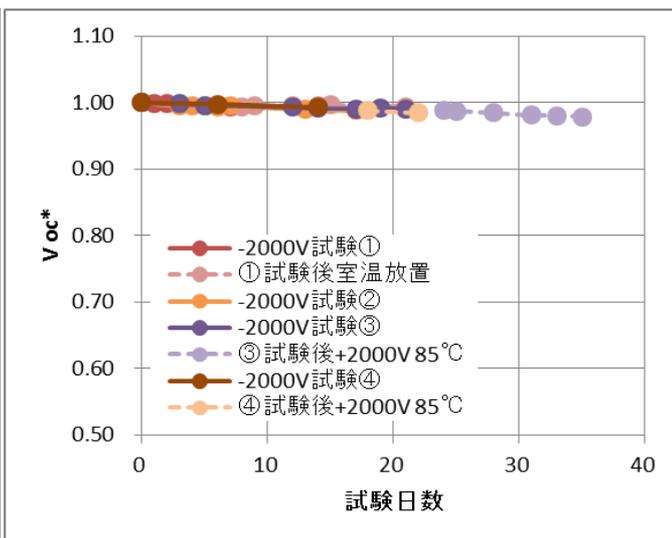
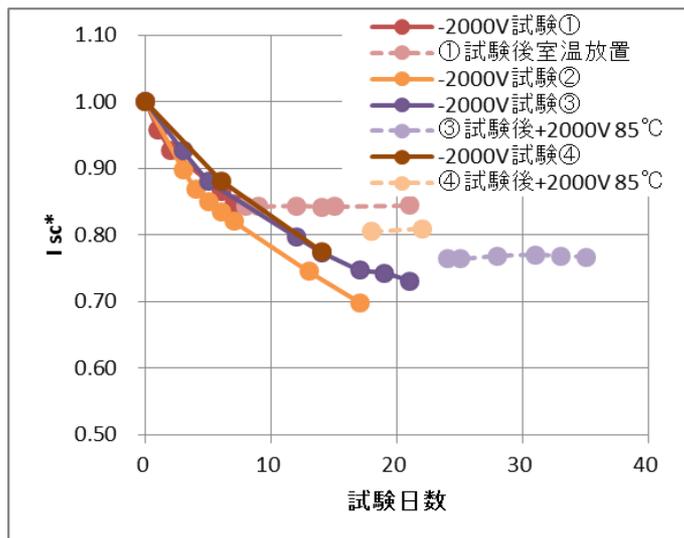
- ・ガラスの汚損（降砂、降灰）
- ・封止材の着色
- ・透明導電膜の着色



- ・封止材の剥離による白濁
 光の散乱が生じるので、一概に出力低下に繋がるともいえないが、BIPVでは外観上の問題で建物価値を毀損



透明導電膜着色の事例：シリコンヘテロ接合 太陽電池モジュールの電圧誘起劣化



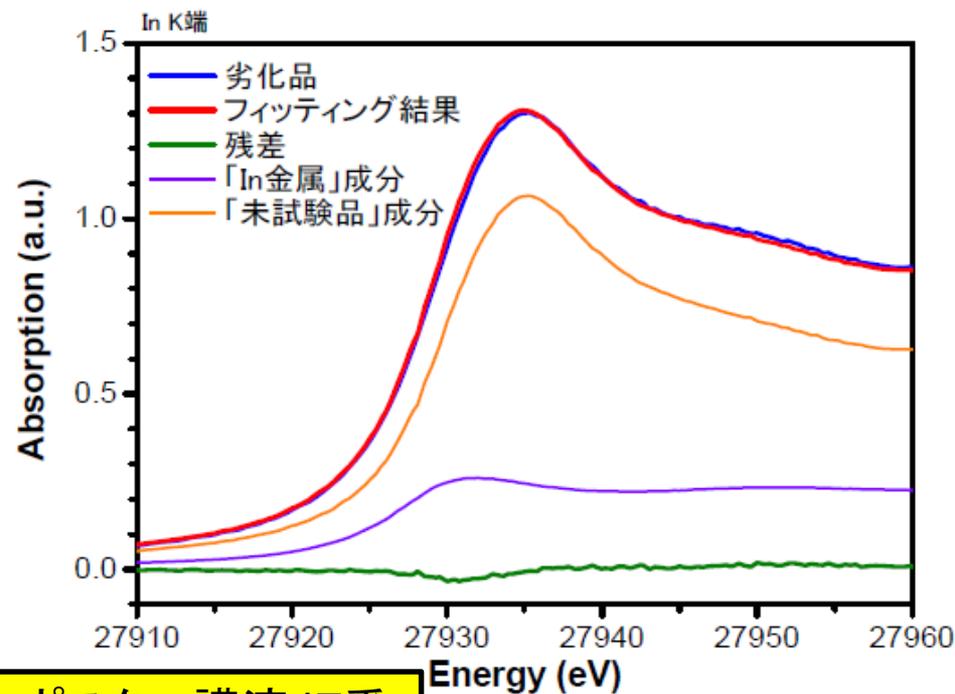
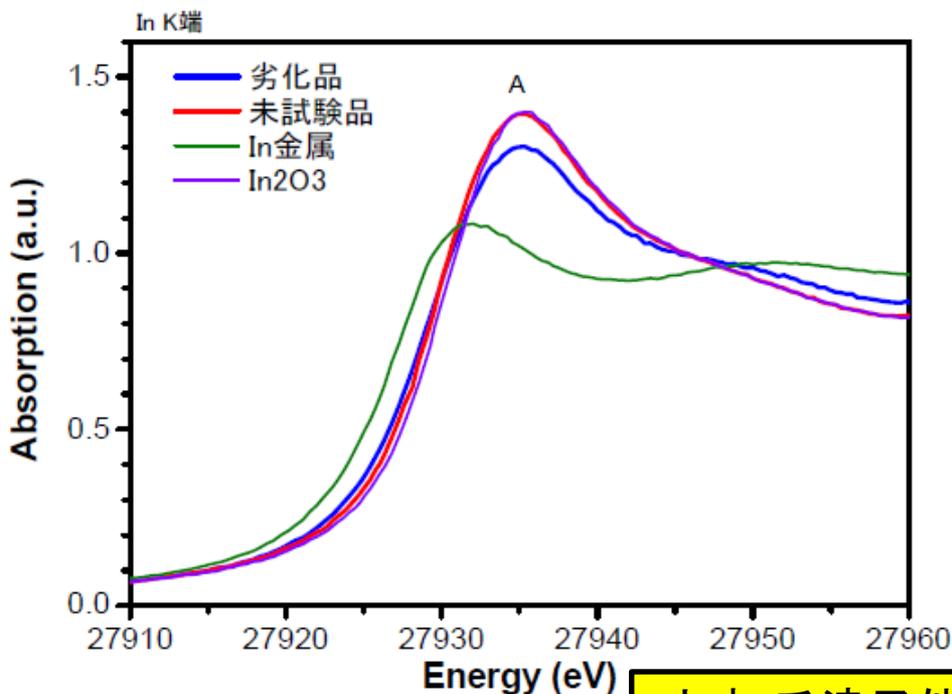
山本 千津子他、
ポスター講演47番

S. Yamaguchi *et al.*,
Solar Energy Mater.
Solar Cells **161**
(2017) 439.

シリコンヘテロ接合太陽電池モジュールの劣化要因解析

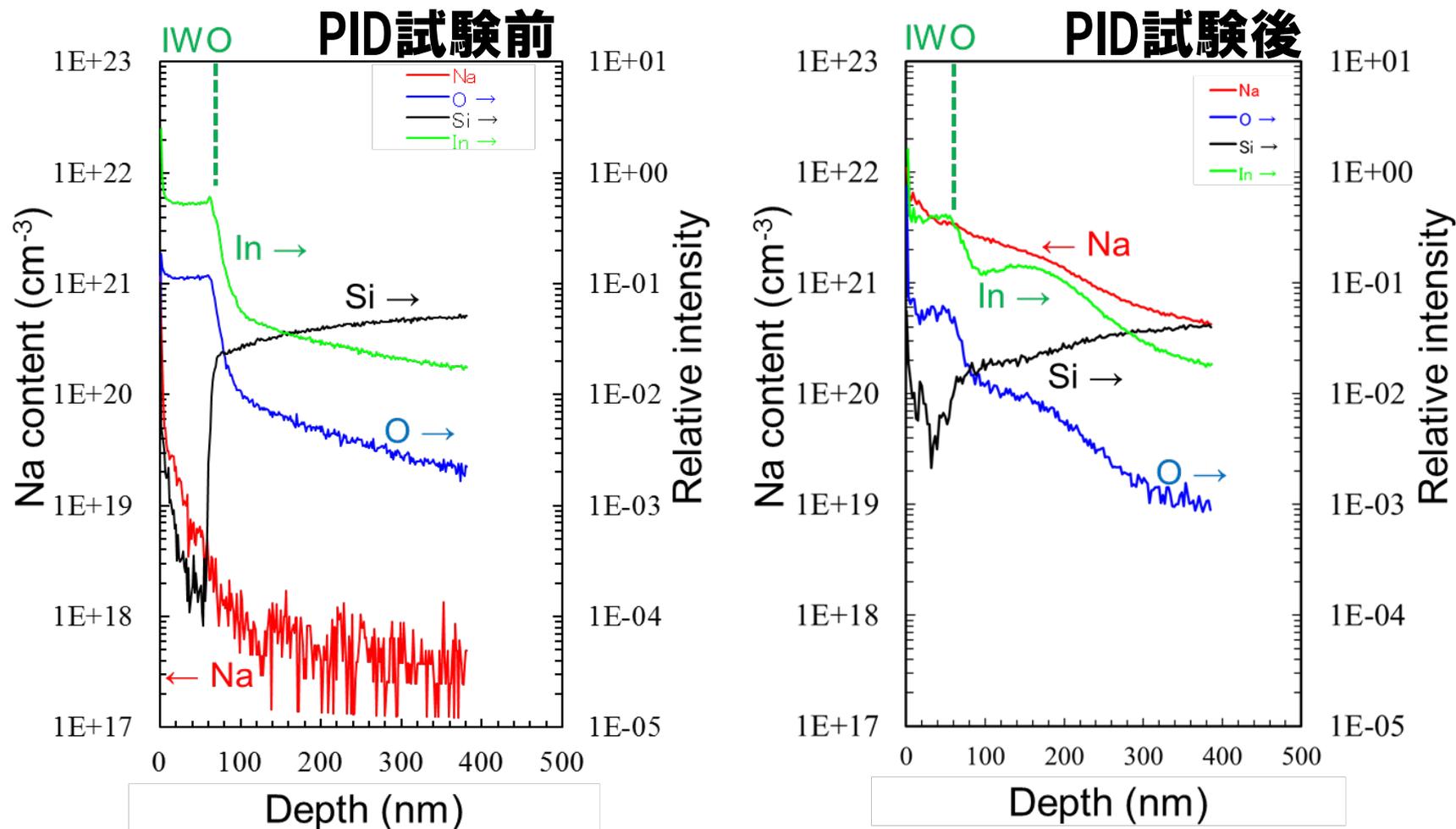
透明導電膜分析 In K端XANESスペクトル

未試験モジュールと劣化モジュールのXAFSスペクトルの吸収端近傍のXANESスペクトルより、Inの価数や構造に関する情報を得た。測定はSPring-8で実施した。未試験モジュール、劣化モジュールともに、 In_2O_3 標準試料のスペクトルとよく一致し、両者とも主には In^{3+} として存在する。一方、劣化モジュールでは信号のエネルギーや強度が未試験モジュールよりも若干低く、In金属の混在が示唆される。フィッティングの結果、劣化モジュール中のIn金属成分の比率は24%であった。



