

# 各種太陽電池モジュールの PID現象と抑止法

太陽光発電研究センター  
モジュール信頼性チーム  
増田 淳、原 浩二郎

## 本講演で引用した成果に関わる共同研究者(順不同)

城内 紗千子<sup>1</sup>、原 由希子<sup>1</sup>、山本 千津子<sup>1</sup>、井上 昌尚<sup>1</sup>、秋富 稔<sup>1</sup>、  
仁木 栄<sup>1</sup>、柴田 肇<sup>1</sup>、小牧 弘典<sup>1</sup>、上川 由紀子<sup>1</sup>、土井 卓也<sup>1</sup>、  
村上 拓郎<sup>1</sup>、小川 錦一<sup>1</sup>、岡林 裕介<sup>1</sup>、松崎 弘幸<sup>1</sup>、大平 圭介<sup>2</sup>、  
山口 世力<sup>2</sup>、池野 成裕<sup>3</sup>、小椋 厚志<sup>3</sup>、川上 雄士<sup>4</sup>、橘 泰至<sup>5</sup>、  
豊田 文紫<sup>5</sup>、中野 幸一<sup>5</sup>、南川 俊治<sup>5</sup>、一ノ瀬 弘道<sup>6</sup>、奥川 敦雄<sup>7</sup>、  
奥脇 経三<sup>7</sup>、上野 清志<sup>8</sup>、山崎 敏晴<sup>8</sup>、三科 健<sup>9</sup>、大岸 厚文<sup>9</sup>、  
猿渡 哲也<sup>9</sup>、篠原 誠<sup>9</sup>

<sup>1</sup>産業技術総合研究所、<sup>2</sup>北陸先端科学技術大学院大学、

<sup>3</sup>明治大学、<sup>4</sup>久留米工業高等専門学校、<sup>5</sup>石川県工業試験場、

<sup>6</sup>佐賀県窯業技術センター、<sup>7</sup>菊水電子工業株式会社、

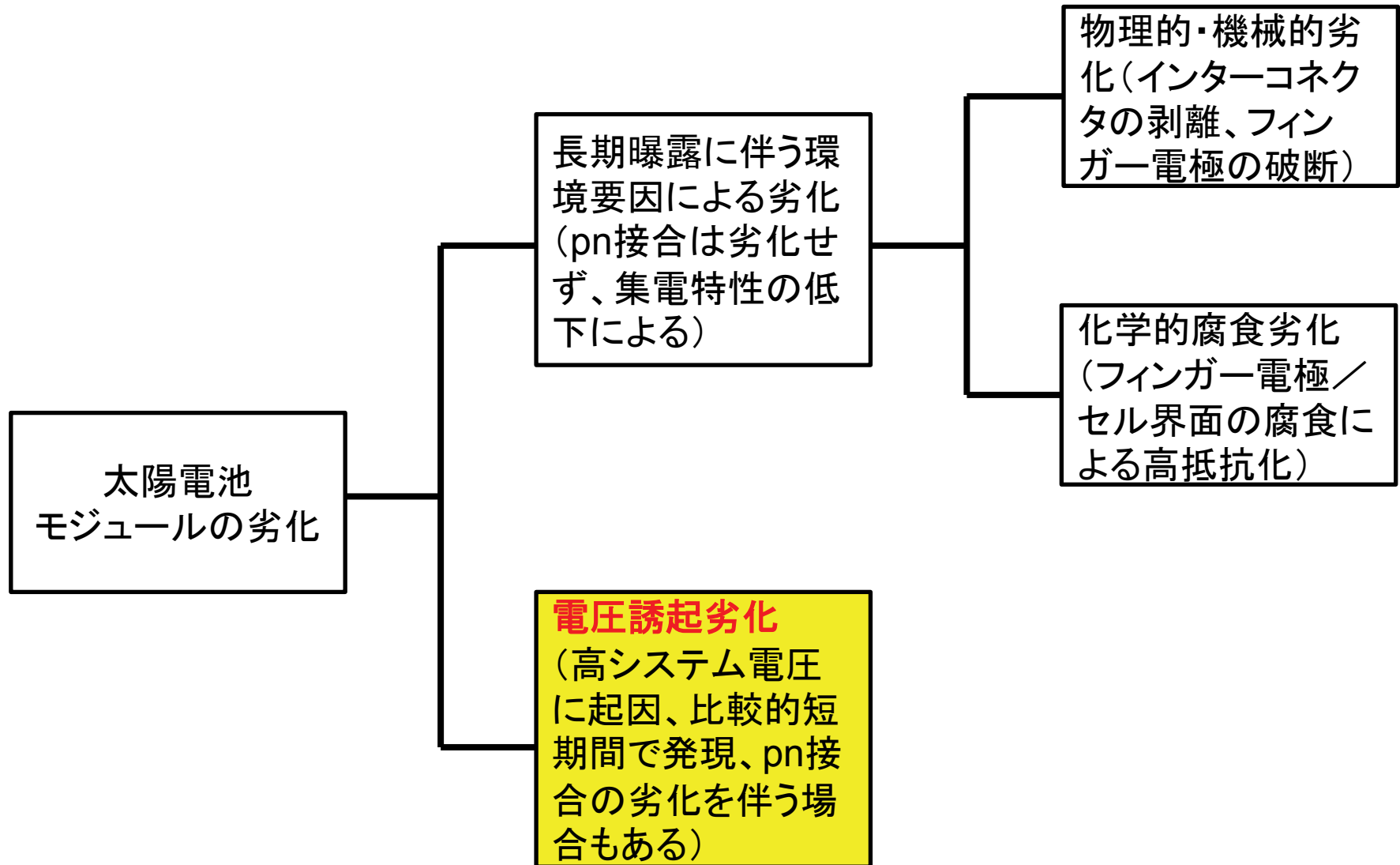
<sup>8</sup>長州産業株式会社、<sup>9</sup>株式会社島津製作所、

**本研究の一部はNEDOの委託による。**

## 電圧誘起劣化(PID)

- 固定価格買取制度も始まり、太陽電池の初期特性ばかりでなく、長期信頼性にも大きな関心が寄せられている。
- とりわけ、短期間に発電性能が大きく低下する電圧誘起劣化 (potential induced degradation: PID) が注目されている。
- PIDとは「高電圧で誘起される劣化」の総称である。太陽電池の種類毎にPIDのメカニズム解明と対策が望まれている。
- 屋外で生じるPIDを再現可能な適正な試験法開発も重要である。

# 太陽電池モジュールの劣化の分類





# PID (Potential-Induced Degradation)

メガソーラーにおける太陽電池モジュール出力の大幅低下が顕在化

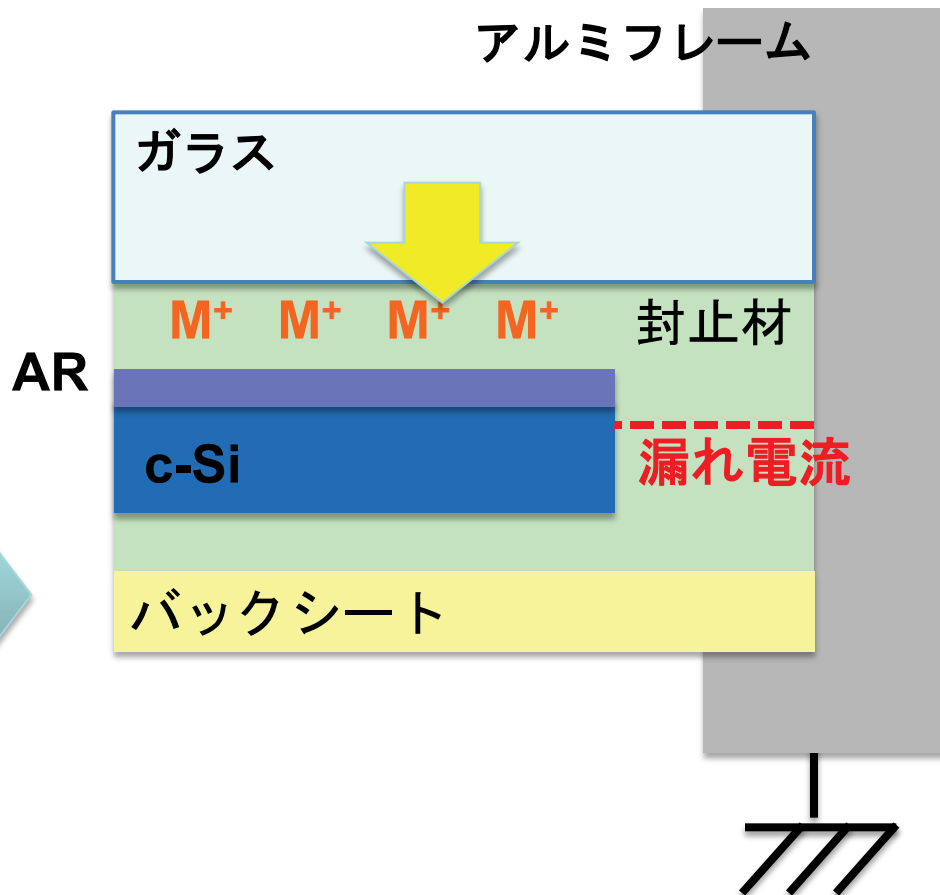


主な関連要因

メガソーラー

- ・メガソーラー(高システム電圧)
- ・水分(湿度)
- ・高温
- ・ソーダライムガラス
- ・封止材
- ・反射防止(AR)膜

想定されている劣化メカニズム例



# PIDの研究課題

- メカニズムの解明と対策

  - ガラスからのNa拡散

  - 封止材の体積抵抗

  - 反射防止膜の組成、抵抗率

  - 太陽電池の種類→p型Si、n型Si、薄膜系(薄膜Si、CIGS)

- 試験法、試験条件

  - チャンバー法、水張り法、アルミ法

  - 温度、湿度、印加電圧、時間

  - 屋外での発生事例との比較検討

- 回復

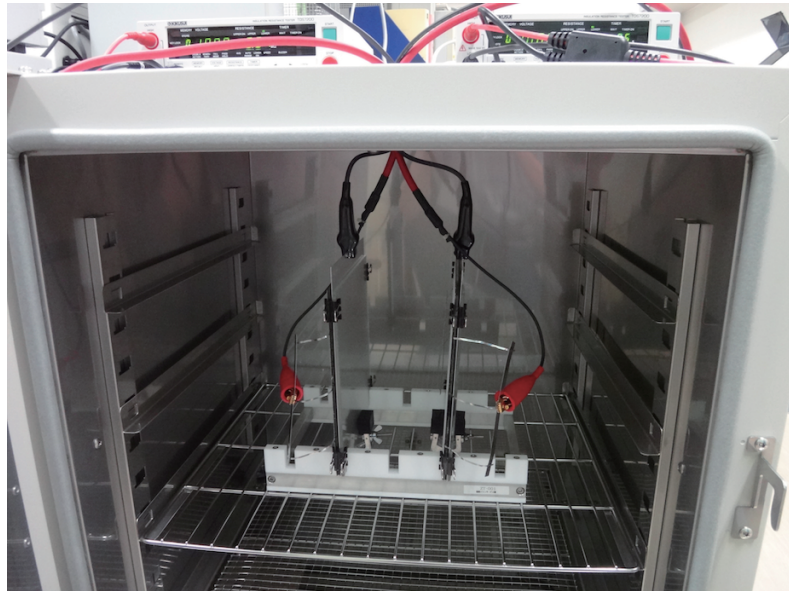
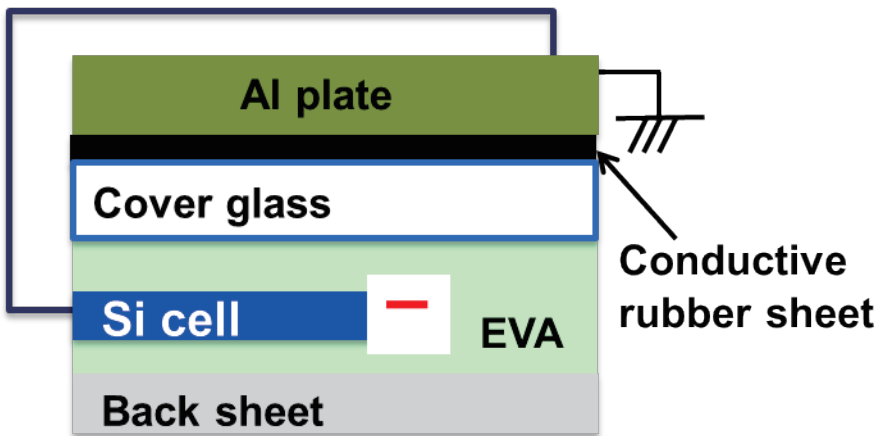
  - 完全回復、部分回復、自然回復、逆電圧印加による回復

# PID試験方法

# AI法によるPID試験



単セル (156 mm x 156 mm) モジュールの外観



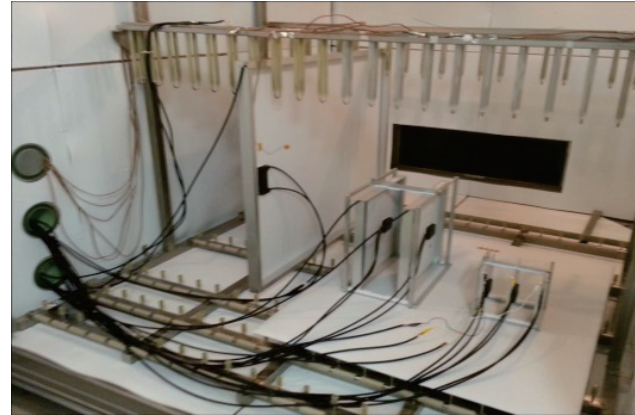
**典型的な試験条件**  
 -1000 V, 85°C, 2-1000 h  
 <2% RH

