



『計測標準フォーラム第22回講演会』  
「GXにおける計量標準・計測技術の活用」  
2024年9月19日(木) @東京ビックサイト



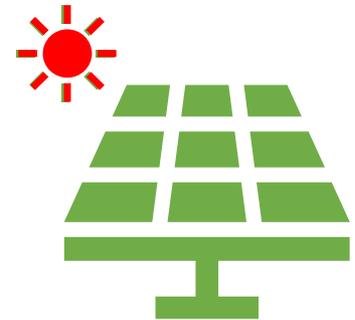
# 太陽電池技術の動向と太陽電池性能 評価技術開発への取り組み

産業技術総合研究所  
再生可能エネルギー研究センター  
太陽光評価・標準チーム

吉田 正裕

## 本日の講演内容：

- 太陽電池の技術開発動向
- 太陽電池の性能評価技術
  - ・ 基準太陽電池の校正技術
  - ・ 太陽電池の出力特性評価技術



## GX (Green Transformation)実現に向けて GX推進戦略

※経産省資料より抜粋

1. エネルギーの安定供給
2. 脱炭素社会への移行と経済成長の同時実現

### 「エネルギーの安定供給」

- ① ---
- ②再エネの主力電源化
  - ・今後10年間程度で過去10年の8倍以上の規模で系統整備
  - ・次世代太陽電池や浮体式洋上風力の社会実装化など
- ③ ---
- ④ ---



- ◆ 太陽光発電の立地制約の克服
  - ・重量制約のある屋根、建物壁面、移動体への導入。新市場の創出
- ◆ 次世代型太陽電池の開発
  - ・次世代型太陽電池(ペロブスカイト太陽電池)の開発  
(グリーンイノベーション基金事業)

など、太陽光発電の大量導入・新市場創出に向けた施策、開発PJの推進

# 新用途・新市場への展開 --- 立地制約の克服

## 建物・水上設置・営農型(ソーラーシェアリング)

## モビリティ

工場屋根設置(軽量太陽電池 設置イメージ)



出典: 株式会社デンソーHP

車載(トラック屋根)



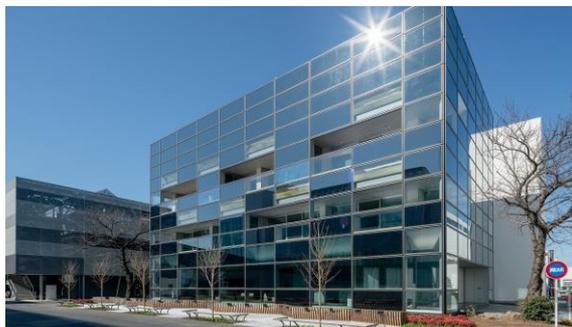
出典: 株式会社セブン-イレブン・ジャパンHP

車載(普通車)



出典: トヨタ自動車株式会社HP

壁面設置・壁面一体型(ZEB)



出典: 大成建設株式会社HP  
ZEB: NetZeroEnergyBuilding

営農型太陽光発電



出典: 農林水産省ホームページより

成層圏通信プラットフォーム(HAPS)



出典: ソフトバンク先端技術研究所HP  
HAPS: High Altitude Platform Station

# NEDOグリーンイノベーション基金事業 「次世代型太陽電池の開発」 (2020年度～)

研究開発項目：  
次世代型太陽電池実用化事業

**ペロブスカイト太陽電池…軽量・フレキシブル**

研究開発内容①：次世代型太陽電池基盤技術開発

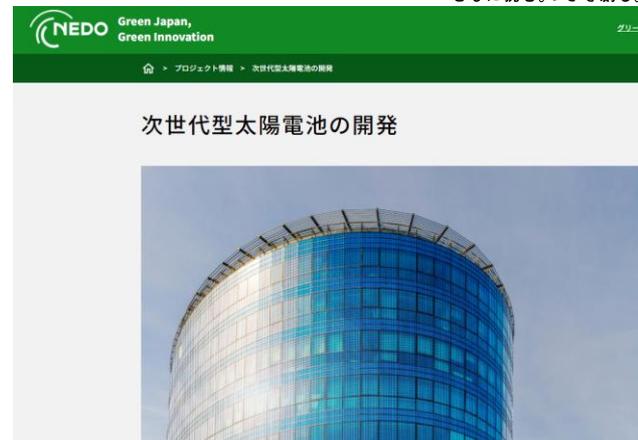
- 産業技術総合研究所

研究開発内容②：次世代型太陽電池実用化事業

- 事業者

(もしくは、事業者と研究機関とのコンソーシアム)

研究開発内容③：次世代型太陽電池実証事業（2024年度事業開始予定）



NEDOホームページより

# ペロブスカイト太陽電池実用化に向けた実証実験(例)

「大阪・関西万博」へのフィルム型ペロブスカイト太陽電池設置(イメージ図)