シリコンヘテロ接合太陽電池モジュールの劣化要因解析

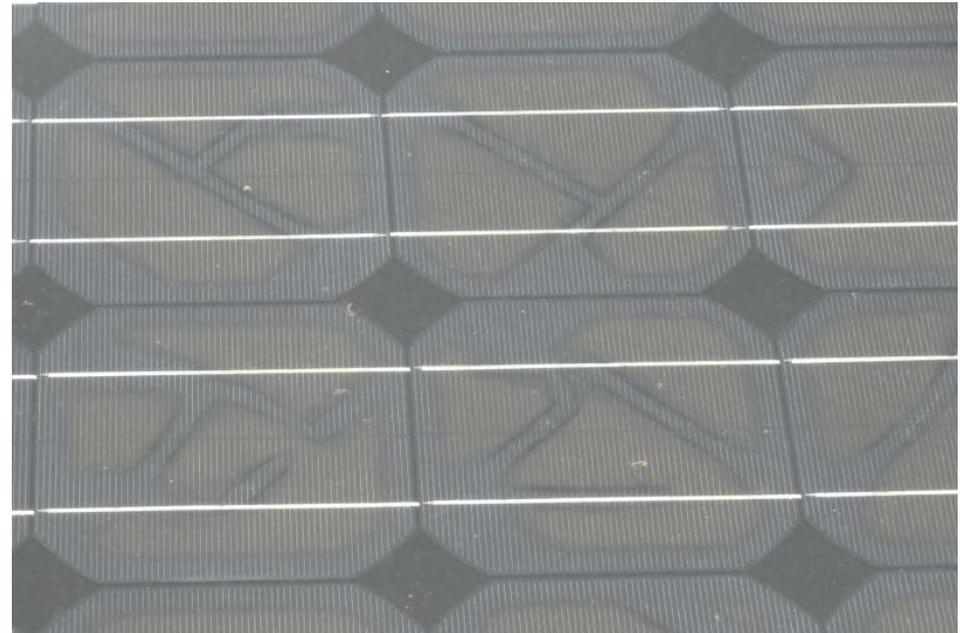
PID試験前後のNaのSIMS分析



IWOの還元:カバーガラス等からのNaの拡散に起因する可能性

スネイルトレイル

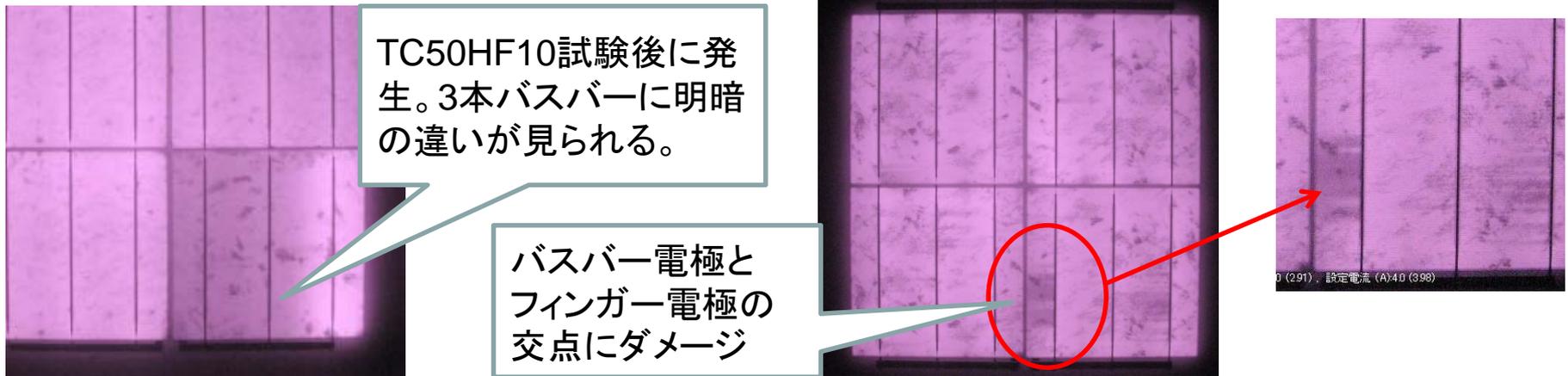
- 製造時もしくは設置後に発生したセルクラックが、封止材の着色によって顕在化したものと考えられる(裏面から酸素もしくは水蒸気が透過しやすいセル間もしくはセル端の受光面側封止材が着色しにくいことと関係)。
- セルが割れても、フィンガー電極が繋がっていれば、出力は維持される。
- セルクラックを通じて水蒸気が拡散すれば、表面側での酢酸生成が促進され、劣化が速まる可能性はある。



集電劣化

- ・大半の出力低下の原因
- ・pn接合には異常なし
- ・物理的・機械的劣化

インターコネクタの破断、剥離
フィンガー電極とバスバー電極の交点での破断



- ・化学的腐食劣化

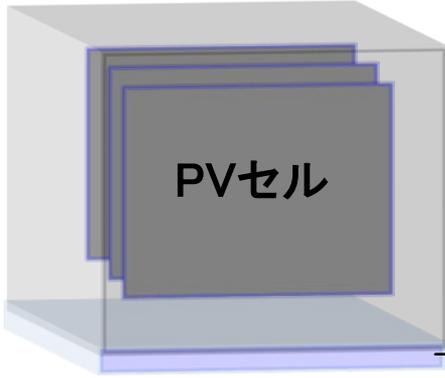
電極（特に受光面側フィンガー電極）の化学的変性

実験方法

酢酸蒸気曝露試験

棚橋紀悟他、ポスター講演71番

実験群

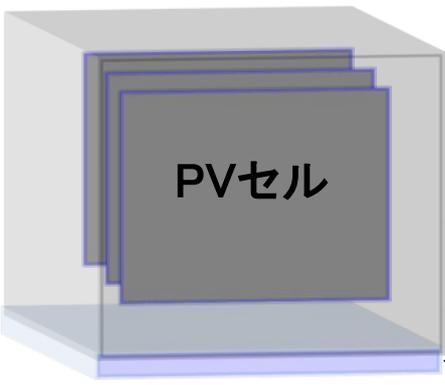


85°C保温

飽和KClにより
80%rh制御可能

3% 酢酸 (HAc)
飽和KCl水溶液

対照群



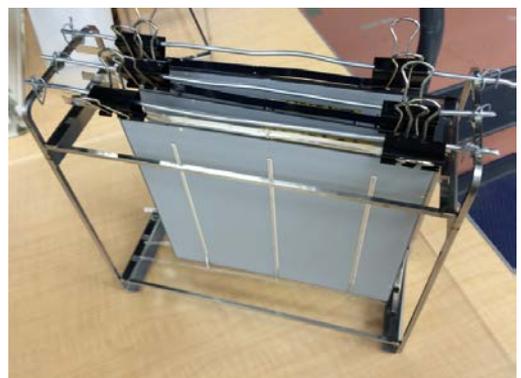
85°C保温

飽和KClにより
80%rh制御可能

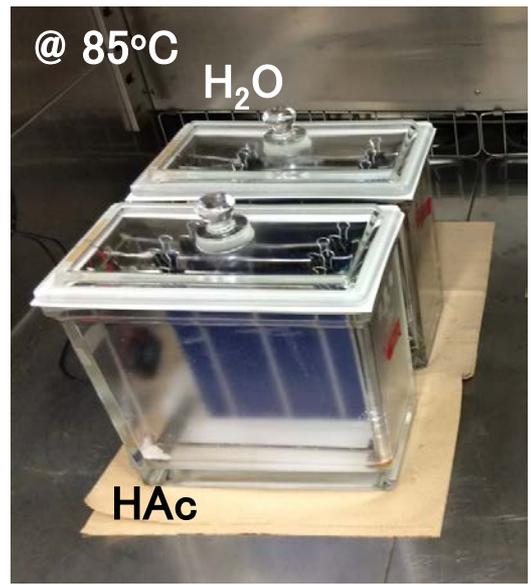
飽和KCl水溶液

評価(初期・周期的評価)

- ・外観変化
- ・I-V特性(明暗)
Rs変化動態確認
- ・EL特性 / Rs分布
- ・ACインピーダンス特性
Rs変化動態確認



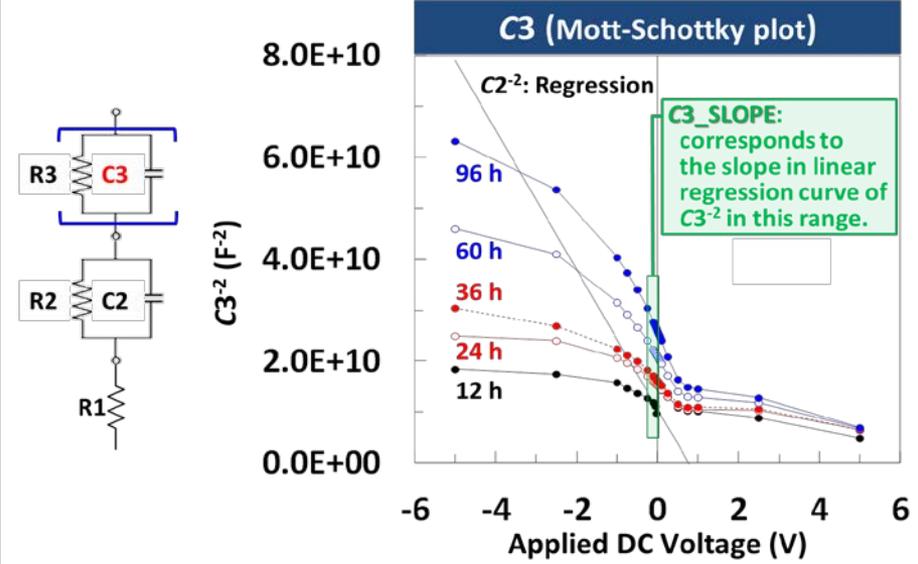
(SEMIで国際標準化投票可決、
2017年秋までに標準化予定)
SEMI Draft Document #6016, New
Standard: Test Method for Exposure
Durability of PV Cells to Acetic Acid Vapor



