

宇宙用太陽電池の耐放射線性

I. 電子線照射方法の検討

1989年7月

三井 光・田中 隆一・須永 博美
金沢 孝夫・田中 進・春山 保幸
上松 敬・松田 純夫*・野口 敬*
田村 高志*・辻 政信*

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

宇宙用太陽電池の耐放射線性

I. 電子線照射方法の検討

日本原子力研究所高崎研究所開発部

三井 光・田中 隆一⁺・須永 博美・金沢 孝夫・田中 進⁺
春山 保幸・上松 敬⁺・松田 純夫^{*}・野口 敬^{*}・田村 高志^{*}
辻 政信^{*}

(1989年6月12日受理)

宇宙開発事業団は、耐放射線性などを考慮して、50 μ m厚のシリコン薄型太陽電池と280 μ m厚の砒化ガリウム太陽電池を新たに開発した。これらの太陽電池の耐放射線性に関し、日本原子力研究所と宇宙開発事業団は、1984年度から1987年度までの4年間、共同研究を実施した。この共同研究では、宇宙用太陽電池のより合理的な耐放線性評価試験法の確立を目的として、電子線の照射方法および太陽電池の電子線劣化の照射条件依存性とそのアニール効果などを中心に検討した。

本報告では、まず、人工衛星用太陽電池が遭遇する宇宙の放射線環境について述べる。次いで、研究に使用した太陽電池および実験方法について記述する。その後、電子線照射方法の検討結果について報告する。

電子線照射方法の検討では、固定照射法（走査ビームによる静止試料の照射法）、移動照射法（走査ビームによる移動試料の照射法）およびスポット照射法（無走査ビームによる静止試料の照射法）の3方法について検討し、固定照射法が最も妥当な照射方法であると結論した。さらに、この研究において、電子線照射による太陽電池の電気特性の変化に関する若干の知見を得た。

高崎研究所：〒370-12 群馬県高崎市綿貫町1233

+ 放射線高度利用研究推進室

* 宇宙開発事業団筑波宇宙センター

Radiation Resistance of Solar Cells for Space Application

I. Study on the Irradiation Procedure of Electron Beams

Hiroshi MITSUI, Ryuichi TANAKA⁺, Hiromi SUNAGA, Takao KANAZAWA
Susumu TANAKA⁺, Yasuyuki HARUYAMA, Takashi AGEMATSU⁺
Sumio MATSUDA^{*}, Takashi NOGUCHI^{*}, Takashi TAMURA^{*}
and Masanobu TSUJI^{*}

Department of Development
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received June 12, 1989)

A 50- μ m thick ultrathin silicon solar cell and a 280- μ m thick high performance AlGaAs/GaAs solar cell with high radiation resistance have been recently developed by National Space Development Agency of Japan (NASDA). In order to study the radiation resistance of these cells, a joint research was carried out between Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) and NASDA from 1984 through 1987. In this research, the irradiation method of electron beams, the effects of the irradiation conditions on the deterioration of solar cells by electron beams, and the annealing effects of the radiation damage in solar cells were investigated.

This paper is the first one of a series of reports of the joint research. In this paper, the space radiation environment which artificial satellites will encounter, the solar cells used, and the experimental methods are described. In addition to these, the results of the study on the irradiation procedure of electron beams are reported.

In the study of the irradiation method of electron beams, three methods, that is, the fixed irradiation method, the moving irradiation

⁺ Office of Advanced Technology Project

^{*} Tsukuba Space Center, National Space Development Agency of Japan

method, and the spot irradiation method were examined. In the fixed irradiation method and moving one, stationary solar cells and solar cells moving by conveyer were irradiated by scanning electron beams, respectively. On the other hand, in the spot irradiation method, stationary solar cells were irradiated by non-scanning steady electron beams. It was concluded that the fixed irradiation method was the most proper method. In addition to this, in this study, some pieces of information were obtained with respect to the changes in the electrical characteristics of solar cells caused by the irradiation of electron beams.

Keywords: Artificial Satellite, Solar Cell, Silicon Solar Cell, GaAs Solar Cell, Space Environment, Radiation Resistance, Irradiation Procedure of Electron Beams, Fixed Irradiation Method, Moving Irradiation Method, Spot Irradiation Method

目 次

1. 緒 言	1
2. 宇宙の放射線環境	5
2.1 地磁気捕捉放射線	5
2.1.1 地磁気捕捉電子線	5
2.1.2 地磁気捕捉陽子線	6
2.2 太陽フレア放射線	7
2.3 銀河宇宙線	8
2.4 年間等価 1 MeV電子フルエンス	8
3. 太陽電池	14
3.1 宇宙用シリコン太陽電池	14
3.2 宇宙用砒化ガリウム太陽電池	15
3.3 試料太陽電池	15
3.3.1 概要	15
3.3.2 電気特性	16
4. 照射方法	25
4.1 電子線照射装置	25
4.1.1 1号加速器	25
4.1.2 2号加速器	25
4.1.3 低エネルギー加速器	26
4.2 γ 線照射装置	26
4.3 照射用治具	27
4.3.1 電子線照射用治具	27
4.3.2 γ 線照射用治具	27
4.4 電子フルエンスの測定	28
4.4.1 1号加速器および2号加速器	28
4.4.2 低エネルギー加速器	29
4.5 γ 線量の測定	30
4.6 電子エネルギーの評価	31
4.7 電子線の照射方法	34
4.7.1 固定照射法	34
4.7.2 移動照射法	36
4.7.3 スポット照射法	36
4.8 基準照射条件	37
5. 電気特性の測定	55

5.1	電流－電圧特性	55
5.1.1	測定装置	55
5.1.2	電気特性	56
5.2	分光感度特性	59
6.	電子線照射方法の検討	66
6.1	太陽電池と照射条件	66
6.2	実験結果	66
6.2.1	照射中の太陽電池の温度変化	66
6.2.2	電流－電圧特性	67
6.2.3	分光感度特性	69
6.3	考 察	69
6.3.1	電気特性保存率の標準偏差	69
6.3.2	電気特性初期値の影響	70
6.3.3	フルエンス率の影響	80
6.3.4	フルエンスの影響	81
6.3.5	照射時の試料温度の影響	81
6.4	結 論	82
7.	結 言	157
謝 辞	.....	159
引用文献	.....	160

Contents

1. Introduction	1
2. Radiation environment in space	5
2.1 Geomagnetically trapped radiation	5
2.1.1 Geomagnetically trapped electrons	5
2.1.2 Geomagnetically trapped protons	6
2.2 Solar flare radiation	7
2.3 Galactic cosmic rays	8
2.4 Annual equivalent 1 MeV electron fluence	8
3. Solar cell	14
3.1 Silicon solar cell for space use	14
3.2 Gallium arsenide solar cell for space use	15
3.3 Solar cells used	15
3.3.1 Outline	15
3.3.2 Electrical characteristics	16
4. Irradiation procedure	25
4.1 Irradiation facility of electron beams	25
4.1.1 No. 1 accelerator	25
4.1.2 No. 2 accelerator	25
4.1.3 Low energy electron accelerator	26
4.2 Irradiation facility of gamma rays	26
4.3 Irradiation equipments	27
4.3.1 Irradiation equipment for electron beams	27
4.3.2 Irradiation equipment for gamma rays	27
4.4 Measurement of electron fluence	28
4.4.1 No. 1 and No. 2 accelerators	28
4.4.2 Low energy electron accelerator	29
4.5 Measurement of the dose of gamma rays	30
4.6 Evaluation of the energy of electron beams	31
4.7 Irradiation methods of electron beams	34
4.7.1 Fixed irradiation method	34
4.7.2 Moving irradiation method	36
4.7.3 Spot irradiation method	36
4.8 Standard irradiation condition	37
5. Measuring methods of electrical characteristics	55
5.1 Current-voltage characteristics	55
5.1.1 Measuring instrument	55

5.1.2	Electrical characteristics	56
5.2	Spectral sensitivity	59
6.	Study of the irradiation methods of electron beams	66
6.1	Solar cells and irradiation conditions	66
6.2	Experimental results	66
6.2.1	Changes in the temperature of solar cell during the irradiation of electron beams	66
6.2.2	Current-voltage characteristics.....	67
6.2.3	Spectral sensitivity	69
6.3	Discussion	69
6.3.1	Standard deviation of the remaining factors of electrical characteristics	69
6.3.2	Effects of the initial values of electrical characteristics	70
6.3.3	Effects of the fluence rate of electron beams	80
6.3.4	Effects of the fluence of electron beams	81
6.3.5	Effects of the temperature of solar cells during the irradiation	81
6.4	Remark	82
7.	Conclusion	157
	Acknowledgment	159
	References	160

1. 結 言

1957年 10 月に、世界最初の人工衛星「スプートニク 1 号」が打ち上げられて以来、30年余が経過している。この間、宇宙開発の発展は目覚ましく、米ソ2大国を中心に、4,000 機近い人工衛星が打ち上げられている。

日本では、1970年 2 月に、東京大学宇宙航空研究所〔現在の文部省・宇宙科学研究所（宇宙研）〕が、日本初の人工衛星「おおすみ」の自力打ち上げに成功した。その後、日本の宇宙開発は着実な歩みを続け、宇宙航空研究所と宇宙研および 1969 年に設立された宇宙開発事業団（NASDA: National Space Development Agency of Japan）によって、過去 19 年間に 41 機の人工衛星が打ち上げられている。最近では、NASDA が、3 段式の国産ロケット H-I によって大型の技術試験衛星 V 型「きく 5 号（ETS-V）」を 1987 年 8 月に打ち上げており、続いて、1988 年 2 月と 9 月には、日本初の実用通信衛星「さくら 3 号-a（CS-3a）」と「さくら 3 号-b（CS-3b）」の打ち上げに成功している。これらによって、2t 級の静止衛星を打ち上げる能力を有する純国産ロケット H-II の開発に大きな自信が得られ、1992 年 8～9 月の「技術試験衛星 VI 型（ETS-VI）」の打ち上げを目指して、着実に開発が進められている。また、1989 年 2 月には、宇宙研が、オーロラ観測を目的とする第 12 号科学衛星「あけぼの（EXOS-D）」の打ち上げに成功している。さらに、1989 年 3 月には、日本通信衛星が、日本初の民間商用通信衛星として、米国ヒューズ・エアクラフト社製 HS-393 型の「JC・SAT-1」を、仏領ギアナのクールー打ち上げセンターから、欧州宇宙機関（ESA: European Space Agency）のアリアン 4 型ロケットによって打ち上げている。続いて、6 月には、宇宙通信が、同様の民間商用通信衛星「スーパーバード-A」（米国フォードエアロスペース社製）を、同じ打ち上げセンターから、アリアン 4 型ロケットによって打ち上げている。

現在、NASDA は、「静止気象衛星 4 号（GMS-4）」と「海洋観測衛星 1 号-b（MOS-1b）」の打ち上げを、それぞれ 1989 年 8～9 月と 1990 年初頭に予定している。これらを含めて、現在、多くの人工衛星の開発が、NASDA と宇宙研において進められている。また、上記の民間 2 社は、それぞれ「JC・SAT-2」と「スーパーバード-B」の打ち上げを、それぞれ 1989 年の 9 月と 10 月に予定している。

さらに、米国の航空宇宙局（NASA: National Aeronautics and Space Ad-

ministration)」が中心になって進めている宇宙ステーション計画においては、日本の実験モジュール「JEM (Japan Engineering Module)の製作が具体化の段階に入っている。

このような宇宙開発の進展に伴って、人工衛星は、近年ますます大型化し、高精度、多機能、かつ長寿命化への要求が著しく増大している。このため、人工衛星に使用する材料・部品の宇宙環境における特性の変化を正確に把握し、この要求を満たす高性能かつ高信頼性の材料・部品を確保する必要がある。

これまでに打ち上げられた多数の人工衛星によって、宇宙環境に耐える材料・部品に関する多くの技術が蓄積されている。しかし、半導体素子をはじめとする材料・部品の進歩は著しい。従って、上記の要求を満たす人工衛星の製作には、新しく開発された材料・部品の宇宙環境における使用の可能性を判断するためのデータの蓄積が必要である。

宇宙空間において、人工衛星が遭遇する主な環境因子は、放射線、高真空、および広い範囲の温度サイクルである。人工衛星の材料・部品の耐宇宙環境性は、これらの複合効果に着目して評価しなければならない。

日本における宇宙環境を模擬した評価試験において、最も難しいと考えられているのは、耐放射線性に関するものである。その理由として、この分野における技術的蓄積が少いこと、放射線の照射施設の数に限られており、希望する条件で自由に照射試験ができないことなどが挙げられている。さらに、半導体素子では、その放射線による劣化機構が明確にされていないことも耐放射線性の評価を困難にしている一因になっている。

人工衛星に使用する材料・部品の中で、各サブシステムにエネルギーを供給する衛星の心臓部とも言える電源系の太陽電池に関する正確なデータを取得することは特に重要である。太陽電池の耐放射線性評価試験は、人工衛星の信頼性と寿命にかかわるものであるが、これまでに電子線、陽子線、ガンマ線、中性子線などを照射して実施した試験では、必要最小限の評価しか行っていない。これは、これまで使用されてきた太陽電池がシリコン (Si) を母材とした 200~300 μm 厚の比較的厚いものであり、その耐放射線性評価結果は NASA とジェット推進研究所 (JPL: Jet Propulsion Laboratory) が「Solar Cell Radiation Handbook」¹ として公表しており、日本では、その公表結果と差のないことを確認するだけで宇宙用として使用できるとされていたためである。

しかし、NASA が、耐放射線性をはじめ軽量化や高効率化などを考慮して、新たに開発した 50 μm 厚のシリコン薄型太陽電池 (Si-50セル) と 280 μm 厚の砒化ガリウム

太陽電池（Ga As セル）は、量産実用化され、世界的にも注目を浴びているが、NASDAが自身でその耐放射線性を評価する必要があった。また、太陽電池の耐放射線性評価試験における照射条件はメーカーによって異っており、標準照射条件を確立する必要も出てきた。

そこで、日本原子力研究所（原研）とNASDAは、このような問題点を解決するため、太陽電池やMOSキャパシタなどの半導体素子の耐放射線性に関する共同研究「半導体素子の放射線劣化に関する研究」を、1984年度から1987年度まで、4年間実施した。この共同研究では、太陽電池について、電子線の照射条件、耐放射線性評価基準などを検討し、より合理的な耐放射線性評価試験法を確立することを目的としている。この共同研究によって得られた成果は、既に、各年度毎に、それぞれ「共同研究成果報告書」²⁻⁵としてまとめられている。また、Si-50セル^{6,7}とGa As セル⁶⁻⁸の耐放射線性に関する研究結果は、それぞれ部分的に報告されている。

本報告書は、上記の共同研究で得られた成果を総合的に解析し、まとめることを目的としている。このため、第I報では、先ず、人工衛星用太陽電池が宇宙において遭遇する放射線環境について述べる。次いで、研究に使用した太陽電池、放射線の照射方法、および電気特性の測定方法について記載する。その後、1984年度に実施した「電子線照射方法の検討」に関する研究結果について報告する。

なお、原研とNASDAの共同研究において、各年度に実施した太陽電池に関する研究項目は、次の通りである。

1984年度

- (1) 電子線の照射方法
- (2) 電子線損傷のフルエンス率依存性
- (3) 電子線損傷のエネルギー依存性
- (4) 電子線とガンマ線の損傷等価性 [I]
- (5) 電子線損傷のアニール効果 [I]
- (6) 電子線照射実験の再現性 [I]
- (7) 電子線のフルエンス測定法

1985年度

- (1) 電子線とガンマ線の損傷等価性 [II]

- (2) 電子線損傷のアニール効果 [II]
- (3) 電子線の連続照射と断続照射による損傷の比較
- (4) 電子線損傷の換算係数
- (5) 電子線照射太陽電池のドライアイス中保管効果
- (6) 電子線照射実験の再現性 [II]

1986年度

- (1) 電子線損傷の照射温度依存性
- (2) 電子線のシリーズ照射による損傷効果
- (3) 損傷に及ぼす電子線入射角の影響
- (4) 電子線照射直後のアニール効果

1987年度

- (1) Ga As セルの換算係数
- (2) Ga As セルのシリーズ照射
- (3) アニール効果の評価方法

2. 宇宙の放射線環境

宇宙空間において、人工衛星が遭遇する主な環境因子は、放射線、高真空、微小重力、および広い範囲の温度サイクルである。これらに加えて、プラズマ、宇宙塵、原子状酸素などによっても人工衛星は影響を受ける。さらに、人工衛星は、打ち上げ時に、衝撃、加速度、振動などのストレスを受ける。人工衛星本体の外表面（ボディマウント型）または外部（展開型）に装備される太陽電池は、これらの環境因子に直接曝される。本章では、これらの環境因子の中で、人工衛星用太陽電池が遭遇する放射線環境について述べる。

地球近傍の放射線環境は、幾つかの成書⁹⁻¹²に記載されている。また、1984年8月に打ち上げられた静止気象衛星3号「ひまわり3号（GMS-3）」の宇宙環境測定器（SEM: space environment monitor）によって観測された1時間毎の電子線（ >2.0 MeV）、陽子線（ $0.8 \sim 100$ MeV）、および α 線（ $8 \sim 370$ MeV）の積算フルエンスが、気象庁気象研究所気象衛星センターから「Monthly Report」¹³として毎月報告されている。

宇宙空間において、人工衛星が遭遇する主な放射線は、地球磁界に捕捉された地磁気捕捉放射線、大きな太陽フレア活動に伴う粒子放射線（太陽フレア放射線）、および少量の銀河宇宙線である。

2.1 地磁気捕捉放射線

地磁気の大規模な磁界によって、粒子放射線が捕捉され、ドーナツ状に地球を取り巻く放射線帯（バンアレン帯）が形成されている。この放射線帯の主な成分は、電荷を有する電子と陽子である。本節では、これらの放射線について説明し、次いで地磁気捕捉放射線を模擬した年間等価1 MeV 電子フルエンスの概念について述べる。

2.1.1 地磁気捕捉電子線

エネルギーが数100 keV以上の地磁気捕捉放射線帯の電子線は上限高度が10 Re[Re: 地球の赤道半径（6,378 km）を単位とする地球の中心からの距離]の磁気圏の外側にまで広がっており、その境界は8~11 Reの範囲で変動している。エネルギーが1 MeV以上の地磁気捕捉電子線のフルエンス率の分布をFigure 2.1¹⁴に示す。この図に示したように、地磁気捕捉電子線にはフルエンス率の高い領域が2つあり、内帯および外帯と呼ばれている。地磁気捕捉放射線帯の内帯は1.2~2.8 Reの範囲にあり、外帯の領域は3~11

Reである。内帯と外帯におけるエネルギーが1 MeV以上の電子線のフルエンス率のピークは、それぞれ1.4 Re付近と4~5 Reの範囲にある(Figure 2. 1)。

外帯は、安定に捕捉されている電子線と準捕捉状態と考えられる寿命の短い電子線によって構成されており、非常に動的な領域である。しかし、太陽や銀河系などの外部の強い線源から電子が絶え間なく供給されるので、地磁気捕捉放射線帯には、エネルギーが250 keV以上の電子線がおよそ $10^7 \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ のフルエンス率で常に存在している¹¹。

地磁気捕捉放射線帯内帯の電子線のフルエンス率を表わすモデルには、AE 5^{11, 15, 16}とAE 6^{11, 15, 17}がある。内帯電子線のフルエンス率のモデルとして、太陽活動が穏やかな期間(period of solar minimum)はAE 5に記載されているAE 5 MINが利用でき、太陽活動が活発な期間(period of solar maximum)はAE 6中のAE 6 MAXが利用できる¹⁵。また、外帯電子線のフルエンス率を表わすモデルには、AE I 7^{11, 15, 18}がある。このモデルには、太陽活動が活発な期間のAE I 7 HIと太陽活動が穏やかな期間のAE I 7 LOがあり、外帯電子線のフルエンス率のモデルとして利用できる¹⁵。

これらのモデルから、広範囲のエネルギーの電子線が地磁気に捕捉されていることが分かる。

地磁気捕捉電子線のフルエンス率は経度によって変化し、地球を周回する人工衛星の軌道のフルエンス率分布は、2つの山と2つの谷を有する曲線になる^{11, 19}。高度35,794 km(およそ6.6 Re)の赤道上空の地球同期衛星軌道、すなわち静止衛星軌道では、西経160度付近のフルエンス率が最も高く、3 MeV以上のエネルギーの電子線のフルエンス率は、フルエンス率が最も低い西経70度付近のそれと比較しておよそ1桁大きい。しかし、地球を周回する人工衛星は、通常、総ての経度を通過するので、地磁気捕捉電子線の影響が平均化される。従って、経度による電子線のフルエンス率の変化は、太陽電池の劣化にほとんど影響を与えない。

また、地磁気捕捉放射線帯内帯の電子線のフルエンス率は地球の磁気嵐によって変化し、太陽活動が増加すると内帯電子線のフルエンス率が長期間にわたって増加する¹¹。

2. 1. 2 地磁気捕捉陽子線

エネルギーが4 MeV以上の地磁気捕捉陽子線のフルエンス率の分布をFigure 2. 2¹⁴に示す。地磁気捕捉陽子線のエネルギーは、高度の増加とともに低下する。中間エネルギーの地磁気捕捉陽子線のフルエンス率の高い領域は4 Re以内の地球近くにあり、フルエ

ンス率のピークは2 Re 付近である (Figure 2. 2)。高エネルギーの陽子線は、さらに地球近くに集中しており、1.5 Re 付近にフルエンス率のピークがある。一方、低エネルギーの陽子線は地球同期衛星軌道付近まで分布しているが、この軌道には2 MeV以上のエネルギーの陽子線は事実上存在しない¹¹。

地磁気捕捉陽子線のフルエンス率を表わすモデルにAP8^{11, 15, 20}がある。このモデルには、太陽活動が活発な期間と穏やかな期間の平均的な条件にそれぞれ対応するAP8 MAXとAP8 MINがあり、地磁気捕捉陽子線のフルエンス率のモデルとして利用できる¹⁵。

これらのモデルから、種々のエネルギーの陽子線が地磁気に捕捉されていることが分かる。

地磁気捕捉陽子線の太陽周期に伴う変化は観測されていない¹¹。

2.2 太陽フレア放射線

太陽フレアは、太陽黒点の近くで起こり、太陽表面の数100万～数10億 km²の面積に拡大し、その強度がピークに達し、その後徐々に減衰して、数分から数時間以内に完全に消滅する。大きな太陽フレアの発生後数10分以内に、高エネルギーの粒子放射線（太陽フレア放射線）が、地球、特に地磁気の極付近のオーロラ帯で検出される。この放射線は、1～3日の間に次第に静まる。粒子放射線の構成成分は、電子線、陽子線、 α 線、および非常に少数の中間質量の原子核（C、N、Oなど）放射線である。電子線のエネルギーは100 keV前後である。陽子線には、地球の極地方の大気を異常電離するPCA (polar cap absorption : 極冠吸収) と呼ばれるエネルギーが100 keV～10 MeVの陽子線と、太陽宇宙線と呼ばれるエネルギーが1 MeV～1 GeVの陽子線が含まれている。

地球に到達する太陽フレア放射線のフルエンス率およびエネルギースペクトルは、時間とともにかなり複雑に変化する。太陽フレアの発生確率とその規模を予測する試みが行われているが成功していない¹¹。人工衛星の運用期間が1年以上の場合、異常に大きい太陽フレアに遭遇する確率が大きいので、通常規模の太陽フレアから発生する粒子放射線の影響はそれ程重要でなくなる。運用期間が短い人工衛星の場合には、異常に大きい太陽フレアと遭遇する機会は少く、通常規模の太陽フレアからの粒子放射線が重要になる。しかし、運用期間が短い人工衛星が異常に大きい太陽フレアに遭遇しないという保証は無い。

異常に大きい太陽フレアが1年に1回起こると仮定した時の、太陽周期21 (1978～1984

年)の間の太陽フレアに起因する陽子線の年間フルエンスの予測値(信頼度:90%)をTable 2. 1¹¹⁾に示す。

2.3 銀河宇宙線

銀河宇宙線は、太陽系外を発生源とする $10^2 \sim 10^{20}$ MeVの高エネルギー放射線であり、上層大気中の物質と、核破碎や核分裂およびこれに続く2次的な過程など、複雑な相互作用をする。従って、銀河宇宙線の構成成分は、高度によって変化する。大気の上層付近の銀河宇宙線の主な成分は陽子線(79%)と α 線(20%)であり、これらは核反応の生成物とその崩壊反応の生成物である。大気中の銀河宇宙線には、陽子、中性子、 π 中間子、 μ 中間子、電子、光子などから成る粒子放射線と未確認の粒子放射線が含まれている。銀河宇宙線のエネルギーは著しく大きい。しかし、他の放射線と比較して、フルエンス率が無視し得る程小さいので、銀河宇宙線が太陽電池に与える損傷効果は、通常無視されている¹¹⁾。

2.4 年間等価1 MeV フルエンス

以上述べたように、人工衛星用太陽電池は、宇宙において種々の放射線によって損傷を受ける。しかし、定常的に太陽電池に影響を与えるのは、主として地磁気捕捉放射線である。

2.1節で述べたように、広範囲のエネルギーの電子線と陽子線が地磁気に捕捉されている。これらの放射線が太陽電池に与える損傷は、地上で入手可能な条件における放射線の照射によって与えられる損傷から推定する必要がある。このため、太陽電池に損傷を与える種々のエネルギーの地磁気捕捉放射線の年間フルエンスを、同じ損傷を与える地上で容易に得られるエネルギーが1 MeVの電子線のフルエンスに換算する方法が行われている²¹⁾。この損傷等価の概念に基づいて、人工衛星の軌道に存在する種々のエネルギーの地磁気捕捉放射線が1年間に与える劣化と同じ程度に太陽電池の電気特性を劣化させる太陽電池に垂直入射するエネルギーが1 MeVの電子線のフルエンスを「年間等価1 MeV 電子フルエンス(annual equivalent 1 MeV electron fluence)」と呼ぶことにする。

2.1.1項で述べたモデルAE6MAXとAEI7LO、およびAP8MAXから得られる赤道上空の種々の高度の円軌道に存在する種々のエネルギーの地磁気捕捉電子線および陽子線が典型的な太陽電池の工学的電気特性、すなわち開放電圧(V_{oc})、短絡電流

(I_{sc})、および最大出力(P_{max})に与える劣化に対応する年間等価 1 MeV 電子フルエンスを Table 2. 2¹⁵に示す。Table 2. 3¹⁵は、高度 35,794 kmの種々の傾斜角の円軌道に存在する種々のエネルギーの地磁気捕捉電子線と陽子線が太陽電池の V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} に与える劣化に対応する年間等価 1 MeV 電子フルエンスである。これらの表には、カバーガラスの無い太陽電池(Bare セル)、および原研とNASAの共同研究において使用したとほぼ同じ厚み(152 μm)のカバーガラス(3. 3. 1項)を表面に接着した太陽電池(CGセル)について示した。Table 2. 2と2. 3の年間等価 1 MeV 電子フルエンスの算出には、無限厚みの後方遮蔽が仮定されている。

宇宙において太陽電池に最高の損傷を与える陽子線のエネルギーに近く、比較的均一な損傷を発生させ、かつ地上において比較的容易に得られる陽子線のエネルギーは 10 MeV である²²。従って、Table 2. 2と2. 3に示した陽子線の年間等価 1 MeV 電子フルエンスは、上述の損傷等価の概念に基づいて、種々のエネルギーの地磁気捕捉陽子線が1年間に与える劣化と同じ程度に太陽電池の電気特性を劣化させる太陽電池に垂直入射するエネルギーが 10 MeV の陽子線のフルエンス、すなわち「年間等価 10 MeV 陽子フルエンス(annual equivalent 10 MeV proton fluence: $\Phi_{10MeV-p}$)」に換算し、このフルエンスを次式

$$\Phi_{1MeV-e} = 3,000 \Phi_{10MeV-p} \quad (2.1)$$

によって年間等価 1 MeV 電子フルエンス(Φ_{1MeV-e})に換算してある¹⁵。この式は、太陽電池の電気特性の電子線劣化と陽子線劣化を関係付けるための近似式である。エネルギーが 10 MeV の陽子線を照射した時の太陽電池の電気特性の劣化曲線は、エネルギーが 1 MeV の電子線の場合のそれと異なる。従って、式(2.1)の定数は、太陽電池の電気特性の低下の程度によって変化する。上式の定数 3,000は、太陽電池の電気特性が 25 % 低下した時の定数である。

エネルギーが 10 MeV 以下の陽子線が太陽電池の V_{oc} と P_{max} に与える劣化の程度はほぼ等しいが、 I_{sc} のそれと比較してかなり大きい¹⁵。従って、陽子線の場合には、 V_{oc} と P_{max} および I_{sc} の年間等価 1 MeV 電子フルエンスを別個に示してある。電子線とエネルギーが 10 MeV 以上の陽子線の場合には、このような現象は認められない。

Table 2. 2の円軌道は傾斜角0度で赤道上空を飛翔する人工衛星の軌道であり、高度が 35,794 kmの場合には、Table 2. 3の傾斜角0度の円軌道と同じの静止衛星軌道になる。従って、Table 2. 2と2. 3から、静止衛星軌道を飛翔する人工衛星で使用される

152 μm 厚のカバーガラス付きの太陽電池は、捕捉陽子線によってほとんど影響を受けないことが分かる。これは、2. 1. 2 項で述べたように、この高度の円軌道には 2 MeV 以上のエネルギーの地磁気捕捉陽子線が事実上存在しないので、総ての陽子線がカバーガラスによって阻止されるためである。

なお、Table 2. 3 の傾斜角 90 度の軌道を飛翔する人工衛星は、極軌道衛星である。

Table 2.1 Estimated annual integral proton fluence due to solar flare in solar cycle 21 (1979 ~ 1984)¹¹

Proton energy (MeV)	> 10	> 30	> 60	> 100
Annual integral proton fluence (p·cm ⁻²)	1.7×10 ¹⁰	7.9×10 ⁹	2.5×10 ⁹	5.6×10 ⁸

Table 2.3 Annual equivalent 1 MeV electron fluence for the electrical characteristics (Voc, Isc, and Pmax) of solar cell due to geomagnetically trapped electrons and protons in circular orbit of the altitude of 35,794 km¹⁵
(Models: AE 6 MAX, AEI 7 LO, and AP 8 MAX)

In- cli- na- tion	Annual equivalent 1 MeV electron fluence (e·cm ⁻²)					
	Electron		Proton			
	Characteristics		Characteristics			
	Voc, Isc, Pmax		Voc, Pmax		Isc	
	Solar cell ^{a)}		Solar cell ^{a)}		Solar cell ^{a)}	
	Bare	CG	Bare	CG	Bare	CG
0°	4.35 E+13	2.48 E+13	2.65 E+17	0.00	2.39 E+15	0.00
10°	3.83 E+13	2.15 E+13	1.76 E+17	0.00	1.61 E+15	0.00
20°	2.62 E+13	1.41 E+13	8.64 E+16	0.00	8.11 E+14	0.00
30°	1.65 E+13	8.80 E+12	5.60 E+16	0.00	5.24 E+14	0.00
40°	1.22 E+13	6.56 E+12	4.31 E+16	0.00	4.02 E+14	0.00
50°	1.00 E+13	5.41 E+12	3.58 E+16	0.00	3.34 E+14	0.00
60°	8.89 E+12	4.81 E+12	3.21 E+16	0.00	2.99 E+14	0.00
70°	8.21 E+12	4.44 E+12	2.98 E+16	0.00	2.77 E+14	0.00
80°	7.88 E+12	4.27 E+12	2.86 E+16	0.00	2.67 E+14	0.00
90°	7.84 E+12	4.24 E+12	2.85 E+16	0.00	2.65 E+14	0.00

a) Bare : Bare solar cell without cover glass.

CG : Solar cell with 152 μm-thick cover glass.

Table 2.2 Annual equivalent 1 MeV electron fluence for the electrical characteristics (Voc, Isc, and Pmax) of solar cell due to geomagnetically trapped electrons and protons in circular orbit over the equator (inclination = 0°)¹⁵
(Models: AE 6 MAX, AEI 7 LO, and AP 8 MAX)

Altitude (km)	Annual equivalent 1 MeV electron fluence (e-cm ⁻²)					
	Electron		Proton			
	Characteristics		Characteristics			
	Voc, Isc, Pmax		Voc, Pmax		Isc	
	Solar cell ^{a)}		Solar cell ^{a)}		Solar cell ^{a)}	
	Bare	C G	Bare	C G	Bare	C G
277	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
463	1.14 E+07	9.51 E+06	0.00	0.00	0.00	0.00
555	4.65 E+07	3.41 E+07	0.00	0.00	0.00	0.00
833	8.03 E+09	2.95 E+09	2.87 E+12	1.90 E+12	1.91 E+12	1.61 E+12
1,111	4.92 E+11	1.58 E+11	3.88 E+13	2.79 E+13	2.66 E+13	2.25 E+13
1,481	7.25 E+12	2.51 E+12	3.27 E+14	2.26 E+14	2.11 E+14	1.69 E+14
1,852	2.49 E+13	9.32 E+12	1.48 E+15	9.65 E+14	8.87 E+14	6.62 E+14
2,315	6.03 E+13	2.44 E+13	6.51 E+15	3.89 E+15	3.55 E+15	2.39 E+15
2,778	9.80 E+13	4.08 E+13	2.11 E+16	1.16 E+16	1.07 E+16	6.61 E+15
3,241	1.26 E+14	4.99 E+13	5.17 E+16	2.65 E+16	2.50 E+16	1.43 E+16
3,704	1.46 E+14	5.35 E+13	1.09 E+17	4.77 E+16	4.92 E+16	2.43 E+16
4,167	1.64 E+14	5.57 E+13	2.35 E+17	7.82 E+16	9.79 E+16	3.76 E+16
4,630	1.73 E+14	5.59 E+13	4.26 E+17	1.09 E+17	1.66 E+17	5.02 E+16
5,093	1.70 E+14	5.31 E+13	7.09 E+17	1.36 E+17	2.55 E+17	6.07 E+16
5,556	1.53 E+14	4.71 E+13	1.08 E+18	1.53 E+17	3.57 E+17	6.66 E+16
6,482	1.11 E+14	3.21 E+13	2.51 E+18	1.59 E+17	7.09 E+17	6.64 E+16
7,408	8.00 E+13	2.24 E+13	4.98 E+18	1.47 E+17	1.21 E+18	5.94 E+16
8,334	6.39 E+13	1.90 E+13	8.40 E+18	1.21 E+17	1.80 E+18	4.77 E+16
9,260	4.90 E+13	1.74 E+13	1.28 E+19	9.26 E+16	2.45 E+18	3.58 E+16
10,186	3.81 E+13	1.72 E+13	1.79 E+19	6.40 E+16	3.15 E+18	2.43 E+16
11,112	3.63 E+13	2.11 E+13	2.26 E+19	4.18 E+16	3.60 E+18	1.57 E+16
12,964	6.96 E+13	4.97 E+13	2.83 E+19	1.25 E+16	3.49 E+18	4.56 E+15
14,816	1.00 E+14	7.36 E+13	2.71 E+19	2.66 E+15	2.56 E+18	9.53 E+14
16,668	1.47 E+14	1.08 E+14	1.66 E+19	2.71 E+14	1.27 E+18	9.50 E+13
18,520	2.04 E+14	1.49 E+14	1.01 E+19	2.67 E+13	5.95 E+17	9.18 E+12
20,372	2.19 E+14	1.60 E+14	6.40 E+18	6.27 E+11	2.67 E+17	2.13 E+11
22,224	2.18 E+14	1.58 E+14	4.57 E+18	9.63 E-03	1.35 E+17	4.60 E-04
24,076	1.89 E+14	1.36 E+14	3.29 E+18	0.00	6.50 E+16	0.00
25,928	1.57 E+14	1.10 E+14	2.22 E+18	0.00	3.06 E+16	0.00
27,780	1.32 E+14	8.96 E+13	1.60 E+18	0.00	1.74 E+16	0.00
29,632	1.09 E+14	7.19 E+13	1.21 E+18	0.00	1.21 E+16	0.00
31,484	8.96 E+13	5.74 E+13	9.40 E+17	0.00	8.75 E+15	0.00
33,336	6.71 E+13	4.09 E+13	6.86 E+17	0.00	6.01 E+15	0.00
35,794	4.35 E+13	2.48 E+13	2.65 E+17	0.00	2.39 E+15	0.00

a) Bare : Bare solar cell without cover glass.

C G : Solar cell with 152 μm-thick cover glass.

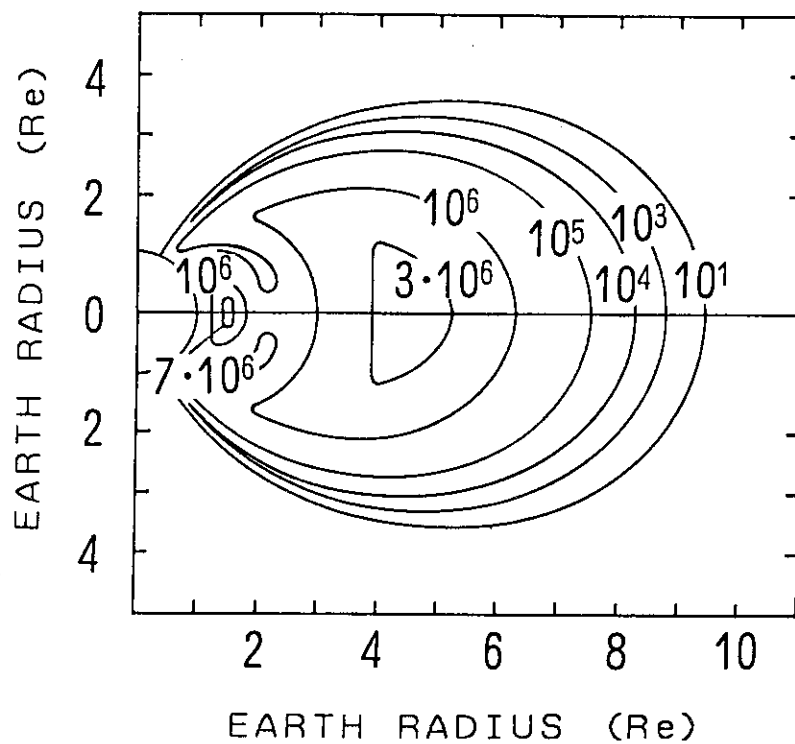


Figure 2. 1 Fluence rate distribution of geomagnetically trapped electrons (>1 MeV)¹⁴

(The unit of number in figure is $e \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)

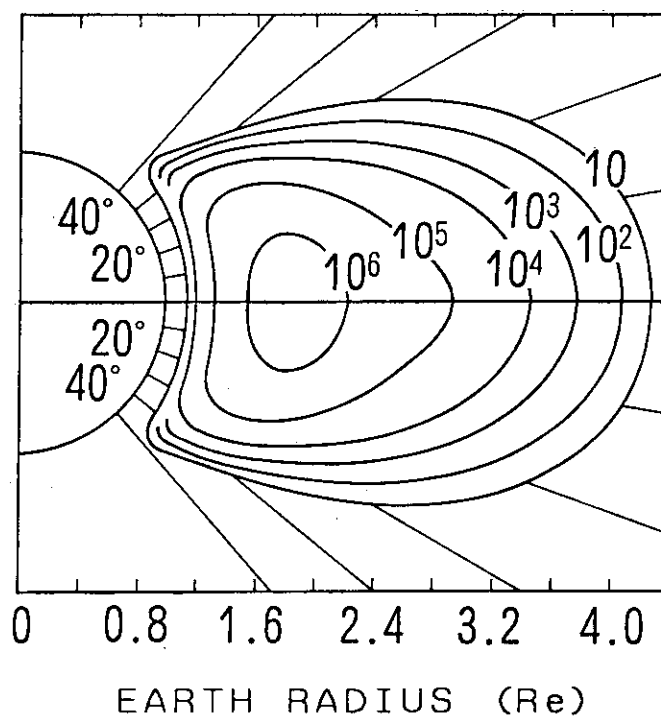


Figure 2. 2 Fluence rate distribution of geomagnetically trapped protons (>4 MeV)¹⁴

(The unit of number in figure is $p \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)

3. 太陽電池

本章では、これまでに開発され使用されてきた宇宙用シリコン太陽電池（Si 太陽電池）と砒化ガリウム太陽電池（Ga As 太陽電池）の概要、および原研とNASDAの共同研究において使用した太陽電池の概要と電気特性について述べる。

3.1 宇宙用シリコン太陽電池

宇宙用Si太陽電池は、宇宙の放射線環境における耐放射線性を考慮して、p型シリコン単結晶の上にn型シリコン層を設けたn on p型構造である。この構造の太陽電池では、n側すなわち表面電極を負、p側すなわち裏面電極を正にした外部電圧が生ずる。p型基板の不純物は、通常、硼素（B）が使用される。抵抗率が $2\Omega\cdot\text{cm}$ と $10\Omega\cdot\text{cm}$ の基板が使用されているが、 $10\Omega\cdot\text{cm}$ の基板の方が耐放射線性に優れている。n型層形成のための不純物として、一般に、磷（P）が使用されている。

人工衛星で使用されるSi太陽電池には、コンベンショナル（conventional）型、裏面電界効果（BSF：back surface field）型、裏面反射電極（BSR：back surface reflector）型、裏面電界効果・反射電極（BSFR：back surface field and reflector）型、およびブラックセル（black cell）の5種類がある。これらの太陽電池の構造をFigure 3.1⁶に示す。

コンベンショナル型Si太陽電池は、構造は簡単であるが変換効率が低いので、最近はほとんど使用されていない。

BSF型Si太陽電池の表面側の構造はコンベンショナル型Si太陽電池と同じであり、裏面に基板と同じ不純物を基板より高濃度に注入したBSF構造を有している。BSF構造は、光の照射によって基板内に発生し、裏面電極に拡散して来る少数キャリアの進行方向を逆転させて接合に向って拡散させる働きをする。この接合に向って拡散する少数キャリアは接合近傍で収集されるので、太陽電池の変換効率が向上する。

BSR型Si太陽電池も、表面側の構造はコンベンショナル型のそれと同じである。しかし、この型の太陽電池には、長波長の光を裏面から反射させる電極（裏面反射電極）が設けてある。長波長の光は、電子-正孔対を発生させるだけの十分なエネルギーを持っていないが基板の温度を上昇させるので、太陽電池には好ましくない。裏面で反射された長波長の光は表面から排出されるので、太陽電池の温度上昇が妨げられる。この電極は、ア

ルミニウム (Al)、チタン (Ti)、パラジウム (Pd)、および銀 (Ag)を積層した構造になっている。この電極は短波長の光も接合方向に反射させ、この光が接合近傍で電子-正孔対を発生させるので、太陽電池の変換効率が向上する。

BSFR型Si太陽電池は、BSF型Si太陽電池に裏面反射電極を導入した太陽電池であり、BSF型Si太陽電池とBSR型Si太陽電池の特長を合わせ持っている。3.3節で述べるように、原研とNASDAの共同研究において使用した2種類のSi太陽電池は、いずれもこの型の太陽電池である。

ブラックセル、すなわち表面凹凸型太陽電池 (textured surface solar cell)は、BSFR型Si太陽電池の変換効率を向上するために、表面に密集したピラミッド型の凹凸構造を形成した太陽電池である。この表面構造によって光の吸収効率が向上する。

3.2 宇宙用砒化ガリウム太陽電池

GaAs太陽電池を電力源として使用している人工衛星は、1988年2月と9月に打ち上げられた実用通信衛星「さくら3号-aとb (CS-3aと3b)」のみである。これらの人工衛星には、次節で述べる原研とNASDAの共同研究において使用したGaAs太陽電池が搭載されている。この太陽電池は、単位面積当たりの電気出力を向上するために、NASDAが開発した耐放射線性に優れた太陽電池である。その断面図をFigure 3.2⁴⁴に示す。この図に示したように、GaAs太陽電池は、Si太陽電池と異り、n型基板の上にP型層を結晶成長させたp-on-n型構造である。この構造の太陽電池では、p側すなわち表面電極を正、n側すなわち裏面電極を負にした外部電圧が生ずる。

3.3 試料太陽電池

本節では、原研とNASDAの共同研究において使用した太陽電池の概要とその電気特性について述べる。

3.3.1 概要

原研とNASDAの共同研究では、200 μm 厚のシリコン太陽電池 (Si-200セル)を標準試料として用い、NASDAが耐放射線性などの耐宇宙環境性、軽量化または高効率化などを考慮して開発した50 μm 厚のシリコン薄型太陽電池 (Si-50セル)と280 μm 厚の砒化ガリウム太陽電池 (GaAsセル)を使用した。形状は、総て縦と横が2 cm

の正方形である。Si-50セルとSi-200セルは、シャープ株式会社製であり、いずれもFigure 3. 1に示したBSFR（裏面電界効果・反射電極）型Si太陽電池である。GaAsセルは三菱電機株式会社製であり、その構造はFigure 3. 2に示した。

それぞれの太陽電池について、カバーガラスの無いもの（Bareセル）と表面に150 μm 厚のカバーガラスを70 μm 厚の接着剤で接着したもの（CGセル）の2種類を使用した。従って、試料は、Si-50（Bare）セル、Si-50（CG）セル、Si-200（Bare）セル、Si-200（CG）セル、GaAs（Bare）セル、およびGaAs（CG）セルの6種類になる。

Si-50セル^{6, 7, 23-31}とGaAsセル³²⁻⁴³開発のそれぞれの段階における成果と耐放射線性の試験結果および現状は文献に記載されており、開発経過を総括して松田が報告⁶している。

用いたカバーガラスは、ピルキントン・パーキン・エルマー（PPE）社製の酸化セリウム（IV）（ CeO_2 ）を5%含有するソーダ石灰珪酸塩ガラス（PPE-CMS）と、旭硝子株式会社が開発した同じ成分のカバーガラスである。これらのカバーガラスの物性定数をTable 3. 1に示す。酸化セリウム（IV）は、放射線によるカバーガラスの黒化を防止するために添加されている。従って、これらのカバーガラスの光透過性などの物性は、いずれも電子線および γ 線の照射によって変化しなかった。

接着剤は、ダウコーニング社製のDC 93-500を使用した。この接着剤はシリコンエラストマーであるが、その成分、物性などの詳細は不明である。

3. 3. 2 電気特性

前項で述べたように、原研とNASDAの共同研究において使用した太陽電池は、Si-50セル、Si-200セル、およびGaAsセルのそれぞれBareセルとCGセルの6種類である。

1984～1987年の4年間の共同研究において使用した総ての太陽電池について、5章で述べる方法によって測定した開放電圧（ V_{oc} ）、短絡電流（ I_{sc} ）、最大出力（ P_{max} ）、および曲線因子（FF）の各年度毎の平均値（ A_v ）、標準偏差（ σ ）の3倍値（ 3σ ）と平均値に対する 3σ 値の割合、最大値（Max）、最小値（Min）、および各年度毎のそれぞれの太陽電池の使用枚数をTable 3. 2～3. 4に示す。

Table 3. 2～3. 4に示したように、各年度に使用した太陽電池の V_{oc} の平均値に対

する 3σ 値の割合は 4 % 以下であり、 I_{sc} のそれは 9 % 以下である。しかし、1985 年度に使用した Si-200(CG) セルの V_{oc} の最小値は、他の年度および Bare セルのそれと比較して異常に低い (Table 3. 3)。また、 P_{max} の平均値に対する 3σ 値の割合は、異常に大きい値 (18.4 %) を示した 1987 年度の Ga As (Bare) セル (Table 3. 4) を除いて、5 ~ 13 % の範囲にある。さらに、FF の 3σ 値の平均値に対する割合は、12 % 以下である。これらの結果から、各年度に使用した太陽電池のそれぞれの電気特性は比較的均一であったと考えることができる。また、それぞれの電気特性の平均値の年度による変動もそれ程大きくない。従って、Table 3. 2 ~ 3. 4 の電気特性の平均値を各年度の使用枚数によって重み付けすることによって、原研と NASDA の共同研究において使用したそれぞれの太陽電池の電気特性の平均値を求めることができる。結果 (Av) をそれぞれの電気特性の最大値 (Max) と最小値 (Min) とともに Table 3. 5 に示す。

Table 3. 5 から、いずれの太陽電池においても、電気特性は、カバーガラスによってほとんど影響を受けないことが分かる。また、Si-50 セルと Si-200 セルを比較すると、 V_{oc} と FF はほぼ等しく、 I_{sc} と P_{max} は Si-200 セルの方が幾らか大きい。しかし、Si-50 セルと Si-200 セルの電気特性はほぼ等しいと考えて差し支えない。

一方、Ga As セルの I_{sc} は Si 太陽電池より小さく、FF は Ga As セルの方が幾らか大きい。しかし、 V_{oc} と P_{max} は、Si 太陽電池より Ga As セルの方がかなり大きい。すなわち、電気出力は、Si 太陽電池よりも Ga As の方が優れていることを Table 3. 5 は示している。

Table 3.1 Properties of cover glass used

Items	Cover glass	
	Asahi Glass Co.	Pilkinton Perkin Elmer-CMS
Material	Soda lime silicate glass containing 5 % Ce O ₂	Soda lime silicate glass containing 5 % Ce O ₂
Density [g/cm ³]	2.58	2.62
Coefficient of linear expansion [1/°C]	6.4×10^{-6} (-180 ~ +100 °C)	7.0×10^{-6} (-180 ~ +100 °C)
Young's modulus [GN/m ²]	73	72
Poisson's ratio	0.20	0.2 ± 0.01
Rigidity [GN/m ²]	30	...
Volume resistivity [Ω·cm]	10 ¹⁵ (20°C, 1 torr)	10 ¹⁴ ~10 ¹² (-130 ~ +85°C)
Dielectric constant	7.6 (20°C, 1 MHz)	Unknown ^{a)}
Refractive index	1.53	1.536 ± 0.003
Absorption coefficient (α)	...	0.876 (cell + cover glass)
Emissivity (ε)	0.88 (cover glass only)	0.85 (cell + cover glass)
UV transmittance [%]	< 1 (300~320 nm)	< 1 (300~320 nm)

a) Dielectric constant is 7.0 in the case of Corning Glass 0211 Microsheet at room temperature and 1 MHz.

Table 3.2 Initial values of electrical characteristics of
Si-50 cells used^{a)}

Solar cell		Bare cell				C G cell			
Fiscal year		1984	1985	1986	1987	1984	1985	1986	1987
V _{oc} (mV)	A _v	595.6	590.9	589.2	....	597.1	590.1	592.6	597.5
	3 σ (%)	17.1 (2.87)	19.5 (3.30)	14.8 (2.51)	....	11.7 (1.96)	18.7 (3.17)	16.8 (2.83)	16.5 (2.76)
	Max	603.5	603.5	601.9	....	603.9	601.4	601.6	605.8
	Min	566.2	568.6	574.2	....	574.6	568.1	577.7	584.5
I _{sc} (mA)	A _v	160.2	156.1	158.8	....	158.3	157.2	158.7	162.6
	3 σ (%)	6.7 (4.18)	9.7 (6.21)	6.3 (3.97)	....	5.1 (3.22)	7.0 (4.45)	5.4 (3.40)	7.9 (4.86)
	Max	165.0	162.7	164.5	....	162.5	162.5	162.7	166.2
	Min	153.1	146.0	152.1	....	152.9	147.0	153.0	150.7
P _{max} (mW)	A _v	69.6	66.9	66.4	....	69.0	67.1	68.5	73.5
	3 σ (%)	4.8 (6.90)	6.0 (8.97)	8.0 (12.0)	....	3.7 (5.36)	5.3 (7.90)	7.4 (10.8)	5.7 (7.76)
	Max	73.2	72.7	73.5	....	72.3	71.0	73.3	76.5
	Min	64.4	61.1	55.7	....	65.6	61.1	62.1	67.7
F F (%)	A _v	73.0	72.5	70.9	....	73.0	72.3	72.8	75.1
	3 σ (%)	3.1 (4.25)	3.5 (4.83)	7.6 (10.7)	....	3.4 (4.66)	3.8 (5.26)	6.9 (9.48)	3.2 (4.26)
	Max	75.6	75.0	76.1	....	75.4	74.9	76.2	77.2
	Min	69.5	69.1	58.4	....	68.8	67.9	66.1	73.4
No. of cell		245	340	247	0	245	340	187	60

a) A_v : Average value.

3 σ (%) : Value of 3 times of standard deviation (ratio of 3 σ to average value).

Max : Maximum value.

Min : Minimum value.

Table 3.3 Initial values of electrical characteristics of
Si-200 cells used^{a)}

Solar cell		Bare cell				C G cell			
Fiscal year		1984	1985	1986	1987	1984	1985	1986	1987
V _{oc} (mV)	Av	599.2	598.7	591.6	....	597.6	599.0	591.9	595.0
	3 σ (%)	18.6 (3.10)	13.8 (2.30)	23.6 (3.99)	....	20.5 (3.43)	12.8 (2.14)	16.0 (2.70)	19.1 (3.21)
	Max	608.8	606.0	602.0	....	607.3	603.7	601.2	603.7
	Min	573.8	568.0	571.1	....	578.0	529.6	573.7	576.7
I _{sc} (mA)	Av	172.1	168.3	169.7	....	171.1	168.5	167.5	171.0
	3 σ (%)	8.1 (4.71)	7.8 (4.63)	5.7 (3.36)	....	10.0 (5.84)	6.5 (3.86)	6.3 (3.76)	5.9 (3.45)
	Max	178.9	174.7	174.0	....	177.9	172.7	172.5	175.5
	Min	163.6	161.9	163.2	....	161.6	162.3	160.9	167.3
P _{max} (mW)	Av	75.1	73.2	72.5	....	74.5	73.1	69.5	76.4
	3 σ (%)	8.0 (10.7)	5.1 (6.97)	7.8 (10.8)	....	8.7 (11.7)	4.5 (6.16)	8.8 (12.7)	4.6 (6.02)
	Max	79.5	76.6	77.1	....	79.9	76.1	75.0	79.6
	Min	67.7	66.6	62.3	....	68.2	65.0	54.6	73.6
FF (%)	Av	72.7	72.6	72.2	....	72.8	72.4	70.1	75.1
	3 σ (%)	3.7 (5.09)	3.4 (4.68)	6.1 (8.45)	....	3.5 (4.81)	3.3 (4.56)	8.2 (11.7)	2.0 (2.66)
	Max	75.1	75.0	75.6	....	75.6	75.0	75.0	76.3
	Min	68.7	68.4	64.2	....	69.6	68.3	57.1	73.4
No. of cell		245	340	247	0	245	340	187	60

a) Av : Average value.

3 σ (%) : Value of 3 times of standard deviation (ratio of 3 σ to average value).

Max : Maximum value.

Min : Minimum value.

