

## 宇宙用太陽電池の低エネルギー電子線照射実験

### IRRADIATION EXPERIMENTS FOR SPACE SOLAR CELLS WITH LOW-ENERGY ELECTRON BEAMS

奥野泰希<sup>\*,A)</sup>, 奥田修一<sup>A)</sup>, 小嶋崇夫<sup>A)</sup>, 岡喬<sup>A)</sup>, 川北史朗<sup>B)</sup> 今泉充<sup>B)</sup> 艸分宏昌<sup>B)</sup>  
Yasuki Okuno<sup>\*,A)</sup>, Shuichi Okuda<sup>A)</sup>, Takao Kojima<sup>A)</sup>, Takashi Oka<sup>A)</sup>,  
Shirou Kawakita<sup>B)</sup>, Takashi Imaizumi<sup>B)</sup>, Hiroaki Kusawake<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Osaka Prefecture Univ.

<sup>B)</sup> JAXA

#### Abstract

In space environment compound solar cell which has high radiation resistance is used as a space solar cell of a satellite. Many researches have been performed on the radiation characteristics of the solar cell. The defects are generated in solar cells by electron beam irradiation of the energy more than 1 MeV or proton beam irradiation recoil atoms. In previous studies it's revealed that the performance of the solar cell is degradation due to the defects. However, the mechanism of performance degradation has not been elucidated in detail yet. In this study, we investigated the effect of the defect to degradation of the solar cell performance as CIGS solar cell is expected next generation space solar cell. We can generate a specific defect in the solar cell by low energy electron beam. As irradiation equipment, we used the Cockcroft-Walton electron beam accelerator of OPU Radiation Research Center. To determine the influence of defects by electron beam irradiation, we optimized irradiation unit. The unit system can keep samples cooled by liquid nitrogen in vacuum. Irradiation systems like the above conditions are scarce in the study of lattice defects. The result by electron beam irradiation of 250 keV implies that Cu defects which are occurred by electron beam irradiation make the solar cell performance improvement. However, deposition of impurities was observed on the samples surface when irradiation time is so long. We investigate the cause of this phenomenon and consider how to improve the accelerator.

#### 1. INTRODUCTION

宇宙環境において様々な種類の放射線が存在している。地球の衛星軌道を回っている人工衛星は少なからずその宇宙放射線の影響を受ける。人工衛星は太陽電池をエネルギー源として利用しているため、放射線が及ぼす太陽電池への影響を調査することは非常に重要である。現在最も多く人工衛星に用いられている太陽電池は放射線耐性が高いとされている多層膜型 InGaAsP 太陽電池である。しかしながら製造のコストが非常に高く、数十年間宇宙で利用した場合、放射線による性能の劣化が見られることが解っている。そのため CIGS(Cu, In, Ga and Se)系太陽電池が近年人工衛星用太陽電池として注目されている [1]。

CIGS 系太陽電池は現在その放射線照射による影響を調査されている。実際宇宙打ち上げることによって宇宙環境で太陽電池の性能を測定した結果を Fig. 1 に示す。一般的なシリコン系太陽電池に関しては放射線の影響によって性能が劣化するのに対して、CIGS 系太陽電池に関しては性能が向上することが明らかになった [2]。CIGS 系太陽電池は大気圏外で多く存在する高エネルギー電子線の影響を受けにくい性質をもっている可能性があり多くの研究が進められている。

先行研究において CIGS 系太陽電池に陽子線や高エネルギー電子線を照射すると、太陽電池の性能が低下することが報告された [1]。放射線照射で CIGS

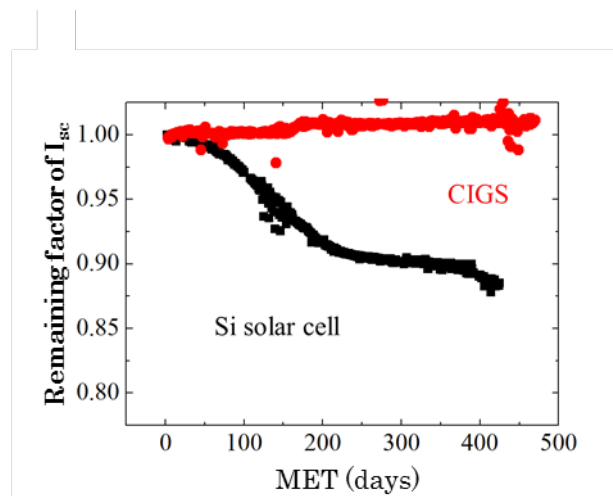


Figure 1: Changes of solar cell performance in space.