出典:積水化学工業HP

ガラス建材一体型ペロブスカイト太陽電池



出典:パナソニックホールディングスHP

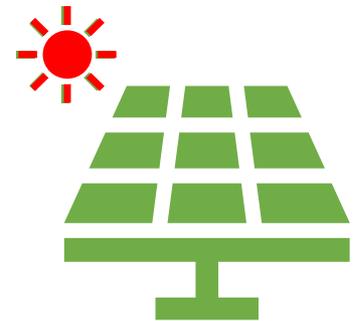
基地局への設置実証実験



出典:KDDI、エネコートテクノロジーズHP

# 本日の講演内容：

- 太陽電池の技術開発動向
- 太陽電池の性能評価技術
  - ・ 基準太陽電池の校正技術
  - ・ 太陽電池の出力特性評価技術



## 太陽電池の性能評価技術(イントロ)

### 太陽電池出力の高精度な性能評価技術の必要性？

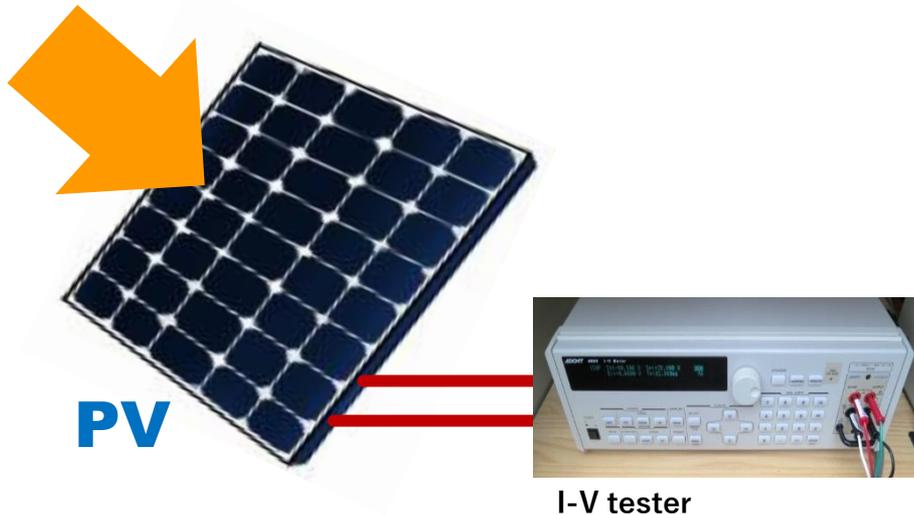
- 太陽電池デバイス研究・開発面：
  - ✓ 新型太陽電池の出力測定はどうする？
    - ・正しい評価法の確立が必要
    - ・研究開発方針をミスリードしないように
  - ✓ 評価結果の整合性
- 事業者・市場展開面：
  - ✓ 太陽電池製品の型式認証、品質管理
  - ✓ 製品の特性評価結果の国際整合性
  - ✓ 公正で公平な市場形成、など



太陽電池の発電性能を**高精度**、かつ、**整合性の担保**された**計測手法**で評価することが重要

## ソーラシミュレータ光

(AM1.5G 基準太陽光スペクトル)

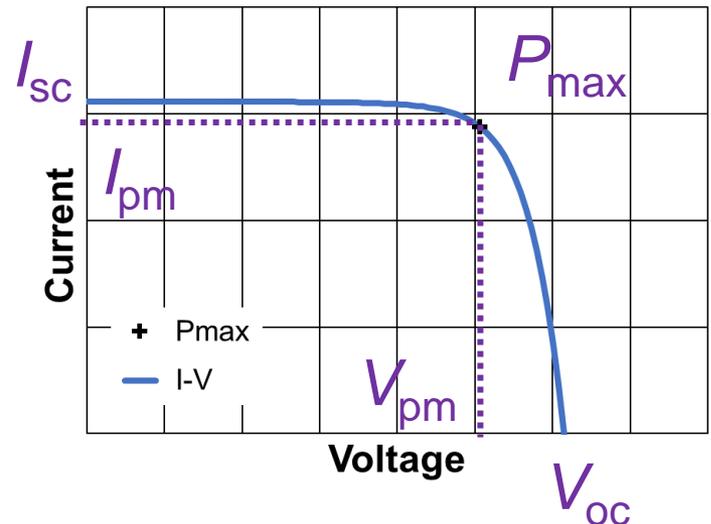


STC (standard test conditions)

- 分光放射スペクトル: AM1.5G
- 照度:  $1000 \text{ W/m}^2$
- 温度:  $25^\circ\text{C}$

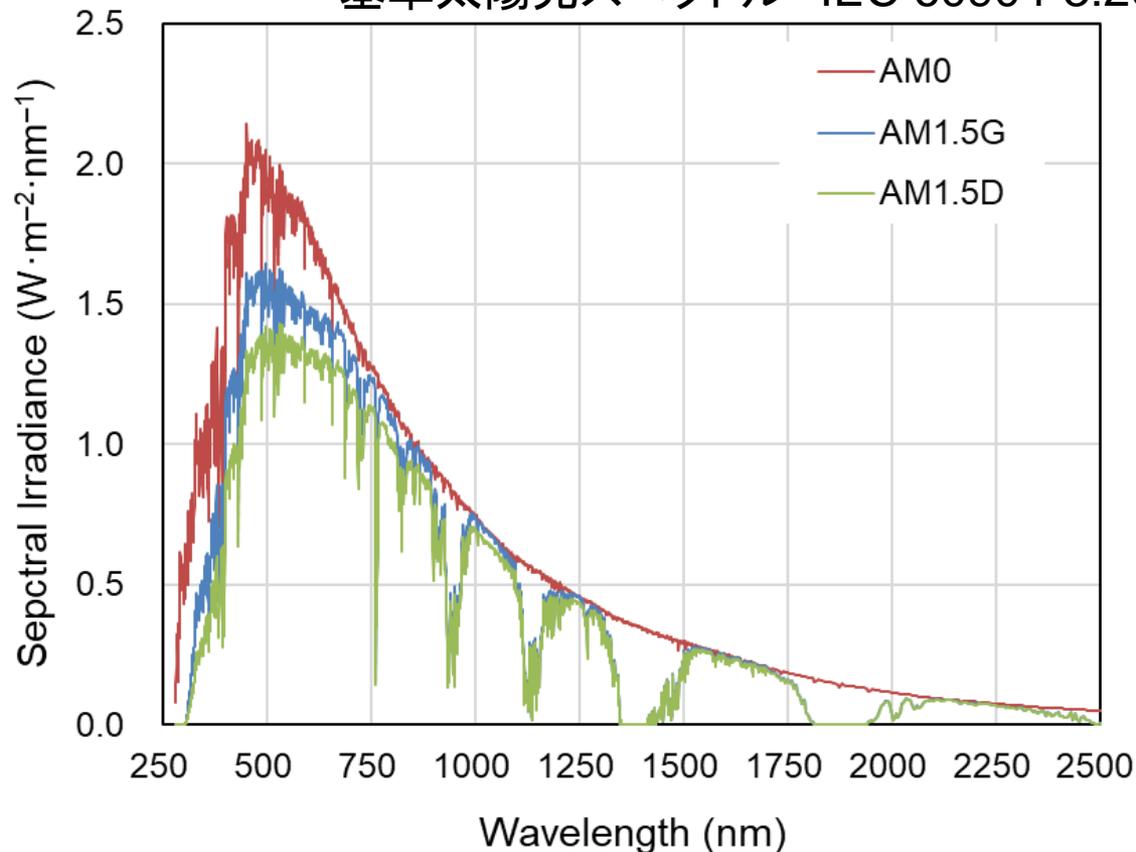
## 性能評価:

