

## 過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発 (委託研究)

—令和2年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

Development of Dosimetry Device  
in Reactor Cores under Severe Radiation Environment  
(Contract Research)

-FY2020 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource  
Development Project-

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター  
木更津工業高等専門学校

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,  
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development  
National Institute of Technology, Kisarazu College

January 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課  
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).  
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.  
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

## 過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発

(委託研究)

—令和2年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
廃炉環境国際共同研究センター

木更津工業高等専門学校

(2021年10月5日受理)

日本原子力研究開発機構（JAEA）廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）では、令和2年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業（以下、「本事業」という）を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等をはじめとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。

平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省からJAEAに移行することで、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、研究課題のうち、平成30年度に採択された「過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発」の平成30年度から令和2年度の研究成果について取りまとめたものである。本課題は令和2年度が最終年度となるため3年度分の成果を取りまとめた。

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（1F）の炉内および建屋内は事故の影響で非常に高い放射線環境となっており、1F現場作業状況のニーズを踏まえた上で、放射線測定技術の開発が求められている。本研究では、太陽電池素子による線量測定技術を基盤とした画期的な放射線計測システムの実用化に向けた開発を行い、太陽電池型線量計は、炉心付近の高線量率下での線量評価、非電源化・超小型軽量化、および高い耐放射線性を達成可能であることを明らかにした。

---

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、木更津工業高等専門学校が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター：〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

Development of Dosimetry Device in Reactor Cores under Severe Radiation Environment  
(Contract Research)

— FY2020 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,  
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development  
Japan Atomic Energy Agency  
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

National Institute of Technology, Kisarazu College

(Received October 5, 2021)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to “the Project”) in FY2020.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields.

The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2018, this report summarizes the research results of the “Development of dosimetry device in reactor cores under severe radiation environment” conducted from FY2018 to FY2020. Since the final year of this proposal was FY2020, the results for three fiscal years were summarized.

Since the radiation level in the reactors and buildings of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (1F) is extremely high due to the accident, it is required to develop radiation measurement technology based on the needs at the 1F working site. In this study, we will develop technologies towards practical application of revolutionary radiation measurement system based on the dose measurement technology utilizing solar cell devices. It has been found that solar cell dosimeters could be used for dose evaluation under high dose rate near the reactor pressure vessel because they have advantages such as unnecessary of a high-voltage source, ultra-compactness, lightweight, and high radiation resistance.

Keywords: Solar Cell, CdTe, InGaP, High Dose-rate Radiation Dosimeter, Radiation-resistance

---

This work was performed by National Institute of Technology, Kisarazu College under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要 .....	1
2. 平成 30 年度 採択課題 .....	2
3. 令和元年度 採択課題 .....	5
4. 令和 2 年度 採択課題 .....	8
付録 成果報告書 .....	11

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project .....	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
4. Accepted Proposal in FY2020.....	8
Appendix Result Report .....	11

This is a blank page.

## 1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン(平成26年6月文部科学省)」等を踏まえ、平成27年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」(以下、「本事業」という。)を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」という。)では、平成27年に廃炉国際共同研究センター(以下、「CLADS」という。現:廃炉環境国際共同研究センター)を組織し、「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏まえ、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所廃炉(以下、「1F廃炉」という。)に係る研究開発を進めている。

また、平成29年4月にCLADSの中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを踏まえ、今後はCLADSを中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基礎的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指すことが期待されている。

このため、本事業では平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省からJAEAに移行することで、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来プログラムを、①共通基盤型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、④研究人材育成型廃炉研究プログラム(令和元年度より新設)に再編した。

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム	11 課題（若手研究 6 課題、一般研究 5 課題）
課題解決型廃炉研究プログラム	6 課題
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題（日英共同研究）

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性微粒子回収法の高度化	山崎 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響評価	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオライト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斉藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業 高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邊 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー 加速器研究機構

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 毅	京都大学

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

- 共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）
- 課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題
- 国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英共同研究 2 課題、日露共同研究 2 課題）
- 研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一朗	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (令和元年度まで) 大曲 新矢	産業技術総合 研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島2・3号機ペDESTAL燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立 GE ニュークリ ア・エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (令和2年度 まで) 岡山大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (平成30年度まで) 竹下 健二	東京工業 大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

## 4. 令和2年度 採択課題

令和2年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。  
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和2年3月17日～令和2年5月14日（課題解決型）  
令和2年5月13日～令和2年7月15日（国際協力型）

課題数：10 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題（若手研究2 課題、一般研究6 課題）  
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英共同研究）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議での審議を経て、採択課題を決定した。

## 令和2年度 採択課題一覧

## 課題解決型廃炉研究プログラム

## 【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸	高エネルギー加速器研究機構
$\alpha$ / $\beta$ / $\gamma$ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現：ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邊 豊	東北大学
$\beta$ 、 $\gamma$ 、X線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的水質浄化剤の開発による環境問題低減化技術の開拓	浅尾 直樹	信州大学
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン技術の研究開発	鎌田 創	海上・港湾・航空技術研究所

本報告書は、以下の課題の平成30年度から令和2年度の研究成果を取りまとめたものである。本課題は令和2年度が最終年度となるため3年度分の成果を取りまとめている。

共通基盤型原子力研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業 高等専門学校

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録  
成果報告書

This is a blank page.

令和 2 年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

過酷炉心放射線環境における

線量測定装置の開発

(契約番号 R02I022)

成果報告書

令和 3 年 3 月

独立行政法人国立高等専門学校機構

木更津工業高等専門学校

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」による委託業務として、独立行政法人国立高等専門学校機構木更津工業高等専門学校が実施した「過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発」の平成30年度から令和2年度の研究成果を取りまとめたものです。本課題は令和2年度が最終年度となるため3年分の成果を取りまとめています。

目次

概略 ..... ix

1. はじめに ..... 1-1

2. 業務計画 ..... 2. 1-1

    2.1 全体計画 ..... 2. 1-1

        2.1.1 本業務の計画 ..... 2. 1-1

        2.1.2 実施体制図 ..... 2. 1-4

    2.2 各年度の成果の目標および業務の実施方法 ..... 2. 2-1

        2.2.1 平成 30 年度の成果の目標および業務の実施方法 ..... 2. 2-1

        2.2.2 令和元年度の成果の目標および業務の実施方法 ..... 2. 2-2

        2.2.3 令和 2 年度の成果の目標および業務の実施方法 ..... 2. 2-3

3. 業務の実施内容および成果 ..... 3. 1-1

    3.1 太陽電池式放射線感受素子に関する研究【平成 30 年度～令和 2 年度】 ..... 3. 1-1

        3.1.1 CdTe 太陽電池式放射線感受素子の作製 ..... 3. 1-1

        3.1.2 宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定（再委託先：JAXA） ..... 3. 1-21

    3.2 高耐放射線性微小電流計測システム開発【平成 30 年度～令和 2 年度】（再委託先：京都大学） ..... 3. 2-1

    3.3 放射線照射実験【平成 30 年度～令和 2 年度】 ..... 3. 3-1

        3.3.1 ガンマ線照射、電子線照射実験（再委託先：大阪府立大学） ..... 3. 3-1

        3.3.2 中性子線照射試験（再委託先：理化学研究所） ..... 3. 3-16

        3.3.3 アルファ線照射試験（再委託先：東北大学） ..... 3. 3-23

    3.4 線量解析システムの作成（再委託先：東北大学）【平成 30 年度～令和 2 年度】 ..... 3. 4-1

    3.5 研究推進【平成 30 年度～令和 2 年度】 ..... 3. 5-1

4. 結言 ..... 4-1

執筆者リスト

事業代表者	独立行政法人国立高等専門学校機構木更津工業高等専門学校	教授	岡本 保
再委託先	国立大学法人京都大学	准教授	後藤 康仁
	公立大学法人大阪府立大学	准教授	秋吉 優史
	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構	主幹研究開発員	今泉 充
	国立研究開発法人理化学研究所	専任研究員	小林 知洋
	国立大学法人東北大学	助教	奥野 泰希

表一覧

表 3.1.2-1	InGaP、CIGS、CdTe 太陽電池の $I_{sc}$ の統計処理結果 .....	3.1-28
表 3.1.2-2	CIGS 太陽電池の He イオン照射における $I_{sc}$ の保存率の計算例 .....	3.1-28
表 3.1.2-3	評価・解析に用いた放射線粒子の NIEL 値 .....	3.1-28
表 3.1.2-4	フィッティングより得られた DDD の換算式におけるパラメータ値 .....	3.1-29
表 3.2-1	同軸ケーブルに誘起したガンマ線励起電流 .....	3.2-2
表 3.3.2-1	全中性子束と熱中性子・高速中性子のモデレータ厚さ依存性 .....	3.3-20
表 3.4-1	各太陽電池の検出器特性 .....	3.4-2
表 3.4-2	各外装における性能 .....	3.4-3

図一覧

図 2.1-1	線量計開発に関する概要図	2.1-2
図 2.1-2	研究計画の概要図	2.1-2
図 2.1-3	本業務の全体計画図	2.1-3
図 2.1-4	本業務の実施体制図	2.1-4
図 3.1.1-1	スーパーストレート型 CdTe 太陽電池の構造	3.1-1
図 3.1.1-2	典型的なストレート型 CdTe 太陽電池の電流電圧特性	3.1-2
図 3.1.1-3	サブストレート型 CdTe 太陽電池の構造	3.1-3
図 3.1.1-4	熱処理効果の確認	3.1-4
図 3.1.1-5	分光感度特性	3.1-4
図 3.1.1-6	サブストレート型 CdTe 太陽電池のゼロバイアス時の空乏層幅および変換効率	3.1-5
図 3.1.1-7	Cu ドーピングを行った場合および行わなかった場合のスーパーストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な電流電圧特性	3.1-6
図 3.1.1-8	Cu ドーピングを行った場合および行わなかった場合のスーパーストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な分光感度特性	3.1-7
図 3.1.1-9	スーパーストレート型 CdTe 太陽電池の特性とコバルト 60 ガンマ線照射量との関係	3.1-8
図 3.1.1-10	中性子線照射時の Pb ブロックありの場合、なしの場合の CdTe 太陽電池の誘起電流	3.1-9
図 3.1.1-11	観測された CdTe 太陽電池の電流と陽子線電流	3.1-10
図 3.1.1-12	陽子線電流を変動させた場合の CdTe 太陽電池の誘起電流と陽子線電流	3.1-10
図 3.1.1-13	CdTe 太陽電池の誘起電流と陽子線電流の関係	3.1-11
図 3.1.1-14	中性子線照射前後の電流電圧特性	3.1-12
図 3.1.1-15	CdTe 太陽電池を 2 枚積み重ねて並列接続した場合のガンマ線誘起電流	3.1-13
図 3.1.1-16	PHITS により計算した CdTe 太陽電池数とガンマ線感度の関係	3.1-13
図 3.1.1-17	CdTe 太陽電池数とガンマ線誘起電流の関係	3.1-14
図 3.1.1-18	電子線フラックスと誘起電流の関係	3.1-15
図 3.1.1-19	電子線エネルギーと電子線感度の関係	3.1-16
図 3.1.1-20	200 keV の電子線照射前後の電流電圧特性	3.1-17
図 3.1.1-21	400 keV の電子線照射前後の電流電圧特性	3.1-17
図 3.1.1-22	電子線照射によるセルパラメータの変化	3.1-18
図 3.1.1-23	サブストレート型 CdTe 太陽電池の温度特性	3.1-19
図 3.1.1-24	サブストレート型 CdTe 太陽電池の直列抵抗、並列抵抗の温度特性	3.1-20
図 3.1.2-1	(a) InGaP、(b) CIGS、(c) CdTe 太陽電池の外観と試料の形状	3.1-29
図 3.1.2-2	(a) InGaP、(b) CIGS、(c) CdTe 太陽電池の典型的な LIV 特性	3.1-30
図 3.1.2-3	(a) InGaP、(b) CIGS、(c) CdTe 太陽電池の Isc の度数分布	3.1-30
図 3.1.2-4	耐湿度性試験に用いた恒温恒湿試験装置 (ESPEC SH-221)	3.1-31
図 3.1.2-5	(a) InGaP、(b) CIGS、(c) CdTe 太陽電池の耐湿度性試験結果	3.1-31
図 3.1.2-6	InGaP 太陽電池における (a) 5 MeV He イオンおよび (b) 1 MeV 電子線照射による LIV 特性の変化	3.1-32

図 3.1.2-7	CIGS 太陽電池における (a)5 MeV He イオンおよび (b)1 MeV 電子線照射による LIV 特性の変化	3.1-32
図 3.1.2-8	(a)InGaP、(b)CIGS、(c)CdTe における NIEL 値の計算結果	3.1-33
図 3.1.2-9	改良型 InGaP 太陽電池素子の外観写真、形状および断面構造模式図	3.1-34
図 3.1.2-10	改良型 InGaP 太陽電池素子 50 枚における Isc の度数分布	3.1-34
図 3.1.2-11	改良 (薄) 型 InGaP 太陽電池における初期および 5 MeV He イオン照射後の LIV 特性	3.1-35
図 3.1.2-12	(a)InGaP 太陽電池および (b)CIGS 太陽電池における、Isc の He イオンによる放射線劣化特性	3.1-35
図 3.1.2-13	(a)InGaP 太陽電池および (b)CIGS 太陽電池における、Isc の電子による放射線劣化特性	3.1-36
図 3.1.2-14	(a)InGaP 太陽電池および (b)CIGS 太陽電池における、Isc の陽子による放射線劣化特性	3.1-36
図 3.1.2-15	(a)InGaP 太陽電池および (b)CIGS 太陽電池における、Isc の He イオンによる放射線劣化データの DDD プロット	3.1-37
図 3.1.2-16	(a)InGaP 太陽電池および (b)CIGS 太陽電池における、Isc の電子による放射線劣化データの DDD プロット	3.1-37
図 3.1.2-17	(a)InGaP 太陽電池および (b)CIGS 太陽電池における、Isc の陽子による放射線劣化データの DDD プロット	3.1-38
図 3.1.2-18	(a)InGaP 太陽電池および (b)CIGS 太陽電池における、Isc の放射線劣化データすべての DDD プロット	3.1-38
図 3.1.2-19	(a)InGaP 太陽電池および (b)CIGS 太陽電池における、Isc の陽子による放射線劣化データの換算後の DDD 値を用いたプロット	3.1-39
図 3.1.2-20	(a)InGaP 太陽電池および (b)CIGS 太陽電池における、Isc のガンマ線による放射線劣化特性	3.1-39
図 3.2-1	ケーブル端を電氣的に遮蔽するためのステンレス鋼製の保存缶	3.2-3
図 3.2-2	同軸ケーブルに誘起されるガンマ線励起電流の線量率依存性	3.2-4
図 3.2-3	微小電流計測システムの総合的な遮蔽構造	3.2-5
図 3.2-4	内側被覆を取り出す変換器	3.2-5
図 3.2-5	ガンマ線励起電流測定のために木枠に巻いたケーブルと各場所における線量率	3.2-6
図 3.2-6	内側被覆を浮遊電位としたときと接地したときのガンマ線励起電流の違い	3.2-7
図 3.2-7	三重同軸ケーブルに誘起するガンマ線励起電流の時間変化	3.2-7
図 3.2-8	三重同軸ケーブルに誘起するガンマ線励起電流の接続方法の違いによる差	3.2-8
図 3.2-9	作製した線量計プロトタイプの写真	3.2-9
図 3.2-10	異なる場所における InGaP 太陽電池線量計の出力の時間変化	3.2-11
図 3.2-11	異なる線量率の場所において計測した InGaP 太陽電池の出力電流	3.2-12
図 3.3.1-1	リニアガイドのステッピングモーター、ステージ部	3.3-2
図 3.3.1-2	Arduino を使用したコントローラー部	3.3-2
図 3.3.1-3	第 3 照射室における照射誘起電流測定時のレイアウト	3.3-3
図 3.3.1-4	照射誘起電流測定用ホルダーを用いた InGaP 太陽電池測定時のレイアウト	3.3-3
図 3.3.1-5	InGaP 太陽電池の低線量率での照射誘起電流線量率依存性	3.3-4

図 3.3.1-6	図 3.3.1-5 で示した InGaP 太陽電池の照射誘起電流測定時の各測定点における測定値の変動係数.....	3.3-5
図 3.3.1-7	広い線量率範囲で測定した InGaP 太陽電池の照射誘起電流の線量率依存性.....	3.3-5
図 3.3.1-8	広い線量率範囲で測定した CIGS 太陽電池の照射誘起電流の線量率依存性.....	3.3-6
図 3.3.1-9	静止して 1 分間のサンプリングデータの平均をとった場合と、移動しながらのサンプリングデータの比較.....	3.3-7
図 3.3.1-10	1 MGy まで照射後の InGaP 太陽電池の照射誘起電流の線量率依存性.....	3.3-8
図 3.3.1-11	1 MGy まで照射後の CIGS 太陽電池の照射誘起電流の線量率依存性.....	3.3-8
図 3.3.1-12	1 MGy まで照射した InGaP 太陽電池.....	3.3-9
図 3.3.1-13	<sup>90</sup> Sr 密封小線源による InGaP 太陽電池誘起電流測定.....	3.3-9
図 3.3.1-14	電子線照射試験の年次計画.....	3.3-10
図 3.3.1-15	令和元年度取得した CIGS 太陽電池における電子線誘起電流挙動.....	3.3-11
図 3.3.1-16	直列抵抗を改善した CIGS 太陽電池における電子線誘起電流挙動.....	3.3-11
図 3.3.1-17	InGaP 太陽電池における電子線誘起電流挙動.....	3.3-12
図 3.3.1-18	InGaP 太陽電池における 400 keV 電子線照射時の劣化挙動.....	3.3-14
図 3.3.1-19	InGaP 太陽電池の NIEL 計算結果.....	3.3-14
図 3.3.1-20	InGaP 太陽電池の劣化フィッティング結果.....	3.3-15
図 3.3.1-21	InGaP 太陽電池の電子線誘起電流劣化補正.....	3.3-15
図 3.3.2-1	中性子照射設備 RANS 全景.....	3.3-16
図 3.3.2-2	RANS の陽子線加速器.....	3.3-17
図 3.3.2-3	中性子発生ベリリウムターゲットおよびバナジウム製ホルダー.....	3.3-17
図 3.3.2-4	遮蔽体内部および横穴の位置.....	3.3-17
図 3.3.2-5	本研究で製作した遮蔽体内部において材料照射を行うための遮蔽材と配線治具.....	3.3-18
図 3.3.2-6	オシロスコープで記録した機器動作タイミングと陽子電流の例.....	3.3-18
図 3.3.2-7	中性子エネルギー Spektral 計算結果 (全方向積分値).....	3.3-19
図 3.3.2-8	遮蔽体を開放して露出させた陽子ビームライン末端部.....	3.3-20
図 3.3.2-9	試料照射場所における中性子 Spektral の計算結果.....	3.3-20
図 3.3.2-10	ターゲットステーション内の吸収線量率.....	3.3-21
図 3.3.2-11	中性子照射した CdTe 太陽電池のガンマ線エネルギー Spektral.....	3.3-21
図 3.3.3-1	アルファ線照射試験の年次計画.....	3.3-23
図 3.3.3-2	QST 高崎研におけるタンデム加速器と太陽電池測定時の体系.....	3.3-24
図 3.3.3-3	サブストレート型 CdTe 太陽電池のアルファ線検出特性.....	3.3-26
図 3.3.3-4	CIGS 太陽電池のアルファ線誘起電流のフルエンス依存性.....	3.3-26
図 3.3.3-5	劣化前後の CIGS 太陽電池のアルファ線誘起電流挙動.....	3.3-27
図 3.3.3-6	各フルエンスにおける CIGS 太陽電池の光電流電圧特性.....	3.3-27
図 3.3.3-7	フルエンスを関数とした CIGS 太陽電池の光誘起電流および放射線誘起電流の劣化特性.....	3.3-28
図 3.3.3-8	CIGS 太陽電池の光誘起電流および放射線誘起電流の劣化傾向の比較.....	3.3-28
図 3.4-1	線量解析システムの作製の年次計画.....	3.4-1
図 3.4-2	太陽電池のアルミシールドの内部.....	3.4-3

図 3.4-3	OSAM の試作機の概要図	3.4-4
図 3.4-4	OSAM の試作機のガンマ線誘起電流出力挙動	3.4-5
図 3.4-5	OSAM 試作機の (a) 非照射環境下および (b) 照射環境下の電流信号分布	3.4-5
図 3.4-6	電流信号解析ソフトのユーザーインターフェース	3.4-6
図 3.4-7	電流信号通信から線量解析までの順序	3.4-7
図 3.4-8	各放射線照射時の InGaP 太陽電池における素子吸収線量率と発生電流の関係	3.4-8

略語一覧

1F	: 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所	
CIGS	: Copper Indium Gallium Diselenide	(銅・インジウム・ガリウム・セレン化物)
CSS	: Close-Spaced Sublimation	(近接昇華)
CVD	: Chemical Vapor Deposition	(化学気相成長)
CW 加速器	: コッククロフト・ウォルトン (Cockcroft-Walton) 型電子線加速器	
DDD	: Displacement Damage Dose	(変位損傷線量)
DEGBE	: Diethylene Glycol Monobutyl Ether	(ジエチレングリコールモノブチルエーテル)
ITO	: Indium Tin Oxide	(インジウム・スズ 酸化物)
LIV	: Light-IV (Current-Voltage)	(光照射下電流-電圧)
Isc	: Short-circuit current	(短絡電流)
NIEL	: Non-ionization Energy Loss	(非イオン化エネルギー損失)
OSAM	: Optimized to 1F Solar cell Absorption-dose Measurement-system	(太陽電池型線量計)
PCV	: Primary Containment Vessel	(原子炉格納容器)
TLD	: ThermoLuminescent Dosimeter	(熱蛍光線量計)
Voc	: Open-Circuit Voltage	(開放電圧)

## 概略

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、「1F」と略す。）の廃炉において、デブリの位置特定や解体作業時の安全確保において空間線量を測定することが必要である。しかし、既存の線量計を使用した場合、測定地点が3 m以上離れていること、高いレベルの放射線環境による装置故障などの問題があった。そのため、遠隔でのリアルタイム測定が可能であり、高い放射線耐性を有する革新的な線量計の開発が求められている。

本研究では現在、革新的な線量計の開発において、太陽電池が有力な候補であると考えている。太陽電池は、1F環境下での使用において、①低コスト、②無電源駆動、③小型設計、という3つの利点が考えられている。加えて、シリコン太陽電池の放射線挙動に関しては、1F環境下で想定されているガンマ線線量率の信号を測定できることが先行研究で報告されている。しかし、シリコン太陽電池では、高レベル放射線で照射損傷による素子の劣化により、長時間の使用ができない課題も先行研究で報告されている。そのため、太陽電池型線量計（以下、「OSAM」と略す。）の開発のためには、高い放射線耐性を有する太陽電池を選定することが重要である。

高レベル放射線環境下での太陽電池の利用技術は、宇宙工学分野において実用化されている。InGaP太陽電池やCIGS太陽電池は、人工衛星への利用が既にされている、ないしは検討されている太陽電池であり、高い放射線耐性を有する。また、半導体放射線検出用材料であるCdTeを用いたCdTe太陽電池は高い放射線耐性を有していることが期待される。

本研究では、太陽電池式放射線感受素子を用いることにより、炉心付近の高い線量率の放射線環境をリアルタイムで測定可能な電源レスの線量測定システムを開発することを目的とする。具体的には、素子最小構成1 cm<sup>3</sup>の小型化、最長80 mの遠隔操作、数Gy/h～数kGy/hの高線量率ガンマ線測定、数Gy/h～数kGy/hのアルファ線測定、3 MGy以上のガンマ線耐性を実現し、中性子で発生する素子の電流ノイズに対しては低放射化材料を使用し、線量計における信号エラーを数Gy/hで検出される電流値以下で実現することを目的とした。3カ年計画の各年度の成果は下記の通りである。

### 平成30年度

#### (1) 太陽電池式放射線感受素子に関する研究

##### ① CdTe太陽電池式放射線感受素子の作製

放射線感受素子用にCdTe太陽電池と同様の構造の作製・評価を行った。また、フレキシブル放射線感受素子の作製を目指したCdTe太陽電池の作製・評価を行った。ガンマ線、ベータ線、アルファ線、中性子線の照射試験を行い放射線感受素子としての問題点を明らかにするとともに耐性の評価を開始し、劣化機構の検討を試みた。

放射線感受素子用CdTe太陽電池と同様の構造の作製・評価を行った。また、フレキシブル化を目指したサブストレート型CdTe太陽電池の作製・評価を行った。ガンマ線、ベータ線、アルファ線、中性子線の照射試験を行い、問題点の検討、劣化機構の検討を行った。

##### ② 宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定（再委託先：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（以下、「JAXA」と略す。））

InGaP太陽電池およびCIGS太陽電池の様々な構造の素子から宇宙工学で得られている知見を基に耐放射線性の高い太陽電池構造を有するものを選択し、以後供試体として用いる太陽電池サンプルとしてその母集団から出力性能分布が1σ以内に入るものを選定した。また、InGaP太陽電池およびCIGS太陽電池に対する湿度環境の影響を試験により明らかにした。

InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池の様々な構造の素子から宇宙工学で得られている知見を基に耐放射線性の高い太陽電池構造を有するものを選択し、それらを手に入れた。上記 CdTe 太陽電池を加えた 3 種の太陽電池について初期出力性能を測定・評価し、その母集団から出力性能分布において  $1\sigma$  以内に入るものを選定し、以後の検討に用いる供試体とした。また、その供試体用 InGaP 太陽電池、CIGS 太陽電池および CdTe 太陽電池から各 6 素子を用いて恒温恒湿試験を 1000 時間まで実施し、湿度環境の影響を明らかにした。

(2) 高耐放射線性微小電流計測システム開発（再委託先：国立大学法人京都大学（以下、「京都大学」と略す。））

放射線環境における、本研究課題で開発する各種検出器の性能を確認するとともに、測定系に生じる電離損傷ノイズや劣化の影響を評価するため、検出器における検出出力およびシールド伝送線における電離損傷ノイズ生成の基本特性を高精度の電流計測システムを用いて計測し、本計測システムにおいて適切な電流増幅器（プリアンプ）と伝送線路を選定した。また、選定したプリアンプと伝送線路を用いた遠隔計測システムを立ち上げ、非放射線環境における微小電流計測を行い、計測精度の確認を行った。

異なる種類のシールド伝送線に対してガンマ線照射を行い、生成する電離損傷ノイズの量を測定して基本特性を把握するとともに異なる伝送線路における違いを評価した。選定した電流増幅器と伝送線路を用いて遠隔計測システムを立ち上げ、計測精度を得るための条件を確認した。

(3) 放射線照射実験

① ガンマ線照射、電子線照射実験（再委託先：公立大学法人大阪府立大学（以下、「大阪府立大学」と略す。））

コバルト 60 ガンマ線照射施設を利用して、ガンマ線照射環境下における太陽電池を用いた線量測定の測定環境を整備する。実際の太陽電池モジュールを用いた実証試験を行い、1 MGy 以上の大線量のガンマ線照射による線量増加に伴う影響評価を試みた。また、コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器（CW 加速器）を用いて、電子線照射時の太陽電池からの起電力測定により、ベータ線の線量測定を行うための測定環境を整備した。また、弾き出し損傷評価のためにも数十 keV 程度の低エネルギー電子線照射を行った。

コバルト 60 プール照射時に温度、電流測定を行うための試料ホルダーを設計、製作した。法改正に伴う現状の照射施設の問題点を確認し、達成可能な範囲での照射試験を行った。CW 加速器照射時の線量を測定するための基礎的な計算と、それに基づく測定を実施した。弾き出し損傷評価のために 40 keV での電子線照射を行った。

② 中性子線照射試験（再委託先：国立研究開発法人理化学研究所（以下、「理化学研究所」と略す。））

中性子束調整用照射治具の作製を行うとともに、エネルギー調整用減速材ブロックの調達を行った。材料照射を行うための準備として、器具作製、物品調達を行い、中性子エネルギースペクトルの取得を開始した。

エネルギー調整用減速材ブロックはポリエチレンからなり、厚さ 2、4、6 cm のものを交換することにより減速効果を調整可能とした。材料照射用の器具は、遮蔽部（ボロン含有ポリエチレンおよび鉛）、材料保持部（黒鉛）により構成されている。中性子エネルギースペクトルは実測値との比較を行うための基準値をシミュレーションにより算出した。

③ アルファ線照射試験（連携先：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」と略す。））

タンデム加速器による He イオンの照射試験の利用申請を行った。He イオン照射により試料の放射化がないことを放射線シミュレーションにより解析した。

原子力機構タンデム加速器の利用申請が承諾され、令和元年度の照射試験の実施が可能になった。試料の放射化がないため、問題なく照射できることが明らかになった。

(4) 線量解析システムの作成（連携先：原子力機構）

現場技術員の作業では、様々な使用シーンが想定されるため、高耐衝撃性を持つ線量解析用 PC 等を導入するとともに信号を取得するためのソフトウェアの作成を行った。

PC、National Instruments Corp. 製の LabVIEW、C++、微小電流計、ケーブル、太陽電池を組み合わせて、太陽電池の電流信号を計測できるソフトウェアを作成した。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター（以下、「CLADS」と略す。）等との連携を密にして、ニーズの把握・整理を行いながら研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

CLADS の奥村啓介研究員と 1F 現場のニーズと本研究のシーズに関して意見を伺った。また、各研究項目間の打合せを 3 回実施した。

平成 30 年度における研究成果は、学会での発表：6 件、査読付き英文誌：1 件である。

令和元年度

(1) 太陽電池式放射線感受素子に関する研究

① CdTe 太陽電池式放射線感受素子の作製

平成 30 年度の結果を踏まえて、放射線感受素子用 CdTe 太陽電池の成膜条件、構造の最適化を行った。また、フレキシブル放射線感受素子の作製を目指したサブストレート型 CdTe 太陽電池の作製・評価を行った。さらに、作製した試料のガンマ線、ベータ線、アルファ線、中性子線の照射試験を行うとともに、放射線耐性の評価を行った。

② 宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定（再委託先：JAXA）

平成 30 年度に選択した耐放射線性の高い太陽電池構造を有する素子について、電子線、ガンマ線、およびアルファ線（He イオン）を照射し、光電流－電圧特性を取得した。大阪府立大学にて電子線およびガンマ線を、また原子力機構ないし国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（以下、「QST」と略す。）高崎量子応用研究所（以下、「高崎研」と略す。）にてアルファ線（He イオン）を照射した。これらの太陽電池の照射試験前後の光電流－電圧特性を取得し、エネルギーおよびフルエンスごとに光電流－電圧特性の結果を分類した。照射前後の太陽電池性能の低下率を解析することにより、耐放射線性に関するデータを取得した。

大阪府立大学ではエネルギー 400 keV 程度までの電子線およびガンマ線を照射し、QST 高崎研にてエネルギー 1 MeV の電子線およびエネルギー 5 MeV のアルファ線（He イオン）を照射した。

3 種の太陽電池（CdTe、InGaP、CIGS）について 3 種の放射線（アルファ線、ベータ線、ガンマ線）の耐性、すなわち計 9 種の評価がまだすべて完了してはいないものの、質量が大きいため最も劣化が懸念されたアルファ線に対して InGaP、CIGS 太陽電池の耐性が十分であること、および

CIGS 太陽電池がベータ線で、CdTe 太陽電池がガンマ線でほとんど劣化しないことが示されている。

## (2) 高耐放射線性微小電流計測システム開発（再委託先：京都大学）

平成 30 年度に構築した検出器・増幅器と伝送線路を用いて、放射線環境下における検出器出力の増幅実験を行った。放射線環境における実測データをもとに本計測システムの総合的な遮蔽構造の設計・製作を行った。検出器と増幅器の間が最も放射線に曝される部分になるので、この部分をどのように遮蔽するかを検討した。また、検出器側で電極の取り方等の工夫により電離損傷ノイズの低減の可能性を見だし、電極構造を検討した。

太陽電池のガンマ線照射下における出力電流を、同軸ケーブルを用いて伝送し、平成 30 年度に選定したピコアンメータを用いて増幅することで計測した。ガンマ線照射下において、伝送線路に生じる電気ノイズ、電離損傷ノイズを計測し、検出器およびケーブルの外側被覆を接地することで電気ノイズを低減できるだけでなく、電離損傷ノイズの経時変化も低減できることが明らかとなった。また、電離損傷ノイズの測定結果をもとに、トライアキシャルケーブルを用いて伝送線路を遮蔽する構造を設計し、製作した。

## (3) 放射線照射実験

### ① ガンマ線照射、電子線照射実験（再委託先：大阪府立大学）

コバルト 60 照射施設により、大線量率（最大 3 kGy/h 程度まで）から低線量率（数 mGy/h 程度）でのガンマ線照射時の太陽電池起電力測定を行い、出力電圧の線量率依存性を広い線量率範囲において評価した。照射はプールを用いた水中照射を行うことで、1F 環境を模擬した。それに先立ち、固体線量計の温度依存性を評価した上で照射場の温度分布評価を行い、線量率評価を行った。CW 加速器で 60 keV 程度の低エネルギーから 500 keV 程度までの範囲でビーム電流値を変えて電子線照射を行い、太陽電池からの起電力をその場測定することでベータ線測定の模擬を行った。さらに、それぞれの太陽電池の構成元素ごとの弾き出し閾値エネルギーを評価し、弾き出し損傷評価を行った。

コバルト 60 照射プールにおいて、既存の照射容器を用いて 4.9 kGy/h で照射を行った際に単純照射-照射後特性評価で、照射によって発生したオゾンによる電極酸化により評価が困難であることが明らかになった。そのためアルゴンガスパージおよび電流取り出しが可能な照射容器を新たに作製し、固体線量計の温度依存性を評価した上で照射場の温度分布評価を行い、線量率評価を行った。

