

太陽電池モジュールの発電量推定技術の開発と IEC 61853 (Energy Rating) の動向

独立行政法人 産業技術総合研究所 (AIST)
太陽光発電工学研究センター

石井 徹之

19 Dec. 2013, 太陽光発電部会, 第7回セミナー, 13:20~13:55

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

◆ Outline

1. 太陽電池モジュールの屋外における出力評価技術の高精度化の必要性について
2. 発電量定格技術の概要と IEC 61853 Part 1~ Part 4 (Energy Rating) の動向
3. 8種12型式の太陽電池モジュールにおける発電量推定技術の精度検証
4. 産総研九州センターにおける 8種10型式の太陽電池アレイ単位の月発電量の調査

◆ Outline

1. 太陽電池モジュールの屋外における出力評価技術の高精度化の必要性について
2. 発電量定格技術の概要と IEC 61853 Part 1～Part 4 (Energy Rating)の動向
3. 8種12型式の太陽電池モジュールにおける発電量推定技術の精度検証
4. 産総研九州センターにおける 8種10型式の太陽電池アレイ単位の月発電量の調査

◆ 研究の背景

- 2012年末に太陽光発電システムの累積導入量は100GW超
- 太陽光発電システムの大量導入にともない“Bankability” (資金調達可能性)が重要
- 『再生可能エネルギーの固定価格買取制度』が2012年7月からスタート(2013年度, 10 kW以上: 37.8円/kWh)
- 標準試験条件(1000 [W/m²], 25 [°C], AM1.5G Spectrum)における定格出力(kW)によって性能が定義
⇒ 投資をするには(年間・生涯)発電量を推定する技術が重要



- 定格出力 = 10 [kW]
価格 = 450 万円
- 年間発電量は ?
12000 [kWh] = 45.4 万円/year
13000 [kWh] = 49.1 万円/year
14000 [kWh] = 53.0 万円/year

◆ 発電量を推定するためには・・・

- 太陽電池の屋外出力評価技術の高精度化する必要
⇒ 出力評価技術は発電量推定技術の基礎である

太陽電池の出力を変動させる要因

1. 日射強度

環境要因

2. モジュール温度

3. 日射スペクトル (スペクトル・ミスマッチとして補正)

[Ishii et al., PIP, 2011a] [Ishii et al., JJAP, 2012] [Ishii et al., ESE, 2013] [Ishii et al., PIP, 2013]

4. 光照射効果・熱アニール効果

デバイスに依存

5. 照度依存性

[Ishii et al., SOLMAT, 2011] [Ishii et al., PIP, 2014]

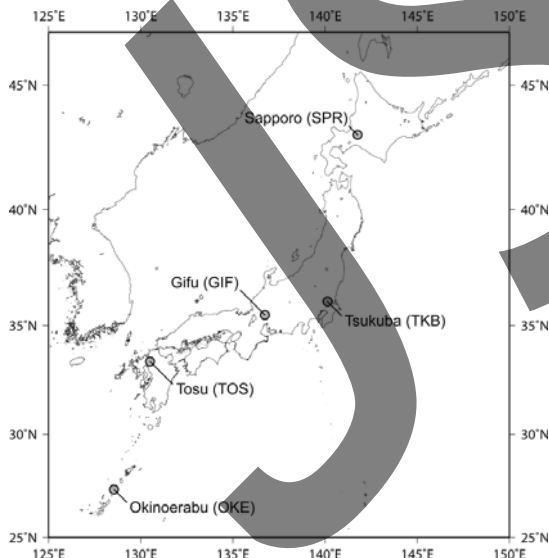
6. 角度依存性

7. 長期信頼性

一般化難

[Ishii et al., PIP, 2011b]

◆ 日射スペクトルの影響



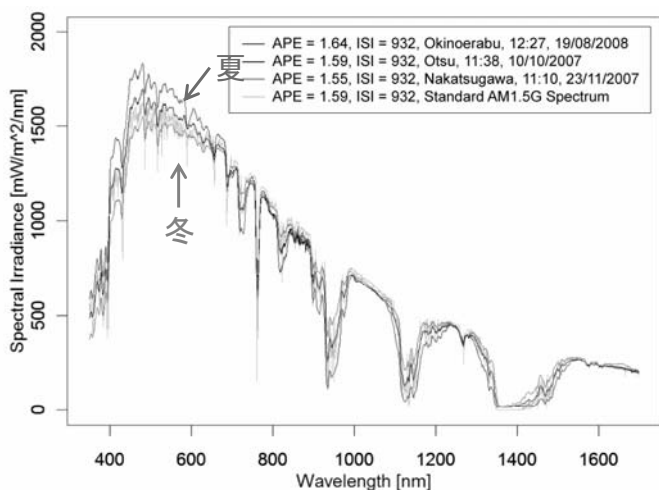
5つの気象計測ステーション



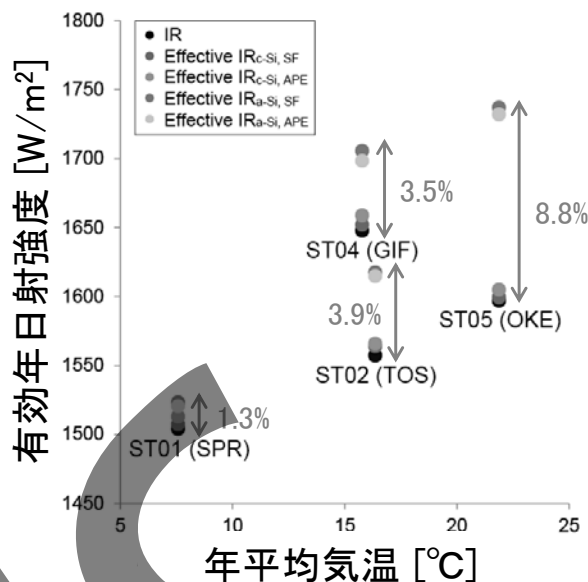
けやき館屋上の計測システム

- 2008年から日本気象協会と共同研究で日射スペクトルの測定を開始(世界初の連続広帯域日射スペクトルデータベースを構築)
- 5日射気候区において日射スペクトルデータを解析し、発電量に及ぼす影響を定量的に評価

