最近の太陽電池とその評価測定技術[†]

中原 乾 志*

1. は じ め に

太陽光発電がようやく見通せるようになってきた。サンシャイン計画コスト目標 100 円/W**~200 円/W などかなり大胆過ぎ、不安の大きいものであったが、プロジェクト・スタート 13 年経過した今、研究開発も着実に進展の跡があり、われわれの身近にも太陽電池がかなり普及してきた。

そのような中で、太陽電池測定評価技術は地味ではあるがかなり進歩した。当初、測定誤差 30 % 程度のばらつきは当たりまえで、変換効率 10 % のものがよく測って見ると 7 % であったりしたものである。国内においての持ち回り測定や、ウィリアムバーグサミットにおける国際協力プロジェクトの持ち回り測定の結果もあって、今では誤差 5 % 以内の測定技術の基盤ができています。性能/コストの厳しい評価パラメータであり、その重要性の認識と技術整備に関し今やつと歩調が合ってきた感がある。一方、計測技術・測定標準化という非常にやかましい技術の世界のことで着実性が必要だが、どこか無理に進行させたところもありそうである。その一つの懸念に、絶対放射計の WRR スケール***の使用決定と、標準電球による整合性のこと、さきの大気外日射スペクトルの修正のこと、全天日射検定の誤差****の評価など、これらをそのままにして測定法を組み立ててある。光学関係者のかたがたのご批判の多いことも予想されるものである。

2. サンシャイン計画における太陽電池開発¹⁾

太陽エネルギーは、地球上に常時 1 kW/m² のエネルギ

ーを注いでおり、単位面積当たりでは他のエネルギーに比べて希薄だが、宇宙規模の面積に常時注いでいるわけだから利用しない手はない。サンシャイン計画の太陽電池開発目標を作成するに当たり、他の化石エネルギーによる発電コストと比較して、太陽電池発電がコスト的に見合うためのエネルギー変換効率と寿命は、10 % 20 年以上の性能で 100~200 円/W 程度のコストであることを示した。そのときの太陽電池価格は数万円/W だった。このコスト目標値は非常に困難度が高く、サンシャイン計画が発足する直前の各種専門家会議で多くの激論を交わしたが、不可能だとする結論はなく、したがって国家プロジェクトとして可能な限りの努力をしようとのことで、1974 年に計画はスタートした。

サンシャイン計画による太陽電池の研究開発が進行するとともに、太陽電池の性能向上、特に生産量とコスト低減は目覚ましく進歩した。そして、新しい種類の太陽電池も誕生した。太陽電池の性能向上とコスト低減は必ずしも相反するものでない。もし、変換効率が 5 割向上するならコスト上昇を 5 割以下に押さえれば良い。しかし、一般的に性能向上のための半導体材料の選択や構造の複雑化は、当然ながらコストの上昇を招く。コスト低減は、低コスト材料の使用や低コスト製造工程の採用によるが、太陽電池の量産化→低コスト化→需要拡大→量産化という正帰還作用による効果はたいへんに大きい。

図 1 太陽電池変換効率の推移

[†] Performance of a Recent Solar Cells and a Present of the Measurement Technology

* 電子技術総合研究所電子デバイス部信頼性研究室 Kenji Nakahara
〒305 つくば市梅園 1-1-4 電話 0298-54-5146
Electrotechnical Laboratory, 1-4, Umezono, Tsukuba-city, Ibaraki-Pref, 305 Japan

** 1 W の発電を得るに必要な太陽電池の価格、変換効率が 10 % のものなら入射太陽光が 100 mW/cm² として 100 cm² の太陽電池の価格である。

*** 世界放射基準によるスケール、1981 年 1 月 1 日から WMO (世界気象機関) の決定に基づき、従来の日射計スケール (IPS-56) を W-RR スケールに変更した。これは従来スケールに対し +2.2 % 補正したものと等価である。

**** 全天日射計には基準器が存在していないので、シャドーリング法などで絶対放射計から検定されるが誤差が多いといわれる。

太陽電池の性能は、太陽電池自身の構造が比較的単純なP/N半導体構造のため、基本的な改良をしない限り数年の研究開発で進歩の度合いは止まってしまうが、新しい材料や構造の採用により新たな発展が行なわれる。太陽電池変換効率は、このような経緯をたどって図1のような推移となっている。これは、近年最も展開の大きいアモルファスシリコン(a-Si)形太陽電池を中心にした変換効率の例である。'実用サイズのa-Si形もようやく10%の台に乗ったことが示されている。参考にした結晶シリコン(c-Si)形太陽電池は、10cm口以上のものについてだけ記した。低コストの多結晶形はすでに13%をクリアしている。

表1 太陽電池の価格の推移

	1974年	1982年	1984年	1987年
c-Si形	20~	2.4千円/W	1.3千円/W	0.9千円/W
a-Si形	30千円/W	4.8~2.9千円/W	2~3千円/W	

