

波長変換素子を用いた 太陽電池モジュールの出力及び温度評価 ～紫外線を吸光する紫素子と緑を吸光する赤素子の特性～

Output and Temperature Evaluation of PV Module Apply Wavelength Shifting Materials
Characteristic of Purple Material Absorb Ultraviolet and Red Material Absorb Green

青木 俊 哲 *¹

Toshiaki AOKI

千葉 大 輔 *²

Daisuke CHIBA

野 呂 将 太 *²

Shouta NORO

中 島 真 吾 *²

Shingo NAKAJIMA

平 田 陽 一 *³

Youichi HIRATA

安 藤 静 敏 *⁴

Shizutoshi ANDOU

谷 辰 夫 *⁵

Tatsuo TANI

Abstract

The lifetime of Photovoltaic (PV) modules are presumed to be 20 years for crystalline and 30 years for thin film. If the system lifetime become longer, that ensures the number of hours, which will have been worked, estimate the more accumulated output, and guarantee the higher reliability. The wavelength shifting materials(WSM) which absorbs ultraviolet fluoresces violet, reduces UV that deteriorates the EVA of PV module. To utilize this violet rays for the spectral response of solar cells, that contribute to extend the lifetime and improve the efficiency. Incident solar radiation is varies by shifting wavelength and that presumed to effect the cell temperature. This research evaluates the characteristics of cell temperature and photovoltaic output by applying violet wavelength shifting material. In the same manner, red wavelength shifting material is evaluated.

キーワード：波長変換素子，蛍光染料，紫外線，太陽電池モジュール，長期信頼性

Keyword：Wavelength Shifting Materials, Fluorescence Dye, Ultraviolet Rays, Photovoltaic Module, Long Term Reliability

1. 緒言

太陽電池モジュールの寿命は、結晶系で 20 年、薄膜系では 30 年と言われている。この寿命をより長くする事で、太陽光発電システムの寿命における積算発電量は増え、システムの価値を高める事が出来る。それと同時に、kWh 当たりの太陽電池を作る投入エネルギーは、相対的に少なくなる。そこで、太陽電池の寿命を延ばすのに必要な耐久性に寄与する、波長変換素子を用いた太陽電池モジュールに関する研究を行った。

紫外線はモジュール内部における充填材などの劣化を招き、寿命に影響を与える¹⁾。この紫外線を波長変換して改質する事で発電に有効利用する事が出来れば、その波長変換素子は、寿命延長と変換効率比向上の 2 点に寄与する事が出来る。現在の波長変換素子は色彩を重点にいくつかの蛍光染料があるが、今後入射光スペクトル分布と分光感度との関係を詳細に考慮することで、より最適な素子の提案も考えられる。また、波長変換する事で入射エネルギーは変化しており、セル温度に少なからず影響を与えている事も推測される。本研究では、紫外線を波長変換して制御する紫色の蛍光染料を用いて、セル温度と出力を測定し、その特性を評価した。同様に緑色を吸光して赤色を蛍光する染料についても評価した。

2. 基本特性

2.1 分光感度

光の各波長に対する太陽電池の出力（短絡電流）への応答性を分光感度特性という。短絡電流の増減は出力の増減となる。基準光スペクトル分布とアモルファス Si、単結晶、多結晶の分光感度²⁾を図 1 に示す。

分光感度は、アモルファス Si は約 550nm を最大値とし、300nm～800nm に分布している。多結晶シリコンは約 800nm を最大値とし、300nm～1200nm に分布している。単結晶シリコンは多結晶より長波長側に寄った約 900nm を最大値とし 300nm～1,200nm に分布している。

太陽電池の出力は、太陽光スペクトルが入射し、太陽電池の分光感度とかけ合わさり、出力される。よって、入射するスペクトルをより太陽電池の分光感度特性に有効な光に改質する事が出来れば、出力は増加する。

*¹ 諏訪東京理科大学 システム工学部 学部生（現 狹野村ユニソン）
（〒 391-0292 長野県茅野市豊平 5000-1）

*² 同学部生

*³ 同学部 准教授 E-mail: youichi@rs.suwa.tus.ac.jp

*⁴ 東京理科大学工学部教授

*⁵ 諏訪東京理科大学 システム工学部 教授
（原稿受付：2010 年 3 月 29 日）

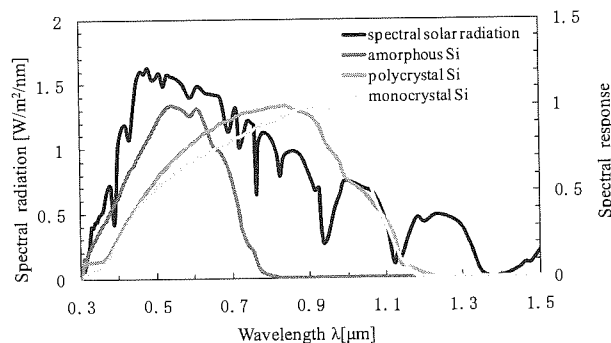


Fig.1 Spectral solar radiation and spectral response of solar cells

図1 太陽光スペクトル分布と太陽電池の分光感度

近年、太陽電池の分光感度は、更なる変換効率向上を意図して、太陽光スペクトル分布との相性を考慮した、アモルファス Si と結晶系を積層したものが多くみられる³⁾。紫を蛍光する波長変換素子とアモルファス Si 太陽電池との相性について検証することができれば、多くの太陽電池への適用が期待できる。

2.2 モジュールの構造とその寿命

モジュール構造には、結晶系シリコンにみられるサブストレート形、スーパーストレート形、充填形などのセルを透明充填剤で挟み込む構造のものと、薄膜系にみられる基板一体スーパーストレート形に大別することができる。図2には、結晶系で代表的なスーパーストレート形と薄膜系のスーパーストレート形のモジュール構造を示す。