It is the result of investigation the performance of Si and CIGS solar cells in space. Red line is the result of CIGS solar cell. Black line is the one of Si solar cell.

系太陽電池の性能を低下させる主な欠損は、ドナーの振る舞いをするインジウムの逆サイト欠陥であると理論的に結論づけられている [3][4]。この逆サイト欠陥は CIGS 系太陽電池のキャリア密度を低下させる働きをするので、陽子線や高エネルギー電子線の照射により太陽電池の性能は劣化する [5]。しかしながら陽子線や高エネルギー電子線ではインジウムの逆サイト欠陥以外にも多くの欠陥が発生し、さ

らに 2 次欠陥の生成によって熱力学的に非平衡である様々な格子欠陥が保存されるため、陽子線や高エネルギー電子線照射の実験では直接的な格子欠陥と太陽電池の性能劣化の関係が明らかにすることは困難であった。

しかしながらシミュレーションによる解析によって低エネルギー電子線を照射することによって発生する格子欠陥の種類を選択できることが明らかになった。Fig. 2 にそのシミュレーション結果を示す。この結果は、200keV 以上 350keV 未満の低エネルギー電子線を照射すると銅イオンのはじき出しのみが生じることを示している。この低エネルギー電子線によってはじき出される銅イオンはフレンケル欠陥を作る。CIGS 系化合物半導体は室温で原子の輸送が容易におきるため、このフレンケル欠陥はすぐに回復してしまう [6]。そのため低エネルギー電子線の照射による欠陥の評価をするには試料の温度を 130 K 以下にする必要がある。

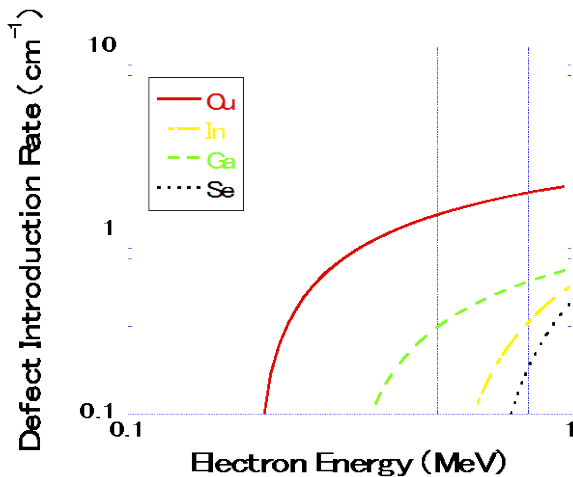


Figure 2: Result of defects generation for electron beam energy.

It's the result of simulation by Casino.

Only Cu atom is recoiled 200-300 keV electron beam.

Cu and Ga atoms is done 300 - 500 KeV one.

Cu, Ga and In atoms is done 500 - 700 KeV one.

All atoms is done Over 700 KeV.

我々は欠損が回復しない低温下で電子線のエネルギーを調整しながら CIGS 系太陽電池に照射することによって欠損するイオンが及ぼす太陽電池の影響を調査する。

## 2. EXPERIMENTAL

### 2.1 CIGS Solar Cells

CIGS 系太陽電池の模式図を Fig. 3 に示す。この太陽電池は産業技術総合研究所が共蒸着法でガラス基板上に作ったものである [7]。CIGS 系太陽電池の 40% は  $[Ga]/([Ga]+[In])$  である。太陽電池は反射抑制コー

ティングされていない。

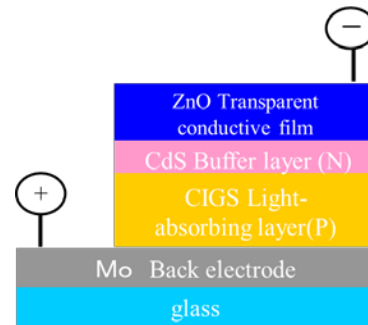


Figure 3: Schematic diagram of CIGS solar cell.