Table 3.4 Initial values of electrical characteristics of
GaAs cells used^{a)}

Solar cell		Bare cell				C G cell			
Fiscal year		1984	1985	1986	1987	1984	1985	1986	1987
V _{oc} (mV)	Av	971.7	969.3	965.8	967.7	971.1	969.0	961.7	964.3
	3 σ (%)	21.2 (2.18)	18.5 (1.91)	12.9 (1.34)	26.0 (2.69)	21.6 (2.22)	16.0 (1.65)	24.8 (2.58)	13.7 (1.42)
	Max	995.4	982.0	975.4	978.6	986.2	981.1	977.0	973.8
	Min	938.8	941.8	953.6	953.2	942.3	945.8	937.5	954.1
I _{sc} (mA)	Av	122.2	125.5	121.8	123.8	122.9	125.5	120.8	122.7
	3 σ (%)	8.5 (6.96)	3.6 (2.87)	4.9 (4.02)	11.1 (8.97)	7.6 (6.18)	3.2 (2.55)	6.5 (5.38)	5.8 (4.73)
	Max	127.6	128.4	124.4	128.8	127.9	127.8	125.4	127.0
	Min	112.7	120.9	112.4	118.3	113.3	117.8	112.9	118.0
P _{max} (mW)	Av	90.3	92.1	89.1	91.9	90.7	92.6	87.8	91.3
	3 σ (%)	10.3 (11.4)	8.0 (8.69)	7.0 (7.86)	16.9 (18.4)	9.8 (10.8)	8.0 (8.64)	10.8 (12.3)	4.1 (4.49)
	Max	98.5	97.9	94.3	98.6	98.1	99.6	96.7	94.3
	Min	73.7	82.5	82.0	84.1	81.7	80.5	77.6	88.3
FF (%)	Av	76.0	75.8	75.8	76.6	76.0	76.1	75.5	75.2
	3 σ (%)	7.4 (9.74)	5.5 (7.26)	4.3 (5.67)	5.8 (7.57)	6.5 (8.55)	5.6 (7.36)	5.6 (7.42)	3.6 (4.79)
	Max	81.2	79.9	79.1	79.5	81.1	80.9	79.2	80.0
	Min	62.2	70.3	71.5	73.5	69.5	65.9	70.6	75.1
No. of cell		245	340	247	25	245	340	187	60

a) Av : Average value.

3 σ (%) : Value of 3 times of standard deviation (ratio of 3 σ to average value).

Max : Maximum value.

Min : Minimum value.

Table 3.5 Average values of electrical characteristics of
solar cells used in fiscal years of 1984~1987^{a)}

Solar cell		Si-50		Si-200		Ga As	
		Bare	C G	Bare	C G	Bare	C G
V _{oc} (mV)	Av	591.8	593.3	596.7	596.7	968.9	967.6
	Max	603.5	605.8	608.8	607.3	995.4	986.2
	Min	566.2	568.1	568.0	529.6	938.8	937.5
I _{sc} (mA)	Av	158.1	158.3	169.8	169.2	123.4	123.5
	Max	165.0	166.2	178.9	177.9	128.8	127.9
	Min	146.0	147.0	161.9	160.9	112.4	112.9
P _{max} (mW)	Av	67.5	68.4	73.6	72.9	90.7	90.9
	Max	73.5	76.5	79.5	79.9	98.6	99.6
	Min	55.7	61.1	62.3	54.6	73.7	77.6
FF (%)	Av	72.2	72.8	72.5	72.2	75.9	75.9
	Max	76.1	77.2	75.6	76.3	81.2	81.1
	Min	58.4	66.1	64.2	57.1	62.2	65.9

a) Av : Average value.

Max : Maximum value.

Min : Minimum value.

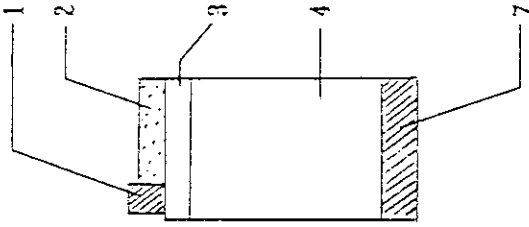
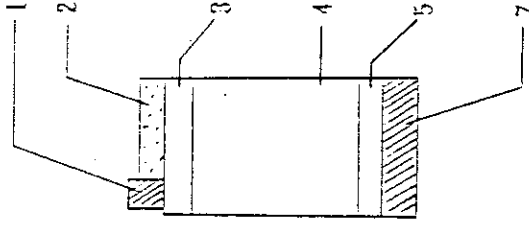
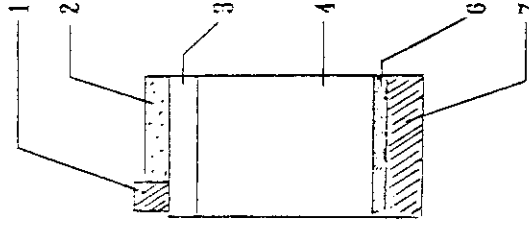
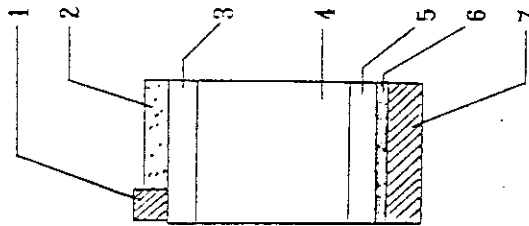
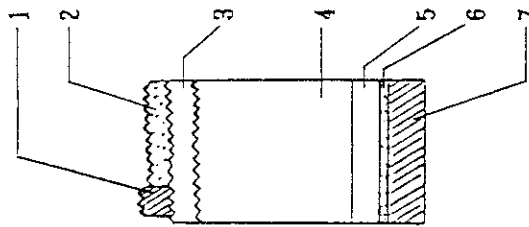
Type	Conventional	BSF	BSR	BSFR	Black
Structure					
Notes	1: n contact 2: antireflective coating 3: n ⁺ Si layer 4: p Si substrate				
	5: p ⁺ Si layer (back surface field) 6: back surface reflector 7: p contact				

Figure 3.1 Structures of Si solar cells⁶

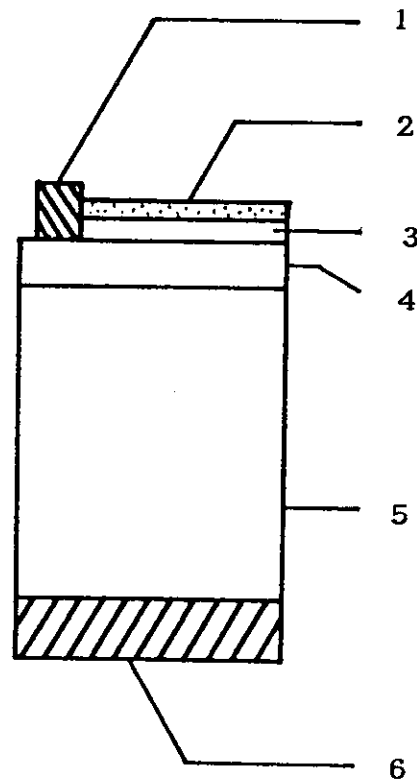


Figure 3. 2 Schematic cross section of the AlGaAs/GaAs solar cell⁴⁴

- 1 : p contact
- 2 : antireflective coating
- 3 : p AlGaAs layer
- 4 : p GaAs layer
- 5 : n GaAs substrate
- 6 : n contact

4. 照射方法

本章では、原研とNASDAの共同研究において使用した電子線照射装置、 γ 線照射装置、照射用治具、電子フルエンスと γ 線量の測定法、電子エネルギーの評価法、電子線の照射方法、および基準照射条件について述べる。

4. 1 電子線照射装置

原研とNASDAの共同研究における電子線照射は、原研高崎研究所（高崎研）に設置されている1号加速器、2号加速器、および低エネルギー加速器を使用して実施した。本節では、これらの加速器の概要を述べる。

4. 1. 1 1号加速器

1号加速器は、日新ハイボルテージ株式会社製のコッククロフト・ウォルトン型電子加速器である。この加速器は、1つの高電圧発生部に2本の加速管を有しており、垂直方向と水平方向に電子線を取り出すことができる（デュアルビーム方式）。

1号加速器の高電圧は、整流器とコンデンサを12段組み合わせた回路で発生される。この高電圧は、高電圧切換装置によって垂直方向と水平方向に切り換えられる。加速電圧は0.5～2.0 MV（連続可変）、ビーム電流は0.1～30 mA（連続可変）である。加速管内で加速された電子線は、周波数200 Hzで電磁走査され、50 μ m厚のチタン製ビーム窓を透過して大気中に取り出される。電子線の走査巾は、垂直ビームが最大120 cm、水平ビームが最大60 cmである。

4. 1. 2 2号加速器

2号加速器は、Radiation Dynamics社（RDI）製のダイナミトロン（Dynamitron）である。この加速器は、電子線を加速するための直流高電圧発生回路に、整流器とコンデンサから成る整流回路を多段接続したカスケード型の電子加速器である。

2号加速器の加速電圧は1.0～3.0 MV（連続可変）であり、ビーム電流は0～25 mA（連続可変）である。加速管内で加速された電子線は、200 Hzの周波数で最大60 cm幅まで電磁走査され、40 μ m厚のチタン製ビーム窓を透過して大気中に取り出される。

この加速器には、照射用のコンベヤがあり、このコンベヤの試料台に乗せた試料を移動

しながら照射することができる。試料台は、幅 80 cm、長さ 1.3 m であり、その移動速度および高さは可変である。試料台は、照射時の試料の温度上昇を防ぐため、ステンレス製の金網で作られている。試料は、試料台に直接または試料台上に設置した照射治具にセットして照射する。ビーム電流が $100\ \mu\text{A}$ 以下の場合には、走査しない電子線（無走査ビーム）の照射が可能である。

4. 1. 3 低エネルギー加速器

低エネルギー加速器は、塗膜の硬化などに使用される日新ハイボルテージ株式会社製の「キュアトロン (Curetron)」である。

この加速器は、非走査型であり、照射部の周囲を鉄板や鉛板で遮蔽した自己遮蔽方式になっている。電子線は、線状のカソードから放出され、直流電圧で 1 段加速された後、50 μm 厚のアルミニウム製ビーム窓を通して照射部へ取り出される。照射部は、窒素雰囲気中に保たれている。加速電圧は 150~300 kV（連続可変）、ビーム電流は 1~100 μA （連続可変）、照射場の幅は 60 cm である。通常、試料は、専用のコンベヤを用いて、5~100 m/min の速度で移動させながら照射する。しかし、静止試料を照射する場合には、一定フルエンス率の電子線を連続して照射できるという利点がある。

4. 2 γ 線照射装置

原研と NASDA の共同研究における γ 線の照射は、高崎研のコバルト第 2 棟第 7 照射室（第 7 照射室）と食品コバルト棟第 2 照射室（第 2 照射室）で行った。

第 7 照射室の線源は、直径 10 mm、長さ 30 cm の ^{60}Co 棒状線源を複雑に組み合わせた 1.2 m 幅の板状であるが、左右の高さが異っており、照射台の中心線から線源に向って左側の線源の高さはおおよそ 30 cm、右側のそれはおおよそ 60 cm である。放射能強度は 4.81 PBq (130 kCi) であり、照射線量率 $1.0 \times 10^5\ \text{R/h}$ で長時間の照射が可能である。

第 2 照射室の線源は、直径 10 mm、長さ 30 cm の ^{60}Co 棒状線源を 1.6 m 幅の板状に組み立てたものである。放射能強度は 6.29 PBq (170 kCi) である。広い照射場が利用でき、 $3 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5\ \text{R/h}$ の範囲の照射線量率による照射ができる。

4.3 照射用治具

4.3.1 電子線照射用治具

電子線照射用治具を Figure 4.1 に示す。この治具は、アルミニウム製であり、電子線の吸収による発熱を防ぐために、水冷式になっている。また、試料の設置位置に小穴があけてあり、試料をセットした後、真空ポンプで吸引して太陽電池を固定する。

2号加速器で実施した照射温度の影響に関する研究では、照射用治具に温水を循環させ、その温度を 28、50、および 75 °C に保った。温水の循環および水温の調節には、ヤマト科学株式会社製 BH-81 型サーモエリートを使用した。照射用治具にセットした試料と同種の太陽電池（ダミー試料）の表面に 0.25 mmφ のクロメル-アルメル熱電対を導電性樹脂で接着して太陽電池表面の温度を測定した。その結果、フルエンス率が $1.0 \times 10^{12} \text{ e} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ で、治具設定温度が 28、50、および 75 °C の場合、太陽電池の表面温度をそれぞれ 28 ~ 31、48 ~ 51、および 66 ~ 71 °C の範囲に調節できることが分かった。これらの表面温度は、太陽電池の種類およびカバーガラスの有無によってほとんど変化しない。

また、1号加速器と2号加速器で実施した電子線損傷に及ぼす電子線入射角の影響の研究では、Figure 4.2 に示す架台を用い、照射用治具を 30、45、および 60 度に傾斜させて電子線を照射した。

低エネルギー加速器にはビームシャッターが無いので、Figure 4.3 に示すビームシャッターを備えた照射用治具を製作した。この治具は、ビームシャッター部および枠組を除いて、Figure 4.1 の照射用治具と同じである。ビームシャッターは、2 mm 厚の遮蔽アルミニウム板を空気圧で開閉する方式になっている。

以上の電子線照射用治具を、高さが調節できる架台（1号加速器）、コンベヤ上の試料台（2号加速器）、またはコンベヤ上（低エネルギー加速器）に水平に設置し、冷却水または温水を流しながら電子線を照射した。

4.3.2 γ線照射用治具

γ線の照射には、Figure 4.4 に示す治具を各照射室の照射台上に立てて使用した。この照射用治具は、Si-50セル、Si-200セル、およびGaAsセルそれぞれのBareセルとCGセルを各10枚、計60枚を同時に照射できる。Si太陽電池用はアルミニウム製であり、GaAsセル用は銅製である。これらの材質は、それぞれの太陽電池の実効原子番号を考慮して決定した。大きさが21 mm×21 mm角で、深さが2 mmの照射パネルの

凹みに太陽電池をセットし、電子平衡を得るために、その前面をそれぞれ2 mm厚のアルミニウム板および1 mm厚の銅板でカバーした。

当初の実験では、室温の変化に伴って、太陽電池の温度が20～31℃と大きく変化した。そこで、照射パネルの裏面にシーズヒーターを取り付け、照射室外に設置した温度コントローラーによって、試料の温度を30.5 ± 1.5℃に調節した。

4.4 電子フルエンスの測定

4.4.1 1号加速器および2号加速器

電子エネルギーが0.5～2 MeVの1号加速器および1～3 MeVの2号加速器の電子線のフルエンスおよびフルエンス率は、原研が開発した電子流密度測定器 (charge collector)^{45, 46} を用いて測定した。フルエンス率 ($\dot{\Phi}$ e·cm⁻²·s⁻¹) と電子流密度 (J A·cm⁻²) の関係は、次式で表わされる。

$$\dot{\Phi} = \frac{J}{1.602 \times 10^{-19}} \quad (4.1)$$

電子流密度測定器の検出器は円筒形であり、その断面図をFigure 4.5⁴⁶に示す。検出器の主吸収体 (main-absorber)、副吸収体 (sub-absorber)、および保護環 (guard ring) はグラファイト (C) 製であり、絶縁体には耐熱性および耐放射線性に優れた窒化硼素 (BN) を用いた。吸収体の実効入射面積は、直径20 mmの主吸収体の周囲に0.5 mmの間隙を隔てて保護環を設け、間隙を通り抜ける電子の半数を半円環状に分割された副吸収体で受ける方法によって正確に決定できる。後方散乱によって吸収体から散逸する電荷は、斜め入射を考慮した後方散乱係数を用いて補正した。吸収電荷量に影響を与える空気中のイオン電荷は、主として主吸収体の側壁と保護環の間の接触電位によって生じる。このイオン電荷は、空気中と真空中における電子流密度の測定結果を比較して補正した。

検出器からの電流は、2芯同軸ケーブルによって電荷測定系へ導かれる。2芯のうちの1本は、シグナル線で、主吸収体と副吸収体の1つに入射した電子線に起因する電流が流れる。他の1本は、ダミー線であり、電子線によって同軸ケーブルに誘起される電流が流れ、電子線によってシグナル線に誘起された電流を補償する役目をする。電荷測定系には2個の反転増幅型演算増幅器が用いられており、吸収体を含めた検出系がゼロ電位に近い状態で測定できる。

この電子流密度測定器の測定範囲は、10⁻¹¹ ～ 10⁻² A·cm⁻² (フルエンス率: 6 × 10⁷

$\sim 6 \times 10^{16} \text{ e} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)であり、吸収電荷量を積分することによってフルエンスが与えられる。

電子流密度測定器を2号加速器のビーム窓下 20 cmの平面に設置して、電子線の走査方向(X軸方向)とその直角方向(Y軸方向)に等速で移動しながら測定した加速電圧 1.0 MV、ビーム電流 1.0 mA の走査ビームの電子流密度の分布曲線をFigure 4. 6に示す。また、同じ方法で測定した加速電圧 1.0 MV、ビーム電流 98 μA の無走査ビームの中心軸付近のY軸方向の電子流密度の分布曲線をFigure 4. 7に示す。この時のX軸方向の電子流密度の分布は、Y軸方向とほぼ同じガウス分布である。

4. 4. 2 低エネルギー加速器

加速電圧が 150~300 kVの低エネルギー加速器 (Curetron)のフルエンス率は、ビーム窓から 5 cm 下の太陽電池の照射場の全ビーム電流と、この照射場の相対的な吸収線量分布から求めた。

全ビーム電流は、電子線の照射場より十分大きい面積の水に入射する電子線に起因する電流を測定して求めた。測定法をFigure 4. 8に示す。ターゲットとして水を用いたのは、水の実効原子番号が低いので電子線の後方散乱が少く、後方散乱に対する補正誤差が小さいためである。測定した電流値(I)を、加速器のカソードへの負荷電流(I_{OP})の関数として、Figure 4. 9に示す。この図から、次の関係式が得られる。

$$I = 0.58 I_{OP} \quad (4.2)$$

実際に水に入射するビーム電流(I_i)は、後方散乱に対する補正を行った次式で与えられる。

$$I_i = \frac{I}{(1 - \eta_{BN})} \quad (4.3)$$

ここに、 η_{BN} は電子数後方散乱係数であり、ターゲットの実効原子番号(Z)、および電子線の入射エネルギー(T)と入射角(Ψ)の関数である。この電子数後方散乱係数は、近似的に次式で表わされる。

$$\eta_{BN} = \eta_{bn}(Z, T, 0) + \eta_{bn}(Z, T, \Psi) \quad (4.4)$$

ここで、 $\eta_{bn}(Z, T, 0)$ は、電子線の入射角がゼロ、すなわち垂直に入射する電子線の電子数後方散乱係数である。また、 $\eta_{bn}(Z, T, \Psi)$ は、入射角が Ψ の斜め入射する電子線の寄与を表わす。

加速電圧が 300 kV 程度の電子線を空气中または窒素雰囲気中で照射すると、電子線の角度分布の広がりが大きくなり、電子線の方向は完全拡散に近くなる。この場合、ビーム窓および空気あるいは窒素層を透過した後の電子線の平均 2 乗散乱角を $\overline{(\theta^2)}$ とすると、入射角が 2 次元ガウス分布の場合の近似式がほぼ適用でき、 η_{BN} は次式で表わされる⁴⁶。

$$\eta_{BN} = \eta_{bn}(Z, T, 0) + 0.17 \overline{(\theta^2)} \quad (4.5)$$

4. 6 節の Table 4. 5 と 4. 6 に示すように、加速管内エネルギーが 300 keV の電子線は、50 μm 厚のアルミニウム製ビーム窓と 5 cm 厚の窒素層を通過すると、その平均エネルギーがおおよそ 250 keV に低下する。この場合、水ターゲットに対する平均 2 乗散乱角 $\overline{(\theta^2)}$ は 0.285 rad^2 となり、エネルギーが 250 keV の電子線の $\eta_{bn}(Z, T, 0)$ は、多幡らの経験式⁴⁷から、0.044 と与えられる。従って、電子数後方散乱係数 η_{BN} は式 (4.5) から 0.0925 となり、実際に水に入射するビーム電流 (I_i) は、次式で与えられる。

$$I_i = \frac{0.58 I_{op}}{(1 + 0.0925)} = 0.639 I_{op} \quad (4.6)$$

ビーム窓下 5 cm の平面における電子線の線状カソードと平行な方向 (X 軸方向) とこれに直角な方向 (Y 軸方向) の相対的な吸収線量の分布は、0.125 mm 厚の CTA 線量計 (cellulose triacetate dosimeter : 三酢酸セルロースに磷酸トリフェニルを添加してフィルム状にした線量計) FTR-125 によって測定した。結果を Figure 4. 10 に示す。照射場の電子線のフルエンス率は CTA 線量計の吸収線量に比例すると考えられるので、Figure 4. 10 の吸収線量分布は、電子線の相対的なフルエンス率の分布を表わすと考えて差し支えない。従って、この図から、X 軸方向には 50 cm (ビーム中心軸の ± 25 cm) の間でほぼ均一なフルエンス率が得られるが、Y 軸方向では均一なフルエンス率が得られる幅が非常に狭いことが分かる。照射場の各点のフルエンス率は、この相対的なフルエンス率を全ビーム電流で規格化することによって与えられる。

4. 5 γ 線量の測定

コバルト第 2 棟第 7 照射室 (第 7 照射室) における太陽電池の γ 線照射は、 $1.0 \times 10^6 \text{ R}\cdot\text{h}^{-1}$ の照射線量率で行った。また、食品コバルト棟第 2 照射室 (第 2 照射室) における照射線量率は、 1.0×10^5 と $3.0 \times 10^4 \text{ R}\cdot\text{h}^{-1}$ であった。

それぞれの照射室における所定の線量率の位置は、平行平板型電離箱 JTC-8 によっ

て測定した線源保護板からの距離が異なる3点の照射線量率のプロットから、内挿法によって決定した。4.3.2項に記載したように、照射用治具の前面(γ 線の入射側)は、電子平衡を得るために、それぞれ2 mm厚のアルミニウム板(Si 太陽電池用)または1 mm厚の銅板(Ga As セル用)をカバーとして用いている。従って、照射用治具前面のカバーによる γ 線の減衰を同じ厚みのアルミニウムの壁を有する電離箱の減衰補正率と同じ1.5 %として、所定の照射線量率の位置を補正した。

第2照射室では、板状線源と平行に照射用治具を設置した。一方、4.2節で述べたように、第7照射室の板状線源は、高さが中心線の左右で異なる。このため、等線量率分布曲線は、線源の形状を反映して、照射台の中心線に対して左右非対称である。そこで、予め定期的に測定されている空間線量率分布に基づいて、照射用治具の線源に対する傾斜角を決定した。

照射用治具内の照射線量率分布は、照射用治具の太陽電池をセットする21 mm×21 mm角で深さが2 mmの凹みにコバルトガラス線量計をセットして測定した。測定点は15点である。測定結果から得た平均照射線量率を、電離箱によって決定した照射線量率とともにTable 4.1に示す。それぞれの照射線量率の位置において、コバルトガラス線量計で測定した15点の照射線量率の標準偏差(σ)の平均照射線量率に対する割合は、1.5 ~ 2.6 %である。従って、照射用治具の太陽電池をセットする部分の照射線量率はほぼ均一であると考えて差し支えない。

Table 4.1によれば、コバルトガラス線量計で測定した平均照射線量率は、電離箱によって測定した照射線量率と比較して7 %程度高い。コバルトガラス線量計は、電子平衡を考慮して、通常、その素子を同じ厚みのガラス板2枚で挟んで使用される。しかし、今回の測定では、太陽電池照射用治具の凹みの部分の深さが2 mmしかないため、1.5 mm厚のコバルトガラス線量計素子を単体で凹みに挿入して照射線量率を測定した。従って、線量計素子に対する電子平衡が成立していないために、コバルトガラス線量計によって測定した平均照射線量率が電離箱による測定値より高い値を示したと考えられる。

4.6 電子エネルギーの評価

加速管内で加速された電子線は、加速管のビーム窓および空気層または窒素層を通過する時、そのエネルギーを失う。さらに、CGセルでは、カバーガラスと接着剤層によっても電子線のエネルギーが低下する。

透過層の厚みが電子線の飛程と比較して十分に薄い場合には、透過層を通過した電子線の平均エネルギー ($\overline{E}_{out}$ MeV)は、

$$\overline{E}_{out} = \overline{E}_{in} - \left(\frac{dE}{dx} \right) t \quad (4.7)$$

で与えられる。ここに、 $\overline{E}_{in}$ は透過層に入射する電子線の平均エネルギー (MeV)であり、 (dE/dx) は透過層の衝突阻止能 ($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)、 t は透過層の厚み ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)である。

4. 1. 1項と4. 1. 2項で述べたように、1号加速器と2号加速器のビーム窓はいずれもチタン製であり、厚みはそれぞれ $50 \mu\text{m}$ ($0.0227 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)と $40 \mu\text{m}$ ($0.0182 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)である。これらの加速器では、ビーム窓を通過した電子線は 20 cm ($0.0241 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)厚の空気層を通過して、太陽電池の表面 (CGセルではカバーガラスの表面)に到達する。一方、低エネルギー加速器のビーム窓はアルミニウム製であり、その厚みは $50 \mu\text{m}$ ($0.0135 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)である (4. 1. 3項)。この加速器の電子線は、ビーム窓を出た後、 5 cm ($0.0058 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)厚の窒素層を通過して、太陽電池の表面に到達する。さらに、CGセルでは、太陽電池の活性領域の表面に到達するまでに、電子線は、 $150 \mu\text{m}$ ($0.0334 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)厚のカバーガラスと $70 \mu\text{m}$ ($0.0079 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)厚の接着剤層を通過する。

このように電子線が多重の透過層を通過する太陽電池の照射の場合には、式 (4.7)を用いて、それぞれの透過層を通過した時の電子線の平均エネルギーを逐次計算して、太陽電池の活性領域の表面に入射する電子線の平均エネルギーを求めなければならない。この場合、それぞれの透過層の衝突阻止能は、その透過層に入射する電子線の平均エネルギーに対応する衝突阻止能を使用する。

しかし、さらに粗い近似では、次式によって、加速管内の電子エネルギー (E_0 MeV)から、太陽電池の活性領域の表面に入射する電子線の平均エネルギー ($\overline{E}$ MeV)を直接求めることができる。

$$\begin{aligned} \overline{E} = E_0 - & \left(\frac{dE}{dx} \right)_w t_w - \left(\frac{dE}{dx} \right)_{air} t_{air} - \left(\frac{dE}{dx} \right)_{cg} t_{cg} \\ & - \left(\frac{dE}{dx} \right)_{ad} t_{ad} \end{aligned} \quad (4.8)$$

ここに、 $(dE/dx)_w$ と t_w 、 $(dE/dx)_{air}$ と t_{air} 、 $(dE/dx)_{cg}$ と t_{cg} 、

および $(dE/dx)_{ad}$ と t_{ad} は、それぞれビーム窓、空気または窒素層、カバーガラス、および接着剤層の衝突阻止能 ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$) と厚み ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) である。この場合には、加速管内の電子エネルギーに対応するそれぞれの透過層の衝突阻止能を用いる。

太陽電池の活性領域表面に入射する電子線の平均エネルギーの計算に必要な、接着剤を除く、それぞれの物質の衝突阻止能 (dE/dx) および密度 (d) をそれぞれ Table 4. 2 および 4. 3⁴⁸ に示す。文献⁴⁸には、エネルギーが 0.0100 ~ 1000 MeV の範囲の電子の衝突阻止能が記載されている。Table 4. 3 には、それぞれの物質の平均励起エネルギー (I) も示した。接着剤は、詳細な組成が明らかでない (3. 3. 1 項) ので、衝突阻止能が得られない。しかし、接着剤として用いられる典型的なエラストマーの密度が $1.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ と報告⁴⁹されているので、Table 4. 4⁴⁸ に示した密度が $1.127 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の細胞組織と等価なプラスチックの衝突阻止能を、接着剤の衝突阻止能として用いることにした。

原研と NASDA の共同研究において、太陽電池の照射に用いた低エネルギー加速器、1号加速器、および2号加速器のそれぞれの加速管内電子エネルギーにおける太陽電池の活性領域表面に入射する電子線のエネルギーの計算結果を Table 4. 5 と 4. 6 に示す。Table 4. 5 は、式 (4.7) による逐次計算の結果である。Table 4. 6 の計算には、式 (4.8) を用いた。以上の計算において、それぞれの透過層における Table 4. 2 と 4. 4 から直接得ることができないエネルギーの電子線の衝突阻止能は、そのエネルギーの上下のエネルギーの衝突阻止能から直線近似法によって求めた。

Table 4. 5 と 4. 6 に示した Bare セルの場合と加速管内電子エネルギーが 0.6 MeV 以上の CG セルの場合には、式 (4.7) を用いる逐次法によって求めた太陽電池の活性領域の表面に入射する電子エネルギーと式 (4.8) を用いる直接法によるその差の逐次法の値に対する割合が 0 ~ 1% である。従って、これらの場合には、太陽電池の活性領域の表面に入射する電子線の平均エネルギーを直接法によって推算して差し支えない。

一方、加速管内電子エネルギーが 0.3、0.4、および 0.5 MeV の CG セルの場合には、逐次法によって算出した太陽電池の活性領域の表面に入射する電子エネルギーと直接法によるその差の逐次法の値に対する割合がそれぞれ 4.7、3.4、および 1.4% である。従って、このような場合には、逐次法によって太陽電池の活性領域の表面に入射する電子エネルギーを推算する方が妥当と考えられる。

以上の考察に基づいて、本報告では、太陽電池の活性領域に入射する電子線の平均エネ

ルギーとして、Table 4. 5 の逐次法の値を用いることにする。

なお、電子線損傷に及ぼす電子線入射角の影響に関する研究では、太陽電池表面（CGセルの場合は、カバーガラス表面）に入射する電子線の平均エネルギーを 0.5、1.0、および 2.0 と規定した。この場合の式 (4.7) を用いる逐次法によって逆算した加速管内電子エネルギー、すなわち加速電圧を Table 4. 7 に示す。

4. 7 電子線の照射方法

原研と NASDA の共同研究における太陽電池の電子線照射は、主として固定照射法 (fixed irradiation method) によって実施した。しかし、宇宙用太陽電池の耐放射線性評価試験における電子線照射の標準的で妥当な方法を確認するために、移動照射法 (moving irradiation method) とスポット照射法 (spot irradiation method) についても検討した。本節では、これらの照射方法について説明する。

4. 7. 1 固定照射法

1号加速器および2号加速器における固定照射法では、ビーム窓下 20 cm の位置に太陽電池をセットし、静止している試料に走査ビームを照射する。一方、無走査ビームの低エネルギー加速器の場合には、ビーム窓下 5 cm の位置に太陽電池をセットし、静止している試料に電子線を照射する。これらの場合、4. 4 節で述べたように、電子線の走査方向に対して直角方向または無走査ビームの線状カソードに直角の方向（Y 軸方向）には、均一なフルエンス率が得られる範囲が狭いので、4. 3. 1 項に記載した電子線照射用治具の試料をセットする溝に 2 cm × 2 cm 角の太陽電池を最高 2 列までしか並べられない。しかし、電子線の走査方向または無走査ビームの線状カソードに平行な方向（X 軸方向）には、標準走査幅または線状カソードの長さの 60 cm までほぼ均一なフルエンス率が得られる (Figure 4. 6 と 4. 10)。

原研と NASDA の共同研究における固定照射法では、まず、4. 3. 1 項に記載した電子線照射用治具の試料をセットする溝の 1 列に同種の太陽電池を 20 枚（Bare セル 10 枚と CG セル 10 枚）セットする。次いで、この溝が電子線の X 軸方向と Y 軸方向の最高フルエンス率が得られる位置、すなわち Figure 4. 6 と 4. 10 の X 軸方向の電子流密度分布または吸収線量分布が平坦な領域で、Y 軸方向のこれらの分布がピークになる位置に来るように照射用治具を設置した。その後、太陽電池が加速器のビーム窓下 20 cm

(1号加速器と2号加速器)または5 cm(低エネルギー加速器)になるように高さを調節して、電子線を照射した。

従って、1号加速器と2号加速器における固定照射法の場合には、電子流密度分布曲線のピーク値から所定のフルエンス率を与えるビーム電流値を得ることができる。原研とN A S D Aの共同研究において1号加速器と2号加速器で実施した固定照射法における加速電圧(E_0)と電子流密度のピーク値(J_p)および $1.0 \times 10^{12} \text{ e} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ のフルエンス率を得るためのビーム電流値(I_b)の関係をTable 4. 8に示す。

一方、4. 4. 2項で述べたように、低エネルギー加速器における固定照射法のフルエンス率は、Figure 4. 10の吸収線量分布から得られる相対的なフルエンス率を全ビーム電流(I_i)で規格化することによって与えられる。従って、この加速器の線状カソードと平行な方向(X軸方向)のフルエンス率は、全ビーム電流で規格化して得たフルエンス率を、この方向にセットできる試料の長さ(およそ50 cm)で平均化することによって得ることができる。また、X軸方向と直角な方向(Y軸方向)のフルエンス率は、規格化によって得られるフルエンス率のピーク値から得ることができる。計算の結果、加速電圧が300 kVで、カソードへの負荷電流(I_{op})が1 mAの時、太陽電池の照射場の平均フルエンス率は $6.09 \times 10^{12} \text{ e} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と与えられる。

1号加速器と2号加速器における固定照射法では、照射量コントロールシステムを用い、所定のフルエンスの電子線を正確に照射できるようにした。このシステムでは、試料面における電子線のフルエンス率を所定の値に調節した後、加速器のビーム窓に取り付けてあるビームシャッターを開いて照射を開始し、フルエンス率の積分値が予め設定した値に達すると、シャッターが自動的に閉じるようになっている。フルエンス率は、4. 4. 1項に記載した電子流密度測定器を用いてビーム電流値に対して校正してあるので、ビーム電流を積分することによって、フルエンスを計数できる。また、このシステムによって、照射中のビーム電流の変動、すなわちフルエンス率の変動、平均フルエンス率などのデータも容易に得ることができる。

1号加速器と2号加速器における固定照射法による電子線照射では、試料が周波数200 Hzの走査ビームによってパルス状に繰り返し照射される。すなわち、走査コイルに流れる電流波形の周期(5 ms)の1/2(2.5 ms)毎にパルス状の電子線が試料に入射する。一般に、このような電子線の照射では、この時間的な変動を平均化した定常的な連続ビームとして扱う。この場合の電子流密度の真のピーク値と平均電子流密度の比は近似計算に

よって求めることができ、定常的な連続電子線としての平均フルエンス率を得ることができ¹⁵⁾。2号加速器の場合、加速電圧 1.0 MV（加速管内電子エネルギー：1.0 MeV）、ビームの走査幅が 60 cmの時、ビーム窓下 20 cm の位置におけるこの比はおよそ 5 である。

4. 7. 2 移動照射法

移動照射法による太陽電池の電子線照射は、照射用のコンベヤを備えた 2 号加速器で実施した。この方法では、4. 3. 1 項に記載した電子線照射用治具に太陽電池をセットし、太陽電池がビーム窓下 20 cmの位置を通過するようにコンベヤの試料台上に照射用治具を設置する。この照射用治具を、コンベヤによって、電子線の走査方向（X軸方向）に対して直角方向（Y軸方向）に等速移動させ、加速器のビーム窓下を繰り返し通過させて、周波数 200 Hz の走査ビームを照射する。

移動照射法の照射条件は、ビーム電流、試料の移動速度、ビーム窓からの距離などの照射パラメータと電子流密度測定器を用いて測定したフルエンスの関係から決定した。また、試料の近くに電子流密度測定器を設置して、照射中の電子線のフルエンスをチェックした。

移動照射法には、電子線照射用治具の試料をセットする 6 列の溝全部に各列 23 枚、計 138 枚の太陽電池をセットして、同時に照射できるという利点がある。しかし、この方法では、固定照射法と同様のビーム走査による電子線の短周期のパルス化に加えて、試料が加速器のビーム窓下を繰り返し通過する長い周期のパルス化のために、試料に入射する電子流密度、すなわちフルエンス率の変化は、固定照射法の場合より非常に複雑になる。

原研と NASDA の共同研究における移動照射法による電子線照射では、電子線照射用治具の試料をセットする溝を 3 列使用して、各列に同種の太陽電池 20 枚（Bare セル 10 枚と CG セル 10 枚）を X 軸方向にセットして同時に照射した。

4. 7. 3 スポット照射法

原研と NASDA の共同研究におけるスポット照射法による太陽電池の電子線照射は、無走査ビームの照射が可能な 2 号加速器で実施した。この方法では、ビーム窓下 20 cm の位置にビームの中心軸を中心にセットした太陽電池に、静止状態で無走査ビームを照射する。この場合、一定フルエンス率の電子線を連続して照射できる。しかし、Figure 4.

7に示した無走査ビームの電子流密度分布から明らかなように、ビーム窓下 20 cmの位置で、均一なフルエンス率を得られる照射場の面積が狭く、2 cm × 2 cm 角の太陽電池の場合、ほぼ均一な最高フルエンス率で一度に照射できる試料数は、無走査ビームの中心軸を中心にX軸方向とY軸方向に2枚ずつ、計4枚になる。この場合、試料の端部のフルエンス率は、ピーク値のおよそ 90 % になる。従って、固定照射法の場合と同様に、スポット照射法の場合のフルエンス率は、Figure 4. 7に示したY軸方向の電子流密度分布曲線のピーク値から所定のフルエンス率を与えるビーム電流値を得ることができる。しかし、ビームの無走査運転は、過熱によるビーム窓の破損の危険性があり、ビーム電流が最高 100 μ A に制限されるために、フルエンス率の可変範囲が狭い。フルエンス率のピーク値は、ビーム電流が 100 μ A の時、 $3.45 \times 10^{12} \text{ e} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ である。

スポット照射法による電子線照射では、それぞれの太陽電池の試料数を4枚とし、同時に照射した。この場合にも、固定照射法の場合と同様に、照射量コントロールシステムを用い、所定のフルエンスの電子線を正確に照射できるようにした。操作方法は、固定照射法の場合と同じである。

4. 8 基準照射条件

現在、高崎研で実施されている宇宙用太陽電池の耐放射線性評価試験における標準的な電子線の照射条件は、

加速電圧 : 1.0 MV (加速管内電子エネルギー : 1.0 MeV)

フルエンス率 : $1.0 \times 10^{12} \text{ e} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (固定照射法)

$1.0 \times 10^{12} \text{ e} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{pass}^{-1}$ (移動照射法)

フルエンス : $1.0 \times 10^{15} \text{ e} \cdot \text{cm}^{-2}$

走査周波数 : 200 Hz

走査幅 : 60 cm

である。

従って、原研とNASAの共同研究においても、1号加速器と2号加速器で照射する場合、この条件を基準条件とした。しかし、Table 4. 5と4. 6に示したように、この基準照射条件では、2号加速器による照射の場合、Bare セル表面に入射する電子線の平均エネルギーは、1号加速器のそれと比較して、およそ 0.65 % 高くなる。また、CGセルの場合には、2号加速器で照射した時の太陽電池の活性領域の表面に入射する電子線の

平均エネルギーが、1号加速器のそれよりおよそ 0.70 % 高い。これは、2号加速器のビーム窓の厚みが1号加速器のそれより 10 μm 薄いためである。実験誤差を考慮すると、この程度の相違は問題にならないかも知れないが、厳密には、1号加速器と2号加速器では照射条件が異なることになる。従って、本報告では、上記条件の2号加速器の場合を1号加速器と2号加速器の基準照射条件とし、太陽電池の活性領域の表面に入射する電子線の平均エネルギーをTable 4. 5の逐次法によって推算した平均エネルギーを使用することとした(4. 6節)。

一方、4. 7. 1項に記載したように、低エネルギー加速器の場合には、加速電圧が 300 kVでカソードへの負荷電流 (I_{op}) が 1.0 mA の時、ビーム窓下 5 cm の位置におけるフルエンス率は $6.09 \times 10^{12} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ になる。従って、低エネルギー加速器で照射する場合の基準フルエンス率を $1.0 \times 10^{12} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ とすると、カソードへの負荷電流が 0.164 mA になる。しかし、低エネルギー加速器では、1 mA以下の負荷電流の制御が困難なので、カソードへの負荷電流を 10 倍の 1.64 mAとし、基準条件を、

加速電圧 : 300 kV (加速管内電子エネルギー : 300 keV)

フルエンス率 : $1.0 \times 10^{13} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

フルエンス : $1.0 \times 10^{15} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$

とした。

γ 線の照射は、宇宙環境における非常に低いフルエンス率の電子線による太陽電池の損傷を模擬するために、損傷等価性を検討する目的で行った。従って、特に基準照射条件を設定しなかった。

Table 4. 1 Exposure dose rate of γ rays

Irradiation room	Item	Ionization chamber	Cobalt glass dosimeter
No. 7 cell	Dose rate ($R \cdot h^{-1}$)	1.0×10^6	1.07×10^6 a)
	σ ($R \cdot h^{-1}$)	. . .	2.37×10^4 a) (2.21 %) b)
No. 2 cell	Dose rate ($R \cdot h^{-1}$)	1.0×10^5	1.07×10^5 a)
	σ ($R \cdot h^{-1}$)	. . .	2.74×10^3 a) (2.56 %) b)
	Dose rate ($R \cdot h^{-1}$)	3.0×10^4	3.21×10^4 a)
	σ ($R \cdot h^{-1}$)	. . .	4.82×10^2 a) (1.50 %) b)

a) Mean value and standard deviation (σ) of exposure dose rates measured at 15 points on the surface of irradiation equipment of solar cell for γ rays.

b) Ratio of σ to mean value.

Table 4.2 Collision stopping power for electrons^{a,b}

Energy (MeV)	Collision stopping power (MeV·cm ² ·g ⁻¹)						
	Ti	Al	Air ^{a)}	N ₂	Glass ^{b)}	Si O ₂	Si
0.1000	2.867 E+00	3.178 E+00	3.633 E+00	3.660 E+00	3.390 E+00	3.386 E+00	3.265 E+00
0.1250	2.514 E+00	2.782 E+00	3.172 E+00	3.195 E+00	2.966 E+00	2.963 E+00	2.859 E+00
0.1500	2.274 E+00	2.514 E+00	2.861 E+00	2.881 E+00	2.679 E+00	2.677 E+00	2.583 E+00
0.1750	2.101 E+00	2.320 E+00	2.637 E+00	2.655 E+00	2.473 E+00	2.471 E+00	2.385 E+00
0.2000	1.971 E+00	2.175 E+00	2.470 E+00	2.486 E+00	2.318 E+00	2.316 E+00	2.236 E+00
0.2500	1.789 E+00	1.973 E+00	2.236 E+00	2.251 E+00	2.102 E+00	2.101 E+00	2.028 E+00
0.3000	1.670 E+00	1.840 E+00	2.084 E+00	2.097 E+00	1.962 E+00	1.961 E+00	1.892 E+00
0.3500	1.588 E+00	1.748 E+00	1.978 E+00	1.991 E+00	1.864 E+00	1.864 E+00	1.797 E+00
0.4000	1.528 E+00	1.681 E+00	1.902 E+00	1.914 E+00	1.793 E+00	1.792 E+00	1.729 E+00
0.4500	1.483 E+00	1.631 E+00	1.845 E+00	1.857 E+00	1.739 E+00	1.738 E+00	1.677 E+00
0.5000	1.449 E+00	1.594 E+00	1.802 E+00	1.813 E+00	1.698 E+00	1.697 E+00	1.638 E+00
0.5500	1.423 E+00	1.564 E+00	1.769 E+00	1.779 E+00	1.665 E+00	1.665 E+00	1.608 E+00
0.6000	1.402 E+00	1.541 E+00	1.743 E+00	1.753 E+00	1.640 E+00	1.639 E+00	1.585 E+00
0.7000	1.373 E+00	1.508 E+00	1.706 E+00	1.716 E+00	1.603 E+00	1.603 E+00	1.551 E+00
0.8000	1.355 E+00	1.487 E+00	1.683 E+00	1.693 E+00	1.579 E+00	1.579 E+00	1.529 E+00
0.9000	1.343 E+00	1.474 E+00	1.669 E+00	1.679 E+00	1.563 E+00	1.563 E+00	1.516 E+00
1.0000	1.335 E+00	1.466 E+00	1.661 E+00	1.670 E+00	1.552 E+00	1.552 E+00	1.507 E+00
1.2500	1.328 E+00	1.458 E+00	1.655 E+00	1.665 E+00	1.540 E+00	1.540 E+00	1.500 E+00
1.5000	1.330 E+00	1.460 E+00	1.661 E+00	1.670 E+00	1.538 E+00	1.538 E+00	1.502 E+00
1.7500	1.336 E+00	1.467 E+00	1.672 E+00	1.681 E+00	1.541 E+00	1.542 E+00	1.509 E+00
2.0000	1.343 E+00	1.475 E+00	1.684 E+00	1.693 E+00	1.547 E+00	1.548 E+00	1.518 E+00
2.5000	1.359 E+00	1.492 E+00	1.712 E+00	1.721 E+00	1.561 E+00	1.563 E+00	1.538 E+00
3.0000	1.376 E+00	1.509 E+00	1.740 E+00	1.749 E+00	1.576 E+00	1.578 E+00	1.558 E+00
3.5000	1.391 E+00	1.525 E+00	1.766 E+00	1.775 E+00	1.590 E+00	1.593 E+00	1.575 E+00

a) Dry air near sea level.

b) Corning 7740 "pyrex glass" (borosilicate).

Table 4. 3 Density (ρ) and average excitation energies (I)^{4a}

Item	Ti	Al	Air ^{a)}	N ₂	Glass ^{b)}	Si O ₂	Si
ρ (g·cm ⁻³)	4.540 E+00	2.699 E+00	1.205 E-03 (20 °C)	1.165 E-03 (20 °C)	2.230 E+00	2.320 E+00	2.330 E+00
I (eV)	233.0	166.0	85.7	82.0	134.0	139.2	173.0

a) Dry air near sea level.

b) Corning 7740 "pyrex glass" (borosilicate).

Table 4. 4 Collision stopping power (dE/dx) for electrons
in A-150 tissue-equivalent plastic^{4a}Density: $\rho = 1.127$ g/cm³, Average excitation energy: $I = 65.1$ eV

Energy (MeV)	dE/dx (MeV·cm ² ·g ⁻¹)	Energy (MeV)	dE/dx (MeV·cm ² ·g ⁻¹)	Energy (MeV)	dE/dx (MeV·cm ² ·g ⁻¹)
0.1000	4.150 E+00	0.4000	2.156 E+00	1.0000	1.834 E+00
0.1250	3.620 E+00	0.4500	2.086 E+00	1.2500	1.812 E+00
0.1500	3.262 E+00	0.5000	2.033 E+00	1.5000	1.803 E+00
0.1750	3.005 E+00	0.5500	1.991 E+00	1.7500	1.802 E+00
0.2000	2.812 E+00	0.6000	1.957 E+00	2.0000	1.804 E+00
0.2500	2.544 E+00	0.7000	1.908 E+00	2.5000	1.814 E+00
0.3000	2.369 E+00	0.8000	1.874 E+00	3.0000	1.827 E+00
0.3500	2.247 E+00	0.9000	1.851 E+00	3.5000	1.839 E+00

Table 4.5 Average energies of electron beams (E_2 and E_4) incident on the surface of active region of solar cell calculated by the successive method using equation (4.7)

Electron accelerator		Low ^{a)}	No. 1						No. 2				
$E_0^{b)}$ (MeV)		0.3	0.4	0.5	0.6	0.75	1.0	2.0	1.0	1.25	1.5	1.0	3.0
Ti or Al window	$dE/dx^{g)}$ ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	1.840	1.528	1.449	1.402	1.364	1.335	1.343	1.335	1.328	1.330	1.343	1.376
	$\Delta E^{h)}$ (MeV)	0.025	0.035	0.033	0.032	0.031	0.030	0.030	0.024	0.024	0.024	0.024	0.025
$E_1^{c)}$ (MeV)		0.275	0.365	0.467	0.568	0.719	0.970	1.970	0.976	1.226	1.476	1.976	2.975
Air or N ₂ layer	$dE/dx^{g)}$ ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	2.174	1.955	1.830	1.760	1.702	1.663	1.683	1.663	1.656	1.660	1.683	1.739
	$\Delta E^{h)}$ (MeV)	0.013	0.047	0.044	0.042	0.041	0.040	0.041	0.040	0.040	0.040	0.041	0.042
$E_2^{d)}$ (MeV)		0.262	0.318	0.423	0.526	0.678	0.930	1.929	0.936	1.186	1.436	1.935	2.933
Cover glass	$dE/dx^{g)}$ ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	2.068	1.927	1.768	1.681	1.611	1.560	1.545	1.559	1.543	1.539	1.545	1.574
	$\Delta E^{h)}$ (MeV)	0.069	0.064	0.059	0.056	0.054	0.052	0.052	0.052	0.052	0.051	0.052	0.053
$E_3^{e)}$ (MeV)		0.193	0.254	0.364	0.470	0.624	0.878	1.877	0.884	1.134	1.385	1.883	2.880
Adhesive layer	$dE/dx^{g)}$ ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	2.866	2.530	2.222	2.065	1.945	1.856	1.803	1.855	1.822	1.807	1.803	1.824
	$\Delta E^{h)}$ (MeV)	0.023	0.020	0.018	0.016	0.015	0.015	0.014	0.015	0.014	0.014	0.014	0.014
$E_4^{f)}$ (MeV)		0.170	0.234	0.346	0.454	0.609	0.863	1.863	0.869	1.120	1.371	1.869	2.866

a) Low : Low energy accelerator.

b) E_0 : Energy of electron beams in the accelerating tube of accelerator.

c) E_1 : Averaged energy of electron beams incident on the surface of air or nitrogen layer.

d) E_2 : Averaged energy of electron beams incident on the surface of bare solar cell or on the surface of cover glass.

e) E_3 : Averaged energy of electron beams incident on the surface of adhesive layer.

f) E_4 : Averaged energy of electron beams incident on the surface of active region of solar cell with cover glass.

g) dE/dx : Collision stopping power.

h) ΔE : Energy loss.

Table 4.6 Averag energies of electron beams (E_2 and E_4) incident on the surface of active region of solar cell calcurated by the direct method using equation (4.8)

Electron accelerator		Low ^{a)}	No. 1						No. 2				
$E_0^{b)}$ (MeV)		0.3	0.4	0.5	0.6	0.75	1.0	2.0	1.0	1.25	1.5	1.0	3.0
Ti or Al window	$dE/dx^{g)}$ (MeV·cm ² ·g ⁻¹)	1.840	1.528	1.449	1.402	1.364	1.335	1.343	1.335	1.328	1.330	1.343	1.376
	$\Delta E^{h)}$ (MeV)	0.025	0.035	0.033	0.032	0.031	0.030	0.030	0.024	0.024	0.024	0.024	0.025
$E_1^{c)}$ (MeV)		0.275	0.365	0.467	0.568	0.719	0.970	1.970	0.976	1.226	1.476	1.976	2.975
Air or N ₂ layer	$dE/dx^{g)}$ (MeV·cm ² ·g ⁻¹)	2.097	1.902	1.802	1.743	1.695	1.661	1.684	1.661	1.655	1.661	1.684	1.740
	$\Delta E^{h)}$ (MeV)	0.012	0.046	0.043	0.042	0.041	0.040	0.041	0.040	0.040	0.040	0.041	0.042
$E_2^{d)}$ (MeV)		0.263	0.319	0.424	0.526	0.678	0.930	1.929	0.936	1.186	1.436	1.935	2.933
Cover glass	$dE/dx^{g)}$ (MeV·cm ² ·g ⁻¹)	1.962	1.793	1.698	1.640	1.591	1.552	1.547	1.552	1.540	1.538	1.547	1.576
	$\Delta E^{h)}$ (MeV)	0.066	0.060	0.057	0.055	0.053	0.052	0.052	0.052	0.052	0.051	0.052	0.053
$E_3^{e)}$ (MeV)		0.197	0.259	0.367	0.471	0.625	0.878	1.877	0.884	1.134	1.385	1.883	2.880
Adhesive layer	$dE/dx^{g)}$ (MeV·cm ² ·g ⁻¹)	2.369	2.156	2.033	1.957	1.891	1.834	1.804	1.834	1.812	1.803	1.804	1.827
	$\Delta E^{h)}$ (MeV)	0.019	0.017	0.016	0.015	0.015	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
$E_4^{f)}$ (MeV)		0.178	0.242	0.351	0.456	0.610	0.864	1.863	0.870	1.120	1.371	1.869	2.866

a) Low : Low energy accelerator.

b) E_0 : Energy of electron beams in the accelerating tube of accelerator.

c) E_1 : Averaged energy of electron beams incident on the surface of air or nitrogen layer.

d) E_2 : Averaged energy of electron beams incident on the surface of bare solar cell or on the surface of cover glass.

e) E_3 : Averaged energy of electron beams incident on the surface of adhesive layer.

f) E_4 : Averaged energy of electron beams incident on the surface of active region of solar cell with cover glass.

g) dE/dx : Collision stopping power.

h) ΔE : Energy loss.

Table 4.7 Accelerating voltages for the electron beams with energies of 0.5, 1.0, and 2.0 MeV incident on the surface of solar cell calculated by the successive method using equation (4.7)

Electron accelerator		No. 1		No. 2	
$E_2^{a)}$ (MeV)		0.5	1.0	1.0	2.0
Air layer	$dE/dx^{d)}$ ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	1.802	1.661	1.661	1.684
	$\Delta E^{e)}$ (MeV)	0.043	0.040	0.040	0.041
$E_1^{b)}$ (MeV)		0.543	1.040	1.040	2.041
Ti window	$dE/dx^{d)}$ ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	1.427	1.334	1.334	1.344
	$\Delta E^{e)}$ (MeV)	0.032	0.030	0.024	0.024
$E_0^{c)}$ (MV)		0.575	1.070	1.064	2.065

- a) E_2 : Average energy of electron beams incident on the surface of bare solar cell or on the surface of cover glass of CG cell.
b) E_1 : Average energy of electron beams incident on the surface of air layer.
c) E_0 : Accelerating voltage of electron beams.
d) dE/dx : Collision stopping power.
e) ΔE : Energy loss.