**極めて迅速にPIDが発生**

K. Hara *et al.*, RSC Adv. 4 (2014) 44291.

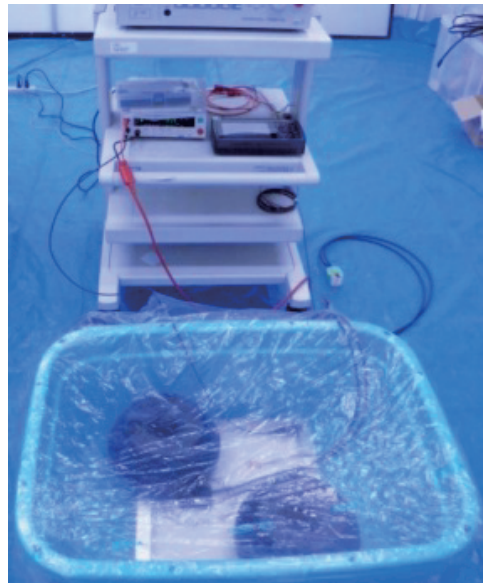
# 屋内PID試験方法(チャンバー法と水張り法)

## チャンバー法



大面積モジュールは、  
フレームから電圧印加

## 水張り法



ガラス面を水面に浸すこと  
により、乾燥を防止

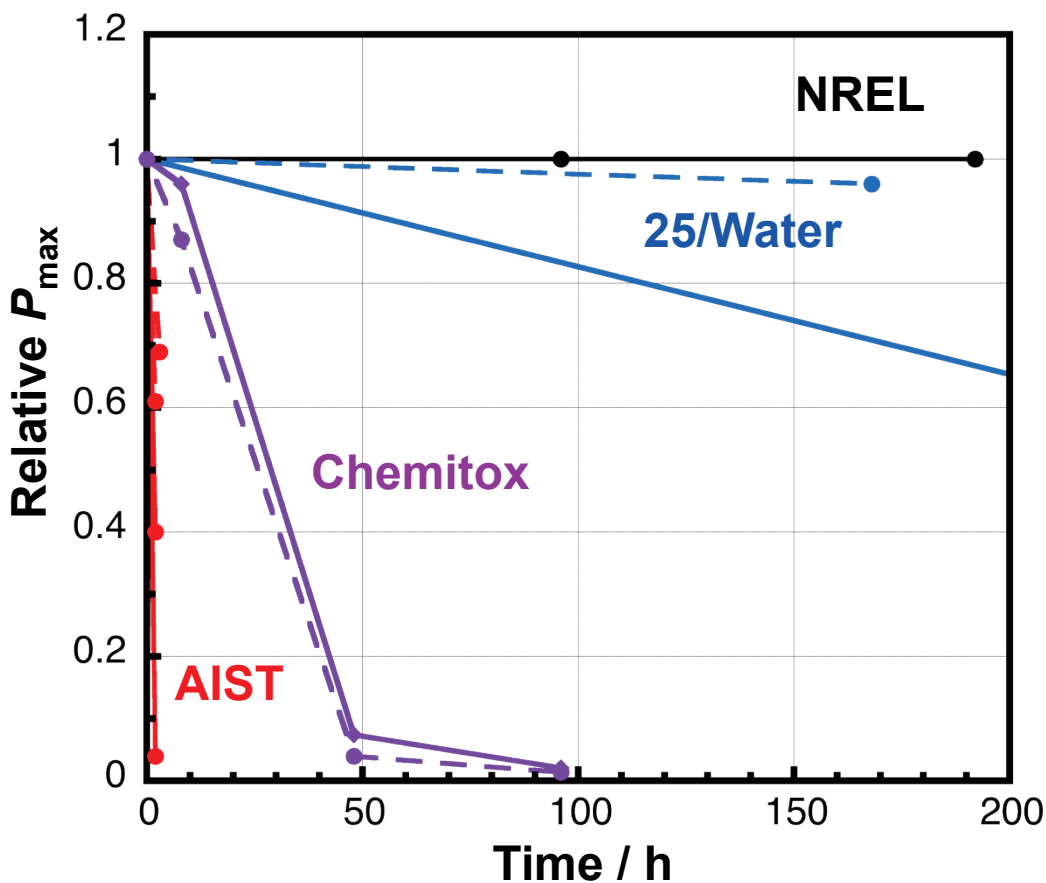
# 各機関から報告されているPID試験方法の比較

機関名	方法	試験温度 / °C	湿度 (%)	印加電圧 / V	試験時間 / h
Fraunhofer-CSP	Al foil	50	50	-1000	48
PI-Berlin	Al foil	85	85	Max S.V.	48
NREL	chamber	60	85	Max S.V.	96
Schott	Al foil	25	—	-1000	168
Chemitox	water	60	85	-1000	96
Sanvic	Al plate	65	—	750	21
<b>AIST</b>	<b>Al plate</b>	<b>85</b>	<b>&lt;2</b>	<b>-1000</b>	<b>2-1000</b>

Max S.V. : 最大システム電圧



# 試験法による劣化の差異

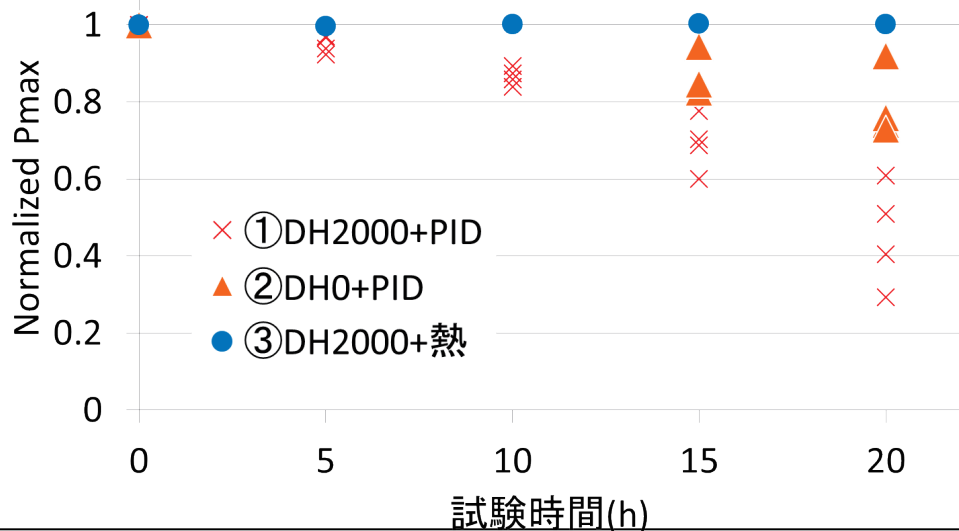


試験法	モジュール表面	試験温度 / °C	湿度 (%)
NREL	—	60	85
25/Water	Water	25	—
Chemitox	Water	60	85
AIST	Al plate	85	<2

印加電圧: -1000 V

産総研で開発したAI法は NRELから報告されている方法に比べ、110倍速く劣化が進行し、モジュール部材やモジュール構造の選別には極めて有効である。

- AI法ではあまりにも短時間で劣化が生じるので、湿度の影響を観測できない。湿度の有無によらず同じ結果になる。
- 典型的な高温高湿試験条件では、浸入水分により酢酸が生成し、モジュールに影響を及ぼすには、2000~3000時間を要する。
- 高温高湿試験とPID試験の組合せにより、湿度がPIDに対して本質的な寄与がある可能性も示唆された。

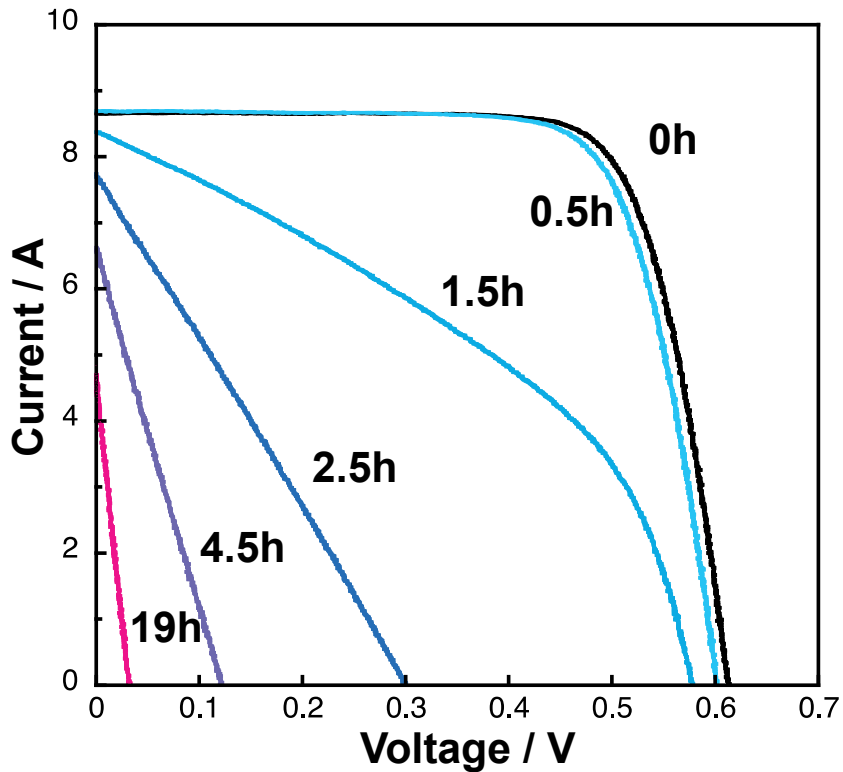


橘泰至他、本成果報告会ポスターセッション No. 55.



# p型結晶Si太陽電池のPID

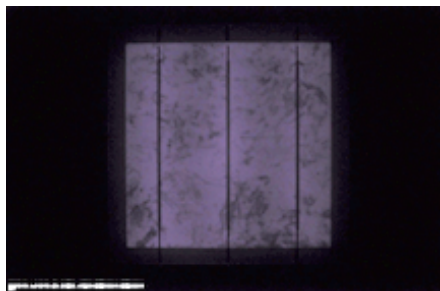
# p型結晶Si太陽電池モジュールのPID



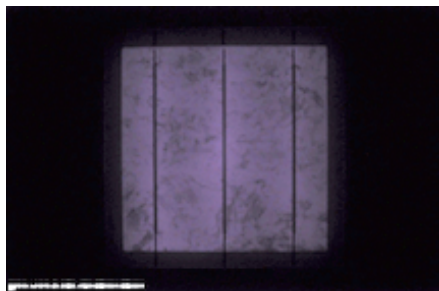
PID試験条件: -1000 V, 85°C

時間 / h	$I_{sc}$ / A	$V_{oc}$ / V	FF	$P_{max}$ / W	Eff. (%)
0	8.66	0.61	0.75	3.98	16.4
0.5	8.69	0.60	0.74	3.87	15.9
1.5	8.36	0.58	0.40	1.93	7.9
2.5	7.69	0.30	0.26	0.60	2.5
4.5	6.58	0.12	0.25	0.20	0.8
19	4.54	0.03	0.24	0.04	0.1

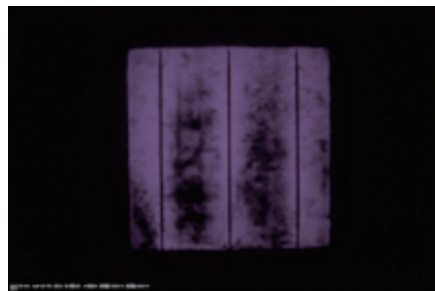
EL画像



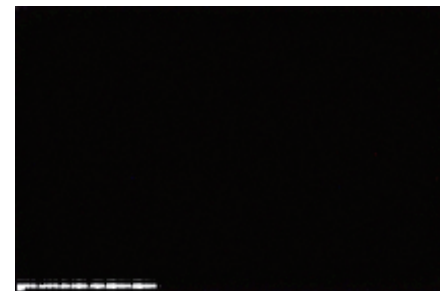
試験前 (16.4%)



0.5 h (15.9%)



1.5 h (7.9%)