◆ 日射スペクトルの影響

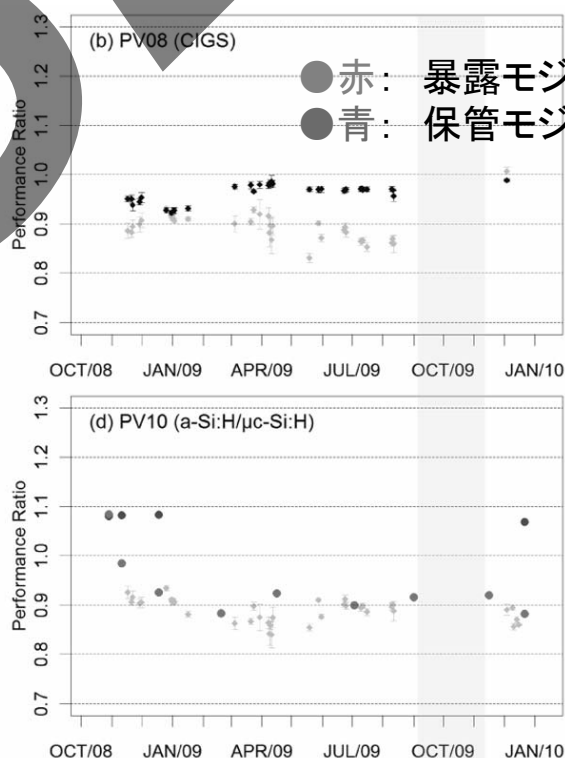
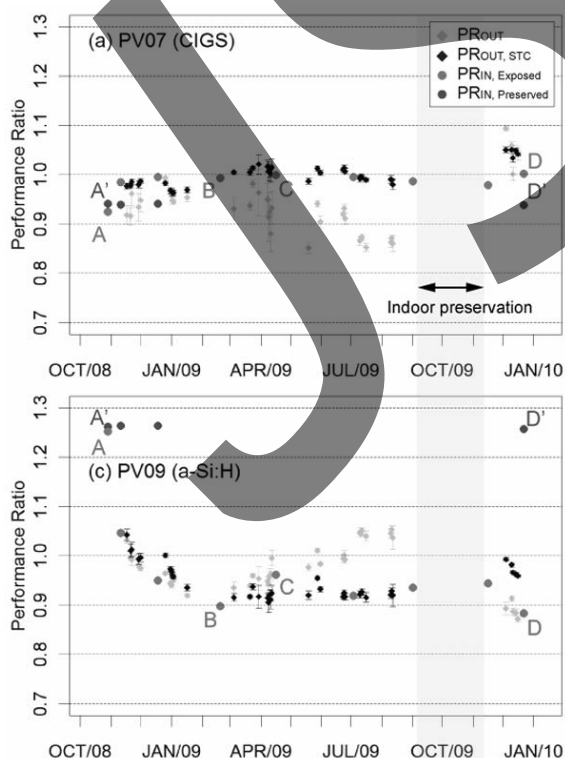


快晴日の日射スペクトル



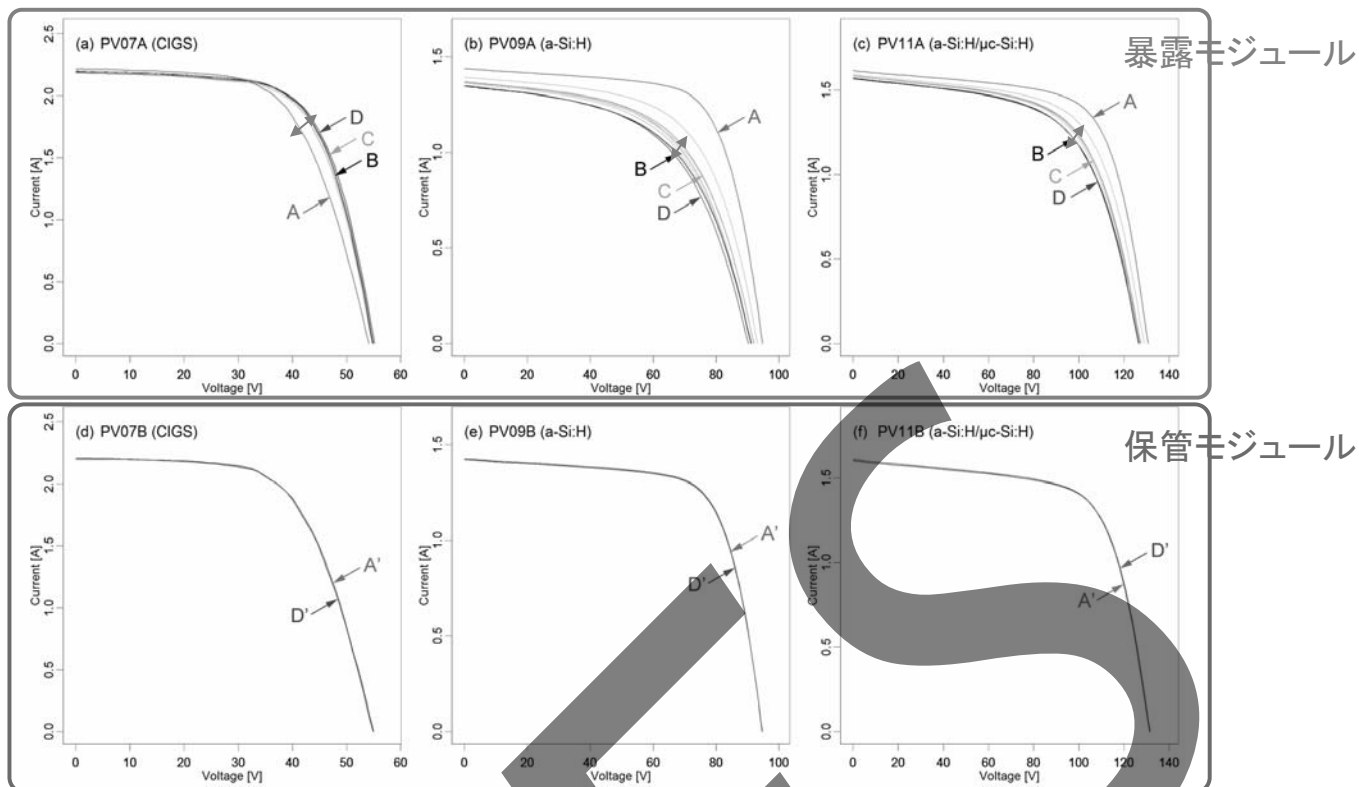
- 日射スペクトルが各種太陽電池モジュールの年間発電量に与える影響を定量的に評価
- 結晶シリコン系太陽電池にはほとんど影響しないが、薄膜シリコン系太陽電池の年発電量に地域によっては8%以上影響