セルに対する酢酸蒸気曝露試験とモジュールに対する高温高湿試験の対比

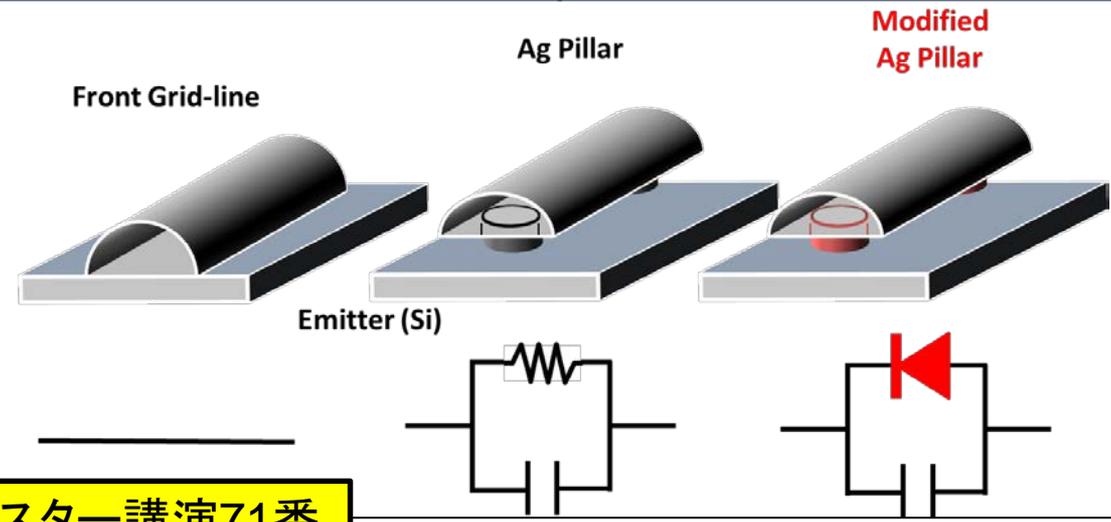
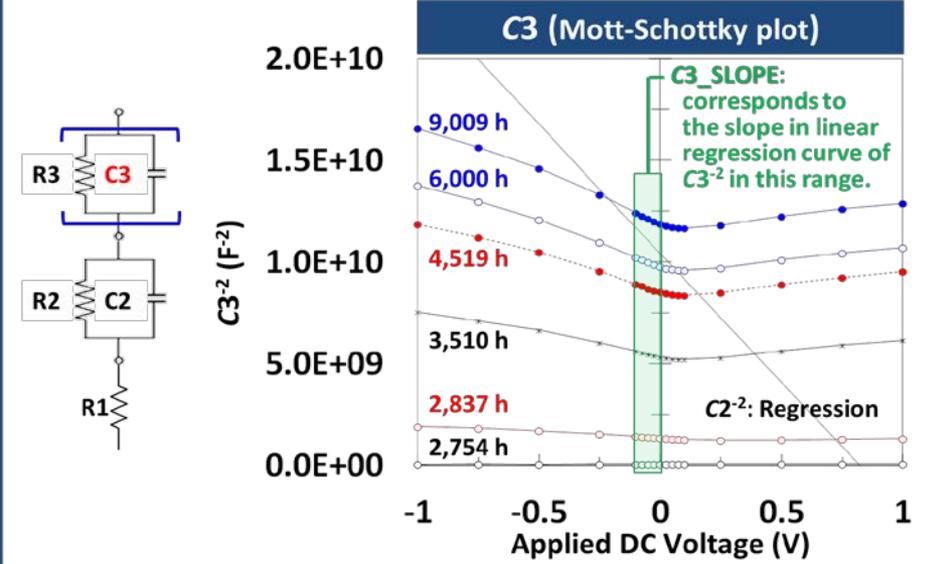
in Bare PV Cells Exposed to HAc Vapor

Effects of DC Bias on **C3**



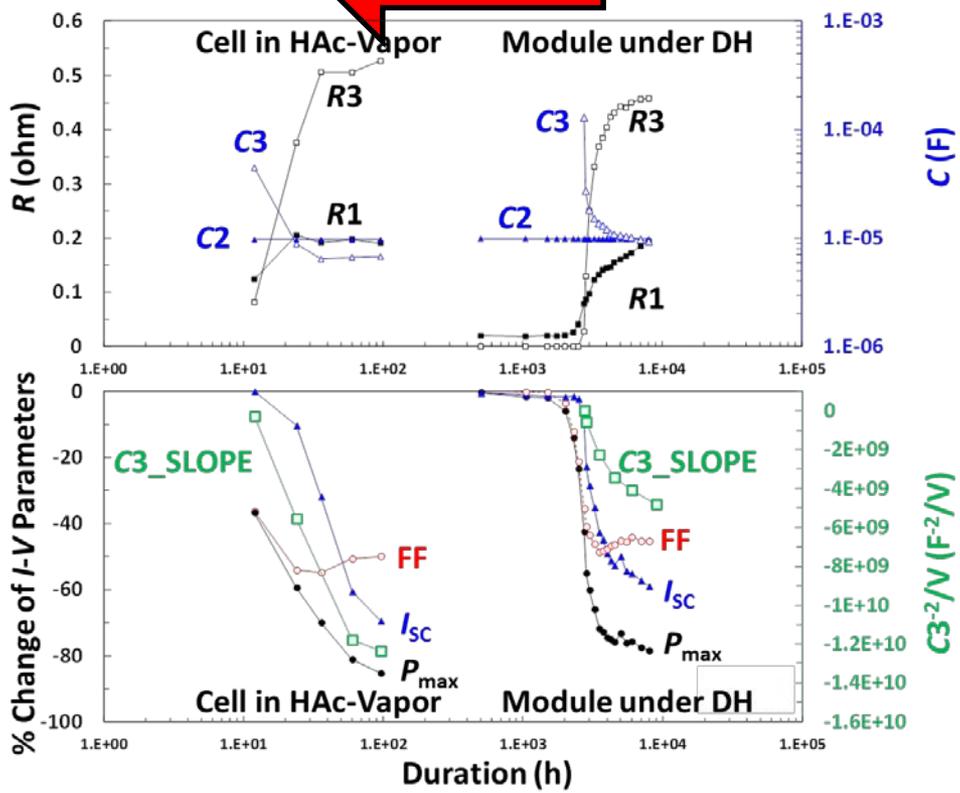
in PV Modules under DH Stress Test

Effects of DC Bias on **C3**

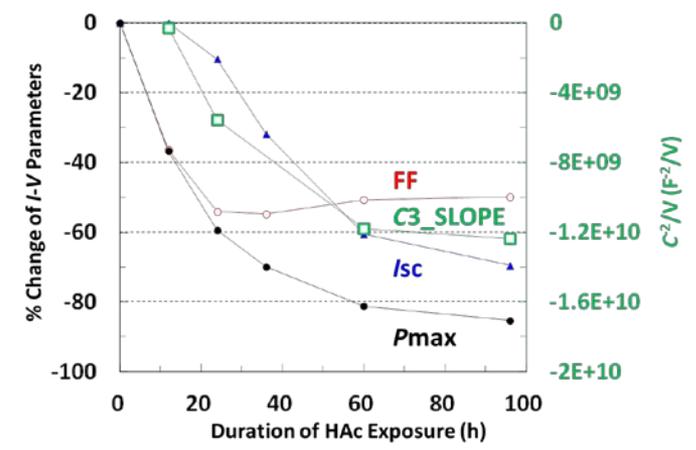


セルに対する酢酸蒸気曝露試験と モジュールに対する高温高湿試験の対比

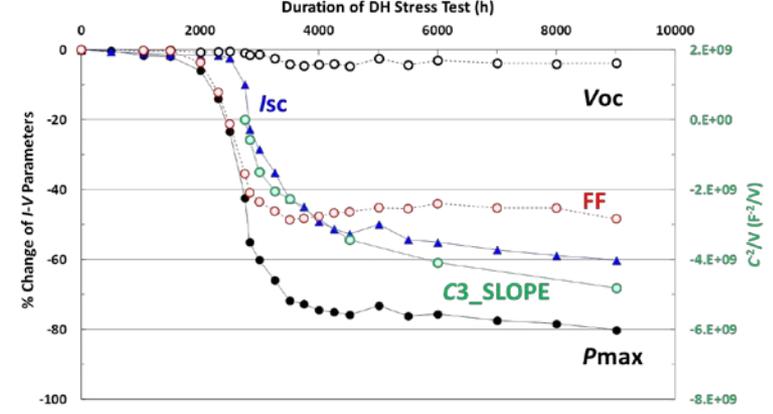
加速係数70倍



Cell in HAc-Vapor
Degradation Profiles of I-V Parameters (with "C3_SLOPE")

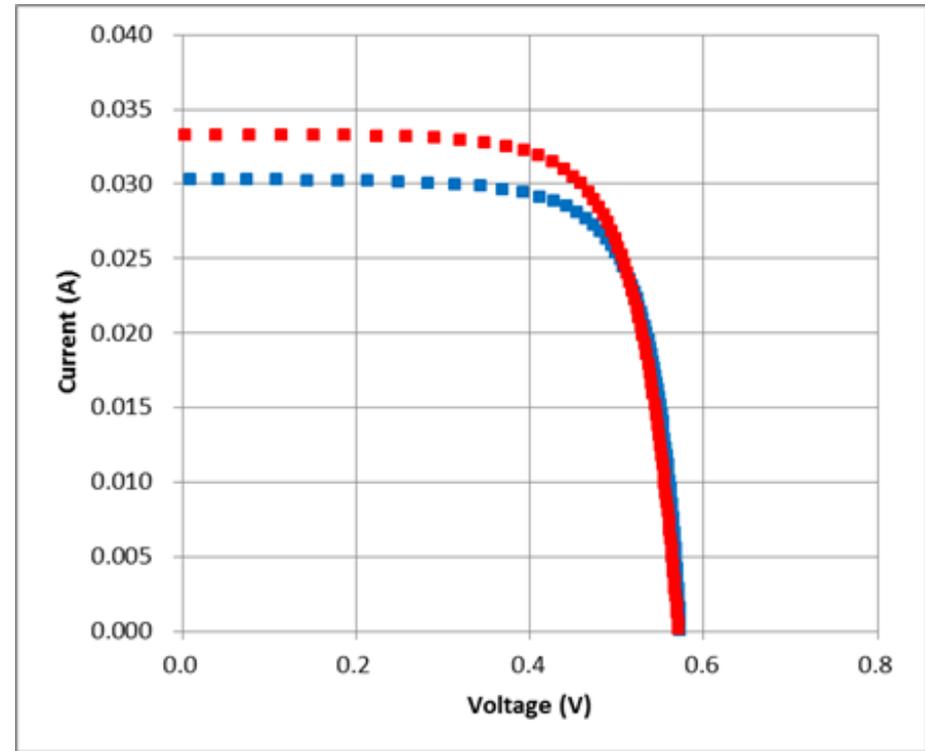
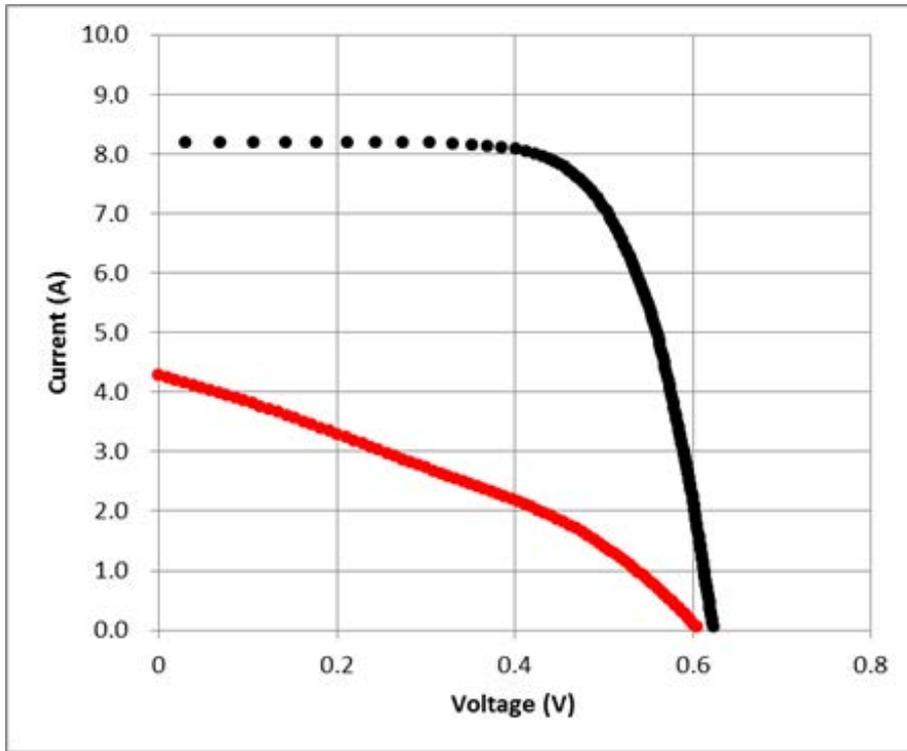