表2 a-Si形太陽電池のコストと生産量の関係(予想)

生産量	10 ³ W/年	10 ⁴ W/年	10 ⁵ W/年	10 ⁶ W/年	10 ⁷ W/年
モジュールコスト(円/W)	2182	1247	471	199	80

(変換効率10%)

桑野, 1985²⁾

一方、太陽電池コストの推移は表1に、そしてa-Si太陽電池の場合のコストと生産量の関係を表2に示す。残念ながら当初予定の1990年までの目標達成は、多少後ろに伸びそうである。

3. 太陽電池の種類と性能³⁾

1954年ベル研究所で誕生したSi結晶形太陽電池*以来、

表3 太陽電池の材料別分類

シリコン	結 晶	インゴット	単 結 晶	多 結 晶	低コスト	
		リボン(単結晶に近い)			"	
			シート(多結晶)			" 研究中
	アモルファス	水素系				" 要光劣化改善
		無素系				" 研究中
化合物半導体	III-V族	単結晶	高変換効率、高温使用可、耐放射線 ……………GaAs, InP等			
		多結晶	薄膜化可、集光用向き(宇宙用向き)			
	II-VI族	単結晶	物性上材料品質が下げられるから、……………CdS, CdTe, Cu ₂ S等			
		多結晶	スプレー法や印刷法が適用できる。			
	その他	単結晶	低コスト材料多し、ただし変換効率悪い……………Cu ₂ O, Se等			
		多結晶	……………($<1.8\%$, 1%)			
有機半導体			……………($<1\%$)…メロニン等			
半導体	電解液太陽電池		湿式は変換効率12%に達したか不安定、乾式はまた低性能			

表4 太陽電池の構造分類

pn接合形	通常形	
	内蔵電界形	BFS形(npp ⁺)等
	裏面反射形	
	ブラック表面形(textured surface)	CNR形等
pin接合形		a-Si形等
ヘテロ接合形(異種接合形)		SnO ₂ , Si, Cu ₂ S, CdS等
ショットキー(金属-半導体接触形)		
MIS形(金属-絶縁膜-半導体接触形)		Pt/SiO ₂ /Si等
多重接合形	タンデム形(積み重ね形)	GaAlAs, GaAs, a-Si-a-SiGe等
	垂直接合形	(集光用)

* 変換効率は6%だった。

すぐ後でCdSセルの提案、少し後でGaAsセル、ヘテロ接合セルの概念やショットキー接合セルの出現といったように、いろいろの種類の太陽電池が提案され試作され、その幾つかが実用化され、またなお研究途上の物も数多い。

今、太陽電池の種類を材料別および構造別の2段階に分類してみると表3および表4のようになる。以下、このうちの主だった太陽電池の構造と性能について述べる。

3.1 シリコン単結晶(c-Si)形太陽電池

概略図2のような構造であり、単結晶丸棒形インゴットを200μm程度(1cm当たり25枚程度)の厚さでスライスしたp形Si基板の表面に、りんを拡散して0.5μm程度の深さのn形層を設けてpn接合を形成した太陽電池である。電力用としては、表面側にグリッド状電極を設けて内部直列抵抗を小さくすることが必要となる。またこのままでは30~50%くらいの反射損が生ずるので、SiOなどの反射防止膜をコーティングして反射損を10%以下に下げる。なお、基板にn形を用い上部にp層を形成する形も可能だが、p基板のほうが性能が良い。単結晶形太陽電池の大きさは単結晶インゴットの大きさで決まるが、単結晶率の優れている新型CZ法**のもので15cm径までに達している。

図2 シリコン単結晶形太陽電池の概略的構造

上記のシンプルな構造での変換効率は10%止まりである。そこで変換効率向上のためにさまざまな方法が考案され、その一つとして、発生キャリアがpn接合面へ効果的に届くように、たとえばp基板裏面側にp⁺層(p形の濃度の強い層)を加えたBack Surface Field形のものがあり、この方法により変換効率は14%程度まで向上した。さらに、基板裏面に光反射膜を設けたBack Surface Reflector形、そして、表面を微細なピラミッド状の凹凸エッチングしてtextured surfaceにして表面反射を非常に小さくさせ、そこにpn結合を形成する方法がある。この方法によると変換効率が18%程度まで向上する。

シリコン単結晶形太陽電池は、最も完成度の高い太陽電池であり、変換効率はシンプルなもので10%程度、高効率対策のもので16%程度(10cm口)である。太陽電池のセル自身の寿命は20年以上十分にある。分光感度特性例は図3の曲線1,2で示す。