◆ 熱アニール・光照射効果の影響



- 薄膜系太陽電池の”Metastability”は Rating における重要問題

◆ 熱アニール・光照射効果の影響

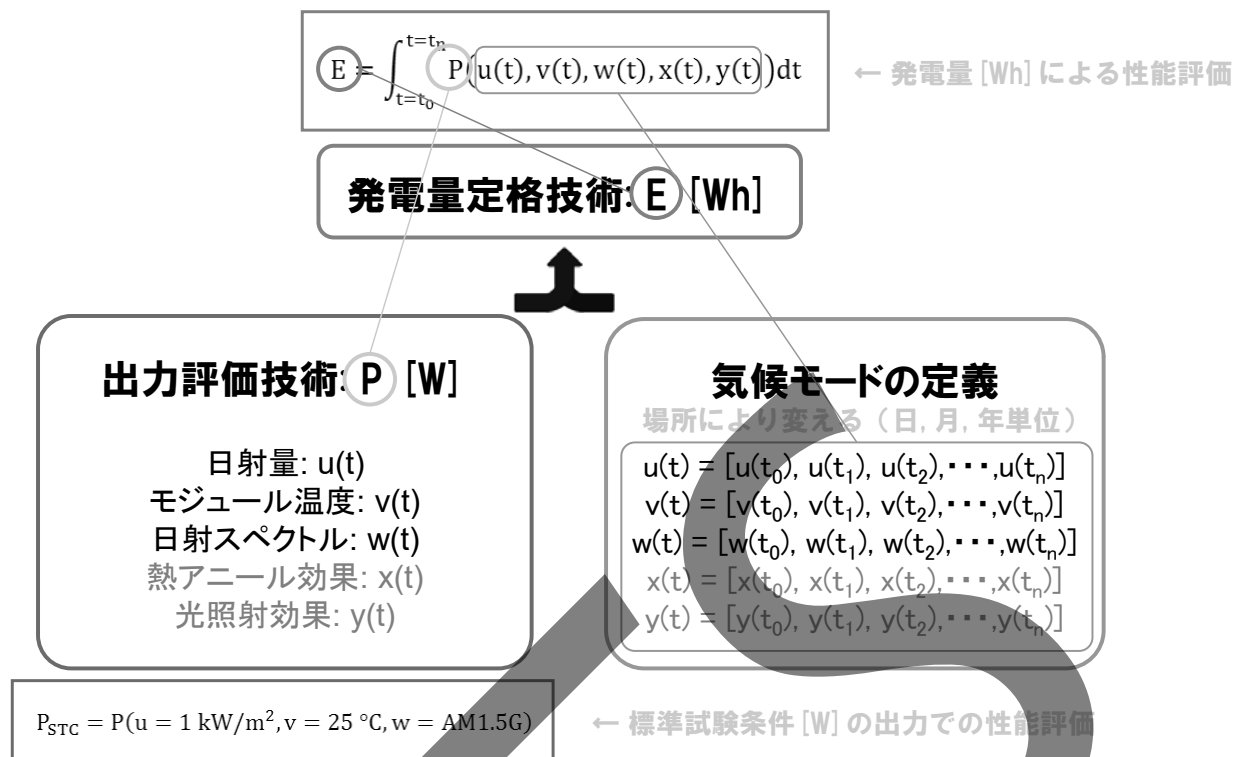


■ 熱アニール・光照射効果により出力が4~6%季節変動

◆ Outline

1. 太陽電池モジュールの屋外における出力評価技術の高精度化の必要性について
2. 発電量定格技術の概要と IEC 61853 Part 1 ~ Part 4 (Energy Rating) の動向
3. 8種12型式の太陽電池モジュールにおける発電量推定技術の精度検証
4. 産総研九州センターにおける 8種10型式の太陽電池アレイ単位の月発電量の調査

◆ 発電量定格技術の概要



- 出力定格技術 (P) を時間積分したものが発電量定格技術 (E)
- $(t_n = t_0, u(t_0) = 1 \text{ kW/m}^2, v(t_0) = 25^\circ\text{C}, w(t_0) = \text{AM1.5G}) \Rightarrow P_{STC} = E_{STC}$

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIIST)

◆ IEC 61853 の概要

“Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating”

- Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating
⇒ Jan. 2011 – Edition 1.0
- Part 2: Spectral Response, Incidence Angle and Module Operating Temperature Measurements
⇒ Jan. 2013 – FDIS? CDV?
- Part 3: Energy Rating of PV Modules
⇒ May 2013 – I
- Part 4: Standard Reference Climatic Profiles
⇒ May 2013 – A

◆ IEC 61853 でやること

■ Part 1: Table を決める (関数 P を決める)

Table 2 - I_{sc} , P_{max} , V_{oc} and V_{max} versus irradiance and temperature

Irradiance $W \cdot m^{-2}$	Spectrum	Module temperature			
		15 °C	25 °C	50 °C	75 °C
1 100	AM1.5	NA			
1 000	AM1.5				
800	AM1.5				
600	AM1.5				
400	AM1.5				NA
200	AM1.5			NA	NA
100	AM1.5			NA	NA

G_0 は I_{sc} と T_m から計算

$$G_0 = \frac{G_{rc} \times I_{sc}}{I_{rc}} \times [1 - \alpha_{rc}(T_m - T_{rc})]$$