### ② 中性子線照射試験（再委託先：理化学研究所）

理化学研究所加速器駆動小型中性子源（RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source）（以下、「RANS」と略す。）のパルス長と周波数を調整することにより、中性子束を最大化する試みを行った。平成 30 年度に引き続き、減速材厚さを変化させた場合の中性子スペクトルの変化を評価し、1F 環境を模擬するための条件を検討した。また、放射化による OSAM システムへの影響評価を行った。

### ③ アルファ線照射試験（連携先：原子力機構）

タンデム加速器で He イオンを加速しアルファ線照射試験および結果解析を行った。そのために照射設備に微小電流測定装置を設置し、その場測定システムを構築した。アルファ線照射試験を実施し、アルファ線照射による太陽電池のキャリア生成量を解析した。

本実験により、太陽電池がアルファ線を検出できることが明らかになった。また、線量率に応じた太陽電池の信号挙動が明らかになった。

#### (4) 線量解析システムの作成（連携先：原子力機構）

簡易的に OSAM システムのハードウェアを組み上げ、選定されたシステム制御用のソフトウェアを利用し、線量解析用ソフトウェアの Ver. 1 を作成した。ソーラーシミュレーターを利用して簡易的な動作試験を実施し、ソフトウェアとハードウェアに動作の障害がないかをチェックした。放射線環境でのその場測定の前段階として、計測中の不具合を解明するため、可視光を用いて、電流量から線量モニターの数値の動作を確認し、不具合がないかチェックした。

LabVIEW によるプログラム作成を実施し、試作機線量計 OSAM の動作確認を実施した。光を照射した際の、電流読み出し時に、プログラムの異常は見られなかった。

#### (5) 研究推進（連携先：原子力機構）

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、ニーズの把握・整理を行いながら研究を進めた。福島にて研究会を開催し、廃炉、太陽電池、および線量計に関する専門家を招くことによって、1F 廃炉に使用できる線量計にするための課題点をより明白にした。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

1F 廃炉関係の学会、ワークショップに参加し、発表を聴講することで情報収集を実施した。研究会を開催し、線量計開発の専門家である JAXA の上野氏、1F 環境におけるデブリ素性の専門家である原子力機構 逢坂氏と、本線量計開発に関する意見交換を実施した。

令和元年度における研究成果は、国内学会での発表：14 件、和文誌：1 件、査読付き英文誌：1 件である。特に査読付き英文誌として発刊された、「InGaP 太陽電池を用いて、ガンマ線の線量計として使用可能であることを明らかにしたこと」は、本研究における重要な知見である。

### 令和 2 年度

#### (1) 太陽電池式放射線感受素子に関する研究

##### ① CdTe 太陽電池式放射線感受素子の作製

令和元年度の結果を踏まえて、放射線感受素子用 CdTe 太陽電池の作製を行った。また、フレキシブル放射線感受素子の作製を目指したサブストレート型 CdTe 太陽電池の作製を行った。作製した試料のガンマ線、ベータ線、アルファ線、中性子線の照射試験を行い、誘起電流および耐性の評価を行った。さらに、ガンマ線に対する感度を向上させる方法を検討した。

スーパーストレート型 CdTe 太陽電池において、ガンマ線、中性子線照射試験を行い、セルを重ねて並列接続することによりガンマ線感度を向上させることを明らかにするとともに、中性子線耐性を確認した。また、サブストレート型 CdTe 太陽電池において、ベータ線、アルファ線による誘起電流を確認するとともに、ベータ線耐性を確認した。

##### ② 宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定（再委託先：JAXA）

令和元年度に取得した、検知素子候補である InGaP、CIGS 太陽電池の耐放射線性試験の結果に基づき、更なる耐性向上が期待されると判断した InGaP 太陽電池素子について、構造の改良を提案し、素子を試作した。この改良版 InGaP 太陽電池に対し、電子線、アルファ線（He イオン）お

よびガンマ線を照射し、その前後で光電流－電圧特性を取得した。この試験結果について令和元年度までと同様な解析を行い、改良効果を判定した。

また、令和元年度までに取得、および令和2年度に取得した放射線照射試験データを基に、宇宙用太陽電池の放射線劣化予測手法として確立されている変位損傷線量（以下、「DDD」と略す。）法を応用し、原子炉環境でも太陽電池が劣化予測できるような手法を確立した。

改良版として、放射線吸収層の厚さを半分（1.0→0.5 μm）とした InGaP 太陽電池を作製したが、放射線照射試験の結果、放射線耐性は同等で向上はみられなかった。

DDD 法により、出力の劣化予測や劣化補正に用いることができる、陽子線を基準としたアルファ線、ベータ線の劣化特性を統一して表す式および劣化特性を取得・確立した。但し、DDD 解析にはまだ困難な点があるため、ガンマ線の照射結果は解析には取り込まなかった。

## (2) 高耐放射線性微小電流計測システム開発（再委託先：京都大学）

令和元年度に検討した遮蔽構造を持つ微小電流計測システムを用いた際にケーブルで発生する電離損傷ノイズを評価した。得られた値から、太陽電池センサ出力に対する電離損傷ノイズの影響を評価し、測定できる線量率下限を評価した。最終目標である 80 m 以上の長さのケーブルを用いて放射線環境下においてセンサ出力の伝送特性の評価を行い、構築した微小電流計測システムが廃炉作業において現実的に利用できるかどうかの総合的な評価を行った。

1. 5D タイプの三重同軸ケーブル 15 m に対して 40～60 Gy/h のガンマ線照射を行い、誘起電流を測定した。この値から 100 m のケーブルが 60 Gy/h の線量率のガンマ線に一樣に曝されていると仮定した場合の誘起電流値を求め、面積 1 cm<sup>2</sup> の太陽電池センサの出力電流値と比較して測定できる線量率下限を評価した。ガンマ線源に太陽電池センサを対向させた状態で 15 m ケーブルおよび 90 m ケーブルを経由してセンサ出力値計測を行い、両者に差異がないことを確認し、信号の長距離伝送に問題ないことを確認した。特性評価の実験において見られたその他の課題などを含めて微小電流計測システムが廃炉作業において現実的に利用できるかどうかを評価した。

## (3) 放射線照射実験

### ① ガンマ線照射、電子線照射実験（再委託先：大阪府立大学）

令和元年度に開発した照射容器とコバルト 60 照射施設により、大線量率（最大 10 kGy/h 程度まで）から低線量率（数 mGy/h 程度）でのガンマ線照射時の太陽電池起電力測定を行い、出力電流の線量率依存性を広い線量率範囲において評価した。また、1 MGy 程度までの積算の線量による起電力特性変化を評価することで耐性評価を行った。これにより、1F 内の過酷環境における太陽電池の線量計としての信頼性を確認した。

CW 加速器で 60 keV 程度の低エネルギーから 500 keV 程度までの範囲でビーム電流値を変えて電子線照射を行い、太陽電池からの起電力をその場測定することでベータ線測定の模擬を行った。また、ガンマ線照射よりも高い線量に相当する照射が可能であるため、損傷評価のため積算線量 10 MGy 程度まで電子線照射を行い、理論的な予測モデルの妥当性を確認した。さらに、ベータ線による起電力特性の検証のために、<sup>90</sup>Sr 密封線源を用いた実証試験を行った。

### ② 中性子線照射試験（再委託先：理化学研究所）

各機関より提供されたデバイスを RANS にて照射した。遮蔽体内部（線量未評価）で照射を行うため、熱中性子量を実測評価した令和元年度に続き、高速中性子量の評価を行った。照射誘起電流測定その他、素子に含まれる元素、システム全体（基板、ハンダ、配線類、コネクタ類、電源、計測機器など）の中性子照射場における放射化検討を Ge 半導体検出器にて行った。安全と放射線計

測の両方の観点から、使用材料の検討、提言を行った。

実際の RANS における照射は 3 回のマシンタイムを確保して行い、デバイスの発電特性測定に約 20 時間のビーム供給を行った。照射位置を変更することにより、高速中性子量を変化させることが可能であることを示した。照射終了直後に残存する発電電流は、周辺およびデバイスの放射化によるものであることが判明した。

### ③ アルファ線照射試験（連携先：国立大学法人東北大学（以下、「東北大学」と略す。））

タンデム加速器で He イオンを加速しアルファ線照射試験および結果解析を行った。令和元年度に構築した、その場測定システムを利用し、InGaP、CIGS、CdTe 太陽電池のアルファ線誘起電流挙動を取得した。また、He イオンの連続照射を実施し、太陽電池のアルファ線誘起電流の劣化挙動を解析した。

タンデム加速器を用いて、アルファ線模擬の He イオンを InGaP、CdTe および CIGS 太陽電池に照射した。照射時に、放射線誘起電流と He イオンフラックスを取得した。また、He を長時間照射することにより、放射線誘起電流が照射フラックスにより劣化する挙動を取得した。

### (4) 線量解析システムの作成（連携先：東北大学）

令和元年度までのデータから、1. 不活性ガスパージ、2. トライアキシャルコネクタ、3. 電磁波シールドの仕様を搭載したセンサ外装が有効であるため、外装の設計および、試作を行った。また、試作した外装を用いて、太陽電池型センサの線量計としての特性を、ガンマ線照射試験により解明した。また、OSAM 用アルファ線、ベータ線、ガンマ線線量校正データによる高精度な線量解析プログラムを開発した。

センサ外装をジュラルミン等にて作製した。作製した外装にて、ガンマ線照射試験を実施し、その放射線誘起電流のガンマ線線量率依存性を取得した。高エネルギー He イオン、電子線、ガンマ線の照射試験の結果より、放射線誘起電流は線種によらず、素子吸収線量に依存して増加することが解明された。この傾向を利用し、アルファ線、ベータ線、およびガンマ線線量の解析プログラムを作成した。

### (5) 研究推進

1F 廃炉に関する学会・ワークショップ等に参加し、情報収集を実施した。研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、ニーズの把握・整理を行いながら研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

本課題におけるワークショップを東北大学にて開催し、SiC 線量計の専門家である QST 大島様、牧野様および、太陽電池の放射線発電効果をご研究されている JAXA 中村様に講演を頂いた。現場ニーズの把握のため、東京電力ホールディングス株式会社（以下、「東京電力」と略す。）の佐藤様、竹中様、および CLADS の奥村様との意見交換を行った。

令和 2 年度における研究成果は、学会での発表：10 件、査読付き英文誌：1 件である。特に査読付き英文誌として発刊された、「CdTe 太陽電池がガンマ線の線量計として使用可能であることを明らかにしたこと」は、本研究における重要な知見である。

## 1. はじめに

1Fの廃炉現場において炉内状況や建屋内状況を調査するうえでは、一般に製品化された放射線計測装置では性能・機能上の限界があり、1Fの環境に合わせ合理的に設計された線量計を開発することが不可欠である。1Fの廃炉作業での線量計の課題は大きく分けると、1. 約10 cmφ以下の小型化、2. 3 m以上先の遠隔地点でのその場測定、3. 10～1000 Gy/hの高レベル放射線環境測定、4. 残留水素を懸念した非電源化、5. 冷却水環境下での耐水性の5つである。

現行の線量計において、高レベル放射線環境を測定するものとして、電離箱がある。電離箱は、駆動するために、高電圧を印加する必要がある。しかし、1F環境下では、水環境や、残留水素の影響を考慮すると高電圧を印加することは望ましくない。そのため、非高電圧電源で駆動でき、かつ電離箱と同等の性能を有する線量計の開発が必要である。

これまでの研究で、太陽電池素子を応用した線量計は、電離箱と同様の高レベル放射線環境中の線量を測定できることが報告されている。また、原理上非電源駆動が可能で、薄膜化技術などの成熟により大きさも超小型軽量化が可能である。そのため、本研究ではこの太陽電池素子による線量測定技術を基盤とした画期的な放射線計測システムの実用化に向けて、研究開発を実施した。

太陽電池は現在、一般消費電力の発電素子として実用化されている。シリコン太陽電池は広く普及・使用されており、そのフォトダイオードは放射線検出器としても研究開発されている。しかし、我々が想定している高レベル放射線環境下で、シリコン太陽電池の線量計を使用した場合、放射線による損傷で、短時間で性能劣化を引き起こすことが先行研究で報告されている。そのため、1Fなどの高レベル放射線環境で使用する線量計としては、高い放射線耐性を有する太陽電池が求められる。

人工衛星に利用される宇宙太陽電池は宇宙空間の高レベル放射線に曝されるため、太陽電池の放射線耐性に関して、多くの研究が行われてきた。学校法人トヨタ学園豊田工業大学、山口らの報告では、宇宙太陽電池の中でもInGaP太陽電池およびCIGS太陽電池において、優れた放射線耐性を有していることが報告されている[3. 1-20 ページ文献 6]。また、半導体放射線検出用材料であるCdTeを用いたCdTe太陽電池も独立行政法人国立高等専門学校機構木更津工業高等専門学校（以下、「木更津高専」と略す。）の岡本らによってガンマ線に対して高い放射線耐性を有することが報告されている[3. 1-20 ページ文献 4]。それらの報告からInGaP、CIGSおよび、CdTe太陽電池は、現在の1Fのガンマ線環境において、数百kGy以上の積算線量においても、ほとんど劣化なく駆動することが期待される。そのため、本研究では、これらの太陽電池素子を用いた、高い放射線耐性を有する線量計システムの実用化に向けて研究開発を実施した。

本報告書では、本研究の研究期間（平成30年度～令和2年度）を通して得られた成果について報告する。

## 2. 業務計画

### 2.1 全体計画

#### 2.1.1 本業務の計画

本研究における線量計開発に関する概要図を図 2.1-1 に示す。開発される線量計の主な駆動時の概要に関しては、1. 放射線に曝された太陽電池に電流が発生する、2. 電流信号をケーブルで輸送する、3. 電流信号を解析することにより線量率を算出する、という過程がある。そのため、この線量計の開発では、①放射線耐性の高い太陽電池型放射線検出器素子の開発、②放射線環境下での A/D 変換データ輸送技術、③英知を結集した線量測定システムの作製の 3 つの研究課題がある。それぞれの課題に関する研究計画の概要図を図 2.1-2 に示す。

①放射線耐性の高い太陽電池型放射線検出器素子の開発では、太陽電池素子の開発が目的である。太陽電池は、放射線耐性の観点から、CdTe 太陽電池、InGaP 太陽電池、CIGS 太陽電池を選定している。研究分担は、CdTe 太陽電池の作製および評価に関しては、木更津高専（代表者：岡本）が担当している。InGaP および CIGS 太陽電池においては、JAXA（代表者：今泉）が担当している。3 年間の研究計画に関しては、1 年目は、太陽電池素子の開発および作製を行う。2 年目は、照射試験を実施し、その照射後の試料を解析する。3 年目は、照射に対しての挙動を得ることにより、線量計に最適な素子構造の改善を行う。

②放射線環境下での A/D 変換データ輸送技術の開発では、放射線環境下で電流信号を太陽電池から解析システムへ輸送することが目的である。研究分担は、京都大学（代表者：後藤）が担当している。3 年間の研究計画に関しては、1 年目は、電流計およびケーブルに関する選定を行う。2 年目は、ガンマ線環境下で照射試験を実施し、その際に発生するリーク電流やノイズについて解明する。3 年目は、照射試験の結果から最適な電流輸送方法に関して決定する。

③英知を結集した線量計システムの作製では、線量計試作機の作製が目的である。研究分担では、東北大学（代表者：奥野）が担当している。3 年間の研究計画に関しては、1 年目は、線量解析システムの準備を行う。2 年目は、準備した線量計作製の機材を用いて試作機の作製を行う。3 年目は、試作機より改善点を洗い出し、1F 環境下で使用可能な線量計の仕様を検討する。

1F 環境下で使用する線量計の開発において、燃料デブリから放出されるアルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子線に関する放射線挙動を実験的に解明するため、照射試験を実施する必要がある。研究分担は、アルファ線において東北大学（代表者：奥野）、電子線およびガンマ線において大阪府立大学、および中性子線において理化学研究所（代表者：小林）が実施している。1 年目は、線量計開発のための照射が可能な照射環境の整備を行う。2 年目および 3 年目は、太陽電池素子および線量測定システムへ照射試験を実施する。

本業務の全体計画図を図 2.1-3 に示す。この図に示すように、本研究では、(1) 太陽電池式放射線感受素子に関する研究、(2) 高耐放射線性微小電流計測システム開発、(3) 放射線照射実験、(4) 線量解析システムの作製、(5) 研究推進を計画している。(1) は CdTe 太陽電池については木更津高専、宇宙用太陽電池については JAXA が主として担当する。(2) は主として京都大学が担当する。(3) はガンマ線照射・電子線照射については大阪府立大学、中性子線照射については理化学研究所、アルファ線照射については東北大学が担当する。(4) については東北大学が担当する。研究推進では各年度に 2～3 回の研究推進委員会を開催し、プロジェクトのメンバーとの研究打合せを実施するとともに、CLADS の研究者などからの聞き取り調査等を行い、ニーズの把握を行う計画である。



図 2.1-1 線量計開発に関する概要図

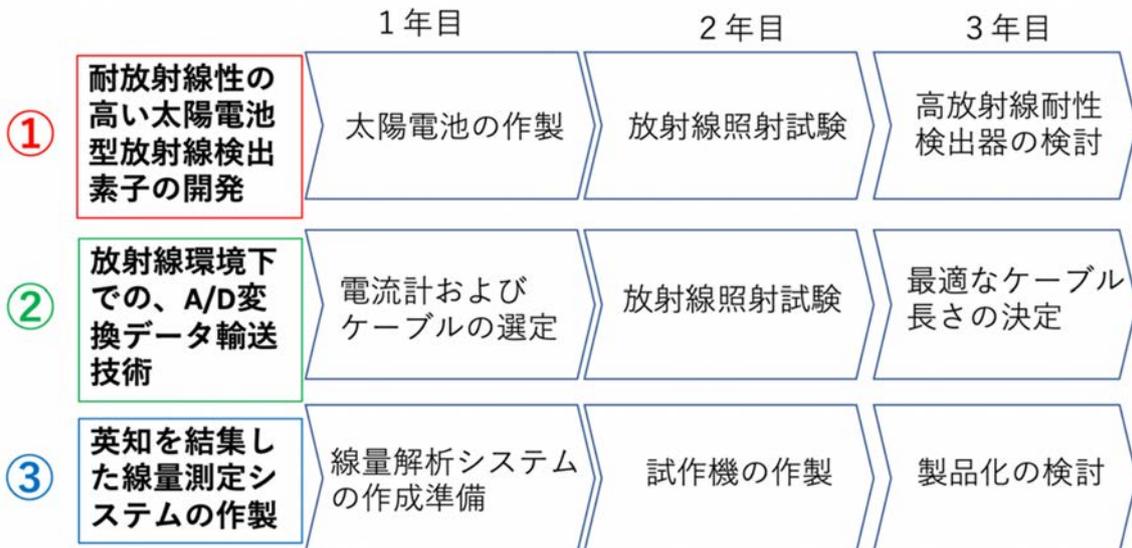


図 2.1-2 研究計画の概要図

	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度
(1) 太陽電池式放射線感受素子に関する研究		CdTe 太陽電池のフレキシブル化の検討 (木更津高専)	
		CdTe 太陽電池の作製と評価 (木更津高専)	
	宇宙用太陽電池の選定・作製	宇宙用太陽電池の選定・作製・評価 (JAXA)	
(2) 高耐放射線性微小電流計測システム開発	電流測定機器・ケーブルの選定・購入	ガンマ線環境中の電流測定機器・ケーブルの挙動の取得 (京都大学)	ガンマ線環境で駆動可能な電流測定機器・長距離信号輸送可能なケーブルの検討
(3) 放射線照射実験	ガンマ線・電子線照射試験の準備	ガンマ線・電子線照射試験の実施 (大阪府立大学)	
	中性子線照射試験の準備	中性子線による放射化の評価 (理化学研究所)	中性子線照射試験の実施
	アルファ線照射試験の準備	アルファ線照射試験の照射試験の実施 (原子力機構)	(東北大学)
(4) 線量解析システムの作製	線量解析システムの作成準備	線量測定システムの試作機の作製 (原子力機構)	製品規格の検討 (東北大学)
(5) 研究推進	研究推進委員会の開催	研究推進委員会の開催	研究推進委員会の開催

図 2.1-3 本業務の全体計画図

2.1.2 実施体制図

本業務の実施体制図を図 2.1-4 に示す。

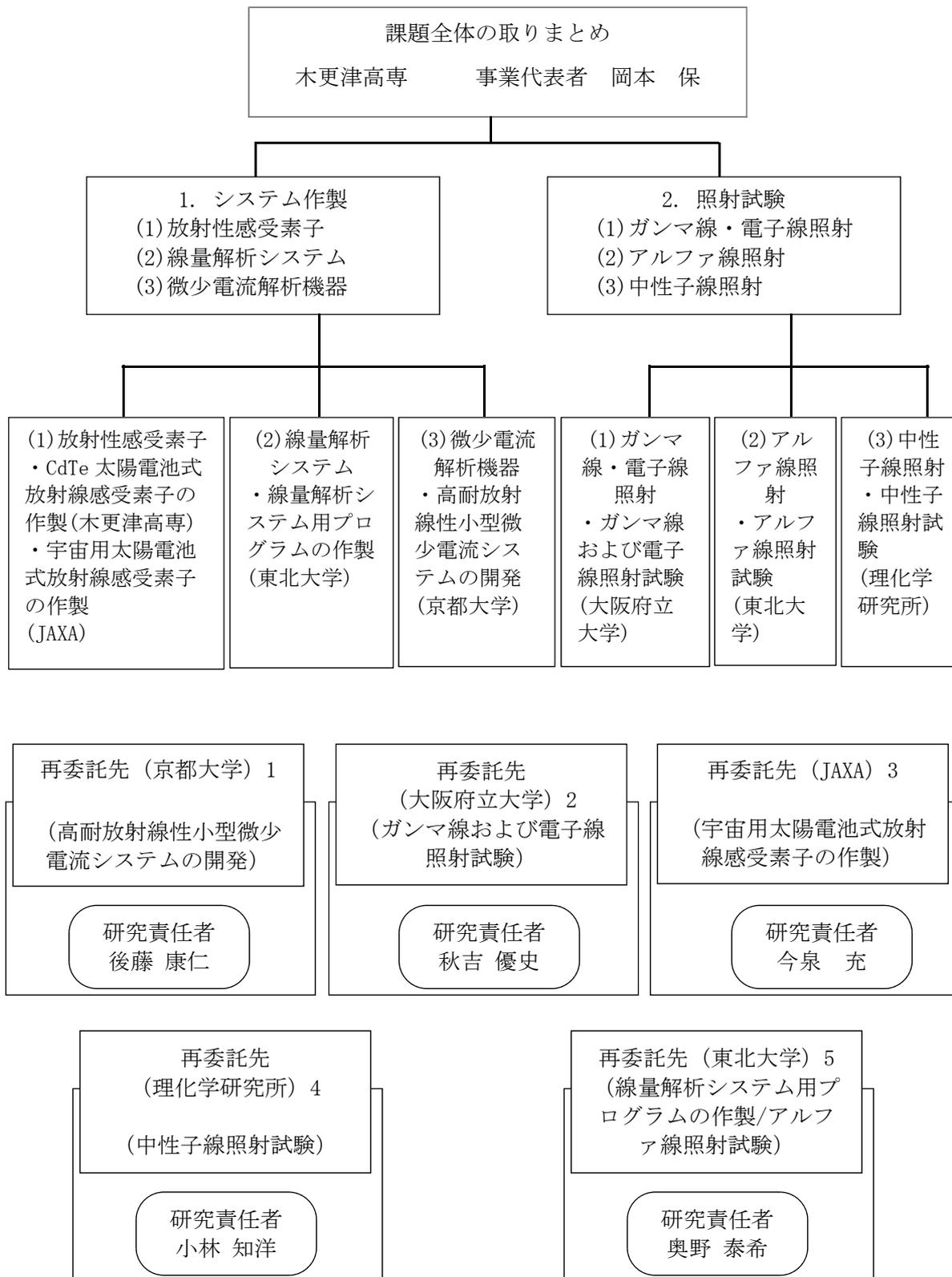


図 2.1-4 本業務の実施体制図

## 2.2 各年度の成果の目標および業務の実施方法

### 2.2.1 平成 30 年度の成果の目標および業務の実施方法

平成 30 年度の計画の概要は下記の通りである。

#### (1) 太陽電池式放射線感受素子に関する研究

##### ① CdTe 太陽電池式放射線感受素子の作製

放射線感受素子用に CdTe 太陽電池と同様の構造の作製・評価を行う。また、フレキシブル放射線感受素子の作製を目指した CdTe 太陽電池の作製・評価を行う。ガンマ線、電子線（ベータ線）、アルファ線、中性子線の照射試験を行い放射線感受素子としての問題点を明らかにするとともに耐性の評価を開始し、劣化機構の検討を試みる。

##### ② 宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定（再委託先：JAXA）

InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池の様々な構造の素子から宇宙工学で得られている知見を基に放射線耐性の高い太陽電池構造を有するものを選択し、以後供試体として用いる太陽電池サンプルとしてその母集団から出力性能分布が  $1\sigma$  以内に入るものを選定する。また、CdTe 太陽電池、InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池に対する湿度環境の影響を試験により明らかにする。

#### (2) 高放射線耐性微小電流計測システム開発（再委託先：京都大学）

放射線環境における、本研究課題で開発する各種検出器の性能を確認するとともに、測定系に生じる電離損傷ノイズや劣化の影響を評価するため、検出器における検出出力およびシールド伝送線における電離損傷ノイズ生成の基本特性を高精度の電流計測システムを用いて計測し、本計測システムにおいて適切な電流増幅器（プリアンプ）と伝送線路を選定する。また、選定したプリアンプと伝送線路を用いた遠隔計測システムを立ち上げ、非放射線環境における微小電流計測を行い、計測精度の確認を行う。

#### (3) 放射線照射実験

##### ① ガンマ線照射、電子線照射実験（再委託先：大阪府立大学）

コバルト 60 ガンマ線照射施設を利用して、ガンマ線照射環境下における太陽電池を用いた線量測定の測定環境を整備する。実際の太陽電池モジュールを用いた実証試験を行い、1 MGy 以上の大線量のガンマ線照射による線量増加に伴う影響評価を試みる。また、CW 加速器を用いて、電子線照射時の太陽電池からの起電力測定により、電子線（ベータ線）の線量測定を行うための測定環境を整備する。また、弾き出し損傷評価のためにも数十 keV 程度の低エネルギー電子線照射を行う。

##### ② 中性子線照射試験（再委託先：理化学研究所）

中性子束調整用照射治具の作製を行うとともに、エネルギー調整用減速材ブロックの調達を行う。材料照射を行うための準備として、器具作製、物品調達を行い、中性子エネルギースペクトルの取得を開始する。

##### ③ アルファ線照射試験（連携先：原子力機構）

タンデム加速器による He イオンの照射試験の利用申請を行う。He イオン照射により試料の放射化がないことを放射線シミュレーションにより解析する。

## (4) 線量解析システムの作製（連携先：原子力機構）

現場技術員の作業では、様々な使用シーンが想定されるため、高耐衝撃性を持つ線量解析用 PC 等を導入するとともに信号を取得するためのソフトウェアの作成を行う。

## (5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、ニーズの把握・整理を行いながら研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

## 2.2.2 令和元年度の成果の目標および業務の実施方法

令和元年度の計画の概要は下記の通りである。

## (1) 太陽電池式放射線感受素子に関する研究

## ① CdTe 太陽電池式放射線感受素子の作製

平成 30 年度の結果を踏まえて、放射線感受素子用 CdTe 太陽電池の成膜条件、構造の最適化を行う。また、フレキシブル放射線感受素子の作製を目指したサブストレート型 CdTe 太陽電池の作製・評価を行う。さらに、作製した試料のガンマ線、ベータ線、アルファ線、中性子線の照射試験を行うとともに、放射線耐性の評価を行う。

## ② 宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定（再委託先：JAXA）

平成 30 年度に選択した耐放射線性の高い太陽電池構造を有する素子について、ベータ線（電子線）、ガンマ線、およびアルファ線（He イオン）を照射し、光電流－電圧特性を取得する。大阪府立大学にて電子線およびガンマ線を、また原子力機構ないし QST 高崎研にてアルファ線（He イオン）を照射する。これらの太陽電池の照射試験前後の光電流－電圧特性を取得し、エネルギーおよびフルエンスごとに光電流－電圧特性の結果を分類する。照射前後の太陽電池性能の低下率を解析することにより、耐放射線性に関するデータを取得する。

## (2) 高耐放射線性微小電流計測システム開発（再委託先：京都大学）

平成 30 年度に構築した検出器・増幅器と伝送線路を用いて、放射線環境下における検出器出力の増幅実験を行う。放射線環境における実測データをもとに本計測システムの総合的な遮蔽構造の設計・製作を行う。検出器と増幅器の間が最も放射線に曝される部分になるので、この部分をどのように遮蔽するかを検討する。また、検出器側で電極の取り方等の工夫により電離損傷ノイズの低減の可能性が見いだせれば、電極構造を検討する。

## (3) 放射線照射実験

## ① ガンマ線照射、電子線照射実験（再委託先：大阪府立大学）

コバルト 60 照射施設により、大線量率（最大 3 kGy/h 程度まで）から低線量率（数 mGy/h 程度）でのガンマ線照射時の太陽電池起電力測定を行い、出力電圧の線量率依存性を広い線量率範囲において評価する。照射はプールを用いた水中照射を行うことで、1F 環境を模擬する。それに先立ち、固体線量計の温度依存性を評価した上で照射場の温度分布評価を行い、線量率評価を行う。CW 加速器で 60 keV 程度の低エネルギーから 500 keV 程度までの範囲でビーム電流値を変えて電子線照射を行い、太陽電池からの起電力をその場測定することでベ

ータ線測定の実験を行う。さらに、それぞれの太陽電池の構成元素ごとの弾き出し閾値エネルギーを評価し、弾き出し損傷評価を行う。損傷評価については JAXA 側が実施する。

② 中性子線照射試験（再委託先：理化学研究所）

RANS のパルス長と周波数を調整することにより、中性子束を最大化する試みを行う。平成 30 年度に引き続き、減速材厚さを変化させた場合の中性子スペクトルの変化を評価し、1F 環境を模擬するための条件を検討する。また、放射化による OSAM システムへの影響評価を行う。

③ アルファ線照射試験（連携先：原子力機構）

タンデム加速器で He イオンを加速しアルファ線照射試験および結果解析を行う。そのために照射設備に微小電流測定装置を設置し、その場測定システムを構築する。アルファ線照射試験を実施し、アルファ線照射による太陽電池のキャリア生成量を解析する。

(4) 線量解析システムの作成（連携先：原子力機構）

簡易的に OSAM システムのハードウェアを組み上げ、選定されたシステム制御用のソフトウェアを利用し、線量解析用ソフトウェアの Ver. 1 を作成する。ソーラーシミュレーターを利用して簡易的な動作試験を実施し、ソフトウェアとハードウェアに動作の障害がないかをチェックする。放射線環境でのその場測定の前段階として、計測中の不具合を解明するため、可視光を用いて、電流量から線量モニターの数値の動作を確認し、不具合がないかチェックする。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、ニーズの把握・整理を行いながら研究を進める。福島にて研究会を開催し、廃炉、太陽電池、および線量計に関係する専門家を招くことによって、1F 廃炉に使用できる線量計にするための課題点をより明白にする。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

2.2.3 令和 2 年度の成果の目標および業務の実施方法

令和 2 年度の計画の概要は下記の通りである。

(1) 太陽電池式放射線感受素子に関する研究

① CdTe 太陽電池式放射線感受素子の作製

令和元年度の結果を踏まえて、放射線感受素子用 CdTe 太陽電池の作製を行う。また、フレキシブル放射線感受素子の作製を目指したサブストレート型 CdTe 太陽電池の作製を行う。作製した試料のガンマ線、ベータ線、アルファ線、中性子線の照射試験を行い、誘起電流および耐性の評価を行う。さらに、ガンマ線に対する感度を向上させる方法を検討する。

② 宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定（再委託先：JAXA）

令和元年度に取得した、検知素子候補である InGaP、CIGS 太陽電池の耐放射線性試験の結果に基づき、更なる耐性向上が期待されると判断した InGaP 太陽電池素子について、構造の改良を提案し、素子を試作する。この改良版 InGaP 太陽電池に対し、電子線およびアルファ

線 (He イオン)、また必要に応じてガンマ線を照射し、その前後で光電流－電圧特性を取得する。この試験結果について令和元年度までと同様な解析を行い、改良効果を判定する。

また、令和元年度までに取得、および令和2年度に取得した放射線照射試験データを基に、宇宙用太陽電池の放射線劣化予測手法として確立されている DDD 法を応用し、原子炉環境でも太陽電池が劣化予測できるような手法を確立する。

### (2) 高耐放射線性微小電流計測システム開発 (再委託先：京都大学)

令和元年度に検討した遮蔽構造を持つ微小電流計測システムを用いた際にケーブルで発生する電離損傷ノイズを評価する。得られた値から、太陽電池センサ出力に対する電離損傷ノイズの影響を評価し、測定できる線量率下限を評価する。最終目標である 80 m 以上の長さのケーブルを用いて放射線環境下においてセンサ出力の伝送特性の評価を行い、構築した微小電流計測システムが廃炉作業において現実的に利用できるかどうかの総合的な評価を行う。

### (3) 放射線照射実験

#### ① ガンマ線照射、電子線照射実験 (再委託先：大阪府立大学)

令和元年度に開発した照射容器とコバルト 60 照射施設により、大線量率 (最大 10 kGy/h 程度まで) から低線量率 (数 mGy/h 程度) でのガンマ線照射時の太陽電池起電力測定を行い、出力電圧の線量率依存性を広い線量率範囲に於いて評価する。また、1 MGy 程度までの積算の線量による起電力特性変化を評価することで耐性評価を行う。これにより、1F 内の過酷環境における太陽電池の線量計としての信頼性を確認する。