CIGS solar cells are made at AIST.

### 2.2 Irradiation Experiment

我々は、60-580 keV の範囲で電子線を加速できるコッククロフトウォルトン型加速器を所持している。Fig. 4, 5 および 6 にそれぞれコッククロフトウォルトン型加速器、電子線輸送部および照射部の概要図を示す。照射部には液体窒素で試料を冷やすことが出来る構造になっており、2 つの窓が照射口を挟んで取り付けられている。この構造によって試料を 130 K 以下に冷やした状態で照射することが可能である。さらに 2 つの窓によって試料を空気中に取り出すことなく、光電気測定が可能である。このような仕様をもった加速器は世界でもほとんどない。

このコッククロフトウォルトン型電子線加速器を用いて電子線を太陽電池に照射した。照射する電子線をコイルに高周波電圧をかけることによって太陽電池に照射される電子線の密度を均一にした。250keV の電子線を真空中で太陽電池に照射した。試料室および加速管内の真空度は  $2 \times 10^{-7}$  Torr であった。液体窒素により太陽電池を 140 K 以下に冷却しながら  $1 \times 10^{14} - 1 \times 10^{16} \text{ cm}^2$  の電子線を照射した。

### 2.3 Solar cell analyses

キャリア密度集約測定は、HP4284A インピーダンスアナライザーを用いて電流電位測定法によって測定された。HAL-320(Asahi Spectra 社製)がソーラーシミュレーターとして用いられた。そのスペクトルは AM0 に調整された。照射後、太陽電池の欠陥が回復しないように、照射部の窓から光を照射した。

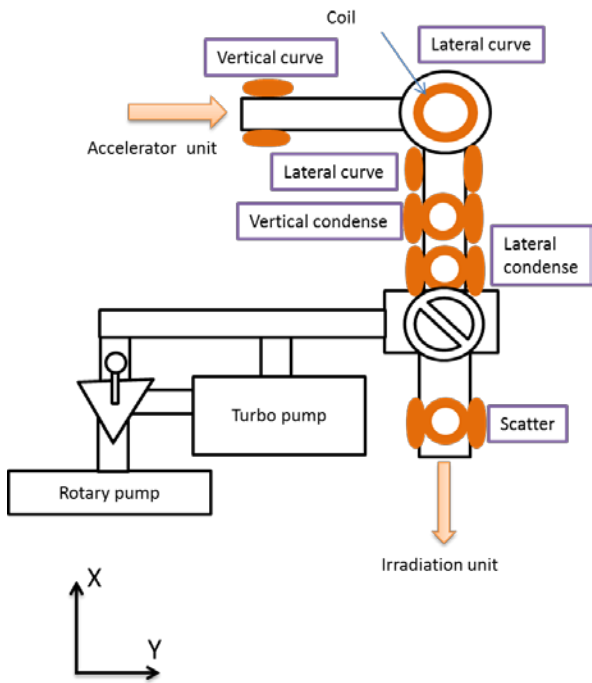


Figure 5: Schematic diagram of electron beam adjustment unit

Adjustment unit can adjust the shape of electron beam by steering coil and bending coil.