3.2 シリコン多結晶形太陽電池

**単結晶インゴットを製造する方法で、チョクラスキー法で改良したもの。

図3 各種太陽電池の分光感度特性例

前記の単結晶形基板材料の替わりに、低コスト形が多結晶基板を使用したものである。太陽電池用多結晶キャスト（鋳造法）は西独の Wacker 社を始め、米国、日本で開発が進められているものであり、大型の角形基板（30 cm 口）を低コストで製造するメリットがある。しかし、多結晶基板は結晶方位の異なる結晶粒の集まりであり、粒界における結晶欠陥や SiC などの不純物も多い。そのため、この形の太陽電池は、単結晶のものに比べて変換効率が低めであるが、現在、10 cm 口でも 12.5 % 程度に達している。この太陽電池は、見た目に単結晶形にない結晶方位の違いのできるモザイク模様がある。この分光感度は単結晶形とほとんど同じであるが、入射光が弱いと図3の曲線2'のような特性となる、いわゆる白色バイアス光効果⁷⁾があるものも多い。

3.3 シリコンリボン結晶形太陽電池

前記二つは、いずれもインゴットをスライスした基板を使用するが、このリボン結晶はシリコン融液から基板材料向けに 5 cm 幅程度のリボン状に引きながら固化して作られたものである。したがって、インゴットからスライスする工程が不要で、かつ、スライスのときの材料ロスがない低コスト形である。しかし、リボンシリコンの表面状態は、スライスし研磨したものとは異なり縦じまの目立った凹凸が多い。結晶状態はリボン製造方法により異なり、単結晶に近いものと多結晶そのものがあり、太陽電池にしたときの変換効率は 11 % 前後である。分光感度特性は多結晶のものとはほとんど同様である。なお、わが国ではこの研究開発は現在中断している。

図4 アルモファスシリコン (a-Si) 形太陽電池の基本的構造例

3.4 アモルファスシリコン (a-Si) 形太陽電池

アモルファス（非結晶）状のシリコン薄膜で作られた太

陽電池であり、基本的構造は図4に示すように、透明導電膜の付いたガラス基板の上に、プラズマCVD法*や光CVD法でアモルファス p, i, n 各層を成膜させて作られる。なお、ガラス基板の替わりにステンレス基板や高分子フィルムを使用し窓側に透明導電膜を用いたものもある。

アモルファスシリコンは、少数キャリアの拡散長が単結晶に比べ非常に小さいので、拡散によるキャリア捕獲を行なう pn 接合方式は使用できない。そこで、pn 層の中間に他層より十分に厚い i 層 (intrinsic (真正)) を設け光吸収はほとんどこの層で行なわせる。この i 層には両端の pn 層による電界が掛かっており、発生したキャリアはその電界によって pn 各層へ高速で移動収集される形となる。なお、a-Si は単結晶に比べ吸収係数が 1 桁程度大きいので、薄膜の形で利用される。また、a-Si 形太陽電池は大きさや形状に原理的な制限がなく、IC 製造技術と同様に直列多段集積**が精度よく容易に行なえることも特徴の一つである。

前記の基本型に対し、さらに変換効率を向上させるため、窓層を微結晶化 a-Si 膜を用い、あるいは p/i 界面の再結合防止のためのバッファ層 (p-SiC) を設けたり、裏面反射効果などを利用したものがある。また、タンデム形 a-Si 太陽電池が近年盛んに報告されているが、これは材料を変化させた pin 接合を複数段縦形に重ねたもので、分光感度帯域をそれぞれ分割して全体の変換効率を大きくさせている。これら a-Si 太陽電池の変換効率は、図1でも示したとおりシングルで 9.5 %, タンデムで 10.5 % 程度 (10 cm 口) に達しているが、依然として光劣化 (温度を上げると回復するから単なる劣化とは異なる) が大きい。その対策が最大の研究課題となっている。a-Si は、単結晶のように Si 原子同志が原子価で結合していないかわりに、普通、水素をターミネータとしている。この水素があまり安定に結合せず、光照射の結果で動いたりすることが光劣化になるらしい。a-Si 太陽電池の分光感度特性例を図3の曲線4に示しておく。この場合も多結晶シリコン形と同様に白色バイアス光効果があり、しかもその効果の現われ方は何種類かある。厳密には分光感度特性だけでなく、出力特性測定法に問題点を残すところが多い。

3.5 ガリウム・ヒ素 (GaAs) 系太陽電池

基本的には、n 形 GaAs 基板に Zn などの拡散により pn 接合を作った太陽電池である。GaAs 結晶は高価な材料であるが、物性上、高変換効率、高温使用可能 (集光用)、耐放射線 (宇宙用)、薄膜化可能の要素があり、特に宇宙用および集光用の高効率化のための開発がかなり行なわれており、薄膜化や Si 等、GaAs 以外の基板利用***や多結晶使用などの低コスト化の研究も行なわれている。

