

太陽電池の標準出力測定

下川 隆一

Standard Measurement Methods of Output Power for Solar Cells

Ryuichi SHIMOKAWA

The standard measurement methods of output power for c-Si and a-Si solar cells are discussed. It is concluded that primary reference cell calibration against the World Radiometric Reference scale plays an important part in the measurement uncertainty. The measurement methods of output power for thin-film solar cells and multijunction solar cells are also discussed.

Key words: standard measuring method, reference cell, calibration method, solar cells

石油代替エネルギーのひとつとして太陽光発電技術が注目され、低価格の結晶系太陽電池・アモルファス太陽電池の実用普及化が急速に進んでいる。この実用化に伴い高効率化競争が激しくなり、出力測定法の分野においても新しい研究課題が生まれている。そのひとつは、変換効率が理論限界値に近づいている単結晶シリコン太陽電池を中心に、出力測定技術の高精度化が求められていること。もうひとつは、さらなる高効率化を目指した多接合太陽電池が開発され、従来の基準太陽電池方式による出力測定方法の限界が生じていることである。前者は、一次基準太陽電池の校正精度をもう一段階引き上げる研究努力を要求し、後者は、新型太陽電池に適合した新しい出力測定技術の開発を促している。さらに、後者は、測定技術以外の課題をいくつか提起している。例えば、単一接合太陽電池の場合には、各種の大気条件における太陽電池出力を理論計算から求めることができたが、多接合太陽電池の場合には、それぞれの気象条件下で実際に出力測定を行う必要があり、太陽光発電システムの設計のための参照太陽光のレーティング問題を複雑にしている。

本稿では、太陽電池標準測定法創設の経緯を簡単に述べたうえで、太陽電池 JIS 規格の根幹をなす標準出力測定法

について解説を行い、最後に、JIS 化が進行中である新型太陽電池の出力測定法について簡単に述べる。詳細は、誌面の関係上、文献^{1,2)}を参照していただきたい。また、太陽電池の普及に伴い発生した認証制度の問題も重要であるが、誌面の関係で割愛する。

1. 標準出力測定法体系の確立と国際標準化

標準化研究は、「その分野の研究開発および普及のための戦略的研究活動である」という認識のもとに、太陽電池研究開発プロジェクトの発足（1974年）当初から、電総研（電子技術総合研究所、現在の産業技術総合研究所）で出力測定法の研究が始められた。工業標準化については、光産業技術振興協会の太陽電池標準化委員会を中心に JIS 素案作成が進められ、機電検（機械電子検査検定協会、現在の日本品質保証機構）が太陽電池セル・モジュールの測定評価センターとしての役割を担うことになった。1983年に「分光放射照度標準電球に基づく基準太陽電池の屋内校正法³⁾」を確立し、日本の標準校正法として提案された。標準化委員会は、この屋内校正法を根幹とする標準出力測定法体系の確立（世界初の太陽電池測定法の規格 JIS C 8911-8918 を 1989 年に創設）と国際標準化のコンセンサスを得

表1 太陽電池 JIS 体系。

一次基準太陽電池セル (JIS C 8910)

二次基準結晶系太陽電池セル (JIS C 8911)
 結晶系太陽電池測定用ソーラシミュレータ (JIS C 8912)
 結晶系太陽電池セル出力測定方法 (JIS C 8913)
 結晶系太陽電池モジュール出力測定方法 (JIS C 8914)
 結晶系太陽電池分光感度特性測定方法 (JIS C 8915)
 結晶系太陽電池セル・モジュールの出力電圧・出力電流の温度係数測定方法 (JIS C 8916)
 結晶系太陽電池モジュールの環境試験方法及び耐久性試験方法 (JIS C 8917)
 結晶系太陽電池モジュール (JIS C 8918)
 結晶系太陽電池セル・モジュール屋外出力測定方法 (JIS C 8919)