Table 4.8 Changes in the beam current density at peak (J_p) and the beam current to give the fluence rate of 1.0×10^{12} $e \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ (I_b) by the accelerating voltage (E_0) of scanning electron beams (width : 60 cm, frequency : 200 Hz) of No. 1 and NO. 2 accelerators

Accelerator	E_0 (MV)	J_p ($\mu A \cdot cm^{-2} \cdot mA^{-1}$)	I_b (μA)
No. 1	0.4	0.224	715
	0.5	0.248	646
	0.6	0.304	527
	0.75	0.343	467
	1.0	0.441	363
	2.0	0.809	198
No. 2	1.0	0.96	167
	1.25	1.19	135
	1.5	1.34	120
	2.0	1.73	93
	3.0	2.38	67

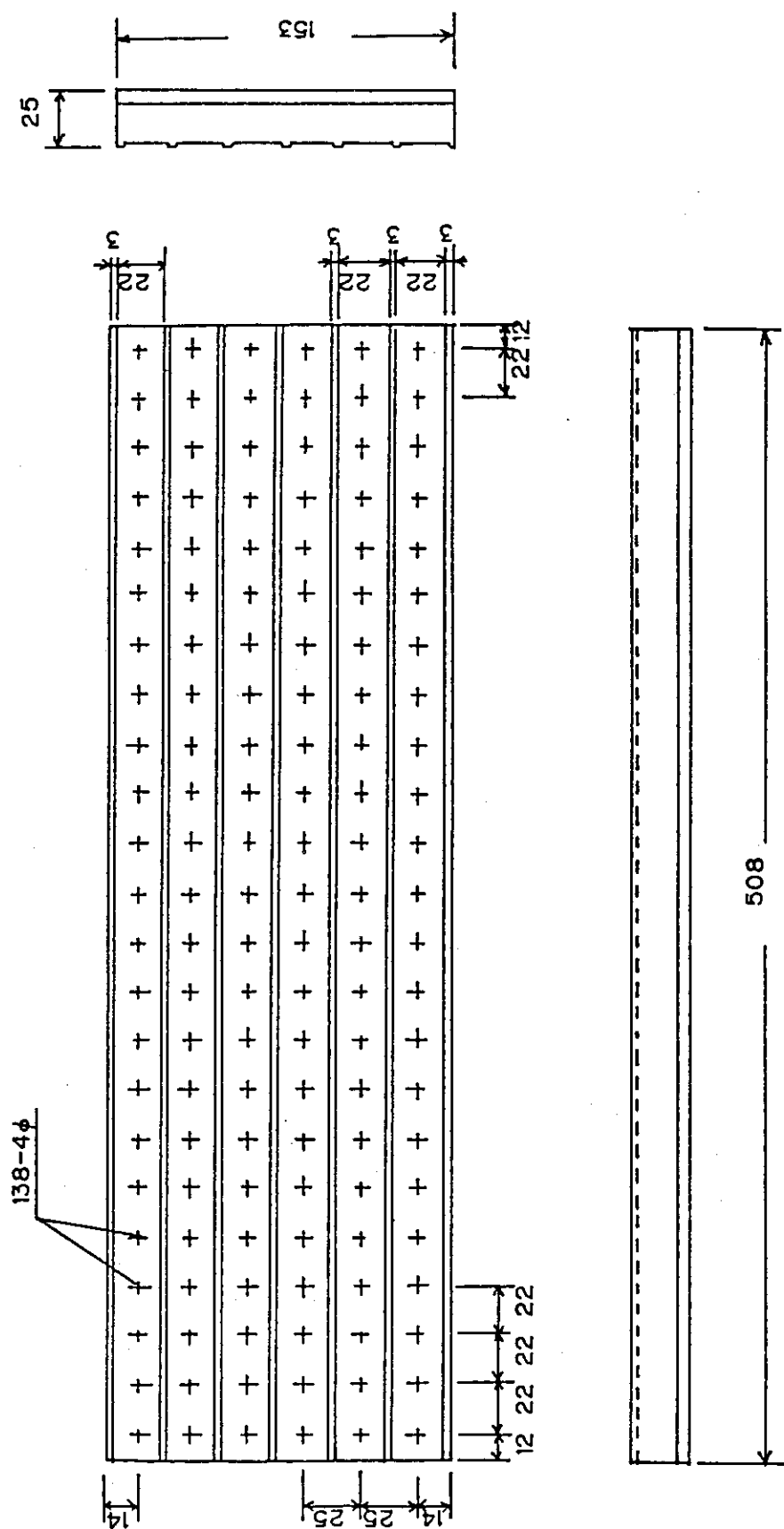


Figure 4. 1 Irradiation equipment of solar cell for No. 1 and No. 2 electron accelerators

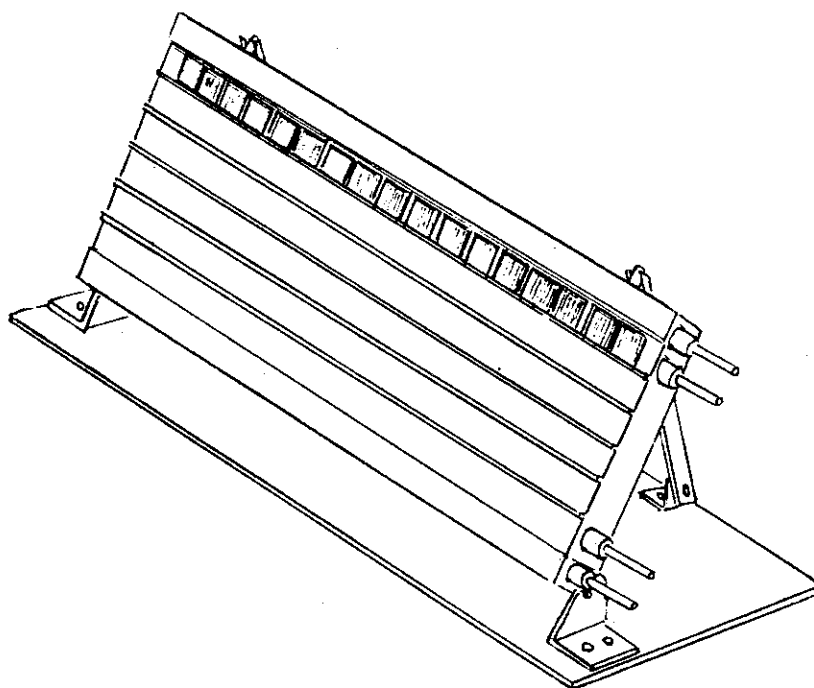


Figure 4. 2 Irradiation equipment of solar cell for No. 1 and No. 2
electron accelerators used in the study on the effects
of incident angle of electron beams on the radiation
damage of solar cell

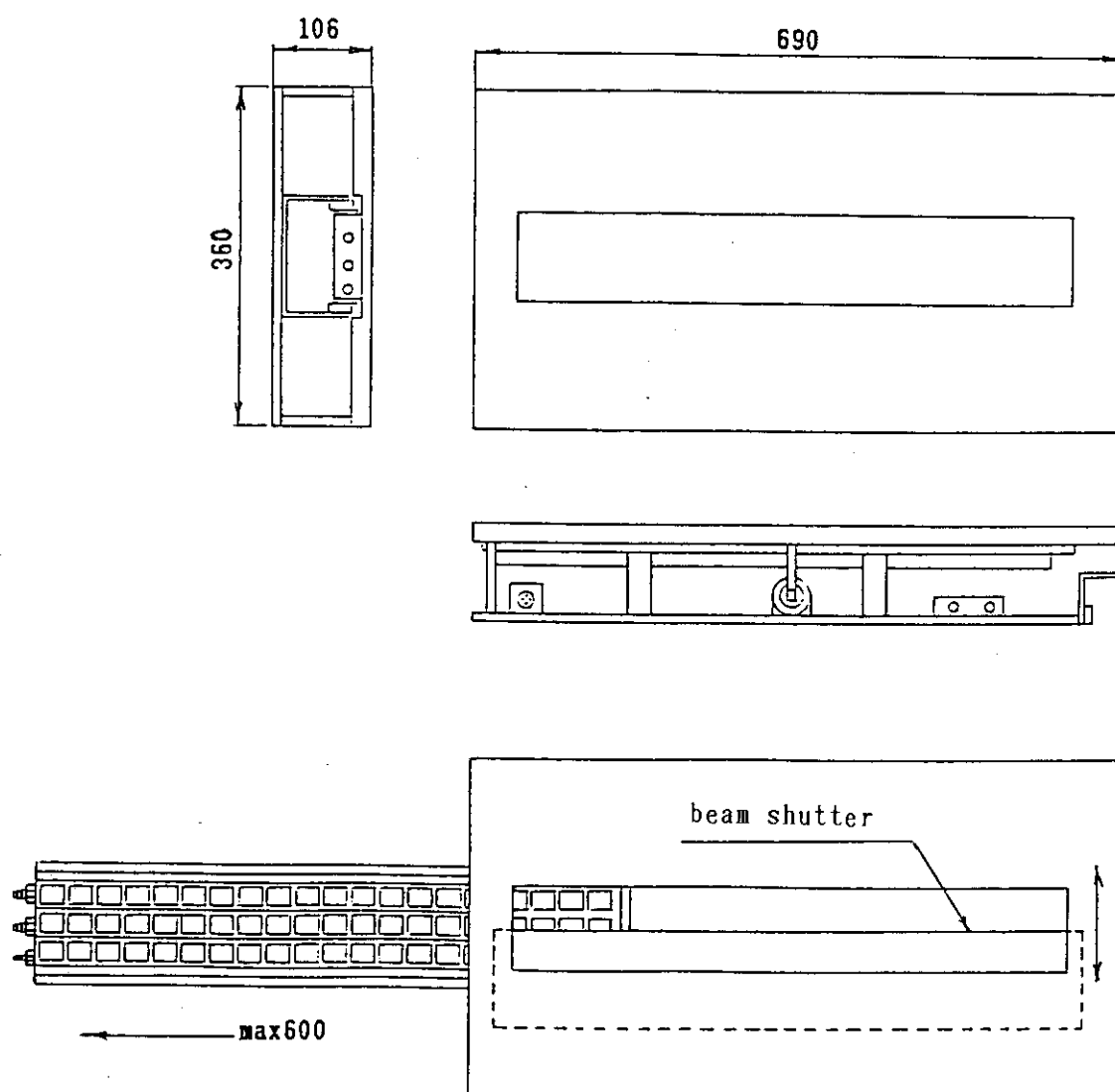


Figure 4. 3 Irradiation equipment of solar cell with beam shutter
for the low-energy electron accelerator (Curetron)

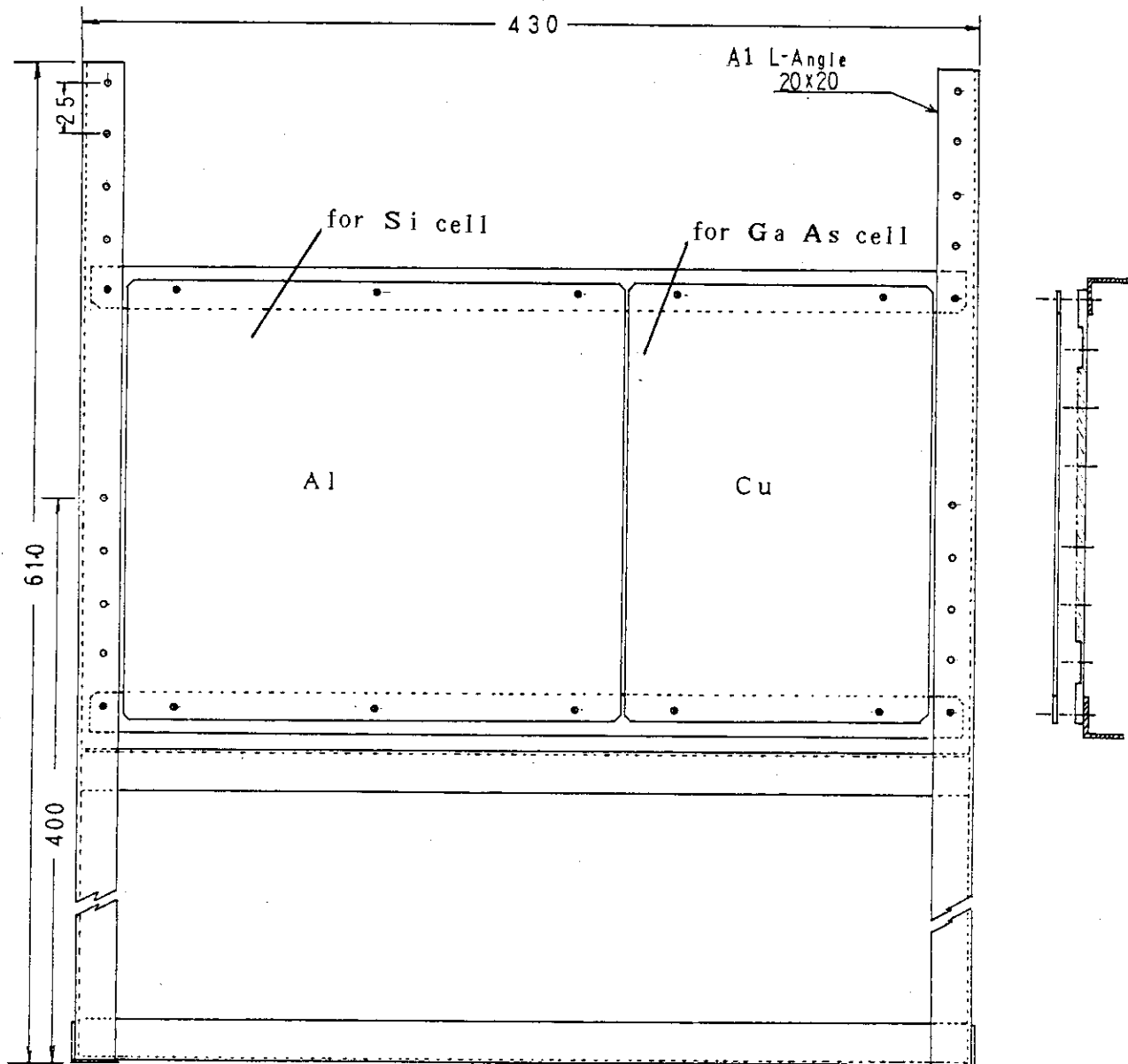


Figure 4. 4 Irradiation equipment of solar cell for γ rays

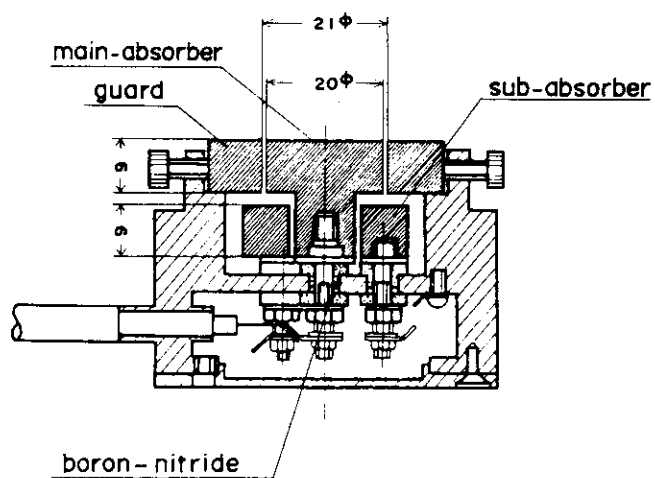


Figure 4. 5 Cross-sectional view of the detector for electron current density measurement (charge collector)⁴⁶

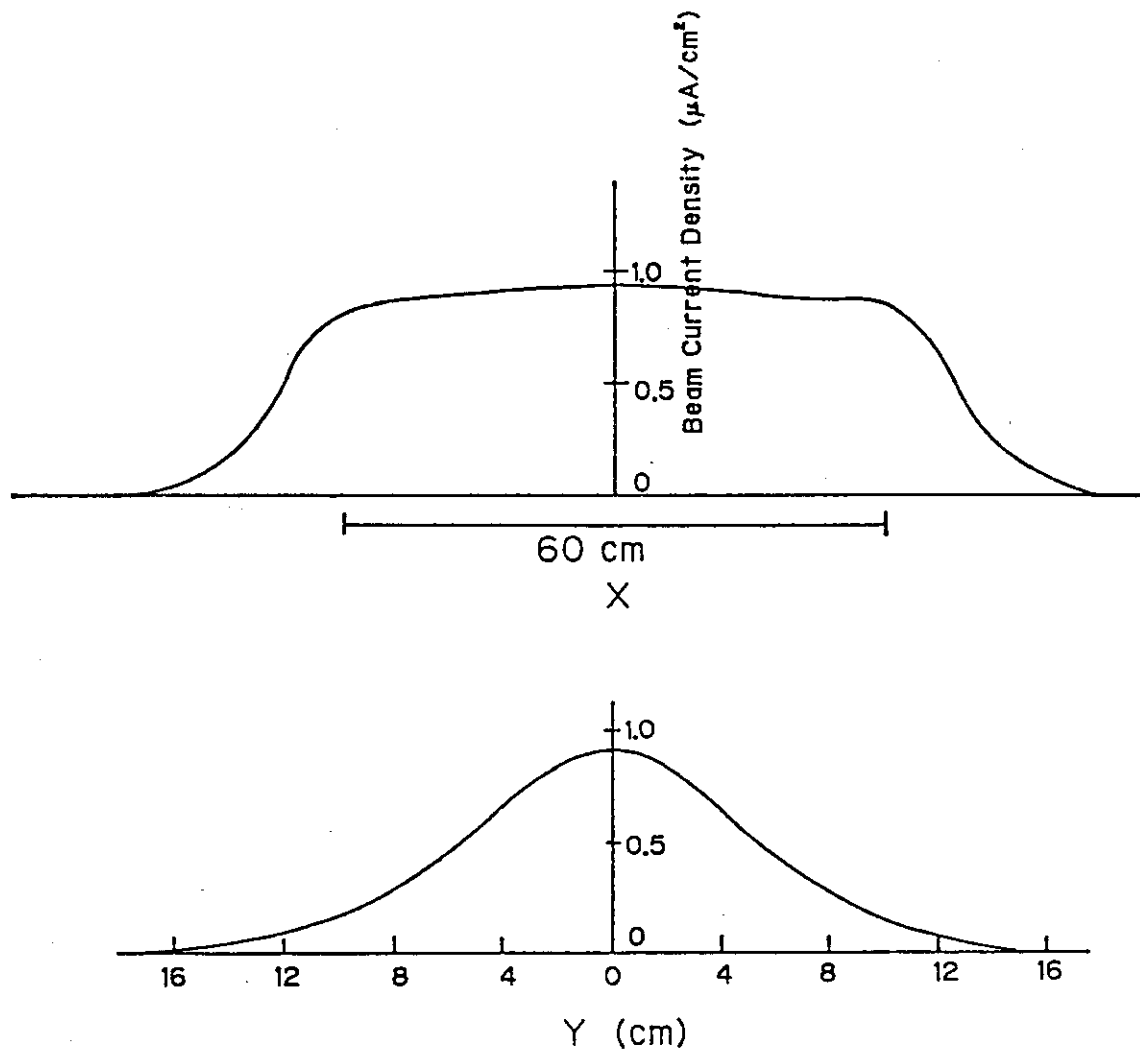


Figure 4. 6 Distributions of the current density of scanning electron beams in the direction of beam scanning (X axis) and the normal direction to X-axis (Y axis) at 20 cm from the beam window of No. 2 electron accelerator obtained by the charge collector

Irradiation conditions : accelerating voltage 1.0 MV
 beam current 1.0 mA
 scanning frequency 200 Hz
 scanning width 60 cm

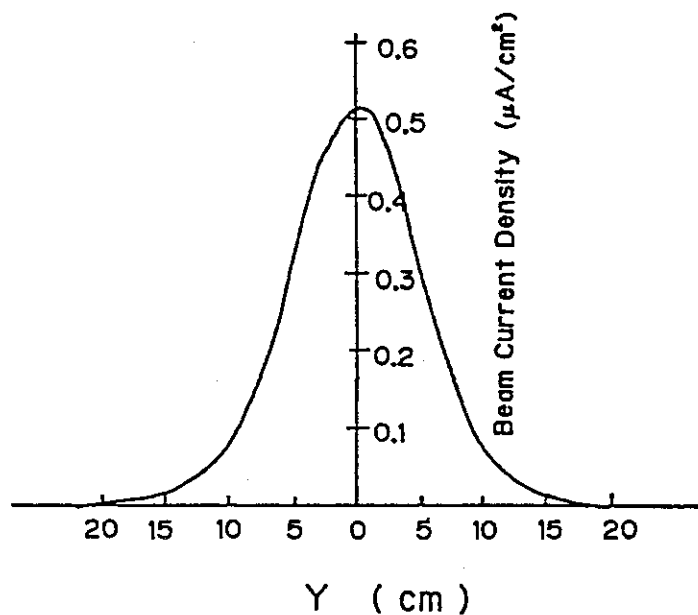


Figure 4. 7 Distributions of the current density of non-scanning electron beams in the normal direction to the beam scanning (Y-axis) at 20 cm from the beam window of No. 2 electron accelerator obtained by the charge collector

Irradiation conditions : accelerating voltage 1.0 MV
beam current 98 μA

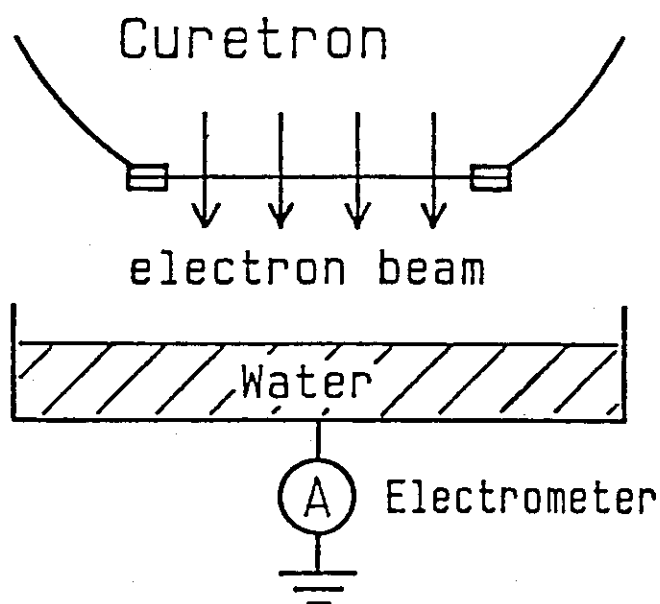


Figure 4. 8 Measuring method of total current due to the electron beams of the low-energy electron accelerator (Curetron)

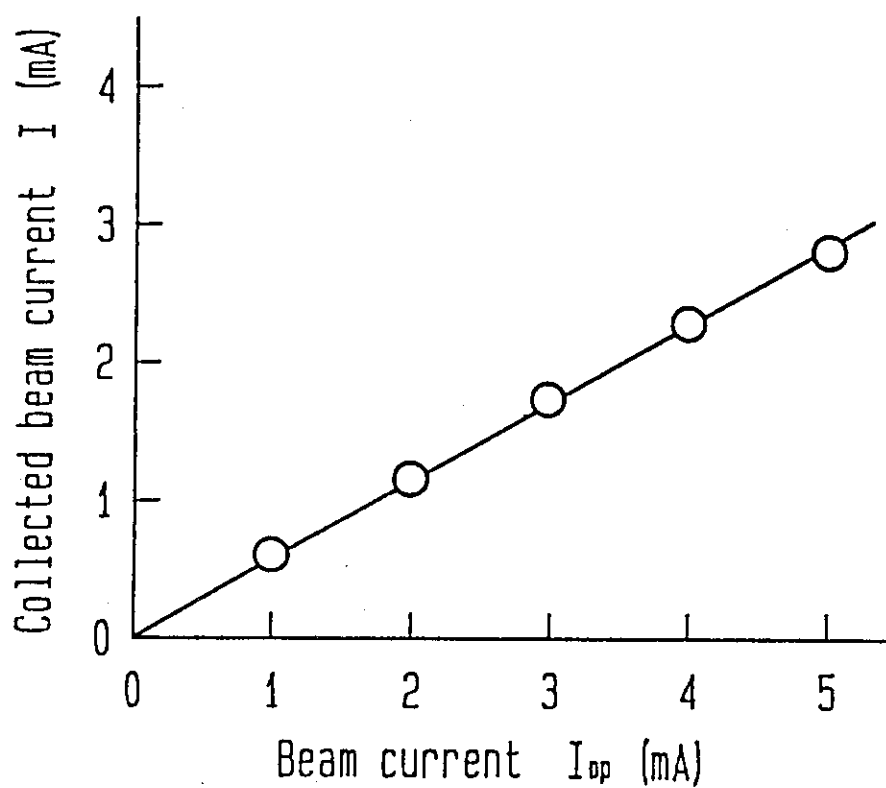


Figure 4. 9 Relation between the current applied to the cathode (I_{op}) and the total current due to the electron beams (I) of the low-energy electron accelerator (Curetron)

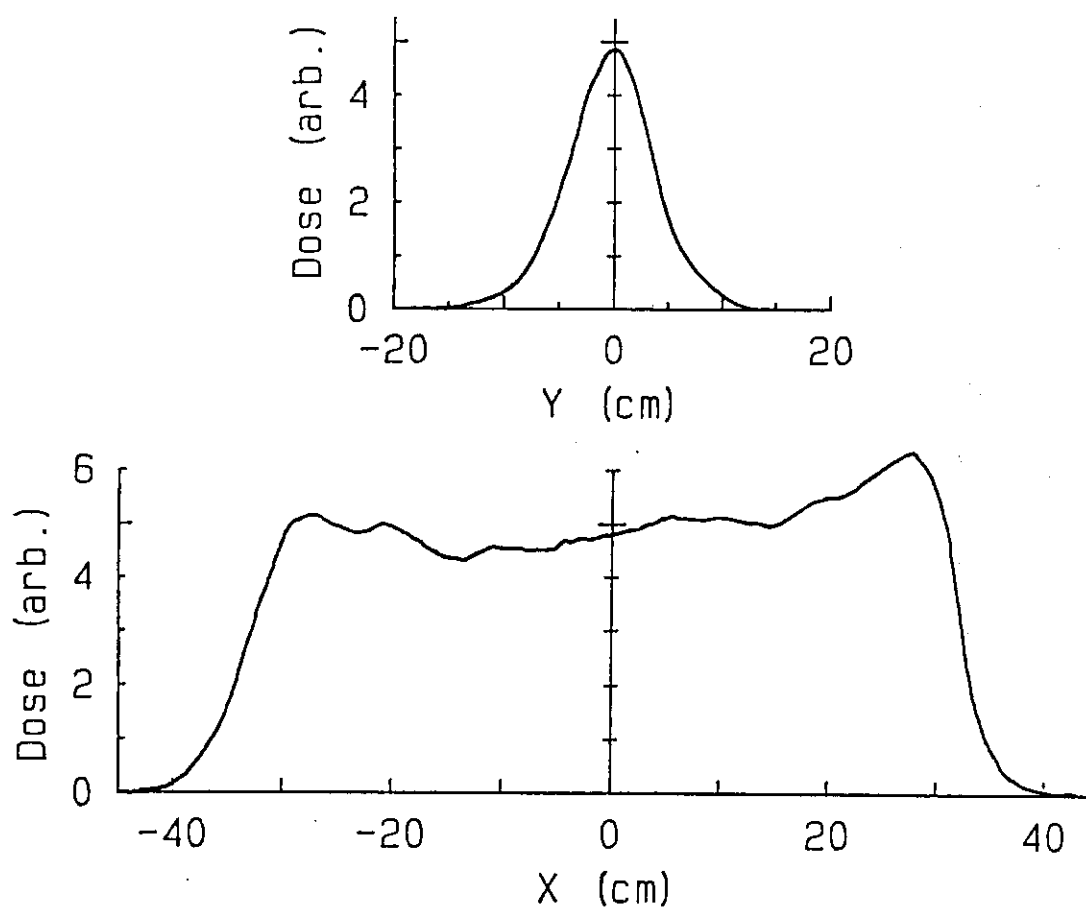


Figure 4. 10 Dose distributions of electron beams in the directions of X axis parallel to the cathode fillament and Y axis (the normal direction to X axis) at 5 cm from the beam window of the low-energy electron accelerator (Curetron) obtained by CTA-film dosimeter

5. 電気特性の測定

原研とNASDAの共同研究では、放射線（電子線と γ 線）を照射した太陽電池の劣化を、主として電流-電圧特性の変化によって評価した。放射線照射による分光感度特性の変化も測定したが、測定結果の定量的な解析は行わなかった。

本章では、これらの電気特性の測定に使用した装置およびI-V特性の測定によって得られる電気特性について説明する。

5.1 電流-電圧特性

5.1.1 測定装置

1984年度と1985年度の共同研究では、放射線の照射を高崎研で行い、電流-電圧特性（I-V特性）はNASDA筑波宇宙センターに設置されている太陽電池電気出力測定装置（stationary-type measuring instrument）によって測定した。このため、放射線を照射した後I-V特性の測定まで、太陽電池を数時間～数10時間室温保管しなければならなかった。この初期の研究において、放射線を照射した太陽電池のI-V特性の室温におけるアニール（回復）効果に疑問が生じたため、1986年度と1987年度は、新たに購入した可搬型の太陽電池電気出力測定装置（portable-type measuring system）を用いて、照射試料のI-V特性を照射直後に高崎研で測定した。使用した太陽電池電気出力測定装置の性能をTable 5.1に示す。これらの装置のソーラシミュレータ（模擬太陽光発生装置）の模擬太陽光の強度は、1 AU（注1）の宇宙空間における太陽光の強度（1 sun）と等しい $135.3 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ であり、1 AUの宇宙空間における1次標準太陽電池の電気特性と同じ電気特性を1次標準太陽電池に生じさせる。それぞれの太陽電池電気出力測定装置において使用したソーラシミュレータの分光分布をAM0（air mass zero）（注2）における太

注1 AU（astronomical unit）：地球と太陽の距離を1とする長さの単位（天文単位）。 $1 \text{ AU} = 1.49 \times 10^{11} \text{ m}$ 。

注2 AM（air mass）：エアマスまたは光学的空気量と呼ばれており、宇宙のある物体から来る光が大気中を通過する相対距離であって、実際の通過距離とその物体が天頂にある時の距離の比で表わされる。従って、AM0は静止衛星軌道のような太陽から1 AUの距離の宇宙空間になる。

陽光の分光分布とともに Figure 5. 1 と 5. 2 に示す。これらの図から、使用したソーラシミュレータの分光分布が AM 0 における太陽光のそれとほぼ等しいことが分かる。

太陽電池電気出力測定装置では、試料太陽電池と 1 次標準太陽電池に同時に模擬太陽光を照射し、試料太陽電池の電気特性を測定するとともに、1 次標準太陽電池の電気特性を測定し、これら 2 つの測定結果を内部演算して、試料太陽電池が正確に AM 0 の状態に置かれた時の試料太陽電池の電気特性を出力する。

原研と NASDS の共同研究における電気特性の測定では、NASDA 筑波宇宙センター所有の 3 枚の 1 次標準太陽電池を使用した。1 次標準太陽電池は、製造後、ほぼ AM 0 と見なし得る地上およそ 36 km の成層圏上部まで遠隔測定装置 (telemeter) を備えた気球で運び、そこで較正される。共同研究において使用した 3 枚の 1 次標準太陽電池のうち 1 枚は、1979 年と 1983 年の 2 回この較正を行い、1 次標準太陽電池としての機能を有することが確認されている。他の 2 枚の 1 次標準太陽電池は、この較正された 1 次標準太陽電池を用いて較正されている。

I-V 特性測定時の太陽電池の温度は 28 ± 1 °C であった。また、15、28、50、75、および 100°C において I-V 特性を測定し、I-V 特性に及ぼす太陽電池の温度の影響を調べた。

5. 1. 2 電気特性

原研と NASDA の共同研究において使用した太陽電池電気特性測定装置によって測定した Si-50 (CG) セルの I-V 特性の 1 例を Figure 5. 3 に示す。この図に示すように、測定した I-V 特性から、開放電圧 (V_{oc})、短絡電流 (I_{sc})、最大出力 (P_{max})、最適動作電圧 (V_{op})、および最適動作電流 (I_{op}) を得ることができる。また、I-V 特性から、電流規程電圧 (V_I)、電圧規程電流 (I_V)、電圧規程出力 (P_V)、電流規程出力 (P_I) などの電気特性も得ることができる。

さらに、I-V 特性から得られる V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} から曲線因子 (FF) が、また P_{max} 、太陽電池の受光面積、および照射した光の入射エネルギー密度 (入射放射照度) から変換効率 (η) が算出できる。

(1) 開放電圧 (V_{oc})

Figure 5. 3 に示すように、光照射下の太陽電池を開放状態 ($I = 0$) にすると光

電流の大きさに対応して起電力が生ずる。これが V_{oc} である。Figure 5. 4⁵⁰に示す基本回路では、電流計回路を切断して測定する。この場合、電圧計の内部抵抗が太陽電池の内部抵抗と比較して十分に大きいことが必要である。

(2) 短絡電流 (I_{sc})

I_{sc} は、光照射下の太陽電池の陰陽両電極間の電位差がゼロ ($V = 0$) の時に流れる電流である (Figure 5. 3)。Figure 5. 4の基本回路において、電流計の内部抵抗をバイアス電圧によって補償し、太陽電池の両電極間の電位差がゼロになるように調節した状態で電流を測定する。電流計の内部抵抗が太陽電池の内部抵抗と比較して十分小さい場合には、Figure 5. 4のバイアス電源を短絡し、電圧計を切断して測定することができる。

(3) 最大出力 (P_{max})

P_{max} は、Figure 5. 3の $I - V$ 曲線上に +印で示した光照射下の太陽電池の電気出力、すなわち電流と電圧の積が最大になる時の電気出力である。 P_{max} は、Figure 5. 4の基本回路において、電圧計と電流計の読みの積が最大になるようにバイアス電圧を調節して測定する。

(4) 最適動作電圧 (V_{op}) と最適動作電流 (I_{op})

V_{op} と I_{op} は、Figure 5. 3に示すように、それぞれ光照射下の太陽電池の電気出力が P_{max} の時の電圧値と電流値である。

(5) 電流規程電圧 (V_I) と電圧規程電流 (I_V)

V_I は、Figure 5. 4の基本回路において、バイアス電圧を調節して電流を規程値に設定して測定した電圧値である。同様に、バイアス電圧を調節して電圧を規程値に設定して測定した電流値が I_V である。

原研とNASDAの共同研究では、 V_I は測定しなかった。 I_V 測定の規程電圧は、Si-50セルとSi-200セルの場合 480 mV であり、GaAsセルでは 700 mV であった。

(6) 電圧規程出力 (P_v) と電流規程出力 (P_i)

P_v は、Figure 5.4 の基本回路においてバイアス電圧を調節して電圧を規程値に設定して測定した電流値と規程電圧値の積である。同様に、バイアス電圧を調節して電流を規程値に設定して測定した電圧値と規程電流値の積が P_i である。

原研と NASDA の共同研究では、これらの電気特性は測定しなかった。

(7) 曲線因子 (FF)

FF は、太陽電池の理想的な最大出力に対する実際の最大出力の割合であり、測定した P_{max} 、 V_{oc} 、および I_{sc} から次式によって算出する。

$$FF (\%) = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \times 100 \quad (5.1)$$

(8) 変換効率 (η)

太陽電池の η には、実用変換効率 (η_{pr}) と真性変換効率 (η_{in}) があり、測定した P_{max} と太陽電池の受光面積および照射光の入射エネルギー密度 (入射放射照度) から、次式によって算出できる。

$$\eta_{pr} (\%) = \frac{P_{max}}{\text{全受光面積} \times \text{入射エネルギー密度}} \times 100 \quad (5.2)$$

$$\eta_{in} (\%) = \frac{P_{max}}{\text{有効受光面積} \times \text{入射エネルギー密度}} \times 100 \quad (5.3)$$

すなわち、 η_{pr} の算出には太陽電池の全受光面積を用い、太陽電池の有効受光面積を用いて η_{in} を算出する。

原研と NASDA の共同研究では、変換効率の算出は行わなかった。

(9) 電気特性保存率 (η)

原研と NASDA の共同研究では、放射線を照射した太陽電池の V_{oc} 、 I_{sc} 、 P_{max} 、 V_{op} 、 I_{op} 、FF、および I_v を測定し、それぞれの保存率 (η)

$$\eta (\%) = \frac{\text{照射後の電気特性}}{\text{照射前の電気特性}} \times 100 \quad (5.4)$$

を算出した。

5.2 分光感度特性

原研とNASDAの共同研究において使用した分光感度測定装置の性能をTable 5.2に示す。また、この装置を用いて測定したSi-50 (CG) セルの分光感度特性の1例をFigure 5.5に示す。

Table 5. 1 Measuring instrument of the current-voltage characteristics of solar cell

Item	Stationary type	Portable type
1. Light source		
(1) Solar simulator	Spectrolab Model X-25	Ewig Shokai ESS-300
(2) Lamp	2.5 kW Xeon lamp	300 W Xeon lamp
(3) Light intensity	135.3 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ (max)	135.3 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ (max)
2. Electrical output measuring system		
(1) Measurable cell size	2×2, 2×4, 2×6 cm Panel: <20×20 cm	2×2 cm
(2) Measuring method	Four-terminal method	Four-terminal method
(3) Measuring items		
a) Voc	20 V (max)	2.0 V (max)
b) Isc	5 A (max)	0.3 A (max)
c) Load current	5 A (max)	0.3 A (max)
d) I-V characteristics	Record: Analogue Data plot: Digital	Data plot: Digital
e) Internal computation	P _{max} , V _{op} , I _{op} , FF	P _{max} , V _{op} , I _{op} , FF
3. Temperature control		
(1) Sample	0 ~100 °C (water circulation)	5 ~50°C (electronic cooling system and heater)
(2) Standard solar cell	10 ~50°C (electronic cooling system and heater)	5 ~50°C (electronic cooling system and heater)

Table 5.2 Measuring instrument for the spectral sensitivity
of solar cell

Item	Capacity
1. Intensity of irradiation light (1) Constant-energy mode (2) Constant-photon mode	$50 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
2. Range of wavelength	320~1200 nm
3. Area of irradiation	20 × 20 cm
4. Stability of light intensity	± 3 %
5. Uniformity of light intensity	< 10 %
6. Control method of quantity of light	Wedge filter of disk-transmission type
7. Light source	Xenon lamp and Halogen lamp (automatic change-over by wavelength)
8. Intensity of bias light	> $135.3 \text{ Mw}\cdot\text{cm}^{-2}$
9. Photodetector (1) Measurement of intensity (2) Monitor for control	Pyroelectric-type detector: LPE Inc. RS-5900 Si and Ge photodiode
10. Current measurement of solar cell (1) P _A meter (2) Range of measurement	HP 4140B $\pm 0.001 \times 10^{-12} \sim$ $\pm 1.999 \times 10^{-2} \text{ A}$
11. Computer and software (1) Computer (2) Software	HP 9816 a) Measurements of the light intensity and the photon number b) Measurements of spectral sensitivity and quantum efficiency c) Calculation d) Function of drawing figures

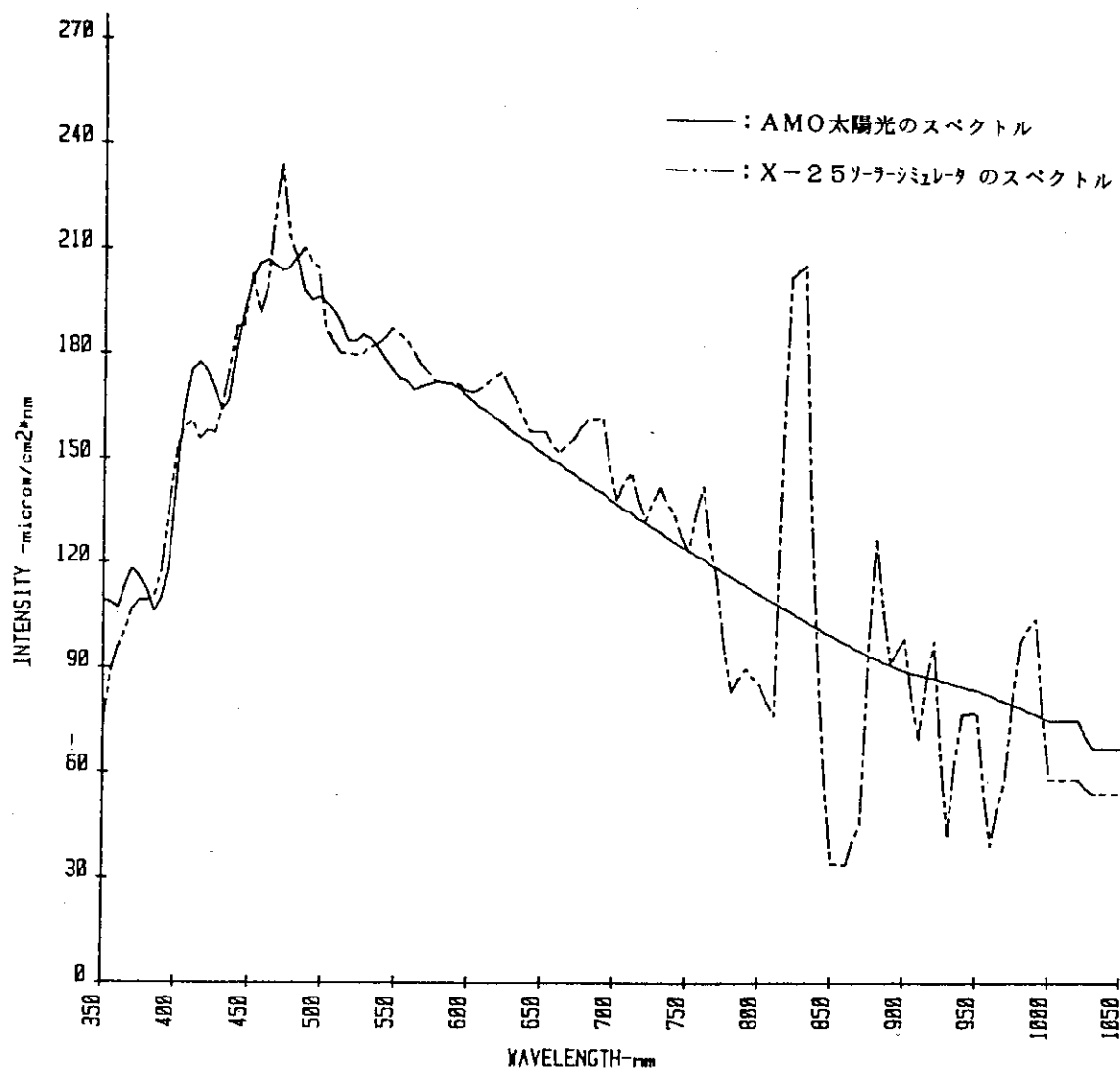


Figure 5. 1 Spectral distributions of the sunbeams at AMO (——) and the artificial sunbeams of the solar simulator (---) of the stationary-type measuring instrument of the current-voltage (I-V) characteristic

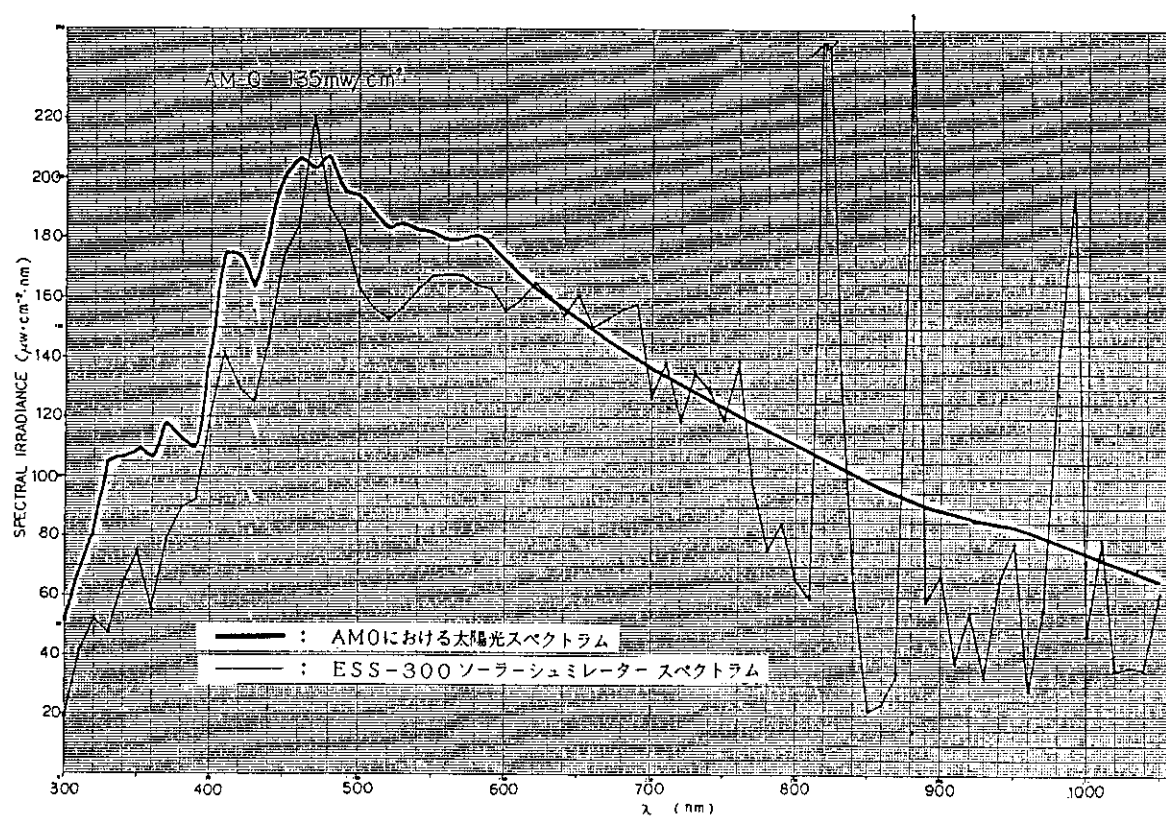


Figure 5.2 Spectral distributions of the sunbeams at AMO (—) and the artificial sunbeams of the solar simulator (—) in the portable-type measuring instrument of current-voltage (I-V) characteristic of solar cell

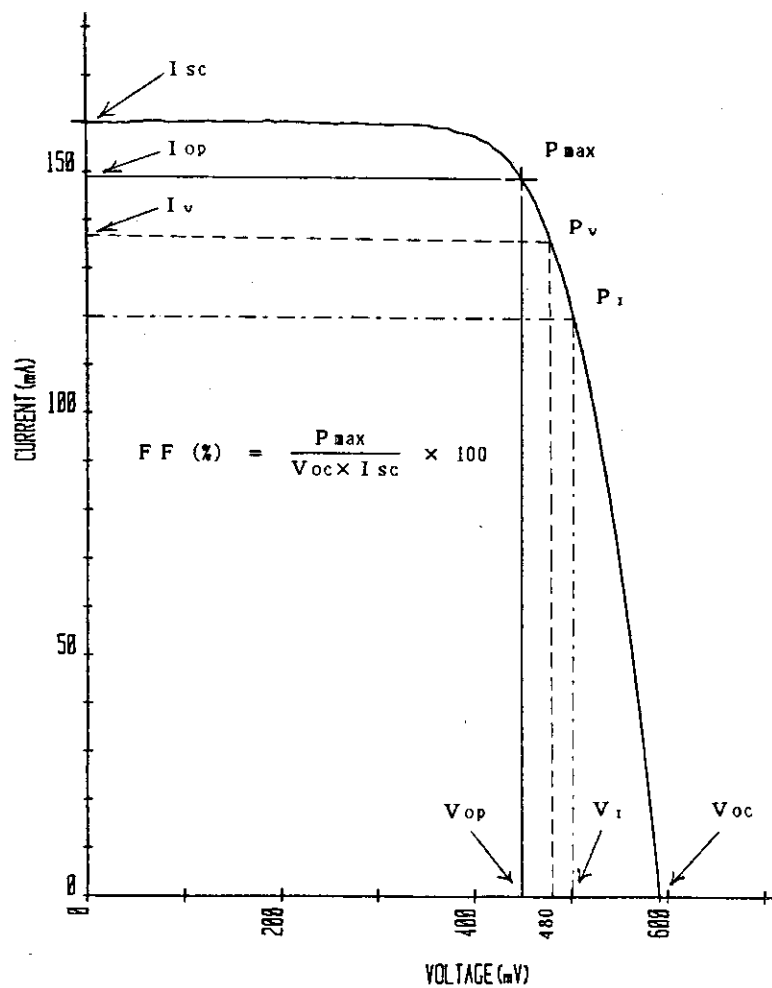


Figure 5. 3 An example of the current-voltage (I-V) characteristic of Si-50 (CG) cell

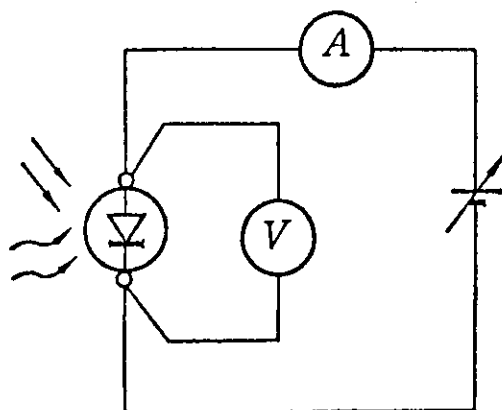


Figure 5. 4 Fundamental circuit for the measurement of current-voltage (I-V) characteristic of solar cell⁵⁰

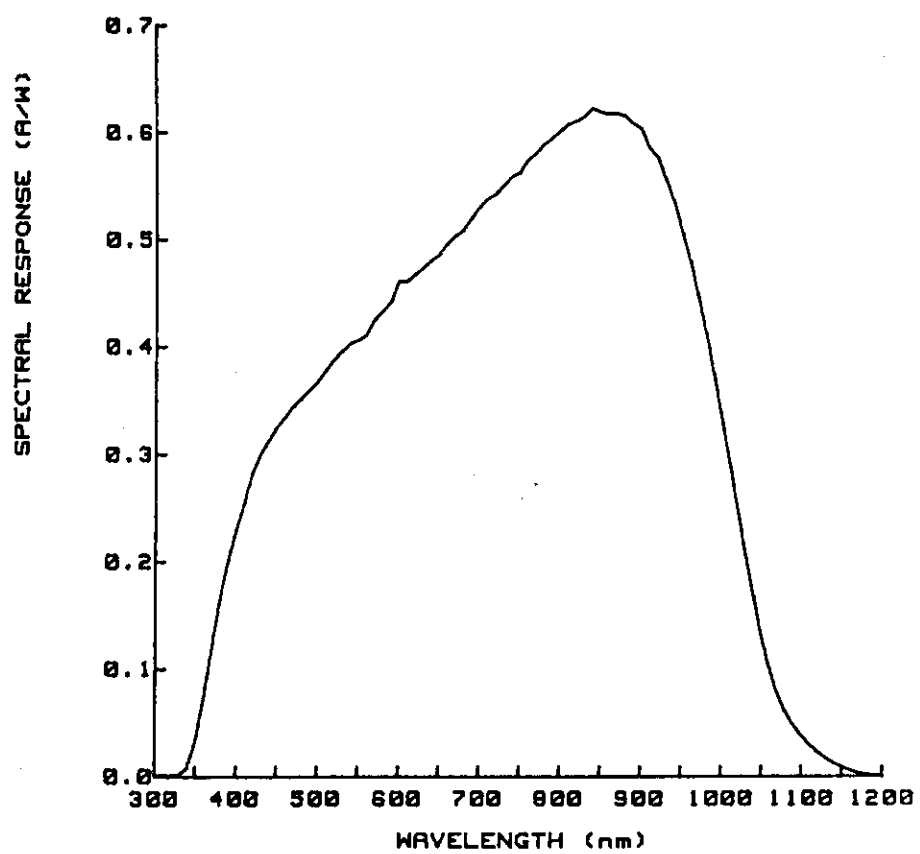


Figure 5. 5 An example of the spectral sensitivity of Si-50 (CG) cell

6. 電子線照射方法の検討

本章では、4. 7節に記載した固定照射法 (fixed irradiation method)、移動照射法 (moving irradiation method)、およびスポット照射法 (spot irradiation method)によって実施した宇宙用太陽電池の電子線照射実験の結果について述べる。

6. 1 太陽電池と照射条件

本章の研究に使用した太陽電池は、3. 3節に記載したSi-50 (Bare)セル、Si-50 (CG)セル、Si-200(Bare)セル、Si-200(CG)セル、Ga As(Bare)セル、およびGa As(CG)セルの6種類である。

2号加速器を用いて実施した本章の研究における固定照射法、移動照射法、およびスポット照射法の照射条件をTable 6. 1に示す。照射は、4. 3. 1項に記載した電子線照射用治具 (Figure 4. 1)に冷却水 (水道水)を流しながら、室温で行った。照射中の試料の表面温度は、照射試料と同種の太陽電池 (ダミー試料)の表面に0.1 mm ϕ の銅-コンスタンタン熱電対を導電性樹脂で接着して測定した。

6. 2 実験結果

6. 2. 1 照射中の太陽電池の温度変化

Table 6. 1に示した条件の固定照射法と移動照射法によって電子線を照射した時のビーム電流の平均値 (I_B)、ならびに太陽電池表面の照射前の温度 (T_0)、照射中の最高温度 (T_M)、および上昇温度 ($\Delta T = T_M - T_0$)をTable 6. 2に示す。

固定照射法の場合には、照射開始と同時に僅かに太陽電池表面の温度が上昇し、照射終了まではほぼ一定温度に保たれる。従って、Table 6. 2に示した照射中の最高温度は、電子線照射中の太陽電池表面の平均温度と考えて差し支えない。一方、移動照射法の場合には、試料が走査ビームの中心軸に近付くと、太陽電池の表面温度が急激に上昇し、中心軸付近で最高値に達し、その後急激に低下して照射前の温度に戻る。従って、Table 6. 1の条件の移動照射法の場合には、この温度サイクルが10回繰り返されることになる。スポット照射法の場合には、ビーム電流が非常に小さいので、固定照射法の結果から、電子線照射による温度上昇は無視できると考え、照射中の太陽電池表面の温度は測定しなかった。

Table 6. 2に示したように、いずれの太陽電池および照射方法においても、Bareセルと比較して、CGセルの方が電子線照射による太陽電池表面温度の上昇が大きい。これは、カバーガラスによって熱伝導が妨げられ、照射用治具による冷却効果が低下するためと考えられる。

固定照射法の場合には、Si-50 (Bare)セルとSi-200 (Bare)セルの表面温度の上昇がほぼ等しく、またSi-50 (CG)セル、Si-200 (CG)セル、およびGa As (CG)セルの表面温度の上昇もほぼ等しい。しかし、Ga As (Bare)セルの表面温度の上昇は、Si-50 (Bare)セルおよびSi-200 (Bare)セルと比較して僅かに大きい。Bareセルの結果は、照射用治具による冷却効果が厚みによってほとんど影響を受けず、シリコンと砒化ガリウムの熱伝導度の差によって太陽電池の表面温度の上昇に差が生じたことを示している。また、CGセルの結果は、照射用治具による冷却効果が主としてカバーガラスによって阻害されることを示すものと考えられる。しかし、固定照射法の場合の表面温度の上昇は、いずれも1℃以下であり、太陽電池の電子線劣化に及ぼす温度上昇の影響は無視できる。

一方、移動照射法の場合の電子線照射による太陽電池表面の温度上昇は、固定照射法の場合と比較してかなり大きい。これは、移動照射法の場合、フルエンス率を $1.0 \times 10^{12} \text{e} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{pass}^{-1}$ にするために、固定照射法のおよそ30倍のビーム電流が必要なためである (Table 6. 1)。また、それぞれの太陽電池のBareセルとCGセルの上昇温度の差も、固定照射法のそれと比較してかなり大きい。Si-50セルとSi-200セルのBareセルの表面温度の上昇は等しいが、CGセルではSi-50セルよりSi-200セルの方が大きい。Ga As (Bare)セルとGa As (CG)セルの表面温度の上昇は、Si-50セルとSi-200セルのそれぞれBareセルとCGセルの場合と比較して大きい。これらの結果は、移動照射法の場合、太陽電池の厚みおよび熱伝導度の相違によって電子線照射による太陽電池表面の上昇温度が異なり、また、裏面が冷却されているので、太陽電池の内部にかなりの温度勾配が生じることを示している。

6. 2. 2 電流-電圧特性

Table 6. 1に示した条件の固定照射法によって電子線を照射したSi-50 (CG)セル、Si-200 (CG)セル、およびGa As (CG)セルの照射前後のI-V特性の例を、それぞれFigure 6. 1~6. 3に示す。これらの図から、いずれの場合にも電子線の照

射によって太陽電池の電気特性が低下することが分かる。同様の結果が、固定照射法、移動照射法およびスポット照射法によって電子線を照射した総ての太陽電池に認められた。

照射前後の太陽電池の $I-V$ 特性から得た開放電圧 (V_{oc})、短絡電流 (I_{sc})、最大出力 (P_{max})、最適電圧 (V_{op})、最適電流 (I_{op})、曲線因子 (FF)、および電圧規定電流 (I_v) を Table 6. 3~6. 17 に示す。Table 6. 3~6. 8 は固定照射法、Table 6. 9~6. 14 は移動照射法、Table 6. 15~6. 17 はスポット照射法の結果である。これらの表では、それぞれの太陽電池の電気特性について、同時に照射した 10 枚の試料の照射前の値すなわち初期値 (V_{oco} 、 I_{sco} 、 P_{maxo} 、 V_{opo} 、 I_{opo} 、 FF_o 、および I_{vo}) と電子線照射後の値 (V_{oce} 、 I_{sce} 、 P_{maxe} 、 V_{ope} 、 I_{ope} 、 FF_e 、および I_{ve})、および電気特性保存率 (η_{voc} 、 η_{isc} 、 η_{Pmax} 、 η_{Vop} 、 η_{Iop} 、 η_{FF} 、および η_{Iv})、ならびにそれぞれの電気特性と保存率の平均値 (Av)、標準偏差 (σ)、最大値 (Max)、および最小値 (Min) を示した。ただし、Table 6. 7 と 6. 8 の固定照射法によって照射した Ga As セルの場合には、照射試料のそれぞれ 1 枚の $I-V$ 特性が著しく異常を示したため、最初から除外した。