* CVD; Chemical Vapor Deposition

**同一板上に短冊状セルを多数並べて、各々を IC 技術で直列に接続したもので高出力電圧を得る。

***たとえば、Si 基板上に Ge を中間層として蒸着し、その上に CVD 法で GaAs を成長させた太陽電池。

高効率化のためには、内蔵電界効果や窓材の選択による表面再結合対策、そしてヘテロ接合（AlGaAs/GaAs）などの技術を駆使しており、長寿命で変換効率 20 % 以上のものが実現している。この太陽電池の分光感度特性例を図 3 の曲線 5 に示しておく。今後、さらにタンデム接合の使用により、変換効率 30 % 以上のものも実現の可能性があるといわれている。

3.6 CdS/CdTe 形太陽電池

Ⅱ－Ⅵ族系の中で最も安定で進歩した一つが CdS/CdTe ヘテロ接合太陽電池である。Ⅱ－Ⅵ族化合物半導体は、過剰少数キャリアの拡散長が短くてよく、そのため材料品質に対する要求が緩いので、製造の容易な方法、たとえばスプレー法や印刷法が利用できる。サンシャイン計画で開発した CdS/CdTe 太陽電池は、ガラス基板上に CdS ペーストをスクリーン印刷機で塗布し、N₂ ガス中で焼結させて n 形 CdS 膜を得、次に CdTe に In を加えて作った p 形のペーストを同様に印刷し焼結させて CdS/CdTe ヘテロ接合膜を作る。この方法で 30 cm² の大型太陽電池を製作し変換効率 8.5 % を達成し、劣化現象も非常に少なくコスト的にも十分将来性のあるものを完成させた。この太陽電池の分光感度特性例として図 3 の曲線 3 に示す。

4. 太陽電池の評価測定技術

太陽電池が多量に普及、商業化してくると、その性能評価測定法を統一しておく必要があるが、昭和 54 年度の実態調査によると、同一の太陽電池を別々の機関で測定比較した結果、変換効率で約 30 % のばらつきが生じた⁴⁾。

この測定・評価のばらつきを極力少なくするため、わが国においては、昭和 50 年から 4 年間開催されたサンシャイン計画・太陽光発電専門委員会にて地上用太陽電池の標準測定法（一次案）を作成した⁵⁾⁶⁾。その後、各機関において測定法の妥当性検証や規格化の作業検討が行なわれている。測定法は現在、アメリカの ASTM 化、わが国の JIS 化*、国際規格（IEC）化**の各々の準備がかなり進んでいる。しかし今現在、なお新型太陽電池の研究開発段階にあたるため今後追加検討を要する部分も多い。

標準測定法を測定させるには、レファレンスセル（基準セル）***の較正技術の確立とともに、レファレンスセルの供給体制を整えることが必要となる。このため、地上用についてわが国では新エネルギー総合開発機構（NEDO）が機械電子検査検定協会（JMI）に較正技術の開発を委託して、サンシャイン計画関連グループにレファレンスセルを暫定的に供給するシステムを取っている。

4.1 出力測定法の組み立て

太陽電池出力は入射光のスペクトルに直接的に依存するため、出力測定用光源の規定が多少複雑になっている。また、太陽電池の受光面の大きいことも光源に対する規定を

厳しくしている。そして、太陽電池温度も出力特性に大きく影響を与えるため、一般の電子部品の基準温度と同様の 25℃と規定****することになる。

4.1.1 太陽電池の出力特性

表 5 に、太陽電池の出力性能を表示するためのパラメータのいろいろを示しておく。太陽電池出力特性を代表する基本パラメータは、短絡電流（*I_{sc}*）、開放電圧（*V_{oc}*）、フィルファクタ（FF）であるが、一般的には変換効率（ η ）や最大出力（*P_{max}*）がよく使用される。

表 5 太陽電池出力パラメータのいろいろ

等価回路パラメータ	
光電流 (I_p)
ダイオード: D	
内部並列抵抗 (R_{sh})	
内部直列抵抗 (R_s)	
基本出力パラメータ	
短絡電流 (I_{sc})	
開放電圧 (V_{oc})	
フィルファクタ (FF)	曲線因子
最適動作電流 (I_{op})	出力電流・電圧極が最大になるときの出力電流または電圧
最適動作電圧 (V_{op})	
最大出力 (P_{max})	$P_{max} = I_{op} \cdot V_{op}$
真性変換効率 (η_N)	有効受光面積の入射エネルギーに対する最大出力
電圧電流特性	
分光感度特性	主に短絡電流の入射光波長依存性を示す。
実用出力パラメータ	
電圧規定出力 (P_v)	
電流規定出力 (P_i)	
電圧規定電流 (I_v)	
電流規定電圧 (V_i)	
実用変換効率 (η_{PR})	入射面全面積の入射エネルギーに対する最大出力

$$P_{\max}=I_{sc}\cdot V_{oc}\cdot FF\cdots\cdots\cdots(1)$$

$$\eta=\frac{P_{\max}}{(\text{放射照度})\times(\text{受光面積})}\cdots\cdots\cdots(2)$$

$$FF=P_{\max}/(I_{sc}\cdot V_{oc})\cdots\cdots\cdots(3)$$

光電流 *I_p* は入射光スペクトル $\phi(\lambda)$ と分光感度 *Q*(λ) が与えられると次式に従う。

$$I_p=I_{sc}|_{R_s=0}=\int_0^\infty \phi(\lambda)\cdot Q(\lambda)d\lambda\cdots\cdots\cdots(4)$$