二次基準アモルファス太陽電池セル (JIS C 8931)
 二次基準アモルファス太陽電池サブモジュール (JIS C 8932)
 アモルファス太陽電池測定用ソーラシミュレータ (JIS C 8933)
 アモルファス太陽電池セル出力測定方法 (JIS C 8934)
 アモルファス太陽電池モジュール出力測定方法 (JIS C 8935)
 アモルファス太陽電池分光感度特性測定方法 (JIS C 8936)
 アモルファス太陽電池セル・モジュールの出力電圧・出力電流の温度係数測定方法 (JIS C 8937)
 アモルファス太陽電池モジュールの環境試験方法及び耐久性試験方法 (JIS C 8938)
 アモルファス太陽電池モジュール (JIS C 8939)
 アモルファス太陽電池セル・モジュール屋外出力測定方法 (JIS C 8940)

る努力を進め、日本の屋内校正法を IEC (International Electrotechnical Commission) 国際規格案として 1986 年に提案した。3 度の国際太陽電池持ち回り測定⁴⁻⁶⁾において良好な測定結果を提出し、国際的な信頼を得て現在定着している。最近、世界放射計測基準 (world radiometric reference; WRR) にトレーサブルな放射照度測定が要求されるに至り、電総研は、この放射照度測定の国際的なトレーサビリティ体系を確立するために、ソーラシミュレーター (疑似太陽光) 光下でも使用可能で、かつ、WRR にトレーサブルな放射照度測定が可能な広開口角絶対放射計の開発⁷⁾を行った。この放射計を使用することにより、WRR にトレーサブルな放射照度測定に基づく一次基準太陽電池の校正が可能になった。この校正方法を規格化したものが、一次基準太陽電池セル規格 JIS C 8910 である (最近、IEC TC 82 で IEC 規格として採択)。標準出力測定法 JIS 体系は、出力電流が放射照度に対してリニアであるか否かで 2 系統に分かれている。リニアの代表が結晶系太陽電池 JIS 体系で、リニアでないものの代表がアモルファス太陽電池 JIS 体系である。これまでに、体系の根幹をなす一次基準太陽電池セル JIS C 8910 と、結晶系太陽電池 JIS C 8911-8919、アモルファス太陽電池 JIS C 8931-8940 が規格化されている (表 1)。

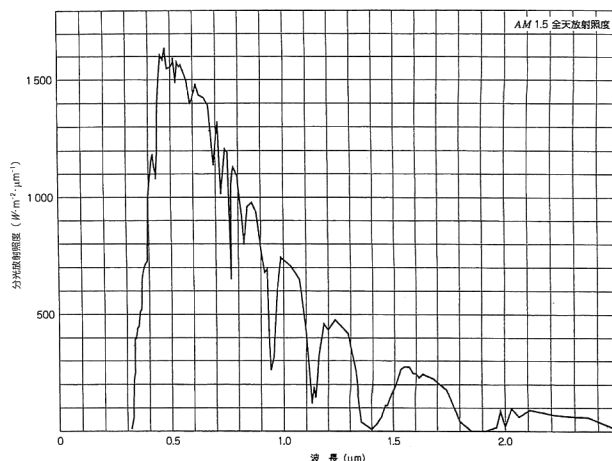


図1 基準太陽光の分光放射照度分布。

2. 太陽電池の出力測定と測定基準

2.1 測定基準

太陽電池は、単結晶、多結晶、アモルファス等の種々の材質、種々の構造のものが製品化されており、いずれの太陽電池も固有の分光感度特性をもっている。このような太陽電池の光電流出力は、太陽光の強度 (放射照度) とその分光分布 (分光放射照度分布) が異なることにより大きく異なる。そのため、太陽電池の出力測定は、以下の共通の基準状態 (standard test conditions; STC) のもとで行われることが国際的に約束されている (JIS C 8910)。

- 基準状態 (1) 太陽電池セル・モジュール温度: 25°C
 (2) 分光分布: AM (エアマス) 1.5 全天日射基準太陽光
 (3) 放射照度: 1000 W/m²

ここでいう基準太陽光は、太陽電池の出力特性を共通の条件で表現するために、放射照度および分光放射照度分布を規定した自然太陽光のことで、現在の IEC および JIS 規格では、自然太陽光の理論計算コードが採用されている。基準太陽光の分光放射照度分布を図 1 に示す。基準太陽光として理論計算コードを採用しているため、世界の任意の大気条件および測定条件下の自然太陽光の放射照度とその分光分布を一義的に算出することができ、太陽電池出力の各種大気条件下での出力値への換算も容易である。他方、理論コードの誤りや改良により、基準太陽光が変更される可能性があるというデメリットがある。