固定照射法と移動照射法の場合 (Table 6. 3~6. 14) には、保存率の σ 値が 2.0 % 以上になる電気特性について、各試料の個々のデータを再点検し、他のデータと比較して異常と思われるデータを除外して平均値と σ 値を再計算した。スポット照射法の場合 (Table 6. 15~6. 17) には、照射試料数が少く、また Si-50 (CG) セルの η_{Iv} の σ 値のみが 2.0 % 以上であった (Table 6. 15) ので、再計算をしなかった。さらに、固定照射法と移動照射法の場合の V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} については、 V_{oco} 、 I_{sco} 、および P_{maxo} に対して、それぞれ V_{oce} 、 I_{sce} 、および P_{maxe} 、ならびに η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{Pmax} をプロット (Figure 6. 4~6. 48) する際に、直線関係から大きく外れるデータも除外して、平均値と σ 値の再計算を行った。これらの再計算において除外したデータは、Table 6. 3~6. 14 のデータに * 印で示してある。これらの表には、再計算した平均値と σ 値とともに、この場合の最大値と最小値も合わせて示した。また、これらの表から電気特性保存率の生の標準偏差 (σ) と上記の再計算によって得られた標準偏差 (σ') を抜粋して Table 6. 18 と 6. 19 に示す。

V_{oco} 、 I_{sco} 、および P_{maxo} に対して、それぞれ V_{oce} 、 I_{sce} 、および P_{maxe} 、ならびに η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{Pmax} をプロットした Figure 6. 4~6. 48 の直線は、Table 6. 3~6. 17 に示した個々の試料のデータから、平均値と σ 値の再計算

において除外したデータを除いて、最小2乗法によって求めた近似直線である。これらの図には、非常に少数ではあるが、可能な限り除外したデータもプロット(●)した。Figure 6. 4～6. 48に示した近似直線の縦軸上の切片(a)と勾配(b)をTable 6. 20～6. 22に示す。

6. 2. 3 分光感度特性

Table 6. 1に示した条件の固定照射法によって電子線を照射したSi-50(CG)セル、Si-200(CG)セル、およびGaAs(CG)セルの照射前後の分光感度特性の例を、それぞれFigure 6. 49～6. 51に示す。いずれの場合にも、電子線の照射によって分光感度が低下しており、その低下の程度は高波長側の方が大きい。同様の変化が、固定照射法、移動照射法、およびスポット照射法によって電子線を照射した総ての太陽電池の分光感度特性に認められた。

6. 3 考 察

6. 2. 2項で述べたように、原研とNASDAの共同研究では、照射前後のI-V特性から、 V_{oc} 、 I_{sc} 、 P_{max} 、 V_{op} 、 I_{op} 、FF、および I_v を得た。これらの中で、特に重要な電気特性は、 V_{oc} 、 I_{sc} 、 P_{max} 、およびFFである。しかし、Table 6. 3～6. 17に示したように、いずれの太陽電池においても、 η_{FF} の平均値はほぼ100%(98.40～101.80%)である。また、文献⁵¹によれば、FFは太陽電池を均一に貫通する電子線によってほとんど影響を受けない。従って、電子線の照射によってFFはほとんど変化しないと考えられる。そこで、本節では、電子線を照射した太陽電池の V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} を中心に考察する。

6. 3. 1 電気特性保存率の標準偏差

6. 2. 2項に記載したように、固定照射法と移動照射法によって電子線を照射した太陽電池の電気特性保存率の σ 値が2.0%以上の場合について、個々の試料のデータを再検討すると、他の試料のデータと比較して異常なデータ、例えば、

(a) Table 6. 3の試料No. 4の I_v のように、他の試料と比較して、初期値は異常に低い、照射による劣化が少く、異常に高い保存率を与える場合。

(b) Table 6. 13の試料No. 7の P_{max} 、 V_{op} 、 I_{op} 、およびFFのように、他の

試料と比較して、初期値はほぼ同じであるが、照射による劣化が著しく、保存率が異常に低くなる場合。

が見出される。このような場合に、これらのデータを除外して再計算すると、電気特性保存率の σ 値 (Table 6. 18と6. 19の σ') が 2.0 %以下になる。この 2.0 %の σ 値に特別な意味は無いが、この値を基準にして、個々の試料のデータを再検討すると、比較的容易に異常なデータを見出すことができる。

固定照射法および移動照射法によって電子線を照射した太陽電池の V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} について、個々の試料の電気特性の初期値に対して電子線照射後の特性値および保存率をプロットすると、直線関係からかなり外れるプロット (Table 6. 3～6. 14の*印のデータ) が見出される (6. 2. 2項)。これらのプロットも除外すると、電気特性保存率の σ 値 (Table 6. 18と6. 19の σ') がかなり低下する。

太陽電池のモジュールやパネルの性能は、一連の太陽電池の最も劣化の激しい太陽電池によって左右される。従って、同時に照射した 10 枚の太陽電池の電気特性に異常と考えられるデータが含まれている場合には、その原因を追求しなければならない。しかし、太陽電池の耐放射線性は、個々の試料のデータを再検討し、異常と考えられるデータを除外した電気特性値によって評価して差し支え無いと考えられる。

Figure 6. 1～6. 3に示した $I-V$ 特性から明らかなように、Si-50セルとSi-200セルの I_v 測定の規定電圧 (480 mV) は、いずれも V_{op0} と V_{op1} の右側の $I-V$ 特性が急激に低下している領域である。一方、Ga Asセルのそれ (700 mV) は、 V_{op0} と V_{op1} の左側の $I-V$ 特性が比較的平坦な領域である。このため、Si-50セルとSi-200セルの I_v は、Ga Asセルのそれと比較して、僅かな $I-V$ 特性の変化によって大きく変化する。その結果、Si-50セルとSi-200セルの η_{iv} は、Ga Asセルのそれと比較して非常に低い値になっている (Table 6. 3～6. 17)。また、Table 6. 18と6. 19に示したように、固定照射法と移動照射法によって電子線を照射した太陽電池では、 η_{iv} の σ 値が 2.0 %以上になる場合が非常に多い。スポット照射法によって照射したSi-50 (CG)セルの η_{iv} の σ 値も 2.0% 以上である (Table 6. 15)。これらのことから、 I_v が非常に不安定な電気特性であることが分かる。

6. 3. 2 電気特性初期値の影響

6. 2. 2項で述べたように、Figure 6. 4～6. 48は、個々の太陽電池の V_{oc} 、

I_{sc} 、および P_{max} の初期値 (V_{oc0} 、 I_{sc0} 、および P_{max0}) に対する電子線照射後の特性値 (V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max}) と保存率 (η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax}) のプロットである。Figure 6. 4～6. 21 は固定照射法、Figure 6. 22～6. 39 は移動照射法、Figure 6. 40～6. 48 はスポット照射法の結果である。これらの図に示した直線は、Table 6. 3～6. 17 に示した個々の試料のデータから、異常と考えられるデータを除いて、最小2乗法によって求めた近似直線である。これらの近似直線の縦軸上の切片 (a) と勾配 (b) は、Table 6. 20～6. 22 に示してある。

(1) 固定照射法

Figure 6. 4 に示したように、固定照射法によって電子線を照射した Si-50 (Bare) セルの V_{oc0} と V_{oc} の間には明確な相関関係が認められないが、 V_{oc0} に対する η_{voc} のプロットは良好な直線関係を示している。Figure 6. 5 の I_{sc} の場合には、試料 No. 5 の I_{sc0} に対する I_{sc} と η_{isc} のプロットが直線関係から外れるので、このデータを除いて近似直線を得た (Table 6. 3)。その結果、 I_{sc0} と I_{sc} および η_{isc} の間に比較的良好な相関関係が得られた。Figure 6. 6 に示した P_{max} の場合には、 P_{max0} と P_{max} の相関関係は明確でないが、 P_{max0} と η_{pmax} の間には一応の相関関係が認められる。Figure 6. 4～6. 6 に示した近似直線から、 V_{oc0} 、 I_{sc0} 、および P_{max0} が増加すると、それぞれ V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} が増加し、 η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} が低下することが分かる。

Figure 6. 7 から、固定照射法によって電子線を照射した Si-50 (CG) セルの V_{oc0} と V_{oc} の相関関係は明確でないが、 V_{oc0} に対する η_{voc} のプロットは良好な直線関係を示すことが分かる。Figure 6. 8 と 6. 9 に示したように、 I_{sc0} と I_{sc} および η_{isc} の間、ならびに P_{max0} と P_{max} および η_{pmax} の間にはいずれも明確な相関関係が認められない。この原因の1つとして、電子線を照射した試料の I_{sc0} および P_{max0} がそれぞれ 157～158 mA の範囲および 67 mW 付近に集中していることが挙げられる。Figure 6. 7～6. 9 の近似直線は、 V_{oc0} 、 I_{sc0} 、および P_{max0} の増加に伴って、それぞれ V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} が増加し、 η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} が低下することを示している。

Figure 6. 10 に示した固定照射法によって電子線を照射した Si-200 (Bare) セルの V_{oc} の場合には、 V_{oc0} と V_{oc} の相関関係は明確でないが、 V_{oc0} と η_{voc} の直線関

係は良好である。 I_{sc0} および P_{max0} に対してそれぞれ I_{sc} と η_{isc} および P_{max} と η_{pmax} をプロットした Figure 6. 11 と 6. 12 では、直線関係から外れる試料 No. 10 のプロットを除いて近似直線を求めた (Table 6. 5)。その結果、 I_{sc0} と I_{sc} および η_{isc} の間にかなり良好な直線関係が得られ、また P_{max0} と P_{max} および η_{pmax} の間にも一応の相関関係が認められた。Figure 6. 10 ~ 6. 12 に示した近似直線は、 V_{oc0} が増加すると V_{oc} と η_{voc} が低下し、また I_{sc0} および P_{max0} の増加に伴って、それぞれ I_{sc} および P_{max} が増加し、 η_{isc} および η_{pmax} が低下することを示している。しかし、上記のように、 V_{oc0} と V_{oc} の相関関係は明確でなく、また、Table 6. 20 に示したように、Si-200(Bare)セルの V_{oc0} に対する V_{oc} のプロットの近似直線の勾配 (b) の絶対値はかなり小さい。従って、固定照射法によって電子線を照射した Si-200(Bare)セルの V_{oc} は、 V_{oc0} の増加に伴って低下すると結論するのは妥当でない。

Figure 6. 13 から明らかなように、固定照射法によって電子線を照射した Si-200 (CG) セルの V_{oc0} と V_{oc} の相関関係はそれ程明確でないが、 V_{oc0} と η_{voc} の間には良好な直線関係が認められる。 I_{sc0} に対して I_{sc} と η_{isc} をプロットした Figure 6. 14 では、直線関係から外れる試料 No. 6 と 10 のプロットを除いて近似直線を得た (Table 6. 6)。また、Figure 6. 15 に示した P_{max0} に対する P_{max} と η_{pmax} のプロットでは、直線関係から外れる試料 No. 6 のプロットを除いて近似直線を得た。これらの除外したデータは、Figure 6. 14 と 6. 15 にプロット (●) してある。この結果、 I_{sc0} と I_{sc} および η_{isc} の間、ならびに P_{max0} と P_{max} および η_{pmax} の間に一応の相関関係が得られた。Figure 6. 13 ~ 6. 15 に示した近似直線から、 V_{oc0} の増加とともに V_{oc} と η_{voc} が低下し、また I_{sc0} および P_{max0} が増加すると、それぞれ I_{sc} および P_{max} が増加し、 η_{isc} および η_{pmax} が低下することが分かる。しかし、上記のように、 V_{oc0} と V_{oc} の相関関係はそれ程明確でなく、また、Table 6. 20 に示したように、Si-200(CG)セルの V_{oc0} に対する V_{oc} のプロットの近似直線の勾配の絶対値はかなり小さい。従って、固定照射法によって電子線を照射した Si-200(CG)セルの V_{oc} は、 V_{oc0} が増加すると低下すると結論できない。

Figure 6. 16 と 6. 17 に示したように、固定照射法によって電子線を照射した GaAs(Bare)セルの場合には、 V_{oc0} と V_{oc} および η_{voc} 、ならびに I_{sc0} と I_{sc} および η_{isc} の間に比較的良好な直線関係が認められる。この場合には、直線関係から外

れる試料No. 8の V_{oc0} に対する V_{oc} と η_{voc} のプロットを除いて近似直線を求めた (Table 6. 7)。また、Figure 6. 18から、 P_{max0} と P_{max} および η_{Pmax} の間に一応の相関関係が存在することが分かる。Figure 6. 16～6. 18に示した近似直線は、 V_{oc0} 、 I_{sc0} 、および P_{max0} が増加すると、それぞれ V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} が増加し、 η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{Pmax} が低下することを示している。

Figure 6. 19に示した固定照射法によって電子線を照射したGa As(CG)セルの V_{oc0} に対する V_{oc} と η_{voc} のプロットでは、直線関係から外れる試料No. 9のプロットを除いて近似直線を得た (Table 6. 8)。その結果、 V_{oc0} と V_{oc} および η_{voc} の間に良好な直線関係が得られた。Figure 6. 20に示したように、 I_{sc0} と I_{sc} および η_{isc} の間には明確な相関関係が認められない。また、Figure 6. 21の P_{max} の場合には、 P_{max0} と P_{max} の間に一応の相関関係が認められるが、 P_{max0} と η_{Pmax} の相関関係は明確でない。Figure 6. 19～6. 21の近似直線は、 V_{oc0} 、 I_{sc0} 、および P_{max0} の増加に伴って、 V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} が増加し、 η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{Pmax} が低下することを示している。

以上の結果から、固定照射法によって電子線を照射した場合には、 V_{oc0} 、 I_{sc0} 、および P_{max0} が大きい程、 V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} が大きく、 η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{Pmax} が低下すると考えて差し支えない。

(2) 移動照射法

Figure 6. 22から、移動照射法によって電子線を照射したSi-50 (Bare)セルの V_{oc0} と V_{oc} の相関関係は明確でないが、 V_{oc0} に対する η_{voc} のプロットはかなり良好な直線関係を示すことが分かる。 I_{sc0} に対して I_{sc} と η_{isc} をプロットした Figure 6. 23では、直線関係から外れる試料No. 2、6、9、および10のプロットを除外して直線関係を求めた (Table 6. 9)。試料No. 6と9のデータは図中にプロット (●) してある。このように大幅なデータ選別を行った結果、 I_{sc0} と I_{sc} および η_{isc} の間にかなり良好な直線関係が得られた。Figure 6. 24に示した P_{max0} に対する P_{max} および η_{Pmax} のプロットでは、直線関係から外れる試料No. 2のプロットを除外して近似直線を求めた (Table 6. 9)。また、この図から、 P_{max0} が 67.7 mWにおける2つのプロット (試料No. 1と10) は、いずれも直線関係からかなり外れているが、相互に補償し合っていることが分かる。これらの結果、 P_{max0} と P_{max} および η_{Pmax} の間に

一応の相関関係が得られている。Figure 6. 22~6. 24の近似直線は、 V_{oc} および P_{maxo} が増加するとそれぞれ V_{oc} と η_{voc} および P_{maxe} と η_{pmax} が低下し、 I_{sco} の増加とともに I_{sce} と η_{isc} が増加することを示している。しかし、上記のように、 V_{oc} と V_{oc} の相関関係は明確でなく、また、Table 6. 21に示したように、Si-50 (Bare)セルの V_{oc} に対する V_{oc} のプロットの近似直線の勾配 (b) の絶対値はかなり小さい。また、 I_{sco} に対する η_{isc} のプロットでは、かなりのデータ選別を行っており、Table 6. 21に示した近似直線の勾配もかなり小さい。さらに、上記のように、 P_{maxo} と P_{maxe} の間には一応の相関関係が得られているが、 P_{maxo} に対する P_{maxe} のプロットの近似直線の勾配の絶対値はそれ程大きくない (Table 6. 21)。従って、移動照射法によって電子線を照射した Si-50 (Bare)セルの V_{oc} と P_{maxe} はそれぞれ V_{oc} と P_{maxo} が増加すると低下し、 η_{isc} は I_{sco} の増加に伴って増加すると結論できない。

Figure 6. 25に示した移動照射法によって電子線を照射した Si-50 (CG) セルの V_{oc} の場合には、 V_{oc} と V_{oc} の相関関係は明確でないが、 V_{oc} と η_{voc} の間には比較的良好な直線関係が得られている。また、Figure 6. 26に示したように、 I_{sco} と I_{sce} の間には一応の相関関係が認められるが、 I_{sco} と η_{isc} の相関関係は明確でない。さらに、 P_{maxo} に対して P_{maxe} と η_{pmax} をプロットした Figure 6. 27では、直線関係から外れる試料 No. 10のプロットを除いて近似直線を得た (Table 6. 10)。しかし、この図から明らかなように、 P_{maxo} と P_{maxe} および η_{pmax} の相関関係は明確でない。この一因として、電子線を照射した試料の P_{maxo} の範囲が 66 ~ 68 mW と非常に狭いことが挙げられる。Figure 6. 25~6. 27に示した近似直線は、 V_{oc} および P_{maxo} の増加に伴ってそれぞれ V_{oc} と η_{voc} および P_{maxe} と η_{pmax} が低下し、また I_{sco} が増加すると、 I_{sce} が増加し、 η_{isc} が低下することを示している。しかし、上記のように、 V_{oc} と V_{oc} および P_{maxo} と P_{maxe} の相関関係は明確でない。また、Table 6. 21に示したように、Si-50 (CG) セルの V_{oc} と P_{maxo} に対するそれぞれ V_{oc} と P_{maxe} のプロットの近似直線の勾配の絶対値はそれ程大きくない。従って、移動照射法によって電子線を照射した Si-50 (CG) セルの V_{oc} および P_{maxe} は、それぞれ V_{oc} および P_{maxo} の増加に伴って低下すると結論するのは妥当でない。

移動照射法によって電子線を照射した Si-200 (Bare)セルの V_{oc} に対する V_{oc} と η_{voc} のプロットは、Figure 6. 28に示したように、 V_{oc} が 585 mV 付近に集中している。しかし、 V_{oc} と V_{oc} の相関関係は明確でないが、 V_{oc} と η_{voc} の間にはか

なり良好な直線関係が認められる。Figure 6. 29に示した I_{sc0} に対する I_{sc} と η_{isc} のプロットでは、直線関係から外れる試料No. 5と8のプロットを除外して近似直線を求めた(Table 6. 11)。この図のプロットは I_{sc0} が167~170 mAの狭い範囲に集中しているが、 I_{sc0} と I_{sc} および η_{isc} の間に比較的良好な直線関係が認められる。一方、Figure 6. 30に示したように、 P_{max0} に対する P_{max} と η_{pmax} のプロットは P_{max0} が70 mW付近に集中しているので、これらの相関関係は必ずしも明確でない。Figure 6. 28~6. 30に示した近似直線から、 V_{oc0} および P_{max0} が増加すると、それぞれ V_{oc} および P_{max} が増加し、 η_{voc} および η_{pmax} が低下し、また I_{sc0} の増加とともに I_{sc} と η_{isc} が増加することが分かる。しかし、上記のように、Figure 6. 29の I_{sc0} に対する η_{isc} のプロットは I_{sc0} が167~170 mA付近に集中しており、Table 6. 21に示したこのプロットの近似直線の正の勾配は、主として I_{sc0} が164.7と171.1 mAのプロット(Table 6. 11の試料No. 3と9)に起因していると考えられ、 I_{sc0} と η_{isc} の相関関係は必ずしも明確でない。従って、移動照射法によって電子線を照射したSi-200(Bare)セルの η_{isc} は、 I_{sc0} の増加に伴って増加すると結論できない。

Figure 6. 31に示した移動照射法によって電子線を照射したSi-200(CG)セルの V_{oc} の場合には、 V_{oc0} と V_{oc} の相関関係は明確でないが、 V_{oc0} と η_{voc} の直線関係は良好である。また、Figure 6. 32から、 I_{sc0} と I_{sc} の間には一応の相関関係が認められるが、 I_{sc0} と η_{isc} の相関関係は明確でないことが分かる。さらに、Figure 6. 33に示したように、 P_{max0} と P_{max} および η_{pmax} の間には明確な相関関係が認められない。Figure 6. 31~6. 33に示した近似直線は、 V_{oc0} および P_{max0} が増加すると、それぞれ V_{oc} と η_{voc} および P_{max} と η_{pmax} が低下し、 I_{sc0} が増加すると I_{sc} と η_{isc} が増加することを示している。しかし、上記のように、 V_{oc0} 、 I_{sc0} 、および P_{max0} とそれぞれ V_{oc} 、 η_{isc} 、および P_{max} の相関関係は明確でない。また、Table 6. 21に示したように、Si-200(CG)セルの V_{oc0} に対する V_{oc} のプロットの近似直線の勾配の絶対値はかなり小さく、 I_{sc0} および P_{max0} に対するそれぞれ η_{isc} および P_{max} のプロットの近似直線の勾配の絶対値は著しく小さい。従って、移動照射法によって電子線を照射したSi-200(CG)セルの V_{oc} および P_{max} はそれぞれ V_{oc0} および P_{max0} の増加に伴って低下し、 I_{sc0} が増加すると η_{isc} が増加すると結論できない。

Figure 6. 34に示したように、Ga As(Bare)セルに移動照射法によって電子線を照射した場合には、 V_{oc0} と V_{oc} の間に比較的明確な相関関係が認められ、 V_{oc0} と η_{voc} の直線関係は比較的良好である。 I_{sc0} と I_{sc} および η_{isc} の関係を示した Figure 6. 35では、これらの間に比較的明確な相関関係が認められる。移動照射法によって電子線を照射したGa As(Bare)セルの試料No. 7の P_{max0} と η_{pmax} は、Table 6. 13に示したように異常に小さい。このため、 η_{pmax} の σ 値が 7.46 と異常に大きくなっている。また、Figure 6. 36の P_{max0} に対する P_{max} と η_{pmax} のプロットでは、試料No. 1のプロットが直線関係から外れる (Table 6. 13)。従って、この図に示した P_{max0} に対する P_{max} と η_{pmax} のプロットの近似直線は、これらのデータを除いて求めた。その結果、 P_{max0} と P_{max} および η_{pmax} の間に一応の相関関係が得られた。Figure 6. 34～6. 36の近似直線から、 V_{oc0} 、 I_{sc0} 、および P_{max0} の増加に伴って、それぞれ V_{oc} 、 I_{sc} および P_{max} が増加し、 η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} が低下することが分かる。

Figure 6. 37に示した移動照射法によって電子線を照射したGa As(CG)セルの V_{oc0} に対する V_{oc} と η_{voc} のプロットでは、直線関係から外れる試料No. 1のプロットを除外して近似直線を得た (Table 6. 14)。その結果、 V_{oc0} と V_{oc} の間に一応の相関関係が得られ、 V_{oc0} に対する η_{voc} のプロットでは比較的良好な直線関係が得られた。Figure 6. 38に示したように、 I_{sc0} と I_{sc} および η_{isc} の間には明確な相関関係が認められない。Table 6. 14に示したように、移動照射法によって電子線を照射したGa As(CG)セルの試料No. 1の P_{max0} と η_{pmax} は異常に小さい。このため、 η_{pmax} の σ 値が 4.45 とかなり大きくなっている。従って、Figure 6. 39の近似直線は、このデータを除外して求めた。その結果、 P_{max0} と P_{max} および η_{pmax} の間に一応の相関関係が得られた。Figure 6. 37～6. 39の近似直線は、 V_{oc0} 、 I_{sc0} 、および P_{max0} が増加すると、それぞれ V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} が増加し、 η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} が低下することを示している。

以上の結果から、移動照射法によって電子線を照射した場合にも、固定照射法の場合と同様に、 V_{oc0} 、 I_{sc0} 、および P_{max0} が大きい程、 V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} が大きく、 η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} が低下すると考えることができる。

(3) スポット照射法

Figure 6. 40～6. 48に示したスポット照射法の場合、それぞれの太陽電池の試料数は4枚である。また、これらの図に示した近似直線は、Table 6. 15～6. 17に示した個々の試料のデータを用いて、最小2乗法によって機械的に求めた。従って、いずれの場合にも満足できる相関関係が得られていない。

Figure 6. 40～6. 42に示した近似直線から、スポット照射法によって電子線を照射したSi-50セルでは、 V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} が増加すると、BareセルとCGセルの V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} と $\eta_{P_{max}}$ 、ならびにCGセルの $\eta_{V_{oc}}$ が増加し、Bareセルの $\eta_{V_{oc}}$ と $\eta_{I_{sc}}$ およびCGセルの $\eta_{I_{sc}}$ が低下することが分かる。しかし、Table 6. 22に示したように、Si-50 (CG)セルの V_{oc} に対する $\eta_{V_{oc}}$ プロットの近似直線の勾配(b)は著しく小さく、またFigure 6. 42に示したBareセルとCGセルの P_{max} に対する $\eta_{P_{max}}$ のプロットはいずれも一応の相関関係が認められる程度である。従って、スポット照射法によって電子線を照射したSi-50 (CG)セルの $\eta_{V_{oc}}$ およびSi-50 (Bare)セルとSi-50 (CG)セルの $\eta_{P_{max}}$ は、それぞれ V_{oc} および P_{max} の増加に伴って増加すると結論するのは妥当でない。

スポット照射法によって電子線を照射したSi-200セルについて示したFigure 6. 43～6. 45の近似直線は、 V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} の増加に伴って、それぞれBareセルの I_{sc} およびCGセルの V_{oc} と P_{max} が増加し、Bareセルの V_{oc} と $\eta_{V_{oc}}$ 、 $\eta_{I_{sc}}$ 、および P_{max} と $\eta_{P_{max}}$ 、ならびにCGセルの $\eta_{V_{oc}}$ 、 I_{sc} と $\eta_{I_{sc}}$ 、および $\eta_{P_{max}}$ が低下することを示している。しかし、これらの図から、Bareセルの V_{oc} と V_{oc} および P_{max} と P_{max} 、ならびにCGセルの I_{sc} と I_{sc} の相関関係は、いずれも明確でないことが分かる。従って、スポット照射法によって電子線を照射したSi-200 (Bare)セルの V_{oc} と P_{max} およびSi-200 (CG)セルの I_{sc} は、それぞれ V_{oc} と P_{max} および I_{sc} が増加すると低下すると結論できない。

Figure 6. 46～6. 48に示したスポット照射法によって電子線を照射したGaAsセルの近似直線から、 V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} が増加すると、それぞれBareセルとCGセルの V_{oc} 、 I_{sc} と $\eta_{I_{sc}}$ 、および P_{max} 、ならびにCGセルの $\eta_{P_{max}}$ が増加し、Bareセルの $\eta_{V_{oc}}$ と $\eta_{P_{max}}$ およびCGセルの $\eta_{V_{oc}}$ が低下することが分かる。しかし、Table 6. 22に示したように、GaAsセルの場合、Bareセルの I_{sc} に対する $\eta_{I_{sc}}$ およびCGセルの P_{max} に対する $\eta_{P_{max}}$ のプロットの近似直線の勾配は著しく小

さい。また、Figure 6. 47に示したように、CGセルの I_{sc} と η_{isc} の相関関係は明確でない。従って、スポット照射法によって電子線を照射したGa As(Bare)セルとGa As(CG)セルの η_{isc} およびGa As(CG)セルの η_{pmax} は、それぞれ I_{sc} および P_{max} が増加すると増加すると結論するのは妥当でない。

以上の結果から、スポット照射法の場合にも、固定照射法および移動照射法の場合と同様に、 V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} が大きい程、 V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} が大きく、 η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} が低下すると考えることができる。

(4) まとめ

上述したように、固定照射法、移動照射法、およびスポット照射法のいずれの場合にも、太陽電池の V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} は、それぞれの初期値が大きい程、電子線照射後の値が大きく、保存率が低下する傾向が認められる。特に、固定照射法および移動照射法によって電子線を照射した太陽電池の V_{oc} と η_{voc} の間には、総ての試料において、かなり良好な直線関係が認められ、 V_{oc} の増加とともに η_{voc} がほぼ定量的に低下すると考えられる。また、 I_{sc} に対する η_{isc} のプロットも、多くの場合、比較的良好な直線関係を示し、 I_{sc} の増加に伴って η_{isc} が低下すると考えて差し支えない。 P_{max} と η_{pmax} の直線関係はそれ程良好ではないが、総ての試料において、 P_{max} が増加すると η_{pmax} が低下する傾向を示している。スポット照射法の場合の V_{oc} と η_{voc} 、 I_{sc} と η_{isc} 、および P_{max} と η_{pmax} の間においても、同様の傾向を示す場合が多い。すなわち、 V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} の初期値が増加すると保存率が低下すると考えられる。

3. 3. 2項のTable 3. 5に示したように、原研とNASDAの共同研究において使用したそれぞれの太陽電池のBareセルとCGセルの V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} の初期値の平均値はほぼ等しい。また、Si-50セルとSi-200セルのこれらの電気特性の初期値の平均値もほぼ等しい。しかし、本章の研究に使用したそれぞれの太陽電池のBareセルとCGセルおよびSi-50セルとSi-200セルでは、これらの電気特性の初期値の範囲が異なる場合が多い(Table 4. 3~4. 17およびFigure 6. 4~6. 48)。

従って、太陽電池の耐放射線性は、放射線の照射によって得られる電気特性保存率の単純な平均値ではなく、それぞれの電気特性の初期値に一定の基準値を設定し、この基準値に対応する放射線照射後の電気特性保存率を求め、これによって評価する必要があると考えられる。

Table 6. 20～6. 22に示したFigure 6. 4～6. 48の近似直線の縦軸上の切片(a)と勾配(b)を用いて、 V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} のそれぞれの基準値に対応する V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} 、ならびに η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} を算出し、Table 6. 23に示す。この表には、採用したそれぞれの電気特性の基準値も示した。Si-50セルとSi-200セルの基準値は、Table 3. 5に示したこれらの太陽電池のBareセルとCGセルの V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} それぞれの4個の平均値の算術平均値に近い値である。また、GaAsセルのそれは、BareセルとCGセルの平均値を算術平均した値に近い値である。

Table 6. 23に示したように、固定照射法と移動照射法の場合のそれぞれの太陽電池のBareセルとCGセルの η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} を比較すると、移動照射法のSi-200セルの η_{isc} が極く僅か(0.2%)にCGセルの方が大きい、これを除くと総てBareセルの方が大きい。この結果は、太陽電池内部における電子線の深部線量分布と関係があり、Bareセルでは、加速管内電子エネルギーが1 MeVの電子線の深部線量分布曲線のピークがp-n接合より深いところにあり、CGセルではこのピークがp-n接合付近にあることを示すものと考えられる。しかし、BareセルとCGセルの η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} の差は、最高で2.3%、ほとんどが1%以下であり、実験誤差の範囲内と考えられる。従って、これらの電気特性保存率は、カバーガラスによってほとんど影響を受けないと結論できる。

Table 6. 23に示した固定照射法、移動照射法、およびスポット照射法の η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} について、Si-50セル、Si-200セル、およびGaAsセルを比較すると、

固定照射法	η_{voc}	GaAsセル>Si-50セル $\geq$ Si-200セル
	η_{isc}	Si-50セル>GaAsセル>Si-200セル
	η_{pmax}	GaAsセル>Si-50セル>Si-200セル
移動照射法	η_{voc}	GaAsセル>Si-50セル $\geq$ Si-200セル
	η_{isc}	Si-50セル>GaAsセル>Si-200セル
	η_{pmax}	GaAsセル>Si-50セル>Si-200セル
スポット照射法	η_{voc}	GaAsセル>Si-50セル $\geq$ Si-200セル
	η_{isc}	Si-50セル>GaAsセル>Si-200セル
	η_{pmax}	Si-50セル>GaAsセル>Si-200セル

となる。従って、本章の研究の範囲では、全体として、Ga As セル、Si-50セル、Si-200 セルの順に耐放射線性が低下すると考えることができる。

同様に、Si-50セル、Si-200 セル、およびGa As セルの η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} について、固定照射法、移動照射法、およびスポット照射法を比較すると、

Si-50セル	η_{voc}	スポット照射法 $\geq$ 固定照射法 $>$ 移動照射法
	η_{isc}	スポット照射法 $>$ 固定照射法 $>$ 移動照射法
	η_{pmax}	スポット照射法 $>$ 固定照射法 $>$ 移動照射法
Si-200 セル	η_{voc}	スポット照射法 $\geq$ 固定照射法 $>$ 移動照射法
	η_{isc}	スポット照射法 $>$ 固定照射法 $>$ 移動照射法
	η_{pmax}	スポット照射法 $>$ 固定照射法 $>$ 移動照射法
Ga As セル	η_{voc}	スポット照射法 $\geq$ 固定照射法 $\geq$ 移動照射法
	η_{isc}	スポット照射法 $\geq$ 固定照射法 $\geq$ 移動照射法
	η_{pmax}	固定照射法 $\geq$ スポット照射法 $\geq$ 移動照射法

となる。従って、Si-50セルとSi-200 セルの η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} の低下はスポット照射法、固定照射法、移動照射法の順に大きくなり、Ga As セルのそれは照射方法によってほとんど影響を受けないと考えられる。このような照射方法による電気特性保存率の変化は、それぞれの照射方法におけるフルエンス率、フルエンス、および照射時の試料の温度の相違に起因すると考えられるので、以下の各項において考察する。

6.3.3 フルエンス率の影響

6.1節のTable 6.1に示したように、本章の研究における固定照射法、移動照射法、およびスポット照射法の場合のビーム電流は、それぞれ0.167、5.0、および0.029 mAである。従って、最高フルエンス率の比はおおよそ1:30:0.17になる。一方、6.3.2項(4)で述べたように、電子線を照射したSi-50セルとSi-200セルの η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} は、いずれもスポット照射法、固定照射法、移動照射法の順に低下する。しかし、Ga As セルの η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} は、照射方法によってほとんど影響を受けない。これらのことから、同じフルエンスの電子線を照射した時、Si-50セルとSi-200セルの η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} はフルエンス率が低い程大きく、Ga As セルの場合にはフルエンス率の影響をほとんど受けないと考えることができる。

4.7節に記載したように、固定照射法の場合にはビーム走査による規則的で短周期の

パルス電子線が太陽電池に入射するが、一定フルエンス率の連続電子線としての取り扱いが可能である。移動照射法の場合には、ビーム走査と試料の移動に伴う複雑に変化するパルス電子線が試料に入射し、この場合のフルエンス率を定量化することは非常に困難である。一方、スポット照射法では、一定フルエンス率の電子線が連続して試料に入射する。従って、照射方法による Si-50セルと Si-200セルの η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} の変化を、定量化に問題があるフルエンス率の観点から解析することは困難である。

6.3.4 フルエンスの影響

6.3.2項(4)に記載したように、Si-50セルと Si-200セルの η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} は、照射方法によって異なる。この結果について、前項ではフルエンス率の観点から考察したが、この原因の1つとして照射したフルエンスの不確かさが考えられる。しかし、GaAsセルの η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} が照射方法によってほとんど影響を受けないことから、本章の研究では、照射方法によるフルエンスの不確かさは、実質的に無視できると考えて差し支えない。

6.3.5 照射時の試料温度の影響

太陽電池の放射線損傷のアニール(回復)効果および逆アニール(損傷促進)効果と温度の関係については多くの研究が行われているが、これらの定量的な関係についてはまだ解明されていない⁵²。地上において電子線を照射した Si 太陽電池の I_{sc} が、室温において、2～3日から1カ月の間に 10% 程度アニール(回復)したと報告されている⁵²。このように、Si 太陽電池の放射線損傷は、室温においても幾らかアニールするが、顕著なアニール効果は、200～400℃の温度範囲において観測される⁵²。一方、宇宙空間において太陽電池が遭遇する限界温度は200℃と考えられている。従って、宇宙用太陽電池の放射線損傷には、実使用条件において、顕著なアニール効果は起こらないと考えられる。さらに、宇宙において太陽電池が遭遇する放射線の線量率は、地上で照射する放射線のそれより幾桁も低い。従って、同時に起こる太陽電池の放射線損傷とアニール効果の速度比(アニール速度/損傷速度)は、宇宙におけるそれと比較して、地上の方が遙かに小さい。太陽電池の電子線損傷の室温における長期間のアニール効果と同等の効果は 60℃において 24 時間保管すると誘起され、太陽電池の損傷は安定化する⁵²。このことから、電子線照射中の太陽電池の温度が上昇するとアニール効果が促進されることが考えられる。

6. 2. 1項で述べたように、電子線を照射すると、太陽電池の表面温度が上昇する。固定照射法およびスポット照射法の場合には、太陽電池の電子線劣化に及ぼす温度上昇の影響は無視できる。移動照射法の場合には、試料の移動に伴って、走査ビームの中心軸付近で、太陽電池の表面温度の急激な上昇と下降が繰り返される。本章の研究におけるこの温度上昇は、Si-50セル、Si-200セル、およびGaAsセルのBareセルとCGセルの場合、それぞれ最高6.5と9.5、6.5と14.4、および15.2と18.1℃である（Table 6. 2）。一方、6. 3. 2項（4）に記載したように、移動照射法の場合の η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} が最も小さく、電子線を照射中に太陽電池の温度が上昇するとアニール効果が促進されるという上記の予測と一致しない。しかし、移動照射法の場合の温度変化を定量化することは非常に困難である。従って、太陽電池の電気特性の電子線劣化に及ぼす温度の影響については、別の観点から検討する必要がある。

6. 4 結 論

宇宙用太陽電池の耐放射線性評価試験における電子線照射は、比較的低フルエンス率の定常的な連続ビームが得られるスポット照射法（静止試料に無走査ビームを照射する方法）が理想的な方法と考えられる。しかし、現在、工業的な電子線照射に使用されている加速電圧が1 MeV程度のビーム走査型電子加速器では、ビーム走査を停止した場合に均一なフルエンス率の電子線を照射できる面積が非常に狭く、4. 7. 3項で述べたように、スポット照射法によって同時に照射できる試料の数が非常に少ない。このため、この方法は、宇宙用太陽電池の耐放射線性評価試験における標準的な電子線の照射法としては不適当と考えられる。

移動照射法（移動する試料に走査ビームを照射する方法）には、大量の試料を同時に照射できるという利点がある（4. 7. 2項）。また、6. 3. 2項（4）に記載したように、他の方法と比較して、この方法によって照射した太陽電池の電気特性の低下が最も大きく、宇宙用太陽電池の耐放射線性の厳しい評価には適している。しかし、この方法では、ビーム走査による短周期のパルス化と試料がビーム窓下を繰り返し通過する長い周期のパルス化のために、複雑に変化するパルス電子線が太陽電池に入射する（4. 7. 2項）。この複雑に変化するパルス電子線のフルエンス率を定量化することは困難である（6. 3. 3項）。また、移動照射法では、試料の移動に伴って、試料温度の急激な上昇と下降が繰り返され、また温度上昇も固定照射法やスポット照射法と比較してかなり大き

い(6.2.1項と6.3.5項)が、この温度変化の定量化が非常に困難である。従って、移動照射法は、宇宙用太陽電池の耐放射線性評価試験における標準的な電子線の照射方法としては不適当と考えられる。

固定照射法(静止試料に走査ビームを照射する方法)の場合の試料に入射する電子線はパルス状であるが、ビーム走査のみによるパルス化であり、定常的な連続電子線としてのフルエンス率を容易に求めることができる(4.7.1項)。また、この方法によって、宇宙用太陽電池の耐放射線性評価に必要な数の試料を同時に照射でき(4.7.1項)、照射中の試料の温度上昇も無視できる(6.2.1項)。さらに、6.3.2項(4)に記載したように、電子線照射による太陽電池の電気特性の低下は、スポット照射法と移動照射法の間である。従って、宇宙用太陽電池の耐放射線性評価試験における電子線の照射方法として、本章の研究において検討した3種の方法の中では、固定照射法が最も優れていると結論できる。

6.3.2項(4)で述べたように、電子線を照射した太陽電池の η_{voc} 、 η_{isc} 、および η_{pmax} は、それぞれ V_{oco} 、 I_{sco} 、および P_{maxo} が増加すると低下すると考えられる。特に、 V_{oco} の増加に伴う η_{voc} の低下はほぼ定量的である。従って、太陽電池の耐放射線性評価試験において、使用した太陽電池のそれぞれの電気特性の初期値の範囲が異なる場合の耐放射線性は、実験的に得られるそれぞれの電気特性保存率の単純な平均値ではなく、Table 6.23に示したように、それぞれの電気特性の初期値に基準値を設定し、この基準値に対応するそれぞれの電気特性保存率を求めて評価する必要がある。

Table 6. 1 Irradiation conditions of electron beams

Irradiation method		Fixed	Moving	spot
Beam current (mA)		0.167	5.0	0.029
Fluence rate	($e \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)	1.0×10^{12}	.....	1.0×10^{12}
	($e \cdot cm^{-2} \cdot pass^{-1}$)	.....	1.0×10^{14}	.....
Fluence ($e \cdot cm^{-2}$)		1.0×10^{15}	1.0×10^{15}	1.0×10^{15}
Conveyer speed ($m \cdot min^{-1}$)		.....	2.4	.....
Number of times of irradiation		3	10 (repetition)	6
Irradiation time ($s \cdot time^{-1}$)		1000	about 10 min (all sample)	1000

Table 6. 2 Maximum temperature of the surface of solar cell during the irradiation of electron beams

Irradiation method	Measuring item ^{a)}	Si-50		Si-200		Ga As	
		Bare	CG	Bare	CG	Bare	CG
Fixed	I _B (mA)	0.164		0.171		0.174	
	T ₀ (°C)	20.0	20.0	19.5	20.1	19.5	20.1
	T _M (°C)	20.5	20.8	19.9	20.8	20.2	21.0
	ΔT (°C)	0.5	0.8	0.4	0.7	0.7	0.9
Moving	I _B (mA)	5.00		5.03		5.07	
	T ₀ (°C)	20.0	20.0	19.5	20.4	19.8	20.6
	T _M (°C)	26.5	29.5	26.0	34.8	35.0	38.7
	ΔT (°C)	6.5	9.5	6.5	14.4	15.2	18.1

a) I_B : Average beam current of electrons.T₀ : Temperature of the surface of solar cell before the irradiation of electron beams.T_M : Maximum temperature of the surface of solar cell during the irradiation of electron beams.ΔT : Difference between T_M and T₀ (= T_M - T₀).

Table 6. 3 Results of Si-50 (Bare) cell irradiated electron beams by the fixed irradiation method^{a)}

Sample No.	Voc			Isc			Pmax			Vop			Iop			FF			Ivp)		
	Voco (mV)	Voce (mV)	η_{voc} (%)	Isc0 (mA)	Iscce (mA)	η_{isc} (%)	Pmax0 (mW)	Pmaxce (mW)	η_{pmax} (%)	Vopo (mV)	Vopec (mV)	η_{vop} (%)	Iopo (mA)	Iopce (mA)	η_{iop} (%)	FFo (%)	FFce (%)	Ivo (mA)	Ivce (mA)	η_{iv} (%)	
1	574.7	507.4	88.3	153.8	139.5	90.7	65.1	51.5	79.1	458.3	394.3	86.0	142.1	130.7	92.0	73.6	72.8	98.9	131.8	50.6	38.4
2	582.8	509.7	87.5	156.0	142.3	91.2	64.4	51.6	80.1	458.1	387.6	84.6	140.5	133.2	94.8	70.8	71.2	100.6	131.3	52.9	40.3
3	577.7	507.8	87.9	157.7	142.4	90.3	67.0	53.0	79.1	465.3	400.8	86.1	144.0	132.2	91.8	73.5	73.3	99.7	136.0	54.0	39.7
4	581.1	509.1	87.6	158.2	142.9	90.3	66.8	51.9	77.7	450.3	394.2	87.5	148.5	131.7	88.7	72.7	71.3	98.1	108.7*	53.8*	49.5*
5	571.0	508.9	89.1	156.8*	138.3*	88.2*	66.4	51.0	76.8	450.9	401.4	89.0	147.2*	127.1*	86.3*	74.1	72.5	97.8	133.1	54.7	41.1
6	587.1	510.5	87.0	153.3	140.0	91.3	65.9	51.3	77.8	464.3	401.6	86.5	141.9	127.8	90.1	74.3	71.8	96.6	133.8	56.9	42.5
7	577.1	508.7	88.1	158.7	142.8	90.0	67.5	52.9	78.4	457.3	401.0	87.7	147.5	132.0	89.5	73.7	72.8	98.8	137.3	54.6	39.8
8	582.5	511.0	87.7	155.5	141.8	91.2	65.7	52.3	79.6	464.3	401.7	86.5	141.5	130.3	92.1	72.5	72.2	99.6	136.9	58.4	42.7
9	591.0	507.5	85.9	157.7	140.9	89.3	67.5	51.1	75.7	471.1	402.9	85.5	143.3	126.9	88.6	72.4	71.5	98.8	139.7*	50.7*	36.3*
10	585.4	509.0	86.9	161.2	144.6	89.7	68.0	52.3	76.9	464.4	387.8	83.5	146.5	134.8	92.0	72.1	71.1	98.6	137.9	51.3	37.2
Av ^{c)}	581.04	508.96	87.60	156.89	141.55	90.22	66.43	51.89	78.12	460.43	397.33	86.29	144.30	130.67	90.59	72.97	72.05	98.75	132.65	53.79	40.75
σ ^{c)}	5.73	1.14	0.83	2.24	1.78	0.93	1.09	0.68	1.32	6.30	5.61	1.49	2.74	2.53	2.30	1.02	0.74	1.05	8.40	2.43	3.52
Max ^{c)}	591.0	511.0	89.1	161.2	144.6	91.3	68.0	53.0	80.1	471.1	402.9	89.0	148.5	134.8	94.8	74.3	73.3	100.6	139.7	58.4	49.5
Min ^{c)}	571.0	507.4	85.9	153.3	138.3	88.2	64.4	51.0	75.7	450.3	387.6	83.5	140.5	126.9	86.3	70.8	71.1	96.6	108.7	50.6	36.3
Av ^{d)}	...	...	...	156.90	141.91	90.44	...	...	...	...	...	...	143.98	131.07	91.07	...	...	...	134.76	54.18	40.21
σ ^{d)}	...	...	...	2.36	1.49	0.67	...	...	...	...	...	...	2.70	0.55	1.90	...	...	...	2.42	2.46	1.77
Max ^{d)}	...	...	...	161.2	144.6	91.3	...	...	...	...	...	...	148.5	134.8	94.8	...	...	...	139.7	58.4	42.7
Min ^{d)}	...	...	...	153.3	139.5	89.3	...	...	...	...	...	...	140.5	126.9	88.6	...	...	...	131.3	50.6	37.2

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{12} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Room temperature.

Voco, Isco, Pmaxo, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo: Values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, Pmaxe, Vope, Iope, FFe, and Ive: Values after the irradiation of electron beams.

 η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{iop} , η_{rr} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 480 mV.

c) Values for all data. Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.d) Values excluded abnormal data (*). Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6. 4 Results of Si-50 (CG) cell irradiated electron beams by the fixed irradiation method^{a)}

Sample No.	Voc			Isc			Pmax			Vop			Iop			FF			I _v ^{b)}		
	Voco (mV)	Voce (mV)	η_{voc} (%)	Isc0 (mA)	Iscce (mA)	η_{isc} (%)	Pmax0 (mW)	Pmaxce (mW)	η_{pmax} (%)	Vopo (mV)	Vopce (mV)	η_{vop} (%)	Iopo (mA)	Iopce (mA)	η_{iop} (%)	FFo (%)	FFce (%)	η_{ff} (%)	Ivo (mA)	Ivce (mA)	η_{iv} (%)
1	597.3	506.0	84.7	158.4	141.4	89.3	66.7	51.3	74.7	464.9	394.5	84.9	147.8	130.0	88.0	72.6	71.7	98.8	114.5*	50.0*	43.7*
2	591.2	506.4	85.7	159.6	143.5	89.9	66.9	52.4	78.3	450.6	394.9	87.6	148.6	132.6	89.2	70.9	72.1	101.7	135.2	50.5	37.4
3	595.4	507.7	85.3	157.4	141.1	89.6	66.2	51.0	77.0	456.7	394.3	86.3	144.9	129.4	89.3	70.6	71.2	100.8	135.6	51.4	37.9
4	594.4	507.9	85.4	157.7	141.1	89.5	66.6	50.8	76.3	464.2	394.3	84.9	143.6	128.9	89.8	71.1	71.0	99.9	137.3	51.6	37.6
5	592.9	507.5	85.6	157.8	142.2	90.1	67.4	52.6	78.0	464.4	394.1	84.9	145.0	133.4	92.0	72.0	72.9	101.3	138.3	53.4	38.6
6	590.8	506.9	85.8	156.6	139.6	89.1	66.7	51.9	77.8	457.4	401.6	87.8	145.8	129.2	88.6	72.1	73.4	101.8	135.7	51.6	38.0
7	591.4	509.3	86.1	155.3	142.0	91.4	67.5	52.7	78.1	471.5	393.9	83.5	143.2	133.7	93.4	73.5	72.9	99.2	139.1	45.4	32.6
8	597.3	509.3	85.3	157.4	142.0	90.2	66.8	50.7	75.9	457.6	394.3	86.2	146.0	128.6	88.1	71.1	70.1	98.6	136.5	51.7	37.9
9	594.5	507.3	85.3	156.4	141.4	90.4	68.3	51.5	75.4	480.3	401.5	83.6	142.2	128.2	90.2	73.4	71.7	97.7	139.9	52.9	37.8
10	595.6	508.8	85.4	157.2	140.9	89.6	67.2	52.1	77.5	471.6	401.7	85.2	142.4	129.6	91.0	71.7	72.7	101.4	141.0	55.9	39.6
Av ^{c)}	594.08	507.71	85.46	157.38	141.52	89.91	67.23	51.70	76.90	463.92	396.51	85.49	144.95	130.36	89.96	71.90	71.97	100.12	135.31	51.44	38.11
σ ^{c)}	2.30	1.09	0.36	1.10	0.96	0.63	0.74	0.71	1.19	8.35	3.34	1.40	2.05	1.96	1.65	0.97	0.97	1.40	7.18	2.56	2.55
Max ^{d)}	597.3	509.3	86.1	159.6	143.5	91.4	68.7	52.7	78.3	480.3	401.7	87.8	148.6	133.7	93.4	73.5	73.4	101.8	141.0	55.9	43.7
Min ^{d)}	590.8	506.0	84.7	155.3	139.6	89.1	66.2	50.7	74.7	450.6	393.9	83.5	142.2	128.2	88.0	70.6	70.1	97.7	114.5	45.4	32.6
Av ^{d)}	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	137.62	51.60	37.49
σ ^{d)}	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1.95	2.65	1.84
Max ^{d)}	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	141.0	55.9	39.6
Min ^{d)}	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	135.2	45.4	32.6

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{12} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Room temperature.

Voco, Isco, Pmaxo, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo: Values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, Pmaxce, Vopce, Iopce, FFe, and Ive: Values after the irradiation of electron beams.

 η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{iop} , η_{ff} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 480 mV.

c) Values for all data. Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.d) Values excluded abnormal data (x). Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6. 5 Results of Si-200 (Bare) cell irradiated electron beams by the fixed irradiation method^{a)}

Sample No.	V _{oc}		I _{sc}		P _{max}			V _{op}			I _{op}			FF			I _{v^b}		
	V _{oc} (mV)	η _{voc} (%)	I _{sc} (mA)	η _{isc} (%)	P _{maxo} (mW)	P _{maxe} (mW)	η _{pmax} (%)	V _{opo} (mV)	V _{ope} (mV)	η _{vop} (%)	I _{opo} (mA)	I _{ope} (mA)	η _{iop} (%)	FF _o (%)	FF _e (%)	η _{FF} (%)	I _{vo} (mA)	η _{iv} (%)	
1	586.3	505.4	165.3	82.9	68.9	49.8	72.3	457.8	394.9	86.3	150.4	126.2	83.9	71.1	72.0	101.3	140.2	45.9	32.7
2	580.4	505.2	168.6	82.6	69.8	50.9	72.9	444.3	395.4	89.0	157.0	128.8	82.0	71.3	72.4	101.5	137.8	46.8	34.0
3	593.5	503.8	168.1	80.7	68.6*	47.1*	68.7*	450.3	387.3	86.0	152.2	121.7	80.0	68.7	68.9	100.3	138.5*	38.4*	27.7*
4	573.8	505.6	166.7	82.8	67.7	50.1	74.0	443.3	387.5	87.4	152.7	129.3	84.7	70.7	71.8	101.6	133.6	46.0	34.4
5	574.6	505.6	167.6	82.6	68.9	50.0	72.6	442.9	387.5	87.5	155.6	129.1	83.0	71.6	71.5	99.9	136.1	46.6	34.2
6	584.9	505.9	165.6	83.1	68.5	50.0	73.0	457.0	401.7	87.9	149.9	124.4	83.0	70.7	71.8	101.6	138.8	46.7	33.6
7	579.0	506.1	167.0	82.8	69.4	49.6	71.5	443.5	394.6	89.0	156.5	125.8	80.4	71.8	70.9	98.7	136.8	48.3	35.3
8	581.6	506.0	169.3	82.3	68.9	50.0	72.6	443.7	387.1	87.2	155.4	129.0	83.0	70.0	70.9	101.3	138.0	45.7	33.1
9	585.0	506.2	168.8	82.0	71.0	50.6	71.3	450.5	394.0	87.5	157.7	128.4	81.4	72.0	72.2	100.3	141.9	48.1	33.9
10	592.4	504.3	163.6*	80.7*	70.4*	47.9*	68.0*	463.9	401.9	86.6	151.7	119.1	78.5	72.6	71.9	99.0	144.4	44.0	30.5
Av ^{c)}	583.15	505.41	167.06	82.25	69.21	49.60	71.69	449.72	393.19	87.44	153.91	126.18	81.99	71.05	71.43	100.55	138.61	45.65	32.94
σ ^{c)}	6.30	0.75	1.02	0.83	0.92	1.12	1.82	7.16	5.43	0.96	2.71	3.34	1.82	1.05	0.97	1.03	2.87	2.68	2.13
Max ^{c)}	593.5	506.2	169.3	83.1	71.0	50.9	74.0	463.9	401.9	89.0	157.7	129.3	84.7	72.6	72.4	101.6	144.4	48.3	35.3
Min ^{c)}	573.8	503.8	163.6	80.7	67.7	47.1	68.0	442.9	387.1	86.0	149.9	119.1	78.5	68.7	68.9	98.7	133.6	38.4	27.7
Av ^{d)}	...	...	167.36	82.64	69.14	50.13	72.53	...	...	...	...	...	...	...	...	...	138.62	46.46	33.52
σ ^{d)}	...	...	1.38	0.73	0.91	0.40	0.80	...	...	...	...	...	...	...	...	...	3.03	1.22	1.28
Max ^{d)}	...	...	169.3	83.1	71.0	50.9	74.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	144.4	48.3	35.3
Min ^{d)}	...	...	165.3	82.0	67.7	49.6	71.3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	133.6	44.0	30.5

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{12} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Room temperature.

Voco, Isco, Pmaxo, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo : Values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, Pmaxe, Vope, Iope, FFe, and Ive : Values after the irradiation of electron beams.