しかし、a-Si 形等の低コスト形太陽電池の分光感度 *Q*(λ) は、入射光のスペクトル $\phi(\lambda)$ が変化すると分光感度も変化してしまうという、いわゆるバイアス光効果がある⁷⁾。したがって、(4)式を満足するための分光感度 *Q*(λ) の測定には、 $\phi(\lambda)$ なるスペクトルを有したバイアス光を印加して行なうものであり、標準測定法においては、基準太陽光スペクトルに近似したものとなる。

4.1.2 基準太陽光と出力測定用光源

地上太陽光のスペクトルは、大気の流れ方やエアマス値 *m* の違いで大きく変化する。このような下での太陽電池の変換効率 η はさまざまな値を示してしまうので、評価

* 光産業技術振興会内太陽電池専門委員会で調整中。
 ** TC-8.2
 ***従来、標準太陽電池といていたことがある。

****測定法一次案の段階では 28℃で規定した。

するにはつづが悪い。現在検討中の IEC 案は、太陽電池に取って傾斜面の全天日射が実際的であるということ

エアマス (m)=1.5
大気混濁係数 (B_{0.5})=0.27
可降水量 (W)=14.2 mm
可降オゾン量 (O₃)=3.4 mm
アルベード (R)=0.2
傾斜角 (θ)=37°
放射照度=100 mW/cm²

W.Length (nm)	Irradiance (mw/m ² +nm)	W.Length (nm)	Irradiance (mw/m ² +nm)	W.Length (nm)	Irradiance (mw/m ² +nm)
305	9.5	740	1210.8	1520	262.5
310	42.3	752.5	1193.4	1539	274.1
315	107.8	757.5	1175.1	1568	274.9
320	180.9	762.5	642.9	1578	244.5
325	246.8	767.5	1030.3	1592	247.3
330	395.2	780	1130.7	1610	228.6
335	390.0	800	1081.2	1630	244.4
340	435.1	816	848.9	1646	234.7
345	438.8	823.7	784.7	1678	220.4
350	483.6	831.5	916.1	1740	171.5
360	520.1	840	959.5	1800	30.7
370	666.0	860	978.5	1860	2.0
380	712.3	880	932.9	1920	1.2
390	720.5	905	748.3	1960	21.2
400	1012.8	915	667.3	1985	91.1
410	1157.8	925	690.1	2005	26.8
420	1183.6	930	403.5	2035	99.5
430	1071.5	937	258.2	2065	60.4
440	1301.5	948	313.5	2100	89.1
450	1525.5	965	526.6	2148	82.1
460	1599.0	980	646.2	2198	71.5
470	1580.4	993.5	746.5	2270	70.2
480	1627.7	1040	690.3	2360	62.0
490	1538.6	1070	637.3	2450	21.2
500	1548.2	1100	412.4	2494	18.5
510	1585.9	1120	108.9	2537	3.2
520	1484.4	1130	189.0	2941	4.4
530	1571.8	1137	132.1	2973	7.6
540	1550.2	1161	338.9	3005	6.5
550	1560.9	1180	459.8	3056	3.2
570	1501.0	1200	423.4	3132	5.4
590	1395.0	1235	480.3	3156	19.4
610	1484.8	1290	412.9	3204	1.3
630	1433.6	1320	250.1	3245	3.2
650	1419.4	1350	32.5	3317	13.1
670	1391.8	1395	1.6	3344	3.2
690	1129.6	1442.5	55.7	3450	13.3
710	1316.3	1462.5	105.1	3573	11.9
718	1010.0	1477	105.5	3765	9.8
724.4	1042.8	1497	182.0	4045	7.5

の傾斜面全天日射（直達光+散乱光）の基準太陽光スペクトルを提案しており、JIS 案もこれに追従した形で検討されている*。この基準太陽光スペクトル ϕ(λ) を表 6 に示しておく⁸⁾。

太陽電池出力測定評価には上記の基準太陽光が必要になり、これを自然太陽光から得る場合、(1)光発電としての実

際的な光源で、かつ運転費のいらない大型光源だが、(2)天候や時間帯に左右され採光チャンスが少ない。(3)屋外での採光は気温や風などの周囲条件がいろいろ変化する。したがって、大面積の太陽電池パネルの測定などやむを得ない場合以外は、人工光源（ソーラシミュレータ）を使用する。ただし、基準太陽光スペクトルの近似度の高い再現は期待できない。實際上、表 7 に示すような性能で、そのソーラシミュレータのスペクトル特性は図 5 の程度のものである。スペクトルは、次項で述べるレファレンスセル方式による補償が必要となる。また検討中の IEC 案および JIS 案は、表 8 のようなクラス分けで規定しようとしている。図 6、図 7 に定常光形ソーラシミュレータ、お