I_{sc} , V_{oc} , P_{max} , and V_{max} v.s. G_0 and T_m

■ Part 2: スペクトル依存、角度依存、モジュール温度の計算

$$\tau(\theta) = I_{sc}(\theta) / (\cos(\theta) I_{sc}(0))$$

$$T_J - T_{amb} = G / (u_0 - u_1 v)$$

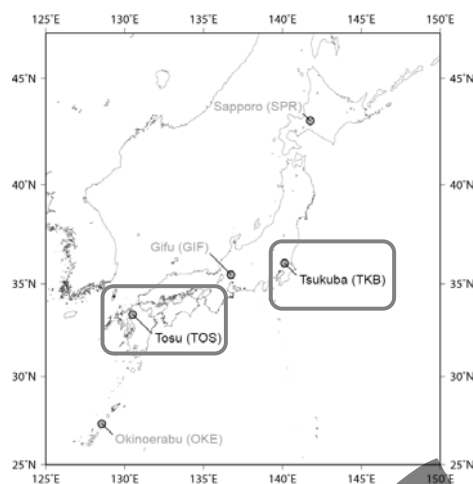
■ Part 3: 時間積分

■ Part 4: モード気候の定義

◆ Outline

1. 太陽電池モジュールの屋外における出力評価技術の高精度化の必要性について
2. 発電量定格技術の概要と IEC 61853 Part 1 ~ Part 4 (Energy Rating) の動向
3. 8種12型式の太陽電池モジュールにおける発電量推定技術の精度検証
4. 産総研九州センターにおける 8種10型式の太陽電池アレイ単位の月発電量の調査

◆ 計測サイト



産総研九州センター



産総研つくばセンター

◆ 8種12型式の太陽電池モジュール

	Kind	Nominal Power [W]	Measured Power (TOS)	Measured Power (TKB)
PV01	a-Si:H/sc-Si	215	210.8	211.1
PV02	IBC sc-Si	210	209.6	208.9
PV03	sc-Si	209	205.7	206.1
PV04	pc-Si	208.4	206.9	205.8
PV05	pc-Si	190	187.1	186.6
PV06	pc-Si	190	186.3	188.3
PV07	CIGS	130	134.2	139.0
PV08	CIGS	130	123.6	123.6
PV09	a-Si:H/ μ c-Si:H	130	145.3	148.2
PV10	a-Si:H	75	91.9	91.9
PV11	CIGS	75	80.0	77.3
PV12	II-VI	65	62.4	62.3



PVS 1222i (Nisshinbo, Mechatronics, Inc., Japan)

- 標準試験条件で室内測定
- CIGSは1日の快晴日の暴露後に計測
- 薄膜シリコンはプレコンディショニングせず

◆ 実測発電量 / 推定発電量

- 推定発電量 [Wh] は、室内測定出力 [W] と日射強度、日射スペクトル、モジュール温度の関数として計算

$$E = \int_{t=20120401}^{t=20120430} P(u(t), v(t), w(t), x(t), y(t)) dt$$

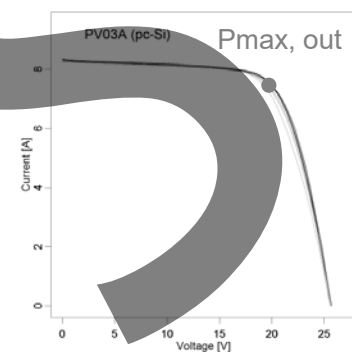
$$P = P_{\max(\text{STC})} \times \frac{G}{1000} \times \{1 - \gamma \times (T_{\text{mod}} - 25)\} / \text{SF}$$

室内測定出力 [W]

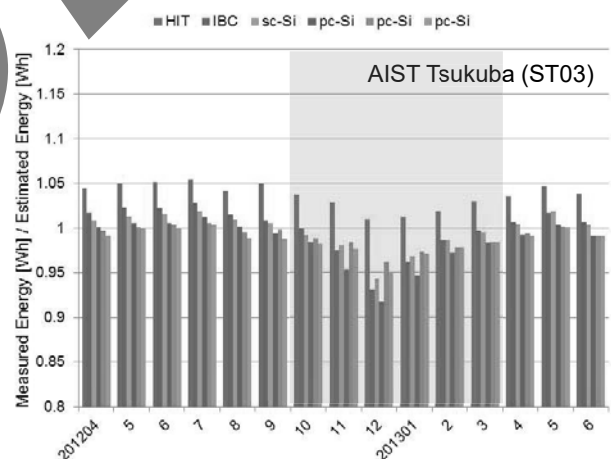
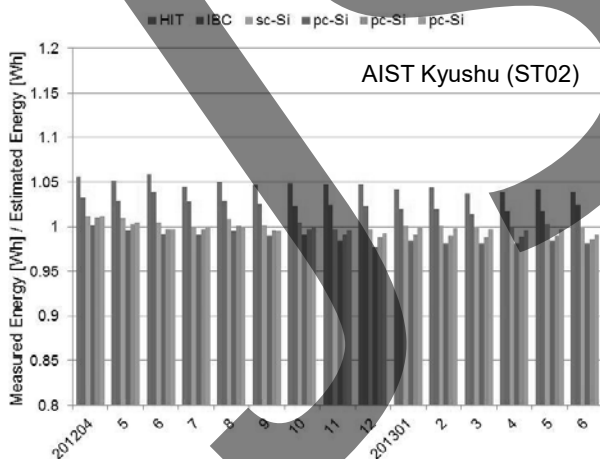
$$\text{SF} = \frac{\int E_{\text{STC}}(\lambda) \text{SR}(\lambda) d\lambda / \int E_{\text{STC}}(\lambda) d\lambda}{\int E(\lambda) \text{SR}(\lambda) d\lambda / \int E(\lambda) d\lambda}$$