Module under DH
Degradation Profiles of I-V Parameters (with "C3_SLOPE")
during DH Stress Test of PV module



棚橋 紀悟他、ポスター講演71番

電極劣化の直接的証拠



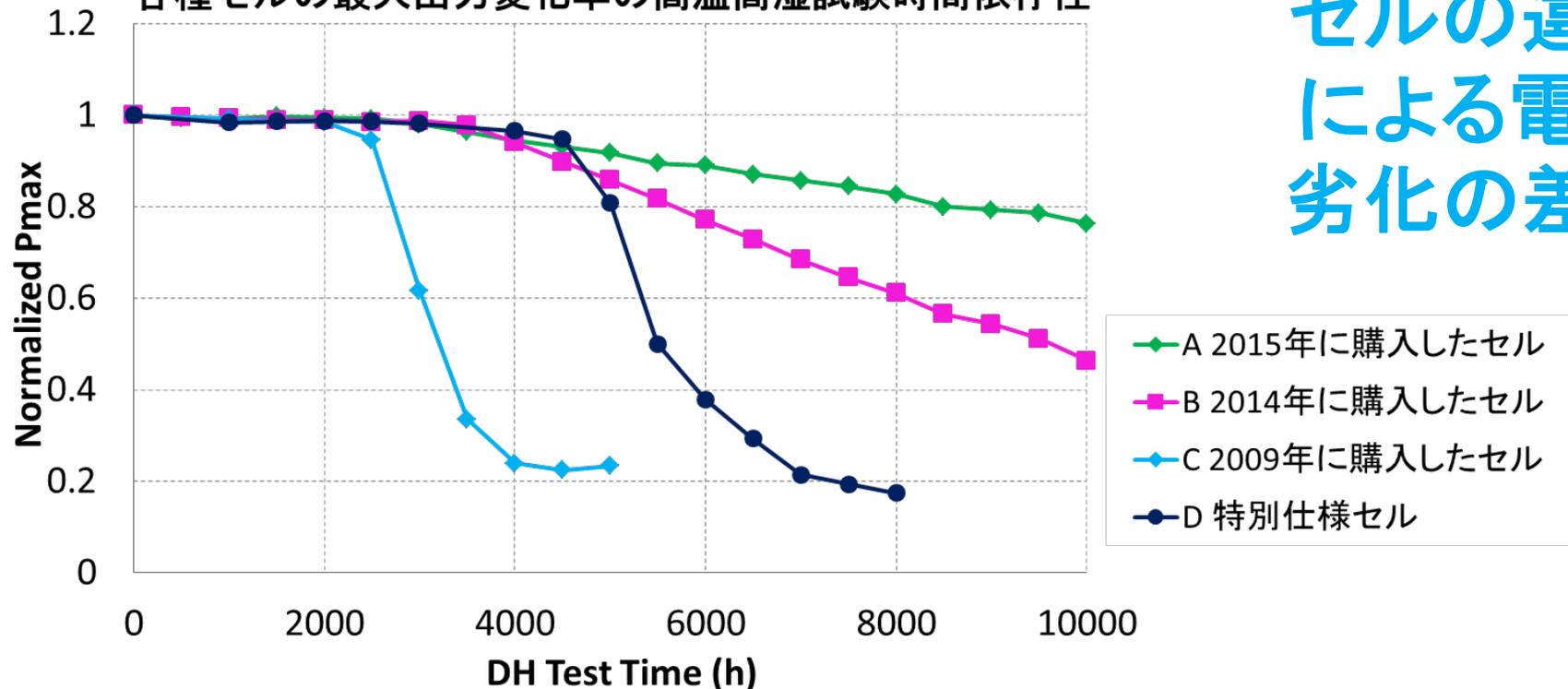
3%酢酸/飽和KCl水溶液の蒸気に、
85°C/80%rh環境下で、48時間曝露
黒: 未試験 FF: 0.70
赤: 酢酸曝露後 FF: 0.34

電極除去ならびに電極再構築を実施したセル
電流値の低下は電極再構築過程で小面積に
切断しているため
赤: 酢酸曝露有、青: 酢酸曝露無
いずれもFFは0.7以上

A. Masuda *et al.*, Proc. 43rd IEEE PVSC, 2016, p. 904.

セルの違い による電極 劣化の差異

各種セルの最大出力変化率の高温高湿試験時間依存性



| | Initial | DH2500 | DH3000 | DH3500 | DH4000 | DH5000 | DH6000 | DH7000 | DH8000 | DH10000 |
|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| A | | | | | | | | | | |
| B | | | | | | | | | | |
| C | | | | | | | | | | |
| D | | | | | | | | | | |

原 由希子他、未発表データ

湿熱負荷による集電劣化対策の指針

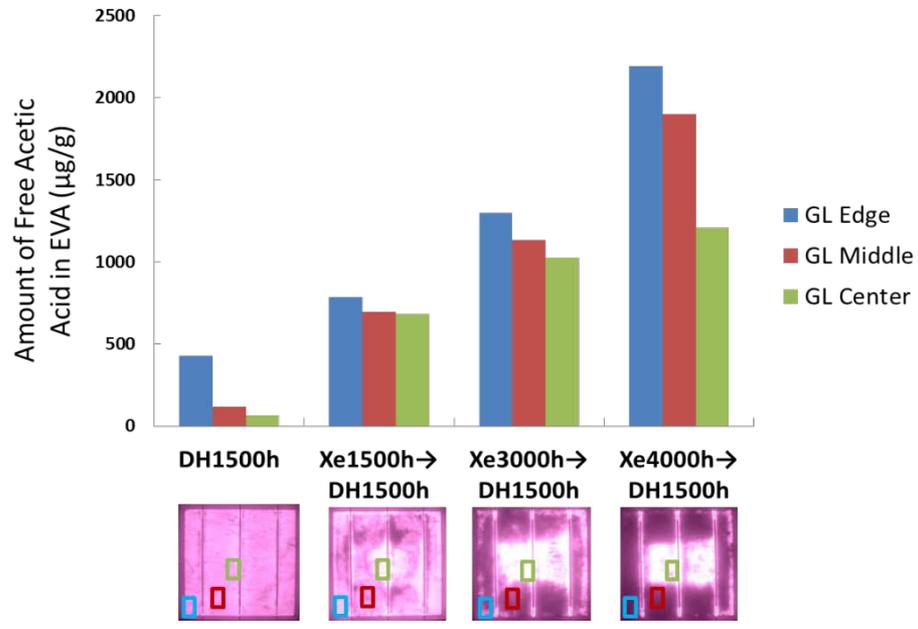
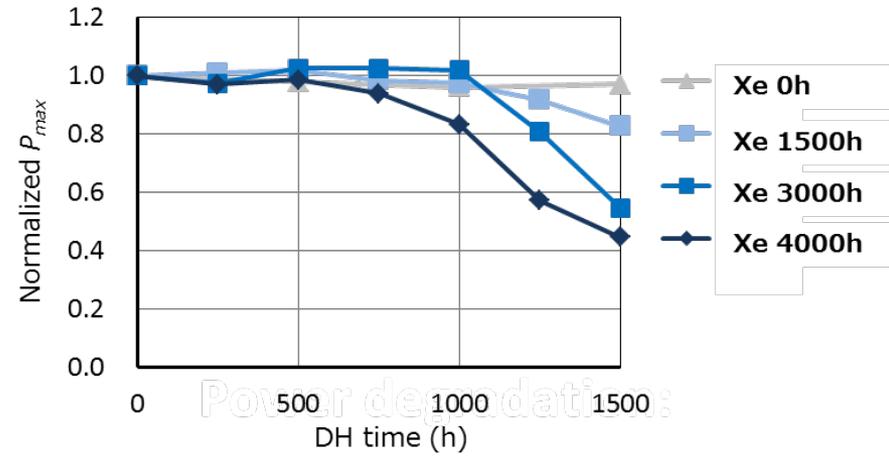
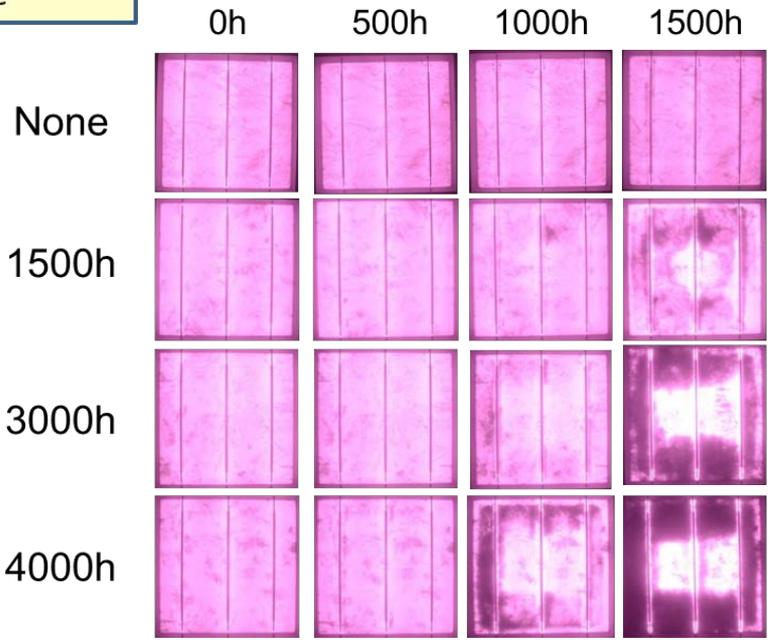
- 標準的な拡散接合結晶シリコン太陽電池において、最終的に劣化を決定するのは電極ペースト材料である。
- 酸を発生させない封止材を用いれば、安価な電極ペーストの使用も可能。
- 酸で劣化しない電極ペーストを用いれば、安価な封止材の使用も可能。
- 電極ペースト、封止材、バックシートのそれぞれにおいて様々な仕様を開発することにより、幅広いモジュールの設計が可能になる。どの部材が選択されるかは、コストと設計寿命により決まる。
- ハイバリアバックシートは薄膜系ならびに有機系太陽電池にとっては重要。