2.2 太陽電池の出力測定 (基準太陽電池方式)

実際の太陽電池セル・モジュールの出力測定は、基準太陽光の状態を実現するチャンスが非常に少ないことから、あらかじめ基準太陽光下における出力値に校正された基準太陽電池セル (基準セルと略す) を使用して測定光源の放

射照度を設定または測定し、等価的に基準太陽光下における太陽電池セル・モジュールの出力を評価する方法（基準太陽電池方式とよばれている）が標準出力測定法として採用されている。測定光源の放射照度とその分光分布の2要素を同時に調整する機能を基準セルに行わせているため、基準セルと被測定太陽電池の相対分光感度が一致することが要求されている。

基準太陽電池方式に従って太陽電池の出力測定を行う場合、まず、基準太陽光（分光放射照度 $E_{\text{ref},\lambda}$ ）のもとで校正された基準セル（分光感度 $R_{\text{ref},\lambda}$ ）を使用して、その出力電流 $I_{\text{ref-meas}}$ が校正値 $I_{\text{ref-ref}}$ になるように、ソーラーシミュレーターの放射照度（分光放射照度 $E_{\text{meas},\lambda}$ ）を調整する。これを式で表現すると、

$$\begin{aligned} I_{\text{ref-meas}} &= \int E_{\text{meas},\lambda} R_{\text{ref},\lambda} d\lambda \\ &= I_{\text{ref-ref}} = \int E_{\text{ref},\lambda} R_{\text{ref},\lambda} d\lambda \quad (1) \end{aligned}$$

となる。次に、このソーラーシミュレーターのもとで被測定太陽電池（分光感度 $R_{\text{cell},\lambda}$ ）の出力測定を行う。ここで、基準セルと被測定太陽電池の相対分光感度が同じであることから、 $R_{\text{cell},\lambda} = kR_{\text{ref},\lambda}$ と表すことができ、この被測定太陽電池の出力電流 $I_{\text{cell-meas}}$ は、式(1)から

$$\begin{aligned} I_{\text{cell-meas}} &= \int E_{\text{meas},\lambda} R_{\text{cell},\lambda} d\lambda \\ &= \int E_{\text{meas},\lambda} k R_{\text{ref},\lambda} d\lambda \\ &= k \int E_{\text{ref},\lambda} R_{\text{ref},\lambda} d\lambda \\ &= \int E_{\text{ref},\lambda} R_{\text{cell},\lambda} d\lambda \\ &= I_{\text{cell-ref}} \quad (2) \end{aligned}$$

が導かれる。これが基準太陽電池方式の原理である。当然、測定光と基準太陽光の分光分布の不一致、そして、被測定太陽電池と基準セルの相対分光感度の不一致から生じる出力測定誤差（スペクトルミスマッチ誤差）が発生するが、JIS規格では誤差が2%以下であることを求めている。

規格では、スペクトルミスマッチ誤差、温度補正、放射照度補正等による誤差を少なくするために、太陽電池測定用ソーラーシミュレーターを使用して一定範囲の温度および放射照度の標準状態（standard test environment）で出力測定がなされることを求めている（JIS C 8913, 8914, 8919, 8934, 8935, 8940）。

3. 基準太陽電池セルの校正方法

規約された基準太陽光下における出力値に校正された基準セルは、一次基準セルと二次基準セルの2種類があり、

いずれも測定光の放射照度を定めるために使用される。二次基準セルは、一次基準セルを用いて校正した基準セルで、一次基準セルの校正値を移し替えたものをいう（JIS C 8911, 8931）。グローバルスタンダード化の競争が激しい昨今、一次基準セルの校正方法（JIS C 8910）は最重要研究課題である。IECは、これまで、“traceable to WRR”という言葉을避けて“conform to WRR”と曖昧さをもたせた表現を採用してきたが、最近、前者の表現に変更する意志を明確にした。