CW 加速器で 60 keV 程度の低エネルギーから 500 keV 程度までの範囲でビーム電流値を変えて電子線照射を行い、太陽電池からの起電力をその場測定することでベータ線測定の模擬を行う。また、ガンマ線照射よりも高い線量に相当する照射が可能であるため、損傷評価のため積算線量 10 MGy 程度まで電子線照射を行い、理論的な予測モデルの妥当性を確認する。さらに、ベータ線による起電力特性の検証のために、<sup>90</sup>Sr 密封線源を用いた実証試験を行う。

#### ② 中性子線照射試験 (再委託先：理化学研究所)

各機関より提供されたデバイスを RANS にて照射する。遮蔽体内部 (線量未評価) で照射を行うため、熱中性子量を実測評価した令和元年度に続き、高速中性子量の評価を行う。照射誘起電流測定その他、素子に含まれる元素、システム全体 (基板、ハンダ、配線類、コネクタ類、電源、計測機器など) の中性子照射場における放射化検討を Ge 半導体検出器にて行う。安全と放射線計測の両方の観点から、使用材料の検討、提言を行う。

#### ③ アルファ線照射試験 (連携先：東北大学)

タンデム加速器で He イオンを加速しアルファ線照射試験および結果解析を行う。令和元年度に構築した、その場測定システムを利用し、InGaP、CIGS、CdTe 太陽電池のアルファ線誘起電流挙動を取得する。また、He イオンの連続照射を実施し、太陽電池のアルファ線誘起電流の劣化挙動を解析する。

(4) 線量解析システムの作成（連携先：東北大学）

令和元年度までのデータから、1. 不活性ガスパージ、2. トライアキシャルコネクタ、3. 電磁波シールドの仕様を搭載したセンサ外装が有効であるため、外装の設計および、試作を行う。また、試作した外装を用いて、太陽電池型センサの線量計としての特性を、ガンマ線照射試験により解明する。また、OSAM用アルファ線、ベータ線、ガンマ線線量校正データによる高精度な線量解析プログラムを開発する。

(5) 研究推進

1F 廃炉に関する学会・ワークショップ等に参加し、情報収集を実施する。研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、ニーズの把握・整理を行いながら研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

3. 業務の実施内容および成果

3.1 太陽電池式放射線感受素子に関する研究【平成30年度～令和2年度】

3.1.1 CdTe 太陽電池式放射線感受素子の作製

(1) CdTe 太陽電池の作製と評価

放射線感受素子用に CdTe 太陽電池の作製と評価を行った。まず、ガンマ線、電子線(ベータ線)、アルファ線、中性子線の照射試験を実施するために、通常の CdTe 太陽電池と同じ構造であるスーパーストレート型太陽電池の作製と評価を行った。

スーパーストレート型 CdTe 太陽電池の構造を図 3.1.1-1 に示す。この構造の太陽電池の作製方法は次の通りである[1] [2]。ITO 付きのガラス基板上 (Corning Eagle XG あるいは Corning1737) に化学気相成長法 (以下、「CVD 法」と略す。) により CdS 膜を堆積した。CVD 法による CdS の成膜では、原料にジエチルジチオカルバミン酸カドミウムを用いて、大気中で堆積した。基板および原料の加熱にはホットプレートを用いた。基板温度は 420~440 °C とした。CdS の厚さは 60~100 nm 程度である。次に近接昇華法 (以下、「CSS 法」と略す。) により CdTe の成膜を行った。CSS 法とは、高温に保った化合物のソース (この場合、CdTe) と、ソースより数十°C低い温度に保持した基板を 2 mm 程度の間隔で近接して向かい合わせに配置し、ソースを昇華させて基板上に堆積させる方法である。今回は Ar 雰囲気、1 Torr 程度の減圧で成膜した。CSS 法は、比較的簡単な操作によって結晶膜を高速で堆積できる (数 μm/min) ため、低コスト化が図れることが利点としてあげられる。基板温度は 400~600 °C の範囲で変化させて成膜を行った。CdTe 層の膜厚は 1~10 μm 程度である。CdTe 膜の成膜後に、CdTe 層の高品質化のために CdCl<sub>2</sub> 処理を行った。CdCl<sub>2</sub> 処理のメカニズムは、まだ十分に明らかにされていないが、粒界の不活性化が高品質化の主要因であると考えている。CdTe 膜に

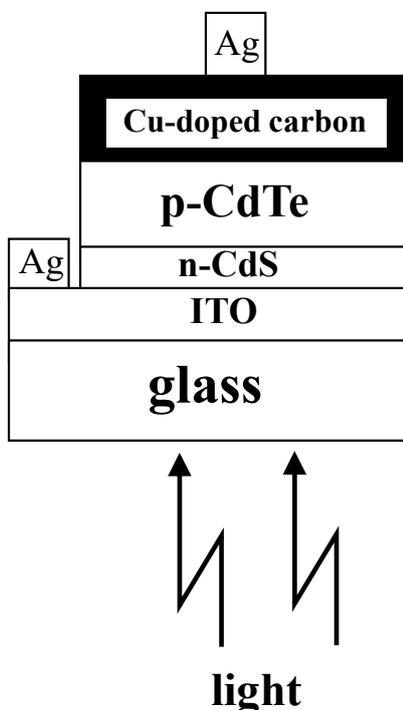


図 3.1.1-1 スーパーストレート型 CdTe 太陽電池の構造

CdCl<sub>2</sub>水溶液を塗布した後に 415 °C で 15 分間熱処理を行った。さらに、Cu 添加カーボン電極をスクリーン印刷により形成し、CdTe の p 形化のために Cu を拡散させるための熱処理を施した。熱処理温度は 325 °C である。

この構造の太陽電池の作製を行い、太陽電池特性の測定を行ったところ、特に短絡光電流密度について 24~25 mA/cm<sup>2</sup> 程度の値が再現性よく得られた。図 3.1.1-2 に典型的なスーパーストレート型 CdTe 太陽電池の電流電圧特性を示す。

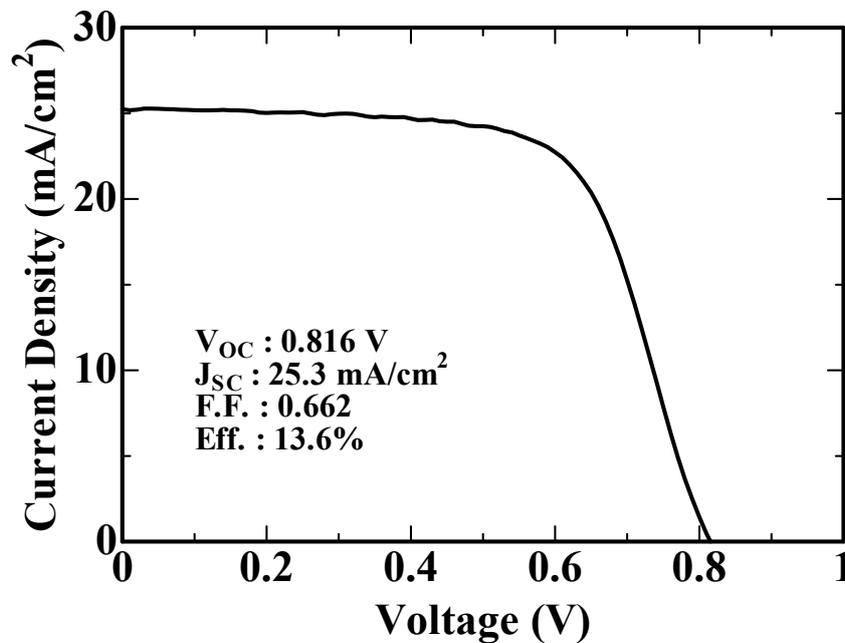


図 3.1.1-2 典型的なスーパーストレート型 CdTe 太陽電池の電流電圧特性

さらに、フレキシブル放射線感受素子の作製を目指して、従来のスーパーストレート型とは逆の構造を有するサブストレート型 CdTe 太陽電池の作製・評価を行った。本研究では、図 3.1.1-3 に示すような Ag/ZnO:Al/CdS/CdTe/カーボン基板という構造のサブストレート型 CdTe 太陽電池を作製した[3]。CSS 法による CdTe 膜の成膜後、415 °C で CdCl<sub>2</sub> 処理を行った。その後、Cu 添加したジエチレングリコールモノブチルエーテル (DEGBE) を塗布し (Cu 密度 50 ppm)、325 °C で熱処理することで CdTe 層への Cu 添加を行った。次に CVD 法により 420 °C で 80 nm 程度の CdS 膜を成膜した。次に CdS/CdTe 界面の混晶化促進のために熱処理 (600 °C での face-to-face アニールおよび 2nd CdCl<sub>2</sub> 処理) を行った。さらに 2nd Cu ドーピング (Cu 密度 1,400 ppm) を行った。CdS 成膜後の熱処理を行った場合、行わなかった場合の試料を作製し、これらの熱処理の効果を検討した。

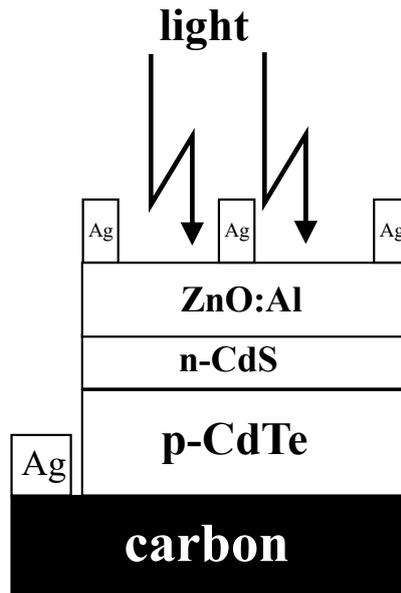


図 3. 1. 1-3 サブストレート型 CdTe 太陽電池の構造

図 3. 1. 1-4 に (a) face-to-face アニール、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理のどちらも行わなかった場合、(b) face-to-face アニールを行わず、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理のみを行った場合、(c) face-to-face アニールのみを行い、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理を行わなかった場合、(d) face-to-face アニール、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理をともに行った場合の I-V 特性を示す。

(a)～(d)は 2nd Cu ドーピングを行っている。比較のために、2nd Cu ドーピングを行わない場合で、(i) face-to-face アニール、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理のどちらも行わなかった場合、(ii) face-to-face アニールおよび 2nd CdCl<sub>2</sub> 処理をともに行った場合の結果を破線で示す。

まず、(i)と(a)を比較すると、混晶化促進のための熱処理を行わない場合でも、2nd Cu ドーピングの効果によりセル特性がわずかに改善している。また、(a)～(c)を比較すると face-to-face アニール、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理のいずれかのみでも特性が改善している。しかし、(d)に比べると変換効率は非常に低く、face-to-face アニール、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理の両方が高効率化のために必要であることがわかる。

図 3. 1. 1-5 に図 3. 1. 1-4 に示した試料の分光感度特性を示す。(ii)の場合のみ、800 nm 付近の感度が増加している。これは、熱処理により Cu アクセプタが不活性化し、CdS/CdTe 付近の内部電界が弱まり、裏面電極付近の内部電界でキャリアが収集されていることを示唆している。(a)～(d)については、2nd Cu ドーピングによるアクセプタ密度の増加によりそのような現象は見られていない。

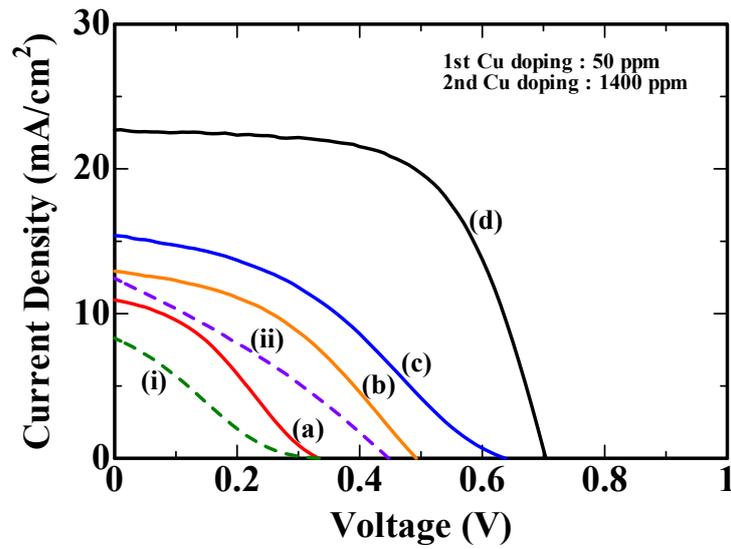


図 3.1.1-4 熱処理効果の確認

- (a) face-to-face アニール、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理のどちらも行わなかった場合
- (b) face-to-face アニールを行わず、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理のみを行った場合
- (c) face-to-face アニールのみを行い、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理を行わなかった場合
- (d) face-to-face アニール、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理をともに行った場合のサブストレート型 CdTe 太陽電池の I-V 特性

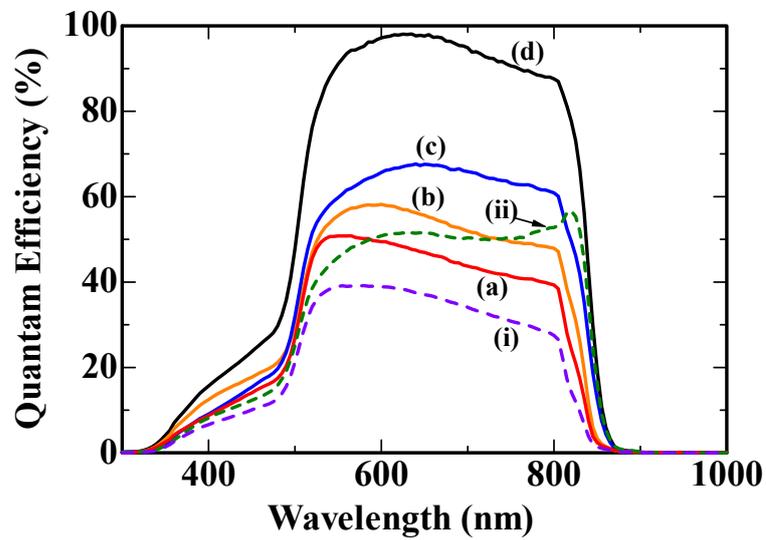


図 3.1.1-5 分光感度特性

- (a) face-to-face アニール、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理のどちらも行わなかった場合
- (b) face-to-face アニールを行わず、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理のみを行った場合
- (c) face-to-face アニールのみを行い、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理を行わなかった場合
- (d) face-to-face アニール、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理をともに行った場合のサブストレート型 CdTe 太陽電池の分光感度特性

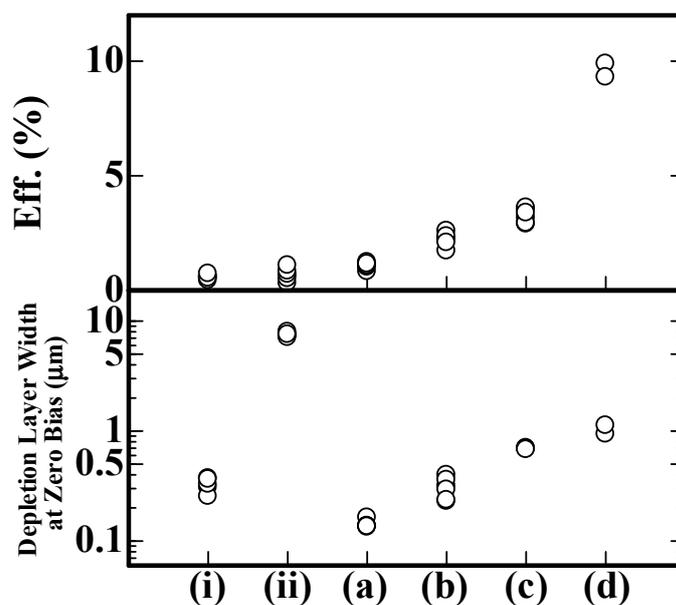


図 3. 1. 1-6 サブストレート型 CdTe 太陽電池のゼロバイアス時の空乏層幅および変換効率

face-to-face アニールおよび 2nd CdCl<sub>2</sub> 処理の効果を明らかにするために、C-V 測定を行った。それぞれの試料のキャリア密度を比較するために、ゼロバイアス時の空乏層幅を比較した。図 3. 1. 1-6 に各試料のゼロバイアス時の空乏層幅および変換効率を示す。これまでに報告した通り、2nd Cu ドーピングを行わない場合で (i) face-to-face アニール、2nd CdCl<sub>2</sub> 処理のどちらも行わなかった場合、(ii) face-to-face アニールおよび 2nd CdCl<sub>2</sub> 処理をともに行った場合の結果を見ると、face-to-face アニールおよび 2nd CdCl<sub>2</sub> 処理の効果で空乏層幅が大幅に増加している。これは熱処理により Cu アクセプタが拡散あるいは不活性化したためと考えられる。CdS/CdTe 界面混晶化により変換効率がわずかに増加はしているが、2 % 以下の変換効率である。これはアクセプタ密度の減少が原因であると考えられる。そのため、(d) では 2nd Cu ドーピングの効果で変換効率が大幅に増加したと考えられる。(a)、(b)、(c) では (d) に比べると空乏層幅が小さくなっている。これは、熱処理によるアクセプタ密度の低下の程度が (d) よりも小さく、同条件で 2nd Cu ドーピングを行ったことにより過度に Cu が添加されたためと考えられる。そのために (d) に比べると変換効率が低くなったと考えることもできる。

face-to-face アニールおよび 2nd CdCl<sub>2</sub> 処理をともに行い、2nd Cu ドーピングを行うことで、現在までのところサブストレート型 CdTe 太陽電池で変換効率 9.9 % (J<sub>sc</sub> : 22.6 mA/cm<sup>2</sup>、V<sub>oc</sub> : 0.704 V、FF : 0.619) を達成している [3]。

次に、スーパーストレート型 CdTe 太陽電池について、主にガンマ線に対する感度を向上させるための成膜条件、構造の最適化を検討した。CdTe 太陽電池を用いた放射線検出器では太陽電池の原理と同様に、素子の内部電界により発生する電流を測定するため、電圧の印加が不要で電源レスとできることが長所となるがガンマ線を吸収する CdTe 膜厚が通常の半導体

放射線検出器の膜厚（400  $\mu\text{m}$  以上）よりかなり薄くなるため、感度が低くなる。そのため、感度を向上するためには CdTe 太陽電池の CdTe 膜厚を大きくした上で空乏層幅を大きくすることが有効であると考えられる。現状では Cu ドーピングにより CdTe 層を p 形化しており、アクセプタ密度は  $10^{14}\sim 10^{15}\text{ cm}^{-3}$  程度で、空乏層幅は 2  $\mu\text{m}$  程度である。Cu ドーピングを行わずに CdTe 層のアクセプタ密度の低減を試みた。図 3.1.1-7 に Cu ドーピングを行った場合および行わなかった場合のスーパーストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な電流電圧特性を示す。また、図 3.1.1-8 に Cu ドーピングを行った場合および行わなかった場合のスーパーストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な分光感度特性を示す。容量電圧測定 ( $C-V$ 測定) を行ったところ、Cu ドーピングを行わない場合にはほぼ全域が空乏化していた。そのため、アクセプタ密度を見積もることはできなかったが、Cu ドーピングを行った場合に比べて確実にアクセプタ密度は低減し、空乏層幅は増加している。図 3.1.1-7 の電流電圧特性を見ると、Cu ドーピングを行わなかった場合には短絡光電流密度がかなり低下している。図 3.1.1-8 の分光感度特性によると、Cu ドーピングを行わなかった場合には 800 nm 以下の光に対する感度が非常に低く、800 nm 以上の長波長の光で感度の増加が見られている。これはアクセプタ密度を低減させて空乏層幅を広げると内部電界が弱くなり、キャリア収集効率が低下し、侵入深さの大きい長波長の光では裏面電極付近 (CdTe/カーボン電極界面付近) の電界でキャリアが収集されていることを示している。これらの結果より、CdTe 太陽電池ではアクセプタ密度の制御による空乏層増加によるガンマ線の感度の向上は困難であると考えられる。ガンマ線感度向上のために別の手法を検討する必要があると考えられる。

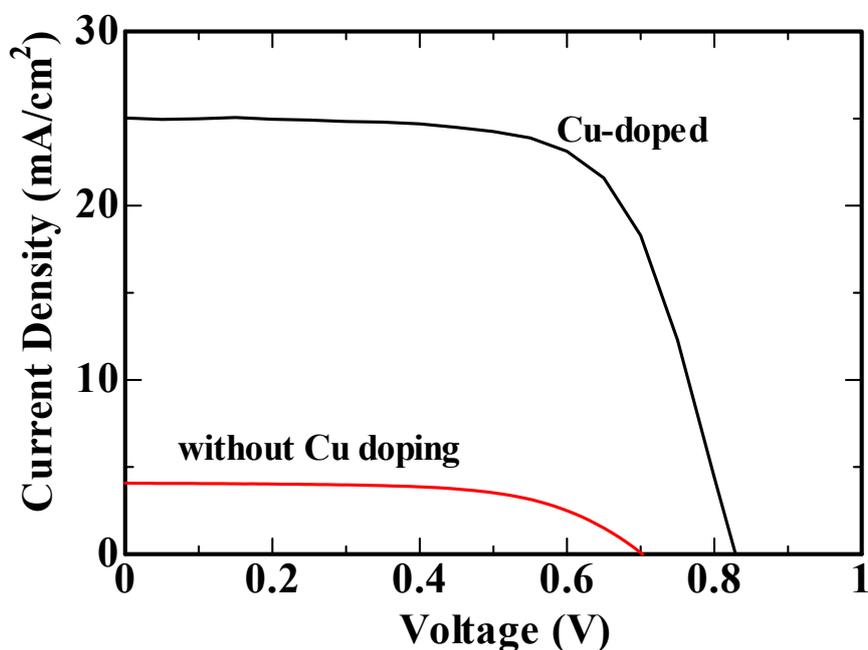


図 3.1.1-7 Cu ドーピングを行った場合および行わなかった場合のスーパーストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な電流電圧特性

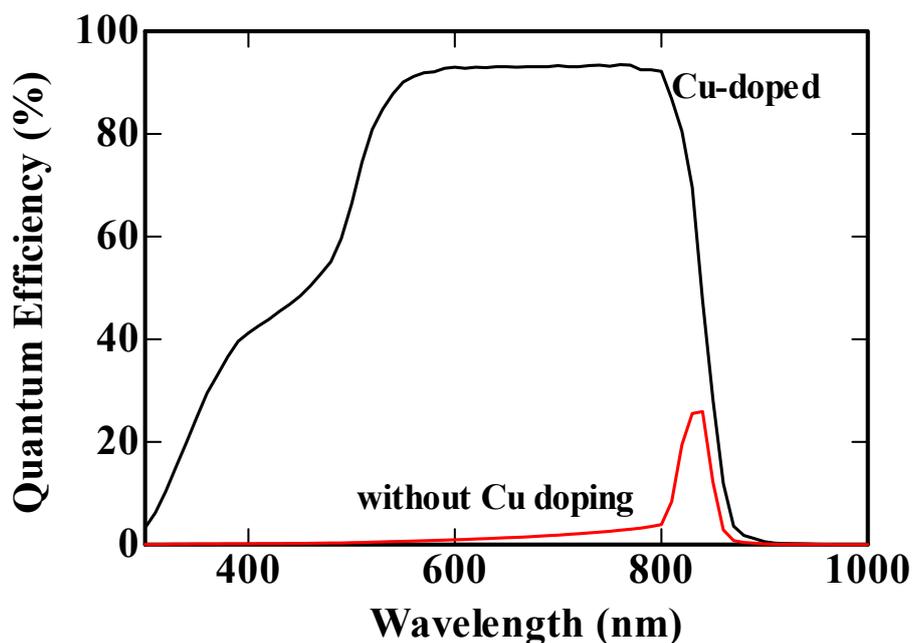


図 3.1.1-8 Cu ドーピングを行った場合および行わなかった場合のスーパーサブストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な分光感度特性

これらの試料へのアルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子線照射について問題点を明らかにするために照射試験を実施した。アルファ線およびベータ線照射試験についてはむき出し構造を有するサブストレート型 CdTe 太陽電池を用いて実施した。アルファ線照射試験の試験方法、結果を一括して 3.3 節で述べる。

#### (2) CdTe 太陽電池へのガンマ線および中性子線照射の影響

図 3.1.1-9 にスーパーサブストレート型 CdTe 太陽電池のコバルト 60 ガンマ線照射試験の結果を示す。この実験はこれまでの耐放射線撮像素子についての研究プロジェクトの実験を本研究にて継続して実施したものである[4]。この結果より、ガンマ線の線量が 3 MGy を超えても、初期のガラスの着色による短絡光電流の低下を除くと大きな劣化が見られていないことがわかる。0.5 MGy 以下の範囲で曲線因子の改善がみられているが、これはガンマ線吸収による CdTe 層への欠陥生成によるキャリア密度増加のためと考えられ、ガンマ線照射により欠陥は形成されていると考えられる。しかし、CdS/CdTe ダイオードの特性には大きな影響は受けていないと考えられる。

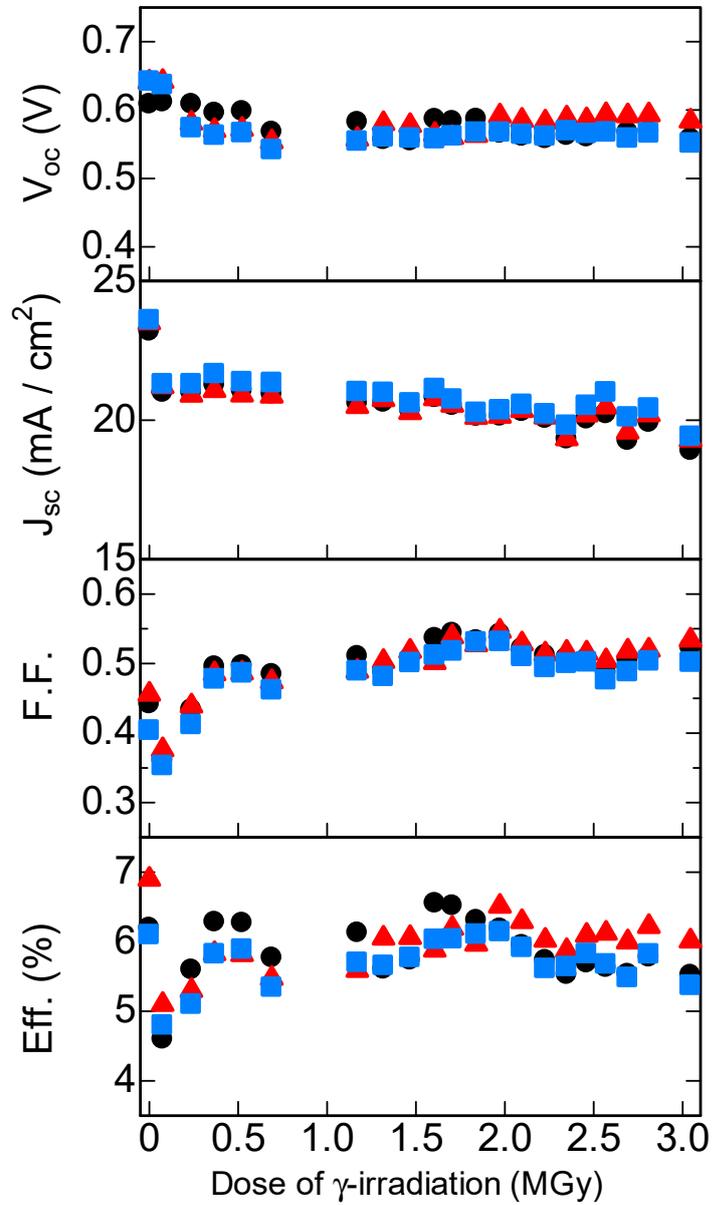


図 3.1.1-9 スーパーストレート型 CdTe 太陽電池の特性とコバルト 60 ガンマ線照射量との関係

次に、中性子線環境中での挙動を検討した。理化学研究所のRANSによりCdTe太陽電池に中性子線を照射し、誘起電流を計測した。中性子線はBeターゲットに高速の陽子を衝突させることにより発生させており、中性子線と同時にガンマ線も発生している。陽子線電流は15~35  $\mu\text{A}$ 程度の範囲で変化させた。誘起電流の測定にはピコアンメータ iDC12 (泰榮エンジニアリング株式会社、最小分解能 1 pA) を用いた。

RANSでは中性子線を発生させると同時にガンマ線も発生する。そこで、中性子線とガンマ線の効果を分離するために、CdTe太陽電池を厚さ20 cmのPbブロックで遮って誘起電流の測定を行った。結果を図3.1.1-10に示す。Pbブロックなしの場合には誘起電流が観測されているが、Pbでガンマ線を遮った場合には誘起電流は観測されていない。このことより、CdTe太陽電池については中性子線にはほぼ感度がないことがわかった。

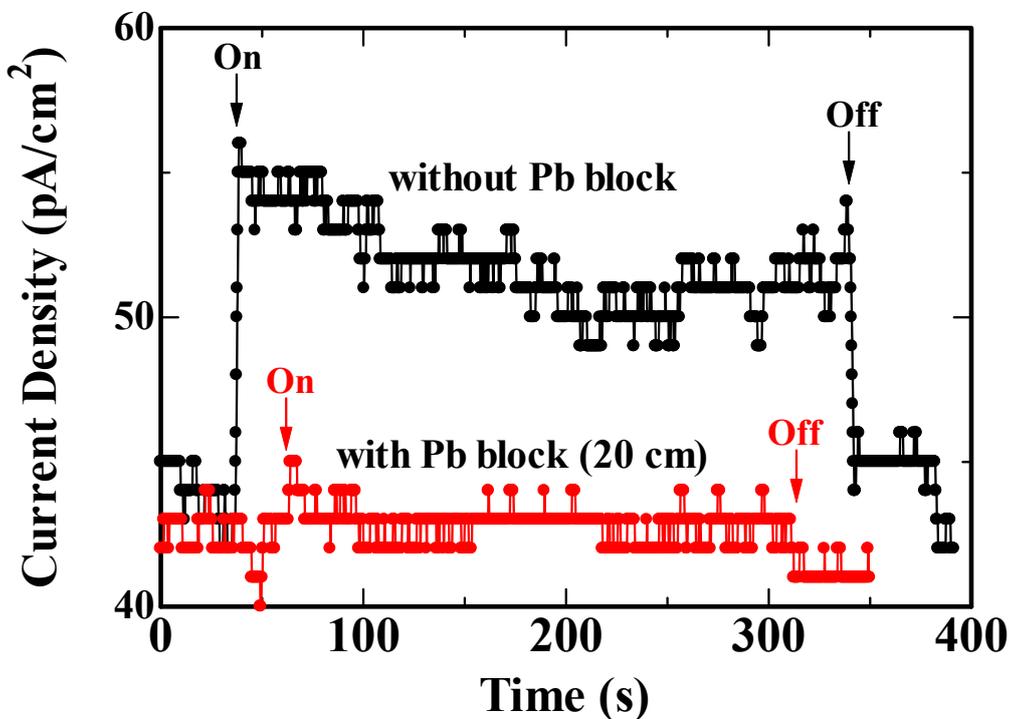


図 3.1.1-10 中性子線照射時の Pb ブロックありの場合、なしの場合の CdTe 太陽電池の誘起電流

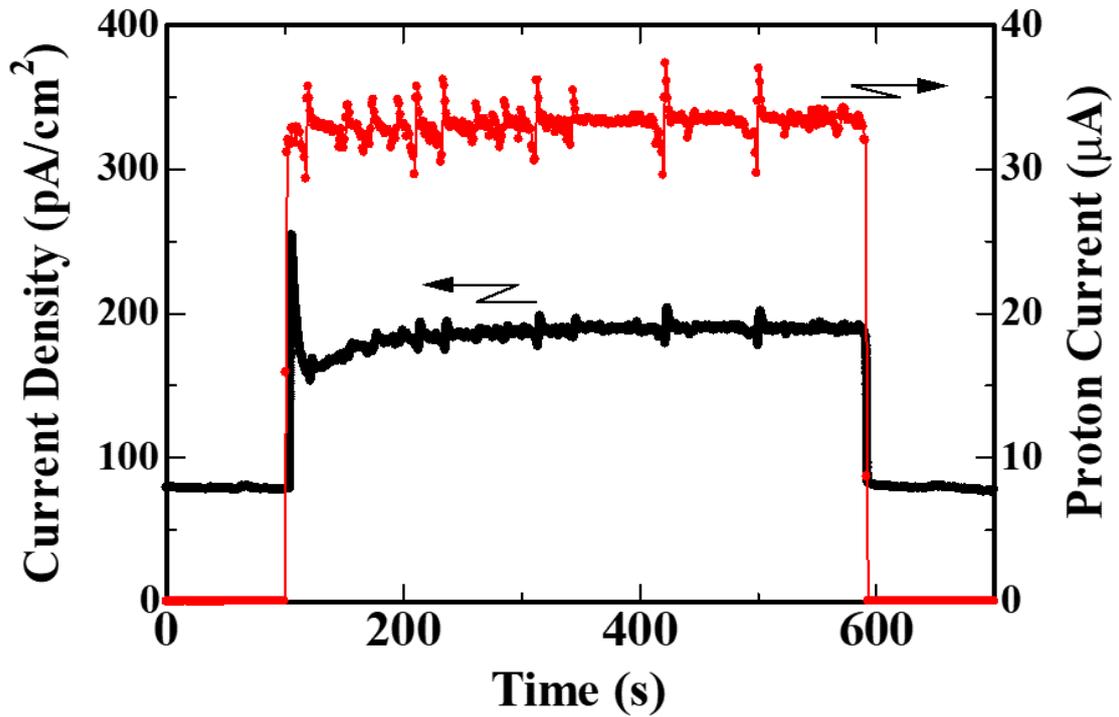


図 3.1.1-11 観測された CdTe 太陽電池の電流と陽子線電流

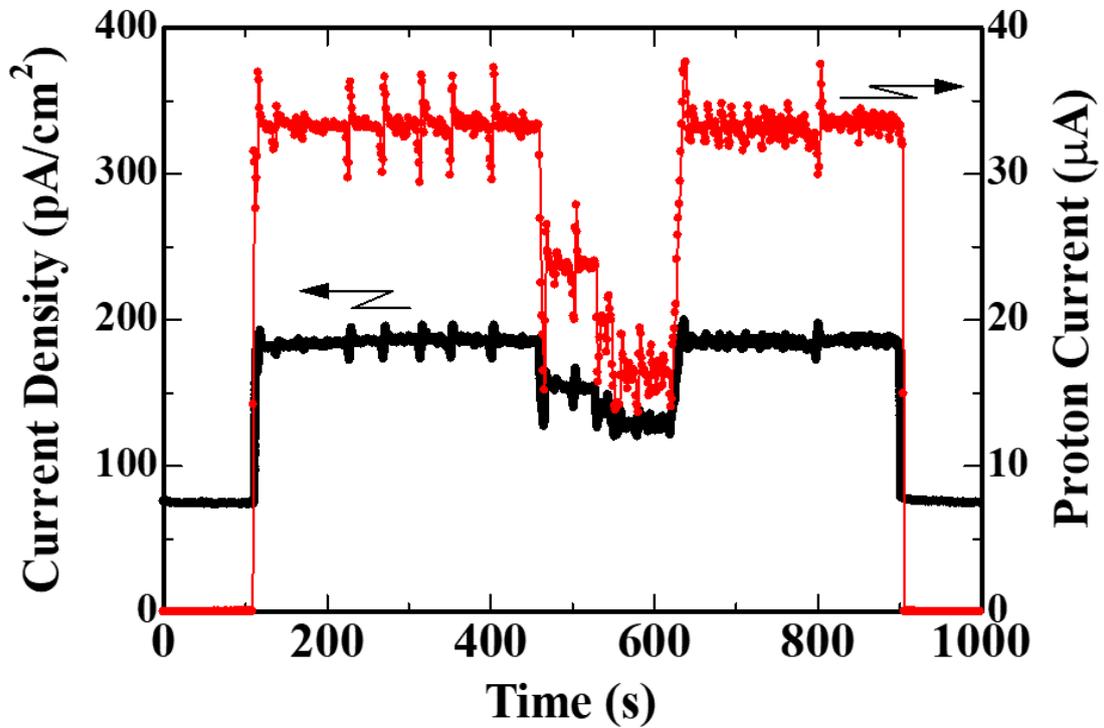


図 3.1.1-12 陽子線電流を変動させた場合の CdTe 太陽電池の誘起電流と陽子線電流

CdTe 太陽電池が中性子線に感度がないことが明らかとなったことから、RANS の中性子線と同時に発生するガンマ線を利用して CdTe 太陽電池のガンマ線に対する挙動を検討した。図 3.1.1-11 に観測された CdTe 太陽電池の電流と陽子線電流を示す。陽子線電流を流した瞬間にオーバーシュートが観測されているが、それ以外はほぼ安定して一定の誘起電流が観測されている。また、電流のリップルまでも CdTe 太陽電池の電流信号は応答していることがわかる。図 3.1.1-12 に陽子電流を変動させた場合の CdTe 太陽電池の電流と陽子線電流を示す。陽子線の電流量に対して、CdTe 太陽電池の電流挙動も変化しており、応答性よくガンマ線を検出できていることがわかる。