表 7 ソーラシミュレータの性能例

	定常光形ソーラシミュレータ (Xeショートアークランプ・ 1ソーラ形例)	パルス光形ソーラシミュレータ (低コスト大面積光源、光照 射での温度上昇が生じない、 高速測定回路が必要)
スペクトル	補正フィルタにより、紫外・近赤外の輝線帯積分放射量を概略的に補正する。全大Am1形、直達Am1、1.5、2形など	定常光形と同じ、ただし電流で変化する
放射照度	70~130mW/cm ² 可変	電流では20~120mW/cm ² 可変
均一性	有効照射面に $\leq \pm 3\%$	$\pm 3\%$ 程度
ビーム平行度	$\leq \pm 5^\circ$	$\pm 15^\circ$ (サブテンス角: $\pm 3^\circ$)
放射安定度	リップル $\approx 1\%$ ゆらぎ $\approx 0.4\%$ ドリフト $\approx 2\%$ (掃還制御あり)	単一パルス(平担): $\pm 1\%$ 程度 繰返しパルス: $\pm 3\%$ 程度 照射時間 3mS (平担時間1.5mS)
照射面積	80φ(300W)、140φ(1kW) 280φ(2kW)、400φ(5kW) ……1m×1.5m(水冷30kW)	$\pm 15^\circ$ 照射角、光源から4m点 で2m×2m

図 5 ソーラシミュレータのスペクトル

表 8 ソーラシミュレータのクラス分け

太陽電池用ソーラシミュレータ			
クラス	A	B	C
場所むら	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 3\%$ ($\leq \pm 5\%$)	$\leq \pm 10\%$
時間変動率	$\leq \pm 1\%$ ($\leq \pm 2\%$)	$\leq \pm 3\%$ ($\leq \pm 5\%$)	$\leq \pm 10\%$
スペクトル* 合致度	0.75 -1.25	0.6 -1.4	0.4 -2.0

* 400~1,100 nm間 100 nm毎分割評価、ただし、900~1,100 nmは 200 nm分割 () : IEC案

* 測定法一次案では直達日射であり、大気条件も若干異なっていた。

図 6 定常光形ソーラシミュレータの概略構成

図 7 パルス形ソーラシミュレータの概略構成

よびパルス光形ソーラシミュレータの概略構成を示しておく。

4.1.3 レファレンスセル方式⁵⁾

太陽電池の測定の手順は、(1)測定対象の太陽電池群（同一ロット）から代表的分光感度特性の太陽電池を選出し、(2)基準太陽光の下で短絡電流 I_{sc} を測定し、これをレファレンスセルの較正值とする。(3)測定用光源（ソーラシミュレータ）の照射面にレファレンスセルをセットし、そのときの短絡電流が、較正值と同一になるように放射照度を調整する。レファレンスセルの温度は較正のときと同一の 25°C にしておく。これで等価的基準太陽光の設定ができたことになる。次に、(4)被測定太陽電池の変換効率などの出力特性が測定される手順になる。なお試作太陽電池の測定などに適用されている簡便な方法で、すでに較正されている「被測定太陽電池とは別の種類」のレファレンスセルを用いて行なう方法があるが、分光感度特性が被測定太陽電池にどの程度近いかで測定誤差が決まる。

レファレンスセルは、レファレンスセルと相対的に同じ分光感度を持った太陽電池の測定に当たって、測定用光源の基準太陽光換算での放射照度を決定するためのものである。この際、分光感度特性に $\Delta q(\lambda)$ の差があるとすると、そのための測定誤差 ΔI_{sc} は $\Delta q(\lambda)$ と $\Delta \phi(\lambda)$ の積和に比例する。ただし、 $\Delta \phi(\lambda)$ は測定用光源の基準太陽光スペクトルからのずれである。

4.1.4 レファレンスセルの較正

セル（太陽電池素子）は、セルの温度制御とセル面の保護のために規定の標準ケースにマウントしてある。

較正值の表示は、地上用の場合、出力測定用の基準放射照度が 100 mW/cm^2 （この光の強さを 1 ソーラ solar または 1 サン sun と呼んでいる）のため、この単位の短絡電流 ($\text{A}/100\text{ mW}\cdot\text{cm}^2$) で示す場合が多いが、単位放射照度当たりの値 ($\text{A/mW}\cdot\text{cm}^2$) もある。宇宙用の場合は、地球の公転楕円軌道による平均距離（これを 1 A.U. astronomical unit と呼ぶ）の大気外日射（＝太陽定数）が単位となっており、 137.6 mW/cm^2 が今日の正しい値*とされている。レファレンスセルの較正パラメータに短絡電流が使用される理由は、光起電流（＝短絡電流）が光スペクトルに直接的に影響を受けるパラメータであるからだ。レファレンスセルは、この較正值のほかにセルの種類や分光感度特性の表示が必要であり、さらに開放電圧や電圧電流特性が表示されることも多い。なお、宇宙用のレファレンスセルの一種のバルーンセルと呼ばれるものでは、短絡電流測定用の抵抗器ごと較正されているため、較正值の表示は電圧となる。