- 電流電圧(I-V)特性  
 $P_{\max} (V_{\text{pm}}, I_{\text{pm}}), I_{\text{sc}}, V_{\text{oc}}, \text{FF}$
- 変換効率  
 $\eta$  (or PCE)
- 分光感度(SR)特性
- 面積



# 基準太陽光スペクトル (AM1.5)

基準太陽光スペクトル IEC 60904-3:2019 (Ed.4.0)



- ✓ AM1.5G (Global)
- ✓ AM1.5D (Direct)
  - 直達光成分
  - 集光型太陽電池評価時

STC測定:

基準太陽光 (AM1.5G) を照度  $1 \text{ kW/m}^2$  で照射時の太陽電池出力特性を測定

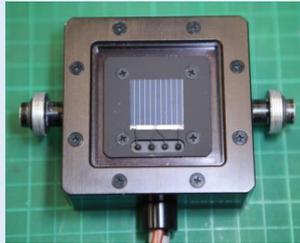
# 太陽電池の出力特性(I-V特性)測定

- ソーラシミュレータ  
IEC 60904-9

## STC測定

照度:  $1 \text{ kW/m}^2$   
スペクトル: AM1.5  
デバイス温度:  $25^\circ\text{C}$

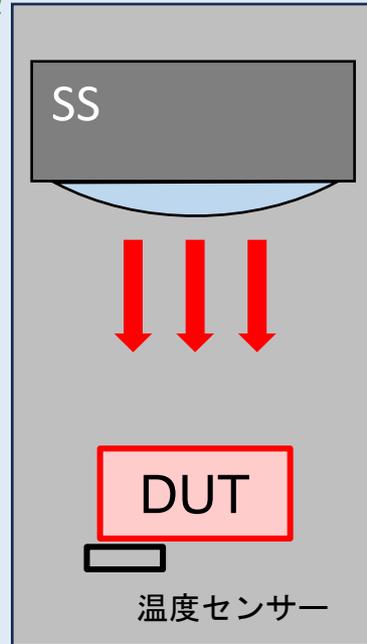
## 基準セル



校正値 (CV)

- 基準太陽電池 IEC 60904-2
- 校正・トレーサビリティ IEC 60904-4

## 照度設定



I-V測定 IEC 60904-1

温度設定 IEC 60904-1 (, IEC 60904-5)

## 分光放射照度

- 基準スペクトル  
IEC 60904-3

- 分光感度(SR)測定  
IEC 60904-8
- 面積  
IEC 60904-1

## 各種補正:

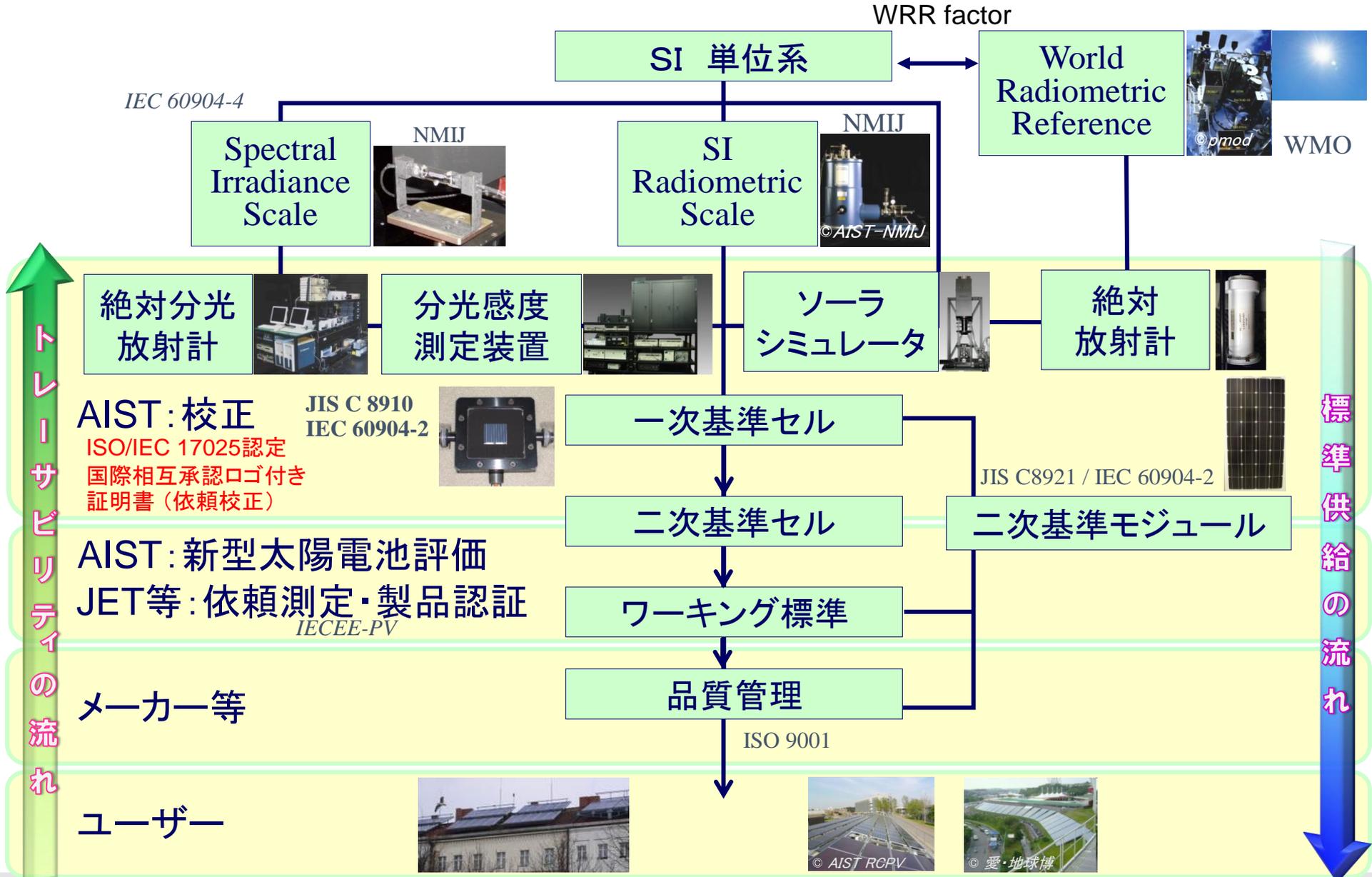
- スペクトルミスマッチ補正 IEC 60904-7
- 温度・照度補正 IEC 60891
- 線形性 IEC 60904-10
- 反射光補正, 両面受光 etc.