図 3.1.1-12 の結果より、陽子線電流と誘起電流の関係をプロットした結果を図 3.1.1-13 に示す。図 3.1.1-11 のオーバーシュートのように、陽子線を on にした直後および off にした直後は出力が不安定であるため、陽子線を on にした直後 (100~120 s) および off にした直後 (900~910 s) のデータは除外した。この図より、誘起電流は陽子線電流にほぼ比例していることがわかる。中性子発生は  $\text{Be}(p, n)\text{B}$  反応によるため、中性子線量と陽子線電流は比例する。ほとんどのガンマ線は  $(n, \gamma)$  反応によって中性子捕獲時に発生するため、ガンマ線量と中性子線量はほぼ比例する。このため、陽子線電流と発生するガンマ線の線量率はほぼ比例し、誘起電流とガンマ線の線量率は比例していることとなる。以前の測定結果より、CdTe 太陽電池のガンマ線感度は 1 kGy/h 当たり約 100 nA/cm<sup>2</sup> 程度である。また、陽子線電流が約 35  $\mu\text{A}$  のときガンマ線の線量率は 0.3 Gy/h 程度であると見積られた。陽子線電流が約 35  $\mu\text{A}$  のときの CdTe 太陽電池の誘起電流は 0.1 nA/cm<sup>2</sup> 程度であり、ガンマ線に対する感度は以前の結果とオーダーは一致しているといえる。これらの結果より、高線量率の中性子環境下でも小ノイズで応答性良くガンマ線検出ができることを示していると考えられる。また、0.1 Gy/h 程度の線量率のガンマ線も検出可能であることを示していると考えられる。

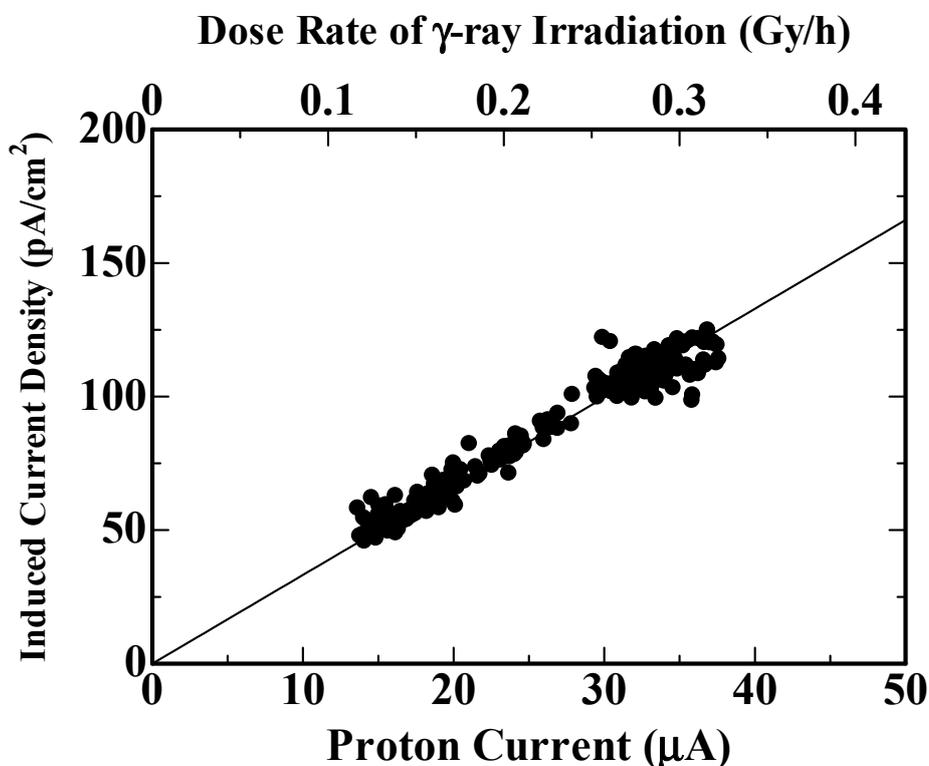


図 3.1.1-13 CdTe 太陽電池の誘起電流と陽子線電流の関係

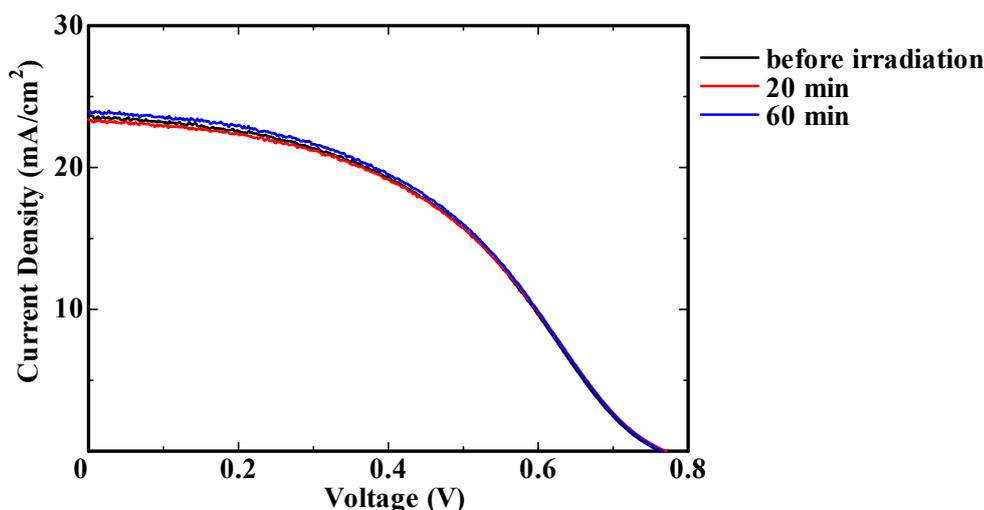


図 3.1.1-14 中性子線照射前後の電流電圧特性

次に、中性子線照射による劣化試験を行った。理化学研究所の RANS により CdTe 太陽電池に中性子線を照射し、照射後の電流電圧特性を測定した。陽子電流は  $3 \mu\text{A}$  程度とした。図 3.1.1-14 に中性子線照射前後の電流電圧特性を示す。中性子線照射前後で電流電圧特性はほとんど見られず、CdTe 太陽電池は中性子線照射に対して十分な耐性を有することが確認できた。

上述したように、CdTe 太陽電池を用いてガンマ線線量率が測定できることを明らかにしてきたが、感度が低いことが問題点としてあげられる。CdTe 吸収層の厚さを増加させることが有効であるが、バイアス電圧を印加しない状況でキャリア収集長を広げるためには空乏層を厚くする必要がある。しかし、CdTe 太陽電池のアクセプタ密度を減少して空乏層幅を広げるとキャリア収集効率が小さくなるため、アクセプタ密度の制御による空乏層増加によるガンマ線の感度の向上は困難であると考えられる。また、面積を大きくすることでも感度が増加するが、小型化の観点から望ましくない。そこで、ガンマ線感度向上のために別の手法を検討する必要がある。そこで、CdTe 太陽電池を積層して、並列接続する方法を提案した。まず、CdTe 太陽電池を 2 枚積み重ねて並列接続した場合のガンマ線誘起電流の測定を行った。結果を図 3.1.1-15 に示す。(a) 上部および(b) 下部に設置した CdTe 太陽電池の誘起電流も併せて示す。2 枚積み重ねて並列接続した場合の誘起電流は(a)と(b)の合計とほぼ一致した。この結果は、積み重ねて並列接続することにより、ガンマ線検出感度を向上できることを示している。次に PHITS [5]を用いて、10 枚の CdTe 太陽電池を積層して並列接続した場合のガンマ線感度を計算した。図 3.1.1-16 に PHITS により計算した CdTe 太陽電池数とガンマ線感度の関係を示す。この結果より、10 枚程度までは積層する CdTe 太陽電池数にほぼ比例してガンマ線感度が向上することがわかった。次に、ガンマ線線量率を約  $57 \text{ Gy/h}$  と一定として、CdTe 太陽電池を 10 枚まで積層・並列接続した場合の誘起電流を測定した。図 3.1.1-17 に CdTe 太陽電池数とガンマ線誘起電流の関係を示す。各セルの感度の違いによるばらつきは見られるが、PHITS での計算結果と同様に CdTe 太陽電池数に比例した誘起電流が得られた。このことより、バイアス電圧を印加なしで CdTe 太陽電池を積層・並列接続することにより感度を向上できることを明らかにした。

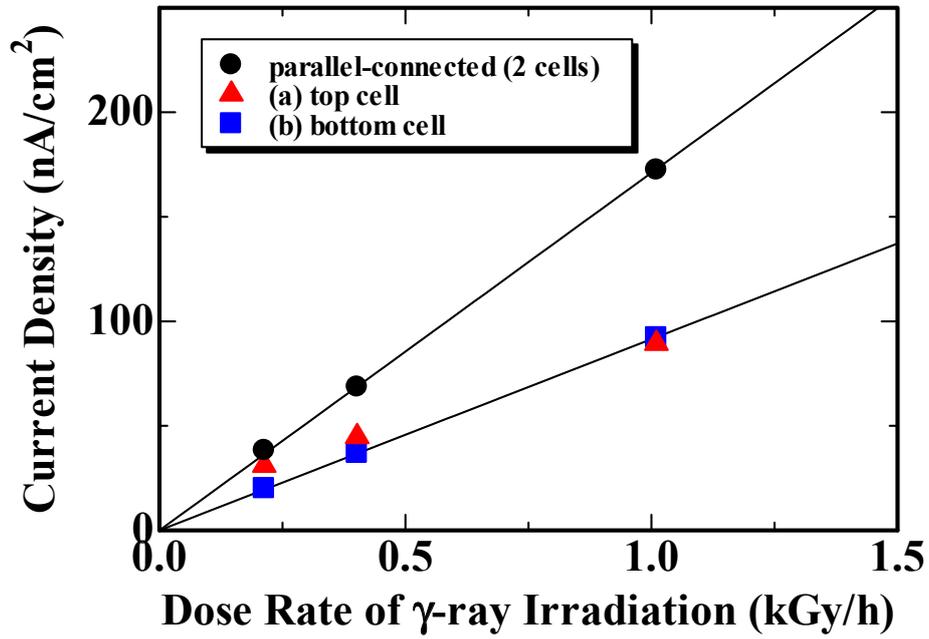


図 3.1.1-15 CdTe 太陽電池を 2 枚積み重ねて並列接続した場合のガンマ線誘起電流

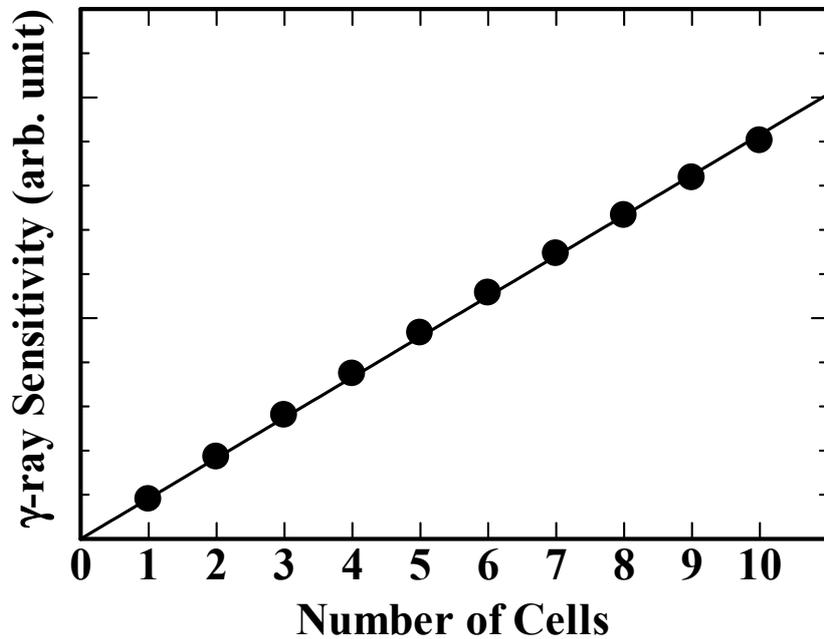


図 3.1.1-16 PHITS により計算した CdTe 太陽電池数とガンマ線感度の関係

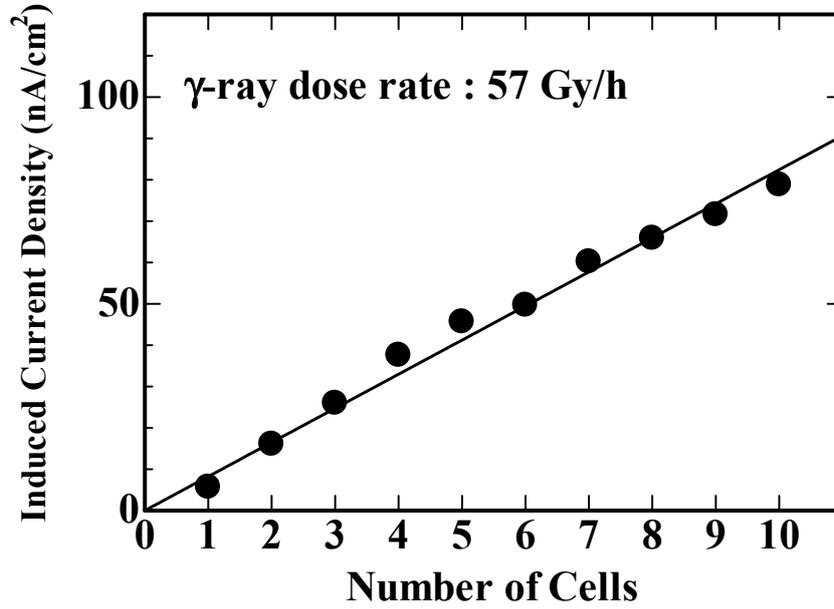


図 3.1.1-17 CdTe 太陽電池数とガンマ線誘起電流の関係

## (3) CdTe 太陽電池への電子線照射の影響

これまで述べたように、スーパーストレート型 CdTe 太陽電池がガンマ線検出に適していることを明らかにしてきた。しかし、アルファ線、ベータ線の検出においては、ガラス基板内での減衰を考慮すると、素子が曝され直接吸収できるサブストレート型が適していると考えられる。そこで、サブストレート型 CdTe 太陽電池へのアルファ線を模擬した He イオンおよびベータ線を模擬した電子線の照射試験を実施した。アルファ線照射試験の試験方法、結果を一括して 3.3 節で述べる。

ベータ線を模擬した電子線照射試験は大阪府立大学 放射線研究センターの CW 加速器を用いた。電子線のエネルギーは 60 keV から 500 keV の範囲で変化させた。図 3.1.1-18 に電子線フラックスと誘起電流の関係を示す。この図より、それぞれの電子線エネルギーについて電子線フラックスに比例した誘起電流が観測されている。図 3.1.1-19 に電子線エネルギーと電子線感度の関係を示す。この図より、電子線エネルギーの変化に対し、100 keV まではエネルギーの増加に伴い感度が増加し、100 keV 以上では低下した。これは電子線エネルギーにより侵入深さが変化するためであり、エネルギーが低いほど表面側の Ag 電極などによる吸収がより大きく感度が低くなり、100 keV 以上ではエネルギーが増加するにつれ電子の侵入長が深くなった結果キャリア収集長の範囲でのエネルギー付与量が減少し感度が低下したと考えられる。

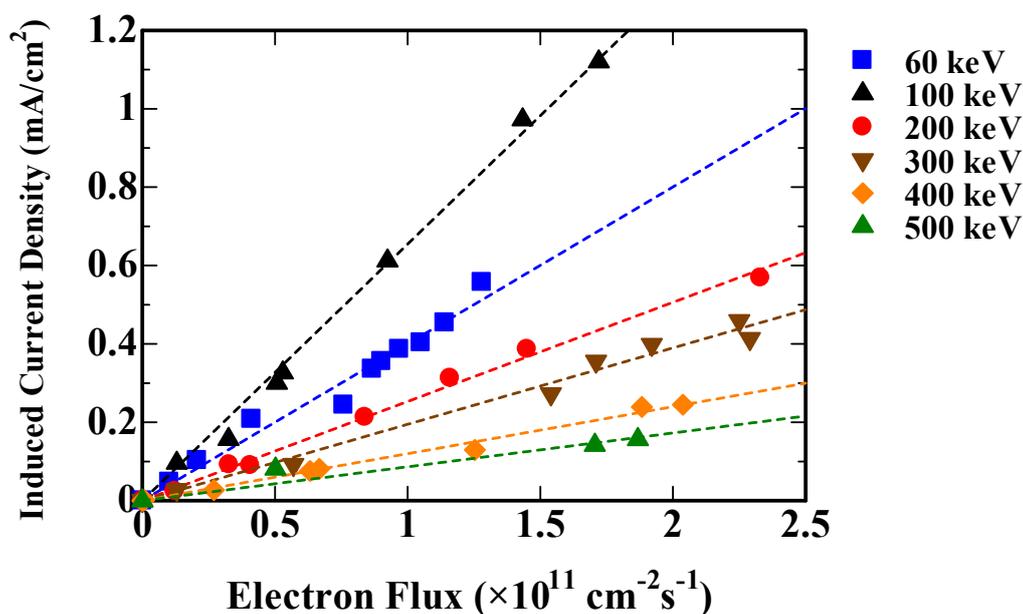


図 3.1.1-18 電子線フラックスと誘起電流の関係

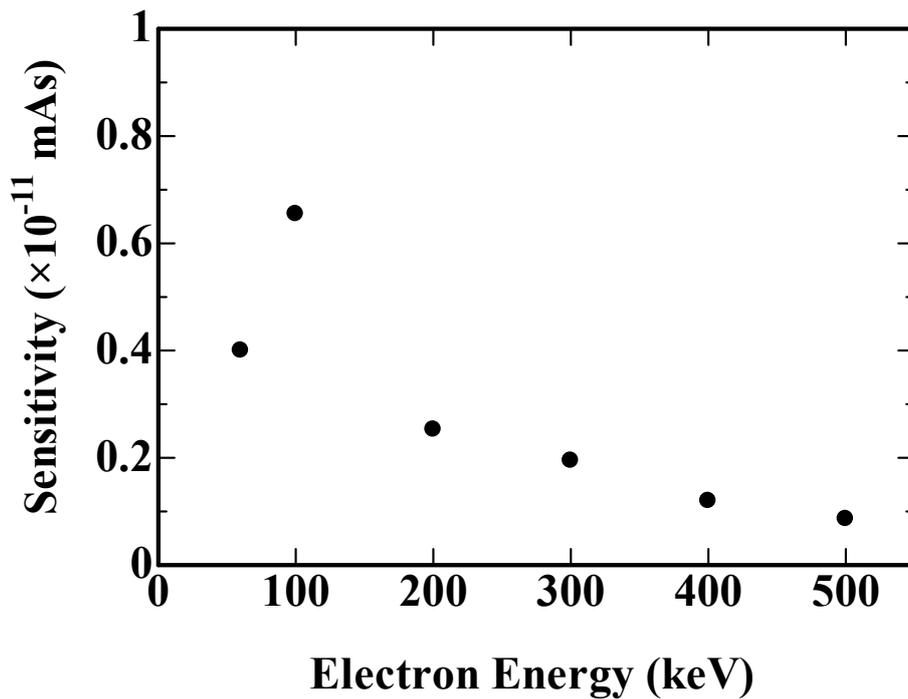


図 3. 1. 1-19 電子線エネルギーと電子線感度の関係

次に、電子線照射による劣化試験を行った。まず、電子線エネルギーを 200 keV として劣化試験を行った。図 3. 1. 1-20 に 200 keV の電子線照射前後の電流電圧特性を示す。200 keV の電子線照射初期に開放電圧および曲線因子が低下した。しかし電子線フラックスを増加させると開放電圧、曲線因子が回復し、電子線フラックス  $3 \times 10^{16}$  cm<sup>-2</sup> まで照射するとほぼ照射前の電流電圧特性に回復した。そこで、同一の試料で引き続き 400 keV の電子線を照射した。400 keV の電子線照射前後の太陽電池の電流電圧特性を図 3. 1. 1-21 に示す。400 keV の電子線照射では電流電圧特性は大きな変化は見られなかった。図 3. 1. 1-22 に 200 keV と 400 keV のセルパラメータをまとめたものを示す。200 keV の電子線照射による初期の劣化の際にも短絡光電流はほとんど変化していないことから、放射線検出器としては電子線照射に対して十分な耐性を有しているといえる。

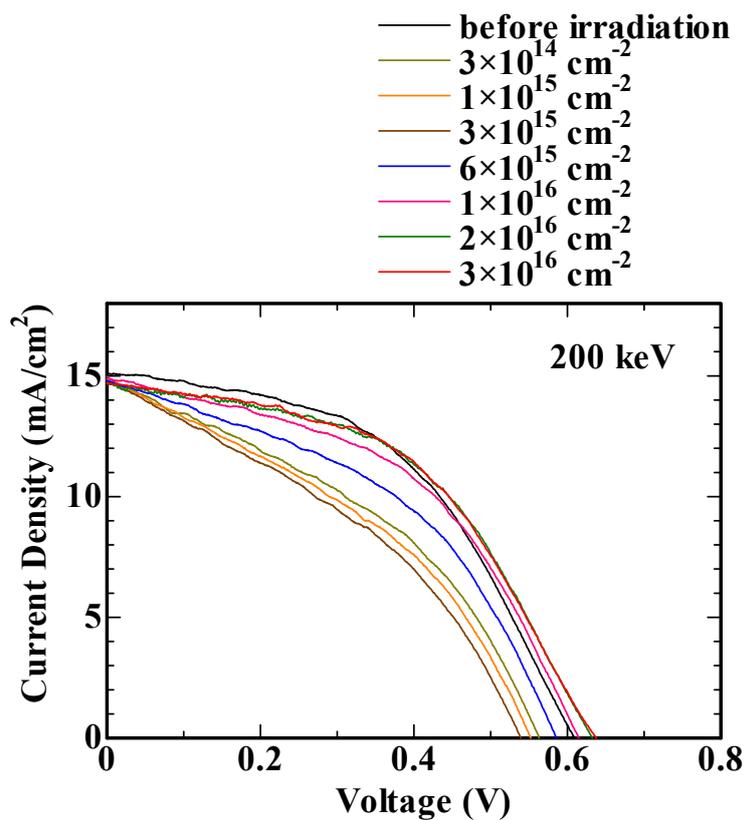


図 3. 1. 1-20 200 keV の電子線照射前後の電流電圧特性

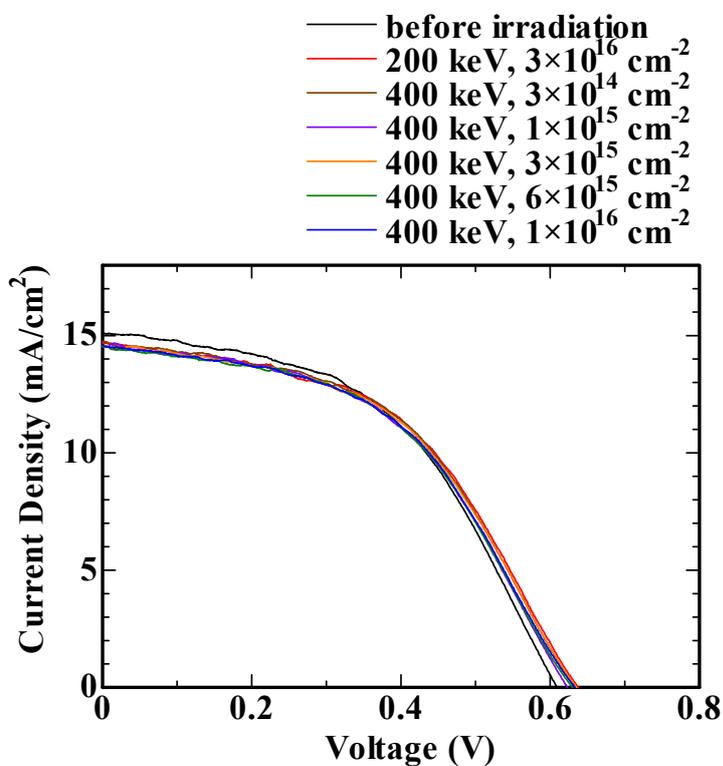


図 3. 1. 1-21 400 keV の電子線照射前後の電流電圧特性

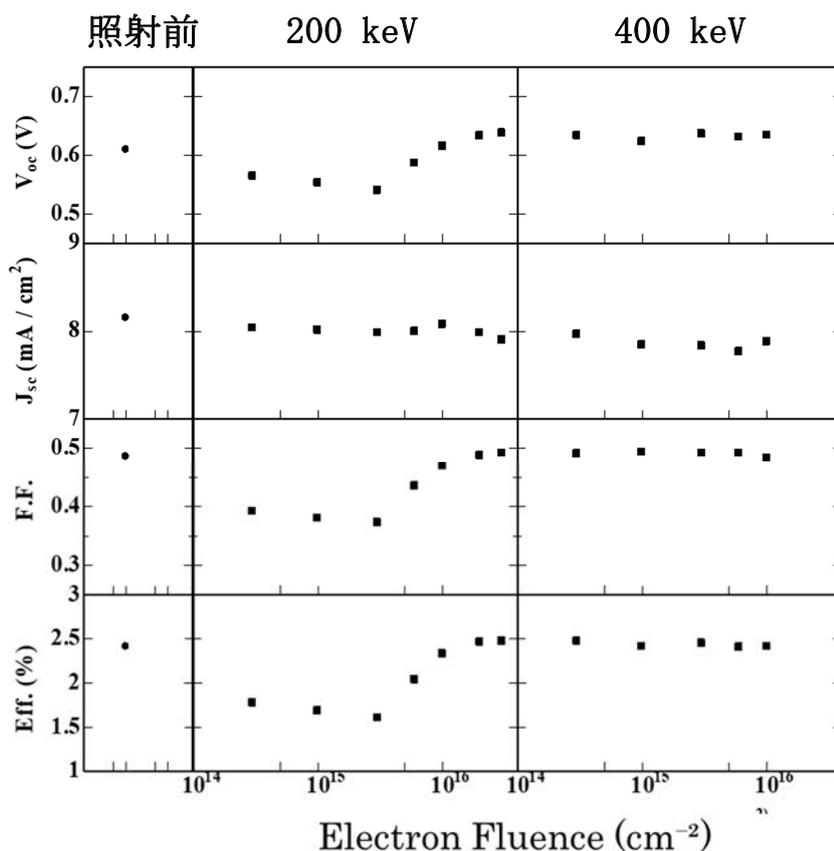


図 3. 1. 1-22 電子線照射によるセルパラメータの変化

(4) CdTe 太陽電池の温度特性

次に、高温での使用を想定して、CdTe 太陽電池の温度特性を測定した。スーパーストレート型では裏面側に電極があり加熱が困難であるため、サブストレート型 CdTe 太陽電池を用いて 20~80 °C の範囲で温度特性を測定した。図 3. 1. 1-23 にサブストレート型 CdTe 太陽電池の温度特性を示す。短絡光電流は温度が上昇するとともにわずかに増加している。これは温度上昇により禁制帯幅が減少するためと考えられる。一方、開放電圧は温度上昇により低下している。これは、主として温度上昇により熱励起させるキャリアが増加し、逆方向電流が増加したためと考えられる。また、曲線因子は温度上昇とともに増加している。この原因を検討するために、直列抵抗および並列抵抗の温度変化を検討した。結果を図 3. 1. 1-24 に示す。この図より、直列抵抗、並列抵抗ともに温度上昇とともに減少していることがわかる。直列抵抗の減少は温度上昇により CdTe 層中のキャリア密度が増加して CdTe 層の抵抗が減少したためと考えられる。並列抵抗の減少もキャリア密度の増加のためと考えられる。並列抵抗の減少は曲線因子の低下の原因となるが、CdTe 太陽電池の場合には直列抵抗の減少の効果が大きく、曲線因子は温度上昇により増加したと考えられる。変換効率は開放電圧の低下の効果が大きいために、温度上昇により低下しているが、80 °C までの範囲では放射線検出のためには問題なく動作すると考えられる。

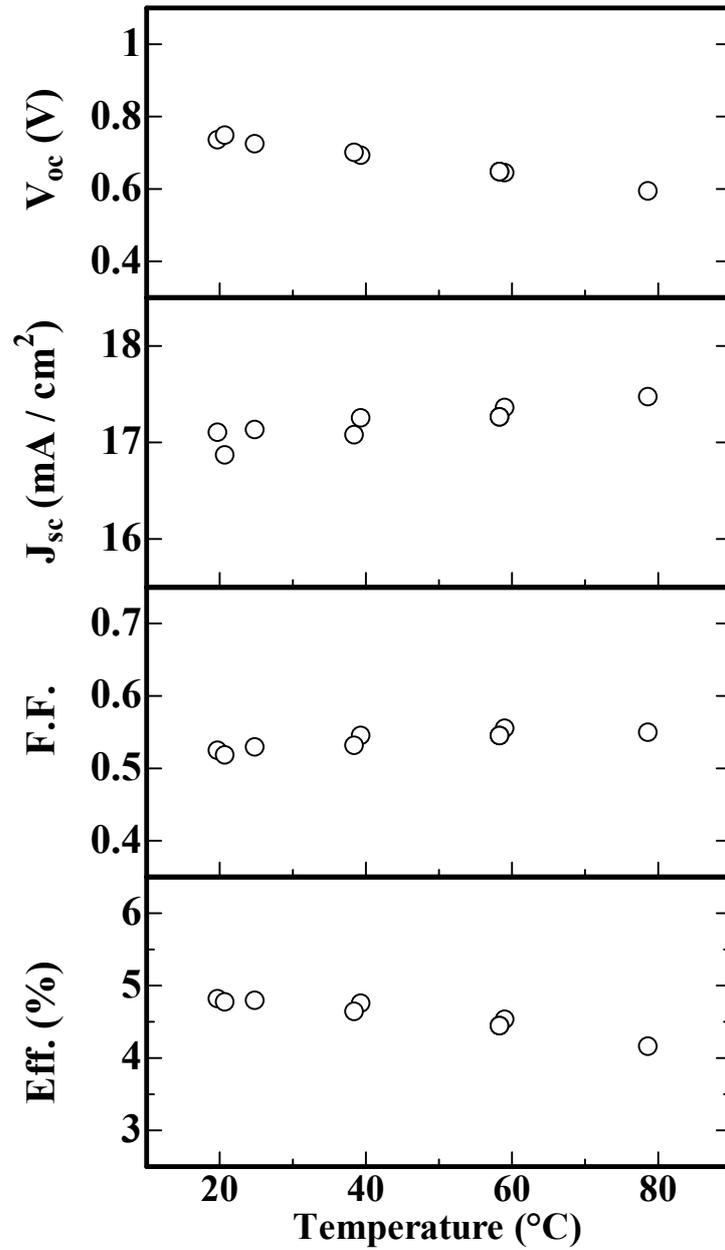


図 3.1.1-23 サブストレート型 CdTe 太陽電池の温度特性

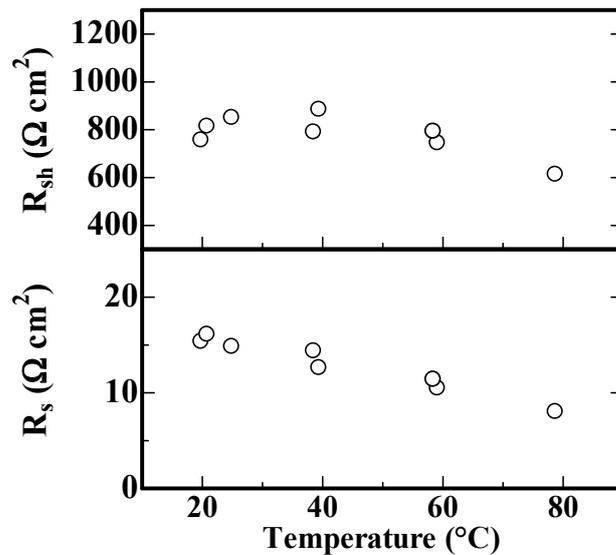


図 3.1.1-24 サブストレート型 CdTe 太陽電池の直列抵抗、並列抵抗の温度特性

参考文献

- [1] Okamoto, T., Shiina, Y., and Okamoto, S., Investigation of Cu-doping Effects in CdTe Solar Cells by Junction Photoluminescence with Various Excitation Wavelengths, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 56, no. 8, 2017, pp. 08MC02-1 - 08MC02-4.
- [2] Okamoto, T., Hayashi, R., Hara, S., and Ogawa, Y., Cu Doping of CdTe Layers in Polycrystalline CdTe Thin-Film Solar Cells for Top Cells of Multijunction Solar Cells, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 52, no. 10R, 2013, pp. 102301-1 - 102301-3.
- [3] Okamoto, T., Murata, A., Hayashi, Y., Watanabe, D., Araki, H., and Katagiri, H., Effects of Cu Doping on CdTe Thin-Film Solar Cells in Substrate Configuration, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 58, no. SB, 2019, pp. SBBF08-1 - SBBF08-5.
- [4] Okamoto, T., Igari, T., Gotoh, Y., Sato, N., Akiyoshi, M., and Takagi, I., Gamma-Ray Tolerance of CdS/CdTe Photodiodes for Radiation Tolerant Compact Image Sensor with Field Emitter Array, Physica Status Solidi (c), vol. 13, no. 7-9, 2016, pp. 635-638.
- [5] Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Tsai, P.-E., Matsuda, N., Iwase, H., Shigyo, N., Sihver, L., and Niita, K., Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol., vol. 55, no. 6, 2018, pp. 684-690.
- [6] Yamaguchi, M., Radiation-resistant solar cells for space use, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 68, 2001, pp. 31-53.