- 実測発電量 [Wh] は、屋外I-V曲線から計算

$$E = \int_{t=20120401}^{t=20120431} P_{\text{MAX,OUT}} dt$$

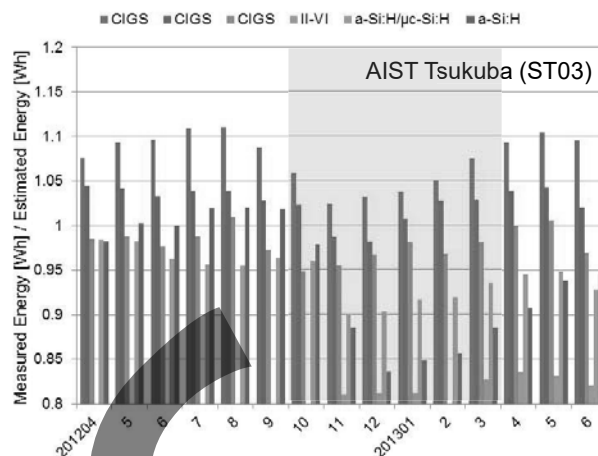
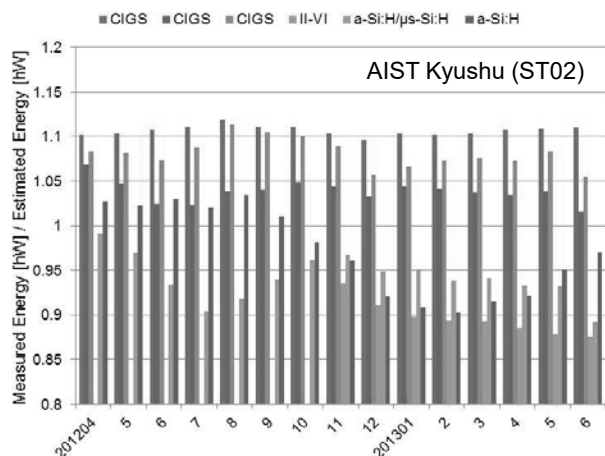


◆ 結晶シリコン系太陽電池の結果



- (通常型) 結晶シリコンは±3%以内で推定可能
- (高効率) 結晶シリコンは推定発電量が小さい
⇒ 室内測定出力が小さかった? (パルス幅 100 ms)
- つくばサイトは影の影響で実測発電量が小さい

◆ 薄膜シリコン系太陽電池の結果



- CIGS太陽電池は型式によって差がある
- 薄膜シリコン太陽電池は季節変動を示す

⇒ 薄膜系太陽電池は光照射効果・熱アニール効果の定量化が必要

◆ Outline

1. 太陽電池モジュールの屋外における出力評価技術の高精度化の必要性について
2. 発電量定格技術の概要と IEC 61853 Part 1～Part 4 (Energy Rating) の動向
3. 8種12型式の太陽電池モジュールにおける発電量推定技術の精度検証
4. 産総研九州センターにおける 8種10型式の太陽電池アレイ単位の月発電量の調査

◆ 研究の目的

- 産総研九州センター(佐賀県鳥栖市)に、8種類10型式各5kWの太陽光発電システムを導入
- 系統電力に接続しており、研究所にて発電した電力を消費
- 出力(DC, AC)、I-V曲線、日射強度、モジュール温度等を計測
- 各種太陽電池アレイ単位のI-V曲線を計測

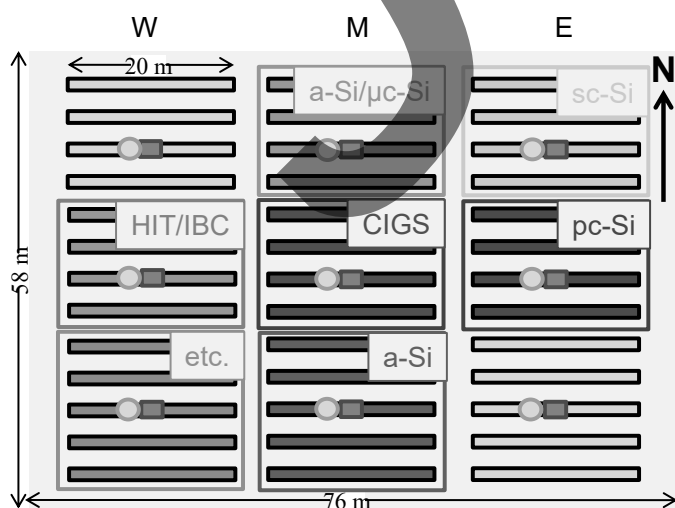
⇒ 各種アレイのI-V曲線から算出される(月・年)発電量を比較



2013年4月撮影 Total = 50 kW

◆ 産総研九州センターの屋外評価設備

- 8種類10型式各5 kWの太陽光発電システム
- I-V曲線計測時以外はストリング・インバータで系統連系運転
- 10分間隔でI-V曲線計測
- パネル裏面のモジュール温度を熱電対で計測
- 日本気象協会(JWA)の5つの気象計測サイトの1サイト



産総研九州センターの太陽電池アレイ配置図

産総研九州センターの太陽電池アレイ構成

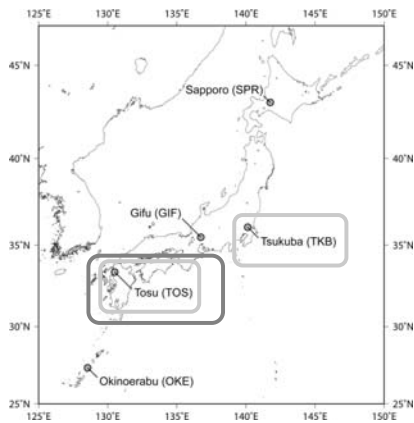
1	Kinds	Total Pmax [kW]	Array Configuration	Installed	
				Year	
E-1a	sc-Si	5.04	7S × 1P × 4A	10/2010	
E-2a	pc-Si	5	6S × 1P × 4A	10/2010	
2	M-1a	a-Si:H/μc-Si:H	5.12	5S × 2P × 4A	10/2010
	M-2a	CIGS	5	2S × 4P × 5A	10/2010
	M-3a	a-Si:H	5	2S × 5P × 5A	10/2010
3	E-1b	sc-Si	5	5S × 1P × 4A	12/2012
	E-2b	pc-Si	4.9	5S × 1P × 4A	12/2012
	W-2a	a-Si:H/sc-Si	4.8	5S × 1P × 4A	12/2012
	W-2b	IBC sc-Si	4.68	6S × 1P × 4A	12/2012
	W-3a	Thin film	5.2	5S × 4P × 4A	12/2012

第1期

第2期

◆ 気象データ・モジュール発電量計測とリンク

- 日本気象協会による5日射気候区における気象データ計測（日射強度、直達日射強度、日射スペクトル・・・）
- 太陽電池モジュール単位の発電量計測も同時並行
- モジュール単位とアレイ単位で違いがあるのか？
- 実運用条件における長期信頼性の調査