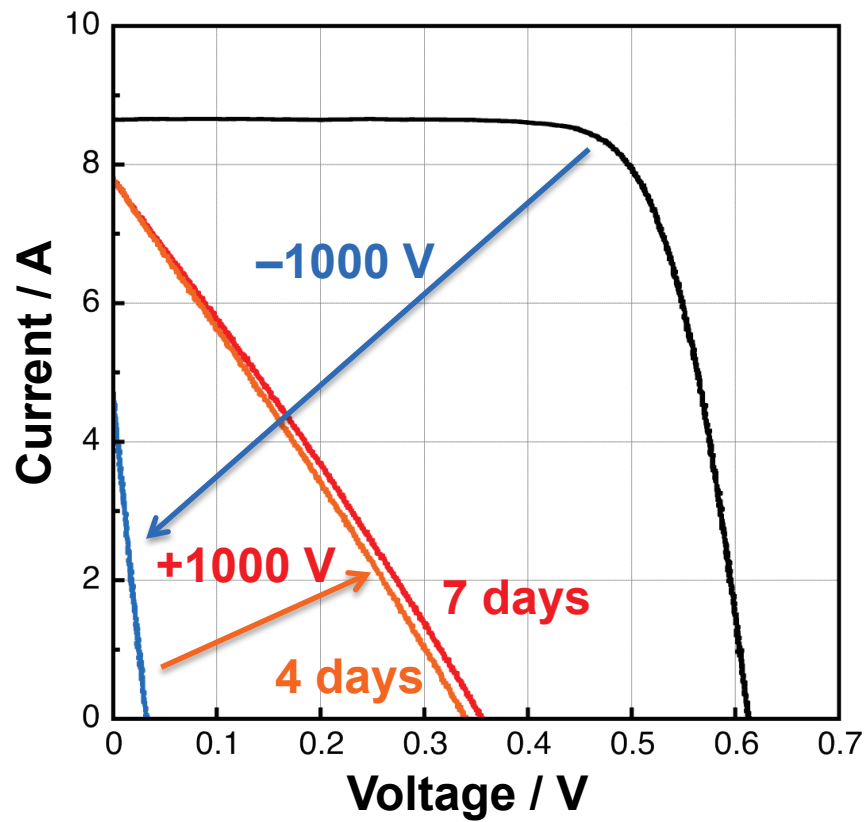
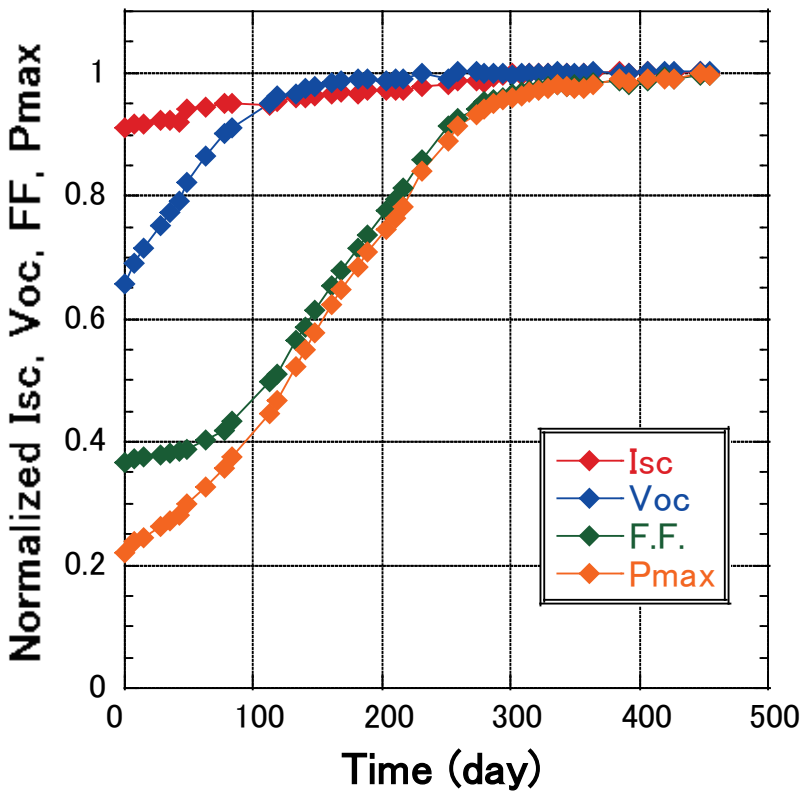


2.5 h (2.5%)

# PIDの回復

室温放置でも完全回復

85°Cの逆電圧印加でも部分回復

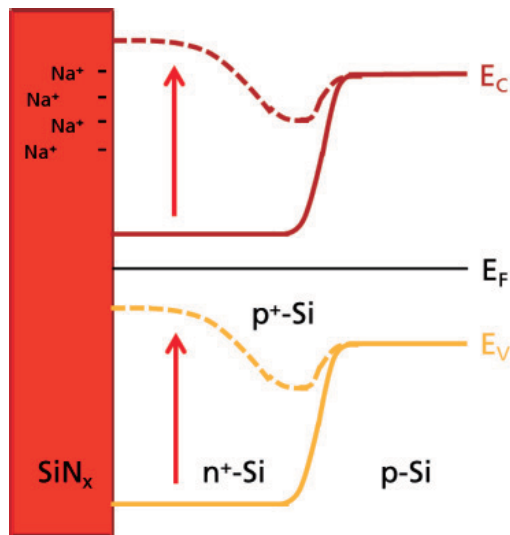


A. Masuda *et al.*, 25th PVSEC, 2015, I-O-04.

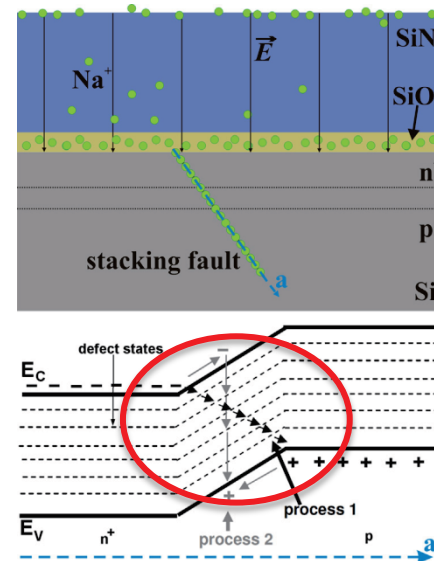
# p型結晶Si太陽電池モジュールのPIDのメカニズム



## 1. セル表面に到達



## 2. セル中に拡散



1. Na<sup>+</sup>によるバンドベンディングの低減  
→回復可?、可逆過程?
2. Na<sup>+</sup>による不純物準位の形成  
→回復困難?、不可逆過程?

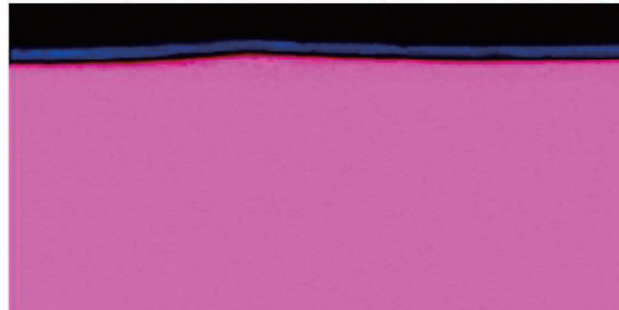
Naumann et al., Energy Procedia 27 (2012) 1.; Sol. Energy Mater. Sol. Cells 120 (2014) 383.

# PID試験ならびに回復試験による pn接合部のSCM像の変化



8  $\mu\text{m}$   $\times$  16  $\mu\text{m}$

試験前EL明部



8  $\mu\text{m}$   $\times$  16  $\mu\text{m}$

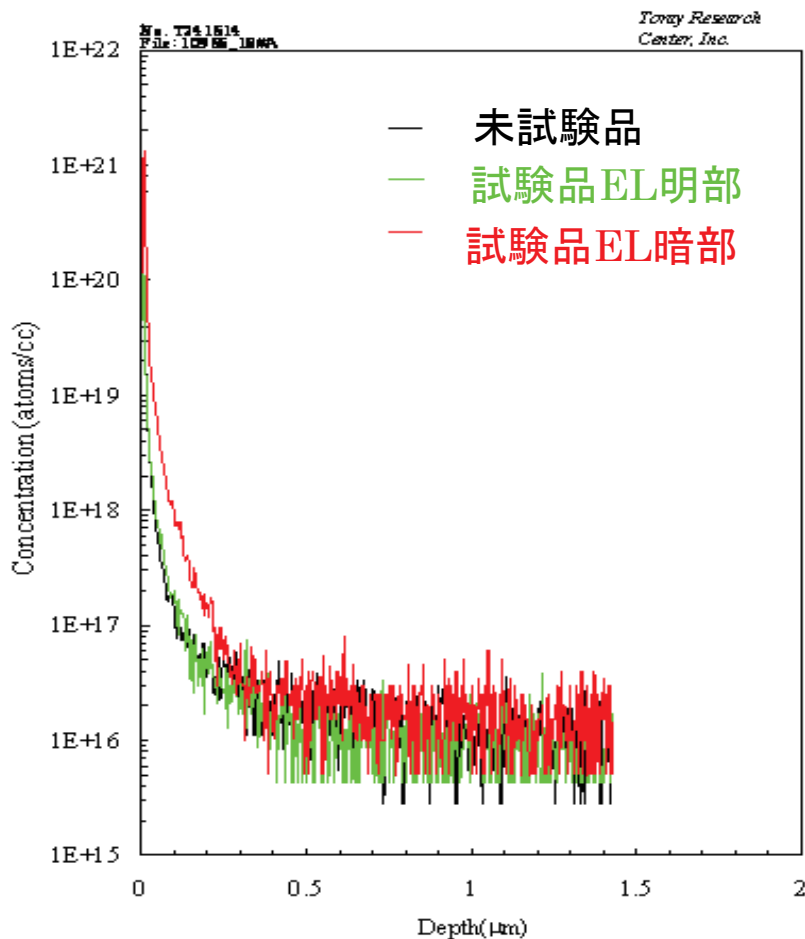
試験後EL暗部



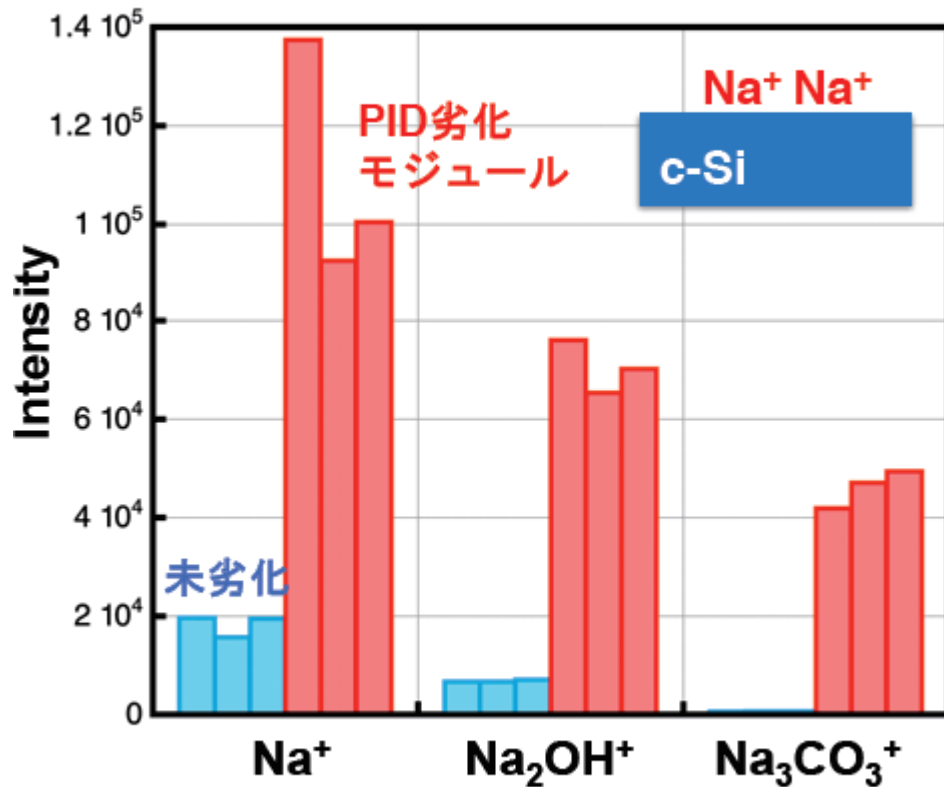
8  $\mu\text{m}$   $\times$  16  $\mu\text{m}$

回復試験後EL明部

# Naの拡散



PID劣化モジュールのSiセル表面をTOF-SIMSにより分析

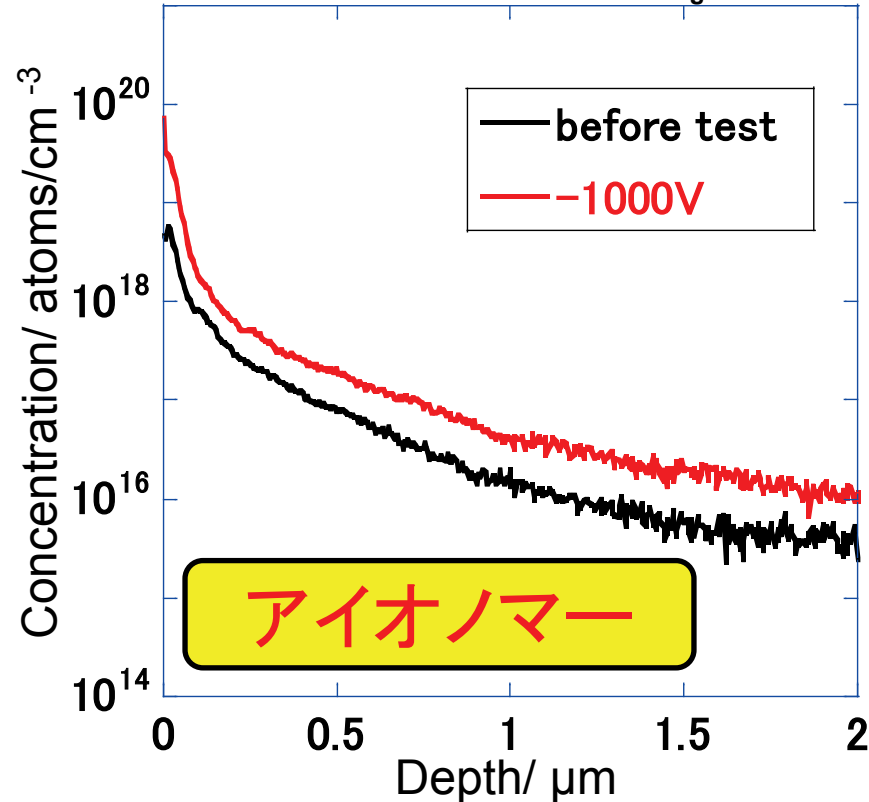
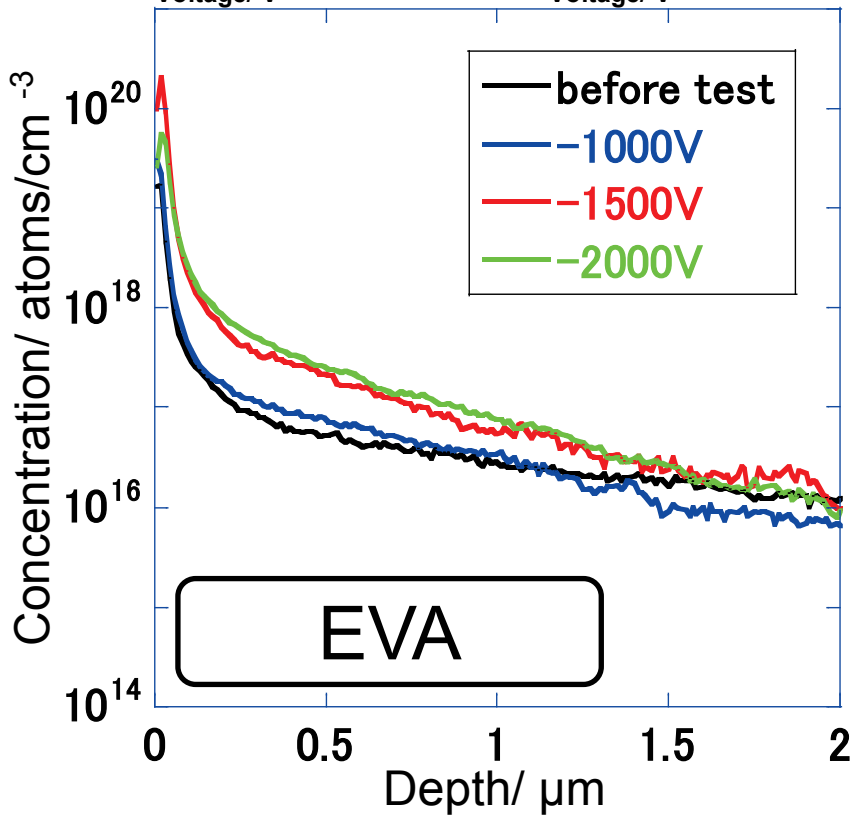
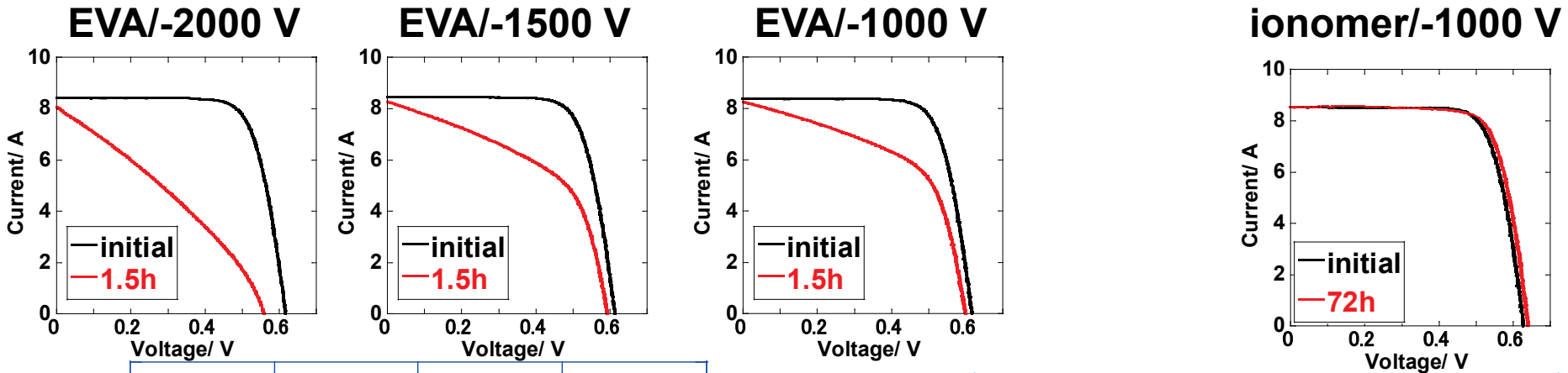