### 3.1.2 宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定（再委託先：JAXA）

#### (1) 検討対象とする太陽電池種の選定【平成 30 年度実施】

本研究における線量計デバイスの候補として、放射線耐性に優れた宇宙用太陽電池をあげた。そこで、過去および現在、宇宙用太陽電池として使用実績のある、ないしは優れた耐放射線性を示した実績のある、次の 3 種の化合物半導体材料を用いた太陽電池を検討対象デバイスとして選定した。

- ・ InGaP 太陽電池
- ・ CIGS 太陽電池
- ・ CdTe 太陽電池

InGaP 太陽電池は、現在宇宙用太陽電池として主流となっている InGaP/GaAs/Ge 構造 3 接合太陽電池のトップサブセル（最表層側構成太陽電池）として使用されており、加えて新型宇宙用太陽電池である InGaP/GaAs/InGaAs 薄膜 3 接合太陽電池の設計・開発段階において、その 3 種の構成太陽電池についてそれぞれ個別に取得された放射線（電子線および陽子線）照射試験にて取得された劣化特性データより、最も高い耐放射線性が示されている[1]。CIGS 太陽電池は、従来より耐放射線性が高いことが放射線照射地上試験により示唆されていたが、JAXA による人工衛星「つばさ」を用いた宇宙実証試験により、宇宙空間における実苛酷放射線環境にてほとんど劣化しないことが示されている[2]。CdTe 太陽電池に関しては、3.1.1 にて記述したように、放射線検出器材料としての実績がある。

#### (2) 供試体の準備と選定【平成 30 年度実施】

供試体として用いる前記 3 種の太陽電池を、以下のように入手した。

InGaP 太陽電池は、参考文献 [1] における実験に用いた試料の余剰在庫が JAXA に存在したため、これを用いた。CIGS 太陽電池は、参考文献 [2] に宇宙実証試験結果が示されている 2 種の CIGS 太陽電池のうち、より放射線耐性が高かった方の太陽電池の製造メーカーより、構造が基本的に同型の太陽電池（但し、出力性能は当時より向上している）[3]の無償提供を受けた。CdTe 太陽電池については、3.1.1 に記述したとおり木更津高専にて作製した。それぞれの太陽電池の外観写真と試料の形状を図 3.1.2-1 に示す。InGaP 太陽電池は 10 mm×10 mm の単一デバイスとして作製されている。CIGS 太陽電池は 100 mm×100 mm のガラス基板上に幅 5 mm のデバイスが連続して接続、集積化されている。これをガラスカッターで約 20 mm×11 mm 大に小さく切断し、単一デバイスを作製した。CdTe 太陽電池はスーパーストレート構造と呼ばれる、受光面がガラス基板側に形成されている形状で、約 50 mm×80 mm のガラス基板の中心部に 3 個のデバイスが形成されている（写真は裏面側）。裏面側に正と負両方の電極が個別に形成されているため、切断せずとも個々に測定・評価が可能である。

これらの太陽電池試料に対し、太陽電池の基本出力特性である光照射下電流-電圧（LIV）特性を測定した。測定条件は、光強度：136.7 mW/cm<sup>2</sup>、光スペクトル：AM0（宇宙空間太陽光模擬）、試料温度：25℃である。3 種の太陽電池の典型的な LIV 特性を図 3.1.2-2 に示す。比較しやすくするため、縦・横軸を統一している。

本研究では、太陽電池デバイスを線量検知デバイスとして用いる可能性を検討する。したがって、最も重要な出力特性パラメータは電流出力である。一方、太陽電池の代表的な電流出力特性パラメータは短絡電流密度：I<sub>sc</sub>（電圧=0、すなわち電流密度軸との交点における単位面積当たりの出力電流値、単位は mA/cm<sup>2</sup>）である。そこで、取得した LIV データより I<sub>sc</sub> 値を求め、統計処理を行った。その結果を表 3.1.2-1 に示す。また、度数分布（ヒストグラ

ム)を図 3.1.2-3 に示す。これらそれぞれの試料母集団の中から、 $I_{sc}$  値が $\pm\sigma$  (標準偏差)の範囲に入る試料を抽出し、以後の実験的検討の供試体として選定した。その数は表 3.1.2-1 最下段に示している。CdTe 太陽電池については試料の母数が少ないため、統計値の信頼性が低くあまり参考とならない。なお、令和元年度以降の供試体は、以後作製する試料に対して同様の出力評価を行い、供試体を抽出・選定した。

ここで、 $I_{sc}$  の絶対値について述べる。太陽電池は基本的に太陽光という白色光を受光して発電するデバイスであり、その光吸収端波長はその半導体材料のエネルギーギャップ  $E_g$  に対応して決定される。今回検討対象とした 3 種の太陽電池材料の  $E_g$  値は InGaP: 1.85 eV、CIGS: 1.1 eV、CdTe: 1.4 eV であり、これより各々の光吸収端波長はおよそ InGaP: 670 nm、CIGS: 113 nm、CdTe: 880 nm となる。したがって  $I_{sc}$  値の大きさは吸収波長領域幅によって CIGS > CdTe > InGaP となるが、これは当然太陽光を吸収した場合である。本研究では線量計としての出力電流を検討するが、対象とする放射線すなわちアルファ線、ベータ線、ガンマ線は太陽光の光子と比較して極めて大きいエネルギーを有する。このため、これら放射線による発生電流 (の大きさ) について、太陽光照射時の  $I_{sc}$  値の大小で優劣を判断するのは適当ではない。したがって、 $I_{sc}$  の絶対値は特に意味を持たない。

### (3) 湿度耐性の検討【平成 30 年度実施】

(2)にて選定した太陽電池 3 種の供試体より各 6 サンプルを任意抽出し、湿度耐性を評価すべく恒温恒湿試験を実施した。試験条件は、1F 炉内環境に近いと考えられる、雰囲気: 大気、温度: 3 °C、湿度: 95 %、試験時間:  $\geq 1000$  h とした。また、太陽電池供試体はすべて被覆、被膜、保護材などのないベア状態で試験に供した。これは、特に検知面側について放射線の入射を考慮した場合、そのエネルギーや線量の低減を避けるためにもベア状態で使用される可能性が高いと想定したからである。ただし、CdTe 太陽電池についてはスーパーストレート構造であるため、半導体検知層の前面に厚さ 1 mm のガラス基板が存在する。なお、試験装置として、図 3.1.2-4 に外観を示す ESPEC SH-221 を使用した。また、性能の変化・劣化を評価する方法として、LIV 特性を測定し、 $I_{sc}$  の変化をみた。

試験結果を図 3.1.2-5 に示す。横軸は累積試験時間、縦軸は  $I_{sc}$  について初期値を 1 に規格化した保存率 (Remaining factor) と称される値である。InGaP 太陽電池および CdTe 太陽電池に関しては、1000 h まで全く劣化がみられなかった。一方、CIGS 太陽電池においては 100 h を超えたあたりから劣化がみられ、1000 h では約 5 %の低下が確認された。また、目視確認よりその表面は若干白濁したように観察された。CIGS 太陽電池において、湿度環境による性能低下が起きることは報告されている[4]。しかし、今回の 1000 h で約 5 %という低下率は 1F 環境で使用できないと判定するようなものではないため、CIGS 太陽電池も線量計デバイスとしての候補として引き続き扱ってよいと判断した。ただし、その低下は無視できる程度とはいえない。よって、今後検討する 1000 h 使用した時の放射線被曝による劣化、低下率との比較とはなるものの、CIGS 太陽電池を線量計デバイスとして使用する場合は、湿度環境による劣化分の補正が必要になる。本試験の結論として、選定した 3 種の太陽電池デバイスは、1F 炉内の線量計デバイス候補としていずれも十分な耐湿性を有していると判断した。

### (4) 放射線耐性検討の対象太陽電池【令和元年度実施】

平成 30 年度の検討結果より、次の 3 種の化合物半導体材料を用いた太陽電池を放射線耐性検討対象素子として選定した。

- ・ InGaP 太陽電池
- ・ CIGS 太陽電池
- ・ CdTe 太陽電池

これらの太陽電池素子に対し、アルファ線 (He イオン)、ベータ線 (電子線) およびガンマ線 ( $^{60}\text{Co}$  線源) の 3 種類の放射線を照射した。またそれに加え、耐放射線性評価のための参照データとして用いるために陽子線 (H イオン) の照射も実施した。これらの放射線照射前後にて、太陽電池としての LIV 特性を測定・取得し、出力の低下率を求めることにより劣化を評価し、耐放射線性の比較を行った。

本項においては、このうち InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池についてのアルファ線および高エネルギーベータ線による耐放射線性の比較検討結果を記す。CdTe 太陽電池に関する低エネルギー電子線およびガンマ線に関する検討結果は 3.1.1 に記述する。

#### (5) 放射線照射試験【令和元年度実施】

InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池に対して He イオンおよび電子線を照射し、アルファ線とベータ線への耐性に関するデータを取得した。また、宇宙用太陽電池の放射線耐性研究においてデータが豊富である陽子線の照射も実施して参照データとし、放射線劣化特性を比較・検討した。

He イオン照射試験は QST 高崎研の TIARA 照射施設にあるタンデム加速器およびその附帯設備を用いて実施した。He は 1 価に電離し、5 MeV の加速電圧で加速しエネルギーを与えた。真空チャンバー内に供試体太陽電池素子を置き、収束させたイオンビームを縦および横方向に走査することで照射を行った。照射雰囲気は真空、供試体温度は室温成行、照射量はフルエンス (単位面積当りの入射イオン数) にて  $3 \times 10^{10} \sim 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  とした。

電子線照射試験は同じく QST 高崎研の 1 号加速器 (CW) およびその附帯設備を用いて実施した。電子は 1 ないし 2 MeV の加速電圧で加速してエネルギーを与えた。大気中に設置した水冷試料台に供試体太陽電池デバイスを真空チャック式で固定し、有効幅約 5 cm の電子ビームを横方向に走査することで照射を行った。なお太陽電池供試体 (幅約 1 cm) はビーム中心に設置した。照射雰囲気は大気、供試体温度は水温程度 (ほぼ室温)、照射量はフルエンスにて  $3 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  である。

また、陽子線 (H イオン) 照射試験は前記 He イオン照射試験と同一の加速器および附帯設備にて実施した。陽子は 3 MeV の加速電圧で加速してエネルギーを与えた。照射雰囲気は真空、供試体温度は室温成行、照射量はフルエンスにて  $1 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  である。

なお、5 MeV He イオン、1、2 MeV 電子、3 MeV 陽子いずれも供試体太陽電池デバイス層を透過することを、TRIM シミュレーション[5]にて確認している。

#### (6) 太陽電池出力評価【令和元年度実施】

前記放射線照射試験に供する太陽電池素子に対し、太陽電池の基本出力特性である LIV 特性を、放射線前後において測定した。測定条件は、光強度：136.7 mW/cm<sup>2</sup>、光スペクトル：AM0 (宇宙空間太陽光模擬)、試料温度：25 °C である。取得した LIV データより短絡電流密度  $I_{sc}$  および開放電圧  $V_{oc}$  (電流=0、すなわち電圧軸との交点における出力電圧値、単位は V) を求め、保存率 (Remaining Factor) を求めた。例として、CIGS 太陽電池の He イオン照射における保存率の計算結果を表 3.1.2-2 に示す。

ここで、本研究では太陽電池デバイスを線量検知デバイスとして用いる可能性を検討している。したがって、本研究において評価対象とすべき太陽電池の出力特性パラメータは電流出力である。そこで、ここでは  $I_{sc}$  について評価・解析を行った。加えて、 $I_{sc}$  に対する評価・解析結果の妥当性を確認することを目的に、太陽電池のもうひとつの出力パラメータである  $V_{oc}$  に対しても同様な評価・解析を行った。

#### (7) 耐放射線性評価【令和元年度実施】

InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池における、5 MeV He イオンおよび 1 MeV 電子線の照射による LIV 特性の変化を図 3.1.2-6、図 3.1.2-7 に示す。縦軸は太陽電池の光発生電流、横軸は光起電圧である。CIGS 太陽電池では電極構造上直列抵抗が高いため、電流と電圧が比例する部分の傾きが小さくなっている。

黒線で示した初期 LIV 特性に対し、概して照射量が増すのに従い電流、電圧出力ともに低下し、LIV 曲線は小さくなっている。これは太陽電池出力の放射線劣化である。InGaP 太陽電池と CIGS 太陽電池を比較すると、He イオン、電子線どちらの照射結果においても CIGS 太陽電池の方が低下率は小さく、特に電子線においては CIGS 太陽電池の LIV 特性はほとんど変化、すなわち劣化していないことがわかる。

InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池における放射線劣化特性については、令和 2 年度に追加した放射線照射試験結果と合わせ、まとめて(11)にて議論する。

#### (8) NIEL 値の計算【令和元年度実施】

非イオン化エネルギー損失 (Non-ionization Energy Loss: NIEL) と呼ばれる、放射粒子が結晶材料内に入射したときの結晶欠陥発生能力を表す特性値を用いることで、太陽電池デバイスの放射線劣化を DDD (基本的にフルエンスと NIEL 値の積で与えられる) という放射線種および粒子エネルギーの依存性をなくして統一した指標値にて表すことが可能である。そこで、He イオン (アルファ線)、電子 (ベータ線)、および陽子の 3 種の放射粒子についての NIEL 値の計算を、本研究で検討対象としている InGaP、CIGS、CdTe の 3 種の太陽電池材料に対して行った。計算には SR-NIEL といわれる計算コードを用いた [6]。図 3.1.2-8 に得られた NIEL 値を示す。

#### (9) 改良型 InGaP 太陽電池の作製【令和 2 年度実施】

放射線照射試験結果より、耐放射線性に関する限りは InGaP 太陽電池と比較して CIGS 太陽電池の方がより優れること、特にベータ線に対する耐性が高いことが明らかになった (詳細は次項に記述)。しかし、InGaP 太陽電池の方が、①電極が金属でリード線端子を装着しやすい、②直列抵抗が低く LIV 特性が良好なため、放射線被曝による劣化の LIV 特性測定での評価が容易、など検知器デバイスとしては利点が多い。一方で、光吸収層を薄くすることで耐性が向上することが、これまでの宇宙用太陽電池の耐放射線性研究によって常識的になっている。そこで、光 (本研究においては放射線) 吸収層の厚さを現状の 1.0  $\mu\text{m}$  を約 1/2 にした InGaP 太陽電池 (吸収層厚 0.55  $\mu\text{m}$ ) を作製し、その放射線起電流と耐放射線性を検討・評価することとした。なお、吸収層厚を薄くすることで懸念される起電流の減少を補うため、太陽電池の面積を現状の 1  $\text{cm}^2$  から 4  $\text{cm}^2$  に拡大させた。図 3.1.2-9 に作製した改良型 InGaP 太陽電池素子の外観写真、形状および断面構造模式図を、図 3.1.2-10 に作製した 50 枚の  $I_{sc}$  の度数分布図を示す。

平成 30 年度の供試体選定においては、出力が  $1\sigma$  内に入る太陽電池を選定したが、今回作製した改良型 InGaP 太陽電池については非常に分布が狭く、またそのために標準偏差  $\sigma$  はほとんど意味をなさないため、全数を合格として供試体に採用した。以降、従来および改良型 InGaP 太陽電池をそれぞれ厚型および薄型 InGaP 太陽電池と称する。

#### (10) 放射線照射試験（追加）【令和 2 年度実施】

薄型 InGaP 太陽電池に対して (5) と同じエネルギーの He イオン、電子線および陽子線を照射し、アルファ線、ベータ線、陽子線への耐性に関するデータを取得した。また今回、厚型 InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池と合わせて、200 keV、1 MeV の He イオン照射、および 200 keV の陽子線照射を追加した。照射量はフルエンスにて 200 keV He イオンが  $1 \times 10^{10} \sim 3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 、1 MeV He イオンおよび 200 keV 陽子が  $3 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  である。薄型 InGaP 太陽電池の初期、および放射線劣化の代表例として 5 MeV He イオンを照射した後の LIV 特性を、図 3.1.2-11 に示す。

しかし、(5) と同様の TRIM シミュレーションを実施した結果、1 MeV He イオンはいずれの太陽電池を透過することが確認されたが、200 keV 陽子は CIGS 太陽電池膜中で止まり局所的損傷を起こしており、劣化のモードが異なることがわかったため、そのデータは今回の解析の対象としないこととした。さらに、200 keV He イオンは CIGS 太陽電池に侵入しない（表面の透明導電膜中で止まる）ことが判明したため、CIGS 太陽電池に対してのみ 6 MeV の陽子線照射を追加実施した。フルエンスは  $3 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  である。なお、照射試験を実施した施設は (5) の記載と同一である。

#### (11) 耐放射線性評価【令和元年度～令和 2 年度実施】

前述したように、放射線検出器として用いる信号は放射線の入射による誘起電流であり、これは太陽電池の出力パラメータにおける  $I_{sc}$  に相当する。よって、これ以降の評価・解析では  $I_{sc}$  のみを対象にして行うこととする。

InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池における  $I_{sc}$  の、He イオン、電子、陽子による放射線劣化特性を図 3.1.2-12、図 3.1.2-13、図 3.1.2-14 にそれぞれ示す。横軸はフルエンスで表した照射量、縦軸は  $I_{sc}$  および  $V_{oc}$  の保存率である。各図(a)の InGaP 太陽電池のグラフには、厚型 (thick) と薄型 (thin) の結果を同時に示す。まずこの InGaP 太陽電池の結果より、電子の高フルエンスにおける点 ( $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) を除いて薄型 (青記号) は厚型 (赤記号) よりわずかに保存率が高く、放射線耐性が比較的に高いといえるが、その向上幅は放射線粒子吸収層を約 1/2 として単位面積当たりの信号強度を半減させることの対価に値しないと判断される。したがって、厚型の方が好ましいと結論した。次に、図 3.1.2-12 のアルファ線模擬の He イオンによる結果では、保存率は CIGS 太陽電池の方が InGaP 太陽電池よりも有意に高い。これより、CIGS 太陽電池の高い耐放射線性は He イオンにおいても実証された（おそらく世界初）。図 3.1.2-13 に示すベータ線模擬の電子線による結果では、InGaP 太陽電池では高フルエンス領域においても保存率は十分高く耐性が高いものの、有意な劣化がみられる。これに対し CIGS 太陽電池では劣化はなく、極めて高い耐性が確認された。図 3.1.2-14 に示したのは、次の (12) での解析のための参照データとして取得した、陽子線による結果である ((b) の CIGS 太陽電池の図では横軸が 1 桁大きいことに注意)。He イオンの場合と同様に両太陽電池にて有意な劣化が確認されるが、同程度の保存率を与えるフルエンスには 1 桁以上の差があり、耐性はやはり CIGS 太陽電池の方が InGaP 太陽電池よりも高い。一方、CIGS 太陽電池

では劣化に陽子エネルギー依存性がほとんどみられていないが、これは 3 MeV と 6 MeV で NIEL 値が同程度（表 3.1.2-3 参照）であることで説明される。

CIGS 太陽電池が特に電子線に対して高い耐性を示すことは以前より知られているが[7][8]、当時の CIGS 太陽電池の変換効率は AM0 光（大気圏外の太陽光）下にて 10 %弱と比較的低効率であったため、放射線耐性（保存率）として高めの値が得られているとの疑念があった。しかし、今回の供試体に用いた太陽電池は変換効率が AM0 光下で 20 %弱と高効率のもの[9]である。したがって、本研究の結果は CIGS 太陽電池が本質的に放射線に高耐性を有することを実証するものである。これは、CIGS 太陽電池の超高フルエンス条件にてみられた電子線による劣化が CIGS 光吸収層での欠陥発生によるものではなく、表面透明導電膜の劣化によるものであるという報告[8]と一致する。

陽子線照射による劣化特性に関しては、これまでの宇宙用太陽電池に関する実験において JAXA に多くのデータがある。これまでの知見から、質量が約 4 倍である He イオン照射では大きな劣化、すなわち陽子線の数倍の劣化を示し、フルエンスが大きくなると結晶欠陥密度の増大による異常劣化[9]が比較的低フルエンスで起きるであろうと予測していた。しかし、結果的には両太陽電池の劣化は陽子線と比較して極めて大きいということはなく、よってアルファ線検知デバイスとして十分な耐性があることが確認された。ここで、CIGS 太陽電池に関しては、アルファ線照射による劣化は欠陥活性による結晶品質の低下ではなく多層構造における界面の劣化であるとの報告がある[10]。

結論として、検討した 2 種の太陽電池デバイスは、線量計デバイス候補としていずれも十分な耐放射線性を有していると判断した。

#### (12) DDD による解析【令和 2 年度実施】

本項では、He イオン（アルファ粒子）、電子（ベータ粒子）による電流出力の劣化を、陽子による劣化を基準とし、DDD というパラメータを用いることで、統一した劣化式の導出を試みる。この式すなわち被曝量と劣化の関係が求められれば、放射線環境がわかっている場合は出力の劣化予測すなわち寿命推定ができ、また被曝による信号出力低下の補正式としても用いることが可能となる。

まず DDD を求める。基本的に DDD は放射粒子の NIEL 値とフルエンスの積で表される。(8)での計算から求められた、今回の照射で用いた放射粒子の NIEL 値を表 3.1.2-3 にまとめて示す。これらの NIEL 値を用いて DDD を計算し、横軸を DDD としてプロットした He イオン、電子線および陽子線による  $I_{sc}$  の劣化特性を図 3.1.2-15、図 3.1.2-16、図 3.1.2-17 にそれぞれ示す。但し、各図(a)の InGaP 太陽電池のデータは厚型のもののみである。図 3.1.2-15(b)以外において、劣化の粒子エネルギー依存性が解消されてすべてのデータ点がひとつの劣化傾向曲線上に表されている。図 3.1.2-15(b)すなわち CIGS 太陽電池の He イオンによる劣化では、後述するエネルギー依存性を消すための  $n$  パラメータによる調整が必要となる。

図 3.1.2-18 は、He イオン、電子線および陽子線による  $I_{sc}$  の劣化データすべてをひとつの図にプロットしたものである。これらのデータ点がひとつの劣化傾向曲線で表されるように、次式を用いて DDD を換算する[11]。

$$\begin{aligned}
 DDD = & \phi(E_p) \cdot NIEL(E_p) + R_{\alpha p} \cdot \phi(E_\alpha) \cdot NIEL(E_\alpha) \left[ \frac{NIEL(E_\alpha)}{NIEL(5MeV)} \right]^{n_\alpha - 1} \\
 & + R_{\beta p} \cdot \phi(E_\beta) \cdot NIEL(E_\beta) \left[ \frac{NIEL(E_\beta)}{NIEL(1MeV)} \right]^{n_\beta - 1}
 \end{aligned}$$

ここで、 $\phi(E)$ はエネルギー $E$ の粒子のフルエンス、 $NIEL(E)$ はエネルギー $E$ のNIEL値、添字の $p$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ はそれぞれ陽子、ヘリウム、電子を表す。 $R_{xy}$ は粒子 $x$ の粒子 $y$ に対する損傷係数、 $n$ は補正係数と呼ばれるパラメータである。この式からわかるように、陽子のDDD値を基本として、ヘリウムおよび電子のDDDを $R_{xy}$ と $n$ を用いて陽子のDDDに等価になるように調整することによって、結果的に3種すべての粒子による劣化をひとつの劣化特性曲線で表せるようになる。これを目指して適当な $R_{xy}$ と $n$ をベストフィッティングにより求めた。得られたパラメータ値を表3.1.2-4に、またその値による換算式を用いて図3.1.2-18の劣化データを再プロットしたものを図3.1.2-19に示す。InGaP太陽電池、CIGS太陽電池ともにすべての結果をひとつの劣化曲線で表すことに成功した。太陽電池の劣化を表す関係式を用いて導いた劣化曲線式を同図中に挿入している。これら得られた劣化式を用いることにより、アルファ線およびベータ線に対しての劣化予測あるいは出力劣化補正が可能となった。

InGaP太陽電池およびCIGS太陽電池に対して行った、ガンマ線照射による $I_{sc}$ の劣化特性を図3.1.2-20に示す。InGaP太陽電池に関しては、Dose=1000 kGyにおいてサンプルが破損した。特性計測は可能であったため破損面積を補正してグラフ上にプロットしたが、参考値として扱うべきと考えている。一方、CIGS太陽電池では劣化傾向がみられるが、照射による電極の酸化に起因する電極抵抗の増加も同時にみられ、測定プローブとのコンタクト抵抗が不安定であるためデータの信頼性が低い。これらより今回は、①実験値が不安定でサンプル数も十分でないため、解析において十分な信頼性が得られない、②ガンマ線のNIEL値あるいはDDD値の算出が現状困難である、の2つの理由により、今回の評価対象から外すこととし、今後の課題とした。

表 3.1.2-1 InGaP、CIGS、CdTe 太陽電池の I<sub>sc</sub> の統計処理結果

	InGaP Solar Cell	CIGS Solar Cell	CdTe Solar Cell
# of samples	104	73	9
Average (mA/cm <sup>2</sup> )	13.34	52.83	29.16
Std. Dev. $\sigma$ (mA/cm <sup>2</sup> )	0.142	0.828	0.461
# of samples in $\pm \sigma$	59	52	6

表 3.1.2-2 CIGS 太陽電池の He イオン照射における I<sub>sc</sub> の保存率の計算例

Fluence (cm <sup>-2</sup> )	$3 \times 10^{10}$	$1.0 \times 10^{11}$	$3 \times 10^{11}$	$1.0 \times 10^{12}$	$3 \times 10^{12}$
Initial I <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	39.64	39.40	40.47	38.85	39.76
Irradiated I <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	39.36	38.77	38.94	36.03	35.28
Rmaining Factor	0.993	0.984	0.962	0.927	0.887

表 3.1.2-3 評価・解析に用いた放射線粒子の NIEL 値

Particle	Helium		Electron		Proton		
	1.0	5.0	1.0	2.0	0.2	3	6.0
InGaP	$8.95 \times 10^{-1}$	$2.15 \times 10^{-1}$	$2.98 \times 10^{-5}$	$4.60 \times 10^{-5}$	$2.15 \times 10^{-1}$	$2.08 \times 10^{-2}$	-
CIGS	$8.11 \times 10^{-1}$	$1.96 \times 10^{-1}$	$1.38 \times 10^{-5}$	$2.99 \times 10^{-5}$	-	$1.85 \times 10^{-2}$	$1.01 \times 10^{-2}$

表 3.1.2-4 フィッティングより得られたDDDの換算式におけるパラメータ値

Energy (MeV)	$R_{\alpha p}$	$n_{\alpha}$	$R_{\beta p}$	$n_{\beta}$
InGaP	1	1	1/3	1
CIGS	2	2.13	1/10	1

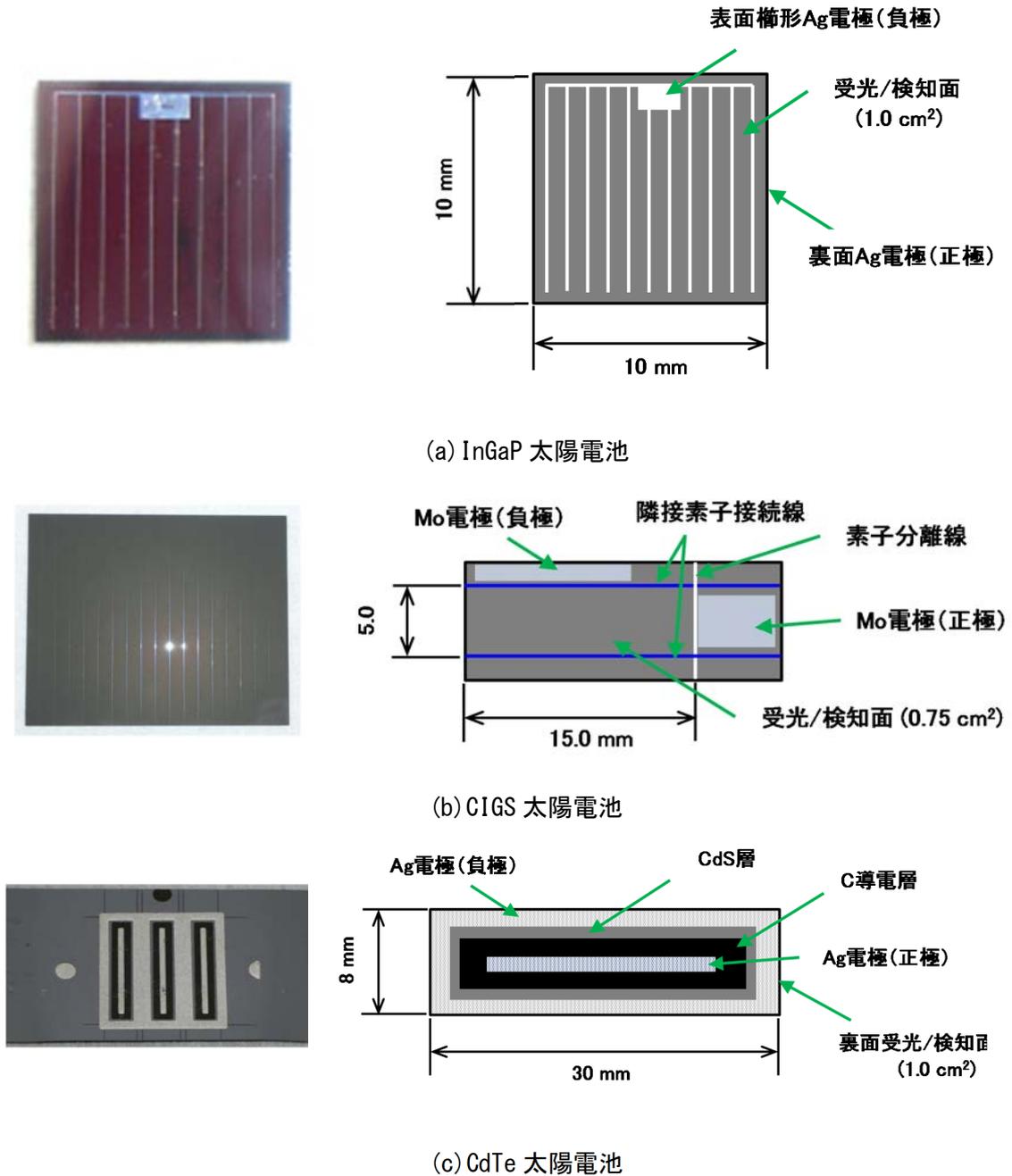
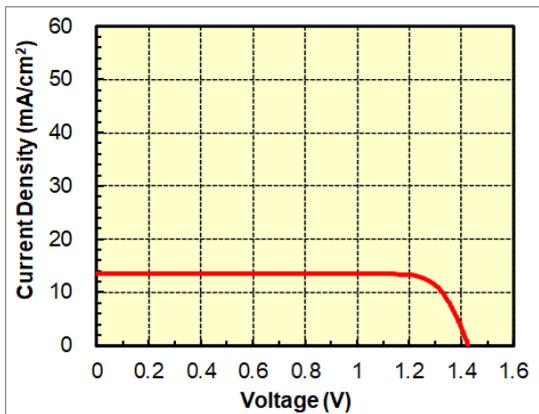
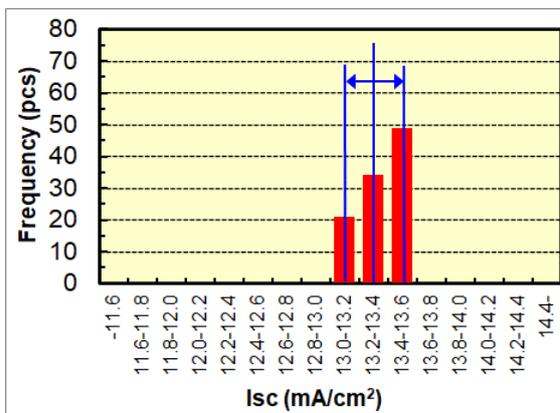