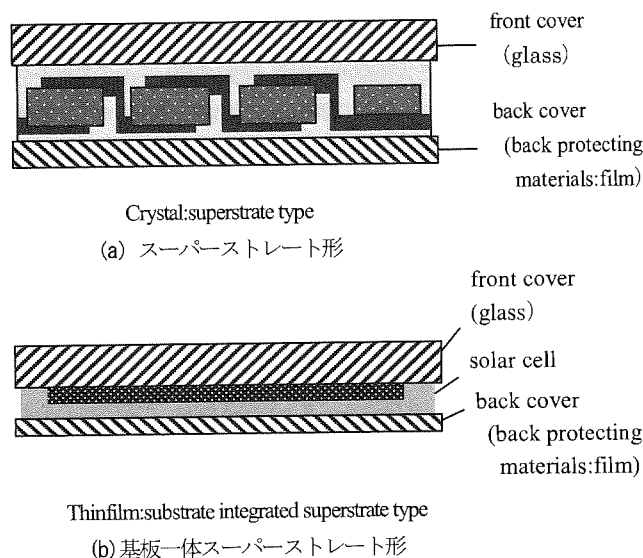


Fig.2 Cross section of photovoltaic module

図2 太陽電池モジュールの断面構造⁴⁾

図2(a)のスーパーストレート構造では、モジュールは複数の構成材料からなり、セル相互の接続にインターコネクタという半田メッキを施した銅線を用いている。多結晶 Si の熱膨張係数の約9倍が半田の熱膨張係数であり、昼間には70℃近い高温になる。また、特性の悪いセルがホットスポットとなり局所高温になることも考

えられる。これらの温度の熱サイクルを繰り返すと、インターコネクタ部への破壊を導く恐れがある⁵⁾。

また、表面ガラスでセリウムなしの白板ガラスに比べセリウムありの白板ガラスは、透過光が UV-B から UV-A II 領域の紫外線波長光が大きく減少しており、そのガラス同士を EVA により貼り合わせたガラスを縦方向に引っ張った強さは暴露時間に対し指数関数的に減少する。そして、2.5UV SUN の照射環境下で、同じ張力を維持するのに暴露時間が1,000h~10,000hへと10倍程度に延びるという報告がある¹⁾。EVA など充填材の劣化は透過光の減少、上述など電気的部材の故障を引き起こすことが懸念される。

図2(b)の薄膜形構造は基板一体スーパーストレート形であり、ガラス面に直接太陽電池を形成可能であり、またレーザー加工によるリード線を用いずに電気的な接続を行えるため、上述のような損傷を受けない利点を有している。

2.3 波長変換素子

2.3.1 原理^{6), 7)}

波長変換素子は光を吸収し蛍光するという特性を有している。その時、光は360°になり蛍光する。つまり蛍光した光の一部は熱になり、一部は上部、両端部へ向かう光になる。つまり、全て太陽電池には照射されないということになり、光学的減衰を考慮する必要がある。アクリル板から外界へ光が出射する時、スネルの法則による屈折、反射が生じる。波長変換素子の蛍光イメージを図3に示す。

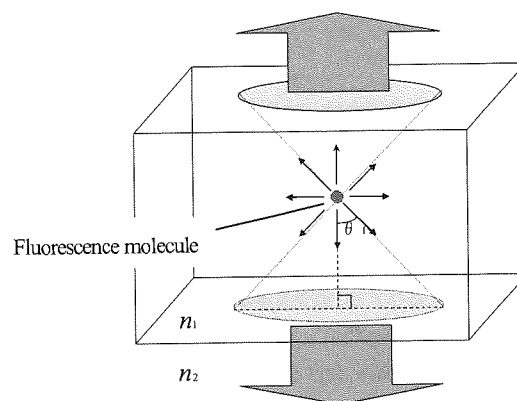


Fig.3 Fluorescence image of wavelength shifting materials.

図3 波長変換素子の蛍光イメージ

スネルの法則より

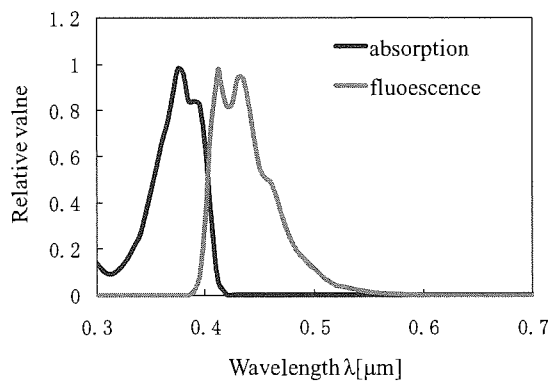
$$\sin \theta_f = \frac{n_2}{n_1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 n_1 : 入射光側の媒質における絶対屈折率、 n_2 : 出射光側の媒質における絶対屈折率である。

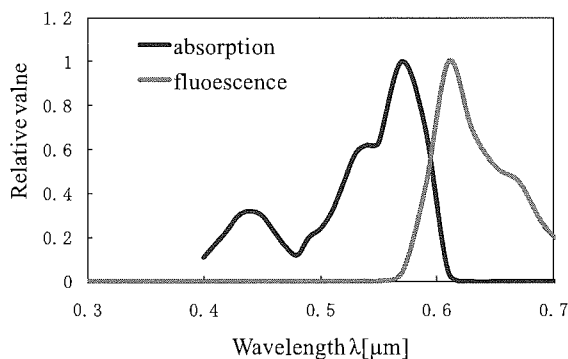
θ_f は臨界角を表し、屈折、反射の境界となる角度である。波長変換素子の周囲が空気であった場合、PMMA は屈折率が1.49で全蛍光量の12.5%が出射光側より放射される。このとき、入射光面側からも出射してしまうため、全ての波長変換光を利用できない特徴がある。

その蛍光を利用するのは大変困難であるので、平板に接する媒質の屈折率を調節することにより、その面から蛍光を効率よく出射させることができる。例えば出射面側の媒質を水（屈折率 1.33）とした場合、出射面から放射される蛍光は 42.0% になる。

本研究では、波長変換素子には蛍光染料（BASF 社製：Lumogen F red305, Lumogen F violet570）が溶かされてあるアクリル板を想定する。それぞれの吸収、蛍光特性を図 4 に示す⁸⁾。Lumogen F violet570 は 300~400nm（紫外線）の光を吸収し、400~500nm（紫色）の光を蛍光する。Lumogen F red305 は 400~600nm（青、緑色）の光を吸収し、560~700nm（赤色）の光を蛍光する。



(a) Lumogen F violet570



(b) Lumogen F red305

Fig.4 Absorption and fluorescence characteristics of fluorescence Dye.