 η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{iop} , η_{FF} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 480 mV.

c) Values for all data. Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.d) Values excluded abnormal data (*). Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6. 6 Results of Si-200 (CG) cell irradiated electron beams by the fixed irradiation method^{a)}

Sample No.	Voc			Isc			Pmax			Vop			Iop			FF			I _{op} ^{b)}		
	Voco (mV)	Voce (mV)	η_{voc} (%)	Isc0 (mA)	Isc1 (mA)	η_{isc} (%)	Pmax0 (mW)	Pmax1 (mW)	η_{pmax} (%)	Vopo (mV)	Vopec (mV)	η_{vop} (%)	Iopo (mA)	Iope (mA)	η_{iop} (%)	FFo (%)	FFe (%)	η_{ff} (%)	Ivo (mA)	Ive (mA)	η_{iv} (%)
1	584.1	503.6	86.2	155.3	135.0	81.2	59.3	48.6	70.1	449.8	387.1	85.1	154.0	125.4	81.4	71.3	71.4	100.1	139.0	42.8	30.8
2	584.6	503.8	86.2	168.2	136.7	81.3	68.6	48.9	71.3	450.3	387.6	85.1	152.4	126.1	82.7	69.8	70.9	101.6	138.4	43.0	31.1
3	582.2	503.9	85.1	167.5	134.9	80.5	71.4	49.2	68.9	458.0	387.5	84.6	155.9	126.8	81.3	72.0	72.3	100.4	146.6	45.1	30.8
4	591.8	503.7	85.1	169.3	136.5	80.6	70.3	49.0	69.7	464.3	394.8	85.0	151.5	124.0	81.8	70.2	71.2	101.4	144.2	42.9	29.8
5	585.4	504.2	86.1	168.2	136.3	81.0	70.8	48.9	69.1	450.6	394.8	87.6	157.2	123.9	78.8	71.9	71.2	99.0	141.0	43.1	30.6
6	590.7	504.0	85.3	168.9*	134.8*	79.8*	70.9*	47.8*	67.4*	457.7	387.3	84.6	154.9	123.3	79.6	71.1	70.3	98.9	144.5	41.5	28.7
7	584.3	504.2	86.3	164.0	132.7	80.9	69.7	48.5	69.6	450.2	394.8	87.7	154.8	122.9	79.4	72.7	72.5	99.7	140.0	44.1	31.5
8	581.0	505.3	87.0	169.5	137.1	80.9	70.3	49.4	70.3	444.8	387.5	87.1	158.0	127.4	80.6	71.4	71.3	99.9	140.7	44.2	31.4
9	581.7	505.4	86.9	167.0	135.5	81.1	69.9	49.3	70.5	444.4	395.0	88.9	157.4	124.7	79.2	72.0	71.9	99.9	140.2	45.8	32.7
10	578.0	504.7	87.3	168.0*	137.9*	82.1*	69.2	49.6	71.7	444.5	394.5	88.8	155.6	125.8	80.8	71.2	71.3	100.1	137.1	45.4	33.1
Av ^{c)}	585.38	504.28	86.15	167.69	135.74	80.94	70.04	48.92	69.86	451.46	391.09	86.85	155.17	125.03	80.56	71.36	71.43	100.10	141.17	43.79	31.05
σ ^{c)}	4.55	0.61	0.79	1.55	1.41	0.56	0.82	0.50	1.17	6.29	3.69	1.54	2.01	1.44	1.21	0.82	0.62	0.83	2.85	1.29	1.21
Max ^{c)}	592.2	505.4	87.3	169.5	137.9	82.1	71.4	49.6	71.7	464.3	395.0	88.9	158.0	126.8	82.7	72.7	72.5	101.6	146.6	45.8	33.1
Min ^{c)}	578.0	503.6	85.1	164.0	132.7	79.8	68.6	47.8	67.4	444.4	387.1	84.6	151.5	122.9	78.8	69.8	70.3	98.9	137.1	41.5	28.7
Av ^{d)}	...	...	...	167.50	135.59	80.94	69.94	49.04	70.13	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
σ ^{d)}	...	...	...	1.66	1.32	0.26	0.81	0.34	0.88	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Max ^{d)}	...	...	...	169.5	137.1	81.3	71.4	49.6	71.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Min ^{d)}	...	...	...	164.0	132.7	80.5	68.6	48.5	68.9	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{13} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Room temperature.

Voco, Isco, Pmaxo, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo: Values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, Pmaxe, Vopec, Iope, FFe, and Ive: Values after the irradiation of electron beams.

 η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{iop} , η_{ff} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 480 mV.

c) Values for all data. Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.d) Values excluded abnormal data (*). Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6.7 Results of Ga As (Bare) cell irradiated electron beams by the fixed irradiation method^{a)}

Sample No.	V _{oc}			I _{sc}			P _{max}			V _{op}			I _{op}			FF			I _{v^{b)}}		
	V _{oc} (mV)	V _{oc} (mV)	η _{voc} (%)	I _{sc} (mA)	I _{sc} (mA)	η _{isc} (%)	P _{maxo} (mW)	P _{maxe} (mW)	η _{pmax} (%)	V _{opo} (mV)	V _{ope} (mV)	η _{vop} (%)	I _{opo} (mA)	I _{ope} (mA)	η _{iop} (%)	FF _o (%)	FF _e (%)	η _{FF} (%)	I _{vo} (mA)	η _{iv} (%)	
1	975.3	906.4	92.9	123.6	106.3	86.0	92.3	72.9	79.0	810.2	745.5	92.0	113.9	97.8	85.9	76.5	75.6	98.8	120.4	101.2	84.1
2	975.4	908.8	93.2	119.8	105.1	87.7	92.0	71.9	78.2	821.0	745.1	90.8	112.1	96.5	86.1	78.7*	75.3*	95.7*	117.4	100.6	85.7
3	985.2	899.2	93.2	122.1	105.0	86.0	87.8	70.2	80.0	786.9	731.8	93.0	111.6	96.0	86.0	74.5	74.4	99.9	117.9	98.8	83.8
4	957.1	893.5	93.4	123.7	106.4	86.0	87.6	68.6	78.3	775.5	718.9	92.7	112.9	95.4	84.5	74.0	72.1	97.4	117.2	97.3	83.0
5	957.2	896.3	93.6	122.4	106.2	86.8	84.5	67.8	80.2	775.0	732.5	94.5	109.1	92.6	84.9	72.1	71.3	98.9	115.1	96.2	83.6
6	956.8	889.2	92.9	123.8	106.0	85.6	86.2	69.6	80.7	774.9	720.0	92.9	111.2	96.7	87.0	72.7	73.9	101.7	117.4	97.8	83.3
7	974.6	906.5	93.0	121.7	105.7	86.9	92.2	73.2	79.4	820.4	744.4	90.7	112.4	98.3	87.5	77.8	76.4	98.2	118.6	101.0	85.2
8	972.3*	877.4*	90.2*	123.3	106.3	86.2	86.6	68.9	79.6	820.7*	692.2*	84.3*	105.5*	99.6*	94.4*	72.3	74.0	102.4	114.6*	85.0*	74.2*
9	975.3	906.2	92.9	124.2	106.6	85.8	92.5	72.4	78.3	820.9	745.7	90.8	112.7	97.2	86.2	76.4	75.0	98.2	121.2	101.3	83.6
10	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Av ^{c)}	967.69	898.17	92.81	122.73	105.96	86.33	89.08	70.61	79.30	800.61	730.68	91.30	111.27	96.68	86.94	75.00	74.22	99.02	117.76	97.69	82.94
σ ^{c)}	8.10	9.73	0.95	1.31	0.54	0.63	2.97	1.91	0.86	20.68	16.93	2.75	2.40	1.87	2.77	2.31	1.55	1.96	2.03	4.82	3.20
Max ^{c)}	975.4	908.8	93.6	124.2	106.6	87.7	92.5	73.2	80.7	821.0	745.7	94.5	113.9	99.6	94.4	78.7	76.4	102.4	121.2	101.3	85.7
Min ^{c)}	956.8	877.4	90.2	119.8	105.0	85.6	84.5	67.8	78.2	774.9	692.2	84.3	105.5	92.6	84.5	72.1	71.3	95.7	114.6	85.0	74.2
Av ^{d)}	967.11	900.76	93.14	...	...	...	...	...	...	798.10	735.49	92.18	111.99	96.31	86.01	74.54	74.09	99.44	118.15	99.28	84.04
σ ^{d)}	8.42	6.78	0.24	...	...	...	...	...	...	20.60	10.69	1.27	1.34	1.65	0.92	2.02	1.59	1.66	1.80	1.88	0.88
Max ^{d)}	975.4	908.8	93.6	...	...	...	...	...	...	821.0	745.7	94.5	113.9	98.3	87.5	77.8	76.4	102.4	121.2	101.3	85.7
Min ^{d)}	956.8	889.2	92.9	...	...	...	...	...	...	774.9	718.9	90.7	109.1	92.6	84.5	72.1	71.3	97.4	115.1	96.2	83.0

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{12} \text{ e}^- \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{ cm}^{-2}$; Room temperatureV_{oc}, I_{sc}, P_{maxo}, V_{opo}, I_{opo}, F_{fo}, and I_{vo} : Values before the irradiation of electron beams.V_{oc}, I_{sc}, P_{maxe}, V_{ope}, I_{ope}, F_{fe}, and I_{ve} : Values after the irradiation of electron beams. η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{iop} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 700 mV.

c) Values for all data. Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.d) Values excluded abnormal data (*). Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6. 8 Results of Ga As (CG) cell irradiated electron beams by the fixed irradiation method^{a)}

Sample No.	Voc			Isc			Pmax			Vop			Iop			FF			I _v ^{b)}		
	Voco (mV)	Voce (mV)	η_{voc} (%)	Isc0 (mA)	Iscce (mA)	η_{isc} (%)	Pmax0 (mW)	Pmaxce (mW)	η_{pmax} (%)	Vopo (mV)	Vopec (mV)	η_{vop} (%)	Iopo (mA)	Iopce (mA)	η_{iop} (%)	FFo (%)	FFce (%)	η_{ff} (%)	Ivo (mA)	Ivce (mA)	η_{iv} (%)
1	971.3	901.0	92.8	119.5	103.3	86.4	87.3	59.8	80.0	806.2	745.5	92.5	108.2	93.7	86.6	75.2	75.1	99.9	115.8	98.0	84.6
2	969.0	897.2	92.6	121.5	104.4	85.9	88.1	68.7	78.0	783.1	732.3	93.5	112.5	93.9	83.5	74.8	73.4	98.1	117.4	97.6	83.1
3	964.6	896.2	92.9	121.3	103.0	84.9	83.9	67.5	80.5	794.8	719.9	90.6	105.6	93.8	88.8	71.7	73.1	102.0	115.4	95.6	82.8
4	968.2	895.7	92.5	122.9	104.8	85.3	89.8	71.0	79.1	805.8	731.8	90.8	111.5	97.1	87.1	75.5	75.7	100.3	119.5	99.6	83.3
5	966.1	897.6	92.9	120.9	104.0	86.0	86.8	69.3	79.8	806.4	733.0	90.9	107.7	94.6	87.8	74.3	74.3	100.0	116.9	98.0	83.8
6	969.6	899.0	92.7	122.2	104.1	85.2	87.8	69.2	78.8	817.2	746.0	91.3	107.5	92.7	86.2	74.1	73.9	99.7	117.1	97.7	83.4
7	961.9	894.6	93.0	121.7	104.3	85.7	84.6	68.9	81.4	761.0	731.4	96.1	111.1	94.2	84.8	72.2	73.9	102.4	116.3	97.1	83.5
8	951.6	888.9	93.4	120.4	102.2	84.9	84.9	67.8	79.9	771.4	733.0	95.0	110.1	92.5	84.0	74.1	74.7	100.8	115.8	95.8	82.7
9	959.6*	873.3*	91.0*	121.4	105.7	87.1	83.1	65.5	78.8	772.4	706.9	91.5	107.5	92.7	86.2	71.3	71.0	99.6	117.4	92.6	78.9
10	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Av ^{c)}	964.66	893.72	92.64	121.31	103.98	85.71	86.26	68.63	79.59	790.92	731.09	92.47	109.08	93.91	86.11	73.69	73.90	100.31	116.84	96.89	82.90
σ ^{c)}	5.83	7.88	0.63	0.93	0.97	0.69	2.10	1.48	0.97	18.50	11.30	1.88	2.17	1.32	1.64	1.47	1.28	1.22	1.17	1.89	1.51
Max ^{d)}	971.3	901.0	93.4	122.9	105.7	87.1	89.8	71.0	81.4	817.2	746.0	96.1	112.5	97.1	88.8	75.5	75.7	102.4	119.5	99.6	84.6
Min ^{d)}	951.6	873.3	91.0	119.5	102.2	84.9	83.1	65.5	78.0	761.0	706.9	90.6	105.6	92.5	83.5	71.3	71.0	98.1	115.4	92.6	78.9
Av ^{d)}	965.29	896.28	92.85	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
σ ^{d)}	5.88	3.35	0.26	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Max ^{d)}	971.3	901.0	93.4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Min ^{d)}	951.6	888.9	92.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{12} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Room temperature

Voco, Isco, Pmaxo, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo: Values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, Pmaxe, Vopec, Iopce, FFe, and Ive: Values after the irradiation of electron beams.

 η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{iop} , η_{ff} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 700 mV.

c) Values for all data. Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.d) Values excluded abnormal data (*). Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6. 9 Results of Si-50 (Bare) cell irradiated electron beams by the moving irradiation method^{a)}

Sam- ple No.	Voc		Isc		Pmax			Vop			Iop			FF			I _v ^{b)}	
	Voco (mV)	η_{voc} (%)	I _{sco} (mA)	I _{sce} (mA)	P _{maxo} (mW)	P _{maxc} (mW)	η_{pmax} (%)	V _{opo} (mV)	V _{ope} (mV)	η_{vop} (%)	I _{opo} (mA)	I _{ope} (mA)	η_{top} (%)	FFo (%)	FFe (%)	η_{ff} (%)	I _{vo} (mA)	η_{iv} (%)
1	582.3	85.9	160.1	139.6	67.2	50.3	74.3	457.6	386.6	84.5	148.0	130.2	88.0	72.6	72.1	99.3	138.4	27.7
2	590.0	84.2	157.0*	133.4*	68.9*	46.4*	67.3*	471.5	380.2	80.6	146.2	122.0	83.4	74.4*	70.0*	94.1*	141.0*	17.1*
3	595.0	83.9	158.3	138.3	67.0	49.1	73.3	463.9	387.1	83.4	144.4	126.9	87.9	71.1	71.1	100.0	140.4	25.4
4	597.9	83.3	156.2	135.7	68.0	49.4	72.6	478.9	395.5	82.6	142.0	125.0	88.0	72.8	73.1	100.4	143.4	24.7
5	588.1	85.0	157.8	138.1	68.0	48.9	71.9	465.7	387.6	83.2	146.1	126.2	86.4	73.3	70.9	96.7	139.9	26.9
6	584.1	85.4	159.2*	136.8*	67.3	49.3	73.3	464.4	387.9	83.5	144.9	127.1	87.7	72.4	72.2	99.7	139.5	21.7
7	591.1	84.5	158.7	138.6	68.1	49.3	72.4	464.6	387.4	83.4	146.5	127.4	87.0	72.6	71.3	98.2	140.1	25.6
8	595.5	83.8	157.9	137.7	69.1	48.9	70.8	470.6	380.7	80.9	145.9	128.3	87.3	73.4	71.1	96.9	139.9	25.7
9	595.4	83.7	160.0*	137.9*	68.1	48.4	71.1	464.3	387.4	83.4	146.6	124.9	85.2	71.4	70.4	98.6	140.4	24.6
10	586.3	83.3	155.4*	134.2*	67.7	47.4	70.0	479.1	388.0	81.0	141.4	122.2	86.4	73.1	71.1	97.3	140.9*	18.2*
Av ^{c)}	591.67	84.30	158.06	137.03	67.99	48.74	71.70	468.06	386.84	82.65	145.30	125.92	86.73	72.71	71.33	98.12	140.39	23.76
σ ^{c)}	5.19	1.08	1.46	1.90	0.61	1.05	1.91	6.55	4.01	1.27	2.04	2.44	1.40	0.91	0.85	1.82	1.23	4.69
Max ^{c)}	597.9	85.9	160.1	139.6	69.1	50.3	74.3	479.1	395.5	84.5	148.0	130.2	88.0	74.4	73.1	100.4	143.4	27.7
Min ^{c)}	582.3	83.3	155.4	133.4	67.0	46.4	67.3	457.6	380.2	80.6	141.4	122.0	83.4	71.1	70.0	94.1	138.4	17.1
Av ^{d)}	...	...	158.17	138.00	67.89	49.00	72.19	...	...	...	...	...	...	72.52	71.48	98.57	140.25	25.29
σ ^{d)}	...	...	1.16	1.18	0.56	0.74	1.30	...	...	...	...	...	...	0.75	0.78	1.30	1.33	2.26
Max ^{d)}	...	...	160.1	139.6	69.1	50.3	74.3	...	...	...	...	...	...	73.4	73.1	100.4	143.4	27.7
Min ^{d)}	...	...	156.2	135.7	67.0	47.4	70.0	...	...	...	...	...	...	71.1	70.4	96.7	138.4	21.7

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{14} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \text{pass}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Conveyor speed, $2.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; Room temperature.

Voco, Isco, P_{maxo}, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo : Values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, P_{maxc}, Vope, Iope, FFe, and Ivc : Values after the irradiation of electron beams.

η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{top} , η_{ff} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 480 mV.

c) Values for all data. Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

d) Values excluded abnormal data (%). Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6. 10 Results of Si-50 (CG) cell irradiated electron beams by the moving irradiation method^{a)}

Sample No.	Voc			Isc			Pmax			Vop			Iop			FF			I ^{op}		
	Voco (mV)	Voce (mV)	η_{voc} (%)	Isc0 (mA)	Isc1 (mA)	η_{isc} (%)	Pmax0 (mW)	Pmax1 (mW)	η_{pmax} (%)	Vopo (mV)	Voce (mV)	η_{voc} (%)	Iopo (mA)	Iope (mA)	η_{iop} (%)	FFo (%)	FFe (%)	η_{ff} (%)	Ivo (mA)	Ive (mA)	η_{iv} (%)
1	500.5	494.9	82.4	158.3	134.6	85.0	66.9	47.6	71.2	471.7	387.3	82.1	141.8	122.8	86.6	70.4	71.4	101.4	139.7	29.1	20.8
2	596.6	497.1	83.3	158.7	136.6	86.1	67.5	48.2	71.4	464.2	387.9	83.6	145.4	124.4	85.6	71.3	71.1	99.7	139.0	32.8	23.6
3	592.2	496.3	83.8	155.9	133.4	85.6	67.1	48.4	72.1	457.4	388.6	85.0	146.7	124.4	84.8	72.7	73.0	100.4	110.8*	32.6*	29.4*
4	595.0	495.8	83.3	157.3	135.5	86.1	67.4	47.6	70.6	471.1	386.1	82.0	143.1	123.3	86.2	72.0	70.9	98.5	140.3	29.9	21.3
5	595.6	497.0	83.4	158.6	138.2	87.1	67.7	48.8	72.1	464.2	387.8	83.5	145.8	126.0	86.4	71.7	71.1	99.2	138.3	32.1	23.2
6	596.2	496.3	83.2	157.6	135.6	86.0	66.4	48.7	73.3	464.1	387.5	83.5	143.1	125.6	87.8	70.9	72.3	102.0	137.4	32.2	23.4
7	591.9	498.0	84.1	157.6	138.3	87.8	67.4	50.0	74.2	470.9	387.6	82.3	143.1	129.0	90.1	72.2	72.6	100.6	141.0	34.6	24.5
8	597.7	497.6	83.3	159.2	137.2	86.2	67.7	47.7	70.5	464.3	381.1	82.1	145.8	125.2	85.9	71.2	69.9	98.2	140.5	32.1	22.8
9	597.9	497.6	83.2	160.4	138.7	86.5	66.8	48.7	72.9	455.0	374.5	80.5	143.5	130.1	90.7	69.6	70.6	101.4	138.8	26.1	18.8
10	601.2	496.4	82.6	161.3	137.5	85.2	67.7*	46.4*	68.5*	463.9	380.8	82.1	145.9*	121.9*	83.6*	69.8	68.0	97.4	139.6	28.7	20.6
Av ^{c)}	596.48	496.70	83.26	158.49	136.56	86.16	67.26	48.21	71.68	455.68	384.92	82.67	144.42	125.27	86.77	71.18	71.09	99.88	136.54	31.02	22.84
σ ^{c)}	2.90	0.90	0.47	1.48	1.66	0.79	0.42	0.91	1.54	4.17	4.38	1.18	1.58	2.46	2.10	-0.97	1.37	1.46	8.64	2.38	2.73
Max ^{d)}	601.2	498.0	84.1	161.3	138.7	87.8	67.7	50.0	74.2	471.7	388.6	85.0	146.7	130.1	90.7	72.7	73.0	102.0	141.0	34.6	29.4
Min ^{d)}	591.9	494.9	82.4	155.9	133.4	85.0	66.4	46.4	68.5	457.4	374.5	80.5	141.8	121.9	83.6	69.6	68.0	97.4	110.8	26.1	18.8
Av ^{d)}	...	...	...	...	...	...	67.21	48.41	72.03	...	...	...	144.26	125.64	87.12	...	...	...	139.40	30.84	22.11
σ ^{d)}	...	...	...	...	...	...	0.42	0.72	1.18	...	...	...	1.59	2.31	1.91	...	...	...	1.08	2.45	1.73
Max ^{d)}	...	...	...	...	...	...	67.7	50.0	74.2	...	...	...	146.7	130.1	90.7	...	...	...	141.0	34.6	24.5
Min ^{d)}	...	...	...	...	...	...	66.4	47.6	70.5	...	...	...	141.8	122.8	84.8	...	...	...	137.4	26.1	18.8

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{14} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \cdot \text{pass}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Conveyor speed, $2.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; Room temperature.

Voco, Isco, Pmaxo, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo: Values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, Pmaxe, Voce, Iope, FFe, and Ive: Values after the irradiation of electron beams.

η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{voc} , η_{iop} , η_{ff} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 480 mV.

c) Values for all data. Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

d) Values excluded abnormal data (*). Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6. 1. 1 Results of Si-200 (Bare) cell irradiated electron beams by the moving irradiation method^{a)}

Sample No.	Voc		Isc		Pmax		Vop		Iop		FF		I _{vp} ^{b)}	
	Voco (mV)	Voce (mV)	Isc _o (mA)	Isc _e (mA)	Pmax _o (mW)	Pmax _e (mW)	Vopo (mV)	Vopec (mV)	Iopo (mA)	Iope (mA)	FF _o (%)	FF _e (%)	Ivo (mA)	IVE (%)
1	584.6	497.6	85.1	168.9	132.8	78.6	449.7	396.8	156.1	120.9	77.5	72.6	142.0	23.0
2	587.0	496.8	84.6	168.8	132.6	78.6	443.7	374.2	155.1	121.6	78.4	69.1	138.4*	15.8*
3	584.9	496.2	84.8	164.7	128.3	77.9	457.6	387.7	151.8	118.2	77.9	72.0	140.5*	17.2*
4	586.8	498.0	84.9	168.3	132.1	78.5	450.6	386.8	155.1	123.0	79.3	72.4	141.7	23.6
5	603.6	498.4	82.6	174.2*	135.7*	77.9*	478.0*	387.6*	159.3	125.2	78.6	71.7	158.7	21.8
6	590.7	497.0	84.1	167.3	131.9	78.8	457.5	387.8	152.8	118.1	77.3	70.8	142.1	21.1
7	586.1	497.5	84.9	169.5	133.9	79.0	450.3	394.3	159.0	121.3	76.3	71.8	143.6	23.4
8	597.0	495.9	83.1	164.3*	126.0*	76.7*	465.3	386.6	151.7	115.5	76.1	71.4	146.5	19.1
9	585.2	497.6	85.0	171.1	134.8	78.8	443.9	387.9	159.1	123.2	77.4	70.5	143.1	22.6
10	590.1	497.2	84.3	167.6	131.0	78.2	450.2	388.0	157.3	121.3	77.1	71.6	144.2	22.5
Av ^{c)}	589.60	497.22	84.34	168.47	131.91	78.30	454.68	387.77	155.73	120.83	77.59	71.44	144.08	21.01
σ ^{c)}	5.88	0.73	0.81	2.74	2.77	0.64	9.95	5.57	2.80	2.71	0.95	1.06	5.29	2.59
Max ^{d)}	603.6	498.4	85.1	174.2	135.7	79.0	478.0	396.8	159.3	125.2	79.3	72.4	158.7	23.6
Min ^{d)}	584.6	495.9	82.6	164.3	126.0	76.7	443.7	374.2	151.7	115.5	76.1	69.5	138.4	15.8
Av ^{d)}	...	...	...	168.28	132.18	78.55	...	452.09	387.79	...	...	...	145.24	22.14
σ ^{d)}	...	...	...	1.74	1.83	0.33	...	6.55	...	...	...	...	5.29	1.38
Max ^{d)}	...	...	...	171.1	134.8	79.0	...	465.3	396.8	...	...	...	158.7	23.6
Min ^{d)}	...	...	...	164.7	128.3	77.9	...	443.7	374.2	...	...	...	141.7	19.1

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{14} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Conveyor speed, $2.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$; Room temperature.

Voco, Isco, Pmaxo, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo : Values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, Pmaxe, Vopec, Iope, FF_e, and IVE : Values after the irradiation of electron beams.

η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{top} , η_{ff} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 480 mV.

c) Values for all data. Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

d) Values excluded abnormal data (x). Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6. 12 Results of Si-200 (CG) cell irradiated electron beams by the moving irradiation method^{a)}

Sample No.	Voc			Isc			Pmax			Vop			Iop			FF			Iv ^{b)}		
	Voco (mV)	Voce (mV)	η_{voc} (%)	Isc0 (mA)	Iscce (mA)	η_{isc} (%)	Pmax0 (mW)	Pmaxce (mW)	η_{pmax} (%)	Vopo (mV)	Vopec (mV)	η_{vop} (%)	Iopo (mA)	Iopce (mA)	η_{iop} (%)	FFo (%)	FFce (%)	η_{ff} (%)	Ivo (mA)	Ivce (mA)	η_{iv} (%)
1	585.0	495.7	84.7	164.4	127.4	77.5	70.5	46.2	65.5	457.7	388.9	85.0	154.1	118.8	77.1	73.4	73.1	99.6	141.3	28.6	20.2
2	585.1	495.4	84.7	166.7	130.3	78.2	69.5	46.3	66.6	450.9	387.3	85.9	154.2	119.4	77.4	71.3	71.7	100.6	140.2	28.8	20.5
3	589.6	493.7	83.7	165.5	128.6	77.7	70.0	44.1	63.0	457.6	381.2	83.3	153.0	115.7	75.6	71.8	69.4	96.7	142.2*	16.7*	11.7*
4	584.1	495.3	84.8	165.5	128.7	77.8	69.7	44.8	64.3	457.3	387.0	84.6	152.3	115.7	76.0	72.1	70.2	97.4	140.2	24.5	17.5
5	584.6	495.6	84.8	165.0	128.7	78.0	69.4	46.5	67.0	457.7	387.5	84.7	151.5	120.0	79.2	71.9	72.9	101.4	141.8	28.9	20.4
6	583.7	495.0	84.8	164.3	128.6	78.3	69.8	45.4	65.0	450.8	388.5	86.2	154.9	116.9	75.5	72.8	71.4	98.1	139.9	23.6	16.9
7	582.4	495.3	85.0	163.2	127.8	78.3	68.2	46.4	68.0	458.0	388.2	84.8	148.9	119.5	80.3	71.7	73.3	102.2	139.0	28.6	20.6
8	578.1	495.4	85.7	165.5	130.7	79.0	69.2	47.1	68.1	450.5	387.4	86.0	153.5	121.6	79.2	72.3	72.8	100.7	138.8	29.9	21.5
9	586.9	495.9	84.5	165.6	128.6	77.7	71.2	46.5	65.3	464.5	394.3	84.9	153.3	118.1	77.0	73.2	73.0	99.7	144.9	30.6	21.1
10	579.6	495.9	85.6	165.9	130.1	78.4	68.8	44.7	65.0	450.6	380.6	84.5	152.7	117.4	76.9	71.6	69.2	96.6	139.9	26.4	18.9
Av ^{c)}	583.91	495.32	84.83	165.16	128.95	78.09	69.63	45.80	65.78	455.57	387.09	84.99	152.84	118.31	77.42	72.21	71.70	99.30	140.82	26.66	18.93
σ ^{c)}	3.15	0.60	0.53	0.93	1.02	0.42	0.80	0.93	1.55	4.46	3.68	0.82	1.61	1.82	1.56	0.67	1.51	1.89	1.72	3.96	2.81
Max ^{d)}	589.6	495.9	85.7	166.7	130.7	79.0	71.2	47.1	68.1	464.6	394.3	86.2	154.9	121.6	80.3	73.4	73.3	102.2	144.9	30.6	21.5
Min ^{d)}	578.1	493.7	83.7	163.2	127.4	77.5	68.2	44.1	63.0	450.5	380.6	83.3	148.9	115.7	75.5	71.3	69.2	96.6	138.8	16.7	11.7
Av ^{d)}	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
σ ^{d)}	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Max ^{d)}	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Min ^{d)}	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{14} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \cdot \text{pass}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Conveyor speed, $2.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; Room temperature.

Voco, Isco, Pmaxo, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo: Values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, Pmaxce, Vopec, Iopce, FFce, and Ivce: Values after the irradiation of electron beams.

η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{iop} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 480 mV.

c) Values for all data. Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

d) Values excluded abnormal data (*). Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6. 13 Results of Ga As (Bare) cell irradiated electron beams by the moving irradiation method^{a)}

Sample No.	Voc			Isc			Pmax			Vop			Iop			FF			I _{ve} ^{b)}		
	Voco (mV)	Voce (mV)	η_{voc} (%)	Isc0 (mA)	Iscce (mA)	η_{isc} (%)	Pmax0 (mW)	Pmaxce (mW)	η_{pmax} (%)	Vopo (mV)	Vopec (mV)	η_{vop} (%)	Iopo (mA)	Iopce (mA)	η_{iop} (%)	FFo (%)	FFce (%)	η_{ff} (%)	Ivo (mA)	Ive (mA)	η_{iv} (%)
1	975.7	902.2	92.5	124.1	105.7	85.2	83.4*	71.4*	85.6*	776.1	732.3	94.4	107.5	97.4	90.6	68.9*	74.8*	108.6*	121.1	100.8	83.2
2	974.2	901.7	92.6	123.7	105.0	85.7	90.9	70.9	78.0	820.0	744.5	90.8	110.9	95.2	85.8	75.4	74.2	98.4	120.9	100.5	83.1
3	974.5	903.6	92.7	123.5	106.0	85.8	92.4	73.2	79.2	820.3	745.0	90.8	112.7	98.2	87.1	76.8	76.4	99.5	120.6	101.3	84.0
4	973.9	901.1	92.5	124.8	106.2	85.1	92.0	71.9	78.2	808.4	731.5	90.5	113.8	98.3	86.4	75.7	75.2	99.3	121.4	101.0	83.2
5	966.1	894.3	92.6	124.0	106.1	85.6	85.2	68.4	80.3	763.6	719.7	94.3	111.6	95.0	85.1	71.2	72.1	101.3	118.5	97.9	82.6
6	954.2	892.8	93.6	123.2	105.8	85.9	85.3	68.1	79.8	775.8	705.8	91.0	109.9	96.4	87.7	72.6	72.0	99.2	117.2	98.0	83.6
7	971.6	897.9	92.4	120.2	104.9	87.3	89.0*	49.9*	56.1*	821.1*	632.2*	77.0*	108.4*	79.0*	72.9*	76.2*	53.1*	69.7*	117.0	99.7	85.2
8	971.0	904.1	93.1	119.6	103.7	86.7	88.9	70.6	79.4	800.6	732.3	91.5	111.0	96.4	86.8	76.6	75.3	98.3	116.3	98.0	84.3
9	972.2	903.9	93.0	120.3	103.8	86.3	89.0	71.4	80.2	821.5	744.9	90.7	108.4	95.9	88.5	76.1	76.1	100.0	116.7	98.9	84.7
10	964.7	897.5	93.0	122.7	104.4	85.1	87.6	69.9	79.8	811.2	732.9	90.3	108.0	95.4	88.3	74.0	74.7	100.9	118.7	98.8	83.2
Av ^{c)}	969.8	899.91	92.80	122.61	105.26	85.87	88.37	68.57	77.66	801.86	722.11	90.13	110.22	94.72	85.92	74.35	72.39	97.52	118.84	99.49	83.71
σ ^{d)}	6.22	3.86	0.35	1.77	0.93	0.88	2.86	6.39	7.46	20.89	32.11	4.60	2.02	5.36	4.58	2.52	6.58	9.69	1.90	1.27	0.78
Max ^{e)}	975.7	904.1	93.6	124.8	106.2	87.3	92.4	71.9	85.6	821.5	745.0	94.4	113.8	98.3	90.6	76.8	76.4	108.6	121.4	101.3	85.2
Min ^{e)}	954.2	892.8	92.4	119.6	103.7	85.1	83.4	49.9	56.1	763.6	632.2	77.0	107.5	79.0	72.9	68.9	53.1	69.7	116.3	97.9	82.6
Av ^{d)}	...	...	...	...	...	...	88.91	70.55	79.36	799.72	732.10	91.59	110.42	96.47	87.37	74.80	74.50	99.61	...	...	...
σ ^{d)}	...	...	...	...	...	...	2.60	1.61	0.81	20.95	12.16	1.51	2.04	1.18	1.55	1.89	1.56	1.01	...	...	...
Max ^{e)}	...	...	...	...	...	...	92.4	73.2	80.3	821.5	745.0	94.4	113.8	98.3	90.6	76.8	76.4	101.3	...	...	...
Min ^{e)}	...	...	...	...	...	...	85.2	58.1	78.0	763.6	705.8	90.3	107.5	95.0	85.1	71.2	72.0	98.3	...	...	...

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{14} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \text{pass}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Conveyor speed, $2.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; Room temperature.

Voco, Isco, Pmaxo, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo : Values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, Pmaxce, Vopec, Iopce, FFce, and Ive : Values after the irradiation of electron beams.

η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{iop} , η_{ff} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 700 mV.

c) Value of all data. Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

d) Value excluded abnormal data (*). Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6.14 Results of Ga As (CG) cell irradiated electron beams by the moving irradiation method^{a)}

Sam- ple No.	V _{oc}			I _{sc}			P _{max}			V _{op}			I _{op}			FF			I _{v^{b)}}		
	V _{oco} (mV)	V _{oce} (mV)	η _{voc} (%)	I _{sco} (mA)	I _{sce} (mA)	η _{isc} (%)	P _{maxo} (mW)	P _{maxe} (mW)	η _{pmax} (%)	V _{opo} (mV)	V _{ope} (mV)	η _{vop} (%)	I _{opo} (mA)	I _{ope} (mA)	η _{iop} (%)	FF _o (%)	FF _e (%)	η _{FF} (%)	I _{vo} (mA)	I _{ve} (mA)	η _{iv} (%)
1	945.4*	861.3*	91.1*	121.8	104.9	86.1	84.0*	54.7*	65.1*	760.5*	632.1*	83.1*	110.5*	86.6*	78.4*	72.9*	60.6*	83.1*	117.2	92.9	79.3
2	978.0	897.2	91.7	121.5	103.0	84.8	92.5	70.9	76.6	829.9	744.9	89.8	111.4	95.1	85.4	77.8	75.7	98.6	118.8	98.4	82.8
3	966.1	894.8	92.6	121.9	102.3	83.9	87.4	69.8	79.9	771.7	744.8	96.5	113.2	93.7	82.8	74.2	76.2	102.7	95.1*	97.1*	102.1*
4	961.4	891.9	92.8	122.8	103.0	83.9	85.1	68.3	80.3	772.1	720.1	93.3	110.3	94.8	85.9	72.1	74.3	103.1	117.6	96.8	82.3
5	967.7	896.3	92.6	122.0	104.4	85.6	88.3	69.5	78.7	795.1	732.2	92.1	111.1	94.9	85.4	74.8	74.3	99.3	117.3	97.5	83.1
6	968.0	900.0	93.0	121.8	104.5	85.8	87.5	68.0	77.7	816.6	745.0	91.2	107.2	91.3	85.2	74.2	72.3	97.4	114.2	95.3	83.5
7	975.2	901.9	92.5	121.5	103.6	85.3	91.3	71.4	78.2	829.1	757.0	91.3	110.1	94.3	85.6	77.0	76.4	99.2	118.6	99.2	83.6
8	968.0	899.1	92.9	121.4	104.7	86.2	86.6	70.5	81.4	793.9	745.6	93.9	109.0	94.5	86.7	73.7	74.9	101.6	117.3*	79.5*	67.8*
9	962.8	892.7	92.7	123.0	105.4	85.7	86.4	70.0	81.0	783.8	732.0	93.4	110.2	95.6	86.8	73.0	74.4	101.9	118.0	98.4	83.4
10	966.9	897.3	92.8	121.1	101.9	84.1	86.5	67.9	78.5	794.6	719.9	90.6	108.9	94.4	86.7	73.9	74.3	100.5	117.0	95.5	81.6
Av ^{c)}	965.95	893.25	92.47	121.88	103.77	85.14	87.56	68.10	77.74	794.73	727.36	91.52	110.19	93.52	84.89	74.36	73.44	98.74	115.11	95.06	82.95
σ ^{c)}	8.34	11.05	0.57	0.57	1.12	0.85	2.47	4.61	4.45	22.87	33.71	3.35	1.53	2.56	2.43	1.70	4.45	5.50	6.78	5.47	7.83
Max ^{d)}	978.0	901.9	93.0	123.0	105.4	86.2	92.5	71.4	81.4	829.9	757.0	96.5	113.2	95.6	86.8	77.8	76.7	103.0	118.8	99.2	102.1
Min ^{d)}	945.4	861.3	91.1	121.1	101.9	83.9	84.0	54.7	65.1	760.5	632.1	83.1	107.2	86.6	78.4	72.1	60.6	83.1	95.1	79.5	67.8
Av ^{d)}	968.23	896.80	92.62	...	...	...	87.96	69.59	79.14	798.53	737.94	92.46	110.16	94.29	85.61	74.52	74.87	100.48	117.34	96.75	82.45
σ ^{d)}	5.02	3.11	0.36	...	...	...	2.29	1.21	1.51	20.89	11.92	1.93	1.61	1.17	1.16	1.71	1.30	1.86	1.33	1.95	1.35
Max ^{d)}	978.0	901.9	93.0	...	...	...	92.5	71.4	81.4	829.9	757.0	96.5	113.2	95.6	86.8	77.8	76.7	103.0	118.8	99.2	83.6
Min ^{d)}	951.4	891.9	91.7	...	...	...	85.1	67.9	76.6	771.7	719.9	90.6	107.2	91.3	82.8	72.1	72.3	97.4	114.2	92.9	79.3

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{14} \text{ e}^+ \text{ cm}^{-2} \text{ pass}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^+ \text{ cm}^{-2}$; Conveyor speed, 2.4 mm min^{-1} ; Room temperature.Voco, Isco, P_{maxo}, Vopo, Iopo, F_{fo}, and Ivo : Values before the irradiation of electron beams.Voce, Isce, P_{maxe}, Vope, Iope, F_{fe}, and Ive : Values after the irradiation of electron beams. η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{iop} , η_{ff} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 700 mV.

c) Value of all data. Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.d) Value excluded abnormal data (*). Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6. 15 Results of Si-50 cell irradiated electron beams by the spot irradiation method^{a)}

Sam- ple	Voc		Isc		P _{max}		Vop		Iop		FF		I _{vp} ^{b)}								
	Voco (mV)	Voce (mV)	Isc0 (mA)	Isc1 (mA)	P _{max0} (mW)	P _{max1} (mW)	Vopo (mV)	Vopec (mV)	Iopo (mA)	Iope (mA)	FFo (%)	FFc (%)	Ivo (mA)	Ive (mA)	η _{iv} (%)						
No.																					
Si-50 (Bare) cell																					
1	595.0	511.2	85.9	154.8	140.7	90.9	67.6	51.5	76.2	466.0	401.8	86.2	145.1	128.1	88.3	73.4	71.5	97.4	138.9	59.0	42.5
2	584.9	510.2	87.2	158.8	144.3	90.9	68.2	52.8	77.4	457.0	401.2	87.8	149.2	131.6	88.2	73.4	71.7	97.7	137.2	55.5	40.5
3	594.6	514.1	86.5	157.9	146.1	92.5	68.2	53.9	79.0	464.5	394.3	84.9	146.8	136.7	93.1	72.6	71.8	98.9	139.0	61.0	43.9
4	585.4	510.7	87.2	157.7	139.2	88.3	67.2	51.5	76.6	471.8	401.6	85.1	142.3	128.2	90.1	72.7	72.4	99.6	139.4	56.3	40.4
Av ^{c)}	589.98	511.55	86.70	157.30	142.58	90.65	67.80	52.43	77.30	464.83	399.73	86.00	145.85	131.15	89.93	73.03	71.85	98.40	138.63	57.95	41.83
σ ^{c)}	4.83	1.51	0.54	1.50	2.75	1.51	0.42	1.00	1.07	5.28	3.14	1.15	2.51	3.50	1.98	0.38	0.34	0.89	0.84	2.19	1.46
Max ^{c)}	595.0	514.1	87.2	158.8	146.1	92.5	68.2	53.9	79.0	471.8	401.8	87.8	149.2	136.7	93.1	73.4	72.4	99.6	139.4	61.0	43.9
Min ^{c)}	584.9	510.2	85.9	154.8	139.2	88.3	67.2	51.5	76.2	457.0	394.3	84.9	142.3	128.1	88.2	72.5	71.5	97.4	137.2	55.5	40.4
Si-50 (CG) cell																					
1	599.4	511.8	85.4	160.7	146.4	91.1	67.7	53.0	78.3	463.7	387.4	83.5	145.9	136.8	93.8	70.2	70.7	100.7	139.0	57.0	41.0
2	595.7	509.2	85.5	158.4	143.1	90.3	67.3	51.7	76.8	464.7	394.1	84.8	144.9	131.2	90.5	71.4	70.9	99.3	139.1	53.9	38.7
3	600.7	514.5	85.7	156.9	144.9	92.4	68.2	53.8	78.9	479.0	401.7	83.9	142.4	133.9	94.0	72.4	72.1	99.6	142.7	64.0	44.8
4	599.5	510.3	85.1	157.0	143.9	91.7	67.7	52.1	77.0	471.5	394.4	83.6	143.6	132.1	92.0	71.9	70.9	98.6	140.3	55.3	39.4
Av ^{c)}	598.83	511.45	85.43	158.25	144.58	91.38	67.73	52.65	77.75	469.73	394.40	83.95	144.20	133.50	92.58	71.48	71.15	99.55	140.28	57.55	40.98
σ ^{c)}	1.88	1.99	0.22	1.53	1.23	0.77	0.32	0.81	0.88	6.14	5.06	0.51	1.32	2.14	1.43	0.82	0.55	0.76	1.49	3.88	2.36
Max ^{c)}	600.7	514.5	85.7	160.7	146.4	92.4	68.2	53.8	78.9	479.0	401.7	84.8	145.9	136.8	94.0	72.4	72.1	100.7	142.7	64.0	44.8
Min ^{c)}	595.7	509.2	85.1	156.9	143.1	90.3	67.3	51.7	76.8	463.7	387.4	83.5	142.4	131.2	90.5	70.2	70.7	98.6	139.0	53.9	38.7

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{12} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \text{pass}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Room temperature.

Voco, Isco, P_{max0}, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo : The values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, P_{max1}, Vopec, Iope, FFc, and Ive : The values after the irradiation of electron beams.

η_{vco} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{iop} , η_{ff} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 480 mV.

c) Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6.16 Results of Si-200 cell irradiated electron beams by the spot irradiation method^{a)}

Sample No.	V _{oc}		I _{sc}		P _{max}		V _{op}		I _{op}		FF		I _{v^{b)}}								
	V _{oco} (mV)	η _{voc} (%)	I _{sco} (mA)	η _{isc} (%)	P _{maxo} (mW)	η _{pmax} (%)	V _{opo} (mV)	η _{vop} (%)	I _{opo} (mA)	I _{ope} (mA)	η _{top} (%)	FF _o (%)	FF _e (%)	I _{vo} (mA)	η _{iv} (%)						
Si-200 (Bare) cell																					
1	584.0	508.3	87.0	170.3	140.3	82.4	70.7	51.8	73.3	451.1	401.2	88.9	156.6	129.0	82.4	71.1	72.6	102.1	143.6	52.8	36.8
2	588.5	506.6	86.1	169.4	139.0	82.1	71.9	51.2	71.2	450.8	394.0	87.4	159.5	130.0	81.5	72.1	72.7	100.8	143.9	49.3	34.3
3	589.0	508.7	86.4	170.1	141.2	83.0	71.2	52.2	73.3	457.6	386.9	84.5	155.6	135.0	86.8	71.1	72.7	102.3	144.1	52.0	36.1
4	587.5	507.4	86.4	171.7	140.1	81.6	71.4	51.3	71.8	450.3	387.1	86.0	158.5	132.5	83.6	70.8	72.2	102.0	143.9	49.4	34.3
Av ^{c)}	587.25	507.75	86.48	170.38	140.15	82.28	71.30	51.63	72.40	452.45	392.30	86.70	157.55	131.63	83.58	71.28	72.55	101.80	143.88	50.88	35.38
σ ^{c)}	1.95	0.81	0.33	0.83	0.78	0.51	0.43	0.40	0.92	2.99	5.88	1.63	1.53	2.33	2.01	0.49	0.21	0.59	0.18	1.55	1.10
Max ^{c)}	589.0	508.7	87.0	171.7	141.2	83.0	71.9	52.2	73.3	457.6	401.2	88.9	159.5	135.0	86.8	72.1	72.7	102.3	144.1	52.8	36.8
Min ^{c)}	584.0	506.6	86.1	169.4	139.0	81.6	70.7	51.2	71.2	450.3	386.9	84.5	155.6	129.0	81.5	70.8	72.2	100.8	143.6	49.3	34.3
Si-200 (CG) cell																					
1	579.7	507.1	87.5	166.7	137.8	82.7	69.0	50.1	72.6	450.8	387.3	85.9	152.9	129.4	84.6	71.4	71.7	100.4	138.1	48.4	35.0
2	579.8	505.7	87.2	168.9	137.2	81.2	69.9	49.7	71.1	450.7	387.2	85.9	155.1	128.5	82.8	71.4	71.7	100.4	138.9	45.7	32.9
3	584.9	507.5	86.8	167.2	138.4	82.8	70.7	50.5	71.4	457.7	401.4	87.7	154.4	125.9	81.5	72.3	72.0	99.6	141.8	51.7	36.5
4	582.7	506.4	86.9	168.6	138.3	82.0	70.5	50.4	71.5	457.9	394.5	86.2	154.0	127.6	82.9	71.8	71.9	100.1	144.3	49.3	34.2
Av ^{c)}	581.78	506.68	87.10	167.85	137.93	82.18	70.03	50.18	71.65	454.28	392.60	86.43	154.10	127.85	82.95	71.73	71.83	100.13	140.78	48.78	34.65
σ ^{c)}	2.17	0.69	0.27	0.92	0.48	0.64	0.66	0.31	0.57	3.53	5.88	0.75	0.80	1.29	1.10	0.37	0.13	0.33	2.46	2.15	1.30
Max ^{c)}	584.9	507.5	87.5	168.9	138.4	82.8	70.7	50.5	72.6	457.9	401.4	87.7	155.1	129.4	84.6	72.3	72.0	100.4	144.3	51.7	36.5
Min ^{c)}	579.7	505.7	86.8	166.7	137.2	81.2	69.0	49.7	71.1	450.7	387.2	85.9	152.9	125.9	81.5	71.4	71.7	99.6	138.1	45.7	32.9

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{12} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Room temperature.

Voco, Isco, P_{maxo}, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo : The values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, P_{maxe}, Voce, Iope, FFc, and Ive : The values after the irradiation of electron beams.

η_{voc}, η_{isc}, η_{pmaxo}, η_{vop}, η_{iop}, η_{ff}, and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 480 mV.

c) Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6. 17 Results of Ga As cell irradiated electron beams by the spot irradiation method^{a)}

Sample	Voc		Isc		Pmax		Vop		Iop		FF		Ivb)	
No.	Voco (mV)	Voce (%)	Isc0 (mA)	Isce (%)	Pmax0 (mW)	Pmaxe (%)	Vopo (mV)	Vopec (%)	Iopo (mA)	Iope (%)	FFo (%)	FFe (%)	Ivo (mA)	Ive (%)
Ga As (Bare) cell														
1	958.1	901.2	94.1	98.9	86.2	82.9	66.6	80.3	799.8	732.2	91.5	103.7	90.9	87.7
2	958.5	897.6	93.6	97.6	85.4	82.1	66.1	80.5	788.4	745.7	94.6	104.1	88.6	85.1
3	959.2	899.9	93.8	99.8	86.5	82.8	67.5	81.5	777.5	732.3	94.2	106.5	92.2	86.6
4	972.3	905.3	93.1	120.4	103.5	90.1	70.0	77.7	821.3	744.7	90.7	109.7	94.0	85.7
Av ^{b)}	962.03	901.00	93.65	99.95	86.03	84.48	67.55	80.00	796.75	738.73	92.75	106.00	91.43	86.28
σ ^{c)}	5.95	2.60	0.36	2.46	2.19	0.40	1.50	1.40	16.22	6.48	1.68	2.39	1.97	0.98
Max ^{e)}	972.3	905.3	94.1	120.4	103.5	90.1	70.0	81.5	821.3	745.7	94.6	109.7	94.0	87.7
Min ^{e)}	958.1	897.6	93.1	114.3	97.6	85.4	66.1	77.7	777.5	732.2	90.7	103.7	88.6	85.1
Ga As (CG) cell														
1	968.7	898.5	92.8	121.4	103.8	85.5	69.8	79.7	793.9	732.8	92.3	110.4	95.2	86.2
2	965.6	900.3	93.2	116.1	98.8	85.1	67.2	79.2	818.4	732.7	89.5	103.7	91.7	88.4
3	970.7	905.2	93.3	121.1	104.3	86.1	72.0	79.6	828.1	757.2	91.4	109.1	95.0	87.1
4	969.5	900.7	92.9	120.9	103.6	85.7	72.1	79.1	829.2	757.2	91.3	109.8	95.2	86.7
Av ^{b)}	968.63	901.18	93.05	119.88	102.63	85.60	70.28	79.40	817.40	744.96	91.13	108.25	94.28	87.10
σ ^{c)}	1.89	2.47	0.21	2.19	2.22	0.36	2.46	2.00	14.20	12.23	1.02	2.67	1.49	0.82
Max ^{e)}	970.7	905.2	93.3	121.4	104.3	86.1	72.1	79.7	829.2	757.2	92.3	110.4	95.2	88.4
Min ^{e)}	965.6	898.5	92.8	116.1	98.8	85.1	67.2	79.1	793.9	732.7	89.5	103.7	91.7	86.2

a) Irradiation conditions : Fluence rate, $1.0 \times 10^{12} \text{ e}^- \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$; Fluence, $1.0 \times 10^{15} \text{ e}^- \text{cm}^{-2}$; Room temperature.

Voco, Isco, Pmaxo, Vopo, Iopo, FFo, and Ivo : The values before the irradiation of electron beams.

Voce, Isce, Pmaxe, Vopec, Iope, FFe, and Ive : The values after the irradiation of electron beams.

η_{voc} , η_{isc} , η_{pmax} , η_{vop} , η_{iop} , η_{ff} , and η_{iv} : Remaining factors.

b) Output current for the normal voltage of 700 mV.

c) Av : Average value, σ : Standard deviation, Max : Maximum value, Min : Minimum value.

Table 6.18 Values of standard deviation (σ) and their corrected values (σ') of remaining factors (η) extracted from Table 6.3~6.8
(fixed irradiation method)

Characteristic	σ or σ'	Si-50		Si-200		Ga As	
		(Bare)	(CG)	(Bare)	(CG)	(Bare)	(CG)
V_{oc}	σ (%)	0.83	0.36	1.02	0.79	0.95	0.63
	σ' (%)	....	....	....	....	0.24	0.26
I_{sc}	σ (%)	0.93	0.63	0.83	0.56	0.63	0.69
	σ' (%)	0.67	....	0.33	....	....	....
P_{max}	σ (%)	1.32	1.19	1.82	1.17	0.86	0.97
	σ' (%)	....	....	0.80	0.88	....	....
V_{op}	σ (%)	1.49	1.40	0.96	1.54	2.75	1.88
	σ' (%)	....	....	....	....	1.27	....
I_{op}	σ (%)	2.30	1.65	1.82	1.21	2.77	1.64
	σ' (%)	1.90	....	....	....	0.92	....
FF	σ (%)	1.05	1.40	1.03	0.83	1.96	1.22
	σ' (%)	....	....	....	....	1.66	....
I_v	σ (%)	3.52	2.55	2.13	1.21	3.20	1.51
	σ' (%)	1.77	1.84	1.28	....	0.88	....