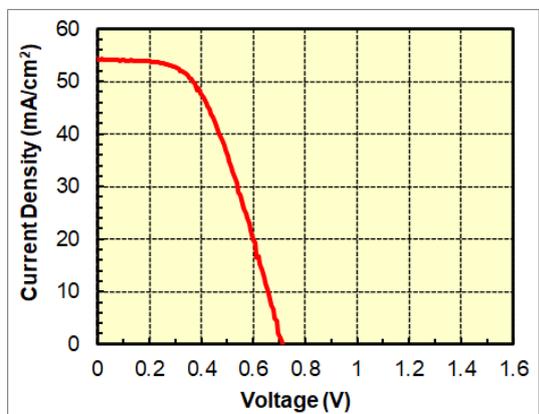
図 3.1.2-1 (a) InGaP、(b) CIGS、(c) CdTe 太陽電池の外観と試料の形状



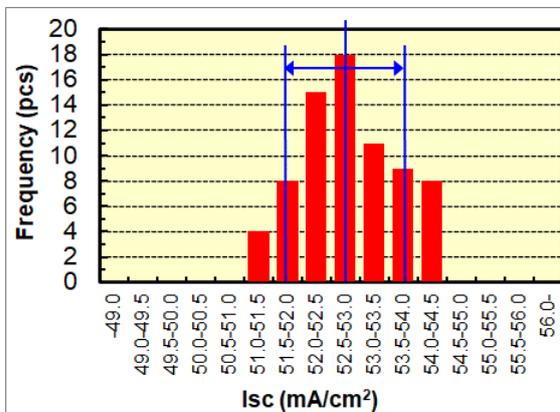
(a) InGaP 太陽電池



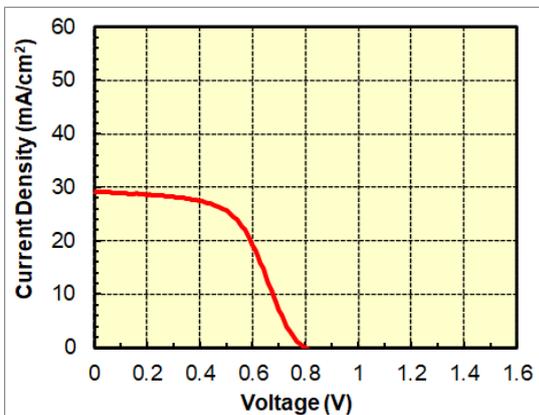
(a) InGaP 太陽電池



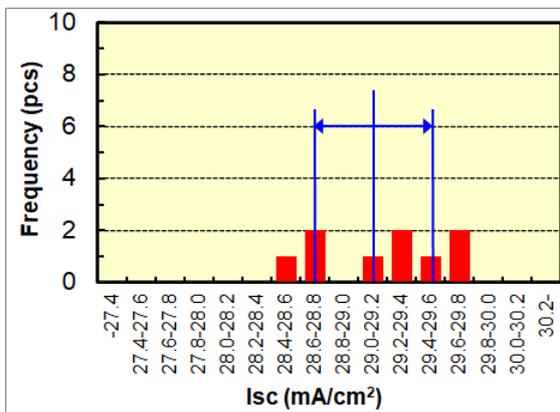
(b) CIGS 太陽電池



(b) CIGS 太陽電池



(c) CdTe 太陽電池



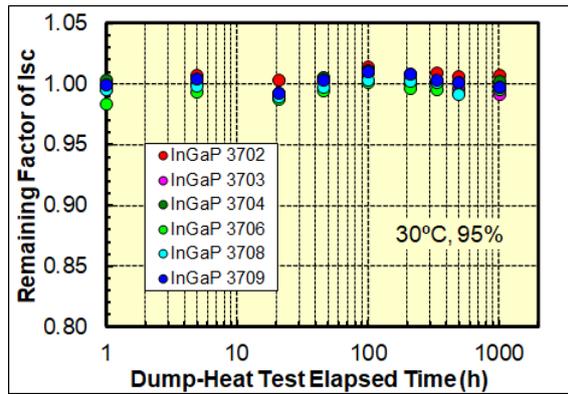
(c) CdTe 太陽電池

図 3. 1. 2-2 (a) InGaP、(b) CIGS、(c) CdTe 太陽電池の典型的な LIV 特性

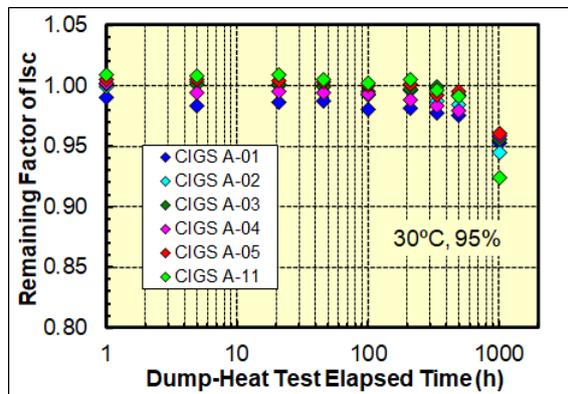
図 3. 1. 2-3 (a) InGaP、(b) CIGS、(c) CdTe 太陽電池の Isc の度数分布



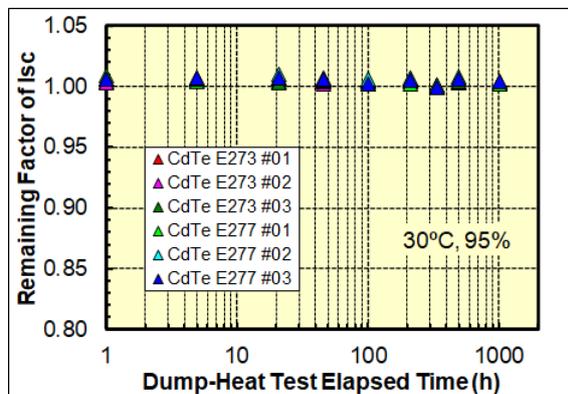
図 3.1.2-4 耐湿度性試験に用いた恒温恒湿試験装置 (ESPEC SH-221)



(a) InGaP 太陽電池

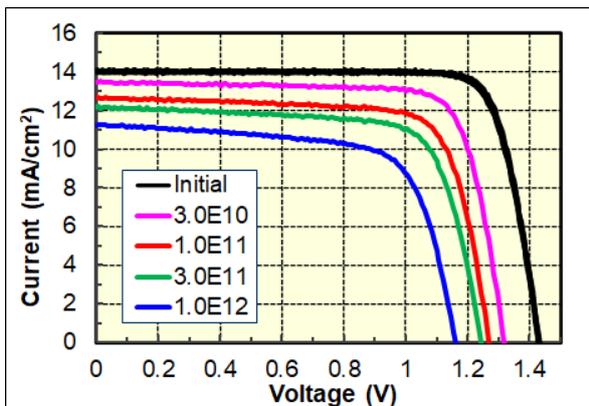


(b) CIGS 太陽電池

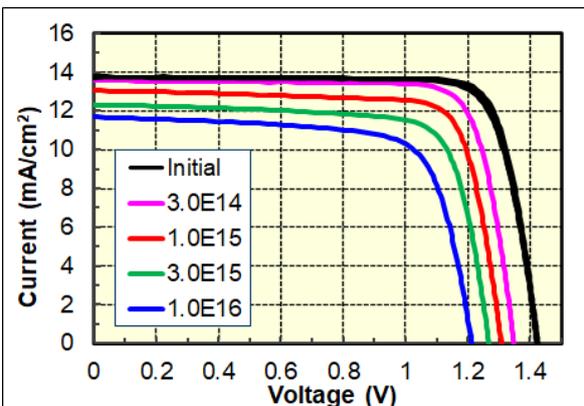


(c) CdTe 太陽電池

図 3.1.2-5 (a) InGaP、(b) CIGS、(c) CdTe 太陽電池の耐湿度性試験結果

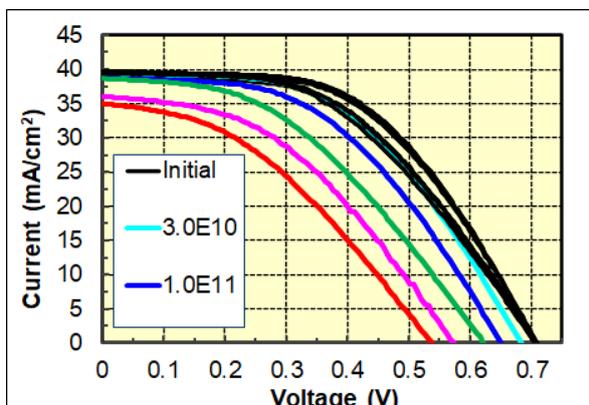


(a) 5 MeV He イオン

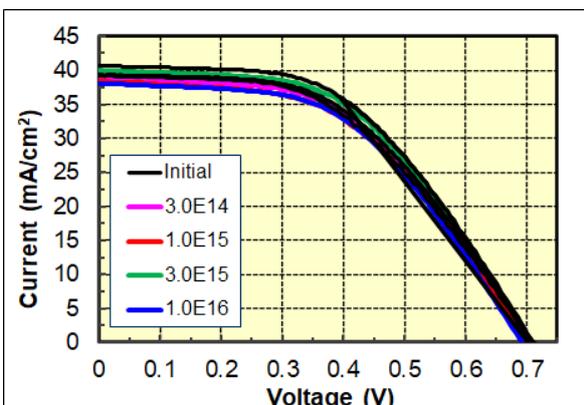


(b) 1 MeV 電子線

図 3. 1. 2-6 InGaP 太陽電池における (a) 5 MeV He イオンおよび (b) 1 MeV 電子線照射による LIV 特性の変化

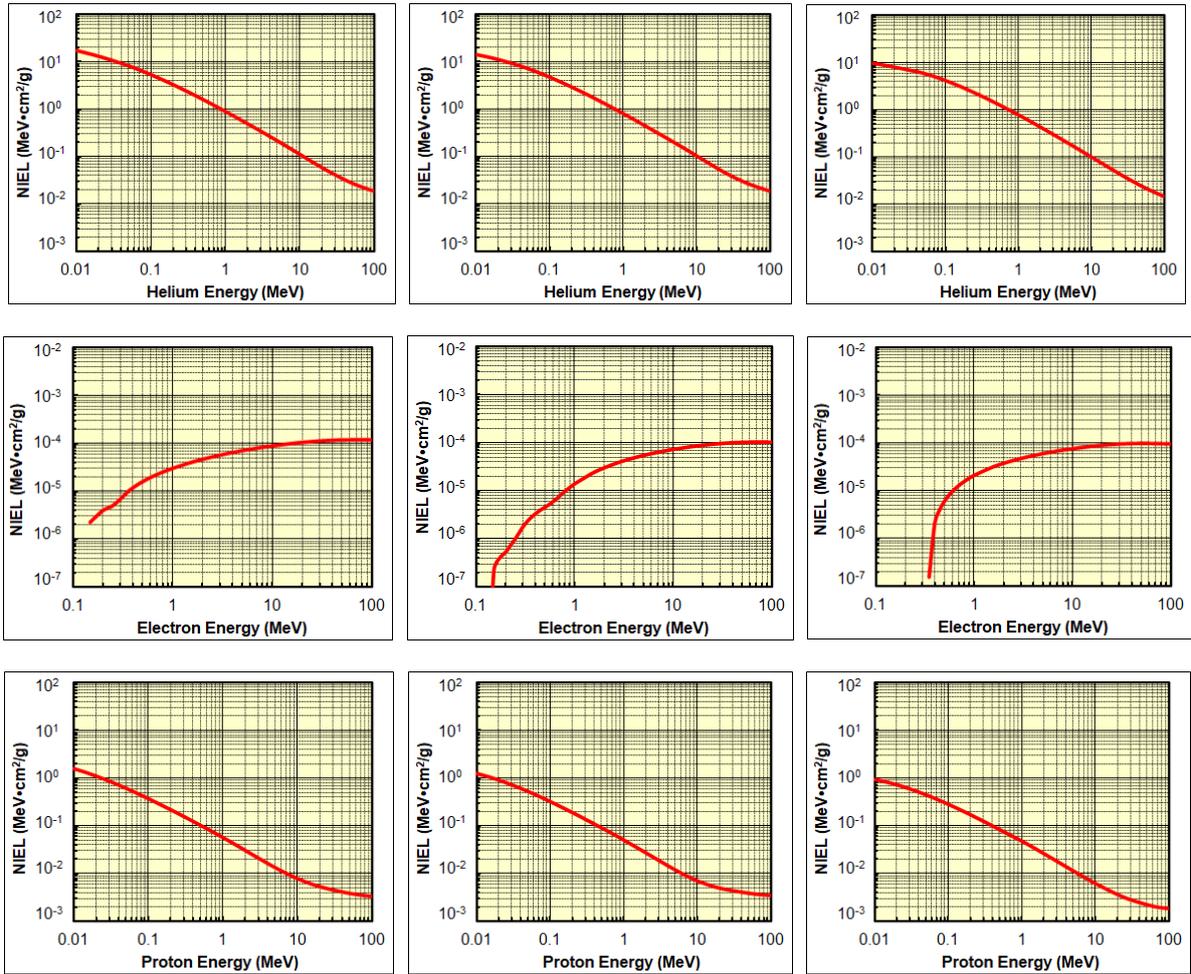


(a) 5 MeV He イオン



(b) 1 MeV 電子線

図 3. 1. 2-7 CIGS 太陽電池における (a) 5 MeV He イオンおよび (b) 1 MeV 電子線照射による LIV 特性の変化



(a) InGaP 太陽電池

(b) CIGS 太陽電池

(c) CdTe 太陽電池

図 3.1.2-8 (a) InGaP、(b) CIGS、(c) CdTe における NIEL 値の計算結果  
ヘリウム (上)、電子 (中)、陽子 (下)

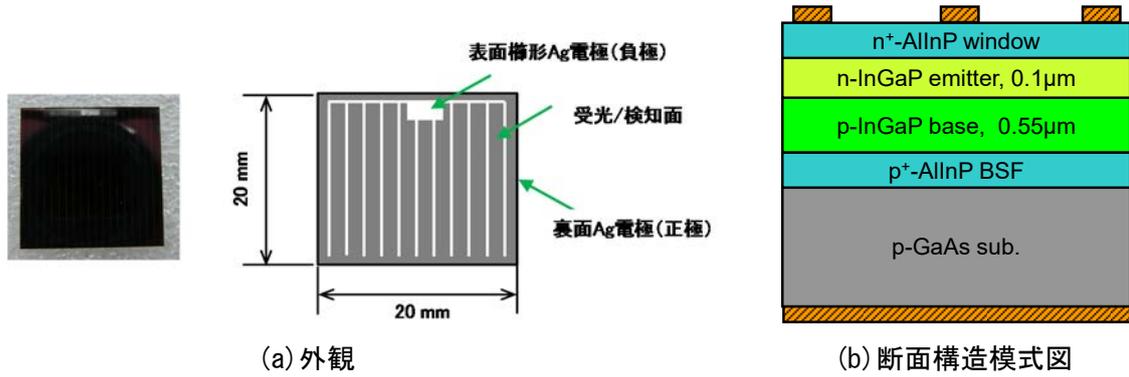


図 3.1.2-9 改良型 InGaP 太陽電池素子の外観写真、形状および断面構造模式図

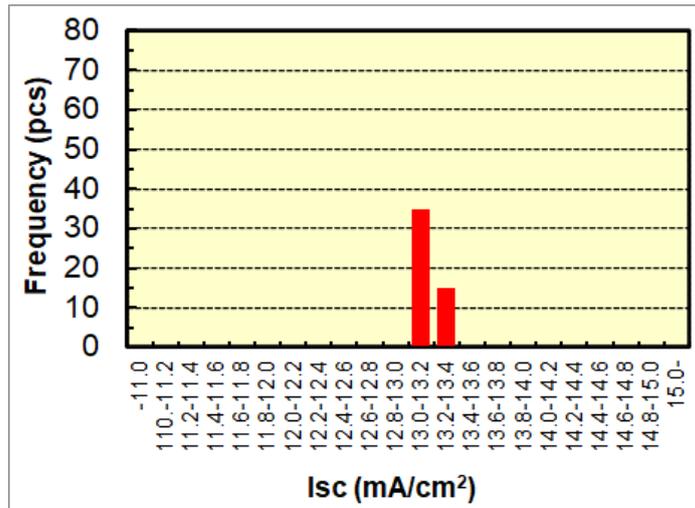


図 3.1.2-10 改良型 InGaP 太陽電池素子 50 枚における Isc の度数分布

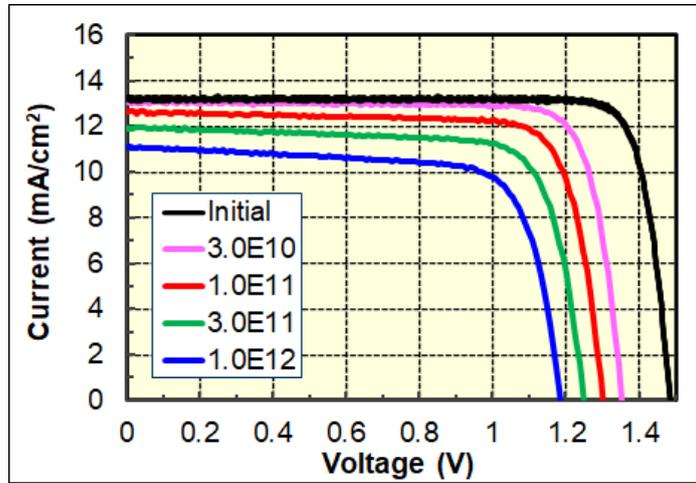
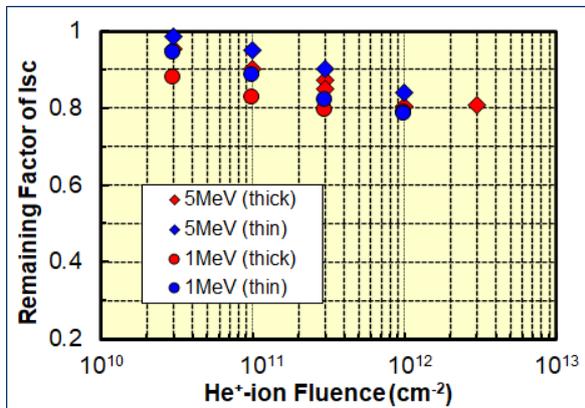
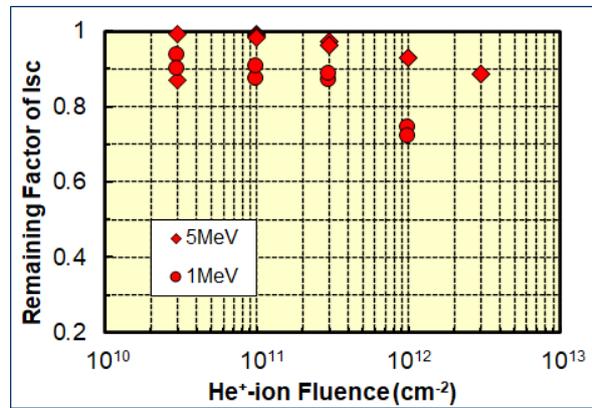


図 3.1.2-11 改良（薄）型 InGaP 太陽電池における初期および 5 MeV He イオン照射後の LIV 特性

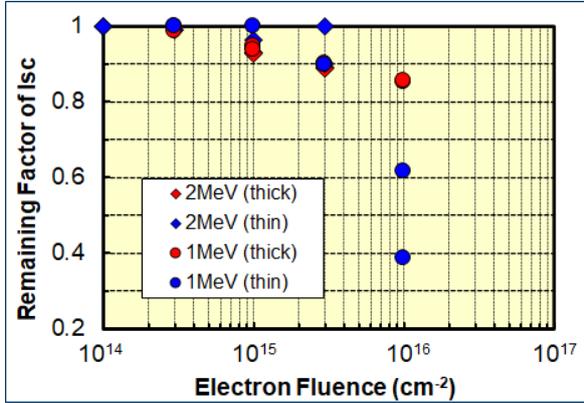


(a) InGaP 太陽電池

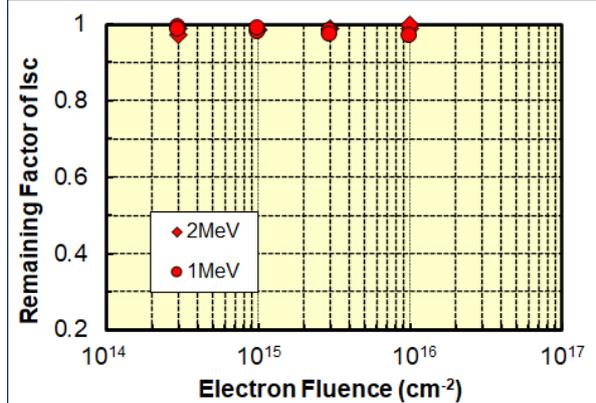


(b) CIGS 太陽電池

図 3.1.2-12 (a) InGaP 太陽電池および (b) CIGS 太陽電池における、 $I_{sc}$  の He イオンによる放射線劣化特性

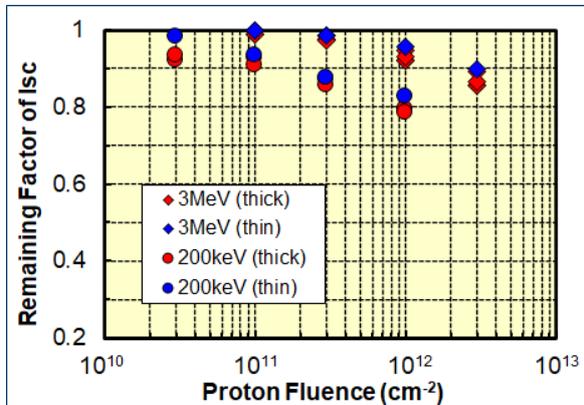


(a) InGaP 太陽電池

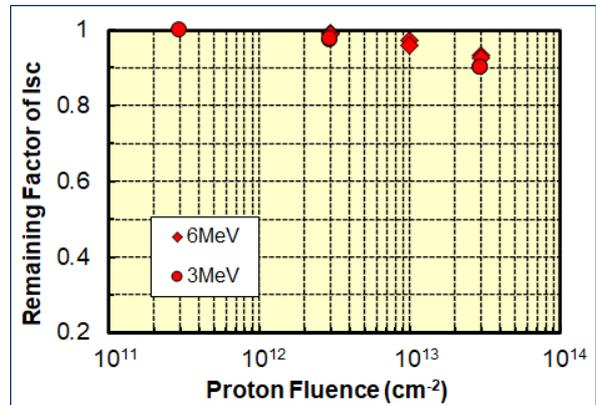


(b) CIGS 太陽電池

図 3. 1. 2-13 (a) InGaP 太陽電池および(b) CIGS 太陽電池における、Isc の電子による放射線劣化特性

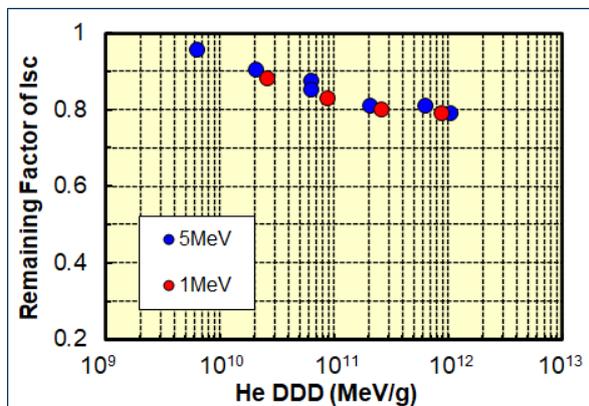


(a) InGaP 太陽電池

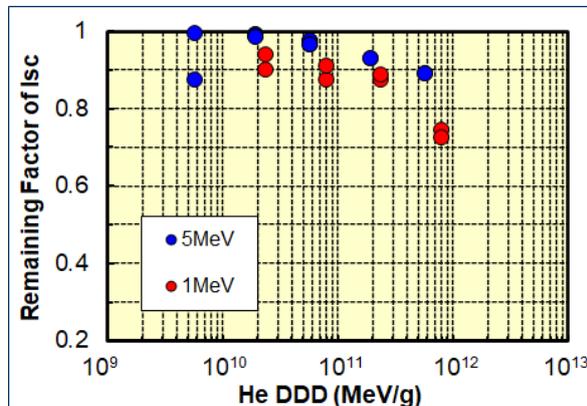


(b) CIGS 太陽電池

図 3. 1. 2-14 (a) InGaP 太陽電池および(b) CIGS 太陽電池における、Isc の陽子による放射線劣化特性

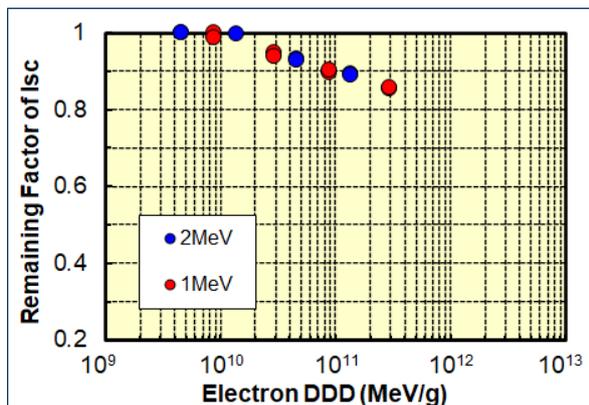


(a) InGaP 太陽電池

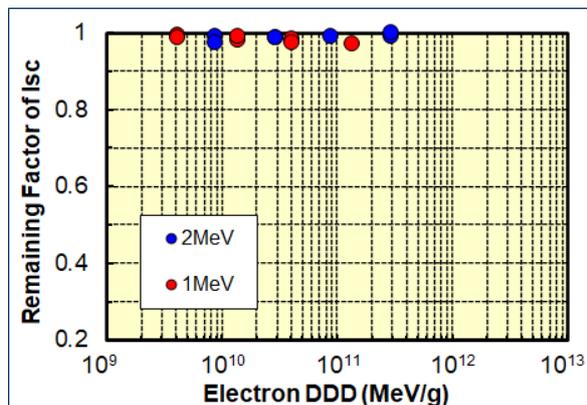


(b) CIGS 太陽電池

図 3.1.2-15 (a) InGaP 太陽電池および(b) CIGS 太陽電池における、Isc の He イオンによる放射線劣化データの DDD プロット

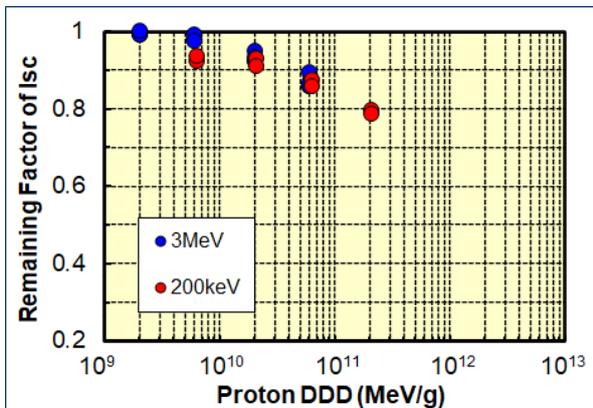


(a) InGaP 太陽電池

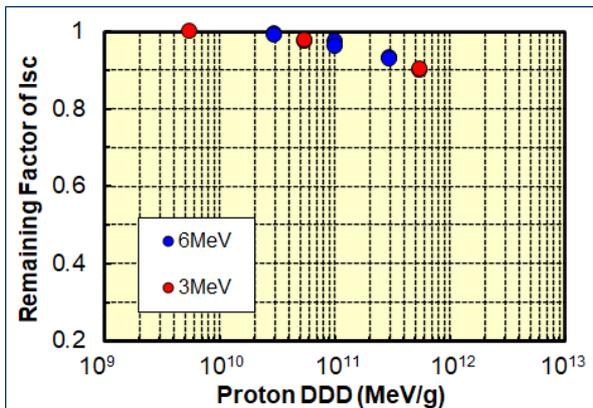


(b) CIGS 太陽電池

図 3.1.2-16 (a) InGaP 太陽電池および(b) CIGS 太陽電池における、Isc の電子による放射線劣化データの DDD プロット

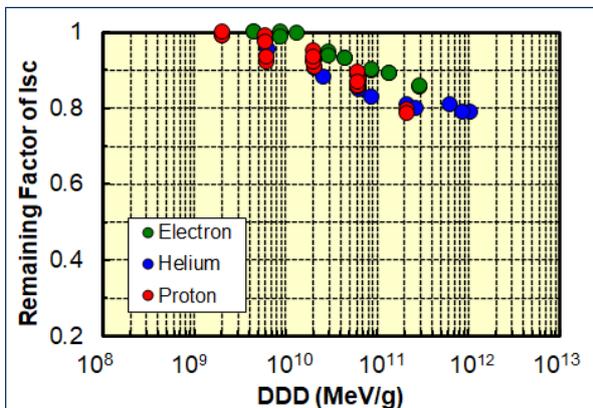


(a) InGaP 太陽電池

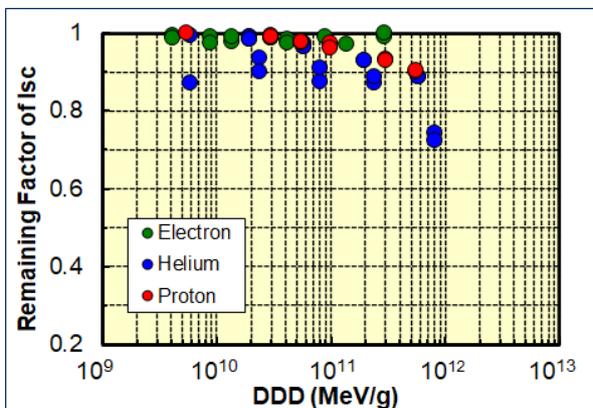


(b) CIGS 太陽電池

図 3. 1. 2-17 (a) InGaP 太陽電池および(b)CIGS 太陽電池における、Isc の陽子による放射線劣化データの DDD プロット

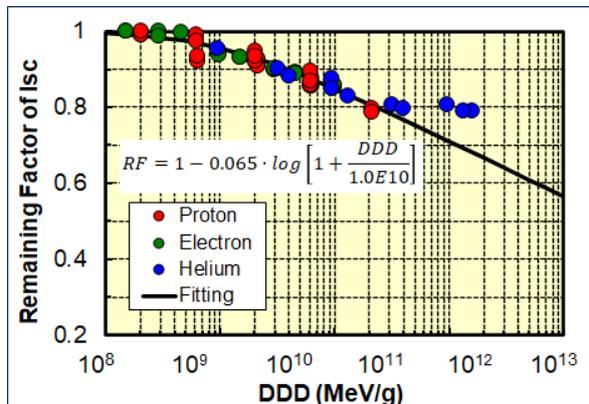


(a) InGaP 太陽電池

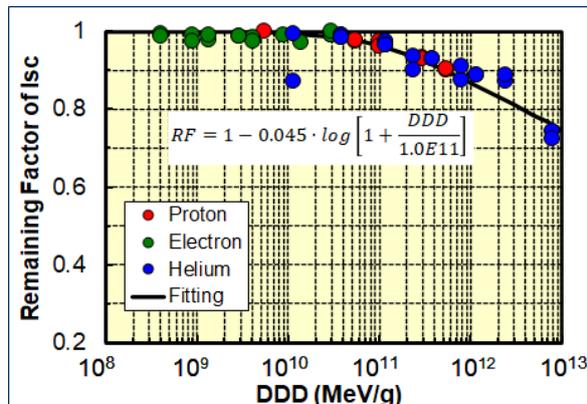


(b) CIGS 太陽電池

図 3. 1. 2-18 (a) InGaP 太陽電池および(b)CIGS 太陽電池における、Isc の放射線劣化データすべての DDD プロット

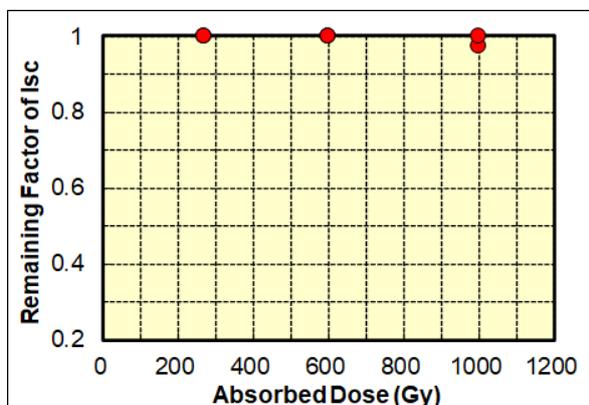


(a) InGaP 太陽電池

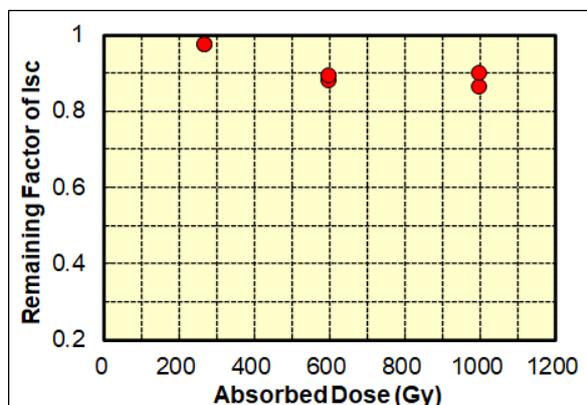


(b) CIGS 太陽電池

図 3. 1. 2-19 (a) InGaP 太陽電池および(b)CIGS 太陽電池における、Isc の陽子による放射線劣化データの換算後の DDD 値を用いたプロット



(a) InGaP 太陽電池



(b) CIGS 太陽電池

図 3. 1. 2-20 (a) InGaP 太陽電池および(b)CIGS 太陽電池における、Isc のガンマ線による放射線劣化特性

## 参考文献

- [1] Imaizumi, M. et al., Radiation Degradation Characteristics of Component Subcells in Inverted Metamorphic Triple-Junction Solar Cells Irradiated with Electrons and Protons, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, vol. 25, issue 2, 2017, pp. 161-174, DOI: 10.1002/pip.2840.
- [2] Imaizumi, M. et al., Results of Flight Demonstration of Terrestrial Solar Cells in Space, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, vol. 13, no. 2, 2005, pp. 93-102, DOI: 10.1002/pip.601.
- [3] Sugimoto, H. et al., Achievement of over 17 % Efficiency with  $30 \times 30$  cm<sup>2</sup>-sized Cu(InGa)(SeS)<sub>2</sub> Submodules, *Conf. Rec. 37th IEEE Photovolt. Specialists Conf.*, CD, Seattle US, 2011, DOI: 10.1109/PVSC.2011.6186681.
- [4] Klaer, J. et al., Damp Heat Stability of Chalcopyrite Mini-Modules: Evaluation of Specific Test Structures, *Conf. Rec. 31st IEEE Photovolt. Specialists Conf.*, CD, Lake Buena Vista US, 2005, DOI: 10.1109/PVSC.2005.1488137.
- [5] Ziegler, J. F., SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, vol. 268, no. 11-12, 2010, pp. 1818-1823.
- [6] Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Screened Relativistic (SR) Nuclear and Electronic Stopping Power Calculator, <http://www.sr-niel.org> (参照: 2021年1月12日).
- [7] Weinert, K. et al., Consequence of 3-MeV Electron Irradiation on the Photovoltaic Output Parameters of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells, *Thin Solid Films*, vol. 431, no. 1, 2003, pp. 453-456, DOI: 10.1016/S0040-6090(03)00181-0.
- [8] Hirose, Y. et al., Optical and Electrical Properties of Electron-Irradiated Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells, *Thin Solid Films*, vol. 519, no. 21, 2011, pp. 7321-7323, DOI: 10.1016/j.tsf.2010.12.132.
- [9] Kawakita, S. et al., Analysis of Anomalous Degradation of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Thin-Film Solar Cells Irradiated with Protons, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 27, 2007, pp. L670-L672, DOI: 10.1143/JJAP.46.L670.
- [10] Sugiyama, M. et al., Optical and Solar Cell Properties of Alpha-ray, Proton, and Gamma-ray Irradiated Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Thin Films and Solar Cells, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 4R, 2010, 042302, DOI: 10.1143/JJAP.49.042302.
- [11] Summers G. P. et al., A New Approach to Damage Prediction for Solar Cells Exposed to Different Radiations, *Proc. 1st World Conf. Photovolt. Energy Conv.*, Waikoloa US, 1994, 521828, DOI: 10.1109/WCPEC.1994.521828.