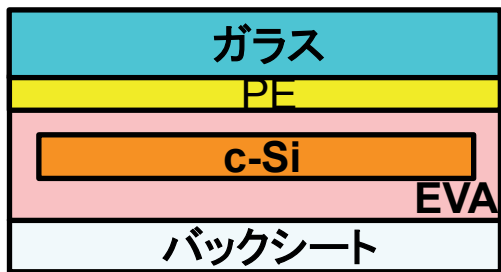
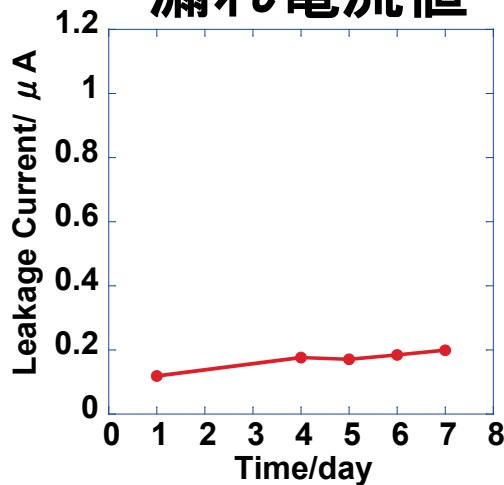
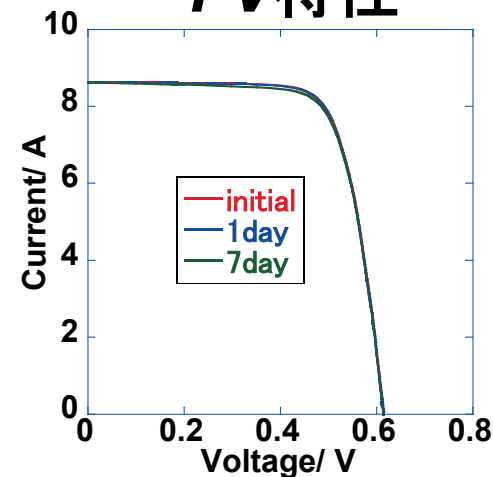
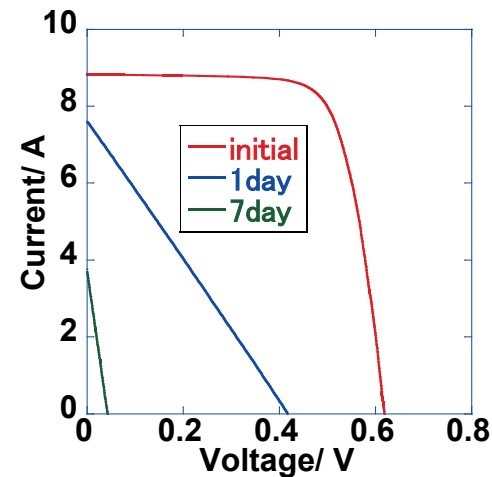
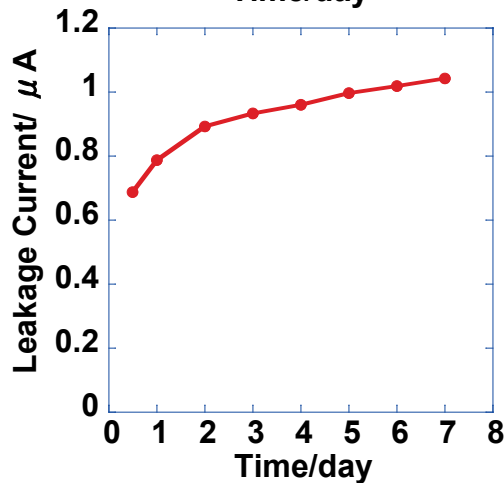
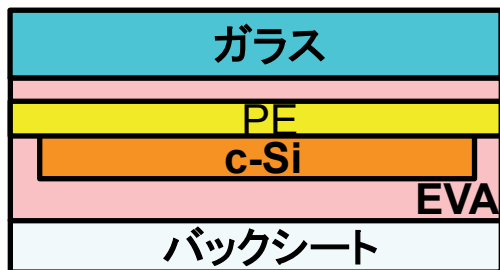
K. Mishina *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **54** (2015) 08KD12.

PID劣化モジュールでNaが大幅増加

K. Hara *et al.*, RSC Adv. **4** (2014) 44291.

# Na拡散はPIDの十分条件か？



**A**

**漏れ電流値**

**I-V特性**

**B**


PID試験条件: -1000 V, 85°C

PIDは体積抵抗率のみならず、界面状態や封止材中の添加剤の影響も受ける。

城内紗千子他、本成果報告会ポスターセッション No. 53.



# p型結晶Si太陽電池モジュールのPID対策

- 漏れ電流抑止

高体積抵抗率封止材（アイオノマー、ポリエチレン、ポリオレフィン、シリコーン）

- Na拡散抑止

化学強化ガラス、無アルカリガラス、アクリル系カバー材、 $\text{TiO}_2$ コートガラス

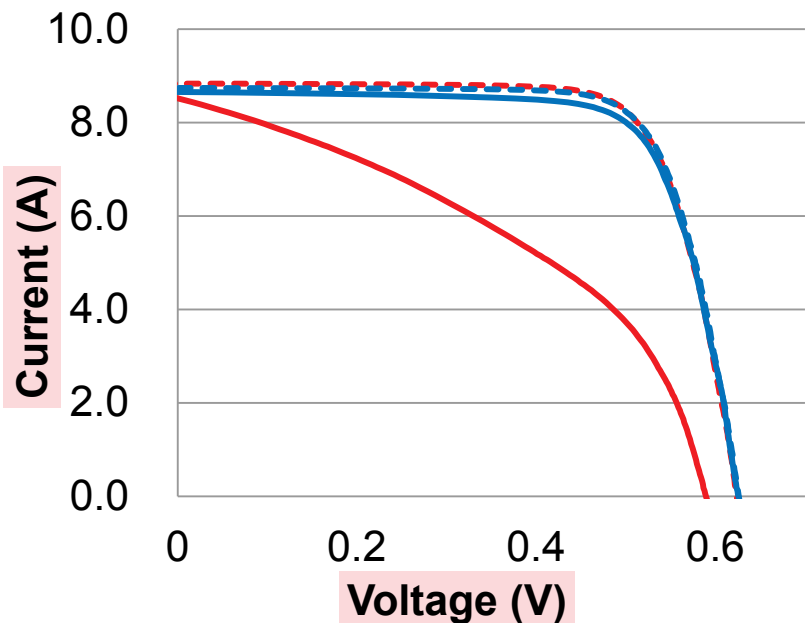
- 反射防止膜の組成、多層化、製膜法（マルチホローカソード）

PID試験前の逆電圧印加条件  
 電圧: +2000 V、時間: 15 h、温度: 85°C

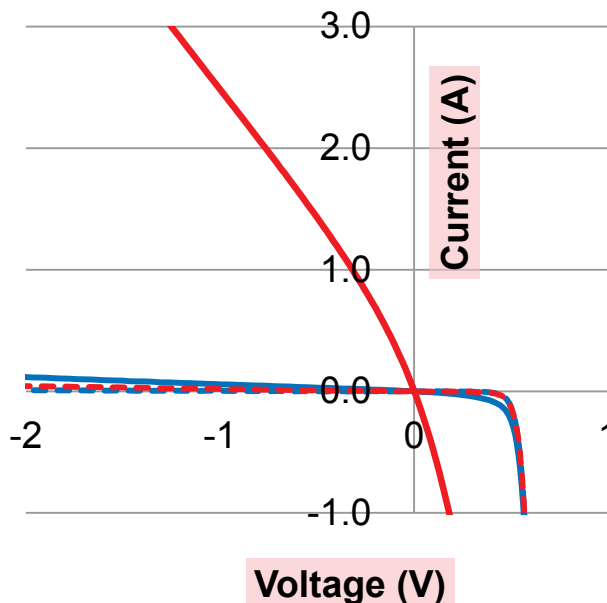


PID試験条件  
 電圧: -1000 V  
 時間: 12 h  
 温度: 85°C

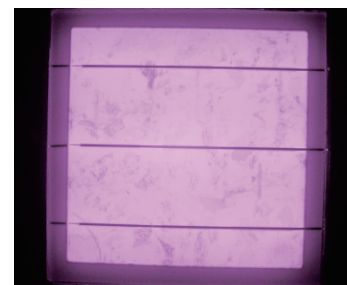
光電流－電圧特性



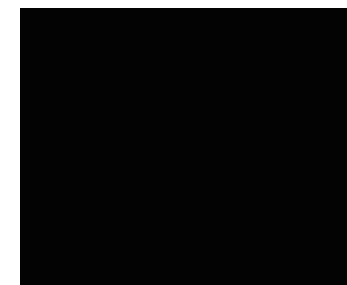
暗電流－電圧特性



PID試験12 h後のEL像



事前逆電圧印加あり



事前逆電圧印加なし

- PID試験前
- ... 逆電圧印加直後
- 逆電圧印加後に12 hのPID試験
- 逆電圧印加なしで12 hのPID試験

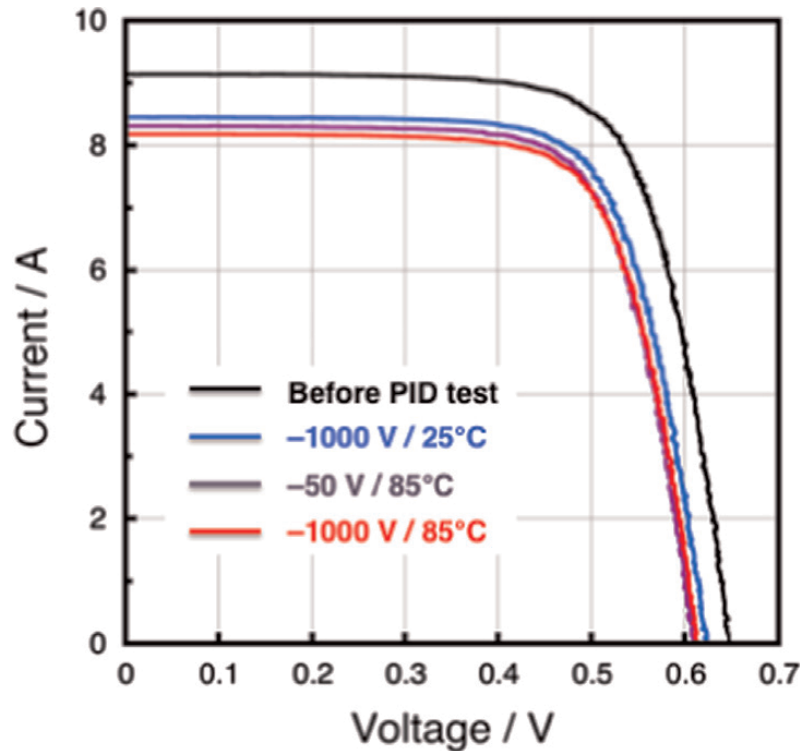
# 逆電圧印加温度: 85°C

Time (h)	Voltage (V)				
	+2000	+1000	+500	+250	+100
15	○	○	○	○	×
6	○	○	○	×	
3	○	×	×	×	
1	×	×			