図4 蛍光染料による吸収特性と蛍光特性

2.3.2 組み合わせシミュレーション

アモルファス Si 太陽電池には紫色、多結晶 Si 太陽電池には赤色、単結晶 Si 太陽電池には赤色の波長変換素子を想定しそれぞれ計算を行った。短絡電流を基準とし、波長変換素子の吸収、蛍光係数ごとに値を求め、波長変換素子が太陽電池に与える効果を比較する。なお、今回の計算では吸収、蛍光は図 4 に示す相対値の値を基に 1:1 の強度で考えた。波長変換後の太陽光出力を表 1 に示す。なお、変換係数は吸収、蛍光の倍率を示している。また、変換効率 0.3 の時の波長変換素子透過スペクトル及び、対象とした太陽電池の分光感度を、それぞれ図 5 に示す。

表 1 波長変換素子による太陽電池出力比率

※ 波長変換素子の適用されていない太陽電池出力を基準とする。

※ 変換効率は吸収と蛍光の係数を意味する。

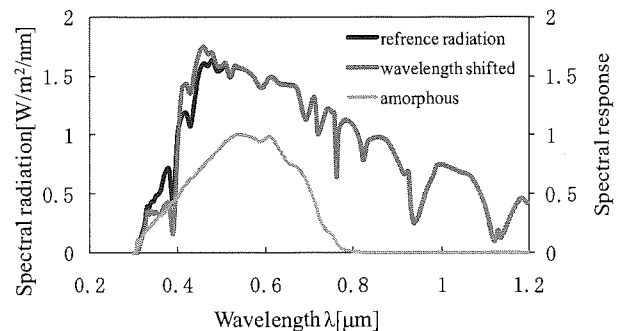
Table1 Output ratio applied by wavelength shifting materials.

Combination of PV and WSM	Conversion coefficient [%]		
	0.1	0.2	0.3
violet m.—amorphous Si	0.5	1.0	1.54
red m.—monocrystal Si	$-1.7 \cdot 10^{-2}$	$-3.5 \cdot 10^{-2}$	$-5.2 \cdot 10^{-2}$
red m.—polycrystal Si	0.3	0.5	0.8

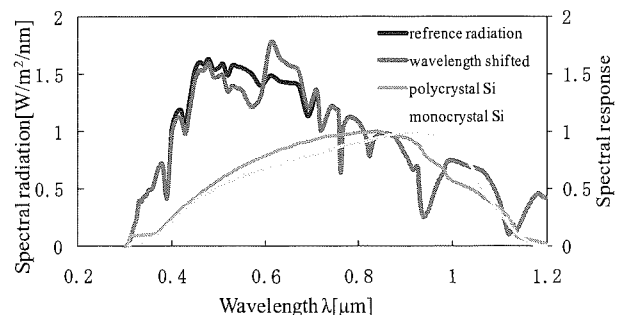
※ reference to photovoltaic output without WSM

※ conversion coefficient means the coefficient of absorption and fluorescence.

紫素子—アモルファス Si、赤素子—多結晶 Si は変換係数 0.3 の時、出力比率がそれぞれ 1.5%、0.8% と僅かであるが、変換係数の増加に対し太陽電池出力が増加していることが分かる。赤素子—単結晶 Si は -0.05% と極僅かに減少しており、組み合わせとしては他に比べると若干不適である。



(a) violet m.—amorphous Si 紫色—アモルファス Si



(b) red m.—monocrystal Si 赤色—単結晶 Si

Fig.5 Spectral distribution of solar radiation after wavelength shifted.

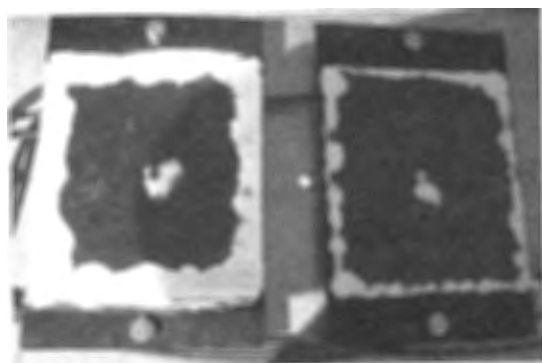
図5 波長変換後の太陽光スペクトル

3. 測定方法

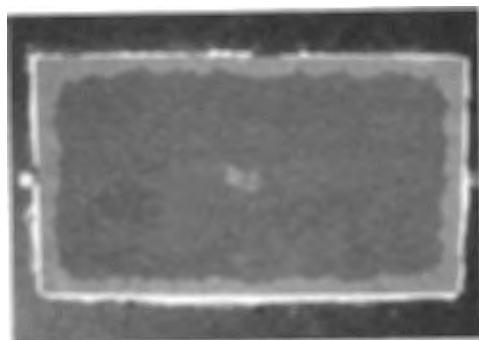
3.1 測定対象

3.1.1 波長変換素子を使用したリファレンスプレート

アクリル板のみによる温度の影響をしらべるため、リファレンスプレートに波長変換素子を添付し、その間の温度を測定した。リファレンスプレートの外観を図6に、断面を図7に示す。波長変換素子(アクリル板)のみの温度を測るため、アルミ板とアクリル板の間に温度計(熱電対)2本を、電気絶縁性、熱伝導率の高い液型RTVゴム、KE-3493、(株)信越シリコンで貼り付ける。アルミ板は、リファレンスプレート、JIS C 8990⁹⁾に準拠し、表面をツヤ消し黒で塗装する。リファレンスプレート法とは、放射照度、周囲温度、風速の同じ条件下で試験モジュールの温度と標準リファレンスプレートの温度とを比較するという原理である。本研究では、透明アクリル板を標準プレートとした。



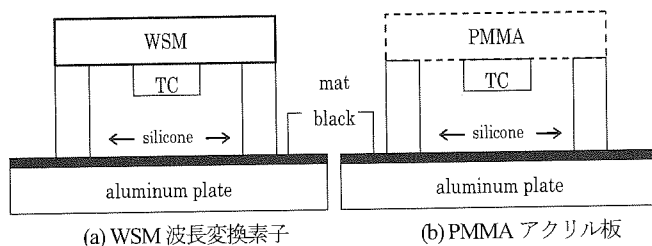
(a) right: clear left: violet m. 右透明アクリル板、左:紫素子



(b) red materials 赤素子

Fig.6 General view of reference plate.

図6 リファレンスプレートの概観



(a) WSM 波長変換素子

(b) PMMA アクリル板

※ TC: thermo couples (熱電対)

※ PMMA: polymethyl methacrylate (ポリメチルメタアクリレート)

Fig.7 Cross section of reference plate.