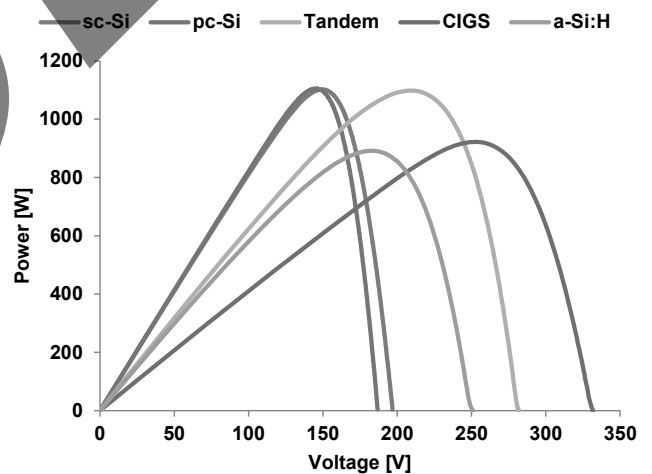
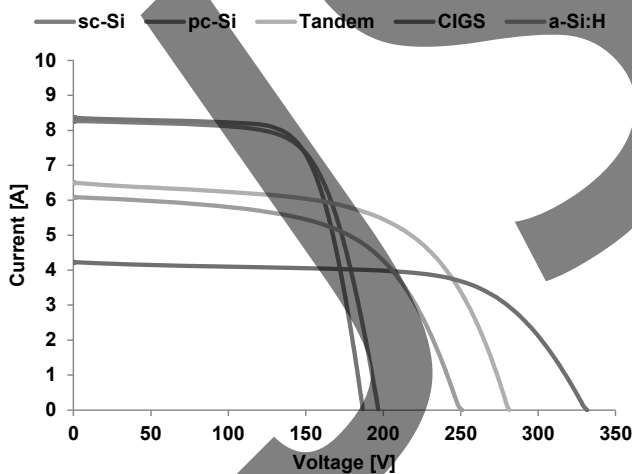
5日射気候区の気象計測サイト



気象計測ステーション

◆ I-V曲線とP-V曲線の例

2011/04/05, 13:50, IR=1000 [W/m²]



	Kinds	Pmax [kW]	Configuration
E01	sc-Si	5.04	7S × 1P × 4A
E02	pc-Si	5	6S × 1P × 4A
M01	a-Si:H/μc-Si:H	5.12	5S × 2P × 4A
M02	CIGS	5	2S × 4P × 5A
M03	a-Si:H	5	2S × 5P × 5A

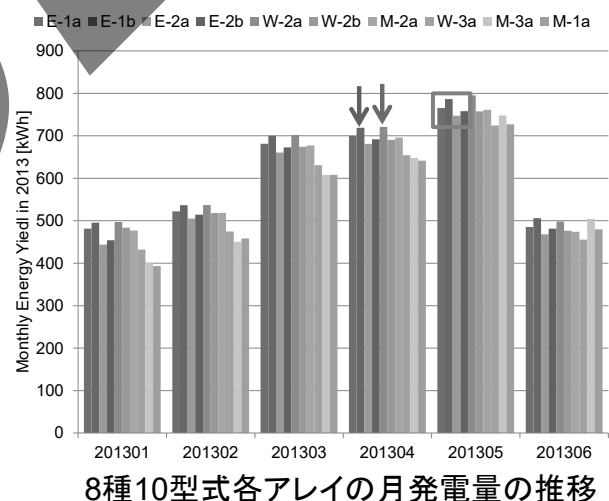
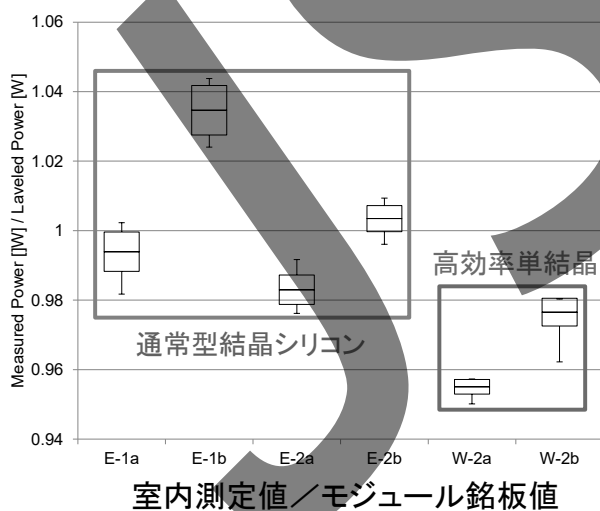
- 1つのアレイの定格出力は、およそ1 [kW]もしくは1.25 [kW]

◆ 月発電量を比較する際の注意点

- 欠測の対応は、すべての太陽光発電システムにおいて、1つのアレイでも欠測していれば、すべてのアレイが欠測したとみなす
⇒ 各種アレイの相対的な発電量比較に重きをおく
- 各種太陽電池アレイは厳密には5 [kW]ではない。結果に示される値は、全て5 [kW]に規格化したものである
- バルク系結晶シリコン太陽電池は、パルス式ソーラシミュレータを用いて、全点検査を行っており、パネルの銘板値との比較を行う（薄膜系太陽電池は、光照射・熱アニール効果のため難）

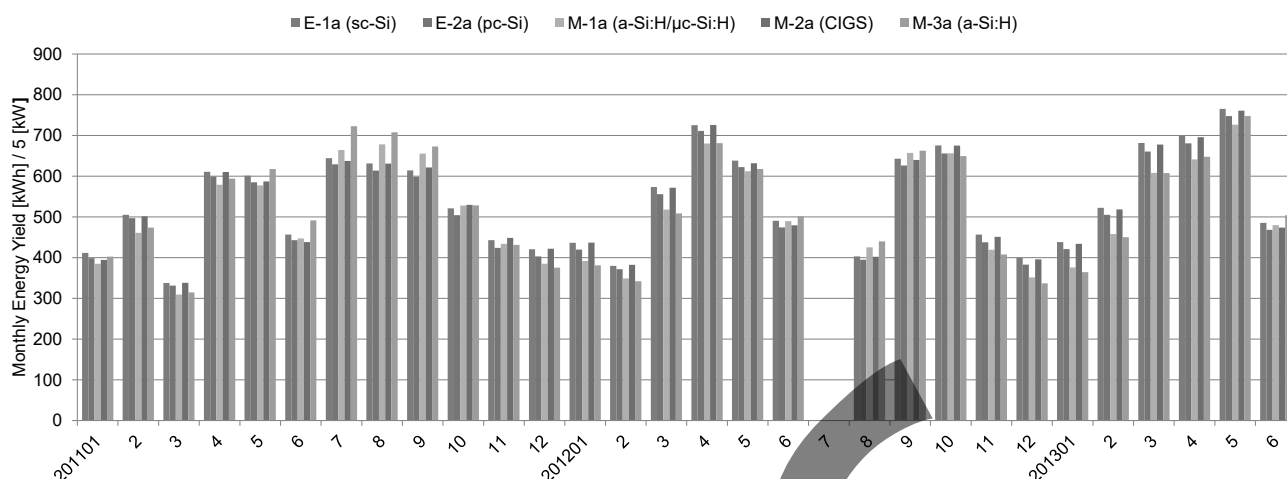
$$E_{\text{MON}} = \int_{t=20120401}^{t=20120430} P_{\text{MAX}} dt$$