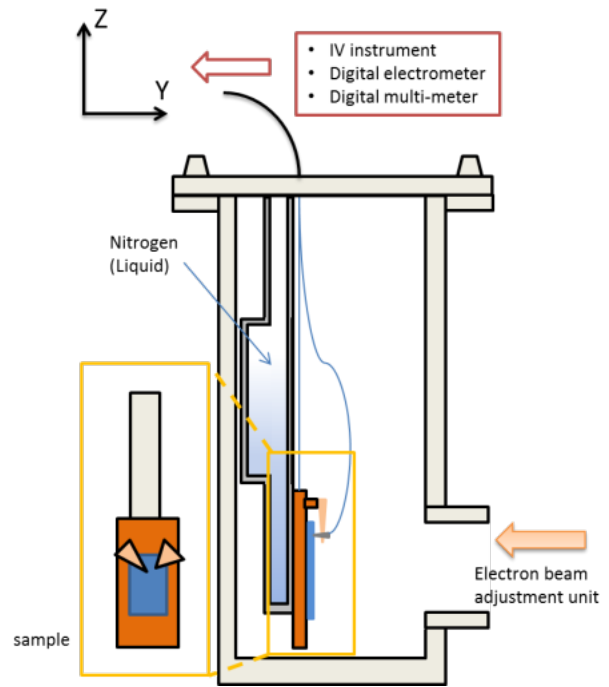


Figure 6: Schematic diagram of irradiation unit

Irradiation unit can keep samples cooling and measure electrical characteristics with irradiating electron beam.

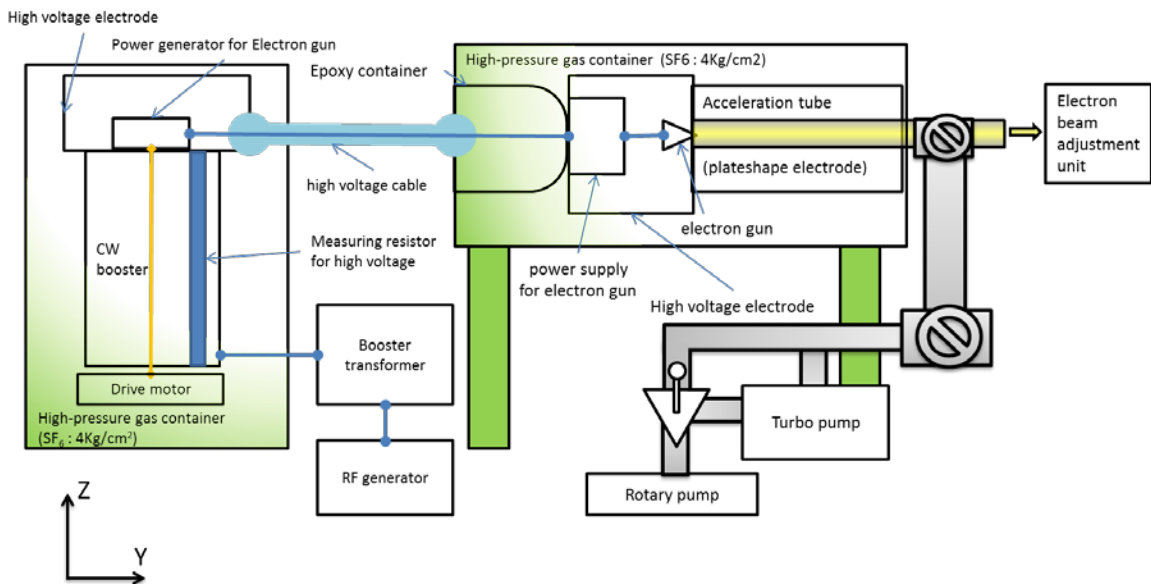


Figure 4: Schematic diagram of Cockcroft Walton type electron beam accelerator  
High-voltage generator is configured RF generator, Booster transformer and Cockcroft Walton type booster. Electron beam acceleration section is used dish-shaped electrode.