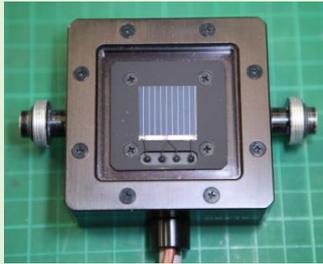
IEC XXXXX は対応するIEC規格

# 太陽電池の性能評価技術

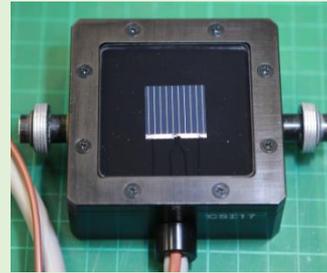
## ―― 基準太陽電池の校正技術 ――

# 日本における太陽電池の標準供給の流れとトレーサビリティ

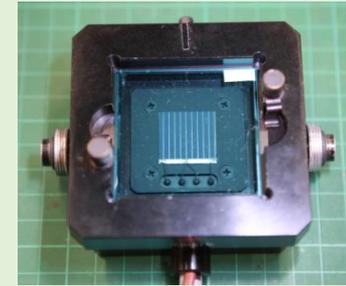




結晶Si用(EVA充填なし)

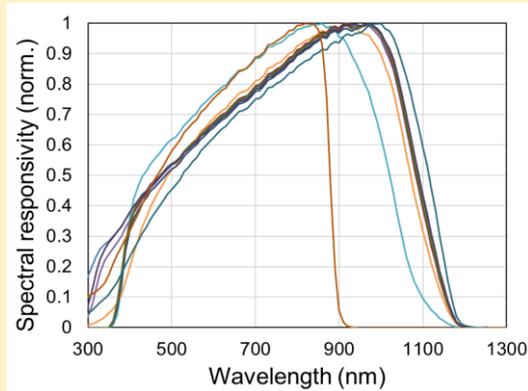


結晶Si用(EVA充填あり)



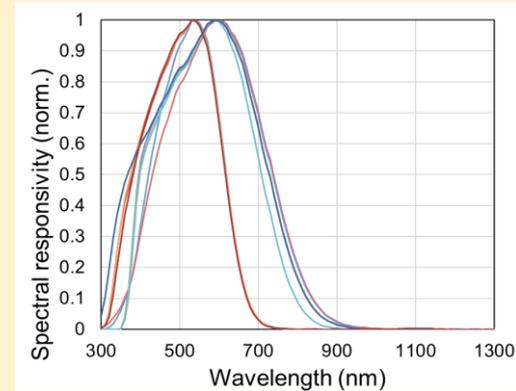
光学フィルター付き

## 基準セル分光感度特性 (例)



用途;