◆ 第1期と第2期の2013年からの月発電量



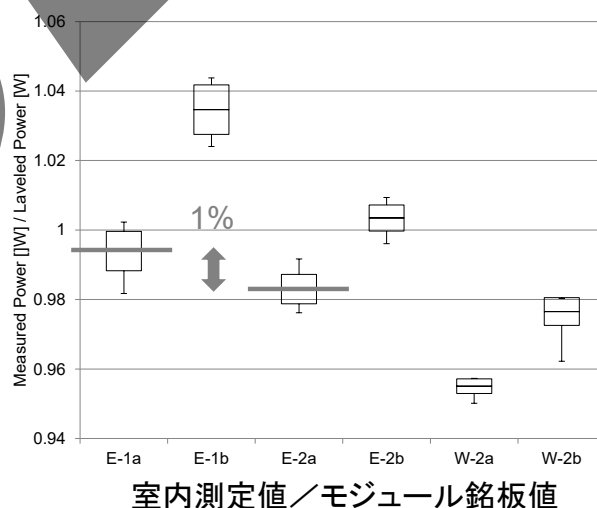
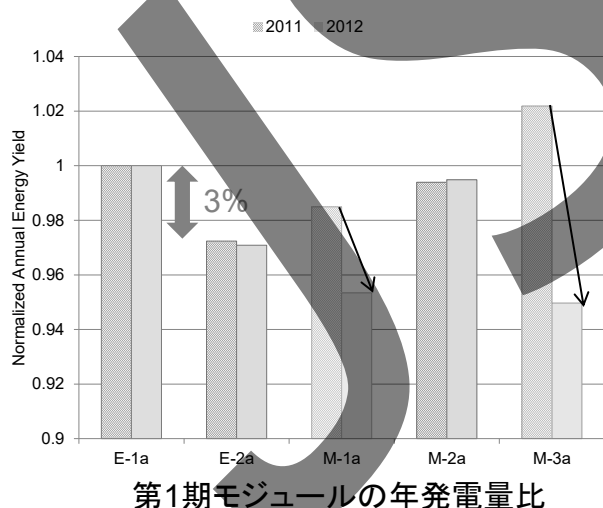
- (通常型)結晶シリコンは、測定値 / 銘板値の差が発電量の差として表れている
- (高効率)単結晶太陽電池の室内測定には、パルス幅 = 100msでは不十分であった ⇒ 300ms以上必要か?
- 2013年上半期の総発電量では、W-2a(HIT)が1番、E-1b(sc-Si)が2番目に大きかった

◆ 第1期の2011年からの月発電量の推移



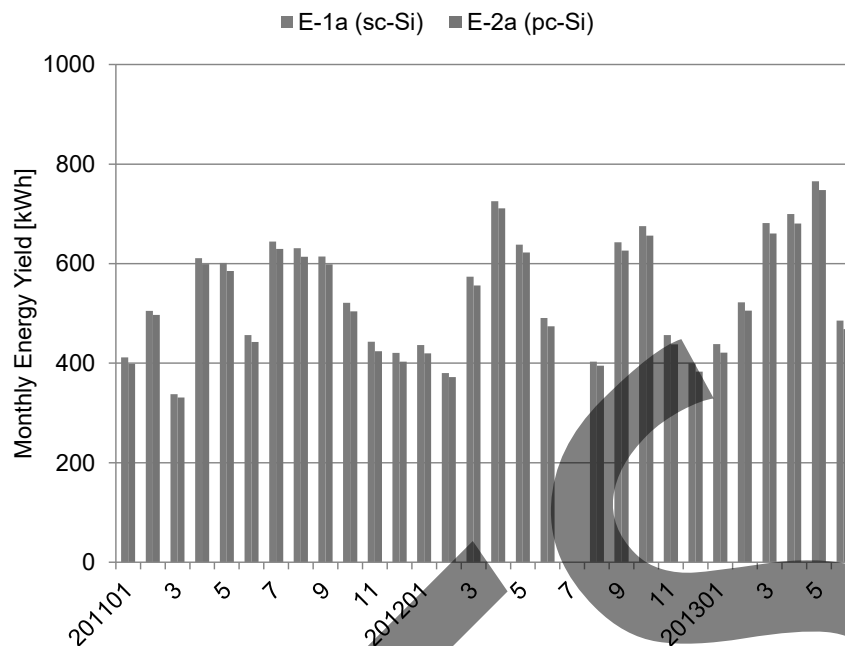
- 2年6カ月のデータ(2012年7月は欠測)
- 単結晶、多結晶、CIGS太陽電池アレイの相対的な月発電量は計測期間を通してほとんど変動しない
- 薄膜シリコン系太陽電池は、結晶シリコン系太陽電池と比較して夏に発電量が多い
⇒ 温度係数、光照射・熱アニール効果、日射スペクトル