Table 6.19 Values of standard deviation (σ) and their corrected values (σ') of remaining factors (η) extracted from Table 6.9~6.14
(moving irradiation method)

Characteristic	σ or σ'	Si-50		Si-200		Ga As	
		(Bare)	(CG)	(Bare)	(CG)	(Bare)	(CG)
V _{oc}	σ (%)	0.84	0.47	0.81	0.53	0.35	0.57
	σ' (%)	....	....	....	....	....	0.36
I _{sc}	σ (%)	0.77	0.79	0.64	0.42	0.68	0.85
	σ' (%)	0.19	....	0.33	....	....	....
P _{max}	σ (%)	1.91	1.54	1.64	1.55	7.46	4.45
	σ' (%)	1.30	1.18	....	....	0.81	1.51
V _{op}	σ (%)	1.27	1.18	2.08	0.82	4.60	3.35
	σ' (%)	....	....	1.61	....	1.51	1.93
I _{op}	σ (%)	1.40	2.10	0.95	1.56	4.58	2.43
	σ' (%)	....	1.91	....	....	1.55	1.16
FF	σ (%)	1.82	1.46	1.22	1.89	9.69	5.50
	σ' (%)	1.30	....	....	....	1.01	1.86
I _v	σ (%)	3.41	2.73	2.59	2.81	0.78	7.83
	σ' (%)	1.67	1.73	1.38	1.52	....	1.35

Table 6.20 Constants (a and b) of the approximate straight lines ($y = a + bx$) in Figures 6.4 ~6.21 plotted the electrical characteristics ($y = V_{oc}$, I_{sc} , and P_{max}) and their remaining factors ($y = \eta_{voc}$, η_{isc} , and η_{pmax}) of solar cells irradiated by the fixed irradiation method to the initial electrical characteristics ($x = V_{oc}$, I_{sc} , and P_{max})

Variable		Con- stant	Si-50		Si-200		Ga As	
x	y		(Bare)	(CG)	(Bare)	(CG)	(Bare)	(CG)
V_{oc}	V_{oc}	a	483.00	467.55	551.33	555.72	151.69	374.66
		b	0.0447	0.0676	-0.0787	-0.0879	0.7745	0.5404
	η_{voc}	a	169.34	164.80	180.91	186.77	108.97	130.93
		b	-0.1407	-0.1336	-0.1616	-0.1719	-0.0164	-0.0394
I_{sc}	I_{sc}	a	53.52	74.90	56.94	8.60	64.63	32.03
		b	0.5633	0.4233	0.4861	0.7581	0.3368	0.5931
	η_{isc}	a	124.40	136.29	117.00	85.85	140.16	110.16
		b	-0.2164	-0.2947	-0.2053	-0.0293	-0.4386	-0.2015
P_{max}	P_{max}	a	37.05	39.47	34.33	44.30	15.91	16.18
		b	0.2234	0.1820	0.2285	0.0677	0.6140	0.6080
	η_{pmax}	a	133.82	133.49	121.70	133.37	96.76	97.82
		b	-0.8385	-0.8418	-0.7112	-0.9042	-0.1960	-0.2113

Table 6.21 Constants (a and b) of the approximate straight lines ($y = a + bx$) in Figures 6.22~6.39 plotted the electrical characteristics ($y = V_{oc}$, I_{sc} , and P_{max}) and their remaining factors ($y = \eta_{voc}$, η_{isc} , and η_{pmax}) of solar cells irradiated by the moving irradiation method to the initial electrical characteristics ($x = V_{oc}$, I_{sc} , and P_{max})

Variable		Con- stant	Si-50		Si-200		Ga As	
x	y		(Bare)	(CG)	(Bare)	(CG)	(Bare)	(CG)
V _{oc}	V _{oc}	a	553.46	562.44	487.58	552.20	401.77	479.48
		b	-0.0925	-0.1102	0.0164	-0.0974	0.5136	0.4310
	η_{voc}	a	177.83	174.74	164.35	181.25	135.42	143.10
		b	-0.1581	-0.1534	-0.1357	-0.1651	-0.0440	-0.0521
I _{sc}	I _{sc}	a	-18.35	16.90	-41.08	-3.65	48.71	14.53
		b	0.9885	0.7550	1.0296	0.8029	0.4612	0.7322
	η_{isc}	a	76.33	97.07	53.45	74.73	125.96	94.20
		b	0.0690	-0.0688	0.1492	0.0204	-0.3270	-0.0743
P _{max}	P _{max}	a	57.76	55.74	21.29	46.35	18.29	38.05
		b	-0.1291	-0.1091	0.3610	-0.0078	0.5878	0.3586
	η_{pmax}	a	156.93	153.14	94.63	133.15	99.74	122.07
		b	-1.2482	-1.2068	-0.4018	-0.9676	-0.2292	-0.4881

Table 6. 22 Constants (a and b) of the approximate straight lines ($y = a + bx$) in Figures 6.40~6.48 plotted the electrical characteristics ($y = V_{oc}$, I_{sc} , and P_{max}) and their remaining factors ($y = \eta_{voc}$, η_{isc} , and η_{pmax}) of solar cells irradiated by the spot irradiation method to the initial values ($x = V_{oco}$, I_{sco} , and P_{maxo})

Variable		Con- stant	Si-50		Si-200		Ga As	
x	y		(Bare)	(CG)	(Bare)	(CG)	(Bare)	(CG)
V_{oco}	V_{oc}	a	380.22	-6.82	571.29	402.62	503.02	194.32
		b	0.2226	0.8655	-0.1082	0.1789	0.4137	0.7298
	η_{voc}	a	148.46	83.40	176.01	153.54	145.80	98.84
		b	-0.1047	0.0034	-0.1525	-0.1142	-0.0542	-0.0060
I_{sco}	I_{sc}	a	2.37	66.30	94.00	169.68	-1.47	-18.22
		b	0.8914	0.4947	0.2708	-0.1891	0.8728	1.0081
	η_{isc}	a	92.05	135.53	139.27	188.75	83.91	70.24
		b	-0.0089	-0.2790	-0.3345	-0.6349	0.0182	0.1281
P_{maxo}	P_{max}	a	-86.94	-106.04	94.99	31.64	30.23	-1.28
		b	2.0556	2.3430	-0.6081	0.2647	0.4418	0.8086
	η_{pmax}	a	-50.77	-80.94	208.26	117.53	113.96	79.22
		b	1.8889	2.3430	-1.9054	-0.6552	-0.4019	0.0021

Table 6.23 Electrical characteristics (V_{oc} , I_{sc} , and P_{max}) and their remaining factors (η_{voc} , η_{isc} , and η_{pmax}) at the standard-characteristic values (V_{oc0} , I_{sc0} , and P_{max0}) of solar cells calculated by using the constants shown in Table 6.21~6.23

Characteristics		Si-50		Si-200		Ga As	
		(Bare)	(CG)	(Bare)	(CG)	(Bare)	(CG)
Standard value	V _{oc0} (mV)	595.0				968.0	
	I _{sc0} (mA)	164.0				123.5	
	P _{max0} (mW)	71.0				91.0	
Fixed irradiation method							
V _{oc}	V _{oc} (mV)	509.6	507.8	504.5	503.4	901.4	897.8
	η _{voc} (%)	85.6	85.3	84.8	84.5	93.1	92.8
I _{sc}	I _{sc} (mA)	145.9	144.3	136.7	132.9	106.2	105.3
	η _{isc} (%)	88.9	88.0	83.3	81.0	86.0	85.3
P _{max}	P _{max} (mW)	52.9	52.4	50.6	49.1	71.8	71.5
	η _{pmax} (%)	74.3	73.7	71.2	69.2	78.9	78.6
Moving irradiation method							
V _{oc}	V _{oc} (mV)	498.4	496.9	497.3	494.2	898.9	896.7
	η _{voc} (%)	83.8	83.5	83.6	83.0	92.8	92.7
I _{sc}	I _{sc} (mA)	143.8	140.7	127.8	128.0	105.7	105.0
	η _{isc} (%)	87.6	85.8	77.9	78.1	85.6	85.0
P _{max}	P _{max} (mW)	48.6	48.0	46.9	45.8	71.8	70.7
	η _{pmax} (%)	68.3	67.5	66.1	64.5	78.9	77.7
Spot irradiation method							
V _{oc}	V _{oc} (mV)	512.7	508.2	506.9	509.1	903.5	900.8
	η _{voc} (%)	86.2	85.4	85.3	85.6	93.3	93.0
I _{sc}	I _{sc} (mA)	148.6	147.4	138.4	138.7	106.3	106.3
	η _{isc} (%)	90.6	89.8	84.4	84.6	86.2	86.1
P _{max}	P _{max} (mW)	59.0	60.3	51.8	50.4	70.4	72.3
	η _{pmax} (%)	83.3	85.4	73.0	71.0	77.4	79.4

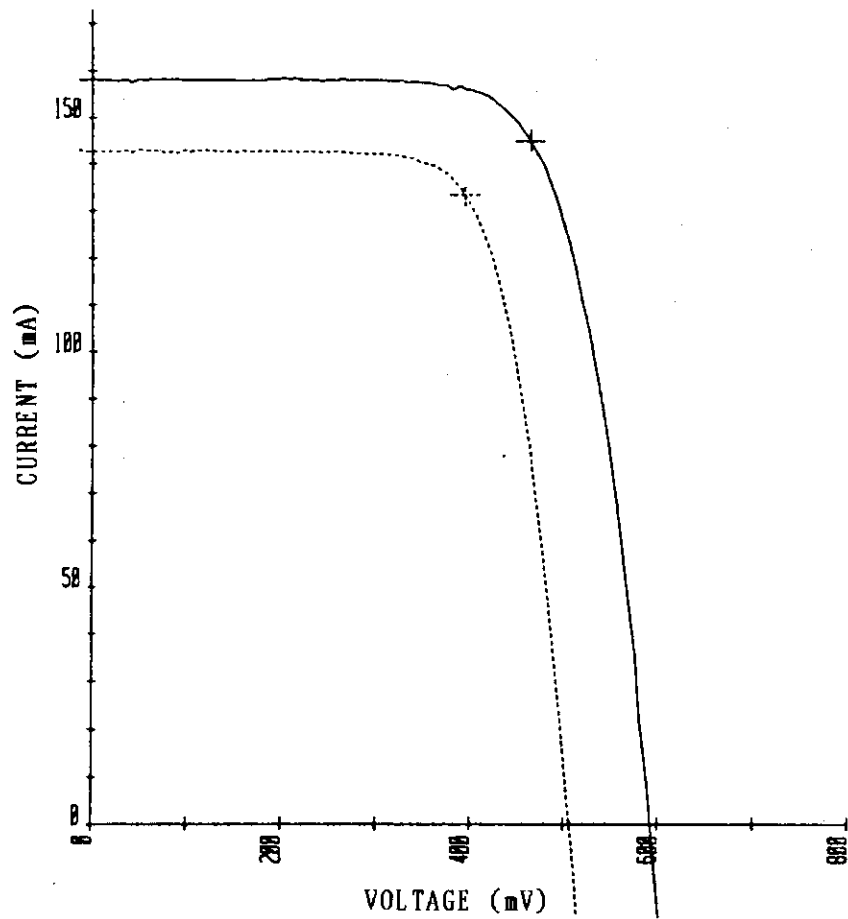


Figure 6.1 Change in the current-voltage (I-V) characteristic of Si-50 (CG) cell irradiated electron beams by fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.4.

————: before the irradiation.

-----: after the irradiation.

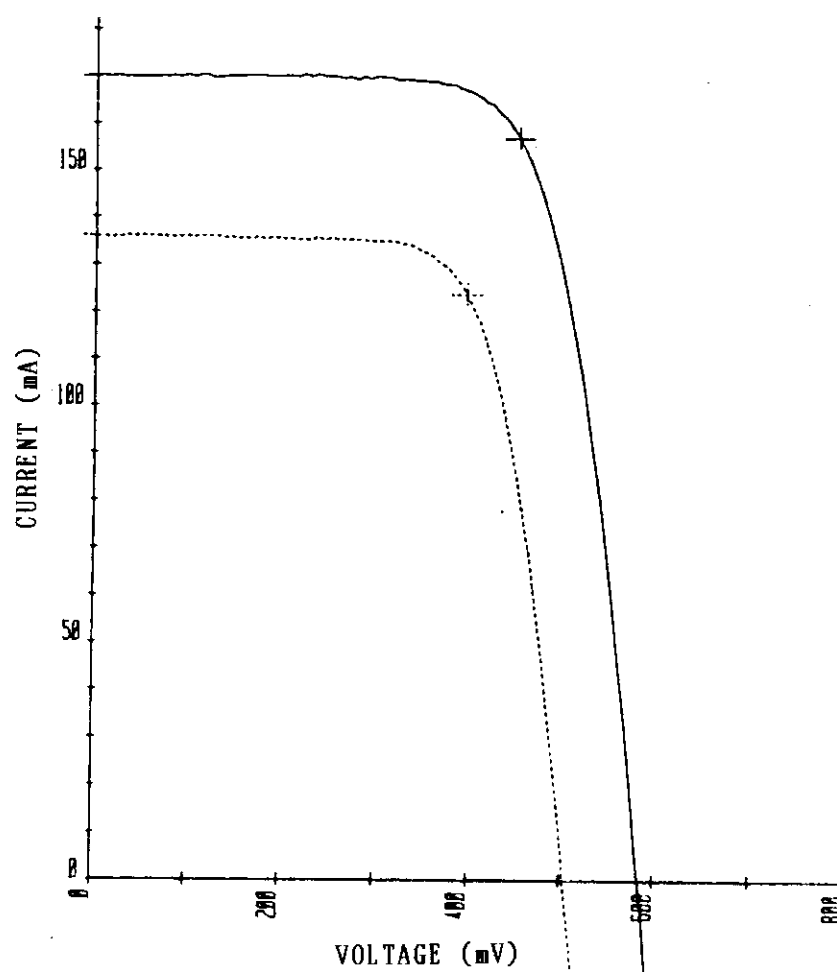


Figure 6. 2 Change in the current-voltage (I-V) characteristic of Si-200 (CG) cell irradiated electron beams by fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.6.

————: before the irradiation.

-----: after the irradiation.

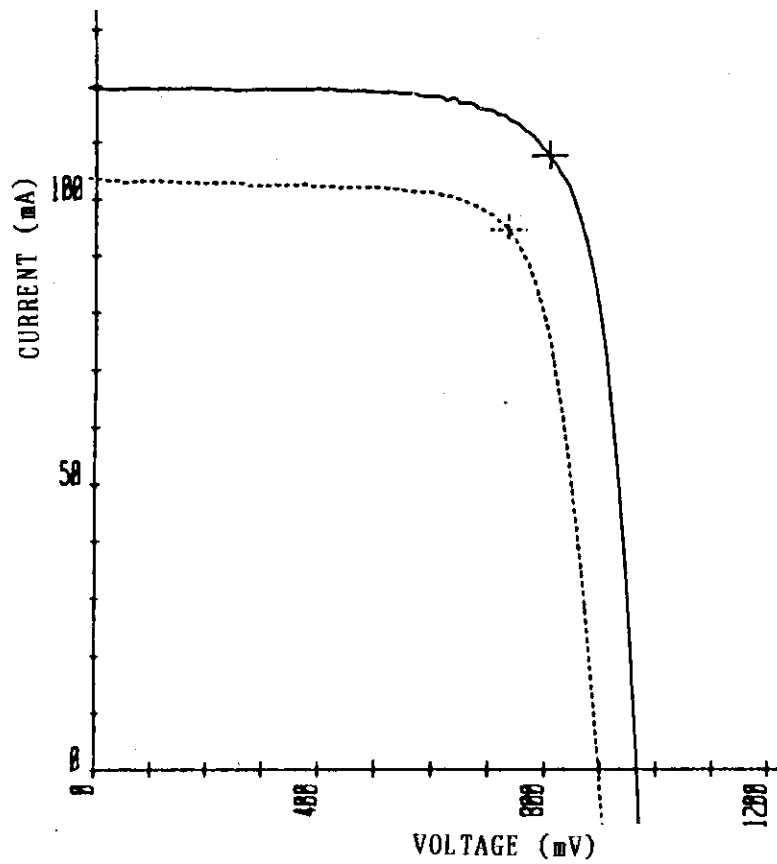


Figure 6.3 Change in the current-voltage (I-V) characteristic of GaAs (CG) cell irradiated electron beams by fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.8.

————: before the irradiation.

-----: after the irradiation.

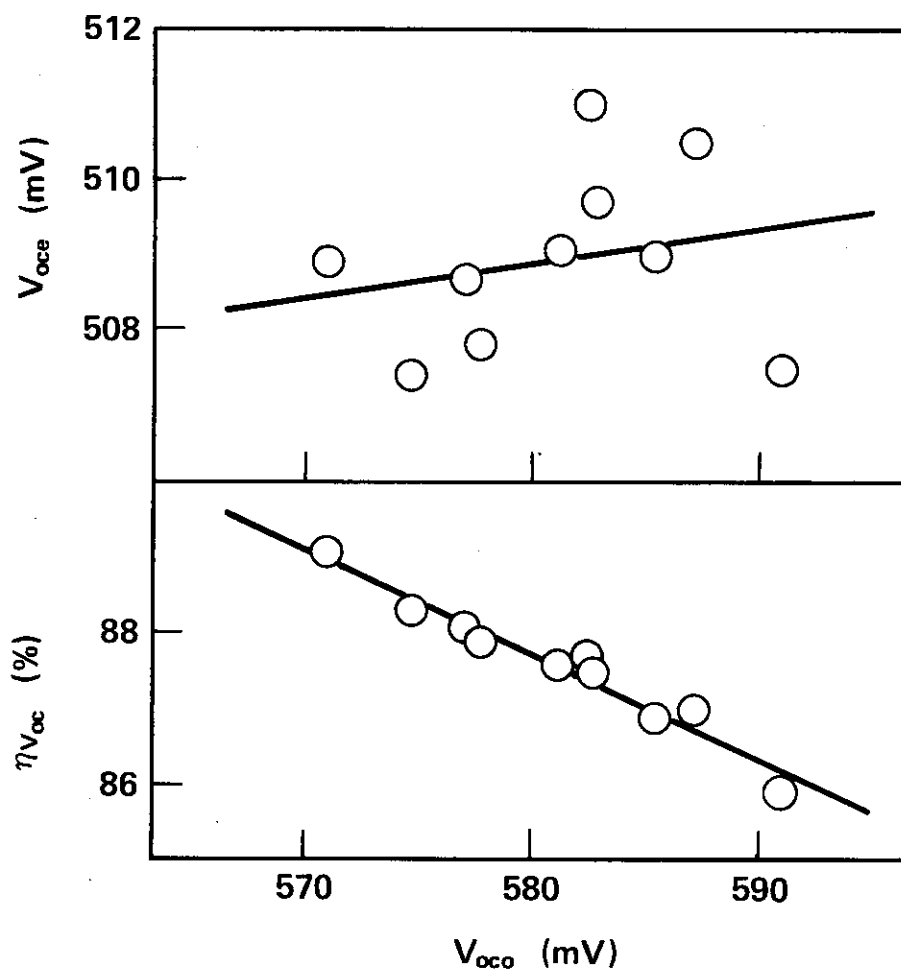


Figure 6. 4 Relation of the open circuit voltages of Si-50 (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.3.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oca} : open circuit voltage after the irradiation.

η_{voc} : remaining factor of open circuit voltage.

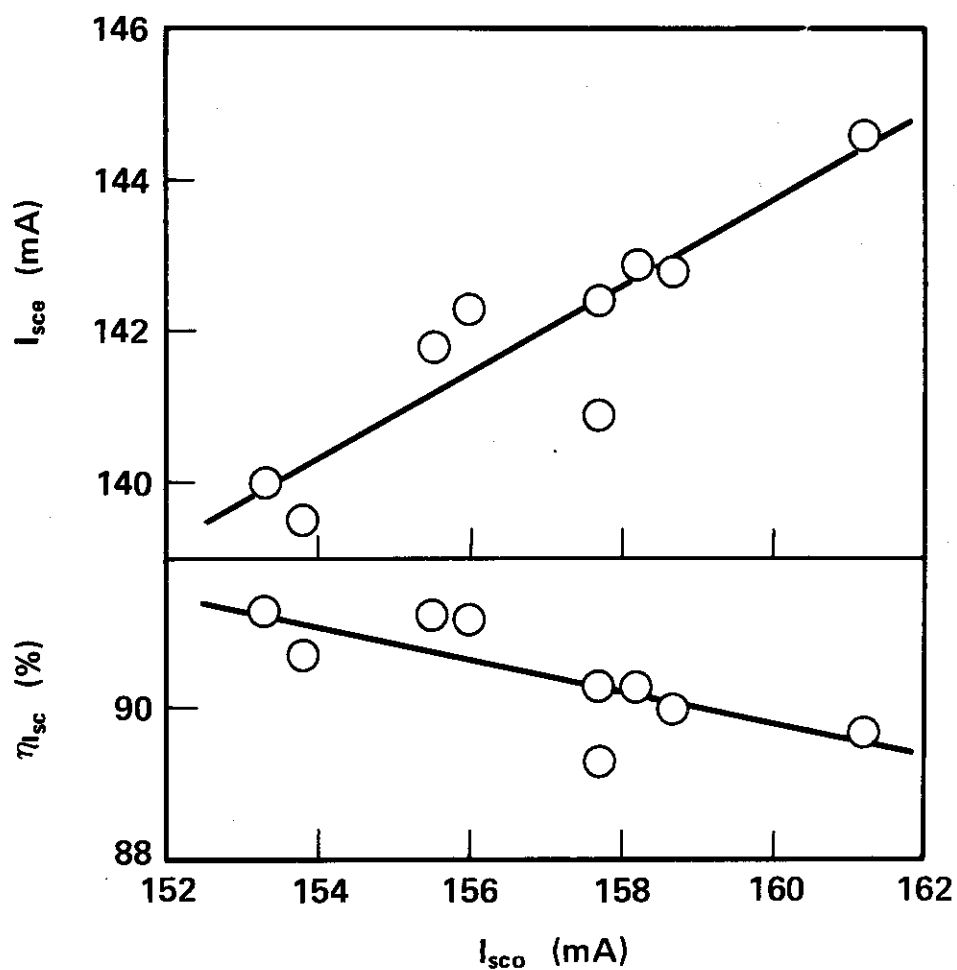


Figure 6. 5 Relation of the short circuit currents of Si-50 (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.3.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{isc} : remaining factor of short circuit current.

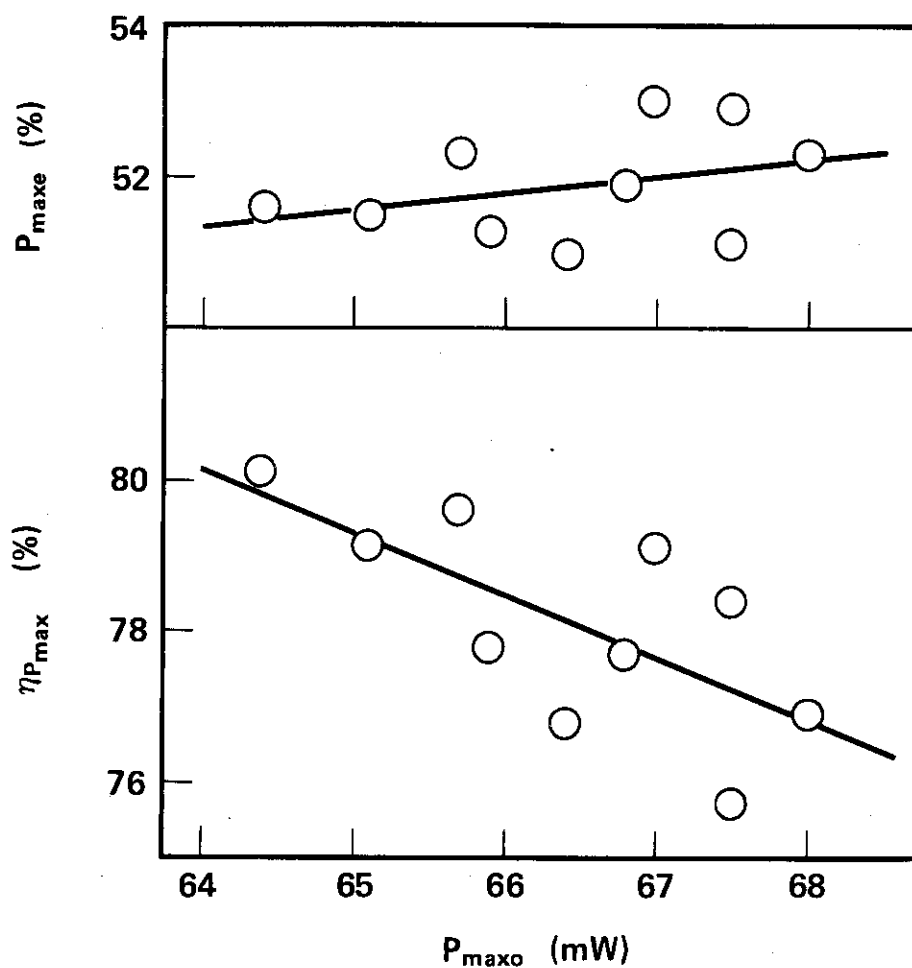


Figure 6. 6 Relation of the maximum powers of Si-50 (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.3.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max e}$: maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\max}}$: remaining factor of maximum power.

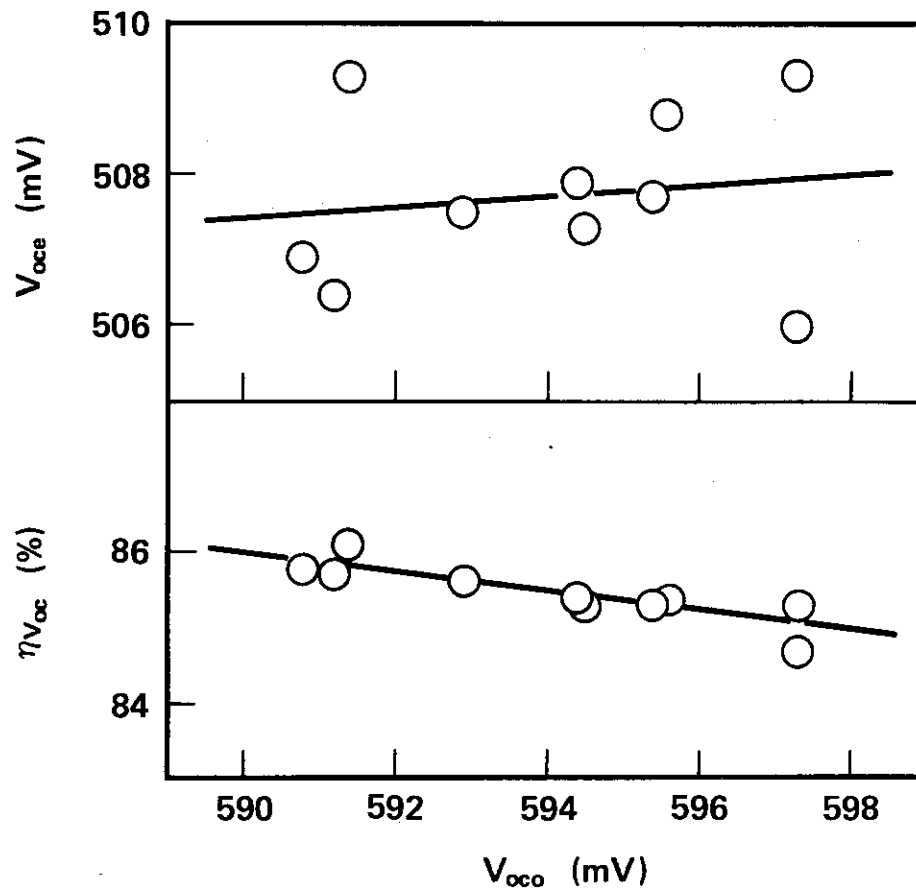


Figure 6. 7 Relation of the open circuit voltages of Si-50 (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.4.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oe} : open circuit voltage after the irradiation.

ηV_{oc} : remaining factor of open circuit voltage.

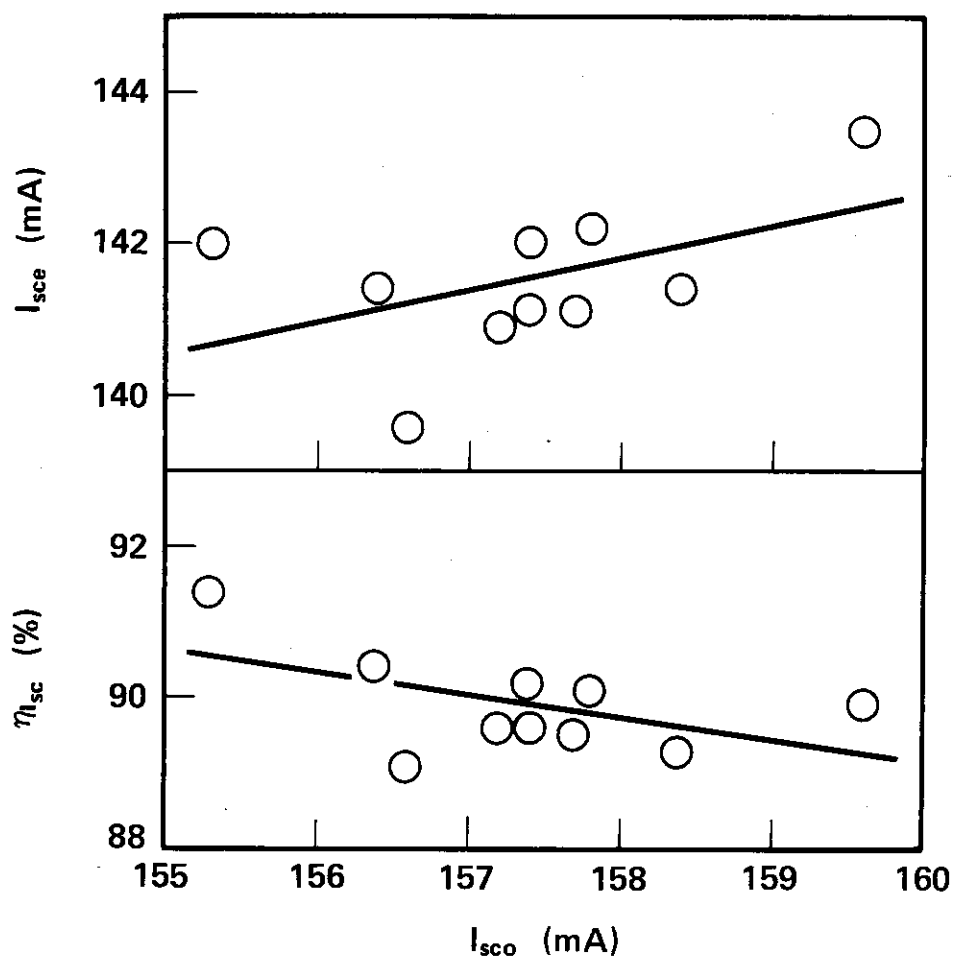


Figure 6. 8 Relation of the short circuit currents of Si-50 (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.4.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{sc} : remaining factor of short circuit current.

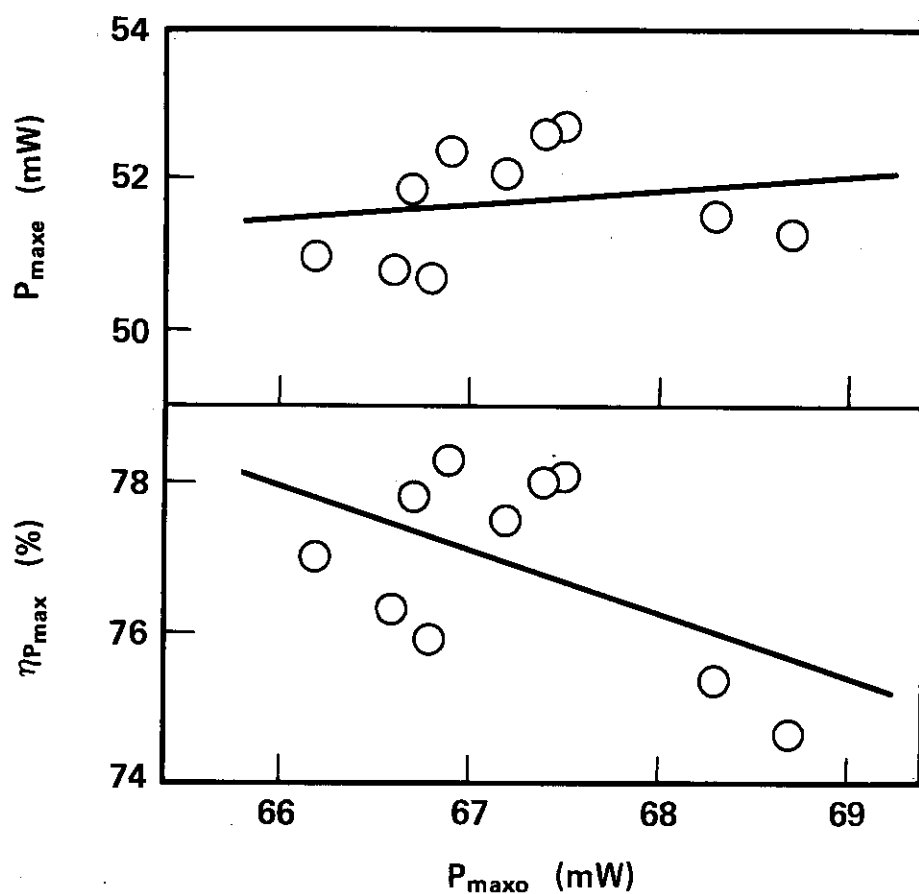


Figure 6. 9 Relation of the maximum powers of Si-50 (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.4.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max}$: maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\max}}$: remaining factor of maximum power.

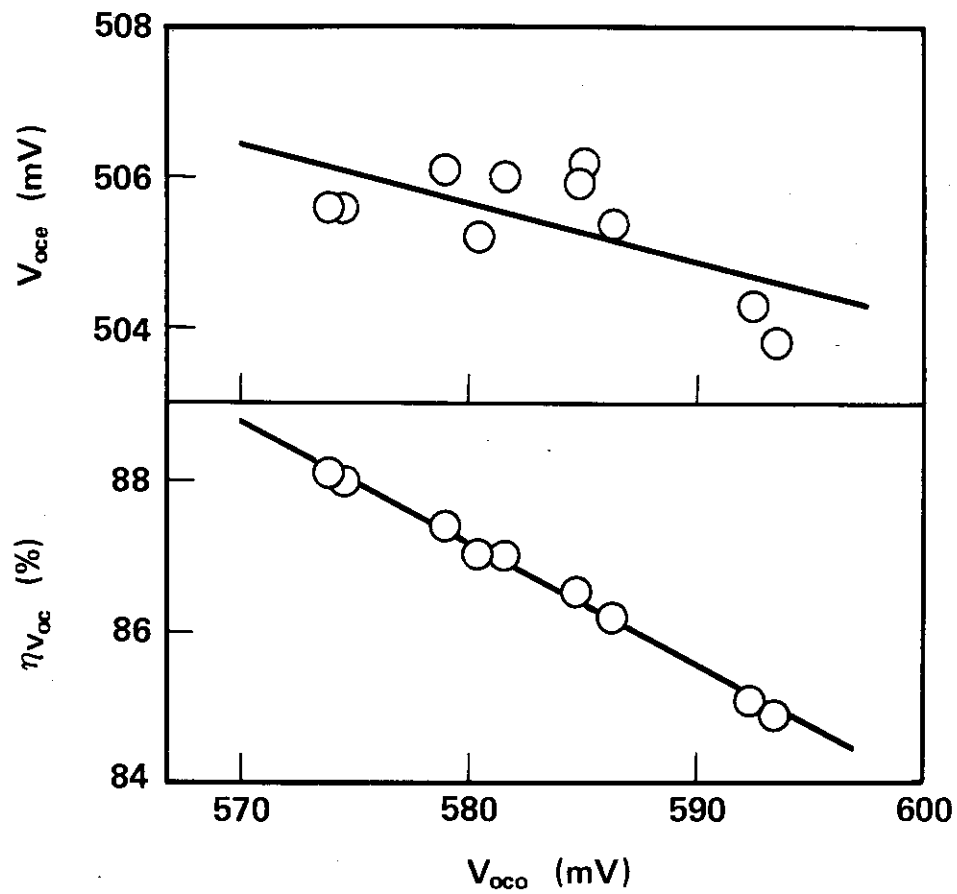


Figure 6. 10 Relation of the open circuit voltages of Si-200 (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.5.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oce} : open circuit voltage after the irradiation.

η_{voc} : remaining factor of open circuit voltage.

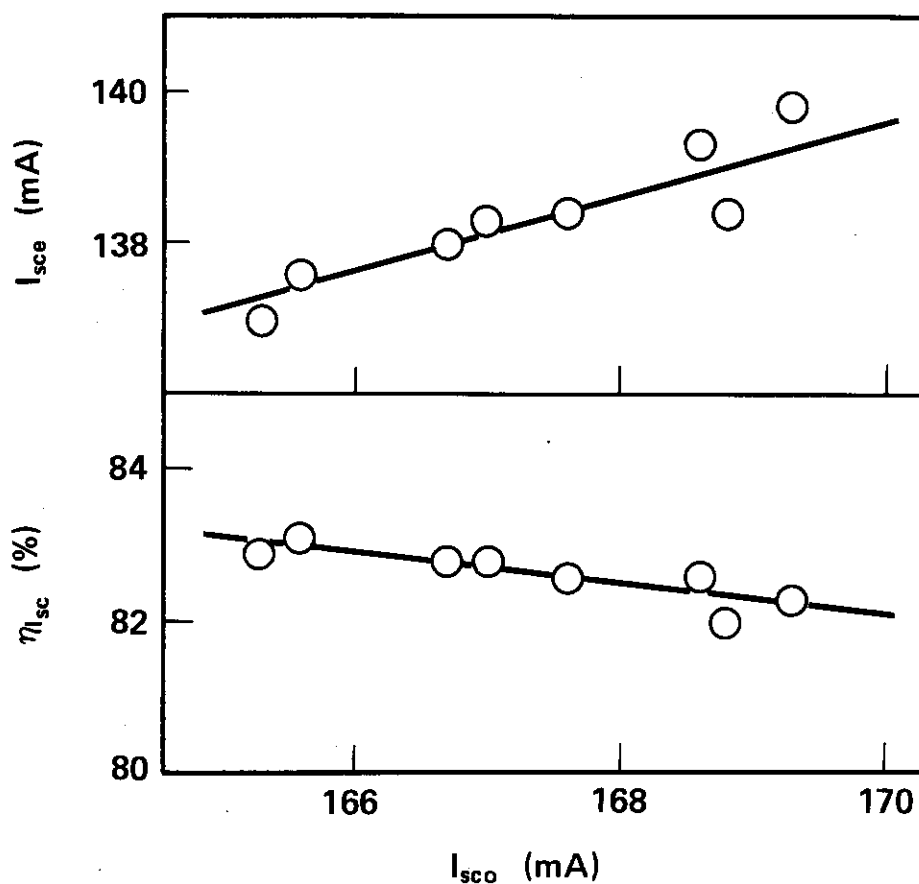


Figure 6. 1 1 Relation of the short circuit currents of Si-200 (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.5.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{sc} : remaining factor of short circuit current .

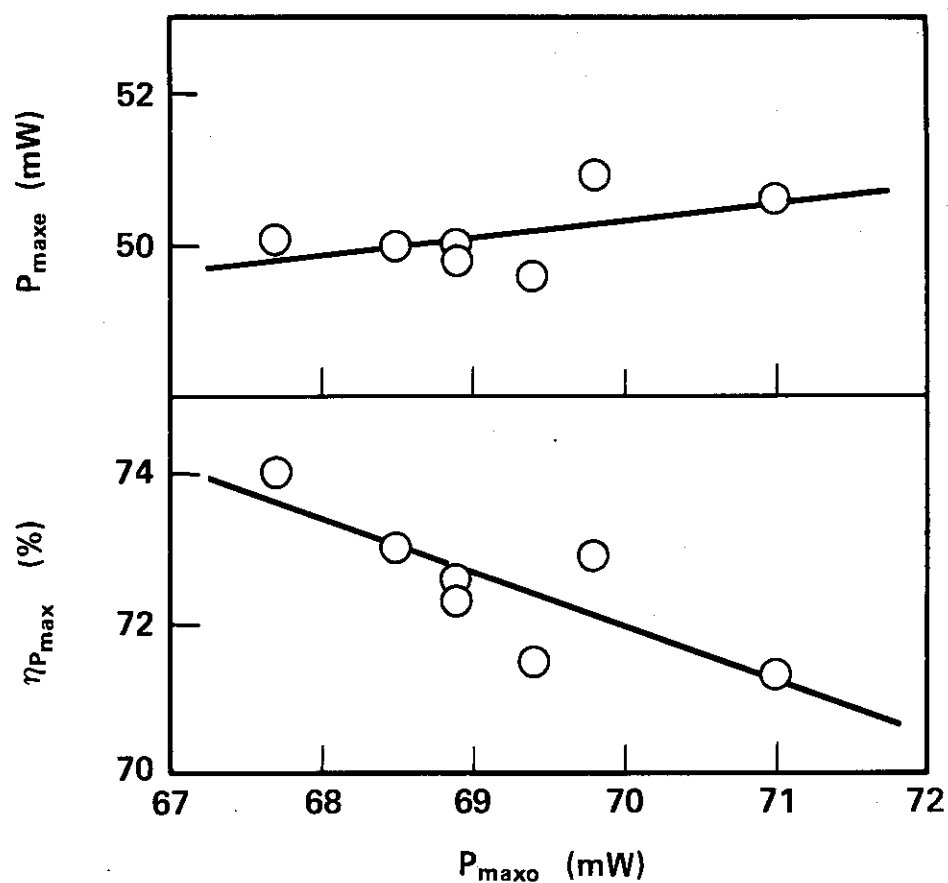


Figure 6. 12 Relation of the maximum powers of Si-200 (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.5.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max}$: maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\max}}$: remaining factor of maximum power.

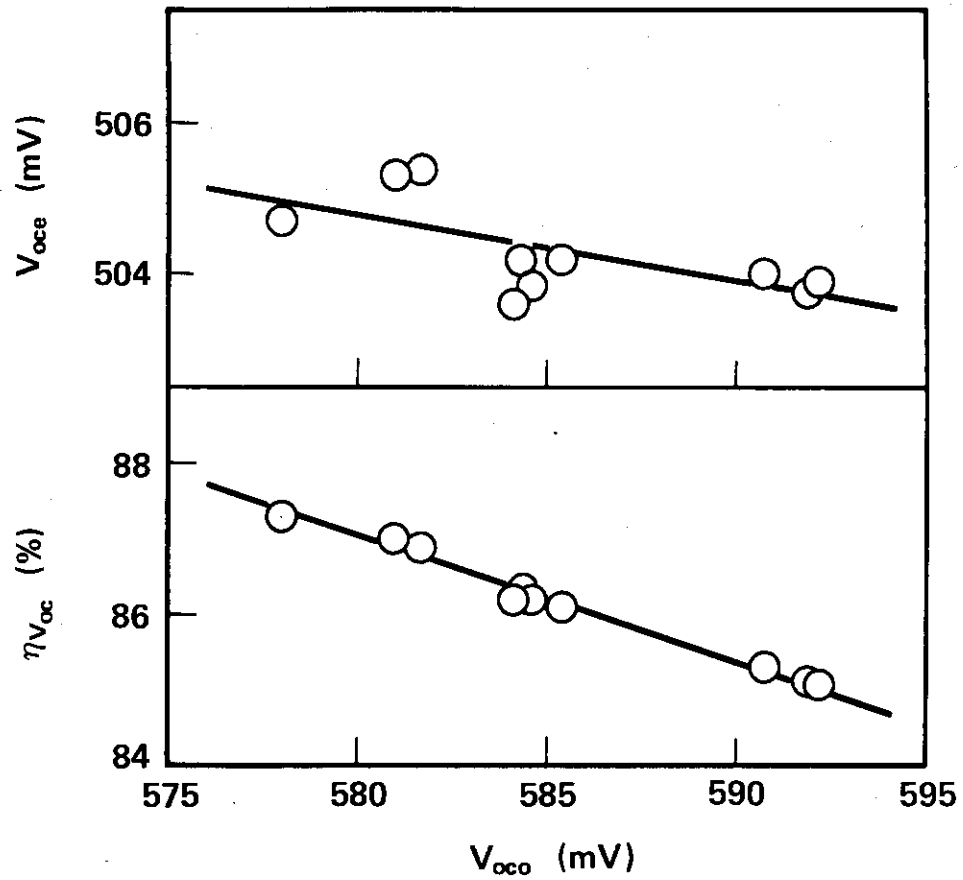


Figure 6. 13 Relation of the open circuit voltages of Si-200 (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.6.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oe} : open circuit voltage after the irradiation.

ηV_{oc} : remaining factor of open circuit voltage.

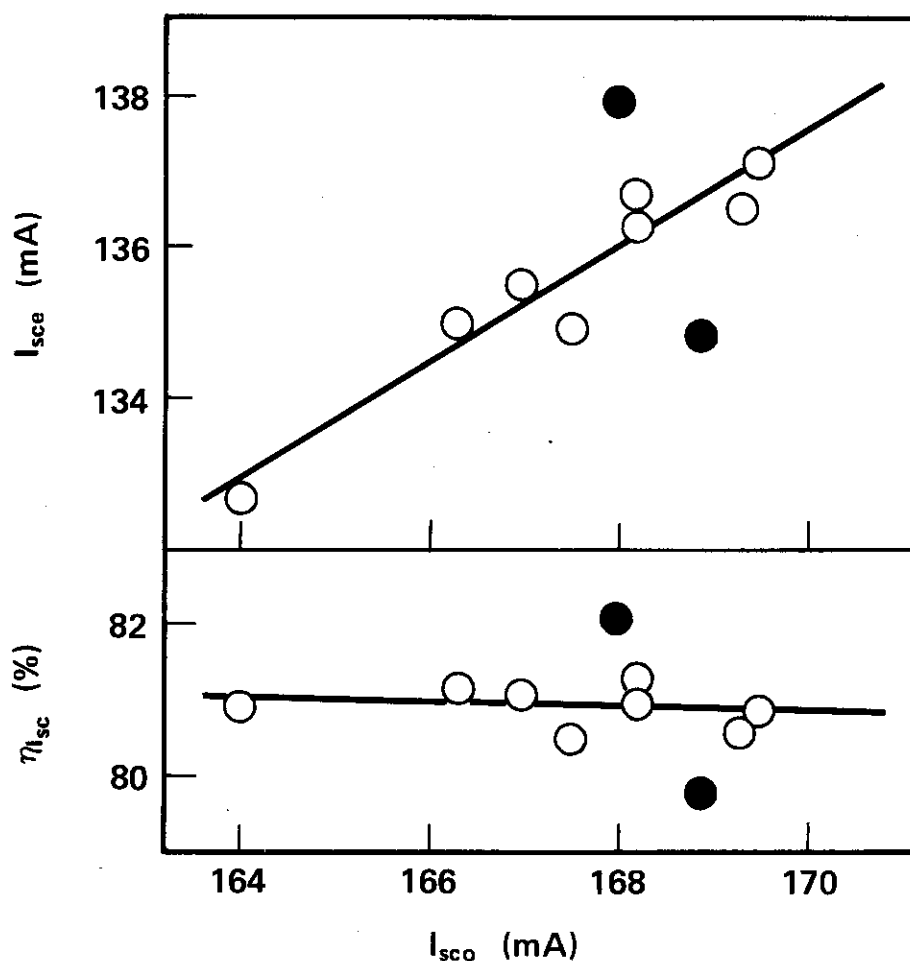


Figure 6. 1 4 Relation of the short circuit currents of Si-200 (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.6.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{sc} : remaining factor of short circuit current.

● : plots excluded in calculation of approximate straight lines.

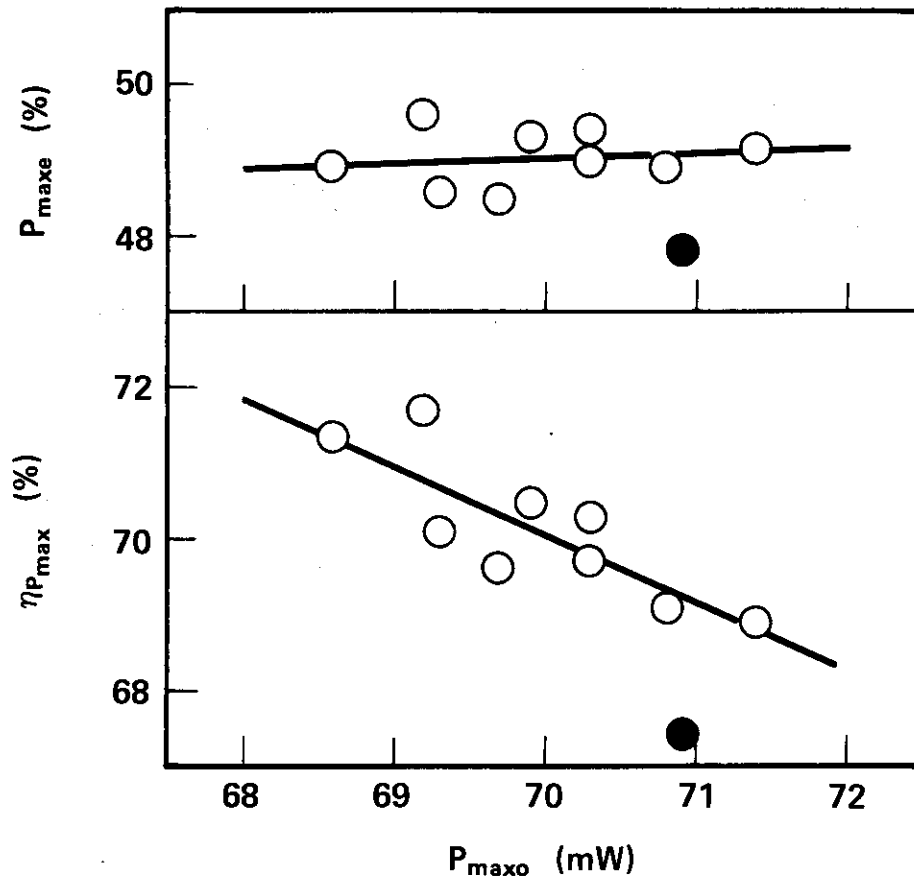


Figure 6. 15 Relation of the maximum powers of Si-200 (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.6.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max}$: maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\max}}$: remaining factor of maximum power.

● : plots excluded in calculation of approximate straight lines.

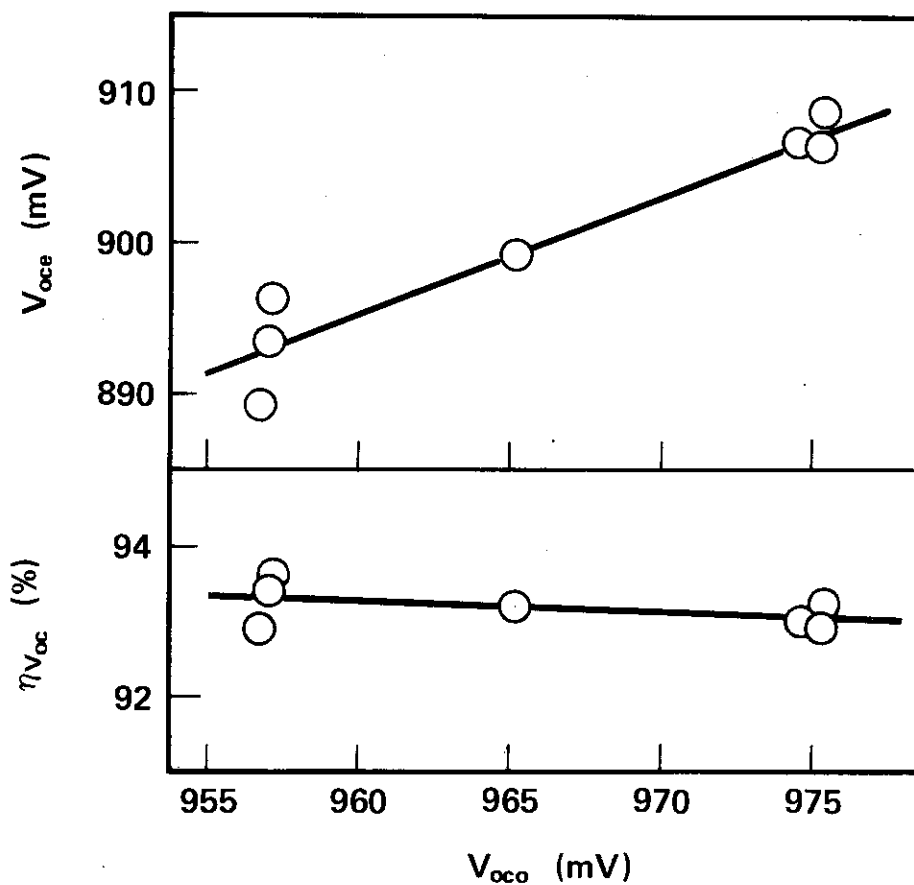


Figure 6. 16 Relation of the open circuit voltages of GaAs (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.7.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oe} : open circuit voltage after the irradiation.

ηV_{oe} : remaining factor of open circuit voltage.

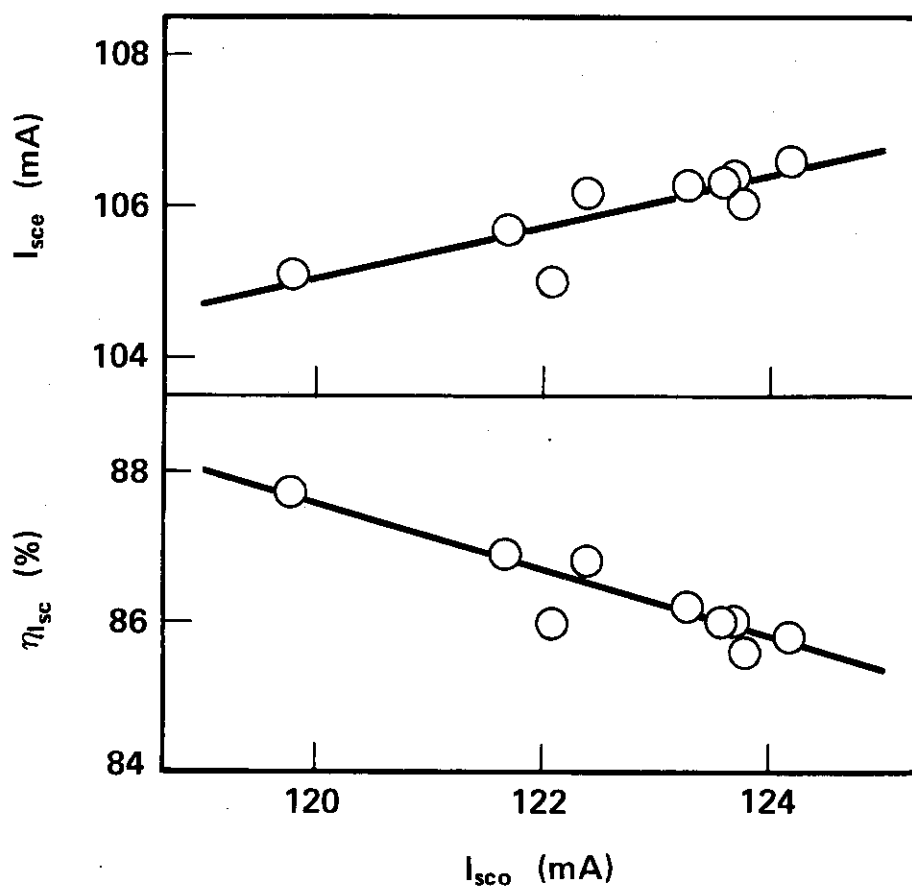


Figure 6. 17 Relation of the short circuit currents of GaAs (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.7.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{sc} : remaining factor of short circuit current.

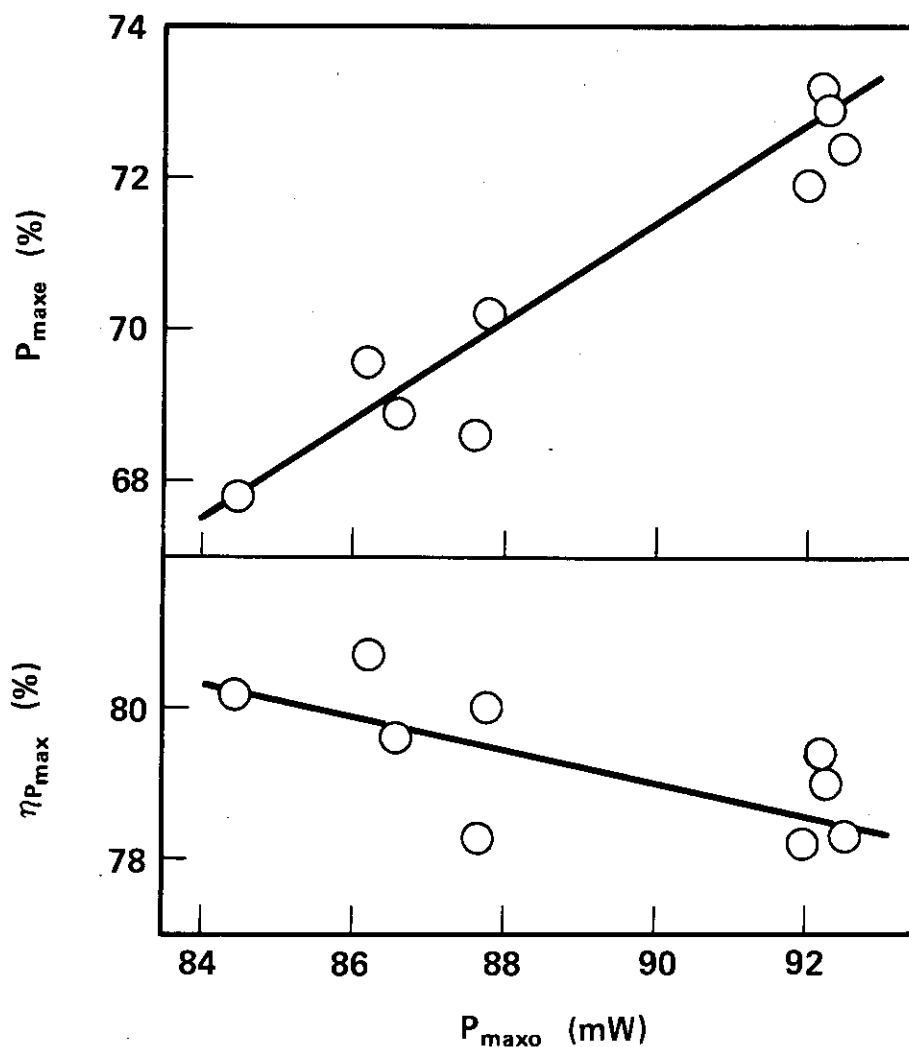


Figure 6. 18 Relation of the maximum powers of GaAs (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.7.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max e}$: maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\max}}$: remaining factor of maximum power.