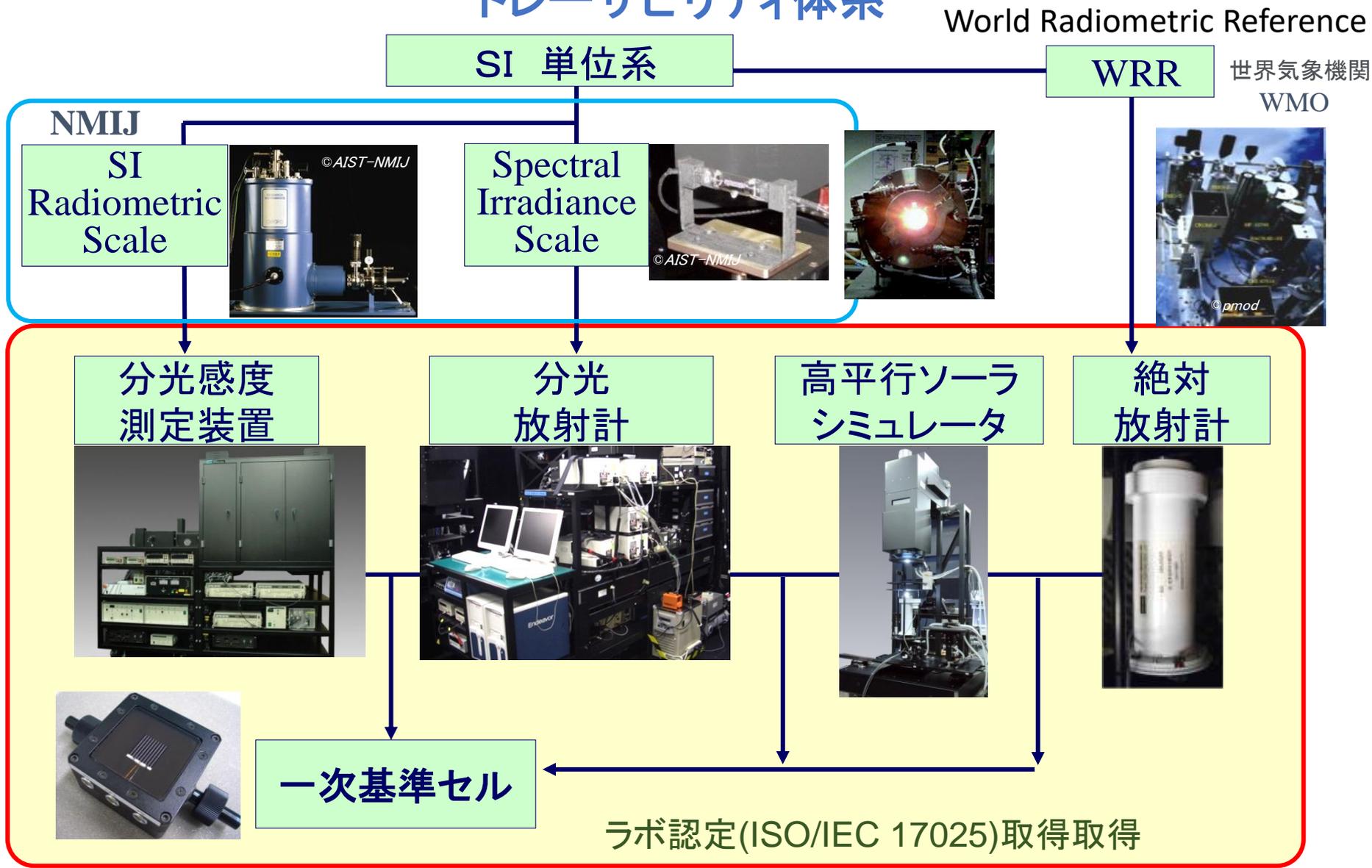
- 結晶Si セル、
- 結晶Si モジュール



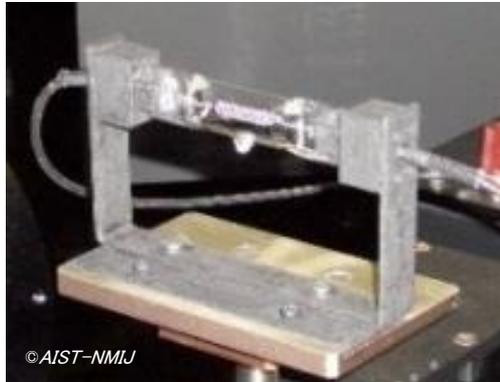
用途:

- タンデム型サブセル
- ペロブスカイト、等

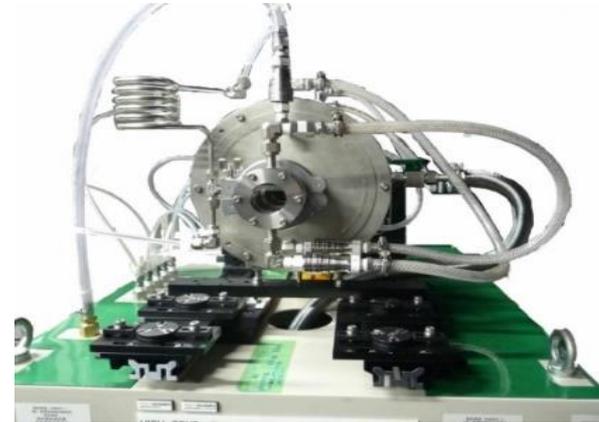
# ソーラシミュレータ法による基準太陽電池校正の トレーサビリティ体系



## ①分光放射照度校正に用いる上位標準となる光源の高輝度化



ハロゲン標準電球



超高温定点黒体炉\*

- 金属炭化物と炭素の包晶合金 (WC-C)
- 包晶点温度:  $\sim 2745^{\circ}\text{C}$
- 包晶点温度プラトーでの黒体輻射スペクトル

⇒ 分光放射計校正精度の向上

\*NMIJが超高温の温度定点として開発

## ②絶対放射計の高精度計測技術開発

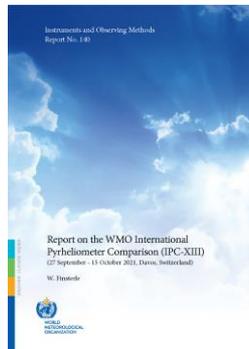
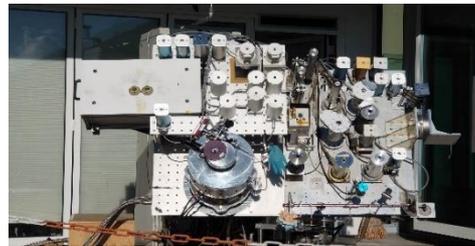
- 受光部の改良
- 絶対放射計の性能検証



世界気象機構(WMO)主催の国際比較測定(IPC)による  
標準レベルの国際整合性の検証

International Pyrheliometer Comparison (IPC-XIII)  
(27 September-15 October 2021, Davos,  
Switzerland)

校正場所: PMOD/WRC Davos (Switzerland)