3.1 校正方法の原理と各種校正法

基準セルの校正値は、原理的には、基準太陽光の絶対分光放射照度と基準セルの絶対分光感度の積の全波長積分によって与えられる。市販太陽電池セル・モジュール用の基準セルの多くは、放射照度に対する出力電流のリニアリティがないために、基準太陽光に近いバイアス光照射下で交流法（ロックインアンプを使用）によって分光感度測定がなされる必要がある。基準セルの絶対分光感度を直接、精度よく測定することが難しく、いろいろな校正方法が各国で研究され提案されている⁸⁾。最も直接的なものが、ドイツのDSR法（differential spectral response method）で、基準セルの絶対分光感度を直接測定する方法である。この方法は、基準セル出力電流の放射照度に対するリニアリティを厳しく要求する。この方法は、汎用性がないこと、そして、SI単位系（System International Unit）に基づいているが“traceable to WRR”ではないこと、の2つの問題点をもっている。米国のdirect sunlight methodは、直達日射下の基準セル屋外校正法で、“traceable to WRR”の絶対放射計を使用している。この校正方法は、校正に適した大気条件を満足する機会が少ないという欠点をもつ。日本のsolar simulator method（JIS C 8910と同）は、校正の機会を増やすために考案された屋内校正法で、詳細は後述する。この方法は、分光放射照度標準電球基準に基づいて、放射照度1000 W/m²下の基準セルの絶対分光感度特性を求める方法で、ドイツの校正方法とは異なり、基準セルのリニアリティの問題が小さく実用性が高いと考えている。

いずれの校正方法も、最終的に基準セルの絶対分光感度特性を求める方法と考えることができるので、どの方法が校正機会が多く、校正精度が高く、メンテナンスが容易か、を実証的に検討して最終決定するのがよいと思っている。

3.2 JIS一次基準太陽電池セル校正法（JIS C 8910）

JIS規格では、分光放射照度標準電球に基づく屋内校正方法(a)とWRRに基づく屋内校正方法(b)の2つの校

正方法が併記されている。図2は、両校正方法の概念図である。(a)は、現在実施されている一次基準太陽電池の校正方法である。(b)は、放射照度標準の国際的なトレーサビリティを考慮した校正方法であるが、「ソーラーシミュレーター光(通常、光ビーム発散角が10度を超える)下でも使用可能で、かつ、WRRにトレーサブルな放射照度測定が可能な絶対放射計」を使用した放射測定が必要とされる。したがって、図2右側に示すように、基準太陽電池の校正には、広開口角(例、40度)の絶対放射計を必要とし、かつ、その上部に開口角5度のコリメーター部を取り付け、太陽光(完全な並行光ビーム)のもとでWRR放射計(開口角5度)と比較測定を行うことが必要とされる。

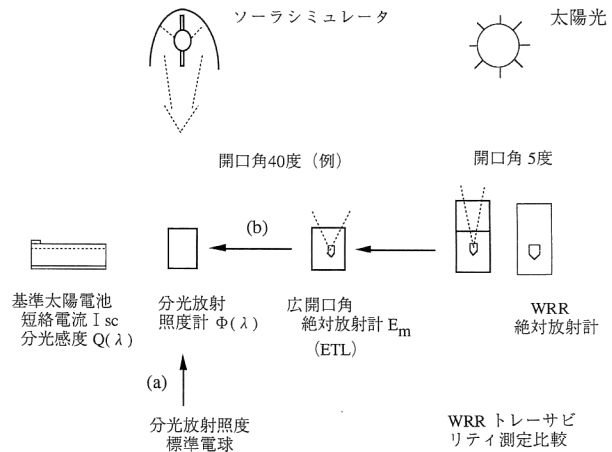


図2 一次基準太陽電池の校正方法。(a) 標準電球基準、(b) 世界放射計測基準(WRR)に基づく屋内校正方法。

(a) 分光放射照度標準電球に基づく屋内校正方法

この一次基準太陽電池セル校正方法では、一次基準太陽電池セルの分光感度特性 $[Q(\lambda)]$ 、短絡電流 $[I_{sc}(m)]$ 、そして、ソーラーシミュレーターの絶対分光放射照度 $[\phi_m(\lambda)]$ を測定し、これらの測定値と AM 1.5 基準太陽光の分光放射照度 $[\phi_s(\lambda)]$ から、次の式を用いて、AM 1.5 基準太陽光のもとにおける一次基準太陽電池の短絡電流を算出し、その値を校正値 $[I_{sc}(c)]$ とする。

$$I_{sc}(c) = I_{sc}(m) \cdot \frac{\int \phi_s(\lambda) Q(\lambda) d\lambda}{\int \phi_m(\lambda) Q(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