### 3.2 高耐放射線性微小電流計測システム開発【平成30年度～令和2年度】(再委託先：京都大学)

#### (1) 本研究項目の目的と業務内容

1Fの廃炉作業においては、作業領域の放射線線量率の値を知ることは、作業に従事するロボットやそれに搭載する機材の耐久性などを予測するうえで重要である。しかしながら、压力容器の中から、計測を実施する作業者のいる場所までは、80 mから100 mに及ぶ長い伝送線路を経由することになる。当然、伝送線路も放射線環境下に置かれるため、伝送線路においても放射線励起により電荷が生成され、電離損傷ノイズが発生する。放射線由来のノイズ以外にも、電源からくる電気ノイズ、ロボットの機械的な移動に伴うノイズ等様々なノイズなどが発生する。本研究ではまず、伝送線路として同軸ケーブルを選んでここで生成するガンマ線励起電流の概要を把握する実験を行った。ガンマ線照射に伴い同軸ケーブルに発生する現象を把握した後、ガンマ線励起電流を低減する手法として三重同軸ケーブルを用いた伝送方式を検討した。いくつかの異なる電氣的接続で実際にガンマ線照射下においてケーブルに生じる励起電流の測定を行い、同軸ケーブルを用いた場合との違いについて検討した。最後に、OSAMの出力を比較的短いケーブル(15 m)と長いケーブル(90 m)により伝送し、それらの間の差について検討した。最後に本研究で得られた実験結果をもとに検討したシステムの総合的な評価を行った。

#### (2) 同軸ケーブルにおけるガンマ線励起電流発生 の概要把握

##### ① 実験方法

この実験では、ガンマ線照射に伴い、同軸ケーブルRG58A/Uおよび1.5D-QEVにどの程度のガンマ線誘起電流が生じるかを計測した。ガンマ線照射は京都大学複合原子力科学研究所のコバルト60ガンマ線照射装置を利用した。異なる長さの伝送線路が受ける放射線の影響を評価するために、同軸ケーブルは15 mのものを複数購入し、接続端子を用いることで最長90 mまでの長さで計測を行った。同軸ケーブルは直径約20 cm程度に巻いた状態にし、上下をややつぶして、楕円形とした。巻いた状態の同軸ケーブル前面がガンマ線源から約40 cm離れたところに、中心の高さがおおよそ20 cmとなるように設置した。前面中心位置における線量率はおおよそ220 Gy/h程度である。同軸ケーブルの上側、下側では線量率はこの値よりも低くなるが、おおよそ100 Gy/h程度の値になっているものと見積もった。ただし、同軸ケーブルは長いと、巻き線の後ろの面は前面からは10 cm以上離れることもあり線量率見積もりの精度はさらに低くなる。このように線量率の精度は低いと、概要を知るためにこのような形で実験を行った。後に(3)でより正確な励起電流のガンマ線線量率依存性は評価する。ケーブル両端はそのまま照射室外に信号を取り出す同軸ケーブルに接続した。この状態であれば、線路を開放しないので、外部からの電氣的ノイズの影響を排除することができる。ソースメータ2台を用いて一方の端(端子A)から一定のバイアス電流を流し、他端(端子B)における電流を計測した。ガンマ線による励起電流が流れる場合、端子Bには端子Aから流れ込む電流と励起電流の和(ないしは差)になると考えられ、両者を比較することで励起電流を求めた。線路に流す電流は、1 pA~10 nAまでとした。異なる長さ(15 m、45 m、90 m)のRG58A/Uと太さが異なる1.5D-QEV(15 m)に対して測定を行った。ソースメータはKeithley Instruments製の2612Bを用い、計測は同社が供給するソフトウェアを用いて行った。電流値の測定は、ガンマ線源が照射室内に移動を終えた後、2分程度の時間をおいてから行った。これは、実験時においては、以前の研究[1]におい

て 2 分程度の時間が経てば、多少過渡現象があったとしても定常的な値に落ち着いていると判断したためである。

## ② 実験結果

90 m、45 m、15 m の RG58A/U および 1.5D-QEV に生じた励起電流の、同軸ケーブルバイアス電流依存性を測定した結果、バイアス電流の増加につれて、励起電流が低減するといった結果になった。しかしながら、結果の詳細な検討の結果、バイアス電流依存性というよりは、測定を行った時刻において残留していた過渡的な電流と判断した。このため、バイアス電流依存性としての意味は持たないため、得られた数値の範囲のみ表 3.2-1 に示す。また、90 m のケーブルでは励起電流が大きく、45 m、15 m のケーブルでは小さいが、励起電流は長さに比例していない。そのうえ、細いケーブルの 1.5D-QEV におけるガンマ線励起電流はそれよりも太い RG58A/U と比較してむしろ大きな値を示した。90 m ケーブルは励起電流の変化が大きかったが、それ以外は比較的小さな変化であった。100 Gy/h 程度の線量率と見積もった今回の計測で、3~5 pA/m の値を得たということは、1.1~1.8 pC/(Gy cm) 程度の値となる。この値は、文献[2] [3]の値と同程度である。

表 3.2-1 同軸ケーブルに誘起したガンマ線励起電流

ケーブルの種類	長さ	誘起したガンマ線励起電流の範囲
RG58A/U	90 m	235 pA ~ 340 pA
RG58A/U	45 m	102 pA ~ 112 pA
RG58A/U	15 m	82 pA ~ 87 pA
1.5D-QEV	15 m	99 pA ~ 100 pA

## ③ 考察

線路に流すバイアス電流が大きくなるにつれて、ガンマ線励起電流が低下しているのは、本質的な結果ではなく、同軸ケーブルに誘起するガンマ線励起電流の過渡現象とすでに判断している。その理由は、上記の結果は、バイアス電流の低い値から高い値へと計測しており、バイアス電流が高いものほど、測定時刻が後になっている。この後の実験で、ガンマ線源が格納されているところから照射室に移動する際、一時的に電流が流れることが観測されており、後述するようにこの電流が消失するにはかなり長い時間を必要とすることからも理解できる。さらには、RG58A/U のケーブルの励起電流が長さに比例していないこともこの過渡的な電流が影響しているものと考えられる。絶縁体の体積の小さい 1.5D-QEV ケーブルのほうが、励起電流が大きくなっているのは、RG58A/U については、それまでの測定で何度かガンマ線源の移動を経験しており、過渡的に流れる電流が低下していたのに対し、1.5D-QEV については、最初の照射であったため、過渡的に流れる電流が多かったと考えることもできる。この結果からだけでは断言は難しいが、同軸ケーブルに流れている電流にかかわらずガンマ線励起電流が流れると考えた。

別の実験で、ガンマ線照射開始から 2 分程度経過すれば定常状態になっていたということについては、その時用いていた素子は、その時観測していた電流が nA 程度のレベルであり、ケーブルにおいて発生する励起電流などの効果が見えなかったためと考えられる。

## ④ まとめ

同軸ケーブルにガンマ線照射をした場合、今の条件で、1~10 pA/m 程度の電流が流れることが明らかとなった。ただし、この値は定常的な値ではなく、過渡的に流れる電流を観測している可能性があることが明らかとなった。この後、より精度の高い測定を行い、伝送線路に生じるガンマ線励起電流の評価を行う。

## (3) 同軸ケーブルにおけるガンマ線励起電流の測定

## ① 実験方法

線量計使用時により近い状況を想定して、上で述べたような形態に巻いた同軸ケーブルの一端を開放、ないしは小信号整流用シリコンダイオードを出力の極めて小さい線量計と見立てて接続した場合のガンマ線励起電流の測定も行った。ダイオードの接続については、太陽電池と同じ接続の場合と逆接続の場合の両方を測定した。外部からの電氣的ノイズを遮蔽するため、図 3.2-1 に示すようなステンレス鋼製の保存缶を利用した。今回の実験では外部から強制的に電流を流した前項の実験とは異なり、同軸ケーブルに流れる電流を測定すればよい。したがって微小電流計のみを使い、微小電流計としては泰榮エンジニアリング株式会社のピコアンメータ iDC12 を用いた。計測ソフトは同社の提供するものを使用した。

ガンマ線照射は京都大学複合原子力科学研究所のコバルト 60 ガンマ線照射装置を用いて行った。ケーブルは前項の実験同様、巻いたケーブルの中心高さが 20 cm 程度となるように設置した。また、線源からの距離は 20~70 cm とした。



図 3.2-1 ケーブル端を電氣的に遮蔽するためのステンレス鋼製の保存缶  
(a) 外観 (b) 小信号整流用シリコンダイオードを取り付けたところ

## ② 実験結果

異なる場所において測定したケーブルに誘起した電流を図 3.2-2 に示す。横軸は直径 20 cm 程度に巻いたケーブルの中心における線量率である。赤丸はダイオードを太陽電池と同じ極性で接続した場合、青四角は逆極性で接続した場合である。いずれもガンマ線照射のない場合にはわずかに正の電流が流れたが、ガンマ線照射に伴い、負の電流が流れた。前項と同じ位置（線源から 40 cm）の位置では、太陽電池と同じ極性で接続した場合に -50 pA 程度の電流であったことから、3.3 pA/m となり、前回の値とほぼ同じである。

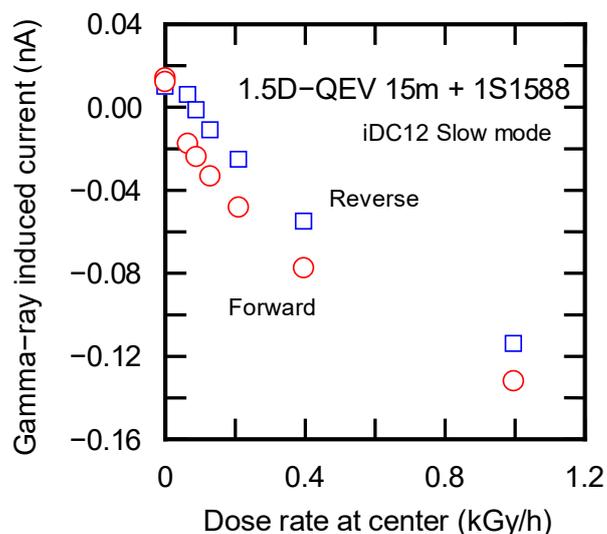


図 3.2-2 同軸ケーブルに誘起されるガンマ線励起電流の線量率依存性

③ 考察

ダイオードの接続の向きで計測される電流量が異なる点については、今後検討を要する。図 3.2-2 のグラフが下に凸の曲線になっているのは、横軸の線量率が巻き線中心における線量率を取っているためと考えられる。すなわち、線源に近い線量率の高い位置ほど、実際の線量率は高くなく、このグラフで左寄りにプロットする必要があるためと考えられる。

④ まとめ

OSAMを接続する場合と同じような回路構成で同時ケーブルに誘起するガンマ線励起電流を計測したところ、値としては、先の実験とほぼ同様の 3 pA/m 程度の値となった。ただし、巻き線中心における線量率が 200 Gy/h 程度の場合である。

(4) ガンマ線励起電流を抑制した微少電流伝送手法の開発

① ガンマ線励起電流を抑えるケーブル構造

(2)において、同軸ケーブルでは、芯線と被覆線間の絶縁体（ポリエチレン）に入射したガンマ線が原子を励起し、励起電流が流れることが明らかとなった。ここでは、この励起電流を抑制する伝送線路について検討した。ガンマ線励起電流の詳細は明らかではないが、絶縁体で電荷が発生した場合、その電荷が芯線ないしは被覆線を経由して電流計に入ることによって計測されるものと考えられる。

そこで、三重同軸ケーブルを利用することを考えた。通常の使用方法とは異なり、芯線と外側被覆で線量計出力の信号を取り出し、内側被覆については、励起電流を遮断する役割を持たせた。概念図を図 3.2-3 に示す。図 3.2-3 のような接続を実現するために、小型のアルミニウム製ケースに三重同軸ケーブル用のレセプタクルを取り付け、芯線と内側被覆をそれぞれ BNC 端子の芯線に接続した変換器を作製した。図 3.2-4 に模式図と写真を示す。

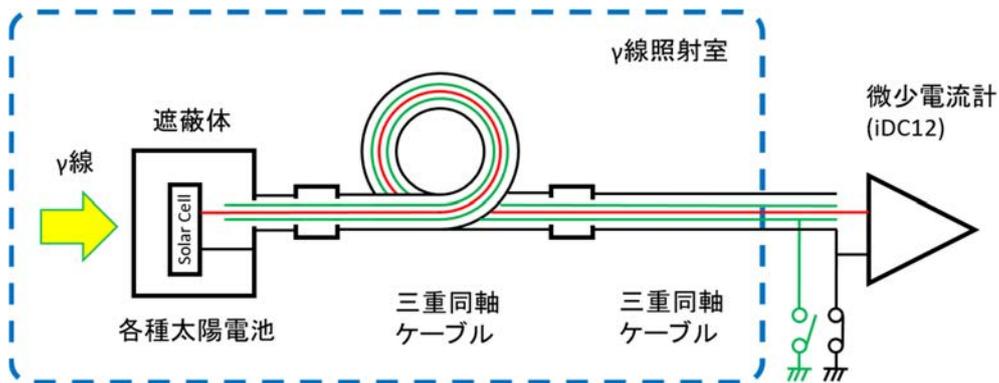


図 3.2-3 微小電流計測システムの総合的な遮蔽構造

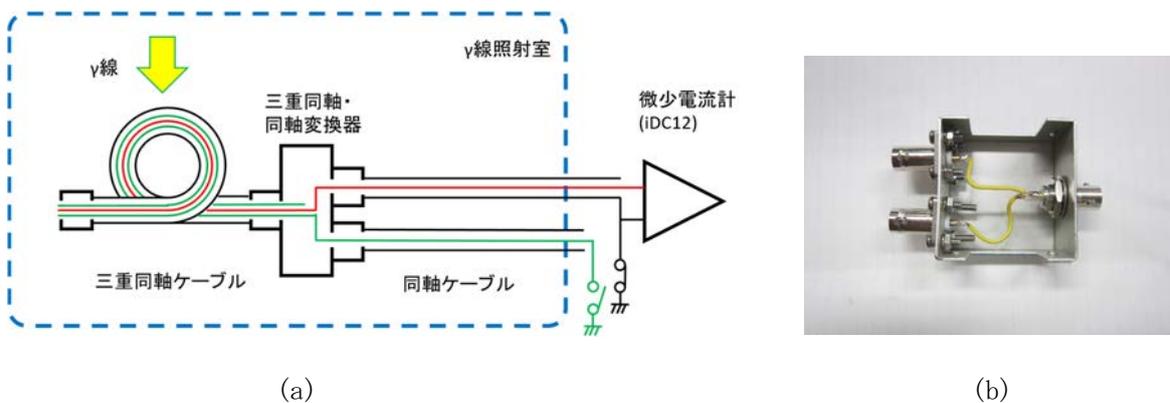


図 3.2-4 内側被覆を取り出す変換器  
(a) 原理図 (b) 写真

## ② 実験方法

ガンマ線照射は京都大学複合原子力科学研究所のコバルト 60 ガンマ線照射装置を用いて行った。まず、15 m の三重同軸ケーブルを直径 20 cm 程度に巻いたものを用いて、線源に対向させ、誘起される電流を測定した。この時、三重同軸・同軸変換器は照射室内で変換器に接続し、その後は同軸ケーブル 2 本を用いて計測室へ導入した。照射対象のケーブルの内側被覆を浮遊電位とした場合と接地した場合について測定を行った。この実験ではケーブルは開放とした。微小電流計として iDC12 を用いた。

最後に、上記の構造を持つケーブルにおけるガンマ線励起電流をできるだけ正確に見積もるために、15 m の三重同軸ケーブルを図 3.2-5 の写真に示すように、木枠の周りに巻いたものを作製した。また、後述する(5)に記載した線量計プロトタイプを用いて、木枠の 4 隅とその前後の位置合計 8 か所における線量率を計測した。図 3.2-5 の写真には、8 か所における線量率の測定値も併せて示した。値は前面 4 か所、後ろ面 4 か所ではぼそろっており、それぞれ 60 Gy/h、40 Gy/h 程度であった。この時は、15 m の三重同軸ケーブルの信号は、三重同軸ケーブルを用いて計測室まで導入し、微小電流計の手前で変換器を利用した。



図 3.2-5 ガンマ線励起電流測定のために木枠に巻いたケーブルと各場所における線量率  
単位は Gy/h

③ 実験結果

三重同軸ケーブルの内側被覆を浮遊電位にした時と、接地した時の励起電流を図 3.2-6 に示す。巻き線中心における線量率 200 Gy/h の時、内側被覆を接地すると -25 pA 程度の電流が流れたが、内側被覆を浮遊電位とすると、-20 pA 程度に低減した。このことから、内側被覆を浮遊電位にすることでガンマ線励起電流を低減できることがわかる。

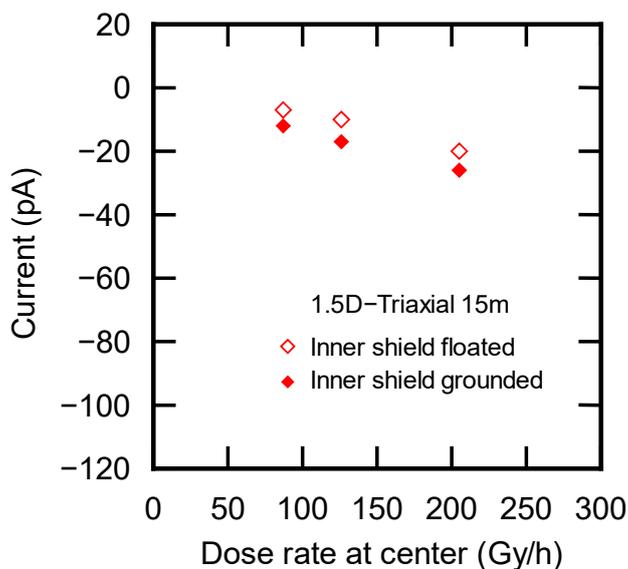


図 3.2-6 内側被覆を浮遊電位としたときと接地したときのガンマ線励起電流の違い

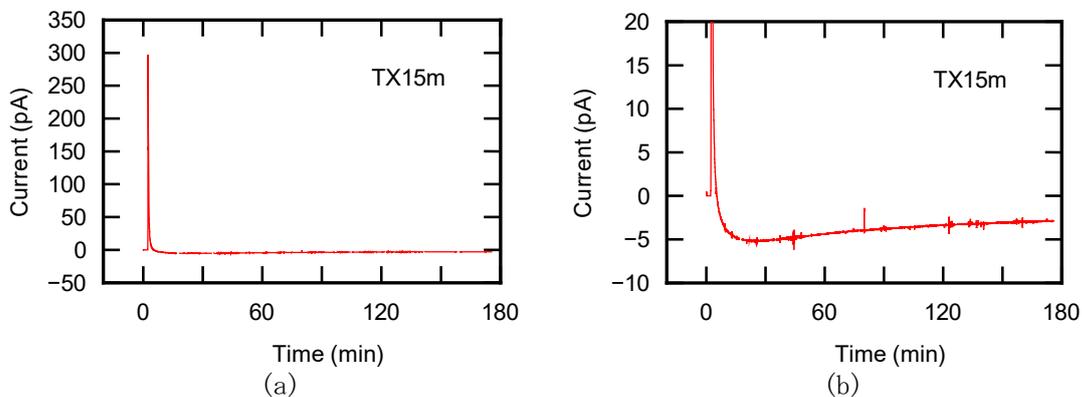


図 3.2-7 三重同軸ケーブルに誘起するガンマ線励起電流の時間変化  
(a) 3 時間の変化、(b) 縦軸を拡大したもの

続いて、ガンマ線励起電流をより正確に見積もるために木枠に巻いた三重同軸ケーブルの励起電流測定を行った。すでに示したように、ガンマ線源が照射室に入る際に、正の電流が流れる。この電流は長い時間をかけて減衰するため、比較的長い時間ガンマ線を照射し、その電流がどのようになるかを観測した。図 3.2-7 にその結果を示す。数十分程度の時間内では、正の電流を示す場合と負の電流を示す場合があったが、この場合は負の値となった。ほぼ 1 日経過した後では、 $-3.5 \text{ pA}$  程度となった。1 日経過後の電流値を図 3.2-8 に示す。図 3.2-8 の時刻 0 は、図 3.2-7 の照射開始から 21 時間後である。この状態で、内側被覆、外側被覆の接続を変更すると、例えば内側被覆を接地した場合には、電流が $-8 \text{ pA}$  程度になることが明らかとなった。回路切り替えの際に過渡的な電流が流れるが、20 分程度の中に収まることから、内側被覆を接地した場合の電流値は $-8.2 \text{ pA}$  と考えて差支えないものと判断した。

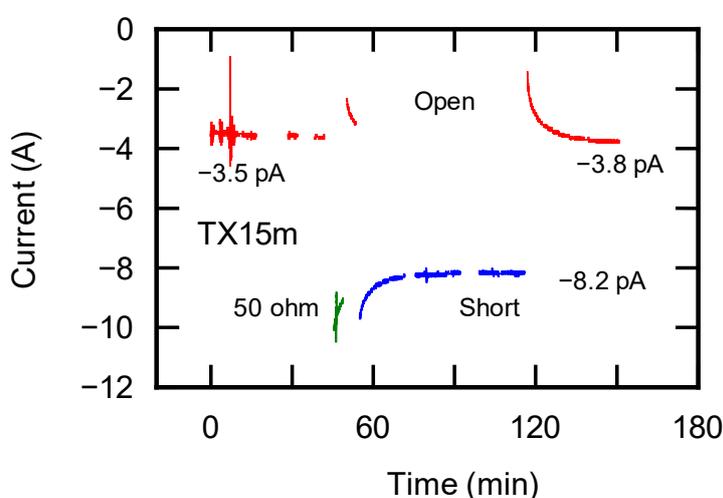


図 3.2-8 三重同軸ケーブルに誘起するガンマ線励起電流の接続方法の違いによる差

④ 考察

三重同軸ケーブルにおける誘起電流の経時変化は、1 日の単位に及ぶ。長い緩和時間の原因が何であるかは現在のところ明らかではない。

⑤ まとめ

ガンマ線照射下においてケーブルに誘起するガンマ線励起電流の測定を行った。特にこの項では、ケーブルへの線量率が比較的評価しやすい形にケーブルを整えてガンマ線照射を行った。1 日程度経過すると、ケーブルに誘起するガンマ線励起電流もほぼ落ち着くことが明らかとなった。

(5) 太陽電池線量計の出力電流の長距離伝送試験

① 実験方法

まず、各種太陽電池を静電的に遮蔽した形で異なる線量率のガンマ線に曝露した際に生じる電流を測定した。測定は、京都大学複合原子力科学研究所のコバルト 60 ガンマ線照射施設にお

いて行った。InGaP および CIGS 太陽電池についてはアルミニウム製の容器内に設置し、CdTe 太陽電池については、太陽電池としての特性測定用治具全体をアルミニウム箔で覆うことで静電遮蔽とした。電流の測定は泰榮エンジニアリング株式会社製の iDC12 である。使用した同軸ケーブルは RG58A/U である。各太陽電池の基本的な特性を把握した後、InGaP を取り上げて、これをステンレス鋼製の缶に封入した線量計プロトタイプを試作し、15 m および 90 m の三重同軸ケーブルを用いて太陽電池の出力伝送実験を行った。線量計プロトタイプの写真を図 3.2-9 に示す。使用した微小電流計は iDC12 である。(2)で述べたようにガンマ線照射開始・終了時に同軸ケーブルに過渡的な応答が見られたことから、出力電流の測定はガンマ線照射開始前から照射終了後までの間とし、線源の移動に伴う電流の過渡的な変化も記録した。



図 3.2-9 作製した線量計プロトタイプの写真

## ② 実験結果

各種太陽電池がガンマ線照射時に出力する電流を線量率依存性の形で表した結果、いずれの太陽電池も、線量率の増加に対して、出力電流が直線的に増加し、その増加の割合は 1 kGy/h 当たり CdTe が最も大きく 96 pA/cm<sup>2</sup>、次いで CIGS の 54 pA/cm<sup>2</sup>、最も小さいものが InGaP で 29 pA/cm<sup>2</sup> となった。CIGS は非放射線環境下においても比較的大きな暗電流が観測された。

本研究テーマは、太陽電池出力を長い伝送線路を経由して伝送した場合の問題を検討するのが主眼であるため、暗電流が少なく、最も感度の低い InGaP を採用することとし、この出力を長い伝送線路を用いて伝送した場合の特性を評価した。

15 m および 90 m の三重同軸ケーブルを用いて測定した線量計プロトタイプを線源から異なる位置に配置した際の出力電流の例を図 3.2-10 に示す。出力電流の測定は、ケーブル等に過渡応答があることを考慮して、ガンマ線源が照射室に入る前から定常位置にとどまり、その後ガンマ線源が格納室に収納されるまでの期間行った。図から明らかなように、線量計の出力が一

定になった部分では、同じ位置では伝送するケーブルの長さにかかわらず、線量計出力の値に有意な差は見られなかった。定常状態における出力値のガンマ線線量率依存性として示したものが図 3.2-11 である。青が 15 m ケーブル、赤が 90 m ケーブルであるが、プロットは重なっており、ほとんど区別できない。

ガンマ線源が格納されている地下から照射室に上昇するにつれて OSAM の出力も上昇するが、線源が照射室の規定の位置まで移動した後も出力がゆっくりと上昇する現象が観測された。この現象は線量率が低い時に顕著であった。しかしながら、線源が照射時の規定の位置にとどまっている間は、ケーブルの長さが 90 m になっても、15 m とほとんど変わらず、ケーブルを長くすることに関する微小電流伝送に与える影響はほとんどないことが明らかとなった。

### ③ 考察

各種太陽電池の非放射線環境下における暗電流の原因は現時点でははっきりとしない。

ガンマ線による励起電流は、三重同軸ケーブルの内側被覆と外側被覆を短絡した場合、 $0.33 \sim 0.49 \text{ pC}/(\text{cm} \cdot \text{Gy})$ 、内側被覆を浮遊電位とした場合、 $0.14 \sim 0.21 \text{ pC}/(\text{cm} \cdot \text{Gy})$  となり、後者ではガンマ線励起電流を半分以下に抑制することができることが明らかとなった。文献に見られる同軸ケーブルにおいて生じるガンマ線の励起電流としては、 $1 \text{ pC}/(\text{Gy} \cdot \text{cm})$  [2]、 $2.5 \text{ pC}/(\text{Gy} \cdot \text{cm})$  [3] がある。今回はケーブルが自身で遮蔽するような形態に整えたため、線量率の見積もりはやや不正確ではある。図 3.2-10 を見ると、90 m のケーブルの一部でやや電流値に乱れがみられるものもあるが、15 m のケーブルでも同様な例は見られ、ケーブルの長さによる効果ではないと考えられる。

ガンマ線源が既定の位置についた後、出力が漸増する現象についてはその原因は明らかではない。ただし、この漸増は試料に依存することから、太陽電池の膜質に依存しているものである可能性はある。

### ④ まとめ

InGaP 太陽電池を用いて、15 m のケーブルを用いたときと、90 m のケーブルを用いたときの出力電流の違いを確認した。結果として、ほぼ同一の値を得ることができ、ケーブルが長くなることによる問題はないと判断できる。

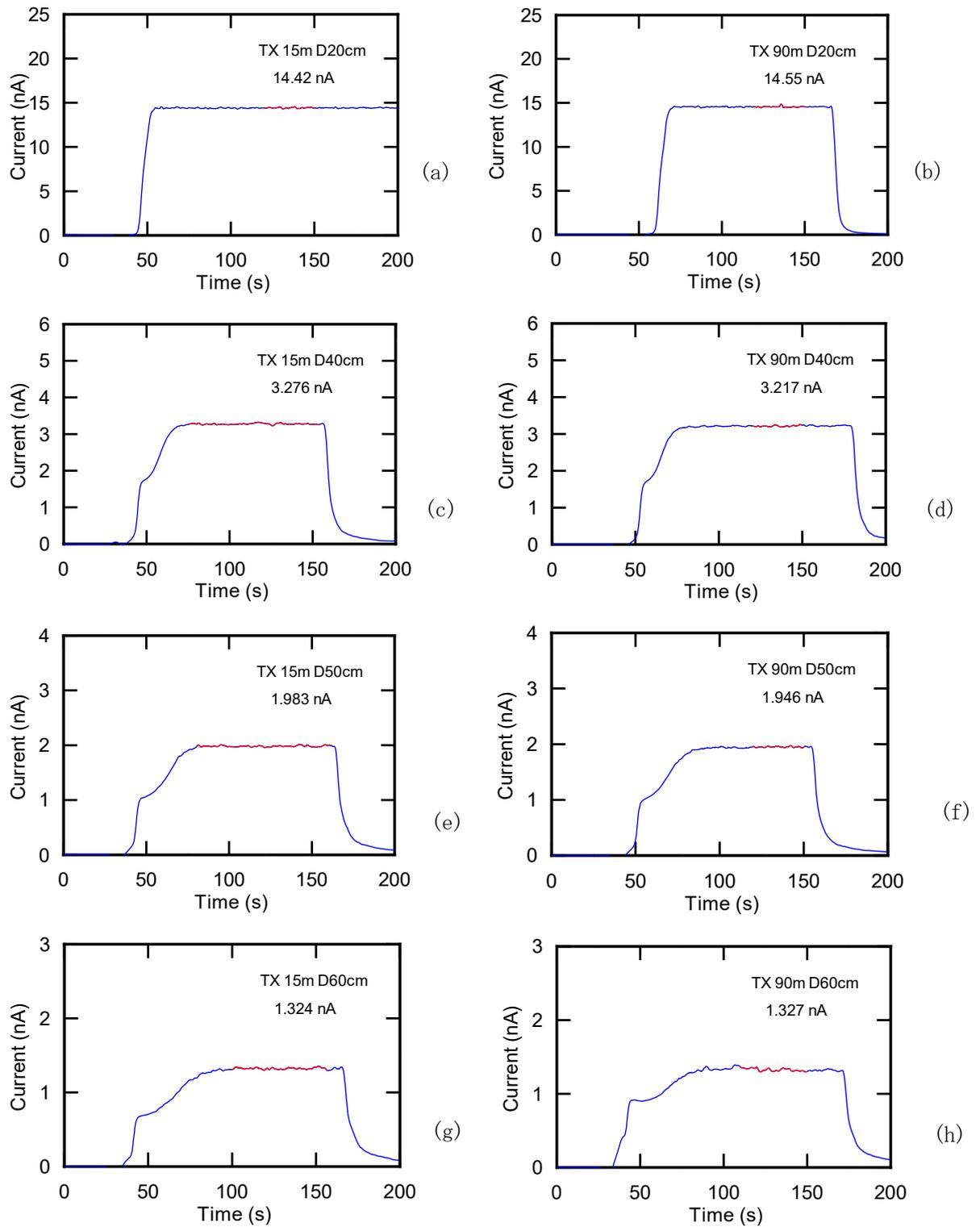


図 3.2-10 異なる場所における InGaP 太陽電池線量計の出力の時間変化

- (a) 線源から 20 cm、15 m、(b) 20 cm、90 m、(c) 40 cm、15 m、  
 (d) 40 cm、90 m、(e) 50 cm、15 m、(f) 50 cm、90 m、  
 (g) 60 cm、15 m、(h) 60 cm、90 m