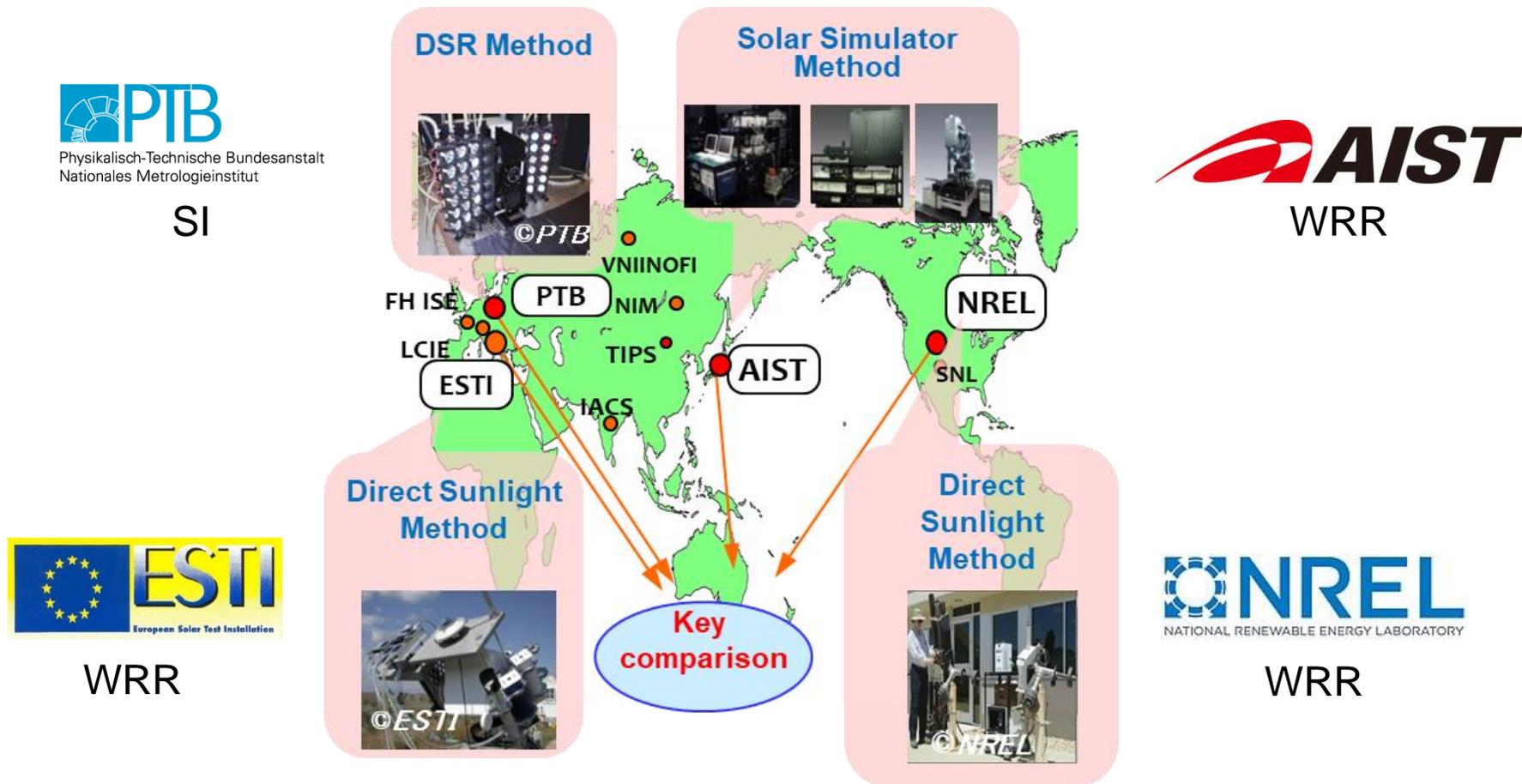


- 世界基準器群 (WSG)との比較: 2005年から継続参加
- WRRファクタの値付け → SI単位系との接続

※IOM Report No.140 (WMO 2023): WMOウェブサイトで公開

# 基準太陽電池校正値の国際同等性維持の取り組み

## WPVS Qualified Laboratoryによる定期的な国際比較



**AIST、PTB、NREL、ESTIの平均値を根幹比較参照値(WPVS)として相互監視**

**世界各国のPVトレーサビリティの最上位**

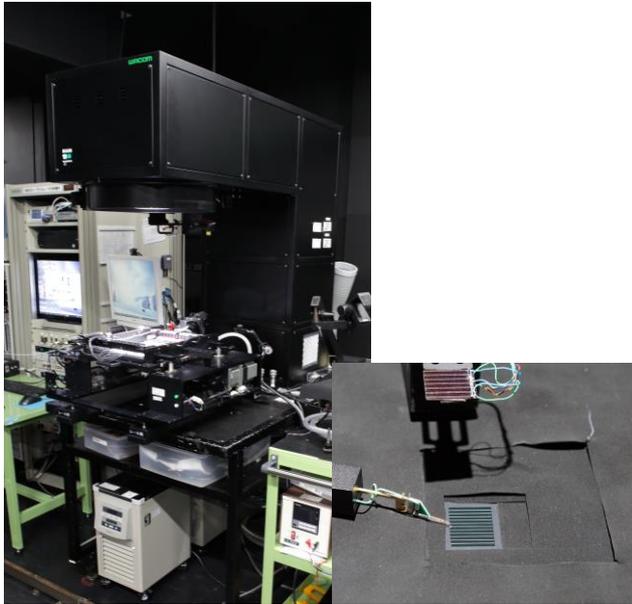
## 太陽電池の性能評価技術

# ——太陽電池の出力特性評価技術—— (高精度評価)

# 太陽電池高精度性能評価測定装置

## 太陽電池セル測定

### 定常光ソーラシミュレータ

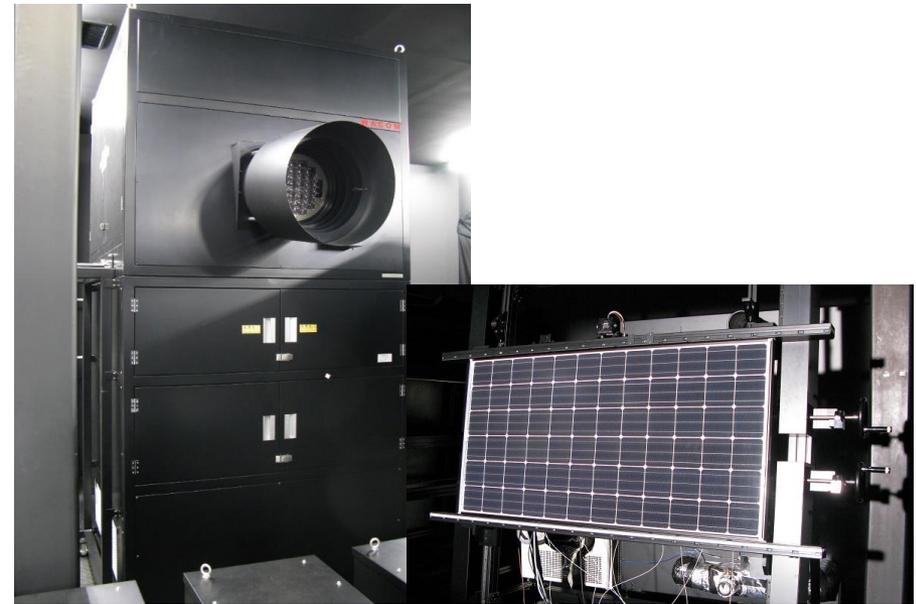


#### Specifications:

- Xe-lamp 単灯
- 定常光
- Class A or better (IEC 60904-9)

## 太陽電池モジュール測定

### ロングパルスソーラシミュレータ



#### Specifications:

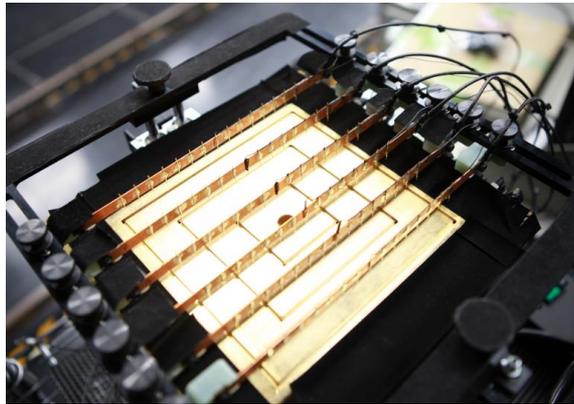
- 6 Xe-lamps
- Pulse duration: 100 ~ 1000 ms
- Class A or better (IEC 60904-9)

## ◆ 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(代表例)	特徴・特性	性能評価法開発
<b>高効率結晶Si太陽電池</b> ・PERC ・TOPCon ・ヘテロ接合 ・バックコンタクト	・高容量性 → I-Vヒステリシス ・高QE(構造的特長) ・特殊バスバー形状 ・特殊裏面電極構造	・I-V測定掃引速度の最適化 ・分光感度(+反射・透過)の高精度測定  ・多数バスバー対応 ・プローブバー影の影響の検討 ・専用測定ジグの使用
・両面受光型	・両面発電(Bi-faciality)	・表面・裏面照度応答性 ・線形性検証 ・裏面入射光の影響
<b>CIGS化合物系 薄膜系</b>	・光照射効果 ・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
<b>ペロブスカイト</b>	・遅い応答時間, I-Vヒステリシス ・不安定性 -- 短/長期安定性 -- 不可逆変化	・低速掃引I-V測定(数秒~数百秒) ・(Quasi-) steady state測定 -- $V_{pm}$ ホールド法/MPPT法/etc.