図7 リファレンスプレートの断面構造

3.1.2 波長変換素子を適用した太陽電池モジュール

今回の実験では、2.3.2 節で述べたシミュレーション結果を踏まえ、波長変換素子との組み合わせに適したサイズの太陽電池モジュールについて、入手し易さなどを考慮し、紫素子-アモルファス Si、赤素子-単結晶 Si の2種類の組み合わせを分析対象として採用した。その定格を表2に示す

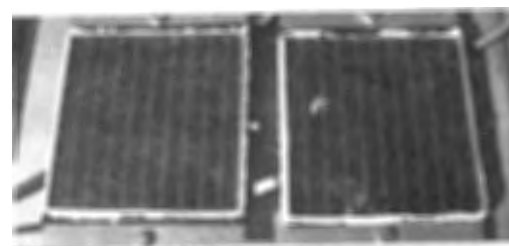
表2 太陽電池モジュールの定格

Table2 Rating of PV module.

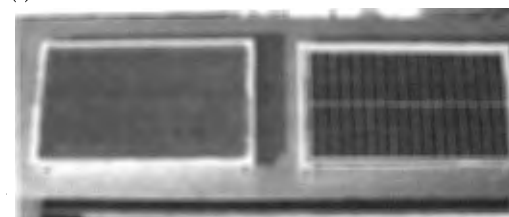
	Amorphous Si	Monocrystal Si
P_{max}	1.3 W	6.0 W
V_{oc}	8.6 V	20.4 V
I_{sc}	127 mA	0.40 A
Model	AN-7A03	GT833S-TF
Co.	Sanyo	KIS

表2に示す定格の太陽電池モジュールに波長変換素子を貼り付けたものの概観を図8に、断面を図9に示す。入手したアモルファス太陽電池は、構造がガラス基板のみであったため、クッション、アルミ板を裏面補強材として使用し、モジュールを作製した。つまり、太陽電池の表側に波長変換素子を光ファイバー用シリコンゴム、(XE5844)、(屈折率: 1.51、モメンティブ・パフォーマンス・マテリアルズ・ジャパン合同会社)で貼り付け、アクリル板の端面から出射してしまわないよう油絵の具(ホルベイン工業・ZINC WHITE)で固める。太陽電池の裏には、温度を測定するために温度計: T 形熱電対を中心部に設置し、その下にクッション(低反発ウレタンフォーム)を敷きアルミ板に貼り付ける。なお、太陽電池とクッション、クッションとアルミ板は一液型RTV ゴムで貼り付ける。

単結晶については、表面側はアモルファス太陽電池と同様だが、モジュール枠は完成されており、裏面に温度計を一液型RTV ゴムで貼りつけた。



(a) violet m. - amorphous Si 紫素子-アモルファス Si



(b) red m. - monocrystal Si 赤素子-単結晶 Si

Fig.8 General view of photovoltaic module applied wavelength shifting materials.

図8 波長変換素子を適用した太陽電池の概観

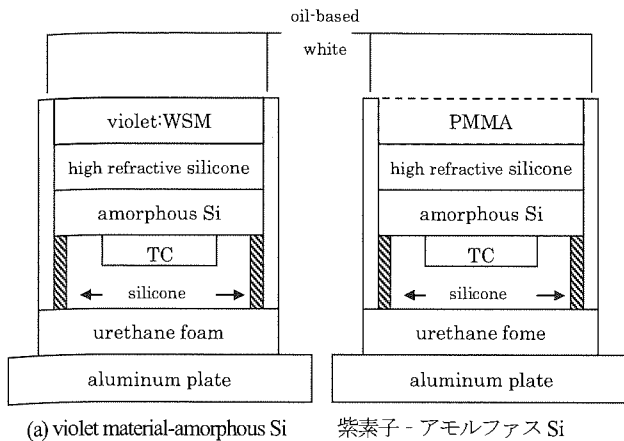


Fig.9 Cross section of PV module apply WSM on the front

図9 波長変換素子を適用した太陽電池の断面構造

出力評価に際しては、アクリル板による影響は除いて、波長変換素子のみによる影響を分析するため、標準となる太陽電池に透明アクリル板を貼り付け、それとの比較により波長変換素子が太陽電池に与える影響を分析する。波長変換素子を、どのように表面に貼付するかは今後の課題とした。

3.2 測定装置

測定装置の概観を図10に示す。各計測器及び測定対象は、表3に示す環境の架台上アルミ板に、熱環境を考慮し、直接設置（以降「隙間なし」と略記）と1.8cm 浮かせて設置（以降「隙間あり」と略記）して、表4に示す測定装置を用いて、日射強度、紫外線領域、温度をデータロガーで、太陽電池出力をI-Vカーブトレーサーで測定する。データは1分毎に取得する。

表3 設置条件

Table3 Installation condition.

place	on the roof of our campus (4F)
direction	due south
inclined angle	30°



Fig.10 General view of measurement equipment.

図10 測定装置概観

表4 測定装置

Table4 Measurement equipment.

Apparatus	Model	Manufacturer Co.
Pyranometer	MS-801F	EKO
UV-A pyranometer	MS-212A	EKO
Spectro-radiometer	MS-700	EKO
I-V curve tracer	MP-123B	EKO
Data logger	DA-100	YOKOGAWA
Infrared thermography	TVS-600S	AVIO

また、波長変換素子を通過した後の放射照度を回折格子型分光放射計で測定する。測定波長域は300~1,105nmである。その時、波長変換素子と分光放射計は2~3cm間を空けている。

温度測定に関して、熱電対では時刻変化が観測しやすい半面、ある点でしか測定できない欠点があり、熱分布による誤差がある。平面状での分布を測定できる、赤外線サーモグラフィで熱分布画像を撮影し、面としての温度分布も確認する。