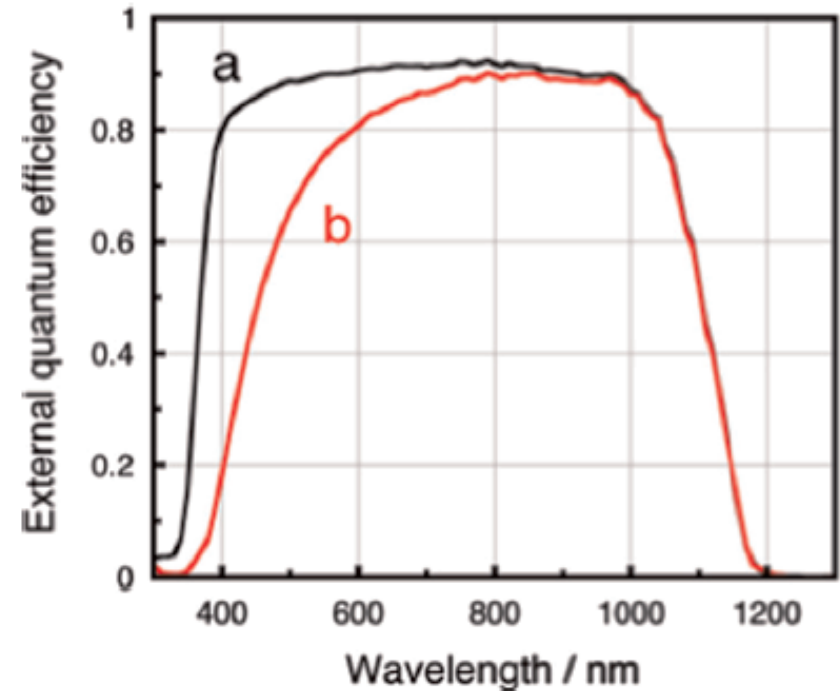
A. Masuda *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **55** (2016) 02BF10.

# n型結晶Si太陽電池のPID

# n型結晶Si太陽電池モジュールのPID



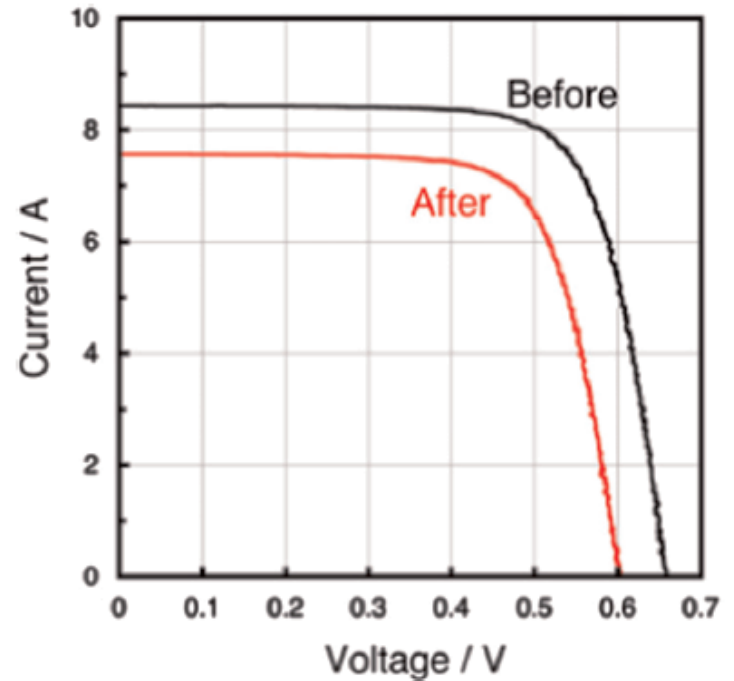
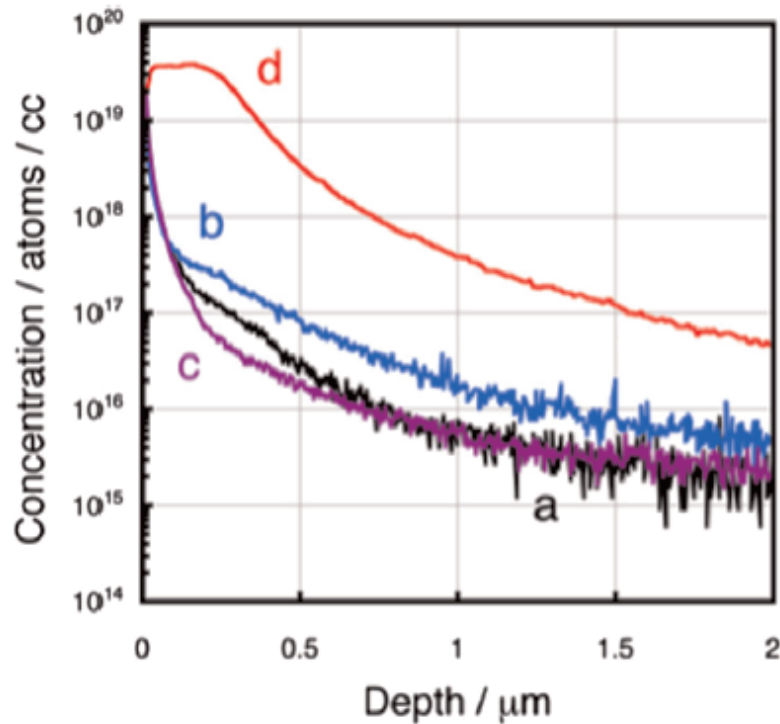
FFを概ね維持  
 $I_{sc}$ と $V_{oc}$ が低下  
 低電圧、低温でも発現



a: 試験前、b: PID試験後  
 85°C, -1000 V, 2 h

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

# n型結晶Si太陽電池モジュールのPID



a: 試験前、b: -1000 V, 25°C, 2 h,  
 c: -50 V, 85°C, 2 h, d: -1000 V, 85°C, 2 h

化学強化ガラス: -1000 V, 85°C, 2 h

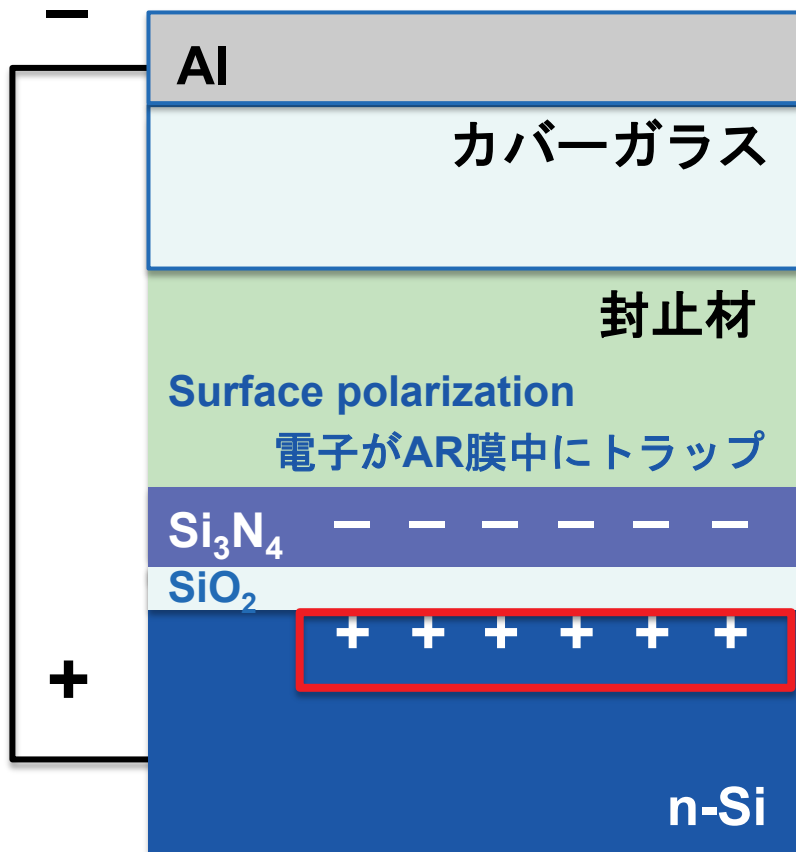
K. Hara *et al.*, Solar Energy Mater. Solar Cells **140** (2015) 361.