◆ 第1期の年発電量の推移



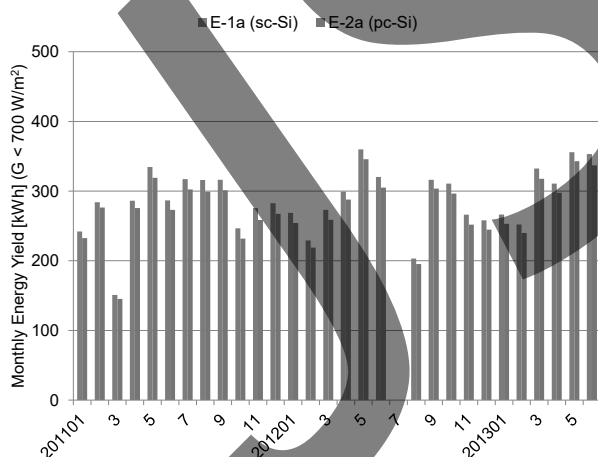
- 薄膜シリコン系太陽電池は、初期劣化のため、2011年の年発電量より2012年の年発電量が数%小さくなった
⇒ 薄膜シリコン系太陽電池が安定化するには2年程度必要
- 単結晶太陽電池と多結晶太陽電池の年発電量の差は約3%であるのに対し、測定値／銘板値の差は約1%

◆ 発電量は計測期間を通して (sc-Si > pc-Si)

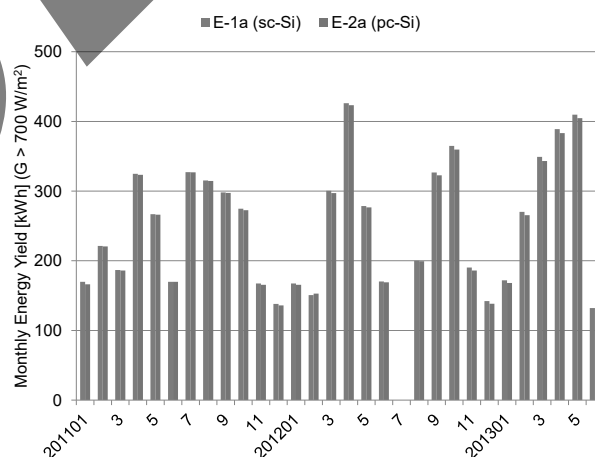


- 室内測定出力はほとんど等しいが、月発電量が異なる
⇒ 照度依存性・角度依存性…等が原因に挙げられる

◆ 発電量を照度条件 (700 W/m²) で区分



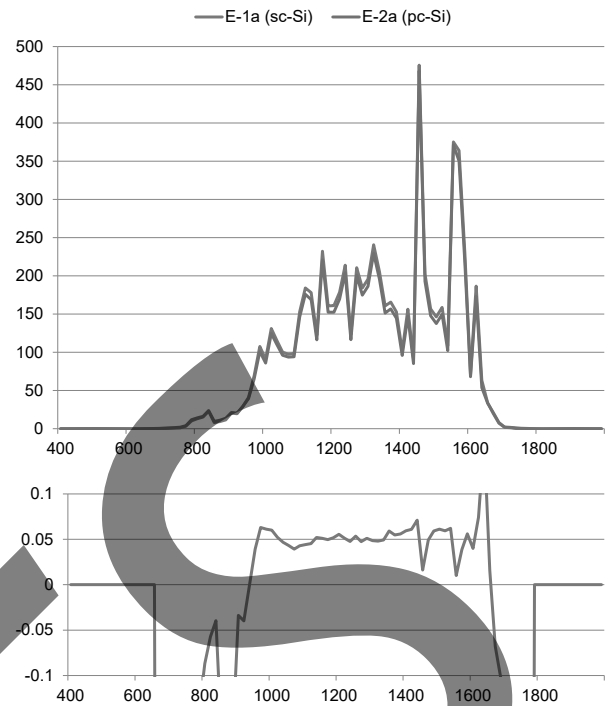
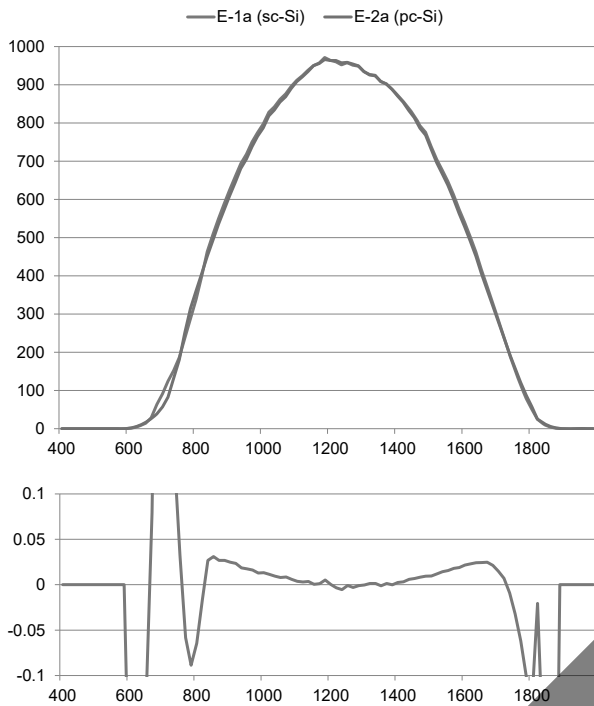
700 W/m²以下の低照度条件



700 W/m²以上の高照度条件

- 700 W/m²以下の低照度条件では、単結晶太陽電池と多結晶太陽電池の月発電量の差は5%と大きい
- 700 W/m²以上の高照度条件では、単結晶太陽電池と多結晶太陽電池の月発電量の差はほとんど見られなかった
⇒ 発電量の違いは低照度条件で起こっている

◆ 快晴日と曇天日の発電量の差



- 低照度の時に差が現れる。特に、曇りの日が顕著
⇒ 照度依存性? or 散乱光が主成分となるときに差が顕著?

◆ まとめと今後の課題

- 発電量定格技術を確立させるには、屋外出力評価技術の精度を向上させ、発電量推定技術の精度を向上させる必要がある
⇒ 各種太陽電池モジュールに公平なベンチマーク指標
- 出力評価技術の課題は、薄膜系太陽電池における光照射効果と熱アニール効果の定量的評価
- パルス型ソーラシミュレータを用いる場合は、(高効率)単結晶シリコン太陽電池の測定値のスweep速度依存性に注意
- (通常型)結晶シリコン太陽電池の発電量は、標準試験条件における室内測定値の精度が重要。...だが...
- (九州センターに導入された)単結晶太陽電池アレイと多結晶太陽電池アレイの年発電量には約3%の差があった
⇒ 低照度条件における発電量の違い(理由は...)