4. モジュール温度の測定結果

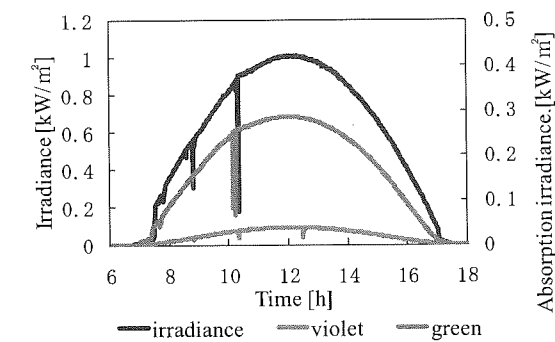
4.1 日射強度と吸収域強度

a. 晴天日（2010年2月7日）

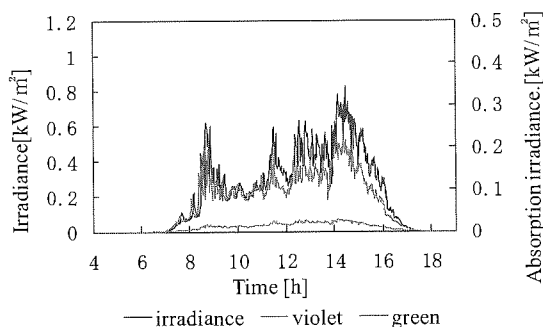
時刻に対する日射強度と吸収域の強度を図11(a)に示す。日射量は6.7kWh/m²・dayである。日射強度は12時頃を最大値1kW/m²とする正弦波を描き、それとともに紫外線吸収域、緑色吸収域も変化した。日射強度を基準にした積算量比率は紫外線が3.42%、緑色は27.5%となった。以降、2/7を晴天日の代表日とする。

b. 曇天日（2010年2月6日）

日射強度と吸収域の強度の図11(b)に示す。日射量は3.2kWh/m²・dayである。日射強度は最大で約0.8kW/m²となり、日射強度とともに吸収域も変化した。日射強度を基準にした積算量比率は紫外線が4.38%、緑色は31.9%となった。晴天日と比べると紫外線は1.0%、緑色は4.4%高くなった。曇天日のほうが短波長成分の比率が増加していることを示している。これは、散乱光比率が高いためと推測される。また、緑色がばらついているのは、放射照度の強い波長域で、大気の状態が不安定なためと思われる。以降、2/6を曇天日の代表日とする。



(a) fine weather 晴天日



(b) cloudy weather 曇天日

Fig.11 Irradiance and absorption radiation variation with time.

図11 時刻に対する日射強度と吸収帯日射強度の変化

4.2 リファレンスプレート

a. 晴天日 (2/7)

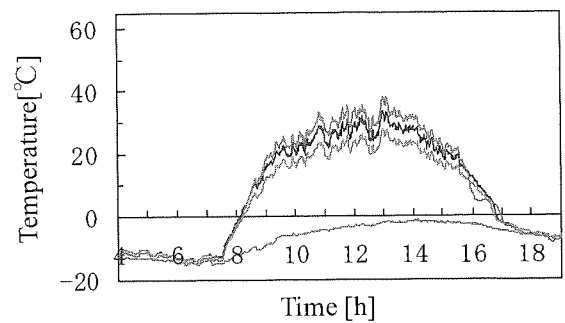
時刻に対する、隙間ありの環境におけるリファレンスプレートの温度変化を図12(a)に示す。赤素子の温度が一番高く、次に透明アクリル板、紫素子となっている。日射強度 0.98 kW/m^2 の下で、標準プレート 40°C を基準とすると、赤は最大で 5°C 高く、紫で 6°C 低い値が観測された。素子の温度上昇は、ストークス損^{4,5)}によるものが考えられる。ストークス損とは、蛍光エネルギーは吸収エネルギーより小さいというものである。つまり、吸収したエネルギーのうち蛍光されなかったものが熱になったと考えられる。この傾向は他の晴天日でも同様に現れた。紫素子については5.1節で述べるが、透過光強度がアクリル板 0.93 に比べ 0.91 で、僅かに 2% 少ない。つまり入射エネルギーに殆ど差がない。また、アクリル板に比べ吸収し蛍光した光が表面より効率よく放射し、温度が低下したものと推測される。

b. 曇天日 (2/6)

同様にリファレンスプレート温度を図12(b)に示す。晴天日と同様の結果となったが、温度の開きはこちらの方が少なくなった。入射する日射強度が小さかったためと思われる。

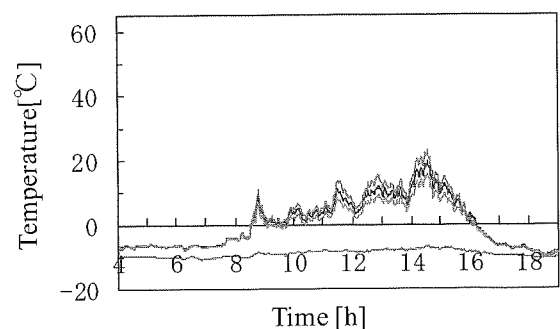
c. 熱分布画像(2/20)

2010年2月20日、13:30頃、晴天日、日射強度 0.98 kW/m^2 、ネオサーモで隙間あり環境下でのリファレンスプレートの熱画像を図13に示す。透明アクリル板を標準として、紫素子の温度は低く、赤素子は若干高いことが分かる。これは、図12(a)の傾向を面としても裏付ける形となった。



— clear — violet — red — ambient

(a) fine weather 晴天日



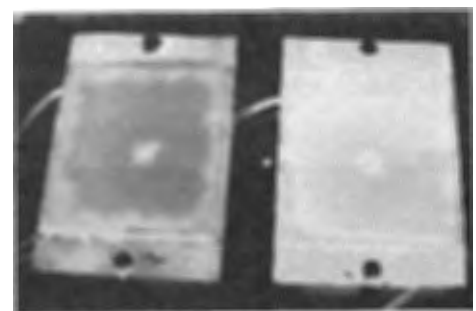
— clear — violet — red — ambient

(b) cloudy weather 曇天日

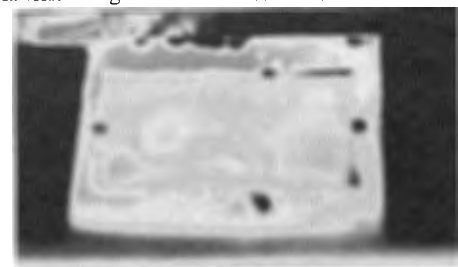
Fig.12 Temperature variation of reference plate with time

:gap on the back.

図12 時刻に対するリファレンスプレートの温度変化 (隙間あり)



(a) left: violet m. right: clear 左: 紫素子、右: 透明アクリル板



(b) red material 赤素子

Fig.13 Thermo graphic of reference plate with gap.