(1) 宇宙用の較正用光源

宇宙用のバルーンフライトシステムによる較正セルはバルーンセルと呼ばれ、約 36 km 上空のほとんど大気のない所での直接的な大気外日射採光による宇宙用レファレンスセルであり、宇宙用レファレンスセルの一次基準として利用される重要なものである。ただし、実際に出力測定に使用するレファレンスセルは、この一次基準を山頂日射や宇宙用ソーラシミュレータを用いて写し替えた二次器となる。写し替えの方法は、バルーンセルと同一種類、同一分光感度特性の写し替え用のセル（二次器）を用意し、バルーンセルとともに光源下にセットして、バルーンセル出力 V_{out} が較正值 V_{calib} に等しくなるように放射照度を調整したときの二次器の短絡電流＝較正值 I_{calib} を求める。光源が日射の場合は、二次器の短絡電流 I_{sc} にバルーンセル出力の較正值に対する比 V_{calib}/V_{out} を乗じた外挿法**となる。

(2) 地上用の較正用光源

宇宙用と異なり基準太陽光スペクトルの直接的な採光はたいへんに難しい。地上用基準太陽光スペクトルは、変動の多い地上日射の内からモデル化して求めた代表的日射スペクトルである⁸⁾。したがって、基準太陽光スペクトルと一致する日射はそうたびたび採光できるものではない。そこで、わが国は次に述べる補正計算式屋内較正法を採用し、これを IEC にも提案してるが、IEC には全天日射を用いる英米案、直達日射を用いるフランス案、日本案にほとんど近い西独案の合計 4 案が提出されている⁹⁾。現在、この中で英米案が最も攻勢である。そのため、IEC 案は日射による屋外法などで較正したレファレンスセルを一次基準器とし、これをソーラシミュレータで写し替えた二次器

* 1981 年以前は 135.3 mW/cm^2 の値が使用されていた。

** 2 日間以上にわたり多数回測定して平均を取る。

を作って測定用レファレンスセルとすることが提案されている。

(a) 補正計算式屋内較正法¹⁰⁾

スペクトルの近似度の良い安定したソーラシミュレータを較正用光源に選び、次式に基づき較正值 I_{calib} を決定する。ここで、 I_{sc} はソーラシミュレータ下でのレファレンスセルの短絡電流、 $\phi_s(\lambda)$ は基準太陽光スペクトル、 $\phi_m'(\lambda)$ はソーラシミュレータの測定スペクトル、 ϕ_M はソーラシミュレータの絶対放射照度、 $\phi_m(\lambda)$ はソーラシミュレータの絶対補正スペクトル、 $Q(\lambda)$ はレファレンスセルの分光感度である。原理上は、較正用光源のスペクトルに条件はいらぬはずだが、太陽電池には微妙に非線形特性を持つものが多いため、スペクトル近似度等に規定を付け表8で示したAクラスを使用する。

$$\left. \begin{aligned} I_{calib} &= I_{sc} \cdot \frac{\int_0^\infty \phi_s(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \phi_m(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda} \\ \phi_m(\lambda) &= \phi_m'(\lambda) \frac{\phi_M}{\int_0^\infty \phi_m'(\lambda) d\lambda} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

この較正法は、ソーラシミュレータのスペクトルを測定するためのスペクトルラジオメータが基準になる。すなわち、スペクトルラジオメータの感度を較正する分光標準ランプが基準となっているが、すでに IEC 案としては WRR スケールの放射計基準であることが合意されているため、(5)式下のように、スペクトルラジオメータに対し、測定されたスペクトルの積分放射照度で、WRR スケールの放射計と一致するように補正する方法を採用する。ただし、その補正量が有意義で生ずるかどうかは不明である。

(b) 全天日射による較正法

前記したような基準大気条件と一致した基準太陽光スペクトルの採光はほとんど困難であるが、実用上レファレンスセルの較正の範囲の基準太陽光スペクトルの採光は可能である。しかし、測定中の日射変動や傾斜面日射の地表からの反射光はかなりやっかいである。日射変動については、安定な日射時を選ぶこと、および多数回測定しその平均を取ることである。反射については、採光面を水平にした全天日射法、あるいは水平面反射光の遮へい付き傾斜面日射法となる。この方法における英米案の採光条件は；