## ◆ 結晶Si太陽電池セル(ベアセル)

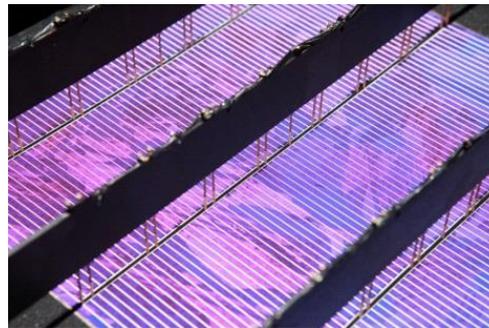
### 1. 多数バスバー(BB)構造



- ・プローブバーによる測定  
⇒ 3~6本まで対応可能
- ・探針ピン間、フローバー間の電位分布補正  
⇒ セル単体の性能を正しく評価

### 2. プローブバー影による照度( $I_{sc}$ )への影響

影あり測定



影なし測定



- ・ケルビンプローブを使用した影なし測定  
⇒ 照度補正

### 各種新型セル構造への対応

- ◆ マルチバスバーセル
- ◆ バスバーレスセル
- ◆ 両面受光セル
- ◆ 大面積ウェハー(M10, M12)、ハーフカット、など

# 太陽電池の出力特性(I-V特性)測定

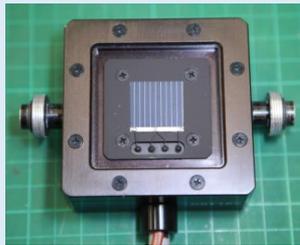
- ソーラシミュレータ  
IEC 60904-9

## STC測定

照度:  $1 \text{ kW/m}^2$   
スペクトル: AM1.5  
デバイス温度:  $25^\circ\text{C}$

1次基準セル

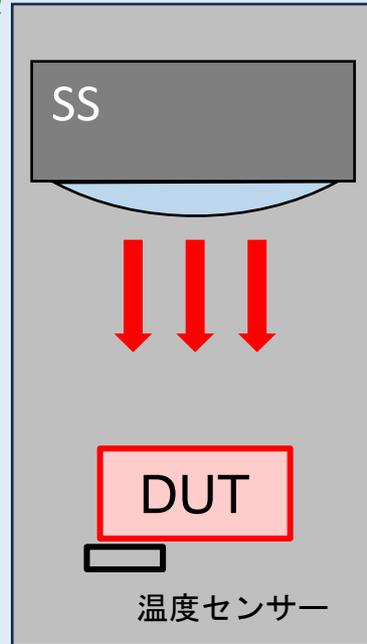
2次基準セル



校正値 (CV)

- 基準太陽電池 IEC 60904-2
- 校正・トレーサビリティ IEC 60904-4

照度設定



I-V測定 IEC 60904-1

温度設定 IEC 60904-1 (, IEC 60904-5)

標準電球

分光放射計

分光放射照度

- 基準スペクトル  
IEC 60904-3

分光応答度 (PD)

分光感度測定装置

DUT

- 分光感度(SR)測定  
IEC 60904-8
- 面積  
IEC 60904-1

各種補正:

- スペクトルミスマッチ補正 IEC 60904-7
- 温度・照度補正 IEC 60891
- 線形性 IEC 60904-10
- 反射光補正, 両面受光 etc.

IEC XXXXX は対応するIEC規格

# 太陽電池の性能評価法に関するIEC規格

**IEC 60891**  
**IEC 60904 series**

**IV特性の温度・照度補正**  
**IV測定法**

} これらのIEC規格に基づいて、  
性能評価測定

各国際規格の詳細:

IEC 60891

[IEC 60891:2021](#) Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics

温度、照度補正

IEC 60904 series Photovoltaic devices -

[IEC 60904-1:2020](#) Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics

IV測定

[IEC 60904-1-1:2017](#) Part 1-1: Measurement of current-voltage characteristics of multi-junction photovoltaic (PV) devices

多接合

[IEC TS 60904-1-2:2019](#) Part 1-2: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices

両面受光

[IEC 60904-2:2023](#) Part 2: Requirements for photovoltaic reference devices

基準太陽電池

[IEC 60904-3:2019](#) Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data

基準スペクトル

[IEC 60904-4:2019](#) Part 4: Photovoltaic reference devices - Procedures for establishing calibration traceability

校正・トレーサビリティ

[IEC 60904-4:2019/COR1:2020](#)

出典: 国際電気標準会議(IEC) HP

# 太陽電池の性能評価法に関するIEC規格 (cont.)

## IEC 60904 series Photovoltaic devices -

[IEC 60904-5:2011](#) Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method

等価セル温度

[IEC 60904-5:2011/AMD1:2022](#)

[IEC 60904-7:2019](#) Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices

スペクトルミスマッチ補正

[IEC 60904-8:2014](#) Part 8: Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device

分光感度

[IEC 60904-8-1:2017](#) Part 8-1: Measurement of spectral responsivity of multi-junction photovoltaic (PV) devices

多接合

[IEC 60904-9:2020](#) Part 9: Classification of solar simulator characteristics

ソーラシミュレータ

[IEC 60904-10:2020](#) Part 10: Methods of linear dependence and linearity measurements

線形性

[IEC TS 60904-13:2018](#) Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules