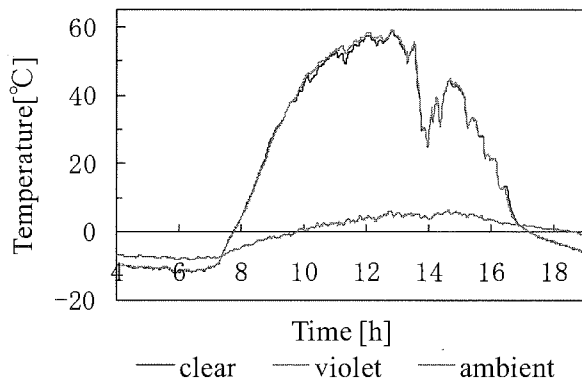
図13 リファレンスプレートの熱分布画像 (隙間あり (2/20, 0.98 kW/m^2))

4.3 太陽電池モジュール温度と出力シミュレーション

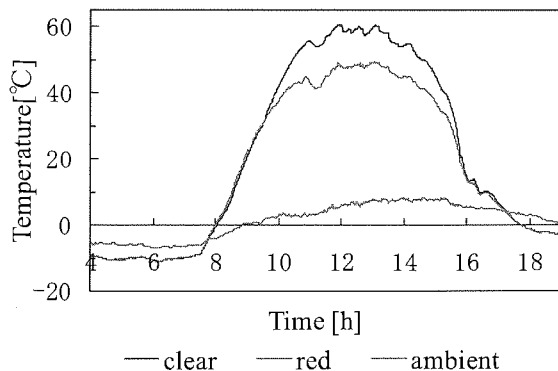
太陽電池のモジュール温度については、架台のアルミ板に隙間なしと隙間ありの2種類の状態で測定し、評価した。隙間ありの場合、晴天日、曇天日の日付は4.1節で扱った2/7、2/6だが、隙間なしのデータ取得日について、晴天日、紫素子-アモルファス Si は2010年2月20日、赤素子-単結晶 Si は2010年1月30日である。また、曇天日の赤素子-単結晶 Si は2010年1月31日である。

a. 晴天日

紫素子-アモルファス Si、隙間なし、2/7 の温度を図14(a)に示す。波長変換素子を適用したモジュールでは、リファレンスプレートで見られたような温度の違いは現れなかった。これは、裏面を断熱する事でモジュール構造の熱容量が増した事が推測される。次に、隙間なし、2/7 の赤素子-単結晶 Si の温度を図14(b)に示す。赤素子が透明アクリル板より最大で約10℃ほど低くなっていることが分かった。理由として波長変換する際、表側でストークス損によりエネルギーが消費され、裏面まで透過するエネルギーが減少したためと考えられる。これは、住宅用太陽電池モジュールに近い設置形態では、これと似た傾向が表れると推測される。



(a) violet m.-amorphous Si 紫素子-アモルファス Si (2/20)



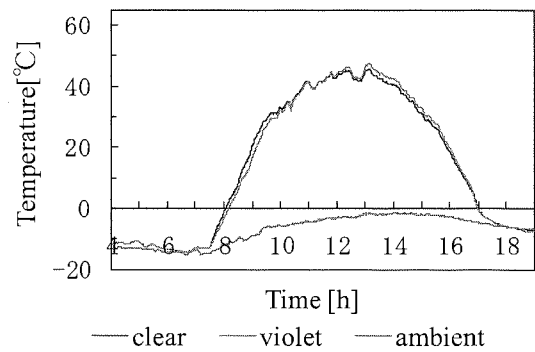
(b) red m.-monocrystal Si 赤素子-単結晶 Si (1/30)

Fig.14 Each module temperature variation with time

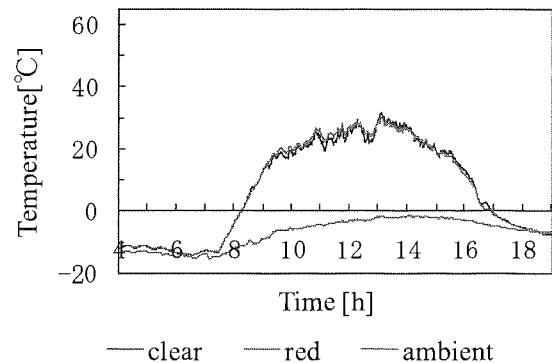
:no gap on the back.

図14 時刻に対する各モジュール温度変化 (隙間なし)

次に、隙間ありの紫素子-アモルファス Si、赤素子-単結晶 Si の温度を図15(a),(b)に示す。両者ともほとんど温度の違いは見られなかった。また、透明アクリル板-単結晶 Si の場合、温度の最大値が隙間なしより約30℃も低下した。このことから、隙間あり設置の場合、外気温度による影響が強くなると思われる。陸屋根形など裏面が外気に十分触れる状態では、このような傾向になることが推測される。



(a) violet m.-amorphous Si 紫素子-アモルファス Si



(b) red m.-monocrystal Si 赤素子-単結晶 Si

Fig.15 Each module temperature variation with time

:gap on the back.

図15 時刻に対する各モジュール温度変化 (隙間あり) (2/7)

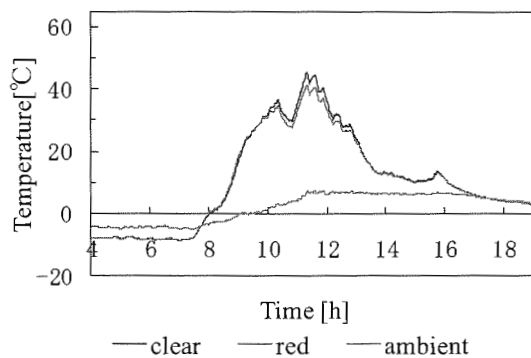
b. 曇天日

紫素子-アモルファス Si は、晴天日の隙間あり、なしで殆ど差が見られなかった。曇天日では更に変化はなかった。

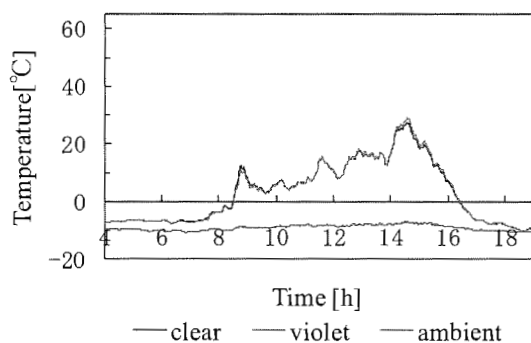
空隔なし、1/31 の赤素子-単結晶 Si は、図16(a)に示すが、波長変換モジュール温度は、晴天日ほど差がつかず、透明アクリルより僅かに低下した。隙間あり、2/6 の赤素子-単結晶 Si、図16(b)は殆ど差が見られなかった。

c. 熱分布画像

ネオサーモで撮影した、隙間なしの波長変換素子を適用した太陽電池モジュールの熱分布画像 (2/20, 13:30, 0.98kW/m²) を、図17に示す。アモルファス Si は隙間なし、単結晶 Si は隙間ありで、両者とも標準との違いは殆ど見られず、中心部の温度の方が高くなっている。図14(a)、15(b)と同様の傾向で、標準モジュールとの差が見られない。