化学的腐食劣化の 再現試験にこそ 光照射が重要

紫外光照射の影響

UV-preconditioning time

DH (85°C, 85%RH)

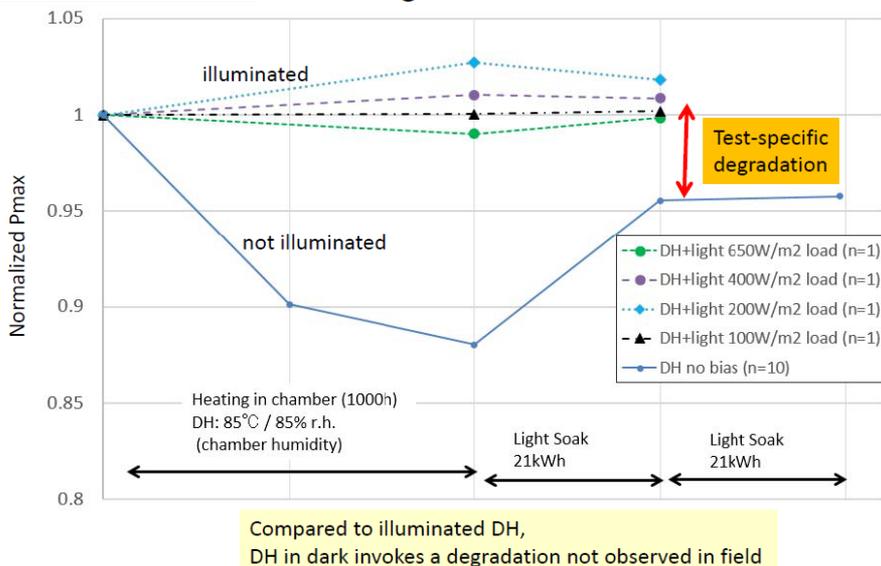


T. Ngo *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **55** (2016) 052301.

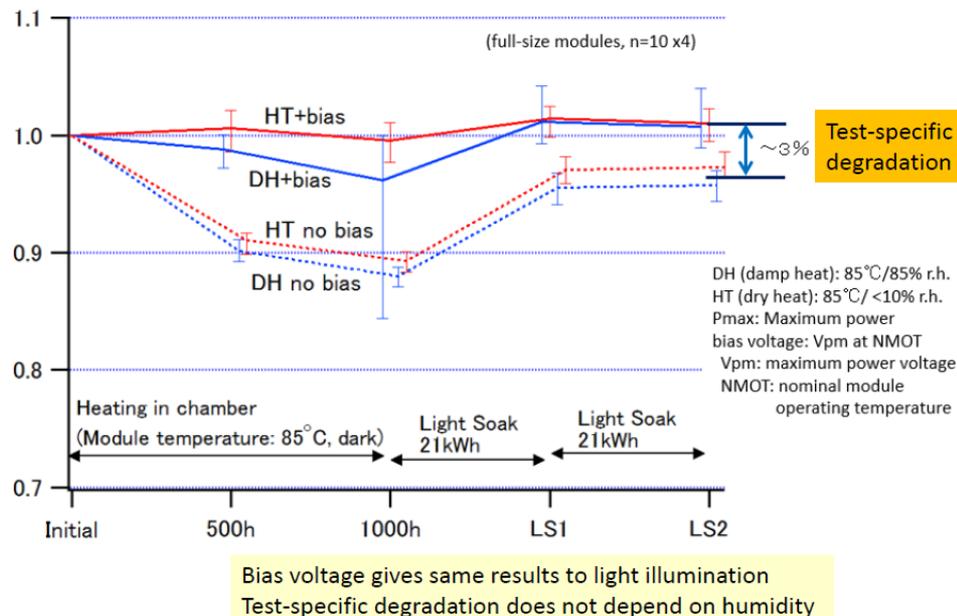
CIGSモジュールでの高温高湿試験

白色LED

Effect of light illumination



Effect of forward bias + DampHeat(DH)/DryHeat(HT) tests



通常の高湿高湿試験は暗中高温で実施するが、実際には起こりにくい環境である上、過剰な劣化を引き起こす。

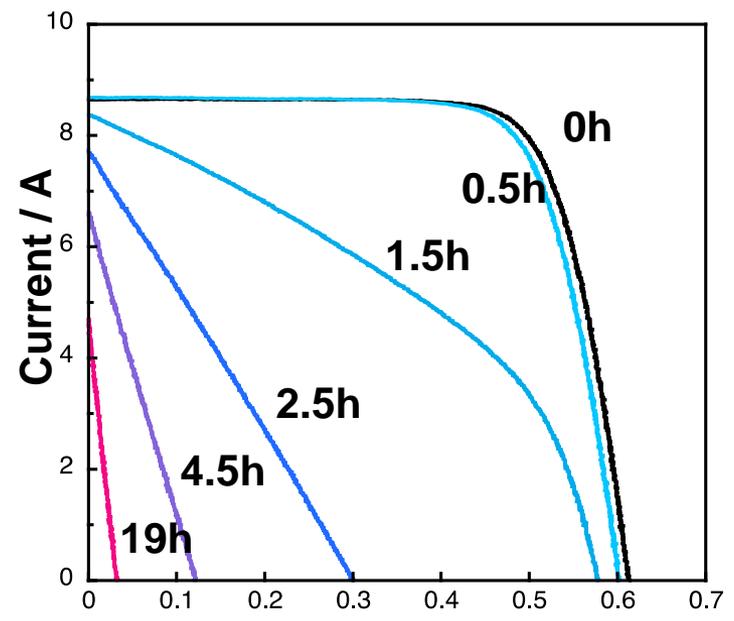
この事例では、光照射をバイアス電圧で代替可

櫻井 啓一郎他、ポスター講演36番

K. Sakurai *et al.*, Proc. 32nd EUPVSEC, 2016, p. 1690.

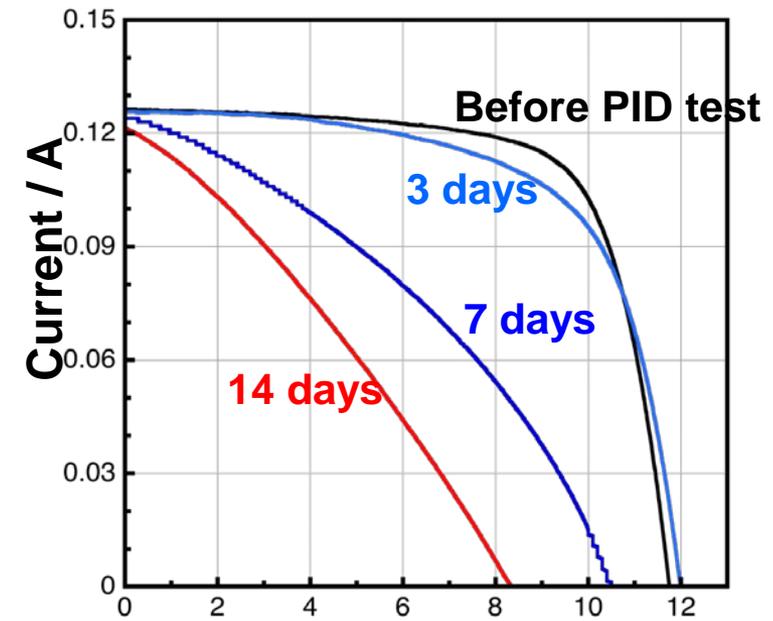
- ・化学的反応は波長依存がある
- ・代替負荷の可能性の見極めは試験実用化の上で極めて重要

起電力低下 (= 電圧誘起劣化 (PID))