(b) 世界放射計測基準(WRR)に基づく屋内校正方法

この方法は、WRRに基づく校正方法である。(a)の測定に加えて、WRRにトレーサブルな絶対放射計を使用してソーラーシミュレーターの絶対放射照度 $[E_m]$ を測定し、分光放射照度電球の校正係数 a (ほとんど“1”に近い値) を求める必要がある。具体的には、次式を用いて一次基準太陽電池の短絡電流を算出し、その値を校正値 $I_{sc}(c)$ とする。

$$I_{sc}(c) = I_{sc}(m) \cdot \frac{\int \phi_s(\lambda) Q(\lambda) d\lambda}{\int a \phi_m(\lambda) Q(\lambda) d\lambda}$$

$$a = \frac{E_m}{\int \phi_m(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

実際の校正手順であるが、校正方法(a)は次の順序に従って行う。

- (1) 一次基準太陽電池セルの分光感度特性 $Q(\lambda)$ の測定
- (2) ソーラーシミュレーター下で、一次基準太陽電池セルの短絡電流 $I_{sc}(m)$ の測定
- (3) 分光放射照度標準電球を用いて標準校正された分光放射照度測定装置によるソーラーシミュレーターの分

光放射照度 $\phi_m(\lambda)$ の測定

これらの測定値を用いて式(3)から校正値を算出する。

校正方法(b)は、さらに、次の測定を行う。

- (4) WRR絶対放射計で校正された広開口角絶対放射計を使用して、ソーラーシミュレーターの絶対放射照度の測定

これらの測定値を用いて式(4)から校正値を算出する。

4. 新型太陽電池の測定方法

4.1 CdTe, CIS系太陽電池⁹⁾

CdS/CdTe太陽電池、CIS系(CuInSe, Cu(InGa)Se₂)太陽電池などの薄膜太陽電池の出力測定方法については、標準化委員会の測定実験を含む検討作業の結果、出力電流が放射照度に対してリニアであることが実証され、結晶系太陽電池JIS規格が準用できることが確認されている。測定用ソーラーシミュレーター規格の基準太陽光エネルギー分布の波長範囲を広げるか否かの議論が残されるのみで、いつでもJIS規格化できる状態にある。

4.2 多接合太陽電池¹⁰⁾

多接合太陽電池は、異なる波長帯域に感度を有する複数の要素セルが直列に接続された構造を有する。a-Si/a-SiGe等のアモルファス太陽電池、InGaP/GaAs/Ge等の化合物太陽電池などが開発実用化されている。多接合太陽電池では、要素セルが直列に接続されているために各要素セル間の電流ミスマッチが存在し、最も光電流の低い要素セルが貫通電流(多接合セルの出力電流)を支配している。基準太陽電池方式で多接合セルの出力測定を行う場合、それぞれの要素セル用の基準セル(基準要素セル)を準備し、かつ、これらの複数の基準要素セルの校正値をいずれも満足するように分光放射照度分布を調整できるソーラーシミュ

レーターを準備しなければならない。基準要素セルの準備・校正については、感度波長帯域が狭くスペクトルミスマッチ誤差が生じやすいので注意を要する。ソーラーシミュレーターについては、これまでに、多光源法¹¹⁾と補助光源法¹²⁾の2つの方法が研究された。前者は、要素セル間の電流ミスマッチの調整に重点が置かれている。後者は、電流ミスマッチの調整機能をもつと同時に、この調整によりソーラーシミュレーターの近似度が上昇することをはかっている。研究の結果、測定光源はできる限り高近似であることが望ましく、補助光源法の測定精度は2~3%であることが実証されている¹²⁾。さらなる測定精度の向上をはかるには、基準太陽光に近い自然太陽光のもとで出力測定がなされる必要がある。