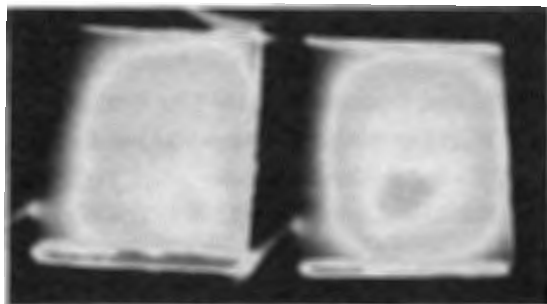
(a) red m.-monocrystal Si without gap
赤素子-単結晶 Si (空隔なし) (1/31)



(b) red m.-monocrystal Si with gap
赤素子-単結晶 Si (隙間あり) (2/6)

Fig.16 Each module temperature variation with time.

図16 時刻に対する各モジュール温度変化 曇天日



(a) amorphous Si left: violet m., right: clear

アモルファス Si (隙間なし) (左: 紫素子, 右: 透明アクリル板)



(b) monocrystal Si left: red m., right: clear

単結晶 Si (隙間あり) (左: 赤素子, 右: 透明アクリル板)

Fig.17 Thermo graphic of reference plate.

図17 太陽電池の熱分布画像 (2/20, 0.98kW/m²)

d. 温度変化に対する出力シミュレーション

温度変化による出力をセル温度補正係数 (アモルファス Si: $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$ 、単結晶 Si: $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$) を用いてシミュレートし、評価したものを表に示す。紫素子-アモルファス Si、空隔ありの赤素子-単結晶 Si は晴天日で 0.03% 、 -0.18% とほぼ変化はないが、赤素子-単結晶は 3.45% と出力が増加した。波長変換素子により温度が低下したためである。曇天日は大きな開きは無く、約 0.4% と出力が僅かに増加した結果となった。

表5 温度変化に対する出力シミュレーション

Table5 Output simulation effected by temperature variation.

Combination of PV and WSM	Wavelength shifted	
	fine	cloudy
violet m.-amorphous Si without gap	-0.09%	—
violet m.-amorphous Si with gap	0.03%	0.40%
red m.-monocrystal Si without gap	3.45%	0.47%
red m.-monocrystal Si with gap	-0.18%	0.33%

5 スペクトルと出力の測定結果

5.1 スペクトル

実際に透明アクリル板、波長変換素子を透過した時の放射照度分布を、晴天日 (2010年2月4日) 1.0 kW/m^2 の環境下で測定した。その太陽光スペクトルを図18に示す。センサーの前に何も無い状態で測定したスペクトルを naked、透明アクリル板を通した時のスペクトルを透明とした。アクリル板を通すことによって、 $300\text{ nm} \sim 360\text{ nm}$ の波長域をカットし、 360 nm 以上は naked と比べ、全体的に僅かに低下した特性となった。紫素子と透明アクリル板を比較すると、紫素子は紫外線部分を僅かに吸収し、紫色を僅かに蛍光した。同様に、赤素子は $400\text{ nm} \sim 600\text{ nm}$ (特に緑色) の波長域を大きく吸収し、赤色を蛍光した。また、アクリル板や紫素子と比べ、 1000 nm 以上で出射光が急激に減少している。

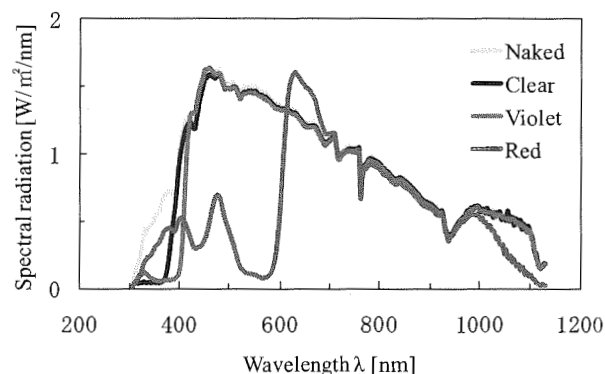


Fig.18 Spectral distribution after transmitted wavelength shifting materials.

図18 波長変換後の透過光スペクトル分布

スペクトル比を表6に示す。300～1105nmにおいて、nakedを基準とした放射照度積分比率は、透明アクリル板を通すことで7%低下した結果となった。さらに紫素子、赤素子を通すことで、9%、37%と低下した。透明アクリルと比べ、紫素子はあまり変わらないが、赤は大きく低下している。

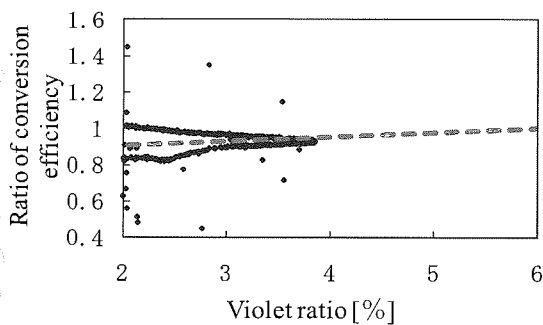
表6 スペクトルによる積分値
Table6 Integrated value of spectral distribution.