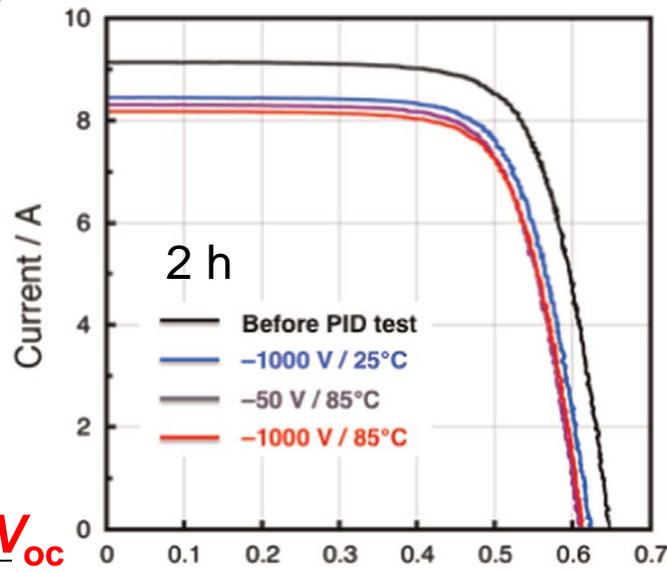
p-type c-Si
Decrease in V_{oc} , R_{sh}

A. Masuda *et al.*,
Current Appl. Phys. **16** (2016) 1659.



CIGS
Decrease in V_{oc}

S. Yamaguchi *et al.*,
Jpn. J. Appl. Phys. **54** (2015) 08KC13.



n-type c-Si
Decrease in I_{sc} , V_{oc}

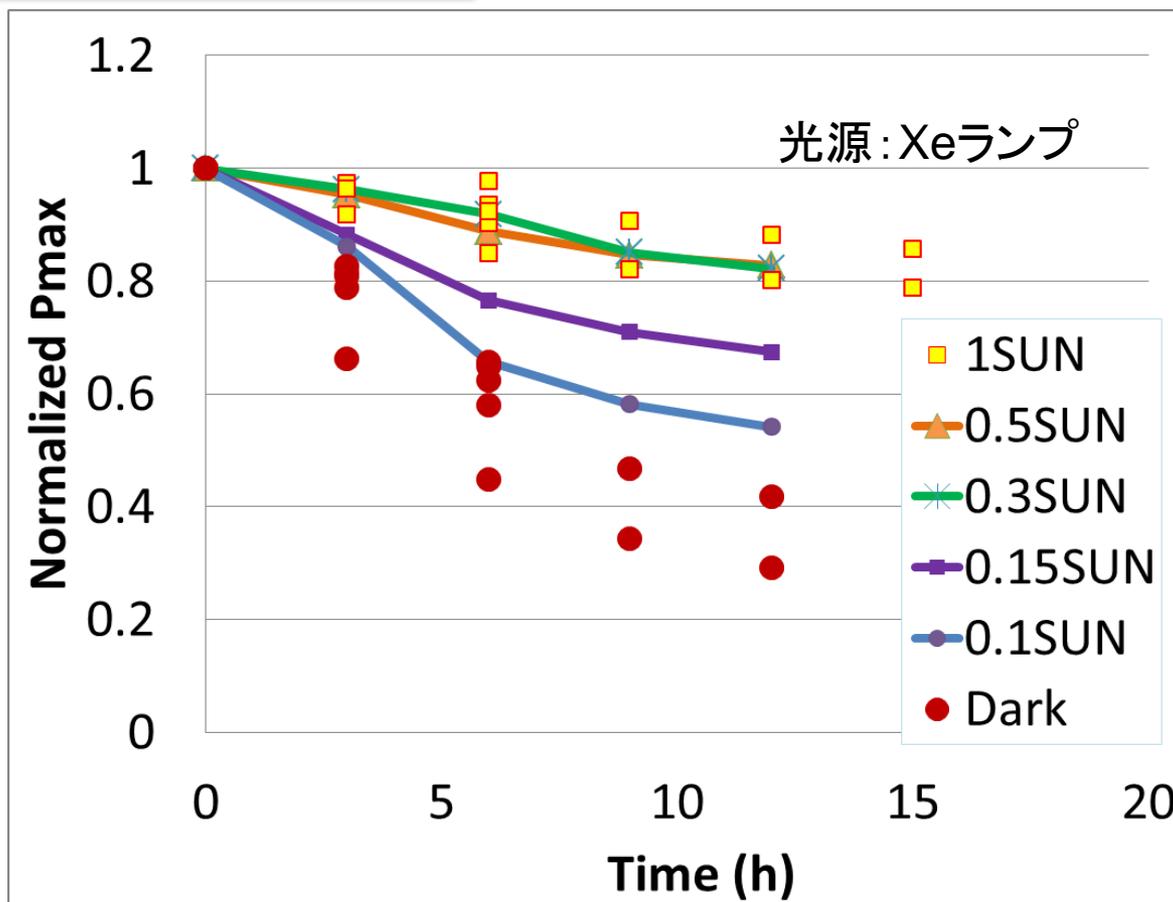
K. Hara *et al.*, Solar Energy Mater. Solar Cells **140** (2015) 361.

現時点で想定されるPIDの原因

- Naの積層欠陥への集積 深い準位によるキャリア再結合
- 電荷蓄積 (surface polarization)
- 透明導電膜の着色 (回復困難)
- 透明導電膜の剥離 (回復不可)

光照射がPIDに与える影響

結晶Si系モジュール



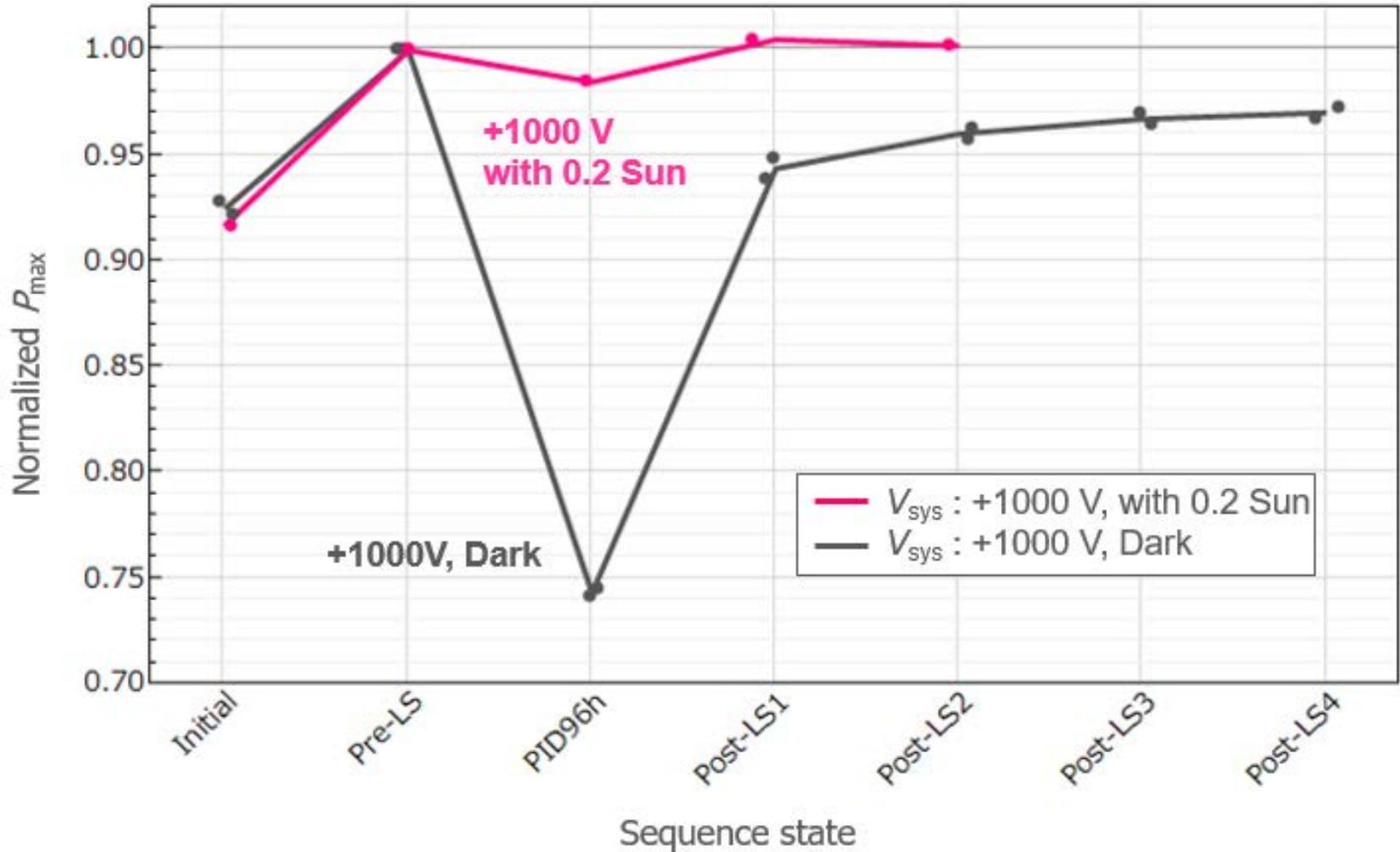
実際の屋外曝露環境では、発電時すなわち光照射時しか、セルに高電圧は印加されない(部分影を除く)。この結果は、暗所でのPID試験が、実際よりも過剰な試験となっている可能性を示唆するものである。

原由希子他、ポスター講演75番

光照射がPIDに与える影響

CIGSモジュール

白色LED



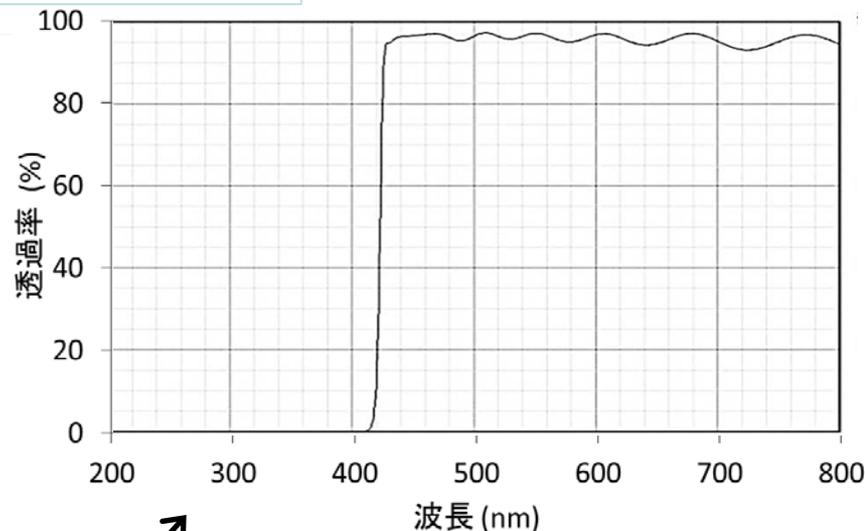
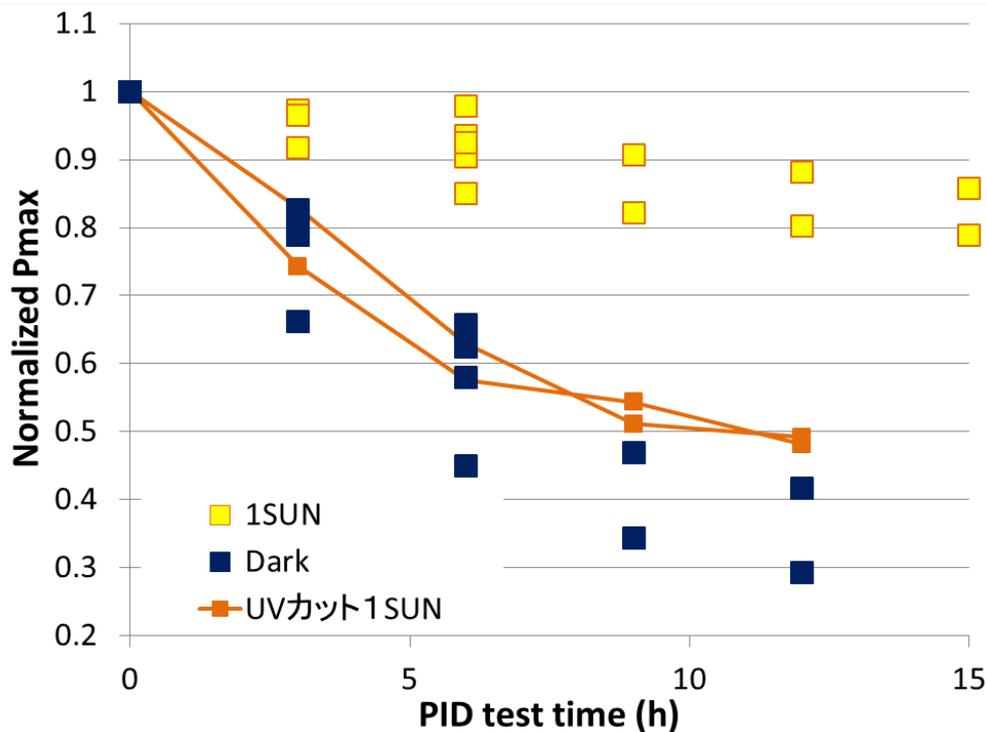
櫻井 啓一郎他、ポスター講演36番