- ・地表反射光の入射は3%以下
- ・雲のない快晴の日射
- ・全天日射計で測った全天日射量 800 W/m² 以上
- ・散乱日射成分は全天日射の25%以下
- ・全天日射受光（水平）のときは太陽高度 54° 以上
(AM ≤ 1.24)
- ・太陽追尾の傾斜面日射受光のとき、

c-Si 形の場合は AM 1.0 ~ AM 2.0

a-Si 形の場合は AM 1.0 ~ AM 1.5

とした上で、基本的に(5)式と同じ補正計算を行なう提案になっているが、一方で日射量当たりの短絡電流をもって較

正值としてもよい場合が多いとも述べている。

全天日射法は、エアマス値の差によるスペクトル変化が少ないので、基準太陽光に近い日射採光が期待でき、実際に c-Si 形太陽電池の場合などは、日射量当たりの短絡電流で較正してもよい場合が多い。しかし、a-Si 形太陽電池などに適用できる厳密な基準太陽光を得るための採光条件はかなり困難なものであり、むしろ採光条件を緩和して計算補正をしたほうが採光チャンスを大きくさせ現実的である。なお、この英米案は WRR スケールの絶対放射計で検定された全天日射計を使用する。

この全天日射法は、最も実際的な較正方法であり、一次基準器としてなら採光条件の厳しいことはやむを得ないはずである。今後、補正計算に頼ることのない適切な採光条件設定方法が開発されることを期待したい。

(c) 直達日射による較正法

直達日射法は、変動要素の多い天空光が含まないことが長所であるが、厳密な直達日射だけを採光するためのコリメーションフードの接続は困難。実際上は、較正用レファレンスセルのコリメーションフードを、日射計やスペクトルラジオメータと開口角を一致させることで、天空散乱光の混入による誤差を相殺させる。しかし、太陽光球周辺の散乱日射はかなり強力のため、太陽追尾誤差も含め、コリメーションフード間の微妙な誤差による測定誤差はかなり注意がいる。フランスはこの方法を IEC に提案している。そのときの採光条件は；

- ・快晴で太陽光球の周囲 15° 以内に雲がないこと
- ・直達日射量 800 W/m² 以上
- ・大気条件の安定度は、レファレンスセルの短絡電流変動が 30 秒間 ± 0.5 % 以下であること
- ・AM 1.0 ~ AM 2.0
- ・散乱日射成分は、コリメーションフードを付けたときと付けないときのレファレンスセルの短絡電流比が 1.2 以下

そして、このフランス案は4バンドのバンドパスフィルタを使用した直達日射スペクトル補正法であるが、考え方として前記の IEC 全天日射法と同様である。

4.2 測定法の今後の問題

新型太陽電池がまだまだ開発が続いている中で、太陽電池標準測定法の JIS 案や IEC 案の議論が行なわれているのである。おそらく最終決定までにはまだ少々時間が掛かると思われる。そして、以上に紹介した測定方法案は今後幾つかの部分の見直しや変更が行なわれる可能性が十分ある。たとえば今、次のような事項の指摘がある。

(1) a-Si 形等のように、厳密には入射放射照度・光起電流関係に直線比例関係がないものについては、レファレンスセル方式の適用性が怪しい。このことの検討と対策が必要

(2) タンデム形太陽電池は、分光感度の異なる複数セルの合成体である。したがって、このレファレンスセル方式の検討と対策、分光感度の測定技術の確立が必要

- (3) 全天日射計の測定精度の向上
- (4) WRR 放射計スケールと標準電球スケールの整合性について

文 献

- (1) 工業技術院サンシャイン計画推進本部：サンシャイン計画の基本方針及び実施計画，サンシャイン計画10年の歩み，サンシャイン計画10周年記念事業工業技術院実行委員会，日本産業技術振興会（昭59）4
- (2) 桑野幸徳：アモルファス太陽電池の経済性の検討，太陽電池ハンドブック，電気学会太陽電池調査専門委員会，コロナ社（昭60）309
- (3) 木村，徳山，小長井，池上，田中：各種太陽電池素子，太陽光発電，高橋清，浜川圭弘，徳川昭雄，森北出版（昭55）146～321
- (4) 後川，中原，吉川：脚光を浴びる太陽電池標準測定法（第3回），電子材料9月号（昭56）76～84
- (5) 同上（第1回）〃7月号（昭56）111～119
- (6) 同上（第2回）〃8月号（昭56）77～84
- (7) 由井尚正，中原乾志：バイアス光法による太陽電池の分光感度測定，電総研彙報49-2（昭60）39～45
- (8) Bird, R. E., Hulstrom, R. L. and Lewies, L. J. : Terrestrial solar spectral data sets, Salar Energy 30-6 (1980), 563～573
- (9) Treble, F. C. : The calibration of primary terrestrial flat-plate reference devices a proposed international standard, Photovoltaic Solar Energy Conference 27～31 Oct. 1986, 89～94
- (10) 中原乾志，白倉裕一：レファレンスソーラーセルの屋内校正法，応用物理 53-11（昭59）996～1003