# n型結晶Si太陽電池モジュールのPIDのメカニズム

バックコンタクト型

R. Swanson et al., PVSEC-15, 2005, p. 410.

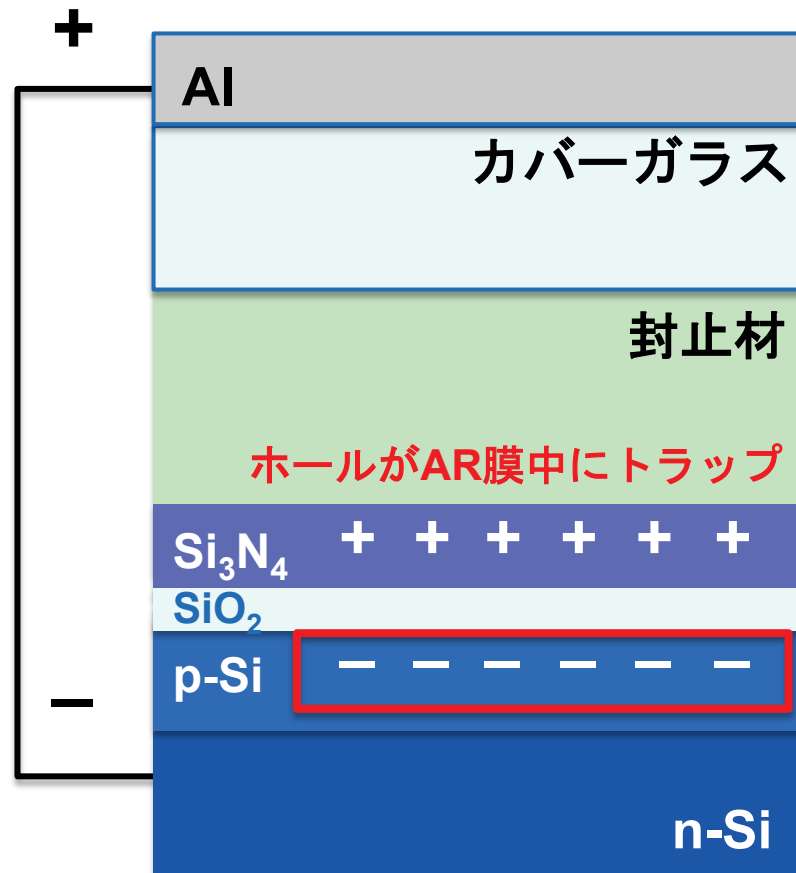
セルへのプラス高電圧



ホール濃度の増加 → 表面再結合の増加

フロントエミッタ型

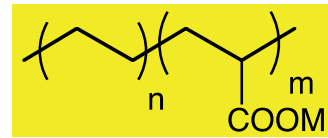
セルへのマイナス高電圧



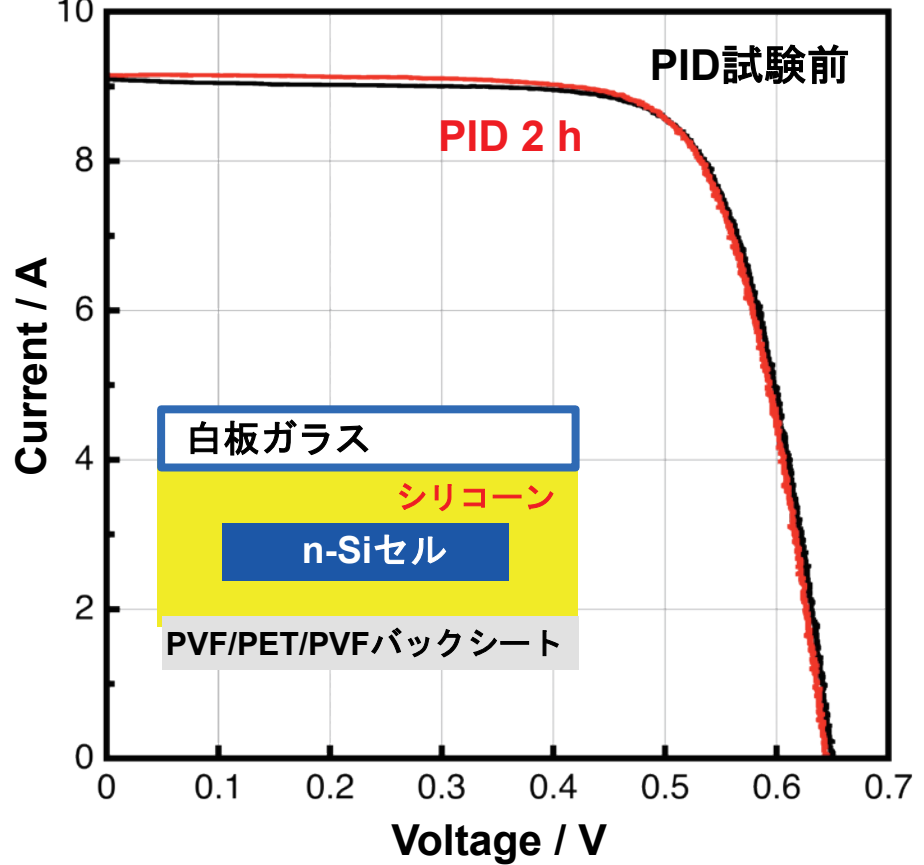
電子濃度の増加 → 表面再結合の増加

# PID対策・高体積抵抗封止材

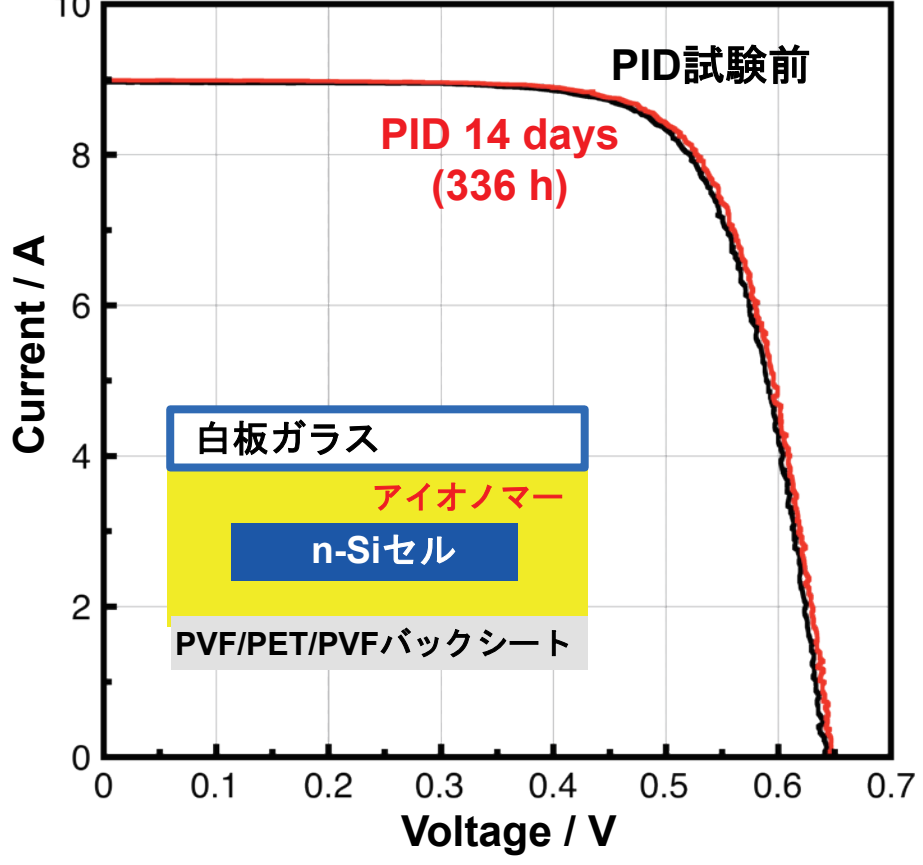
**PID試験：-1000 V, 85°C**



シリコン封止材



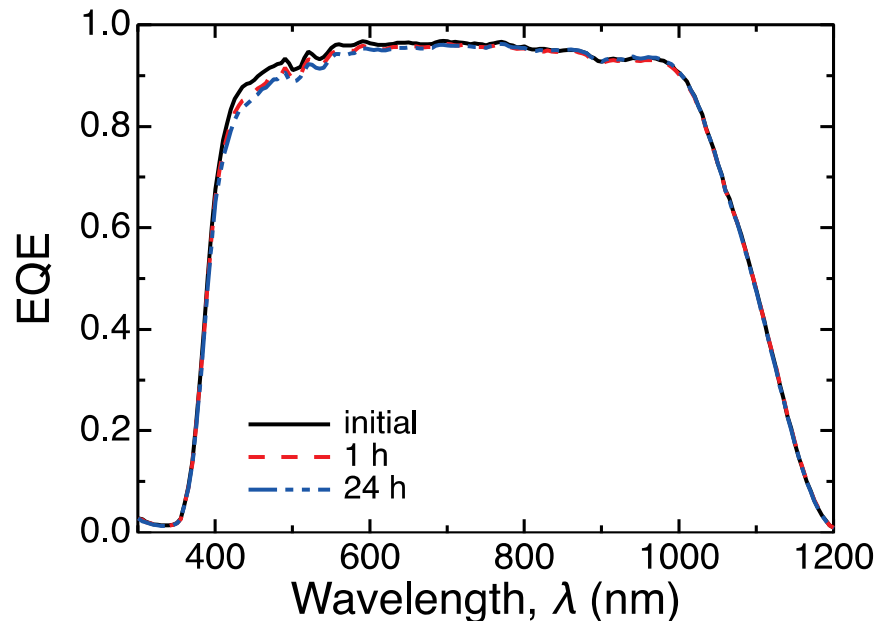
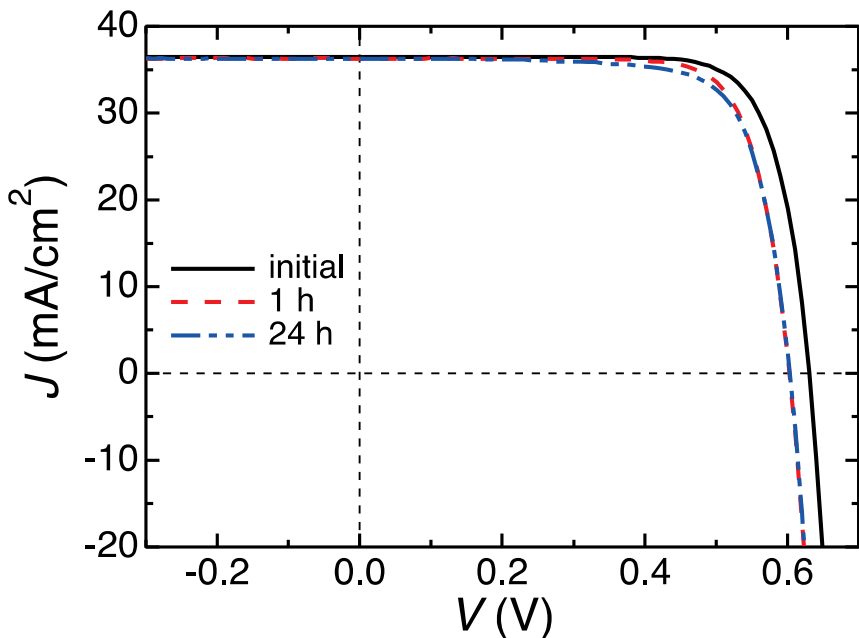
アイオノマー封止材



原浩二郎他、本成果報告会ポスターセッション No. 57.



# n型リアエミッタ結晶Si太陽電池



PID試験条件: -1000 V, 85°C

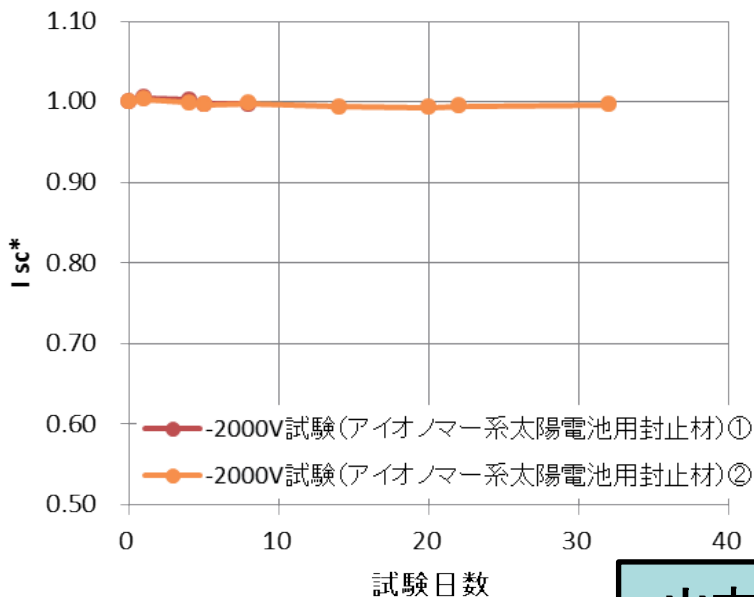
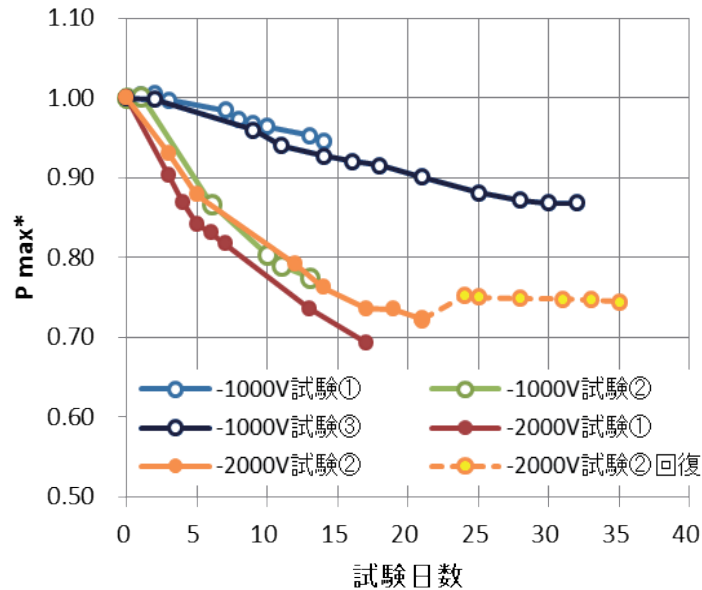
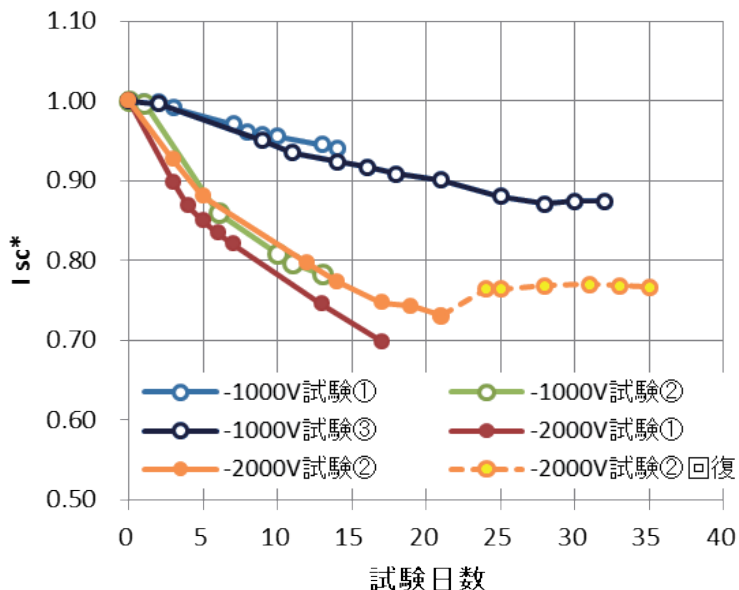
表面再結合に起因

PID現象は比較的短時間で飽和

山口世力他、本成果報告会ポスターセッション No. 58.

S. Yamaguchi *et al.*, *Solar Energy Mater. Solar Cells* **151** (2016) 113.

# n型ヘテロ接合結晶Si太陽電池



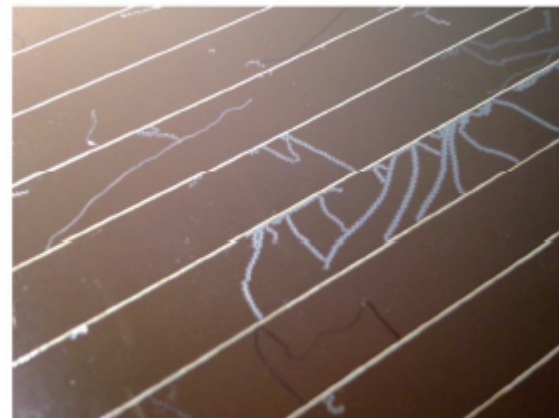
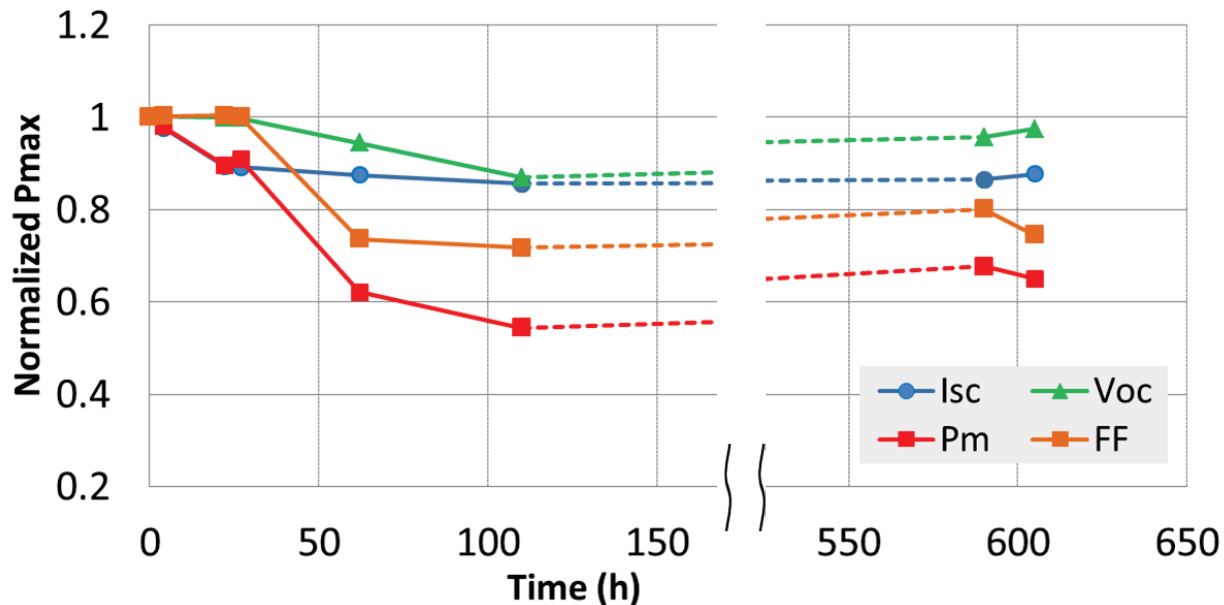
PID試験条件: -1000 V, -2000 V, 85°C