5. 今後の展開

太陽電池の研究開発が最も進んでいる日本のIEC国際規格への貢献度は大きく、電総研・機電検が開発した「分光放射照度標準電球に基づく屋内校正方法」は一次基準太陽電池セルの校正方法のひとつとして国際的に認められ、そして、分光放射照度測定に基づいて基準太陽光下における値に修正計算する手法は米国、ドイツの標準測定法にも取り入れられている。また、新しく開発した「WRRに基づく屋内校正方法」は、従来の校正方法を基本にしつつ、放射照度測定の国際的なトレーサビリティを考慮した校正方法で、この両者の校正データの積み重ねから、標準電球基準とWRR基準のパワー基準の差を明らかにすることができると期待している。また、多接合太陽電池の出力測定は、要素セルの段数が増加するに従い難しくなり、筆者は、多接合太陽電池の出力測定は基準太陽電池方式ではなく、自然太陽光を利用した屋外測定の方がよいと考えている(採光条件、大気条件をある程度変化させ、その傾向から補正を加える必要がある)¹²⁻¹⁴⁾。

最後に、自然太陽光(全天日射)の下で太陽電池セル・モジュールの出力測定を行う場合には、太陽電池の分光感度の入射角度依存性が原因で1~2%の測定誤差が生じるという大きな問題が残っている¹⁵⁾。

文 献

- 1) 小長井誠編：薄膜太陽電池の基礎と応用(オーム社, 2001) pp. 234-243.
- 2) 下川隆一：“太陽電池の光電物性と測定・評価法に関する研究”, 電子技術総合研究所研究報告, 第880号(1987) pp. 132-166.
- 3) R. Shimokawa, F. Nagamine, Y. Miyake, K. Fujisawa and Y. Hamakawa: “Japanese indoor calibration method for the reference solar cell and comparison with the outdoor calibration,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26** (1987) 86-91.
- 4) H. Ossenbrink, R. Van Steenwinkel and K. Krebs: *The Results of the 1984/1985 Round-Robin Calibration of Reference Solar Cells for the Summit Working Group on Technology, Growth, and Employment*, Preprint EUR 10613 EN (Joint Research Centre, Ispra Establishment, April 1986).
- 5) J. Metzendorf, R. Van Steenwinkel, K. Heidler, K. Dehne, R. Shimokawa, F. Nagamine, H. Ossenbrink, L. Fornarini, C. Goodbody, M. Davies, K. Emery and R. DeBlasio: *Proc. 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Kissimmee, FL, 1990) pp. 952-959.
- 6) C. R. Osterwald, S. Anevsky, A. K. Barua, J. Dubard, K. Emery, D. King, J. Metzendorf, F. Nagamine, R. Shimokawa, N. Udayakumar, Y. X. Wang, T. Wittchen, W. Zaaïman, A. Zastrow and J. Zhang: *Proc. 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Washington DC, 1996) pp. 1263-1266.
- 7) R. Shimokawa, H. Ikeda, Y. Miyake and S. Igari: “Development of wide field-of-view cavity radiometer for solar simulator use and intercomparison between irradiance measurements based on the world radiometer reference and electrotechnical laboratory scales,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26** (2002) 5088-5093.
- 8) IEC/TC82/WG2 (Secretary) 101 (1987) Primary Reference Device Calibration Methods.
- 9) 光産業技術振興協会：新型太陽電池の標準化に関する調査研究(平成7-10年度報告書)。
- 10) 光産業技術振興協会：新型太陽電池の標準化に関する調査研究(昭和62-平成4年度報告書)。
- 11) T. Glatfelter and J. Burdick: *Proc. 19th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (1987) pp. 1187-1193.
- 12) R. Shimokawa, F. Nagamine, M. Nakata, K. Fujisawa and Y. Hamakawa: “Supplementary-light method for measuring the conversion efficiency of multijunction solar cells,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) L845.
- 13) R. Shimokawa and F. Nagamine: *Technical Digest of the International PVSEC-5* (Kyoto, Japan, 1990) p. 493.
- 14) Y. Miyake, R. Shimokawa, Y. Nakanishi and Y. Hamakawa: “Global radiation model and angular distribution of the diffuse irradiance,” *Solar Cells*, **19** (1986-1987) 127-143.
- 15) R. Shimokawa, Y. Miyake, Y. Nakanishi, Y. Kumano and Y. Hamakawa: “Effect of atmospheric parameters on solar cell performance under global irradiance,” *Solar Cells*, **20** (1987) 59-72.

(2003年8月18日受理)