光照射がPIDに与える影響

結晶Si系モジュール

【PID試験条件】85°C Dry (相対湿度10%以下)、-1000 V

【照射条件】UVカット1SUN



使用したUVカットフィルター
(422 nm以下カット)の透過率

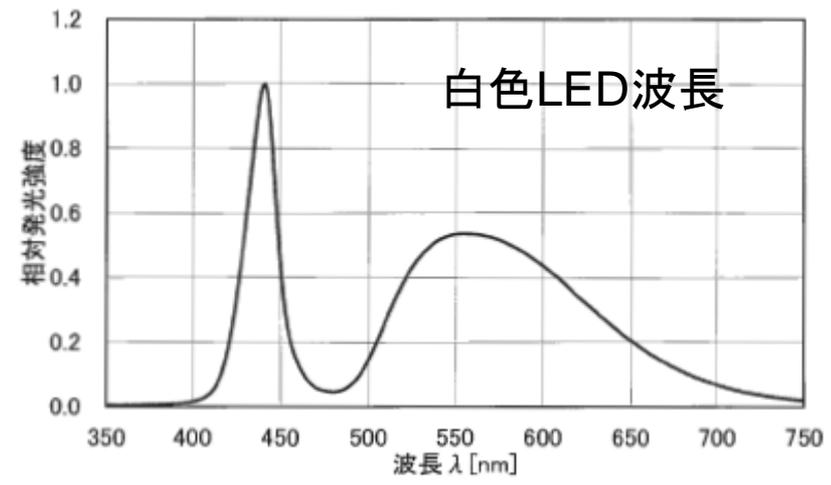
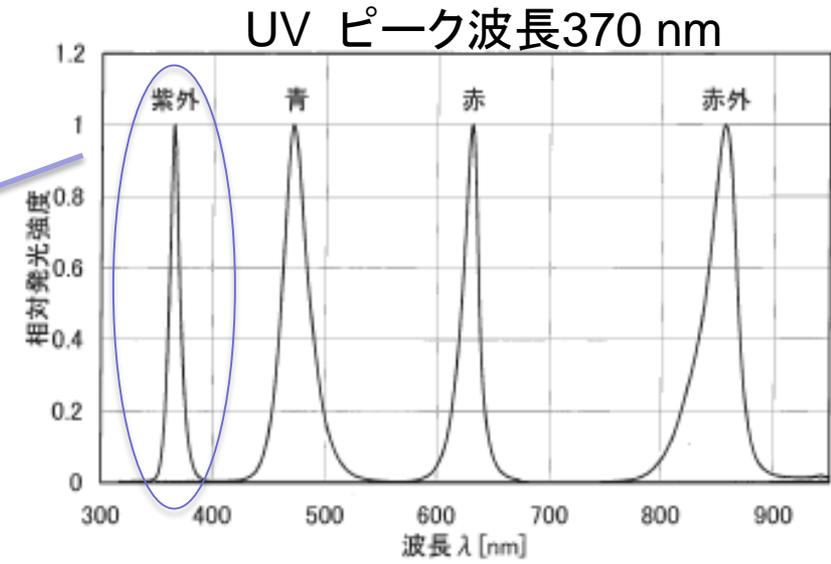
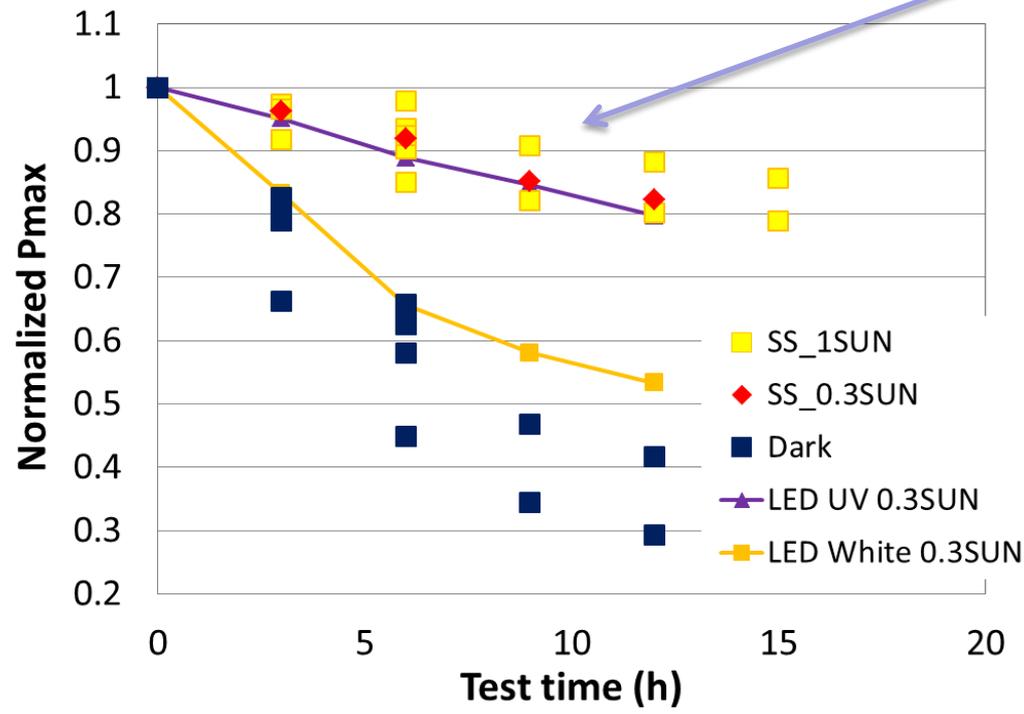
光によるPID抑制効果には紫外光成分が必要
CIGSとは異なる現象

原由希子他、ポスター講演75番

光照射がPIDに与える影響

結晶Si系モジュール

【PID試験条件】 85°C、相対湿度10%以下、
-1000 V
【照射条件】 紫外LED / 白色LED



紫外LED 照射 ⇒ Xeランプ照射と同等の抑制効果
白色LED照射 ⇒ Darkと同等の劣化

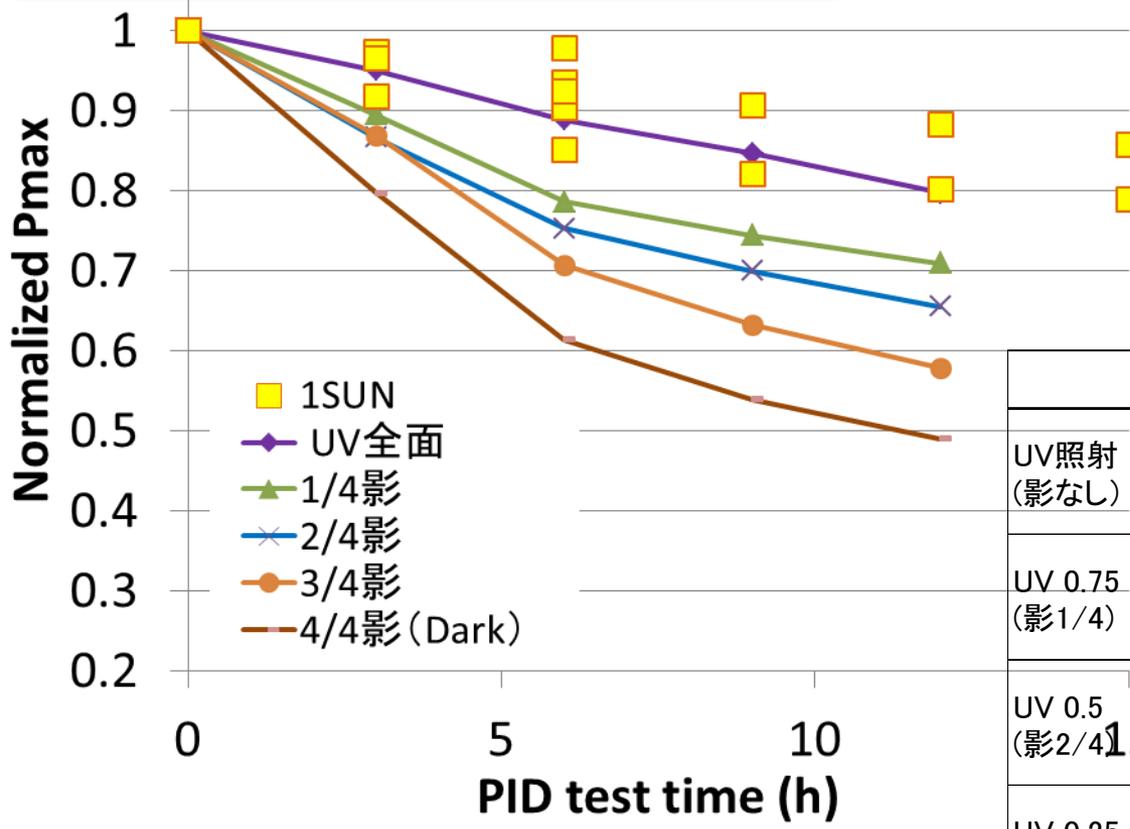
370 nmの紫外光成分で劣化抑制

原 由希子他、ポスター講演75番

光照射がPIDに与える影響

結晶Si系モジュール

【PID試験条件】
 ・85°C、相対湿度10%以下
 ・-1000 V印加
 ・with LED UV 0.3SUN+影



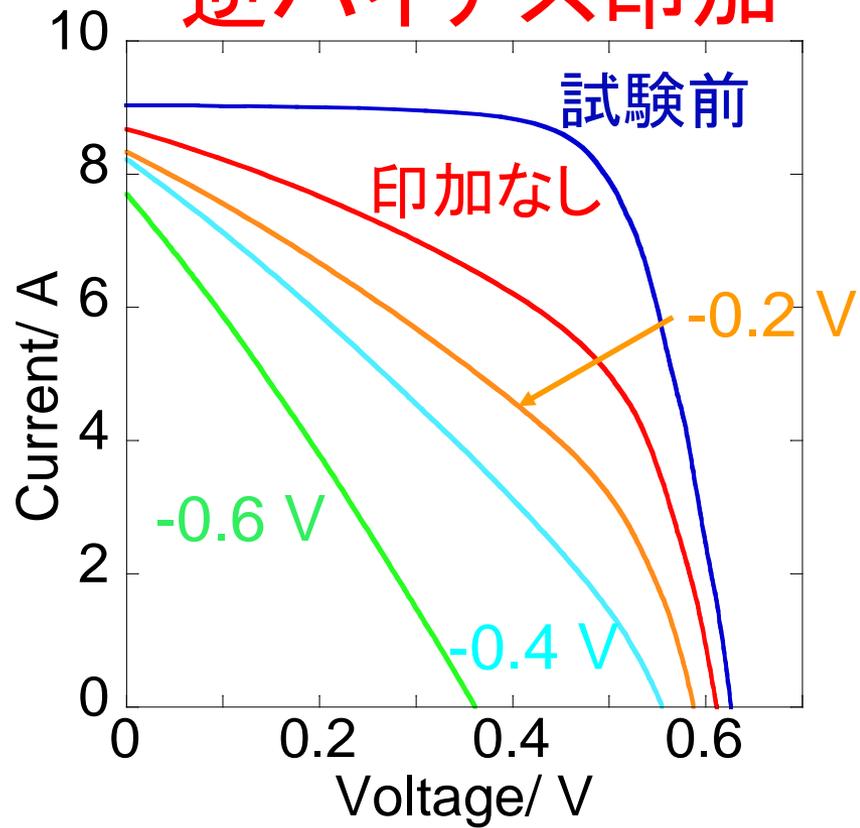
| | Initial | 3h | 6h | 9h | 12h |
|----------------|---------|----|----|----|-----|
| UV照射 (影なし) | | | | | |
| UV 0.75 (影1/4) | | | | | |
| UV 0.5 (影2/4) | | | | | |
| UV 0.25 (影3/4) | | | | | |
| Dark (影4/4) | | | | | |