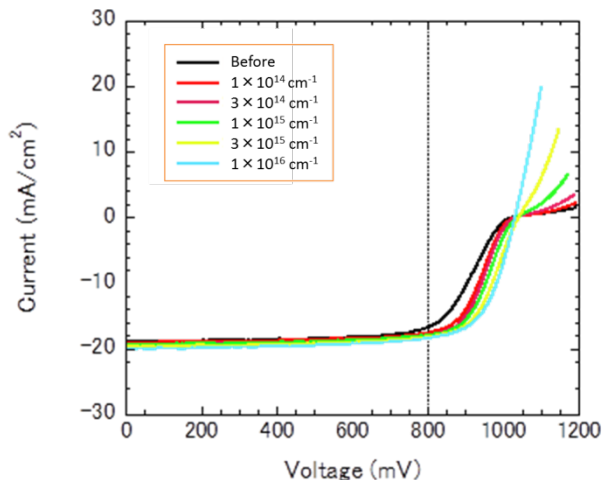


Figure 7: Result of Solar cell performance after electron beam irradiation

This graph is the result of I-V characteristic of CIGS solar cell. The more electron beam of 250keV is irradiated, the more improved the carrier density.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

250 keV の電子線照射後における太陽電池の I-V 測定の結果を Fig. 7 に示す。この結果は 250 keV の電子線照射によって太陽電池の性能が向上したことを示している。Fig. 2 の計算結果から 250 keV の電子線は Cu の原子のみをはじき出すことが分かっている。そして CIGS 太陽電池において Cu の欠陥は、アクセプタ準位を形成するためキャリア濃度を増加させる [8]。このことから、この太陽電池の性能が向上した原因は Cu の原子がはじき出されたためであると考えられる。

しかしながら、長時間の照射をした場合、太陽電池の性能が劣化することが観測された。長時間の間、電子線を照射した場合、試料の上に黒い不純物が堆積することが分かっている。そのため、この劣化が格子欠陥の変化による劣化または不純物の堆積による劣化であるのか詳しく測定することができない。現在、不純物が堆積する要因を明らかにし、加速器の改良を行う予定である。

また我々は、16 MeV-S バンド電子ライナックを所持しており、高電圧における電子線照射による太陽電池の性能評価も検討している。

### 4. CONCLUSION

CIGS 太陽電池に低エネルギー電子線を照射することにより選択的に欠陥を作れることが理論的に明らかであるので、実際に Cu 原子のみがはじき出される 250 keV の電子線を照射した。

コッククロフトウォルトン型電子線加速器を用いて低エネルギー電子線を発生させた。照射部は、格子欠陥が及ぼす太陽電池の性能への影響を測定でき

るように最適化された。

結果は、電子線照射後の CIGS 太陽電池の性能が向上したことを示した。これは、電子線照射によってはじき出された Cu 原子の格子欠陥がキャリア濃度を増加させたと考えられる。

さらに電子線を長時間照射すると、CIGS 太陽電池の性能は低下した。しかしながら太陽電池の表面に不純物が堆積したことが確認されたので、照射による欠陥による性能の低下であるかは明らかではない。現在我々は、この不純物の堆積の原因を明らかにし、加速器の改良を行っている。

### 謝辞

本研究の一部は平成 25 年度 KEK 大学等連携支援事業の支援により行うことができました。心から感謝致します。

### REFERENCE

- [1] T. Hisamatsu, T. Aburaya, S. Matsuda, T. Hisamatsu, Proceedings of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. Vienna, 1998, p. 3568.
- [2] S. Kawakita, M. Imaizumi, M. Takahashi, Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Hamburg, 2011, p. 210.
- [3] J. F. Guillemoles, L. Kronik, D. Cahen, U. Rau, A. Jasenek, H. W. Schock, J. Phys. Chem. B. **104**, (2000), 4849.
- [4] M. Igalson and M. Edoff, Thin Solid Films **322** (2005) 480.
- [5] S. Kawakita, M. Imaizumi, K. Kibe, T. Ohshima, H. Itoh, S. Yoda, O. Odawara, Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) L670.
- [6] S. Kawakita et al., Jpn. J. Appl. Phys., **41**, L797 (2002).
- [7] S. Ishizuka, K. Sakurai, A. Yamada, H. Shibata, K. Matsubara, M. Yonemura, S. Nakamura, H. Nakanishi, T. Kojima, S. Niki, Jpn. J. Appl. Phys. **44**, (2005) L679.
- [8] S. B. Zhang, SH. Wei, A. Zunger, H. Katayama-Yoshida, Phys. Rev. B **57** (1998) 9642.