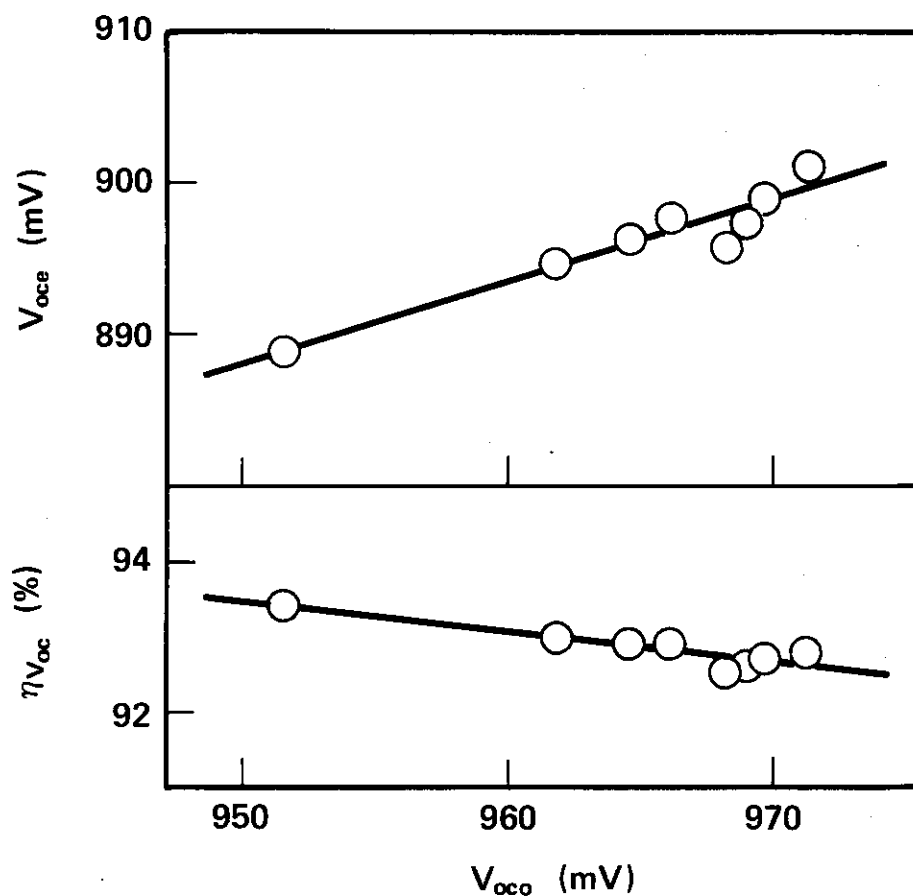


Figure 6. 19 Relation of the open circuit voltages of GaAs (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.8.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oe} : open circuit voltage after the irradiation.

ηV_{oc} : remaining factor of open circuit voltage.

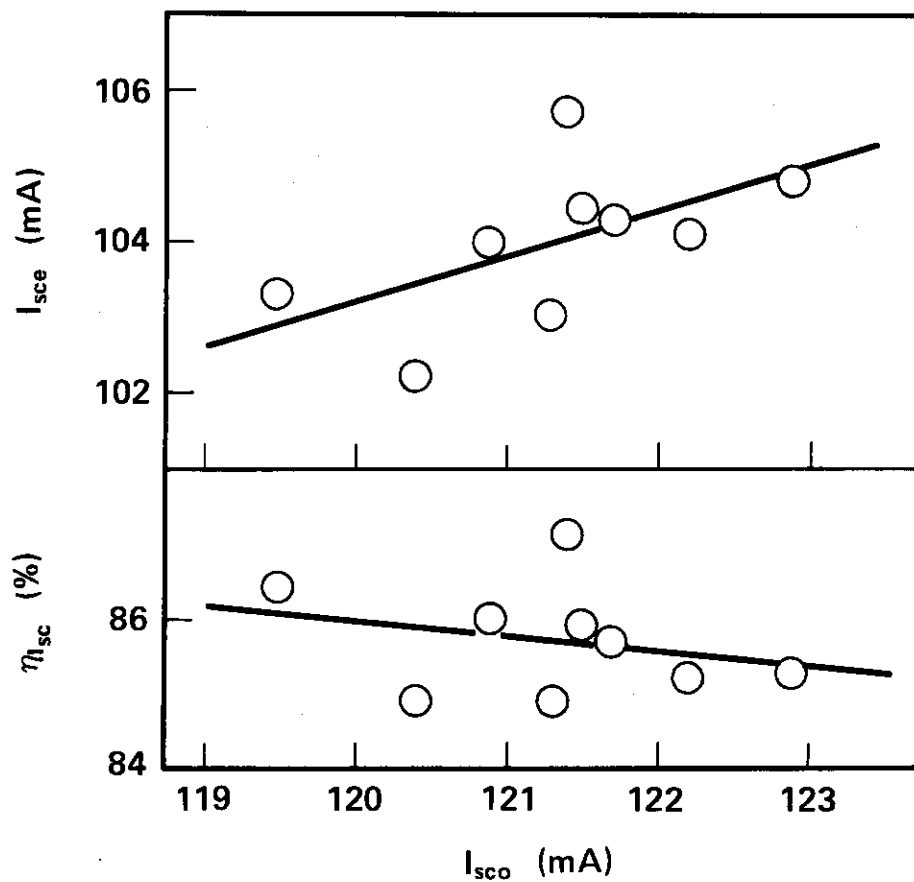


Figure 6. 20 Relation of the short circuit currents of GaAs (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.8.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{sc} : remaining factor of short circuit current.

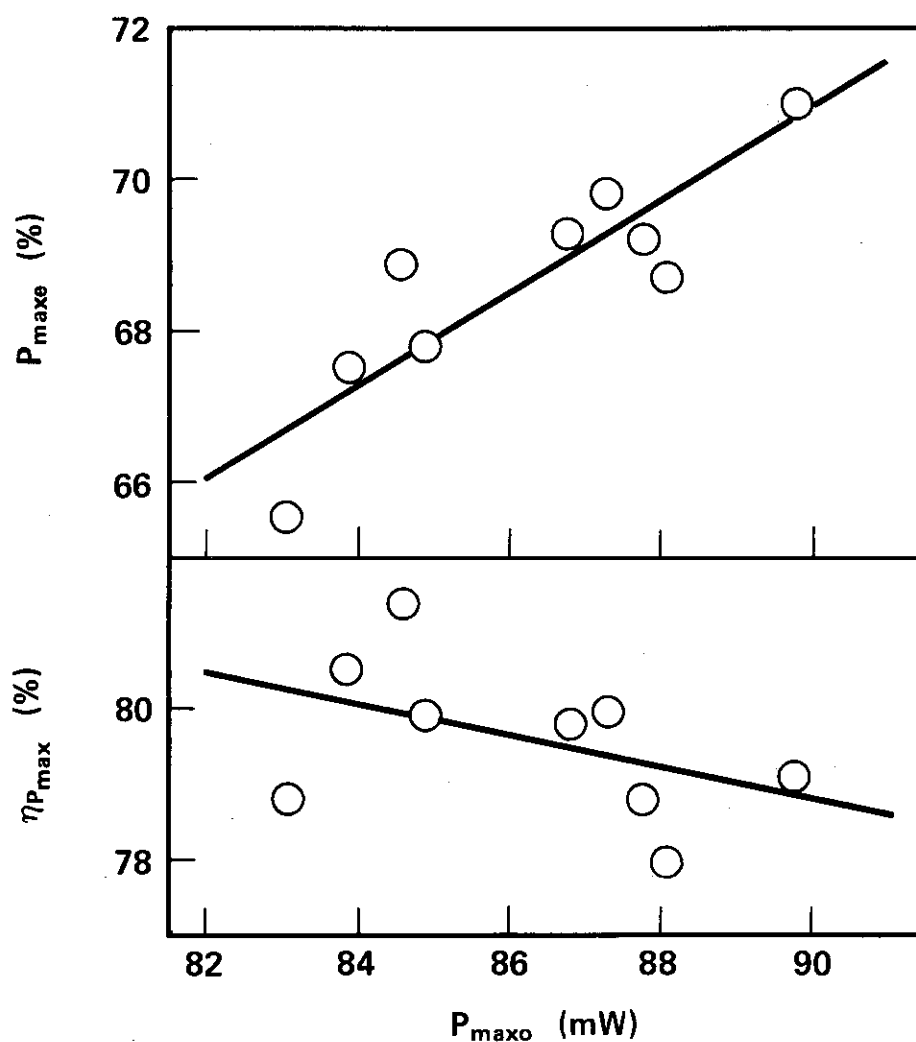


Figure 6. 2 1 Relation of the maximum powers of GaAs (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.8.

P_{maxo} : maximum power before the irradiation.

P_{maxe} : maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\text{max}}}$: remaining factor of maximum power.

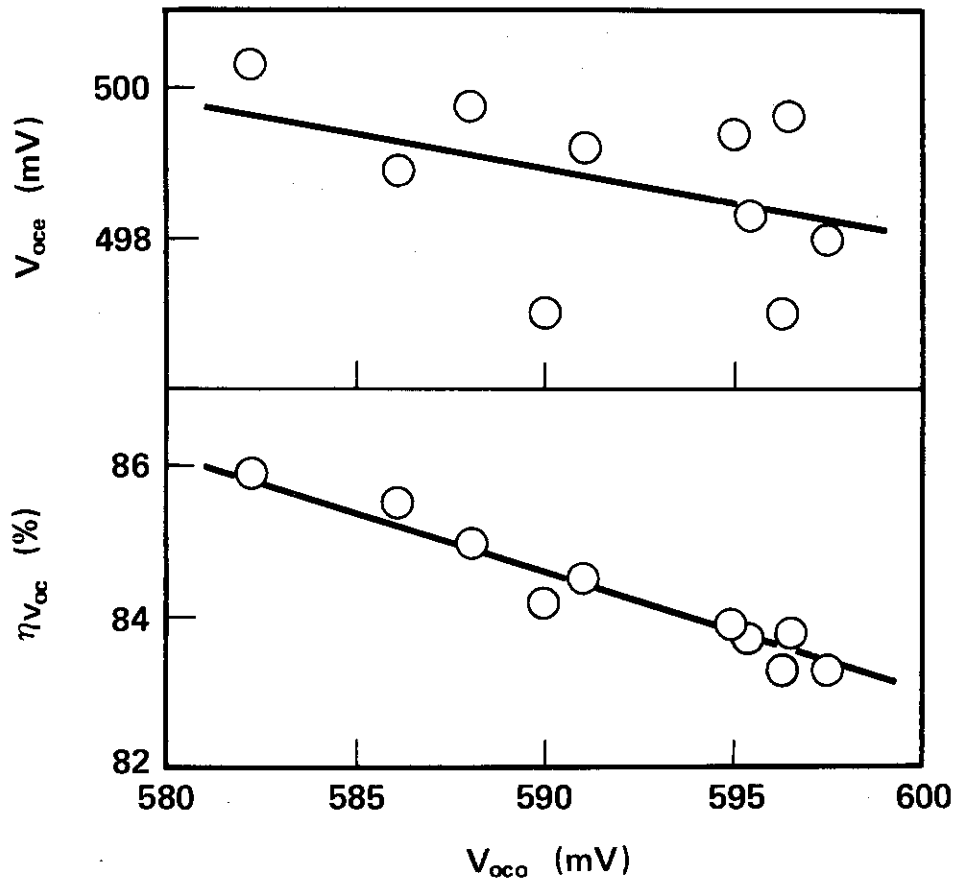


Figure 6. 2 2 Relation of the open circuit voltages of Si-50 (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.9.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oe} : open circuit voltage after the irradiation.

ηV_{oe} : remaining factor of open circuit voltage.

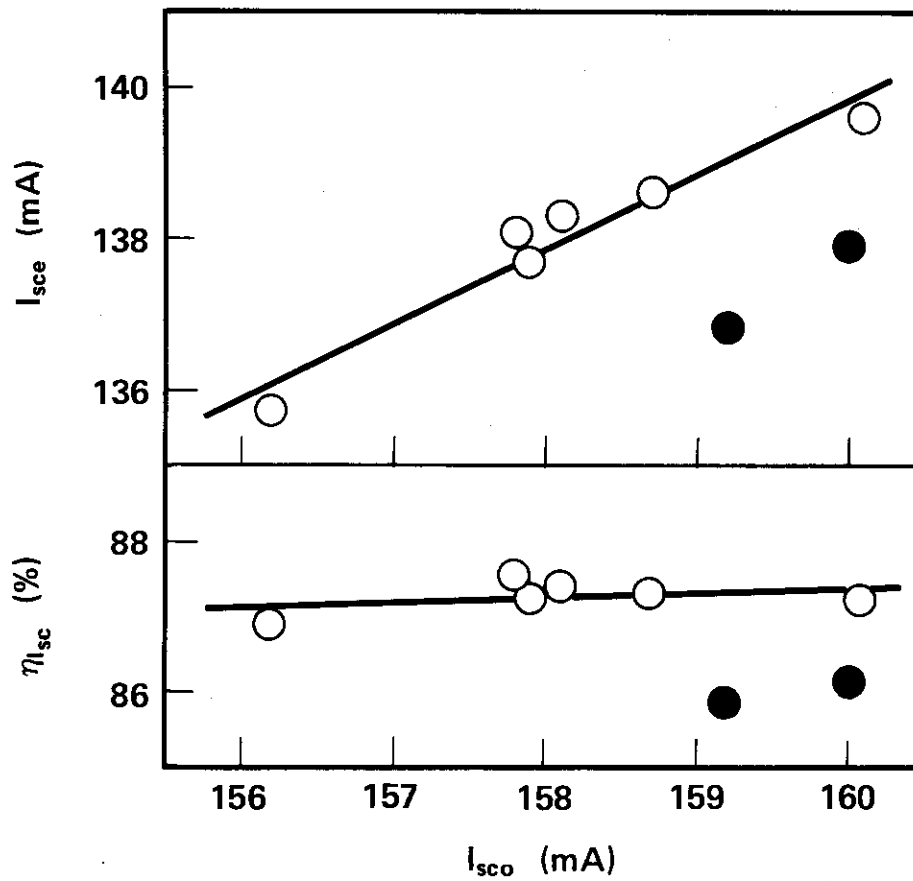


Figure 6. 23 Relation of the short circuit currents of Si-50 (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.9.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{Isc} : remaining factor of short circuit current .

● : plots excluded in the calculation of approximate straight lines.

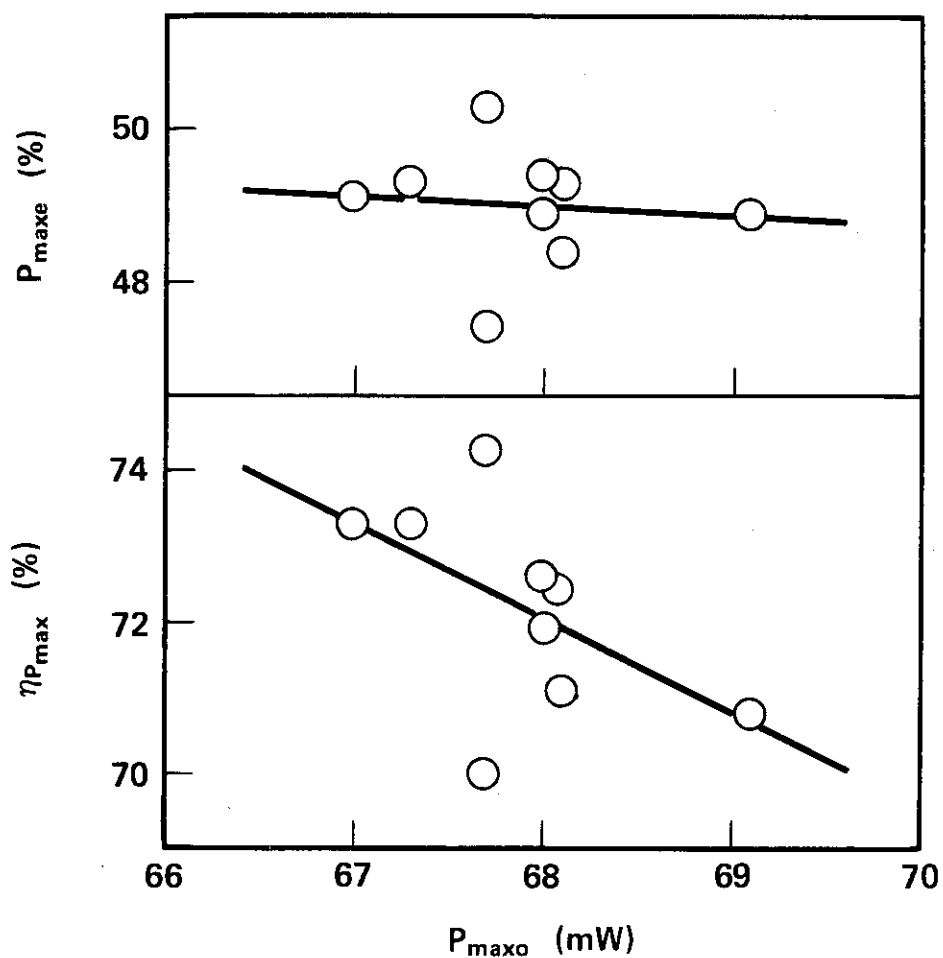


Figure 6. 2 4 Relation of the maximum powers of Si-50 (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.9.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max e}$: maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\max}}$: remaining factor of maximum power.

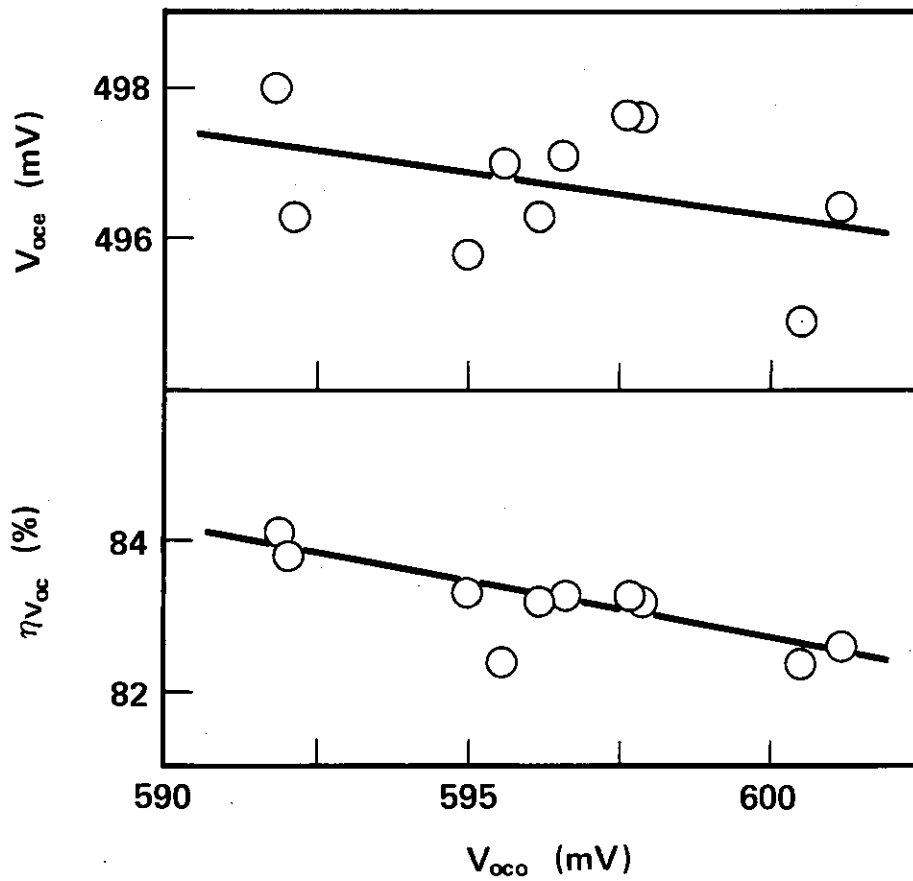


Figure 6. 2 5 Relation of the open circuit voltages of Si-50 (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.10.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oe} : open circuit voltage after the irradiation.

ηV_{oc} : remaining factor of open circuit voltage.

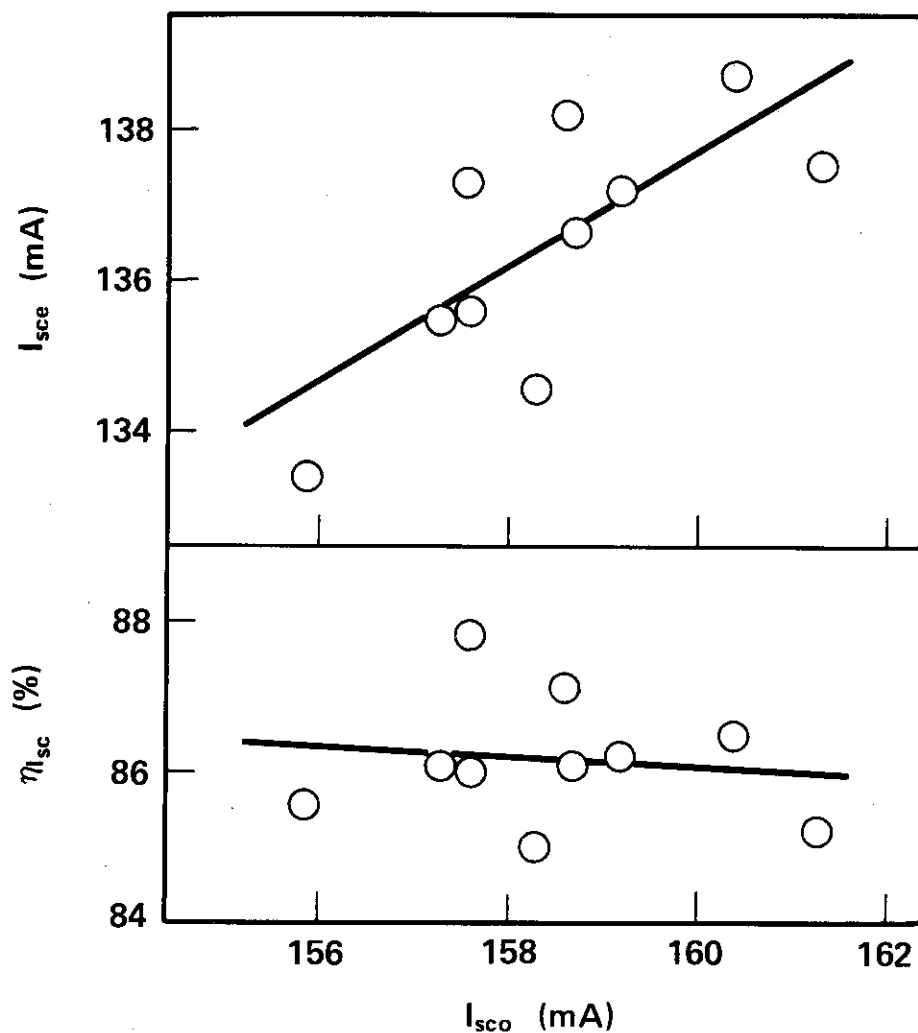


Figure 6. 2 6 Relation of the short circuit currents of Si-50 (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.10.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{isc} : remaining factor of short circuit current.

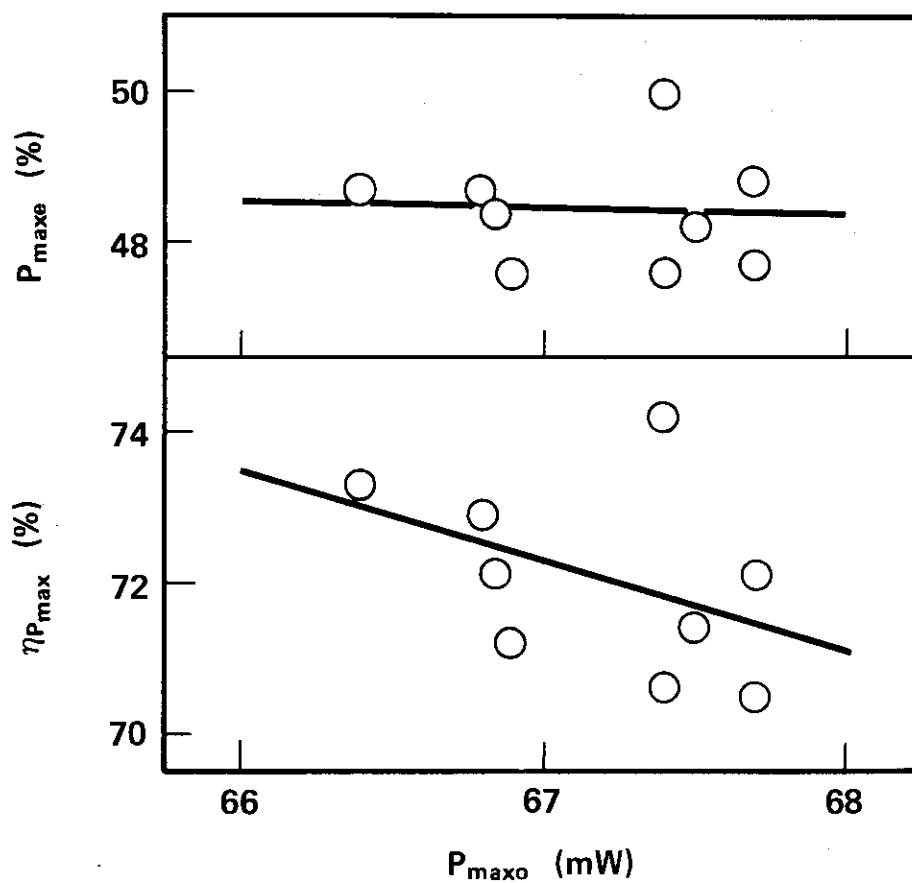


Figure 6. 27 Relation of the maximum powers of Si-50 (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.10.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max e}$: maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\max}}$: remaining factor of maximum power.

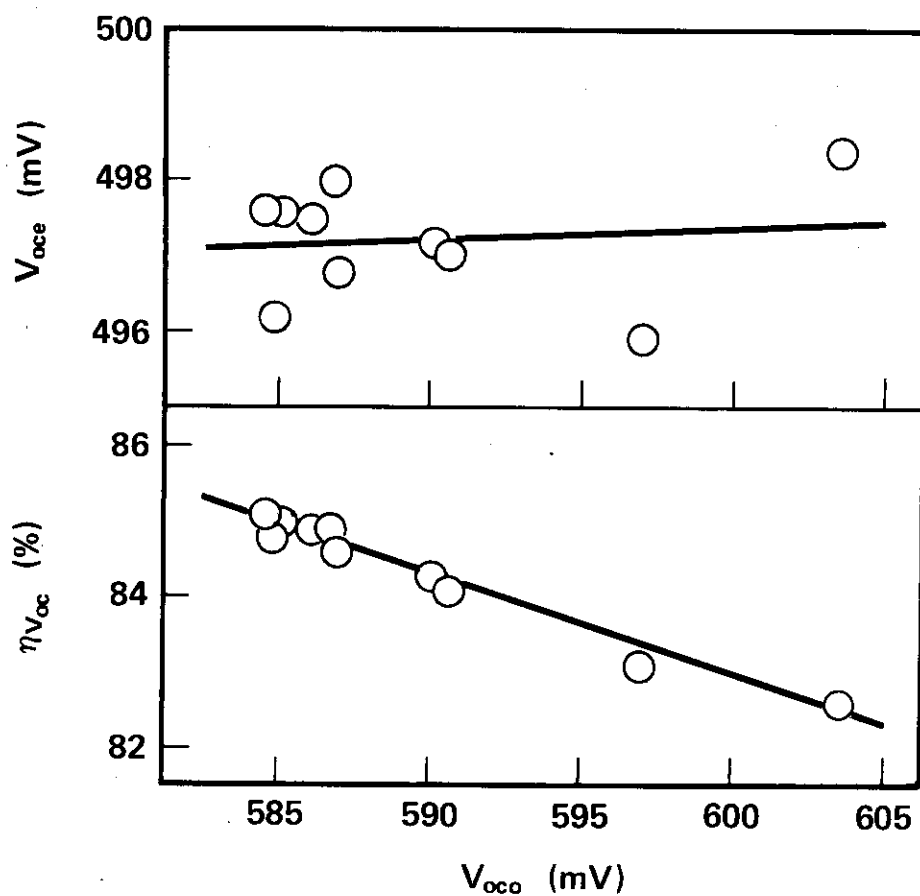


Figure 6. 28 Relation of the open circuit voltages of Si-200 (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 11.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oe} : open circuit voltage after the irradiation.

$\eta_{V_{oc}}$: remaining factor of open circuit voltage.

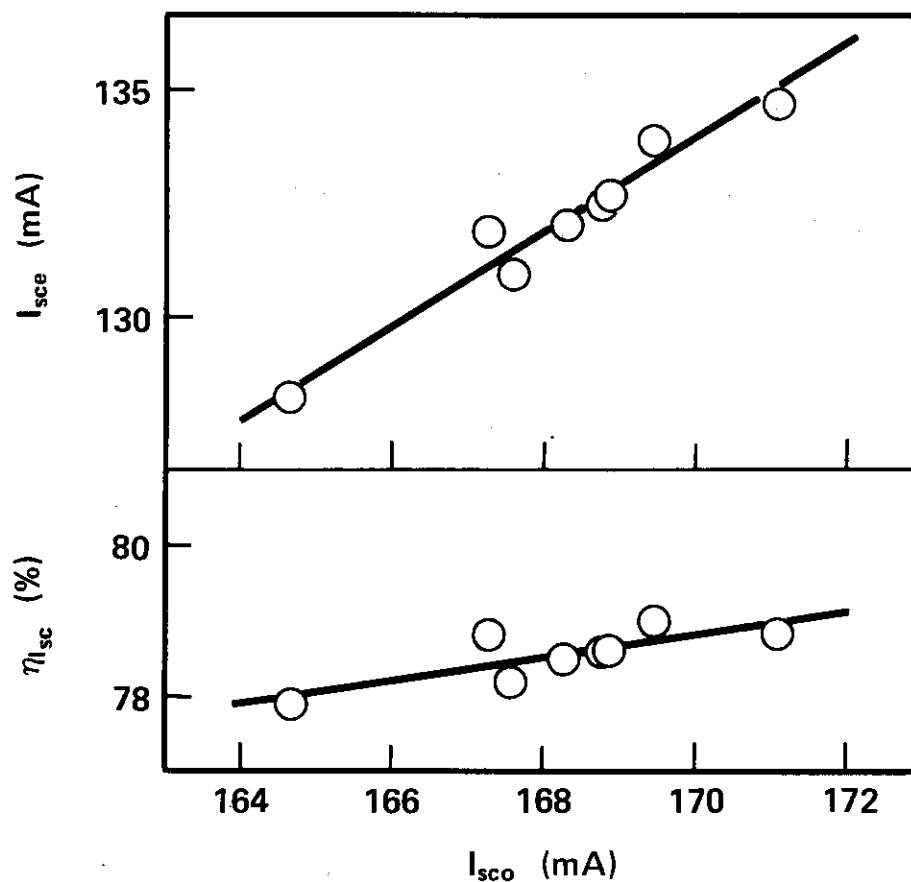


Figure 6. 29 Relation of the short circuit currents of Si-200 (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 11.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{isc} : remaining factor of short circuit current.

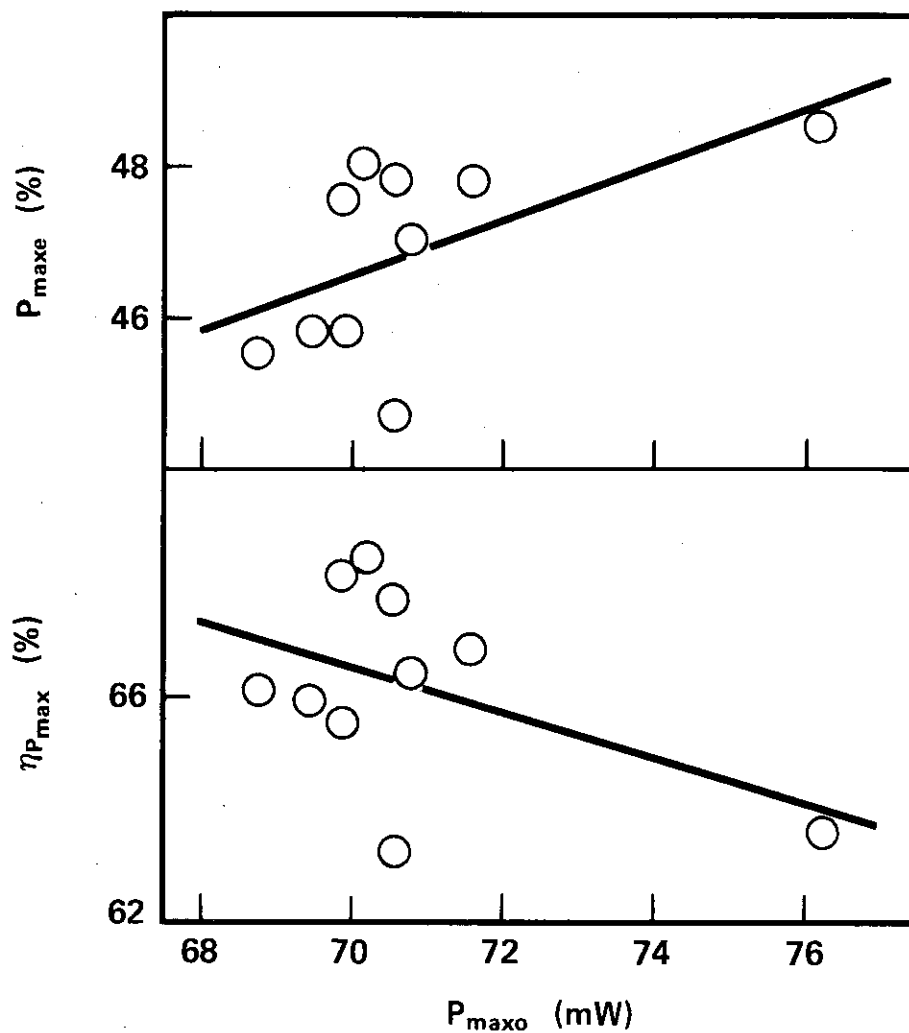


Figure 6. 30 Relation of the maximum powers of Si-200 (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 11.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max e}$: maximum power after the irradiation.

$\eta P_{\max}$: remaining factor of maximum power.

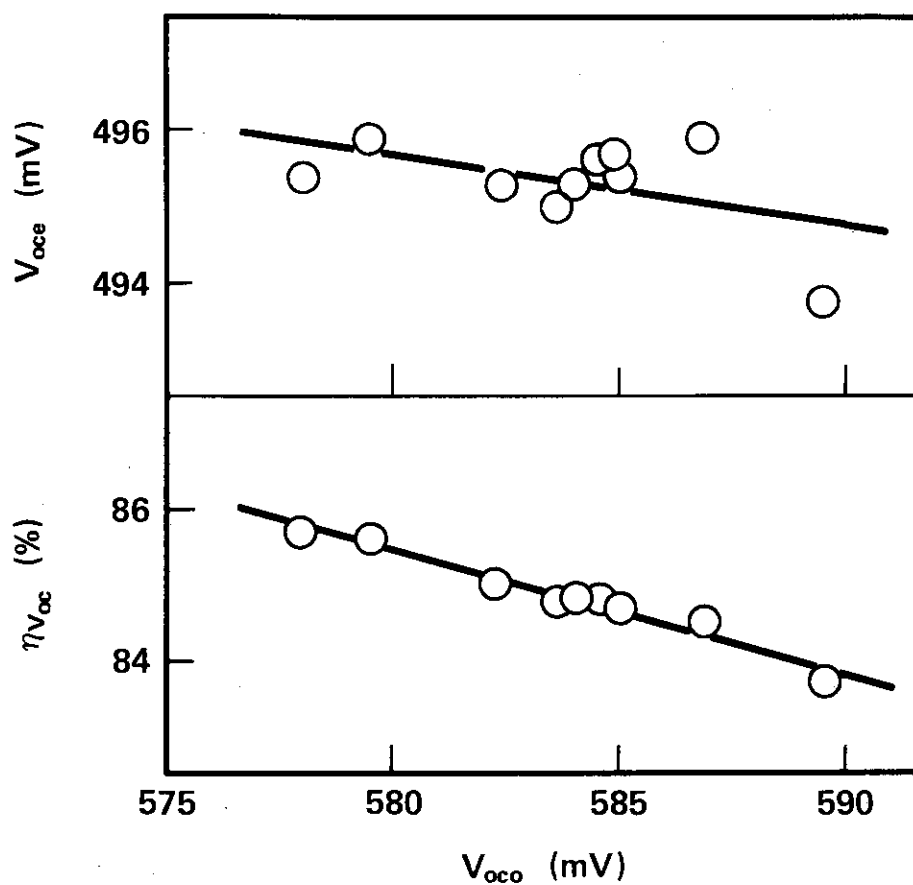


Figure 6. 3 1 Relation of the open circuit voltages of Si-200 (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 12.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oe} : open circuit voltage after the irradiation.

ηV_{oe} : remaining factor of open circuit voltage.

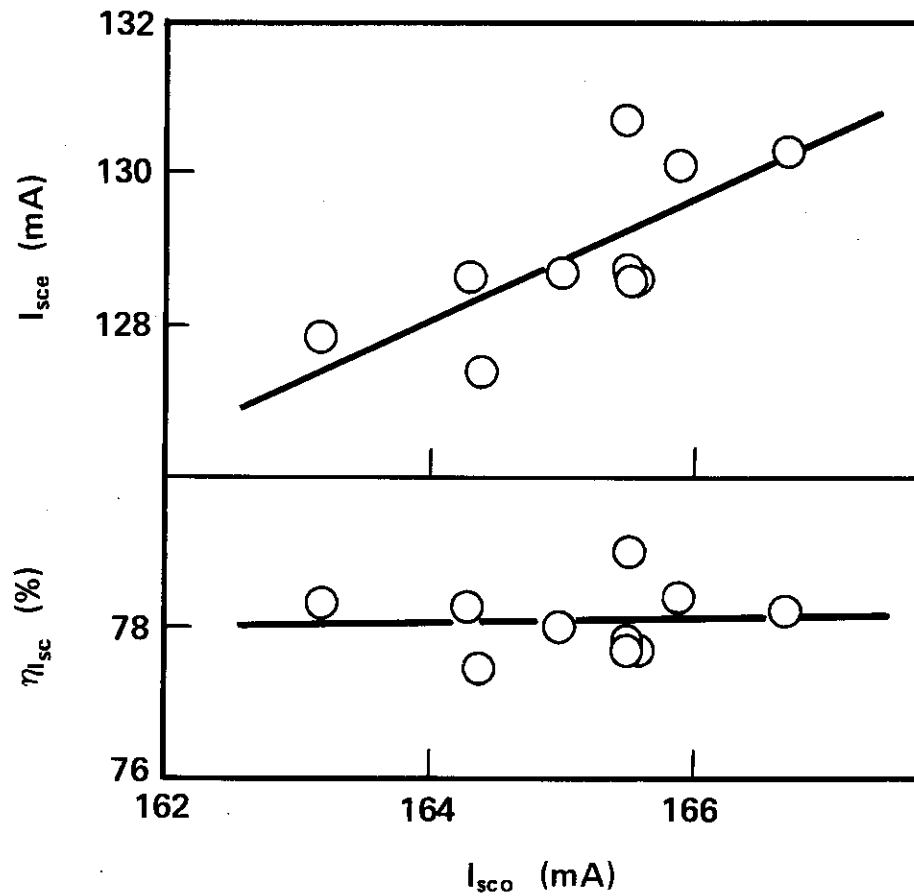


Figure 6. 3 2 Relation of the short circuit currents of Si-200 (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 12.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{sc} : remaining factor of short circuit current.

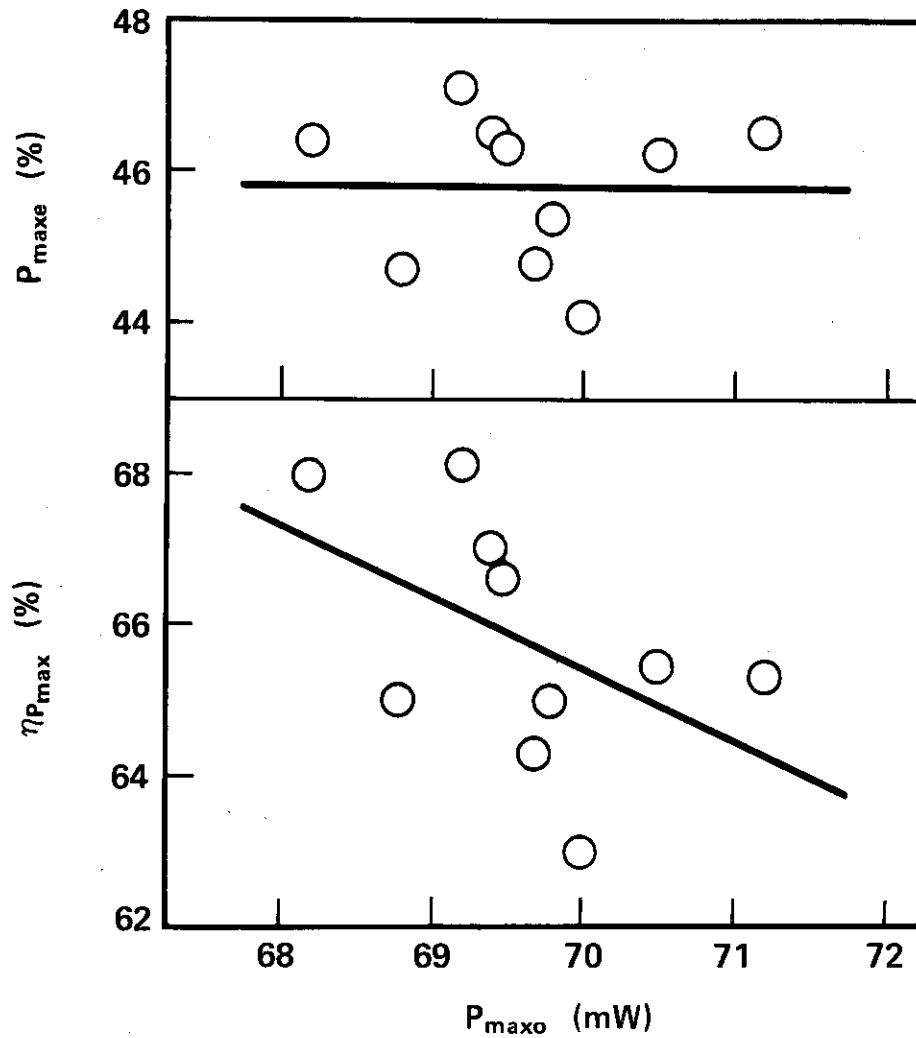


Figure 6. 33 Relation of the maximum powers of Si-200 (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 12.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max}$: maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\max}}$: remaining factor of maximum power.

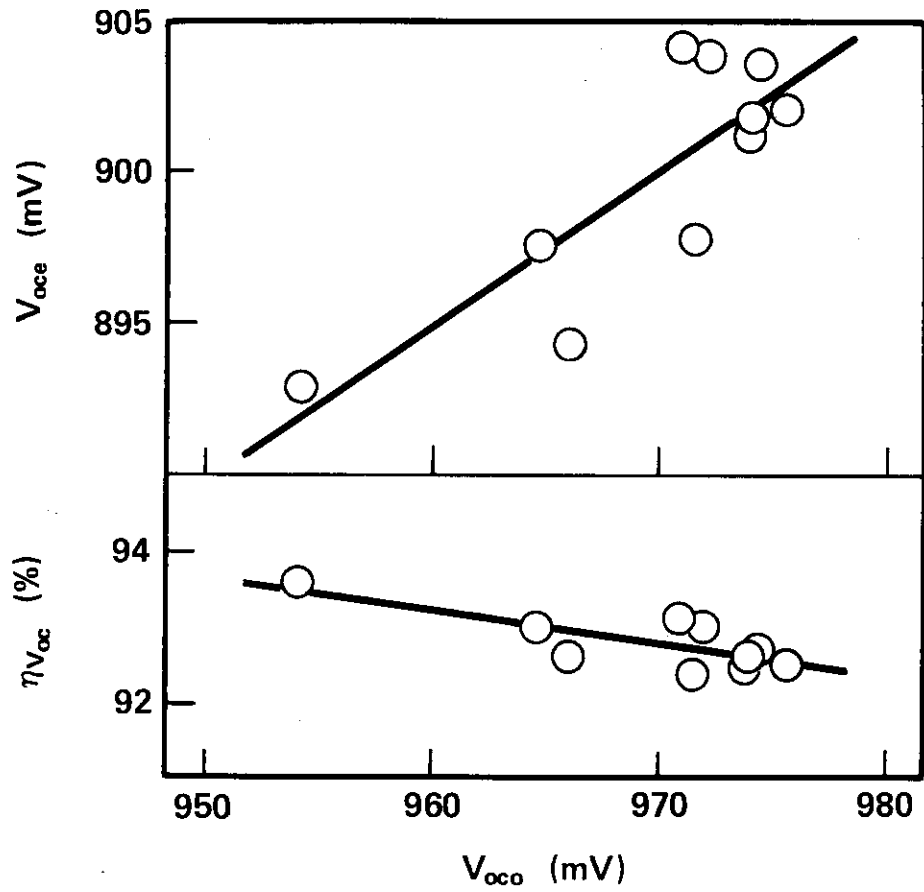


Figure 6. 34 Relation of the open circuit voltages of GaAs (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 13.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oe} : open circuit voltage after the irradiation.

ηV_{oe} : remaining factor of open circuit voltage.

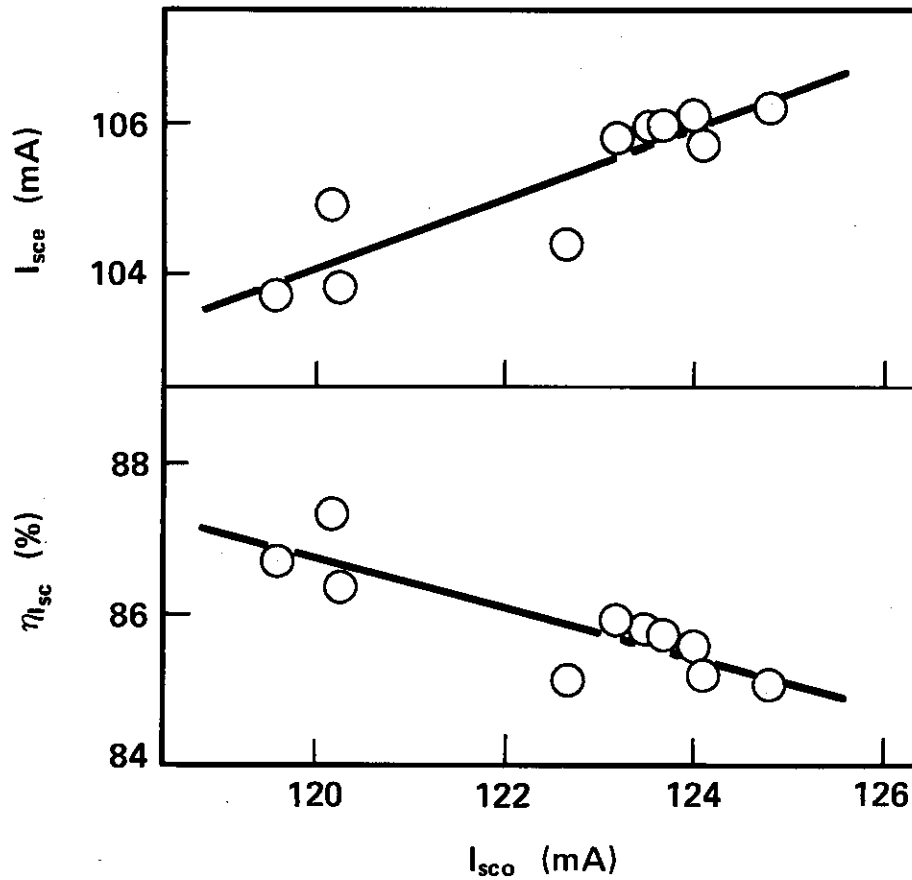


Figure 6. 35 Relation of the short circuit currents of GaAs (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 13.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{sc} : remaining factor of short circuit current.

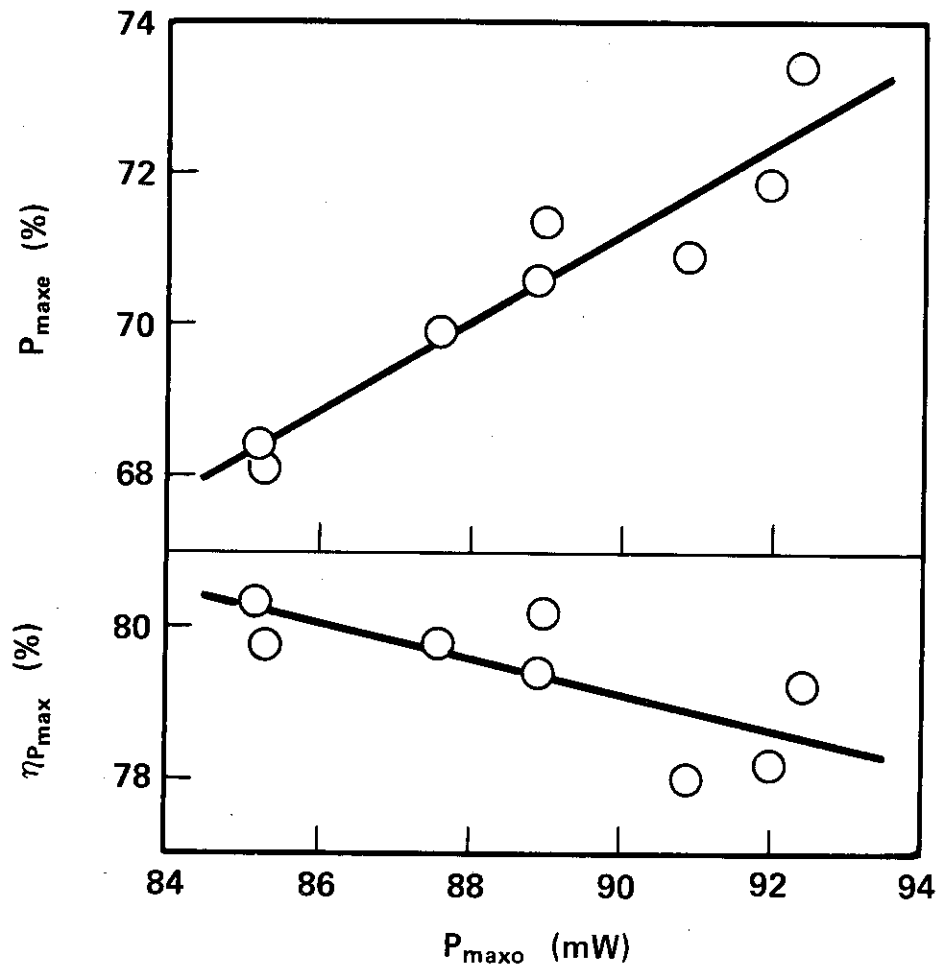


Figure 6. 3 6 Relation of the maximum powers of GaAs (Bare) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 13.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max e}$: maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\max}}$: remaining factor of maximum power.

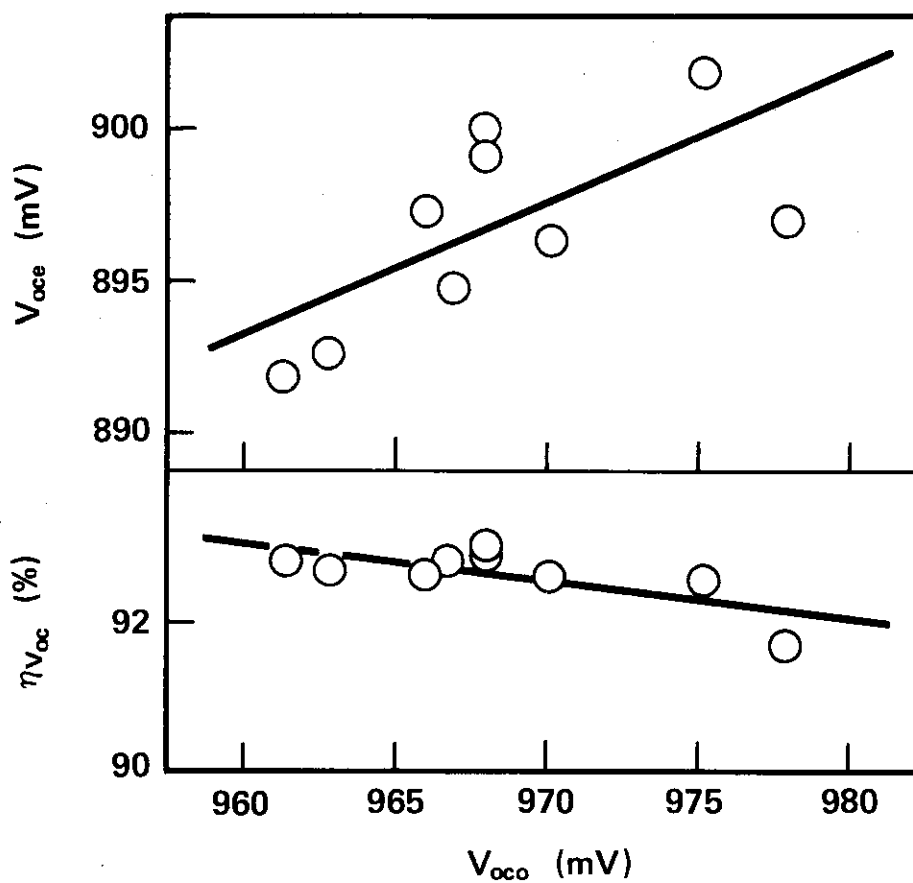


Figure 6. 37 Relation of the open circuit voltages of GaAs (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 14.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oe} : open circuit voltage after the irradiation.

ηV_{oe} : remaining factor of open circuit voltage.