- ・影の面積と劣化速度に相関
- ・影になった箇所から劣化
- ・屋外の部分影はPIDを誘発する可能性

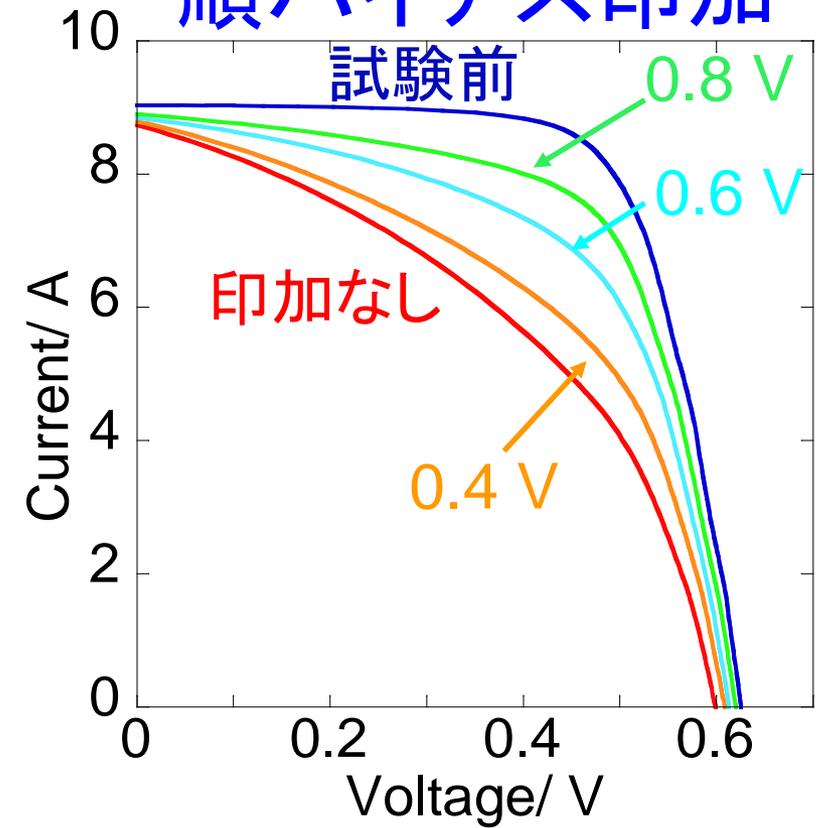
結晶Si系モジュール

PID+バイアス印加 I-V特性

逆バイアス印加



順バイアス印加

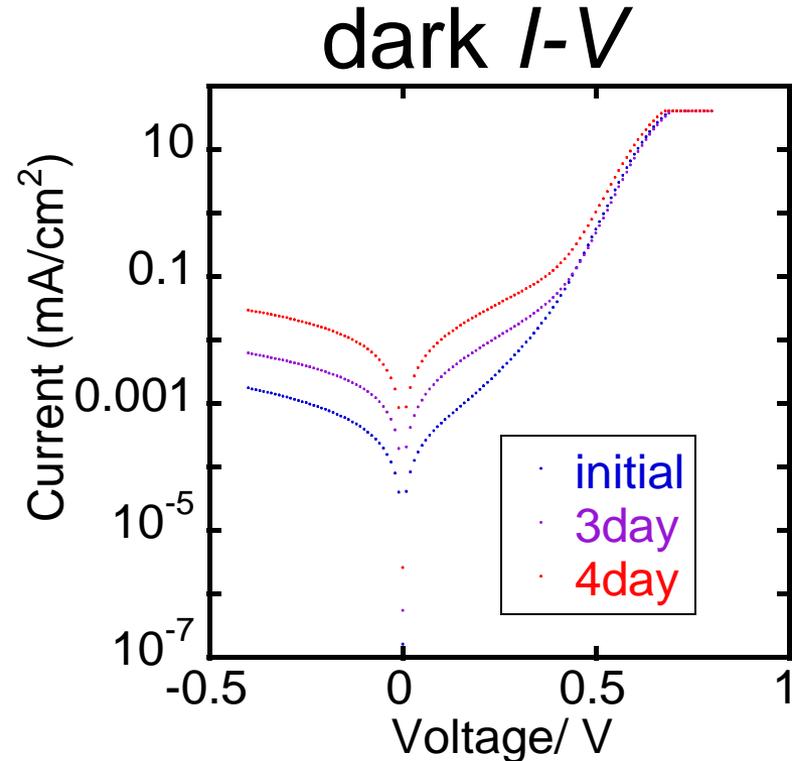
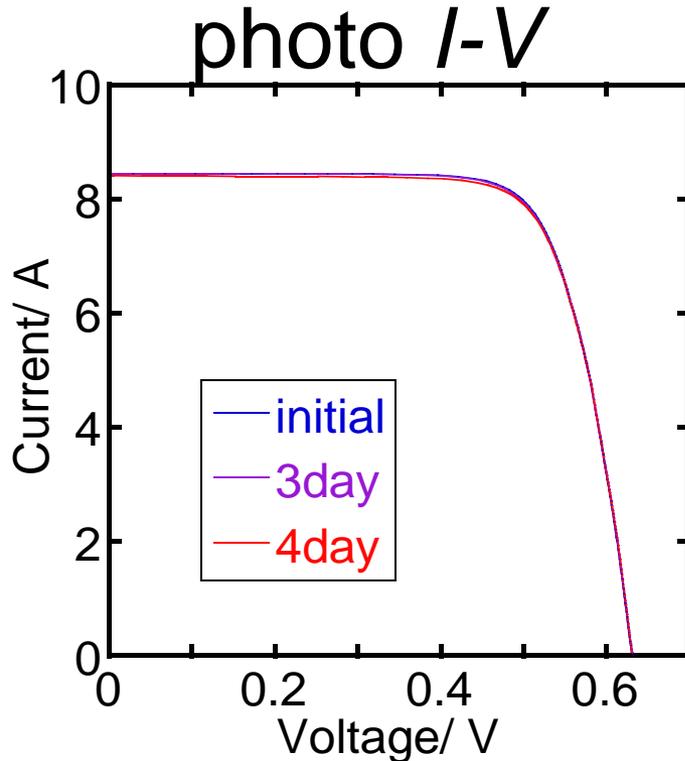


試験条件
-1000 V, 85°C, 1 h

逆バイアス印加 ⇒ 劣化大
順バイアス印加 ⇒ 劣化小

城内 紗千子他、ポスター講演77番

PID試験前後のphoto I-Vならびにdark I-V特性



PID試験条件 アルミフレーム法、印加電圧:-300 V、温度:40 °C、相対湿度:約2~3%

実用的な観点ではphoto I-V特性の変化が重要であるが、photo I-Vでは変化が観測されない低ストレス下でも、dark I-VではPID由来のシャント抵抗の低下が明瞭に観測される。PIDのメカニズムに迫るには、dark I-V特性の観測、解析が欠かせない。

参考文献(産総研と共同研究機関の最近の研究成果)

- 1) K. Mishina *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **53**, 03CE01 (2014)., 2) T. Asaka *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **53**, 04ER18 (2014)., 3) T. Kajisa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **53**, 092302 (2014)., 4) K. Hara *et al.*, RSC Adv., **4**, 44291 (2014)., 5) K. Hara *et al.*, RSC Adv., **5**, 15017 (2015)., 6) A. Masuda *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 04DR04 (2015)., 7) S. Jonai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 08KG01 (2015)., 8) K. Mishina *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 08KD12 (2015)., 9) S. Yamaguchi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 08KC13 (2015)., 10) T. Asaka *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 08KG07 (2015)., 11) S. Suzuki *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 08KG08 (2015)., 12) H. Morita *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 08KF07 (2015)., 13) K. Hara *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **140**, 361 (2015)., 14) M. D. Kempe *et al.*, Energy Sci. Eng., **3**, 565 (2015)., 15) M. D. Kempe *et al.*, Energy Sci. Eng., **4**, 40 (2016)., 16) S. Suzuki *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 022302 (2016)., 17) A. Masuda *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 02BF10 (2016)., 18) A. Masuda *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 04ES10 (2016)., 19) S. Yamaguchi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 04ES14 (2016)., 20) T. Ngo *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 052301 (2016)., 21) S. Yamaguchi *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **151**, 113 (2016)., 22) H. Hagihara *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 102302 (2016)., 23) A. Masuda *et al.*, Cur. Appl. Phys., **16**, 1659 (2016)., 24) S. Yamaguchi *et al.*, Appl. Phys. Exp., **9**, 112301 (2016)., 25) S. Yamaguchi *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **161**, 439 (2017)., 26) K. Hara *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **166**, 132 (2017).

International Workshop on
the **S**ustainable **A**ctions for “**Y**ear by Year Aging”
under **R**eliability **I**nvestigations in **P**hotovoltaic Modules

SAYURI-PV 2017

Satellite Meeting of PVSEC-27

Date: November 11th – 12th, 2017

Venue: Ryukoku University, Seta Campus, JAPAN

Topics: Novel test procedures and characterization methods to assure the long-term reliability of PV modules, including the efforts toward their standardization

For latest information visit <https://unit.aist.go.jp/rcpv/cie/index.html>

Registration Deadline: September 23rd, 2017.

Contact: sayuri-pv-sec-ml@aist.go.jp

今後の課題

- ・紫外光照射が湿熱劣化を速め、PIDを遅らせるメカニズムの解明
- ・光照射の代替負荷の探索と実用的複合加速試験法の開発
- ・物理的・機械的劣化を模した試験法の充実と加速係数の算出
- ・PERC・ヘテロ接合・バックコンタクトをはじめとする新型結晶Si系太陽電池、CdTe太陽電池、ペロブスカイト・有機系太陽電池等、これまでの検証が不十分な太陽電池における劣化機構解明と信頼性向上技術開発

まとめに代えて

- ・国内では太陽電池の研究テーマがセルの高効率化に重点が置かれ、モジュールに関しては学問分野として軽視されてきた経緯がある。欧米では大学、研究機関を中心に長年の研究の蓄積があり、日本は大きく後れを取っている。太陽電池メーカーは相当数のデータを取得しているはずであるが、ノウハウとして秘匿されていることが多い。
- ・太陽電池モジュールの信頼性に関して、議論できる場そのものが少ない。
- ・エネルギーネットワーク技術全盛の時代であるが、モジュールよりも川上側の研究の意義が揺らぐことはなく、材料科学やデバイス物理に根差したモジュール信頼性研究の一層の推進が求められる。とりわけPIDは半導体のpn接合そのものに関連する劣化現象の場合もあり、セル分野の研究者の積極的な参画を期待する。