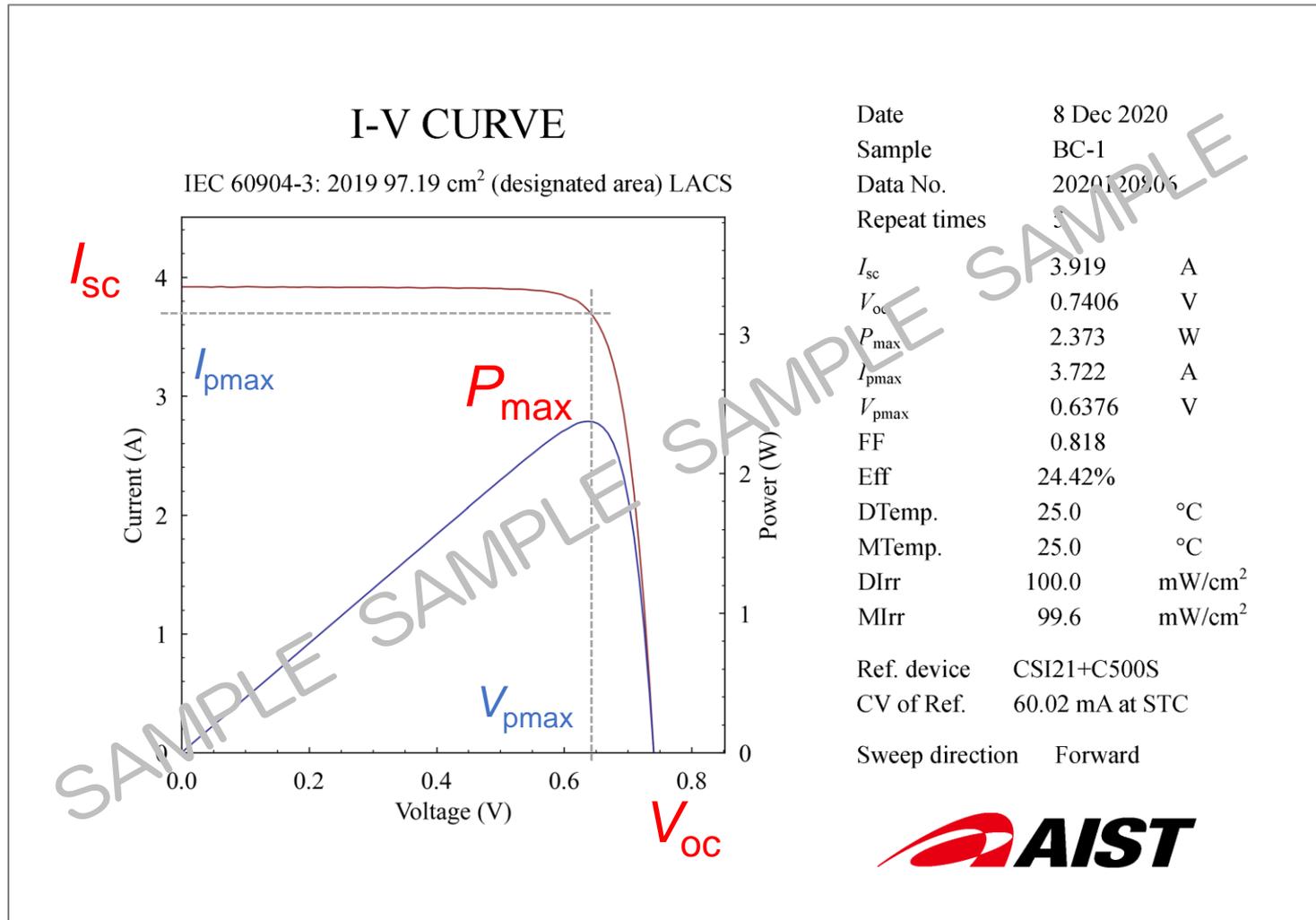
EL

[IEC TR 60904-14:2020](#) Part 14: Guidelines for production line measurements of single-junction PV module maximum power output and reporting at standard test conditions

製品ラインでの測定  
(単接合)

# IV測定 (IEC 60904-1, IEC 60891)

## IV測定報告書例(c-Si)



NEDO委託事業の一環として、高精度測定を実施

# ペロブスカイト太陽電池の性能評価技術

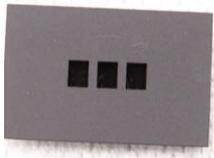
## ペロブスカイト太陽電池の特性・構造に応じた評価法の開発

### ➤ 遅い応答時間・IVヒステリシス

- 高精度測定
- 大面積（モジュール）
- タンデム構造

R&D

- 高効率化
- タンデム化

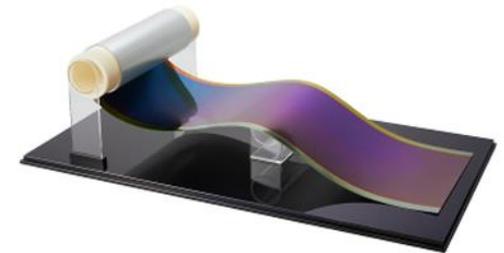


数mm  
~1cm角

&

Real World  
Production, 社会実証

- 大面積化(モジュール化)
- 軽量、フレキシブル
- 高安定性・耐久性向上
- 高効率化・タンデム化



積水化学工業社Webサイトより



パナソニックWebサイトより

## 各種太陽電池の国際比較測定に参加

- ◆ 太陽電池モジュール(c-Si, CIGS, CdTe) \*
- ◆ 基準セル(c-Si, ISO-type)
- ◆ 多接合セル(III-V族化合物系)
- ◆ ペロブスカイト太陽電池セル
- ◆ 曲面モジュール
- ◆ その他

多接合セル国際比較測定 (AIST主催、RD20活動と連携して実施)

III-V系3接合セルによる多接合セル測定の国際整合性検証



Task Group 1-1:

Advanced Characterization of Photovoltaic Devices



RD20: Research and Development 20 for clean energy technologies  
産総研が主催する、カーボンニュートラルの実現に向けた研究開発の国際連携を促進するための枠組み  
<https://rd20.aist.go.jp/ja/>

\* 参加機関: JRC-ESTI, FhG-ISE, NREL, AIST  
E. Salis *et al.*, Solar Energy **155**, 1451-1461 (2017).

## 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) からの委託を受けて実施した。

# ご清聴ありがとうございました