PID現象は電流低下に起因

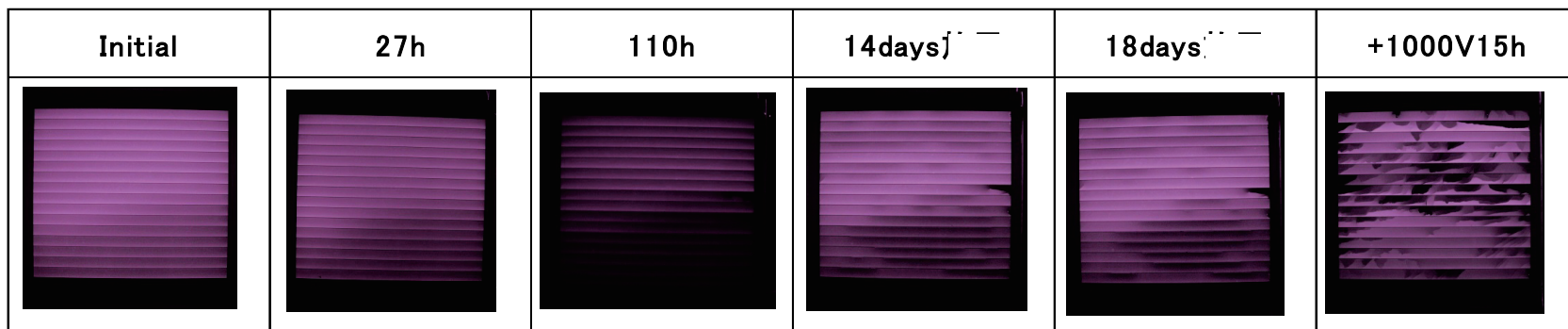
アイオノマー系太陽電池用封止材の適用で完全抑止

# 薄膜系太陽電池のPID

# a-Si:H/ $\mu$ c-Si:Hタンデム太陽電池モジュールのPID

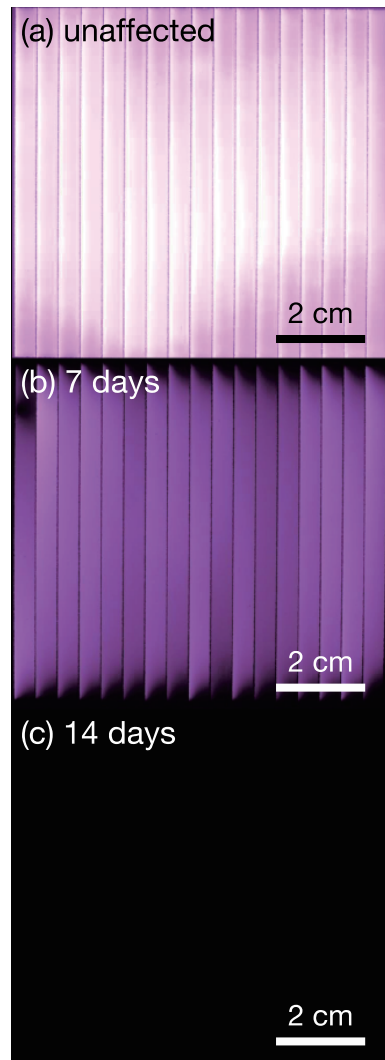
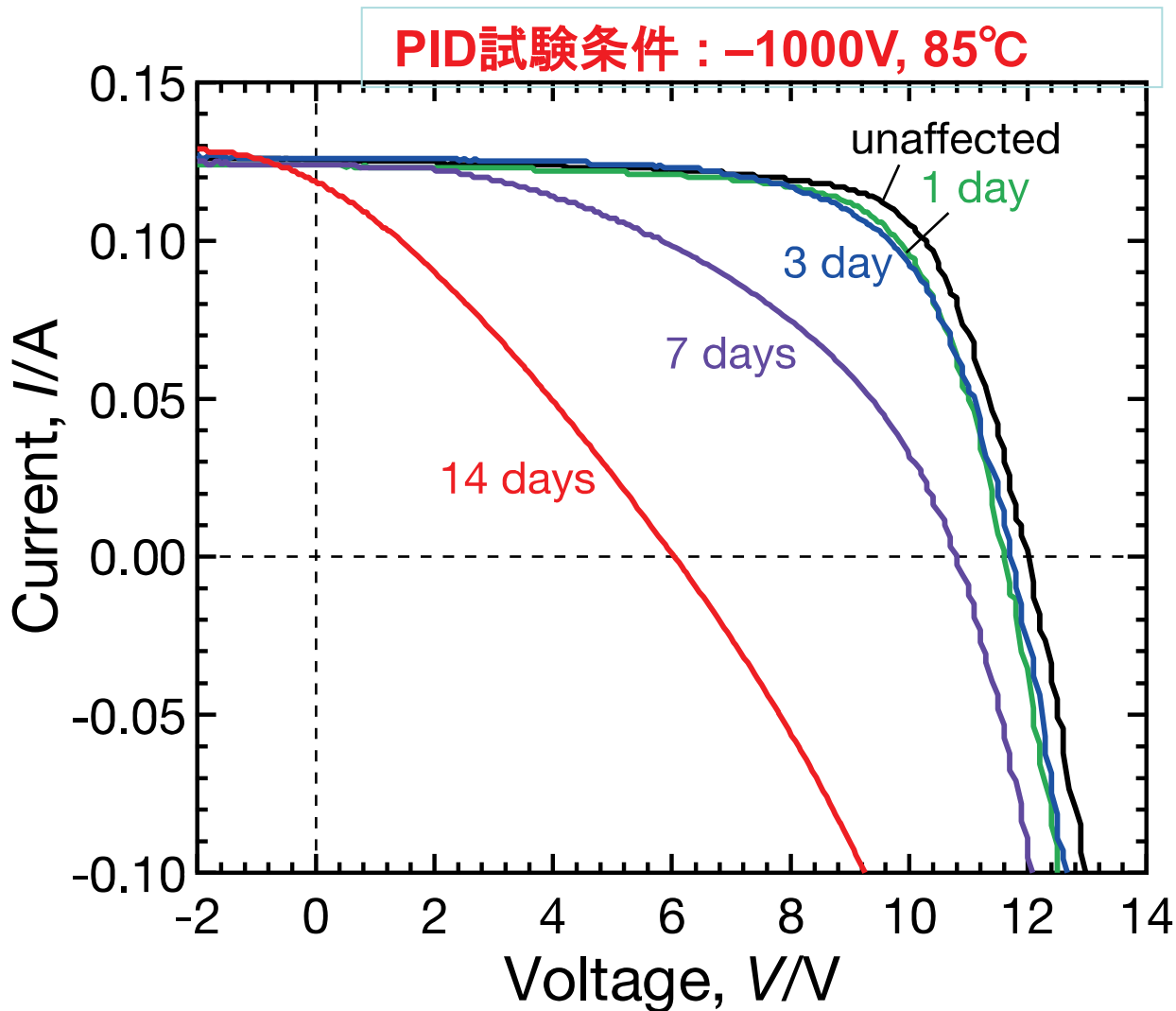


after 110 h



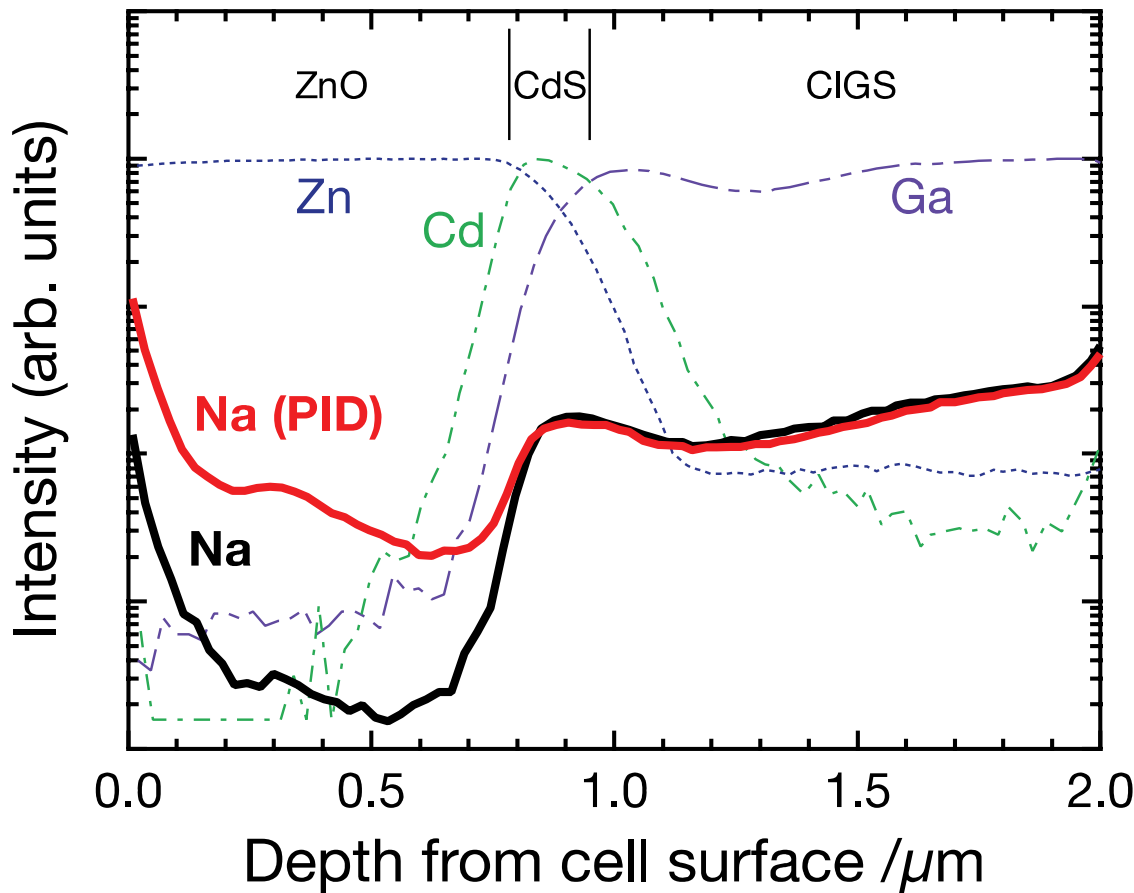
PID試験条件: -1000 V, 85°C

# CIGS太陽電池モジュールのPID



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

# PID試験前後のNa分布 (Dynamic SIMSによる分析)

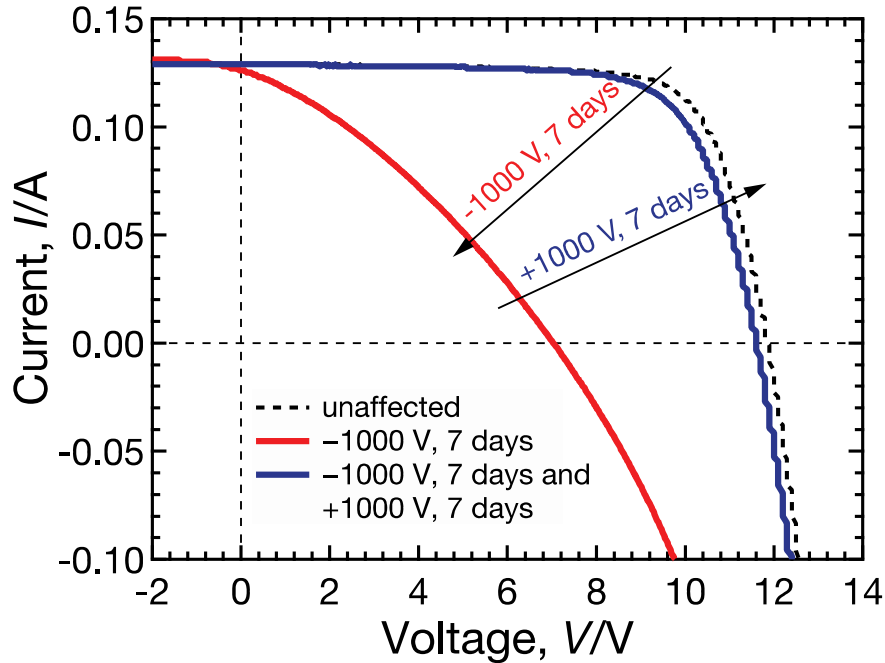


PID試験後、ZnO層中  
ならびにZnO/CdS界  
面においてNa信号強  
度が増加

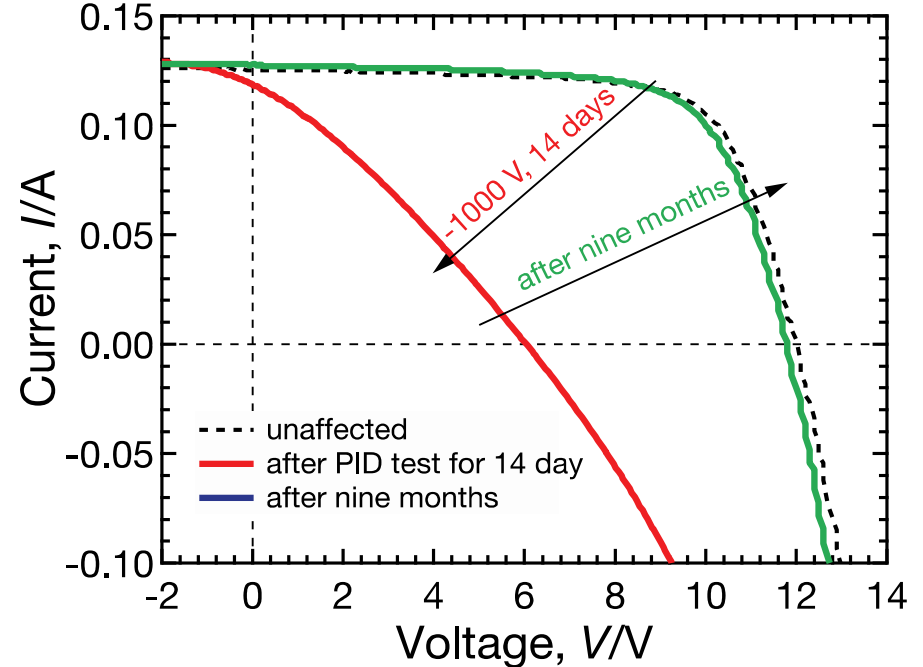
S. Yamaguchi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **54** (2015) 08KC13.