Incident radiation	Ratio
naked	1.00
clear	0.93
violet	0.91
red	0.63

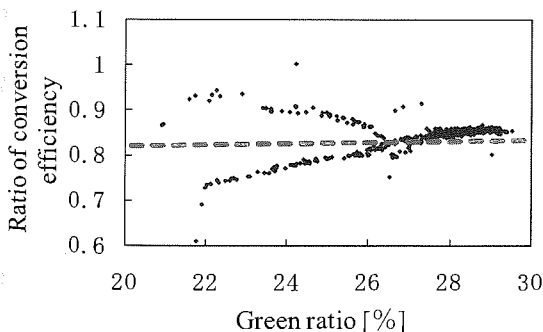
5.2 紫外線・緑色領域

a. 晴天日 (2/7)

晴天日における変換効率比を図19に示す。変換効率比とは、透明アクリル板の変換効率を標準とした波長変換素子の変換効率比率である。また、点線は測定データを元にした最小二乗法による1次近似直線を示し、午前、午後の違いはあるものの、傾きが正の増加を示した。つまり、吸収域の波長成分が多いほど変換効率比が増加している。また、アモルファスSiについては変換効率比が1に近いので、紫素子とPVの分光感度の相性が良い事が確認できた。



(a) violet ratio 紫外線比率



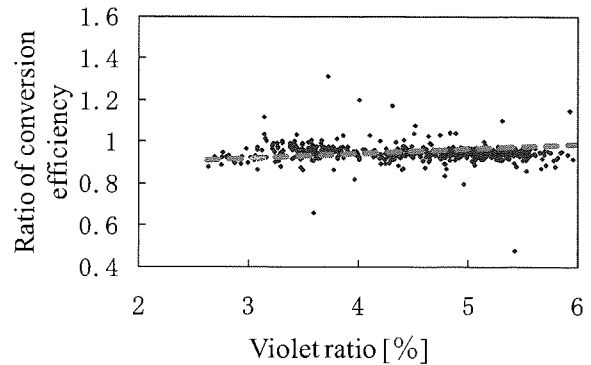
(b) green ratio 緑色比率

Fig.19 Conversion efficiency ratio variation with each wavelength range ratio in fine weather.

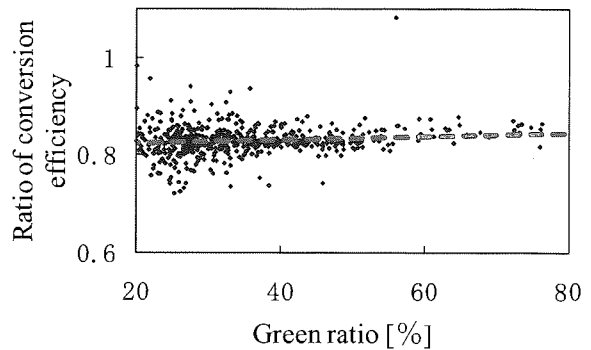
図19 各波長域比率に対する変換効率比の変化(晴天日)

b. 曇天日 (2/6)

曇天日における変換効率比を図20に示す。晴天日と同様に、両者とも吸収域比率が高いほど変換効率比が上がる事が確認できた。紫素子ーアモルファスSiについては、曇天日でも相性が良いことが分かった。



(a) violet ratio 紫外線比率



(b) green ratio 緑色比率

Fig.20 Conversion efficiency ratio variation with each wavelength range ratio in cloudy weather.

図20 各波長域比率に対する変換効率比の変化(曇天日)

c. 出力積算量

波長変換後の出力評価したものを表7に示す。紫素子ーアモルファスSiは晴天日より曇天日の方が効率は良くなっている。曇天日の方が、短波長成分の比率が高くなったためと考えられる。赤素子ー単結晶Siは天候による差はほとんど見られなかった。全体として見ると出力は低下している。今回のデータは2010年2月のもので、日射強度に対する積算量比率は紫外線が晴天日(2/7)で3.4%である。日射強度の強い夏季などは、散乱光が強く、短波長成分が多いので、年間を通して分析する必要がある。

表7 波長変換素子を適用後の出力評価

Table7 Output evaluation applied wavelength shifting materials.

Combination of PV and WSM	Wavelength shifted	
	fine	cloudy
violet m. — amorphous Si	-7.06%	-5.18%
red m. — monocrystal Si	-15.36%	-16.43%

6. 結論

本研究では、紫外線抑制に寄与する紫色蛍光染料を太陽電池に適用して、温度、出力への影響を評価した。また、赤色の蛍光染料についても同様に評価した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 紫色の波長変換素子により、入射光をアモルファス Si の分光感度にとって有効なスペクトルに変換する事で、紫外線を抑制することができた。

(2) リファレンスプレートの紫素子では、晴天日に標準プレートより最大 6°C の温度低下が確認された。紫外線は表面での反応が強いと推測される。太陽電池の分光感度は、アモルファス Si と結晶系を積層した、広い分光感度を有するものが増えており、紫外線によるエネルギーを表面から放出する事で、セル温度を僅かでも減少させる事ができれば、太陽電池にとって有効な改質フィルタとなる。

(3) セル温度補正係数を用いて出力をシミュレートした結果、空隔なしの赤素子単結晶 Si は温度が低下したため、出力が晴天日で 3.5% 増加した。赤色波長変換によりセル温度を下げる事ができ、出力増加につながる事が確認できた。しかし、隙間ありはほとんど変化が見られなかった。裏面への透過熱量の減少による温度への影響は、外気温度に比べると僅かであると推測される。しかし、モジュールの設置形態によっては出力増加に寄与する可能性がある。

(4) 吸収域の波長光の比率が増加するにつれて、変換効率比が増加する事が確認できた。今後、適用方法を更に検討する事で変換効率の向上が期待できる。具体的には、蛍光染料を太陽電池へ塗布する方法、蛍光染料の濃度の検討などである。

今後はアモルファス Si にとって出力の増加が期待される紫外線の強い夏季など、また波長分布が変化する他の期間において分析を行い、測定を継続する予定である。

参考文献

- (1) "Accelerated UV Test Methods and Selection Criteria for Encapsulants of Photovoltaic Modules", Michel D. Kempe, No.421, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (2008)
- (2) 例えば、板垣他「日射気候区別の分光日射データベースの構築」太陽／風力エネルギー講演論文集 2007、No.2、p.39-42 (2007)
- (3) 三菱重工社 HP,
http://www.mhi.co.jp/products/expand/a-si_specification_01.html
- (4) 濱川編著、「太陽光発電」、p.113、CMC(株)
- (5) 土井、山田、作田、「結晶系 Si 太陽電池セルへの順・逆方向電圧印加と発熱・破壊試験」太陽／風力エネルギー講演論文集 2007、No.106、p.445-448 (2007)
- (6) 鈴木、稲田、谷：「波長変換素子の光量解析法」、太陽エネルギー学会、Vol. 26, No. 4 (2000)
- (7) 安倍、油谷、西方、平田、谷内、谷：「光の波長変換を利用したクロレラの増殖に関する研究」、太陽エネルギー学会、Vol. 30, No. 1 (2004)
- (8) BASF 社 HP,
http://worldaccount.basf.com/wa/EU-en_GB/Catalog/Pigments/pi/BASF/range/pl_col_dyes_lumogen_f
- (9) JIS C8990 「地上設置の結晶シリコン太陽電池(PV)モジュール