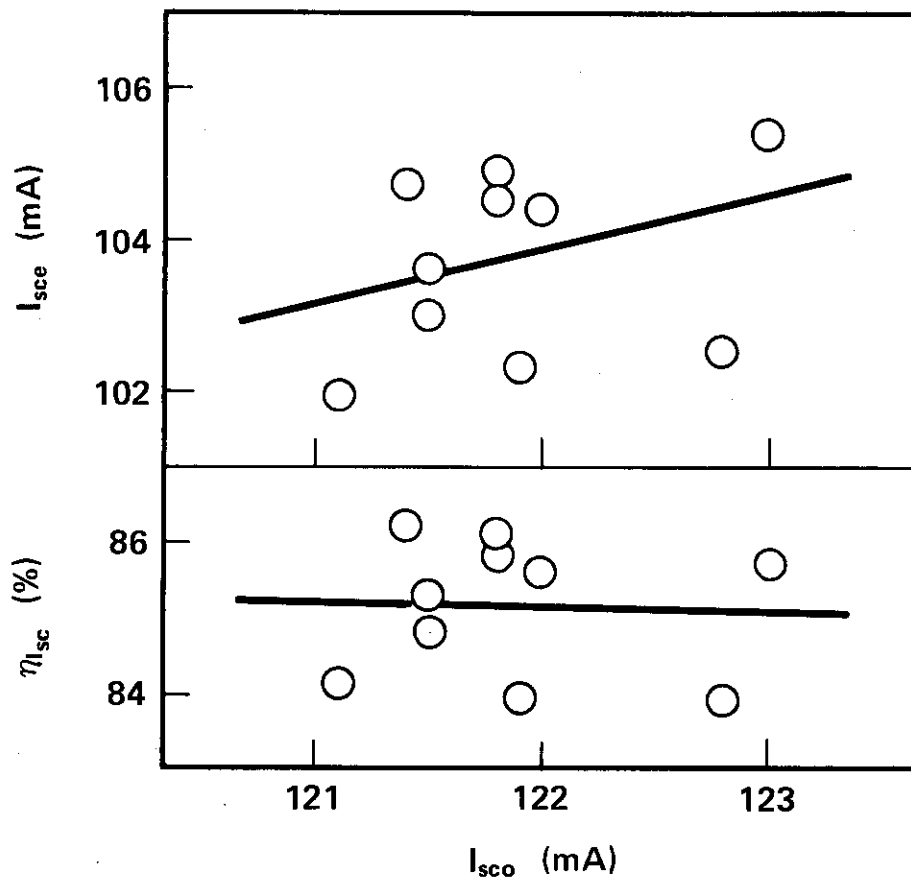


Figure 6. 38 Relation of the short circuit currents of GaAs (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 14.
 I_{sco} : short circuit current before the irradiation.
 I_{sce} : short circuit current after the irradiation.
 η_{isc} : remaining factor of short circuit current.

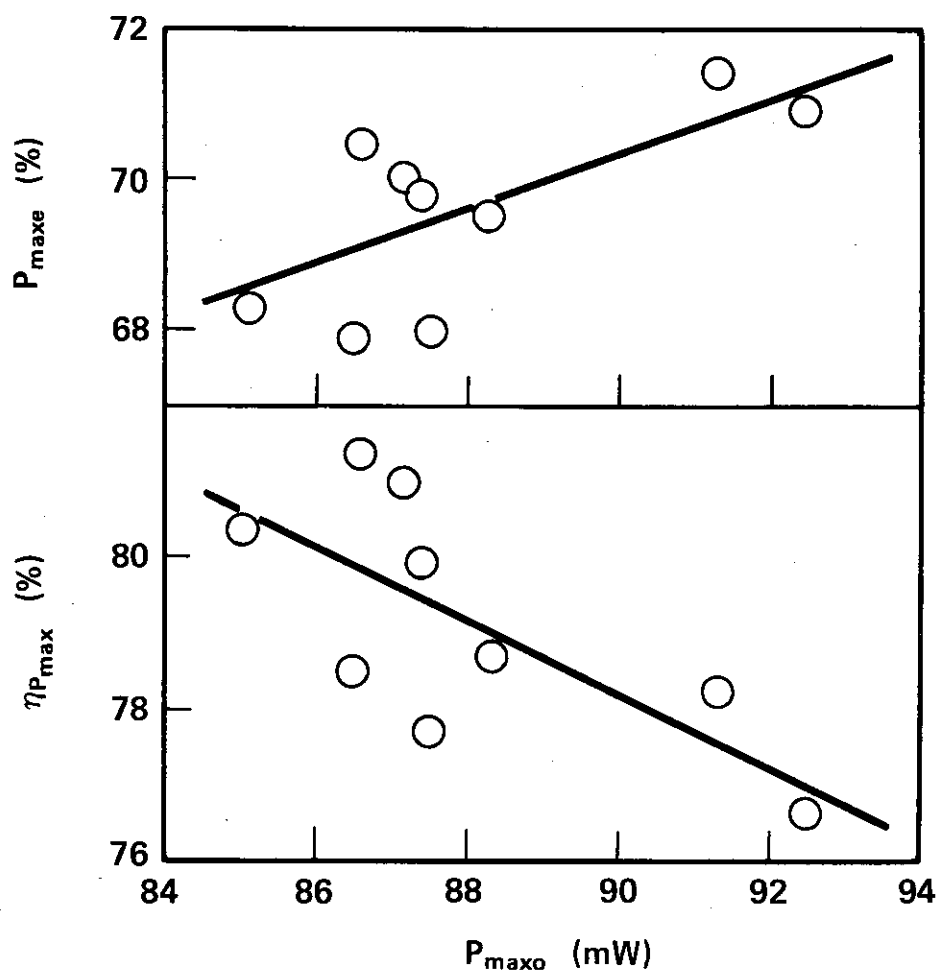


Figure 6. 39 Relation of the maximum powers of GaAs (CG) cell between before and after the irradiation of electron beams by the moving irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 14.

P_{maxo} : maximum power before the irradiation.

P_{maxe} : maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\text{max}}}$: remaining factor of maximum power.

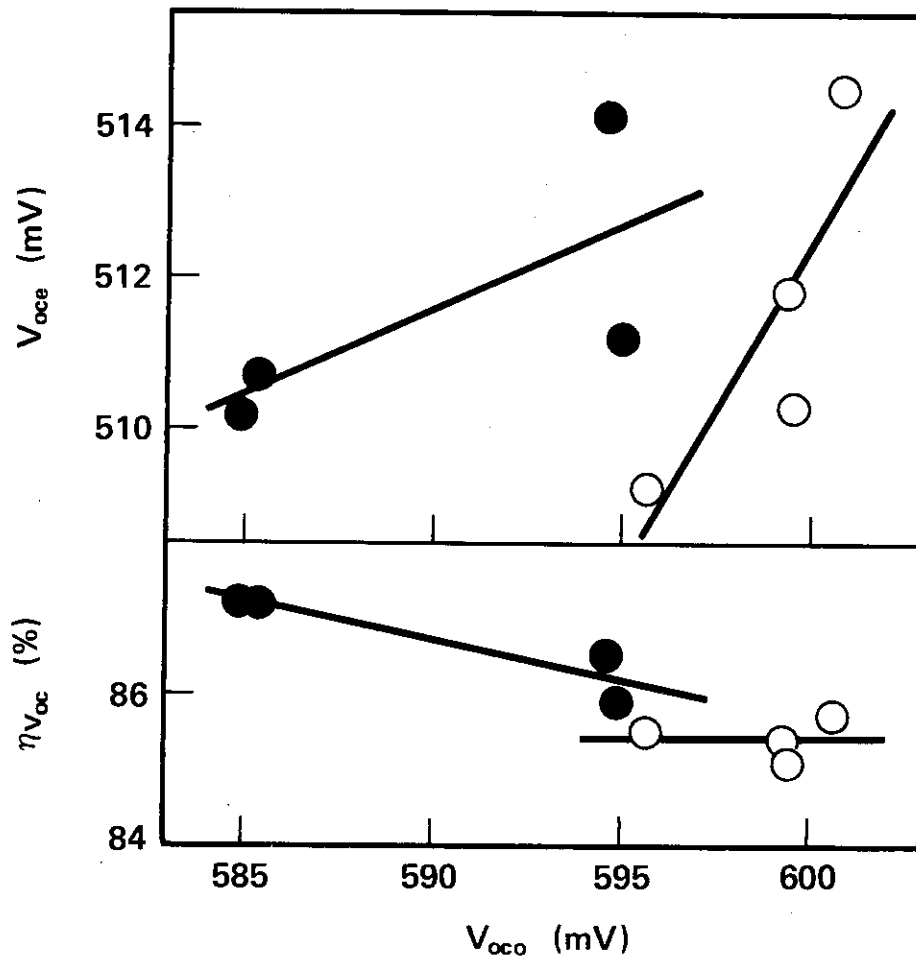


Figure 6. 40 Relation of the open circuit voltages of Si-50 (Bare) cell (●) and Si-50 (CG) cell (○) between before and after the irradiation of electron beams by the spot irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 15.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oca} : open circuit voltage after the irradiation.

η_{Voc} : remaining factor of open circuit voltage.

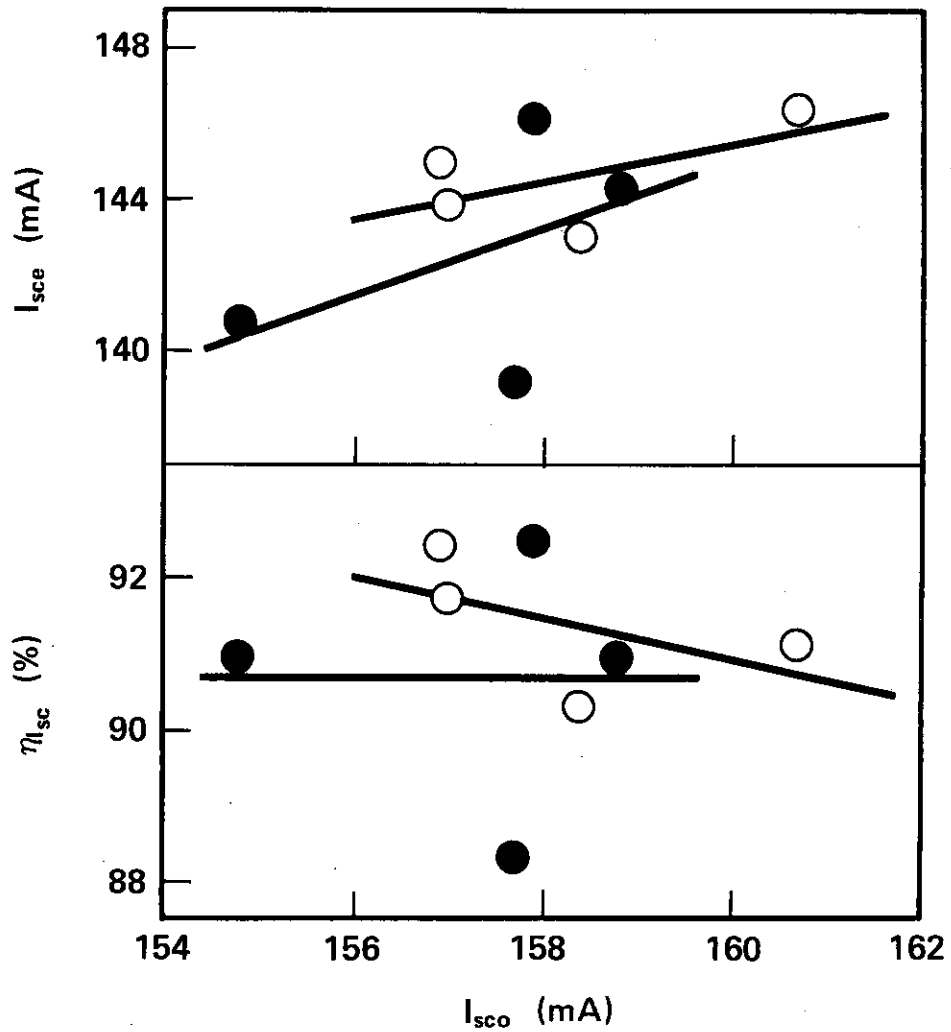


Figure 6.41 Relation of the short circuit current of Si-50 (Bare) cell (●) and Si-50 (CG) cell (○) between before and after the irradiation of electron beams by the spot irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 15.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{isc} : remaining factor of short circuit current.

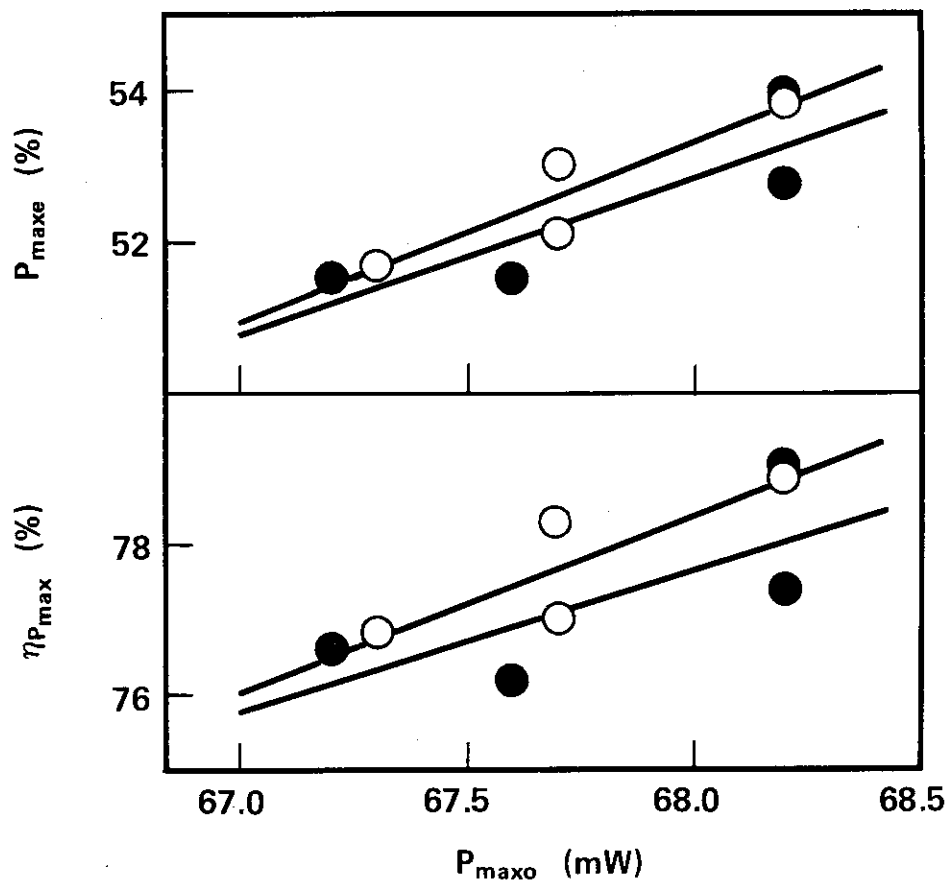


Figure 6.42 Relation of the maximum power current of Si-50 (Bare) cell (●) and Si-50 (CG) cell (○) between before and after the irradiation of electron beams by the spot irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 15.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max}$: maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\max}}$: remaining factor of maximum power.

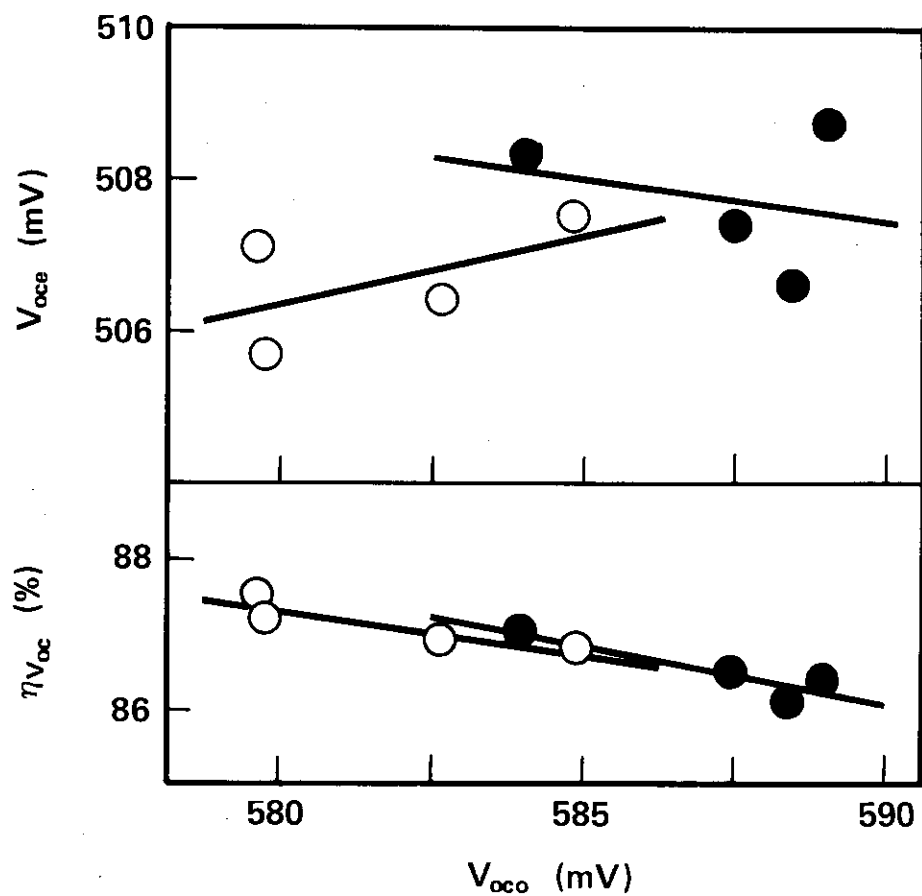


Figure 6. 43 Relation of the open circuit voltages of Si-200 (Bare) cell (●) and Si-50 (CG) cell (○) between before and after the irradiation of electron beams by the spot irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 16.

V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.

V_{oe} : open circuit voltage after the irradiation.

ηV_{oe} : remaining factor of open circuit voltage.

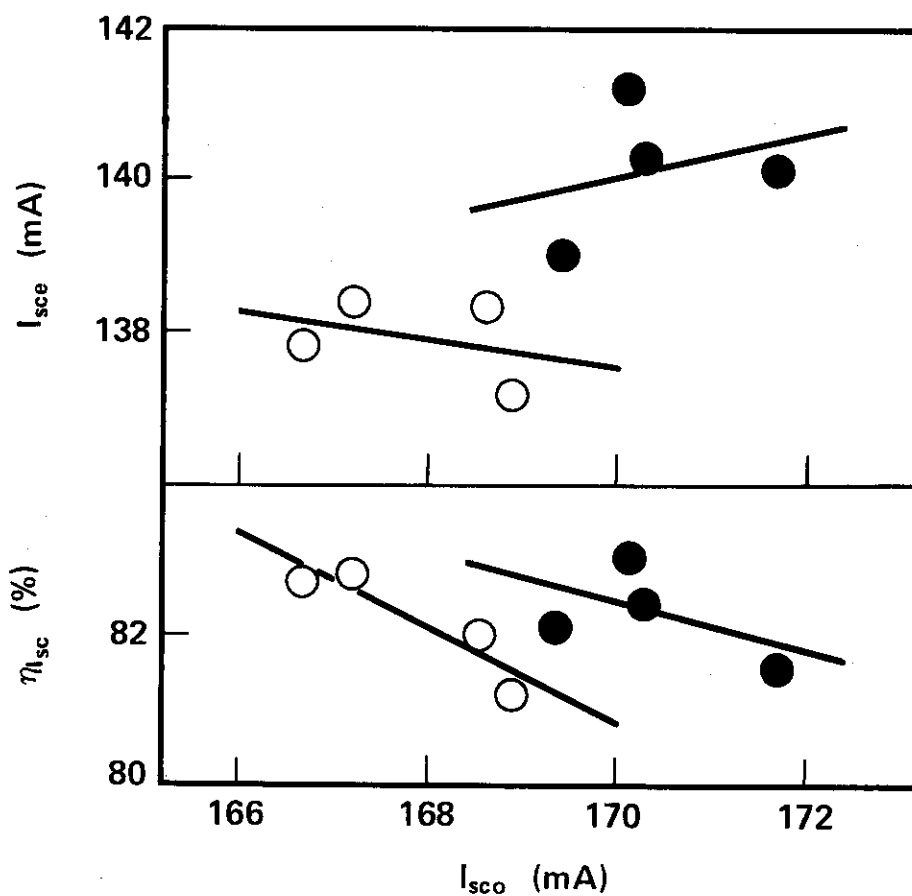


Figure 6. 4.4 Relation of the short circuit current of Si-200 (Bare) cell (●) and Si-50 (CG) cell (○) between before and after the irradiation of electron beams by the spot irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 16.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{isc} : remaining factor of short circuit current.

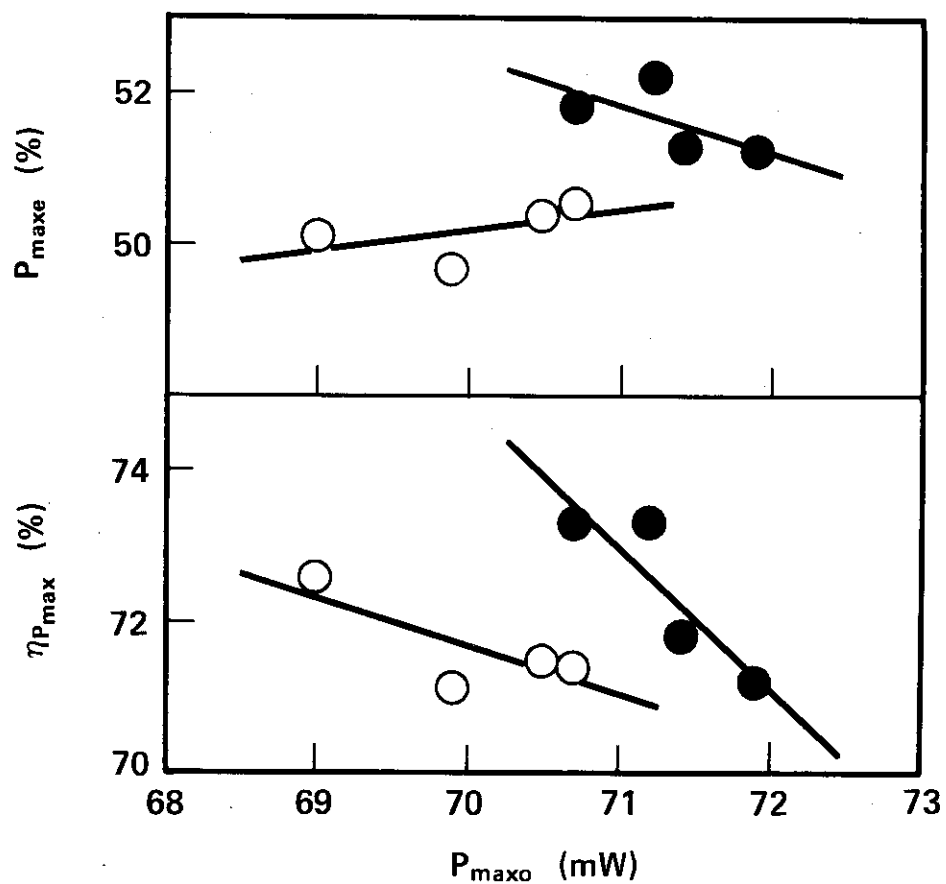


Figure 6.4.5 Relation of the maximum power current of Si-200 (Bare) cell (●) and Si-50 (CG) cell (○) between before and after the irradiation of electron beams by the spot irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 16.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max e}$: maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\max}}$: remaining factor of maximum power.

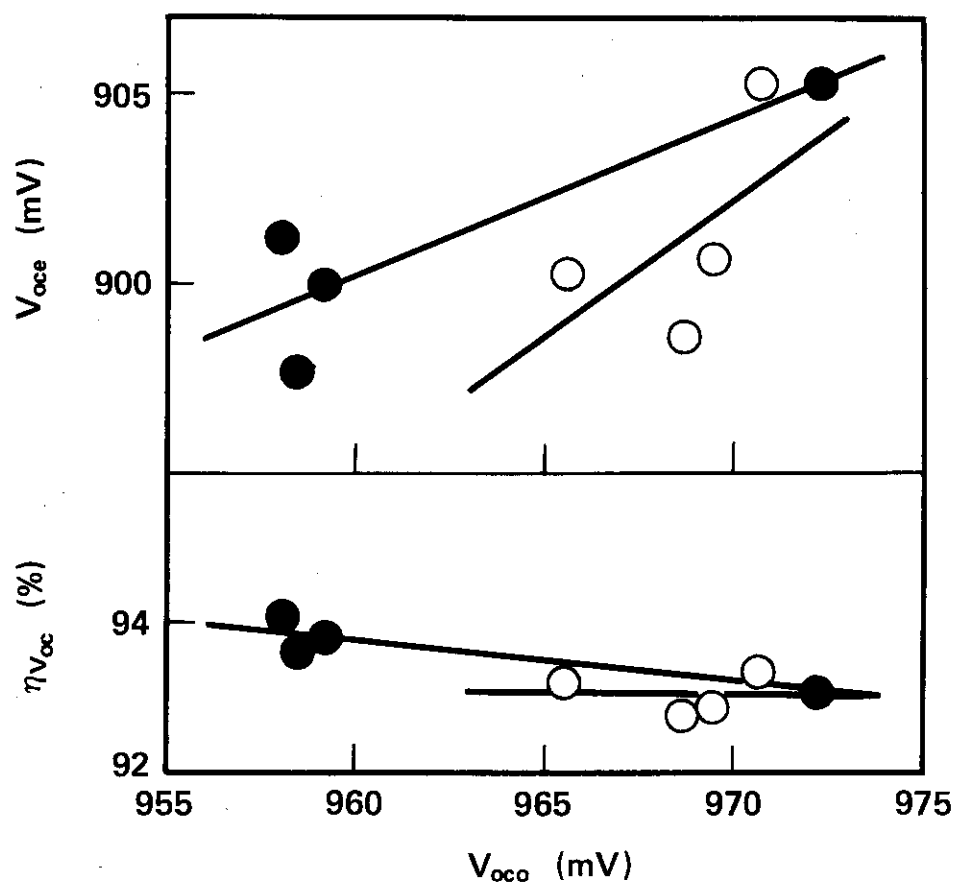


Figure 6.46 Relation of the open circuit voltages of GaAs (Bare) cell (●) and Si-50 (CG) cell (○) between before and after the irradiation of electron beams by the spot irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 17.
 V_{oco} : open circuit voltage before the irradiation.
 V_{oe} : open circuit voltage after the irradiation.
 η_{Voc} : remaining factor of open circuit voltage.

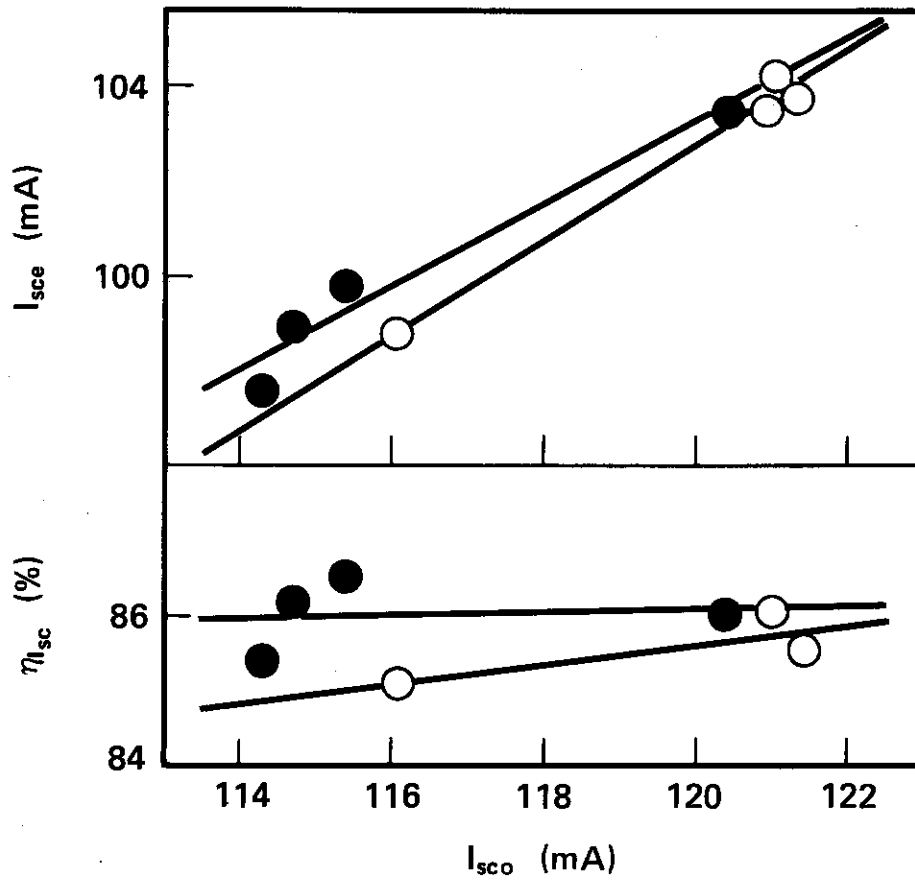


Figure 6. 4 7 Relation of the short circuit current of GaAs (Bare) cell (●) and Si-50 (CG) cell (○) between before and after the irradiation of electron beams by the spot irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 17.

I_{sco} : short circuit current before the irradiation.

I_{sce} : short circuit current after the irradiation.

η_{sc} : remaining factor of short circuit current.

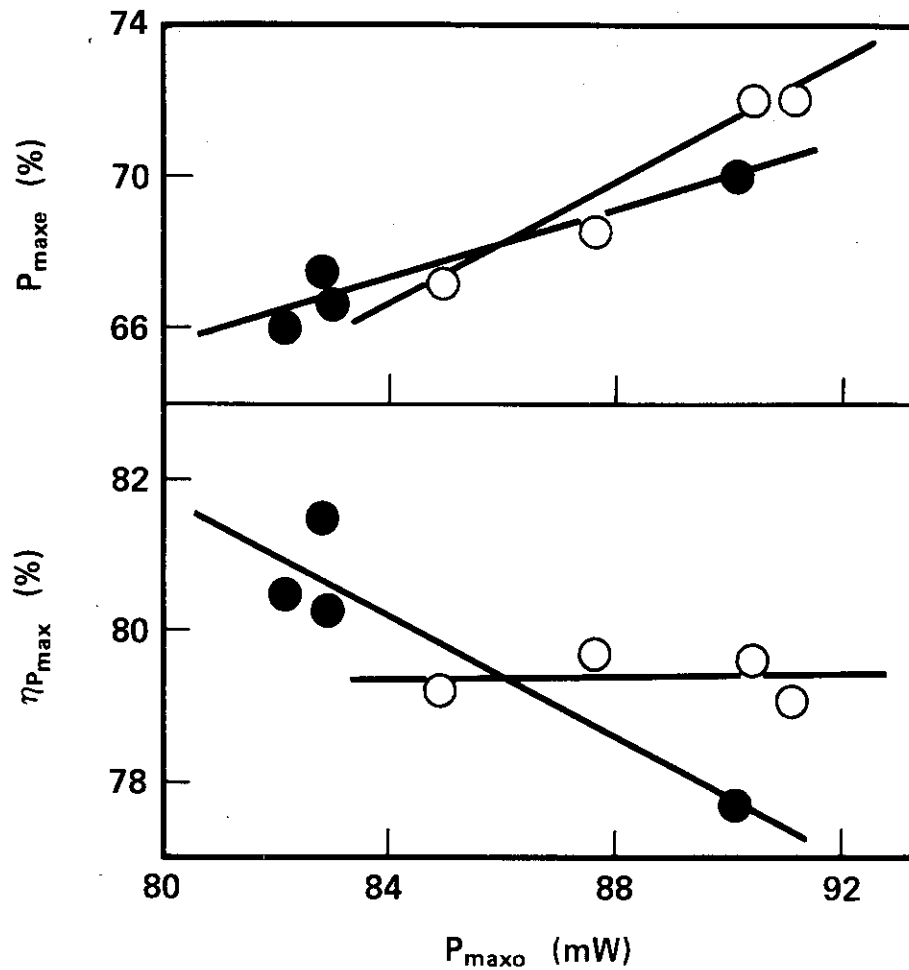


Figure 6. 48 Relation of the maximum power current of GaAs (Bare) cell (●) and Si-50 (CG) cell (○) between before and after the irradiation of electron beams by the spot irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 17.

$P_{\max o}$: maximum power before the irradiation.

$P_{\max e}$: maximum power after the irradiation.

$\eta_{P_{\max}}$: remaining factor of maximum power.

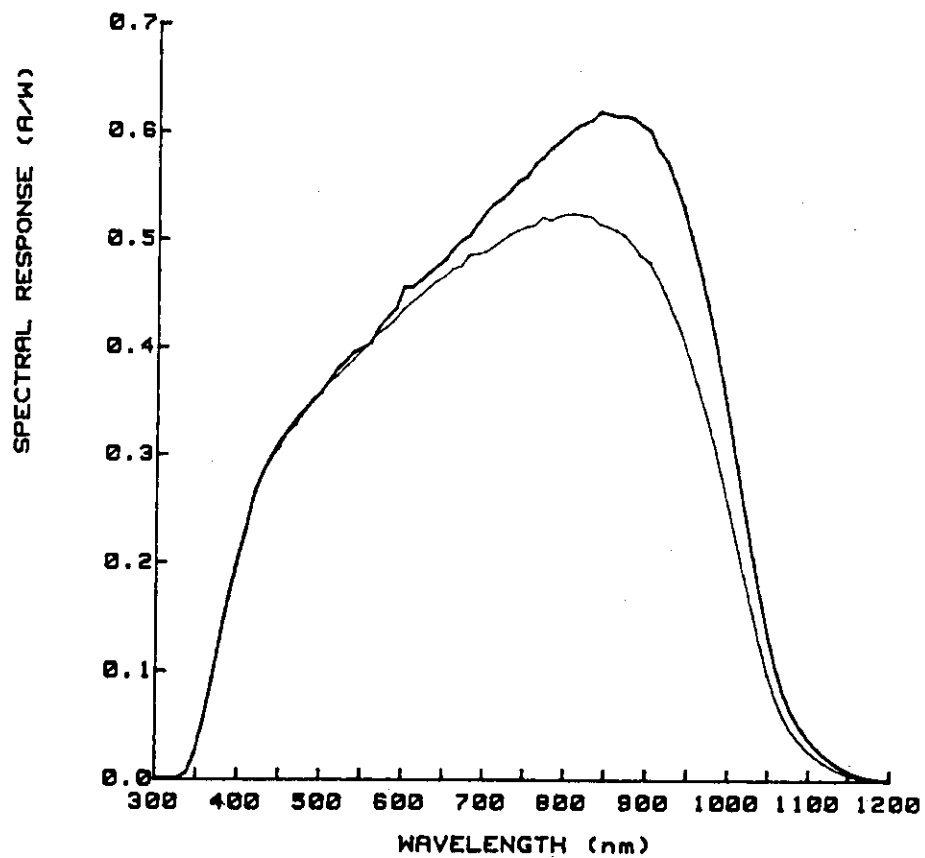


Figure 6. 49 Change in the spectral sensitivity of Si-50 (CG) cell irradiated electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.4.

—: before the irradiation.

- - - : after the irradiation.

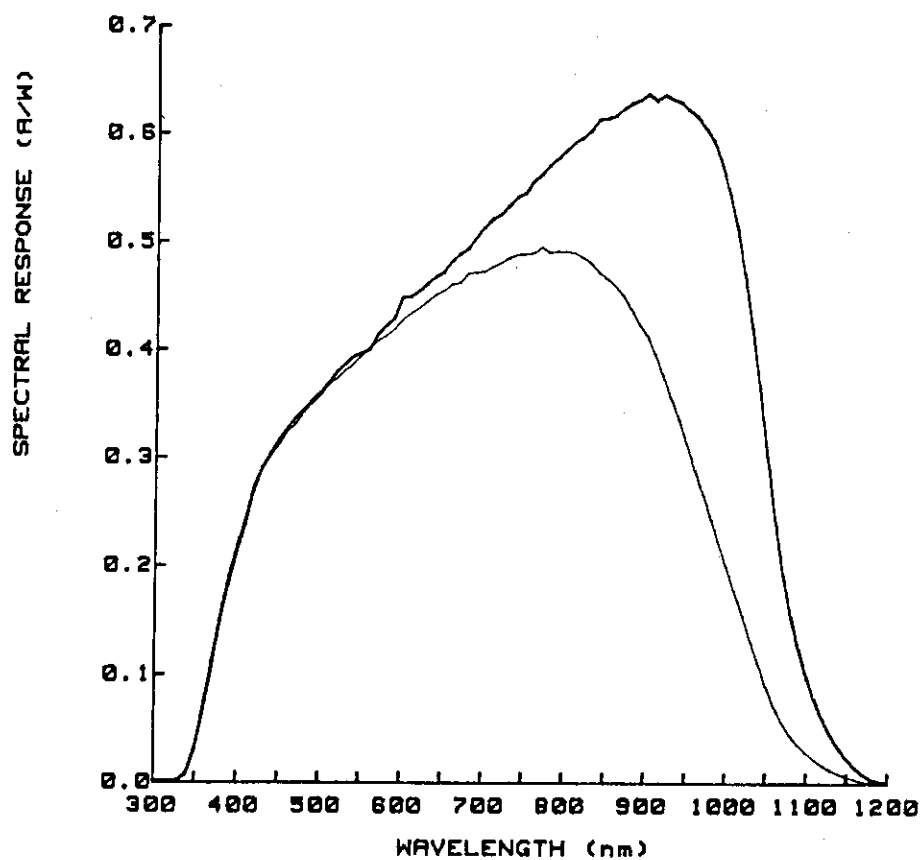


Figure 6. 50 Change in the spectral sensitivity of Si-200 (CG) cell irradiated electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.6.

—: before the irradiation.

- - - : after the irradiation.

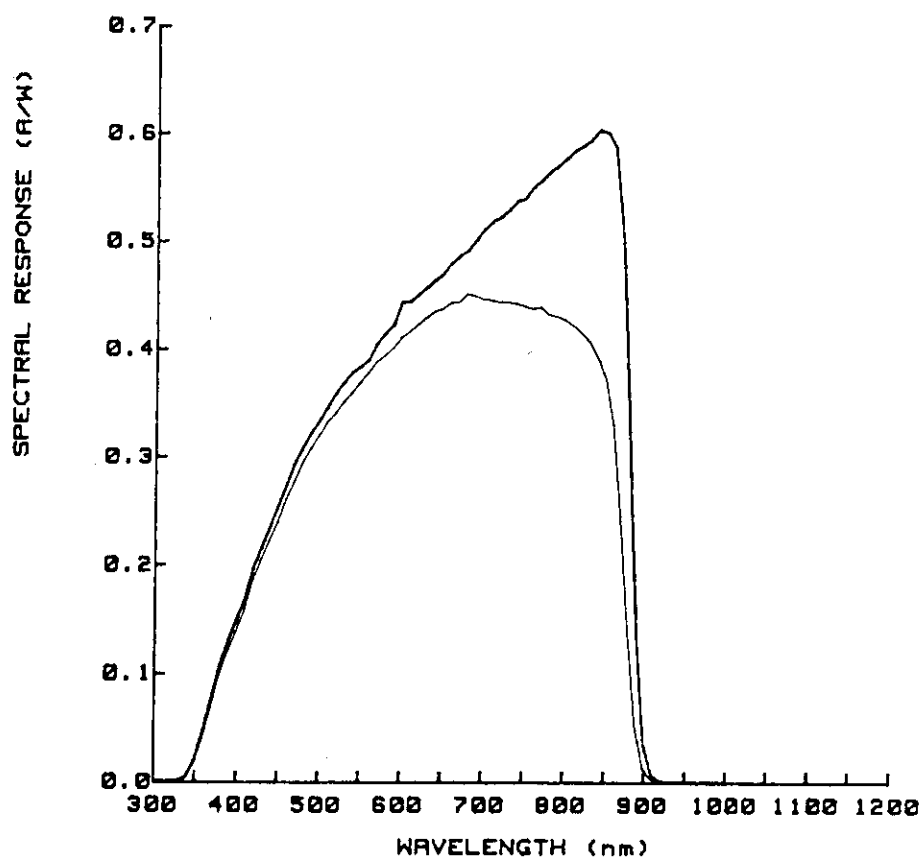


Figure 6. 51 Change in the spectral sensitivity of GaAs (CG) cell irradiated electron beams by the fixed irradiation method

Irradiation conditions are the same as in Table 6.8.

—: before the irradiation.

- - - : after the irradiation.

7. 結 言

本報告では、先ず、人工衛星用太陽電池が遭遇する宇宙の放射線環境を地磁気捕捉電子線と陽子線を中心に明らかにし、これらの放射線による太陽電池の損傷を地上において評価するための損傷等価 1 MeV 電子フルエンスの概念を説明した。次いで、原研と NASA が実施した共同研究「半導体素子の放射線劣化に関する研究」における太陽電池の耐放射線性の研究において使用した太陽電池、電子線と γ 線の照射装置と照射方法、および太陽電池の電気特性の測定方法について記載した。最後に、原研と NASA の共同研究において実施した電子線照射方法の検討結果について報告した。

照射方法の検討に関する研究では、50 μm 厚のシリコン薄型太陽電池 (Si-50セル)、200 μm 厚のシリコン太陽電池 (Si-200 セル)、および280 μm 厚の砒化ガリウム太陽電池 (Ga As セル) を用いて、固定照射法 (静止試料に走査ビームを照射する方法)、移動照射法 (移動する試料に走査ビームを照射する方法)、およびスポット照射法 (静止試料に無走査ビームを照射する方法) の3種の電子線照射方法を比較検討した。その結果、宇宙用太陽電池の耐放射線性評価試験には、固定照射法が最も妥当な電子線照射方法であると結論した。

さらに、宇宙用太陽電池の重要な電気特性、開放電圧 (V_{oc})、短絡電流 (I_{sc})、および最大出力 (P_{max}) の電子線照射による特性低下について、詳細に検討した。その結果、これらの電気特性は、電子線照射前の値すなわち初期値が大きい程、電子線照射後の値が大きく、保存率が低下することを明らかにした。従って、宇宙用太陽電池の耐放射線性の評価には、これらの電気特性の基準値を設定し、それぞれの照射条件における初期値と電子線照射後の電気特性保存率の関係を求め、基準値に対応する電気特性保存率を推算して比較する必要があると結論した。

また、上記の3種の電子線照射方法の検討結果から、次のような知見を得た。

- (1) 曲線因子 (FF) は、電子線の照射によって変化しないと結論できる。
- (2) V_{oc} 、 I_{sc} 、および P_{max} の電子線照射による特性保存率は、150 μm 厚のカバーガラスによってほとんど影響を受けないと結論できる。
- (3) この研究の範囲では、Ga As セル、Si-50セル、Si-200 セルの順に耐放射線性が低下する。
- (4) 上記の3種の電子線照射方法を比較すると、スポット照射法、固定照射法、移動照

射法の順に電気特性の低下が大きくなる。この原因について、フルエンス率、フルエンス、照射中の試料温度などの照射条件の観点から考察したが、明確な結論は得られなかった。

謝 辞

宇宙科学研究所の後川昭雄教授には、日本原子力研究所と宇宙開発事業団の共同研究「半導体素子の放射線劣化に関する研究」において、多大の御支援を頂き、また有益な御討論をして頂いたことを感謝致します。また、シャープ株式会社電子事業本部太陽電池事業部および三菱電機株式会社北伊丹製作所パワーデバイス部の皆様には、太陽電池の製造を担当して頂き、また研究に必要な情報を提供して頂いたことに感謝致します。さらに、株式会社エイ・イー・エス部品グループの永吉慶時部品主任技術者、小綿光喜部品グループリーダー、佐藤正剛業務主任、久保田栄氏、豊田久氏をはじめ株式会社エイ・イー・エスの方々には、太陽電池の照射実験の準備作業や電気特性の測定に御尽力頂いたことに多大の謝辞を呈します。

引用文献

1. H. Y. Tada, J. R. Carter, Jr., B. E. Anspaugh, and R. G. Downing: JPL Publication 82-69 "Solar Cell Radiation Handbook Third Edition", NASA-JPL, Pasadena, Cal., U.S.A. (Nov. 1, 1982).
2. 「共同研究成果報告書：半導体素子の放射線劣化に関する研究（その1）[1/2]，[2/2]」，日本原子力研究所・宇宙開発事業団（Mar., 1985）.
3. 「共同研究成果報告書：半導体素子の放射線劣化に関する研究（その2）[1/3]，[2/3]」，日本原子力研究所・宇宙開発事業団（Mar., 1986）.
4. 「共同研究成果報告書：半導体素子の放射線劣化に関する研究（その3）[太陽電池セル編]」，日本原子力研究所・宇宙開発事業団（Mar., 1987）.
5. 「共同研究成果報告書：半導体素子の放射線劣化に関する研究（その4）[太陽電池セル編]」，日本原子力研究所・宇宙開発事業団（Mar., 1988）.
6. 松田純夫：「人工衛星用太陽電池セルの開発成果」，「宇宙開発事業団技術成果発表会（第1回）前刷集」，宇宙開発事業団，p. 115（May 16, 1985）.
7. S. Matsuda, M. Tsuji, M. Mitsui, R. Tanaka, and H. Sunaga: "Radiation Damage in GaAs and Ultrathin Si Solar Cells", ESA SP-267 (Proc. 5th Eur. Symp. 'Photovoltaic Generators in Space', Scheveningen, Netherlands, Sep. 30-Oct. 2, 1986), 433 (Nov., 1986).
8. T. Tamura, S. Matsuda, M. Tsuji, H. Mitsui, R. Tanaka, and H. Sunaga: "Relative Damage Coefficients of Electrons for GaAs Solar Cells", Tech. Digest Int. PVSEC-3 (3rd Int. Photovoltaic Sci. and Eng. Conf.), Tokyo, Jpn, 203 (Nov. 3-6, 1987).
9. 桜井邦朋：「SEM研究会報告（3）：第1章 太陽活動と地球環境」，理化学研究所宇宙線研究室，東京，p. 1（1981）.
10. 河野毅：「SEM研究会報告（3）：第1章B 衛星環境と放射線」，理化学研究所宇宙線研究室，東京，p. 22（1981）.
11. Ref. 1, "Chap. 5 The Space Radiation Environment", p. 5-1.
12. 後川昭雄，高橋慶治：「太陽光発電（高橋清，浜川圭弘，後川昭雄 編著）：第3編 太陽電池の応用 第12章 宇宙用太陽電池電源」，森北出版，東京，p. 371

(1982).

13. "Monthly Report of Meteorological Satellite Center", Meteorological Satellite Center, Kiyose, Tokyo.
14. 「昭和 58 年度 宇宙開発事業団委託業務成果報告書：半導体デバイスに関する放射線の研究（その 5）」, 日本電子部品信頼性センター, 東京, p. 15 (Mar., 1984).
15. Ref. 1, "Chap. 6 Solar Array Degradation Calculation", p. 6-1.
16. M. J. Teague and J. I. Vette: "The Inner Zone Electron Model AE-5", NASA, NSSDC 72-10 (1972).
17. M. J. Teague, K. W. Chan, and J. I. Vette: "AE6: A Model Environment of Trapped Electrons for Solar Maximum", NASA, NSSDC/WDC-A-R&D 76-04 (1976).
18. H. K. Hills, K. W. Chan, M. J. Teague, and J. I. Vette: to be published (Ref. 11, 15).
19. E. G. Stassinopoulos: "The Geostationary Radiation Environment", J. Spacecraft and Rocket, 17, 145 (1980).
20. D. M. Sawyer and J. I. Vette: "AP8: Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum", NSSDC/WDC-A-R & D 76-06 (1976).
21. Ref. 1, "Chap. 3 Radiation Effects, 3.3 The Concept of Damage Equivalence", p. 3-21.
22. Ref. 1, "Chap. 3 Radiation Effects, 3.6 Effect of Proton Energy on Solar Cell Degradation", p. 3-26.
23. S. Matsuda, A. Suzuki, T. Hirano, T. Matsutani, Y. Kiyota, and T. Saga: "The Development of Silicon Solar Cells for Space Application", Proc. 13th Int. Symp. on Space Tech. and Sci., Tokyo, Jpn., 719 (1982).
24. S. Matsuda, T. Hirano, T. Matsutani, Y. Kiyota, T. Saga, Y. Uchida, and Y. Sato: "Radiation Test of Silicon Solar Cells for Space Application", Jpn. J. Appl. Phys., 21, Suppl. 21-22 (Proc. 3rd Photovoltaic Sci. and Eng. Conf. in Jpn, 1982), 19 (1982).
25. T. Matsutani, T. Saga, H. Ueyama, Y. Hagihara, T. Hirano, and A. Suzuki: "Ultrathin Silicon Solar Cell for Space Application", Jpn. J. Appl. Phys.,

- 21, Suppl.21-22 (Proc. 3rd Photovoltaic Sci. and Eng. Conf. in Jpn, 1982), 23 (1982).
26. 松田純夫, 鈴木皓夫, 平野泰三, 松谷寿信, 佐賀達男, 清田吉春: 「人工衛星用シリコン太陽電池セルの開発」, 昭和58年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 3-277 (1983).
27. S. Matsuda, T. Matsutani, T. Saga, T. Hirano, and A. Suzuki: "Thin and Ultrathin Silicon Solar Cells for Space Use", 4th Eur. Symp. Photovoltaic Generators in Space, Cannes, France, 1 (Sep. 18-20, 1984).
28. S. Matsuda, T. Matsutani, T. Saga, and A. Suzuki: "Development of Ultrathin Si Solar Cells", Proc. 17th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Kissimmee, Florida, U.S.A., 123 (May 1-4, 1984).
29. Y. Tonomura, Y. Hagihara, T. Matsutani, T. Saga, T. Hirano, A. Suzuki, and S. Matsuda: "Improved Antireflective Coating for Ultrathin Silicon Solar Cells", Tech. Digest Int. PVSEC-1 (Proc. 1st Int. Photovoltaic Sci. and Eng. Conf.), Kobe, Jpn, 461 (Nov. 13-16, 1984).
30. H. Ueyama, T. Matsutani, T. Saga, T. Hirano, Y. Kiyota, A. Suzuki, and S. Matsuda: "Characteristics of Ultrathin Silicon Solar Cells", Proc. 1st Photovoltaic Sci. and Eng. Conf., Kobe, Jpn, 825 (Nov. 13-16, 1984).
31. H. Uneyama, Y. Tonomura, T. Saga, T. Matsutani, and Suzuki: "Evaluation of Materials and Structure of Silicon Space Solar Cells", Technical Digest of the International PVSEC-3 (Proc. 3rd Int. Photovoltaic Sci. and Eng. Conf.) Tokyo, Jpn, 645 (Nov. 3 - 6, 1987).
32. S. Yoshida, K. Mitsui, T. Oda, T. Sogo, and K. Shirahata: "High Efficiency $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{-As-GaAs}$ Solar Cells with High Open-Circuit Voltage and High Fill Factor", Jpn. J. Appl. Phys., 19, Suppl. 19-1 (Proc. 11th Conf. (1979 Int.) on Solid State Devices, Tokyo, Jpn, 1979) 563 (1980).
33. S. Matsuda, S. Yoshida, M. Otsuda, K. Teramoto, and A. Kawakami: "Space Qualified AlGaAs/GaAs Solar Cells", 4th Eur. Symp. Photovoltaic Generators in Space, Cannes, France (Sep. 18-20, 1984).
34. S. Yoshida, K. Mitsui, T. Oda, M. Kato, Y. Yukimoto and S. Matsuda: "Liquid

- Phase Epitaxy Technology of Large Area AlGaAs/GaAs Wafers of GaAs Solar Cells for Space Applications", Proc. 17th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Kissimmee, Florida, U.S.A., 42 (May 1-4, 1984).
35. S. Matsuda, M. Otoda, K. Mitsui, M. Kato, S. Hokuyo, and S. Yoshida: "Development of AlGaAs/GaAs Solar Cells with Space Qualifications", Proc. 17th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Kissimmee, Florida, U.S.A., 97 (May 1-4, 1984).
 36. K. Mitsui, S. Yoshida, T. Oda, M. Kato, Y. Yukimoto, and S. Matsuda: "A High Quality AR Coating for AlGaAs/GaAs Solar Cells", Proc. 17th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Kissimmee, Florida, U.S.A., 106 (May 1-4, 1984).
 37. K. Mitsui, M. Kato, S. Yoshida, Y. Yukimoto, and S. Matsuda: "Radiation Damage in GaAs and Si Solar Cells due to Electrons", Tech. Digest Int. PVSEC-1 (Proc. 1st Int. Photovoltaic Sci. and Eng. Conf.), Kobe, Jpn, 473 (Nov. 13-16, 1984).
 38. S. Matsuda, S. Yoshida, M. Otoda, S. Hokuyo, K. Teramoto, and A. Kawakami: "Space Qualified AlGaAs/GaAs Solar Cells", Tech. Digest Int. PVSEC-1 (Proc. 1st Int. Photovoltaic Sci. and Eng. Conf.), Kobe, Jpn, 829 (Nov. 13-16, 1984).
 39. M. Kato, K. Mitsui, S. Yoshida, K. Yamagami, and S. Matsuda: "Radiation Damage in GaAs and Si Solar Cells due to Protons", Tech. Digest Int. PVSEC-1 (Proc. 1st Int. Photovoltaic Sci. and Eng. Conf.), Kobe, Jpn, 814 (Nov. 13-16, 1984).
 40. N. Takata, S. Matsuda, J. Gomi, K. Toriyama, M. Goto and S. Hokuyo: "Energy Dependence of Proton Irradiation Damage in GaAs Solar Cells and Effects of Combined Radiation on Them", ESA SP-267 (Proc. 5th Eur. Symp. 'Photovoltaic Generators in Space', Scheveningen, Netherlands, Sep. 30-Oct. 2, 1986), 425 (Nov., 1986).
 41. S. Matsuda, H. matsumoto, K. Sato, S. Hokuyo, S. Yoshida, K. Yamagami, and M. Ohkubo: "High Performance LPE GaAs Solar Cells with 200 μ m Thickness",

- Tech. Digest Int. PVSEC-3 (Proc. 3rd Int. Photovoltaic Sci. and Eng. Conf.), Tokyo, Jpn, 191 (Nov. 3-6, 1987).
42. N. Ogasawara, S. Ochi, N. Hayafuji, M. Kato, K. Mitsui, K. Yamanaka, and T. Murotani: "22.5 % (one-sun, AM0) GaAs Solar Cell with AlGaAs/GaAs Superlattice Buffer Layer", Tech. Digest Int. PVSEC-3 (Proc. 3rd Int. Photovoltaic Sci. and Eng. Conf.), Tokyo, Jpn, 477 (Nov. 3-6, 1987).
 43. S. Ochi, H. Hayafuji, N. Ogasawara, M. Kato, K. Mitsui, K. Yamanaka, and T. Murotani: "Large-Scale MOCVD Growth of GaAs Solar Cells with Average Efficiency more than 20 % (One-Sun, AM0)", Tech. Digest Int. PVSEC-3 (Proc. 3rd Int. Photovoltaic Sci. and Eng. Conf.), Tokyo, Jpn, 755 (Nov. 3-6, 1987).
 44. Ref. 5, 「I-2 試料の準備・作製」, p. I-3.
 45. 田中隆一: 「照射用電子加速器の電子流密度分布の近似式」, 応用物理, 48 (5), 432 (1979).
 46. R. Tanaka, K. Mizuhashi, H. Sunaga, and N. Tamura: "A simple accurate measurement method of current density of an electron accelerator for irradiation", Nucl. Instrum. and Methods, 174, 201 (1980).
 47. T. Tabata and R. Ito: "An empirical relation for the transmission coefficient of electrons under oblique incidence", Nucl. Instrum. and Methods, 136 (3), 533 (1976).
 48. ICRU REPORT 37 "Stopping Powers for Electrons and Positrons", International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, Md., U. S. A., p. 60 (Oct. 10, 1984).
 49. Ref. 1, "Appendix B Constants, Properties and Values", p. B-5.
 50. 後川昭雄, 中原乾志, 吉川重夫: 「太陽光発電 (高橋清, 浜川圭弘, 後川昭雄 編著): 第1編 基礎編 第4章 太陽電池測定法」, 森北出版, 東京, p. 94 (1982).
 51. Ref. 1, "Chap. 3 Radiation Effects, 3.1 Theory of Silicon Solar Cell
 52. Damage", p. 3-17.
Ref. 1, "Chap. 3 Radiation Effects, 3.10 Annealing of Irradiated Solar Cells", p. 3-42.