# CIGS太陽電池モジュールにおけるPIDの回復現象

85°Cの逆電圧印加で回復

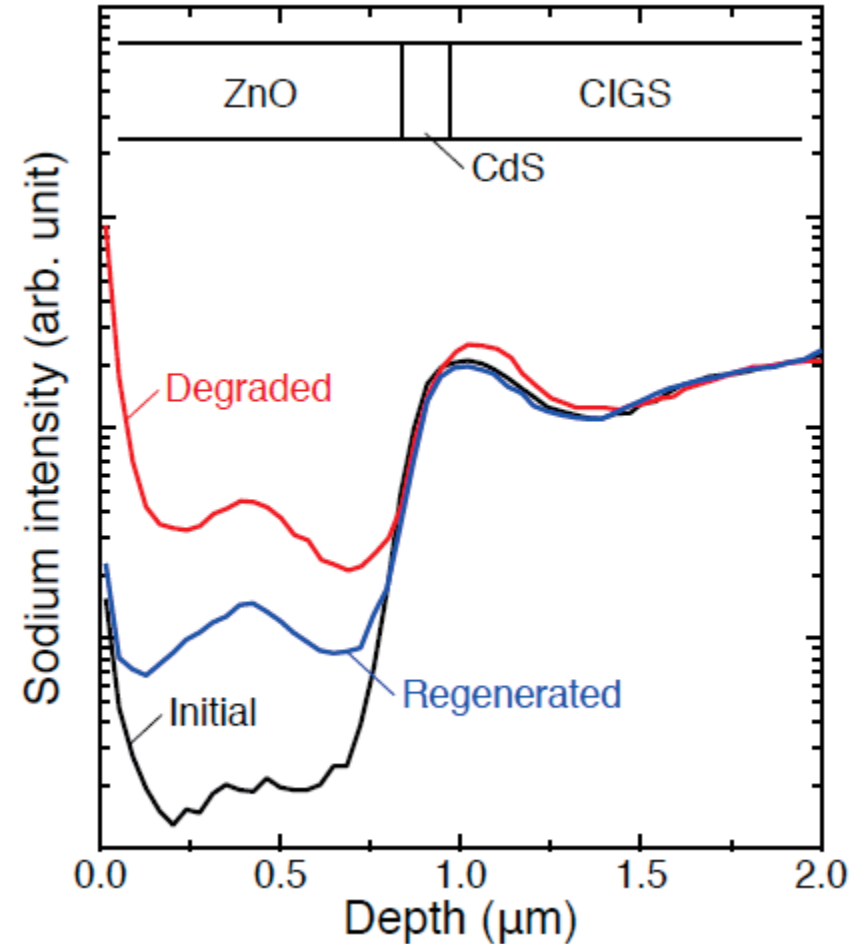
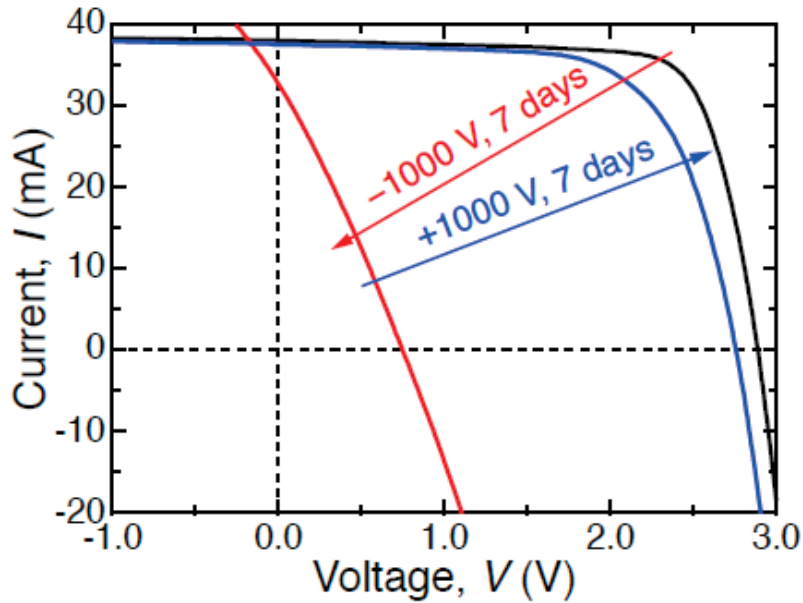


室温放置でも完全回復



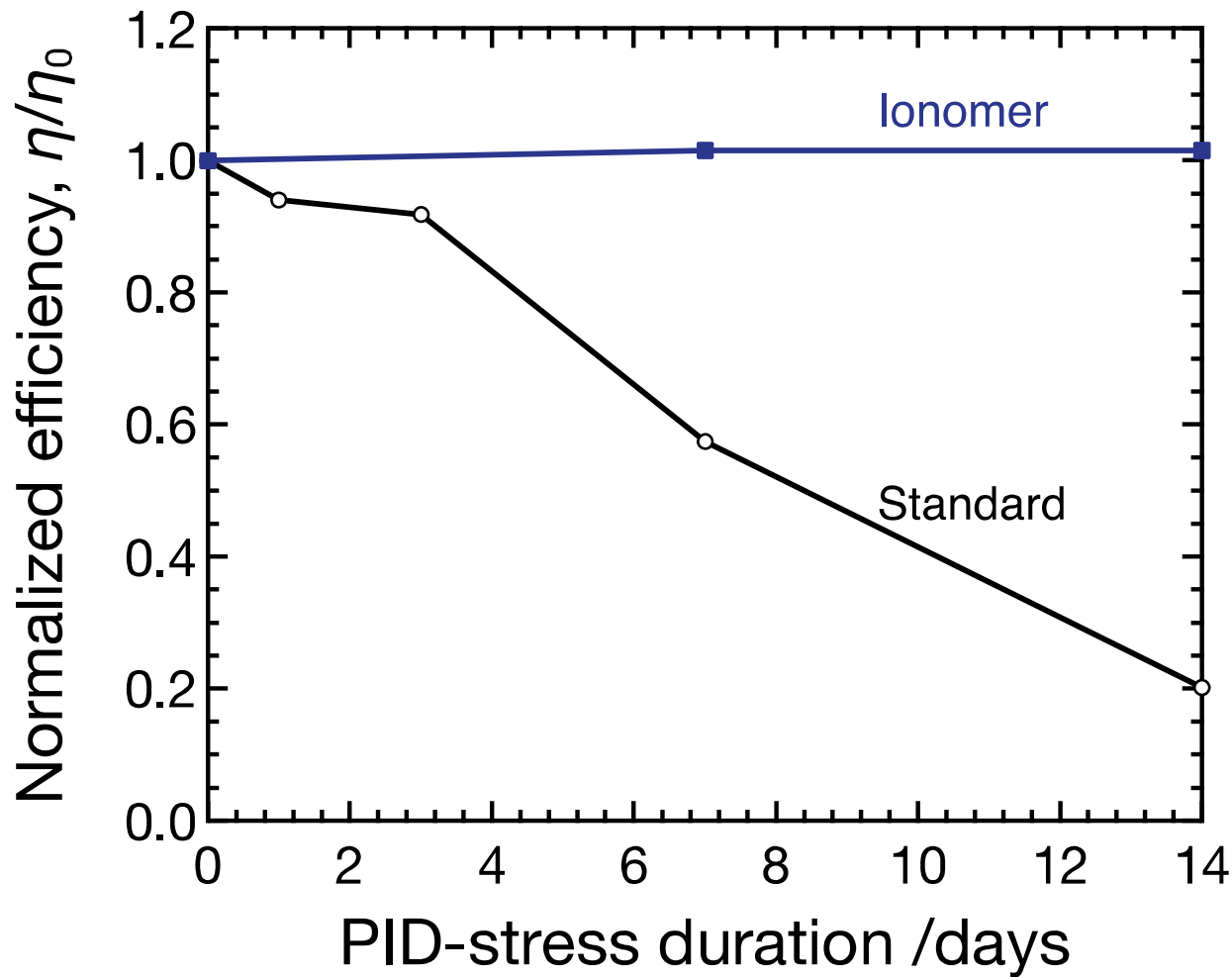
S. Yamaguchi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **54** (2015) 08KC13.

# CIGS太陽電池モジュールにおけるPIDの回復現象とNa分布の関係



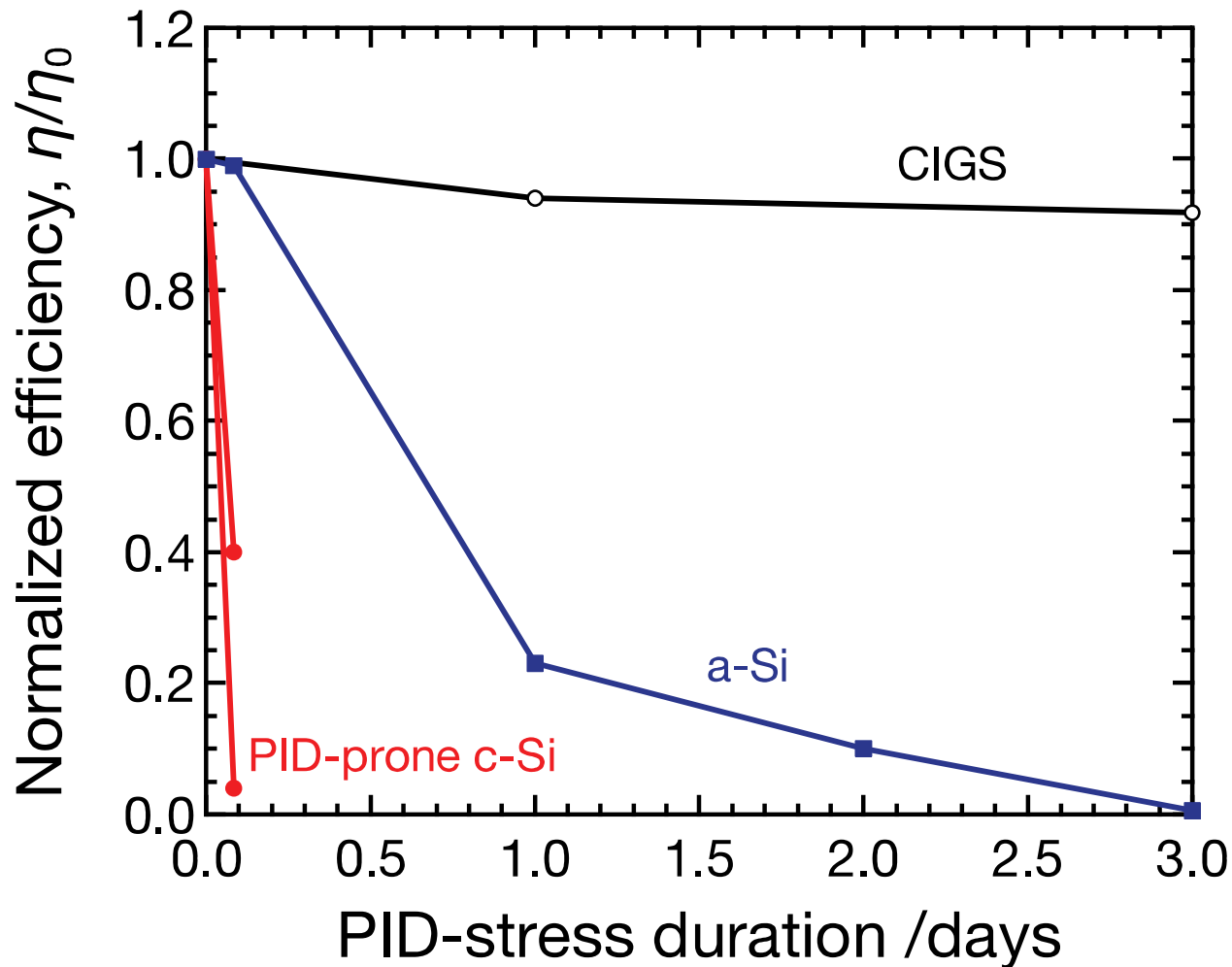


# CIGS太陽電池モジュールにおけるPID対策



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

# 各種太陽電池モジュールのPIDの比較



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

## 参考資料

## 産総研ならびに共同研究機関の

## PIDに関する研究成果(掲載日順、原著論文のみ)

- K. Mishina *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **53** (2014) 03CE01.
- T. Kajisa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **53** (2014) 092302.
- K. Hara *et al.*, RSC Adv. **4** (2014) 44291.
- K. Hara *et al.*, RSC Adv. **5** (2015) 15017.
- S. Jonai *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. **54** (2015) 08KG01.
- K. Mishina *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **54** (2015) 08KD12.
- S. Yamaguchi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **54** (2015) 08KC13.
- S. Suzuki *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **54** (2015) 08KG08.
- K. Hara *et al.*, Solar Energy Mater. Solar Cells **140** (2015) 361.
- A. Masuda *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **55** (2016) 02BF10.
- S. Yamaguchi *et al.*, Solar Energy Mater. Solar Cells **151** (2016) 113.
- S. Yamaguchi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **55** (2016) 04ES14.

## まとめ

- ・PIDは高電圧印加時に発生する劣化の総称であり、太陽電池の種類毎に現象もメカニズムも異なる。
- ・PIDのメカニズムは完全に解明されているわけではない。高効率期待されるn型結晶Si系ならびにCIGS系ではデータも不十分であり、メカニズム解明とそれに基づく抑止策の開発は喫緊の課題である。