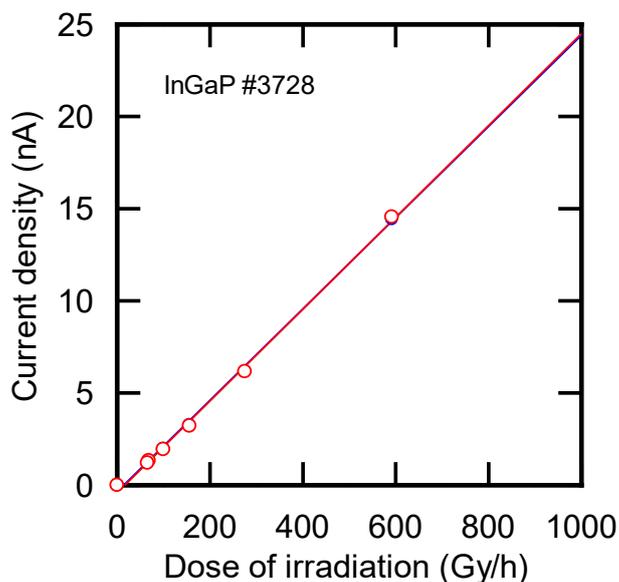


図 3.2-11 異なる線量率の場所において計測した InGaP 太陽電池の出力電流  
赤：90 m ケーブル、青：15 m ケーブル

(6) 総合評価

① 評価の概要

以上の結果を元に、本研究において得られた結果を総合的に評価する。

実際の 1F 廃炉の現場を想定して 100 m の伝送線路において 100 Gy/h 程度の線量率のガンマ線を受けると仮定した場合の励起電流の値は内側被覆を浮遊電位とした場合、三重同軸ケーブルの内側被覆と外側被覆を短絡した場合に、それぞれ 38～58 pA、91～136 pA である。今回検討した太陽電池 3 種類の中で、感度の最も低い InGaP の感度が、20～30 pA/(Gy/h) 程度であることを考えると、100 Gy/h の線量率の下では 2～3 nA の出力を得ることになり、線路において生じる電流は、全体の 2～3 %程度と見積もることができる。太陽電池センサの位置における線量率の値にかかわらず、伝送線路に上記の電流が流れるものとする、太陽電池センサが出力する電流が同程度となるのは 3 Gy/h となり、これが測定可能な線量率下限となる。しかしながら、今回の報告でも述べているようにガンマ線の強い透過性を利用すると、積層した構造を導入することでさらに感度を上げることができることを考えれば、線路における励起電流の影響はさらに低減できるものと考えられ、線量計出力の伝送にはほぼ問題がないものと考えられる。伝送線路および太陽電池センサに同程度の線量率でガンマ線が入射する場合には、伝送線路の線量率下限はなく、太陽電池センサが計測可能な線量率が測定できる下限値となる。

今回はガンマ線励起電流をできる限り低減するという観点から三重同軸ケーブルを用いた手法を検討した。しかしながら、ガンマ線により生じる励起電流が少ないことから、単純な同軸ケーブルを用いても十分伝送は可能と考える。

## ② 残された課題

残された課題としては以下が挙げられる。

- ・長時間ガンマ線照射を受けることによる伝送線路の劣化に伴う励起電流の変化

今回、実験では、いずれの場合も積算線量は大きくなく、劣化の影響について十分な知見は得られていない。この点が最も懸念される点である。

- ・線量計部分よりも伝送線路が高い線量率でガンマ線照射を受ける場合

圧力容器内での作業を考えると、線量計が最も線量率の高い部分にあり、伝送線路はその背後にあって線量率の低い空間と考えがちであるが、必ずしもそうとは限らない場合もありえる。例えば、2号炉内部の線量率測定においては、圧力容器の容器壁付近で比較的高い線量率を記録したということもある。実際の作業時には同軸ケーブルにおいて生じる励起電流を知ることはできないので、線量計の値の正確な補正は難しいが、経路に沿って予め線量率を計測しながら進む場合には、その線量率分布を元に、ケーブルにおける励起電流の値を見積もることができるとも考えられる。

- ・ガンマ線照射における過渡現象の理解

今回の実験結果より、ガンマ線源が格納されているところから照射時の位置に移動する間、同軸ケーブルには過渡的な電流が流れることが示された。1Fの圧力容器内では、放射線の空間分布は時間的に安定していると考えられるが、相対的にはロボットの移動により線源が移動すると受け止めることもできる。以下 3.3.1 で、線量率計を実際に移動させながら計測を行い、問題ないことを示している。また、過渡的な電流は、ガンマ線照射の有無を短い時間の間で繰り返した場合、徐々に低下する傾向があり、常時ガンマ線照射を受ける原子炉圧力容器内においては、一定の時間を経過した後は問題にならないとも考えられる。しかしながら、廃炉作業以外の原子炉の監視に利用する場合に備えて、過渡現象の理解を深めることは重要と考えられる。

## 参考文献

- [1] 京都大学, 「微小真空冷陰極アレイを用いた高い放射線耐性を持つ小型軽量撮像素子の開発」成果報告書 平成 27 年度文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業, 2016.
- [2] Yahagi, K. and Danno, A., Gamma-ray Induced Conductivity in Polyethylene Coaxial Cable, J. Appl. Phys., vol. 31, 1960, p. 734.
- [3] Malik, A. H. Ilyas, M., Ahmad M., Irfan N., Hussain, R., Study of Gamma Irradiation Effects on Coaxial Cables, 2015 Power Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET-2015), Islamabad, Pakistan, Jun. 10-11, 2015.

### 3.3 放射線照射実験【平成 30 年度～令和 2 年度】

#### 3.3.1 ガンマ線照射、電子線照射実験（再委託先：大阪府立大学）

##### (1) 事業全体を通じての実施内容について

平成 30 年度、令和元年度において、コバルト 60 ガンマ線照射施設を利用して、ガンマ線照射環境下に於ける太陽電池を用いた線量測定の実験環境を整備し、照射誘起電流の線量率依存性を広い線量率範囲において評価した。具体的には、照射プールの線源を用いた高線量率での照射時に空気中にオゾンや活性酸素種が発生することにより、照射線量率 4.9 kGy/h で積算線量 93.1 kGy までの照射を行った時点で太陽電池表面の電極を腐食することが明らかになったため、真空引き・アルゴンパージ可能で電流取り出しが可能な照射容器の開発を行った。容器内部での線量率分布の評価、照射時温度の計測などにより、照射条件の信頼性の確保を行った。また、第 2 照射室において 5.5～400 Gy/h の範囲で照射誘起電流測定を行った。泰榮エンジニアリング株式会社製のピコアンメータ iDC12 とシールドツイストペア、ステンレス製のケースなどでノイズ対策を行ったところ、ノイズを低減して照射誘起電流の線量率依存性を取得することができたが、誘起電流の絶対値が小さく、また使用した施設の接地極に問題があったため iDC12 では 1 Gy/h 以下の線量率での測定は行うことができなかった。

令和 2 年度については、令和元年度に開発した照射容器とコバルト 60 照射施設により、大線量率（最大 10 kGy/h 程度まで）から低線量率（数 mGy/h 程度）でのガンマ線照射時の太陽電池起電力測定を行い、出力電流の線量率依存性を広い線量率範囲において評価した。また、1 MGy 程度までの積算の線量による起電力特性変化を評価することで耐性評価を行う。これにより、1F 内の過酷環境における太陽電池の線量計としての信頼性を確認した。InGaP 太陽電池は、0.2 Gy/h 以下で急激に変動係数が大きくなり測定の信頼性が低下した。また、268 kGy 照射後の時点で 10 Gy/h 程度の線量率での出力電流低下が見られた。照射欠陥の導入が原因と考えられる。また、1.25 cm/s で移動しながらの測定でも、1 分間静止しての測定とほぼ同等の測定結果となっており、廃炉現場での移動中の測定の妥当性が確認された。

CW 加速器で 60 keV 程度の低エネルギーから 500 keV 程度までの範囲でビーム電流値を変えて電子線照射を行い、太陽電池からの起電力をその場測定することでベータ線測定の模擬を行った。また、ガンマ線照射よりも高い線量に相当する照射が可能であるため、損傷評価のため積算電子線照射を行い、理論的な予測モデルの妥当性を確認した。さらに、ベータ線による起電力特性の検証のために、<sup>90</sup>Sr 密封線源を用いた実証試験を行った。

##### (2) ガンマ線照射時誘起電流測定

令和 2 年度は、第 3 照射室 (0.04～0.98 Gy/h)、第 2 照射室 (8.2～76 Gy/h)、第 4 照射室 (45～566 Gy/h)、照射プール 10cm 容器 (3.9 kGy/h) と線量率範囲の異なる照射場を利用して、広い範囲での照射時誘起電流測定を InGaP および CIGS 太陽電池に対して実施した。プールでの照射を除く各照射室での測定では、ステッピングモーターを Arduino により制御する全長 1 m のリニアガイドを利用して、照射室に立ち入ることなく連続的に正確な位置での測定を可能とした。図 3.3.1-1 にリニアガイドのステッピングモーター、ステージ部、図 3.3.1-2 に Arduino を使用したコントローラー部を示す。また、微小電流計として最小分解能が 0.1 pA の iDC シリーズの iDC13（泰榮エンジニアリング株式会社製）を使用し、接地極を問題のある分電盤から、より問題の少ない水道管とすること、さらに電流計の電源を商用電源ではなくバッテリー駆動のポータブル電源（ANKER PowerHouse A1701）とすることで、令和元年度よりも測定精度を向上させた。また、従来実施できなかったプールでの高線量率での照射

時の測定も、令和元年度に製作した電流取り出し端子付きのφ10 cm 照射容器により、初めて実現した。図 3.3.1-3 に第 3 照射室における照射誘起電流測定時のレイアウト、図 3.3.1-4 に照射誘起電流測定用ホルダーを用いた InGaP 太陽電池測定時のレイアウトを示す。

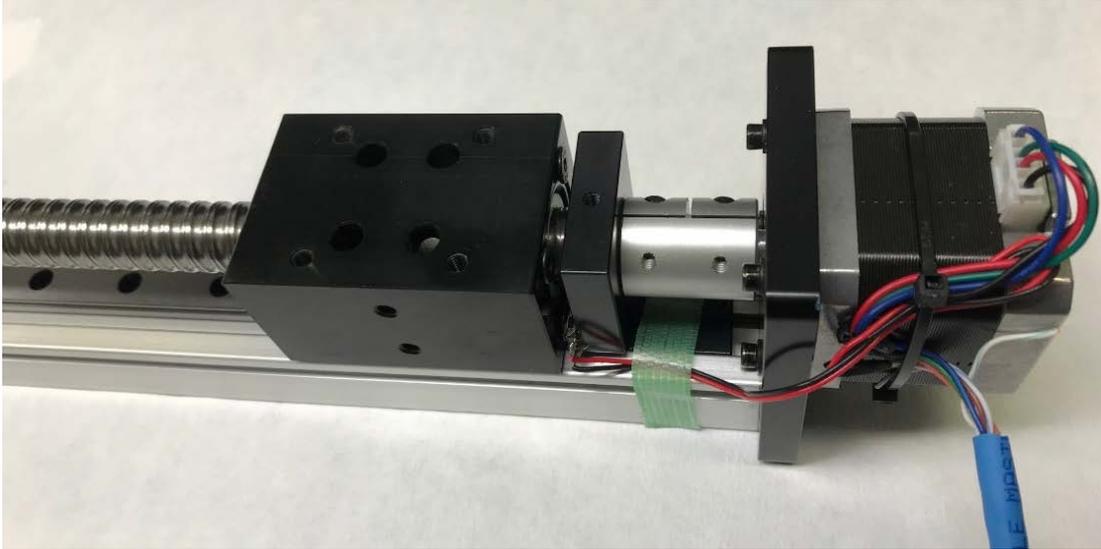


図 3.3.1-1 リニアガイドのステッピングモーター、ステージ部

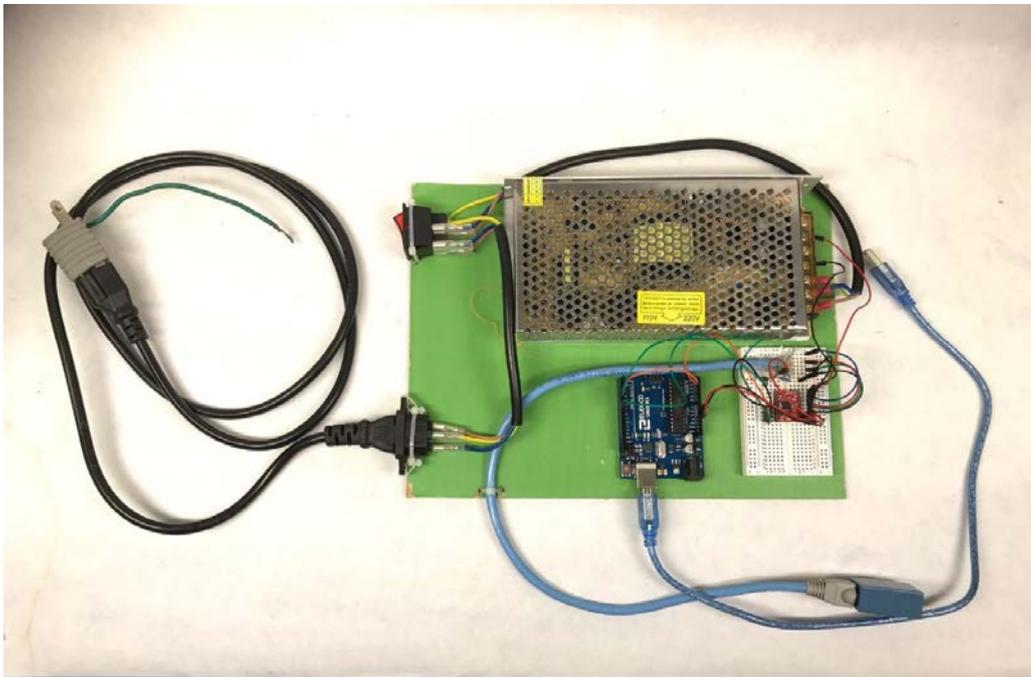


図 3.3.1-2 Arduino を使用したコントローラー部

照射室内部のステッピングモーターとはイーサネットケーブルを接続ケーブルとして照射室外に設置したコントローラーまで配線を行い、USB 接続で PC 上のコンソールから制御を行う。



図 3.3.1-3 第3照射室における照射誘起電流測定時のレイアウト  
画面左側に線源が配置されている。

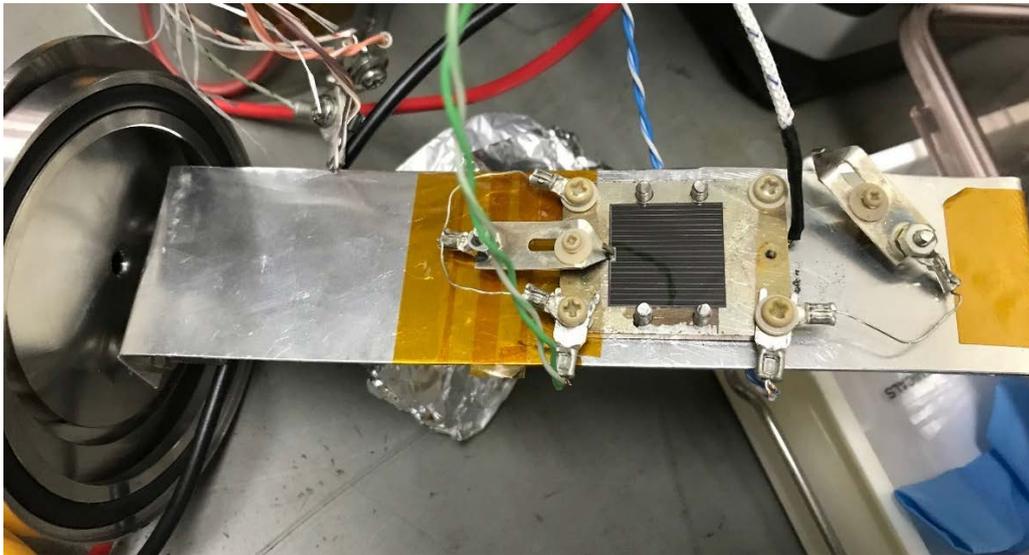


図 3.3.1-4 照射誘起電流測定用ホルダーを用いた InGaP 太陽電池測定時のレイアウト

InGaP 太陽電池に対する測定結果を図 3.3.1-5、図 3.3.1-6、図 3.3.1-7 に示す。図 3.3.1-5 は第 3 照射室における低線量率での照射時誘起電流測定結果であり、0.2 Gy/h 以下になると 1 分間の測定時間内でサンプリングされた電流値の変動係数が急増し（図 3.3.1-6）、測定値の信頼性が大きく低下した。なお、第 4 照射室（45～566 Gy/h）の測定結果のみ傾向から外れているが、他と異なる接地極を使用したためであると考えられるが、線源からの距離と線量率の関係について、ラジオクロミック線量計や熱蛍光線量計（TLD）バッジを利用した実測は行っていないため、より高精度化のために今後検証を行う必要性が示唆された。

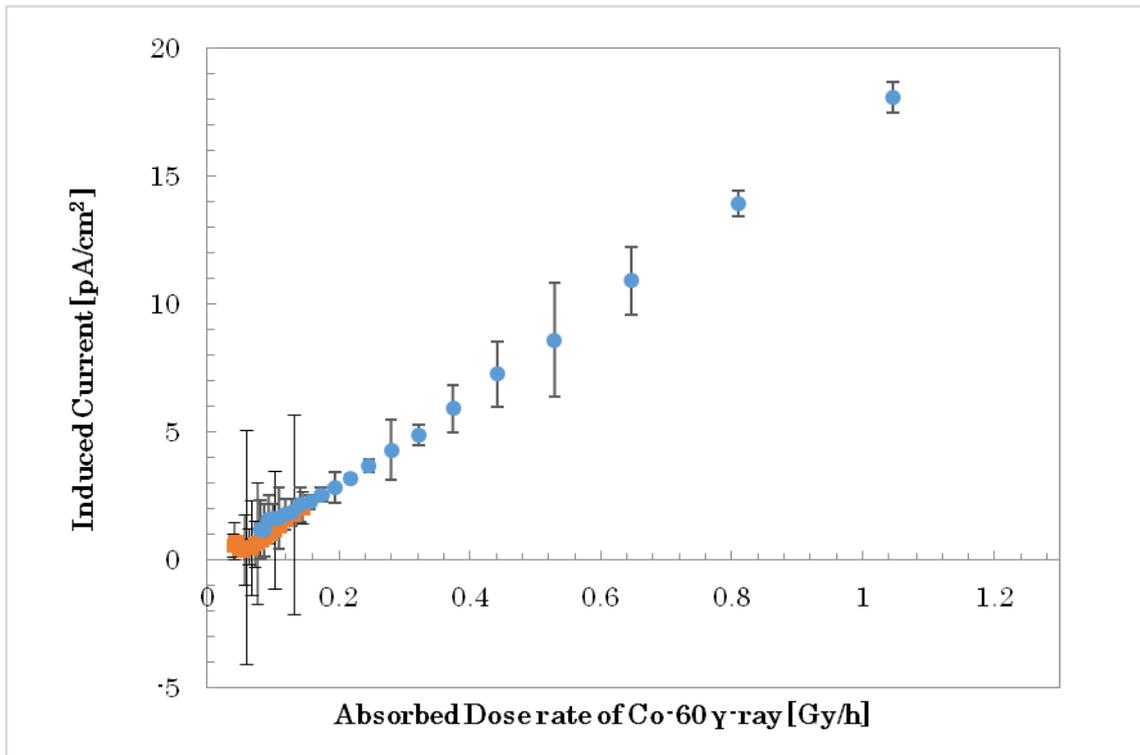


図 3.3.1-5 InGaP 太陽電池の低線量率での照射誘起電流線量率依存性  
リニアガイドの設置位置を動かして広い線量率範囲での測定を行った。

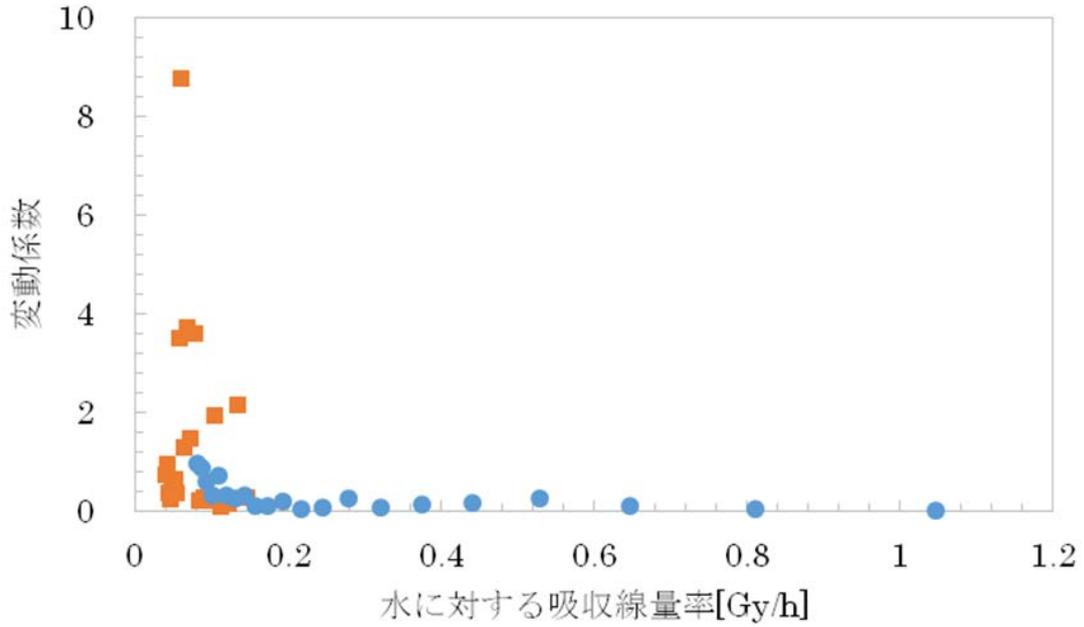


図 3.3.1-6 図 3.3.1-5 で示した InGaP 太陽電池の照射誘起電流測定時の各測定点における測定値の変動係数  
0.2 Gy/h 以下で急激に信頼性が低下している。

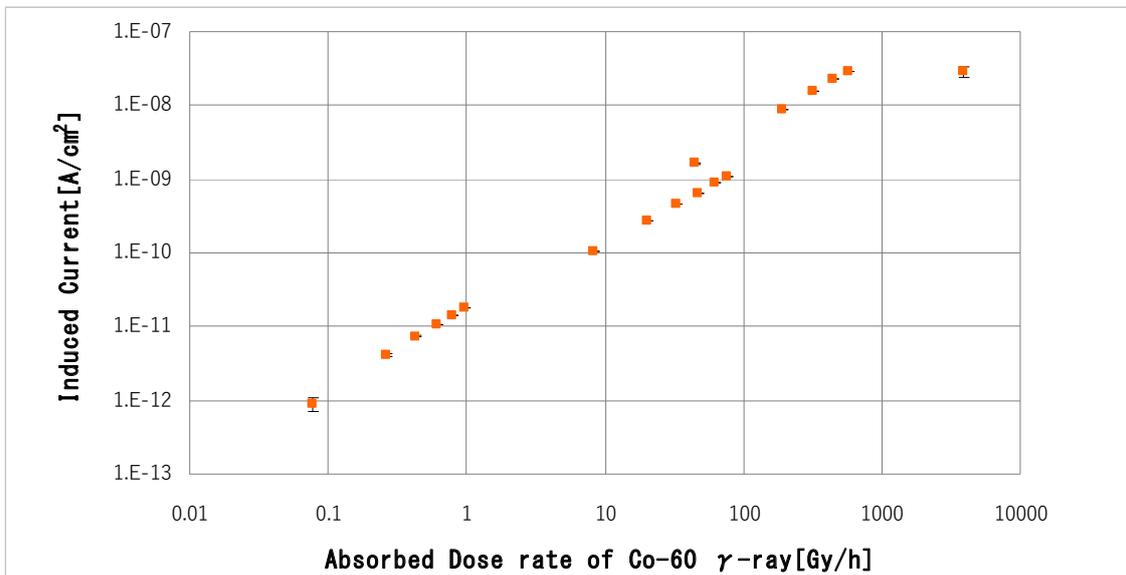


図 3.3.1-7 広い線量率範囲で測定した InGaP 太陽電池の照射誘起電流の線量率依存性

CIGS 太陽電池については第2照射室での測定において、他の照射場での測定結果と比較して一桁程度小さい測定結果となった（図 3.3.1-8）。2枚の素子について測定しているが同様の傾向であった。比較的誘起電流は大きく、接地極の影響によるノイズによるものではなく、電流取り出しのための接触端子の表面状態により抵抗が入ったことが考えられる。図 3.3.1-8 は1分間静止しての測定結果の平均であるが、ここで使用した素子とは別の素子であるが、1.25 cm/s でリニアガイドを線源に近づける方向に動かし続けた場合のサンプリングデータの比較を図 3.3.1-9 に示す。両者はほぼ同じ値を示しており、この程度の移動速度であれば廃炉時の炉内で移動しながらの in-situ 測定が可能であることを示している。

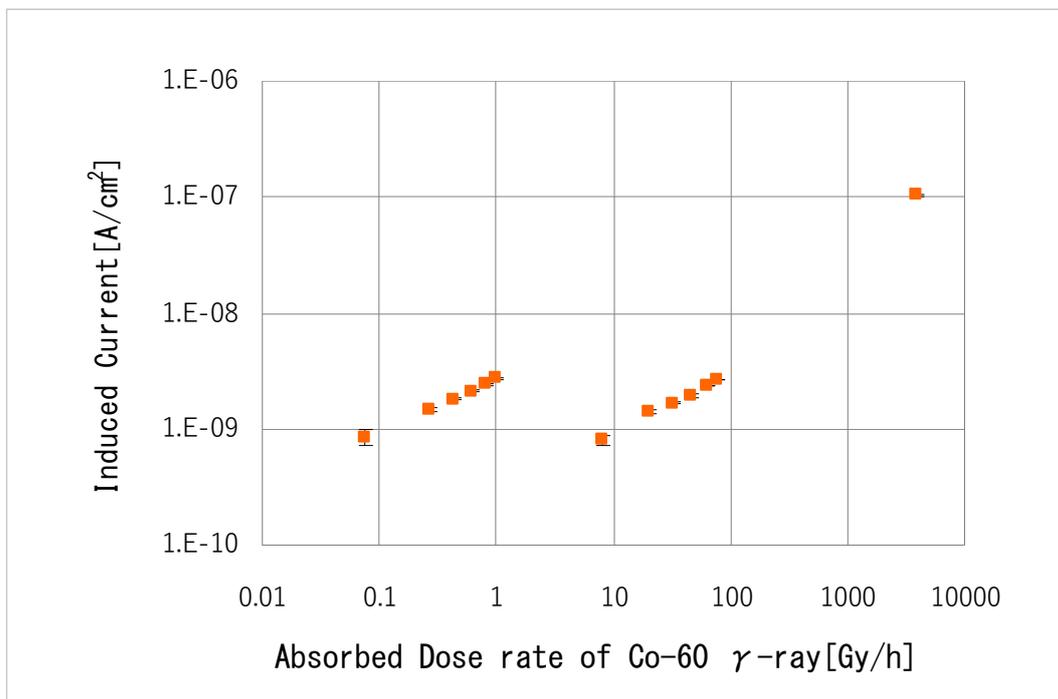


図 3.3.1-8 広い線量率範囲で測定した CIGS 太陽電池の照射誘起電流の線量率依存性

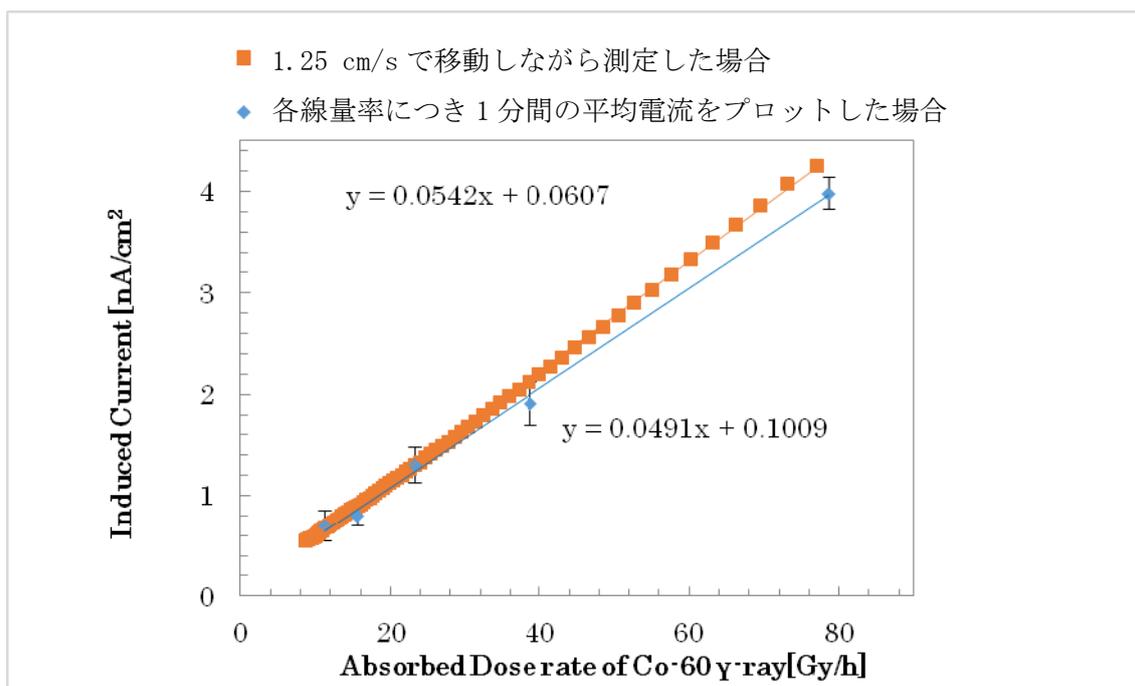


図 3.3.1-9 静止して 1 分間のサンプリングデータの平均をとった場合と、移動しながらのサンプリングデータの比較  
両者は異なる素子を用いているが良い一致を示した。

(3) 大線量照射後のガンマ線照射時誘起電流測定による素子耐性評価

図 3.3.1-10 に 1 MGy まで照射後の InGaP 太陽電池の照射誘起電流の線量率依存性を示す。照射後の測定は第 2 照射室のみで行った。照射により、比較的 low 線量率での照射誘起電流の低下が見られている。別途測定している I-V 特性評価の結果では開放端電圧の低下が見られており、高エネルギーガンマ線照射に伴う光電子などによるはじき出し欠陥の導入などにより再結合中心が生成されたと考えられる。

また、図 3.3.1-11 に 600 kGy まで照射後の CIGS 太陽電池の照射誘起電流の線量率依存性を示す。CIGS 太陽電池については、600 kGy 照射後の暗電流が  $1 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup> 程度まで大きくなっており、照射時の測定では 3 Gy/h 程度までの線量率の低い領域では暗電流を差し引くとわずかに負の値となりプロットできないため、除外した。1 MGy 照射後は、20 Gy/h 程度までは  $6 \times 10^{-11}$  A/cm<sup>2</sup> 程度と非常に誘起電流が小さく、それ以上の線量率では逆に小さくなり負の値となったため、除外した。

なお、1 MGy までの照射後の試料に関して、図 3.3.1-12 に示すように InGaP 太陽電池は 2 枚とも素子が破損していた。照射時誘起電流測定は可能であったため破損面積を補正してグラフ上にプロットしたが、参考値として扱うべきと考えている。また、23 Gy/h 以下の線量率での測定では誘起電流が負の値となったため除外した。

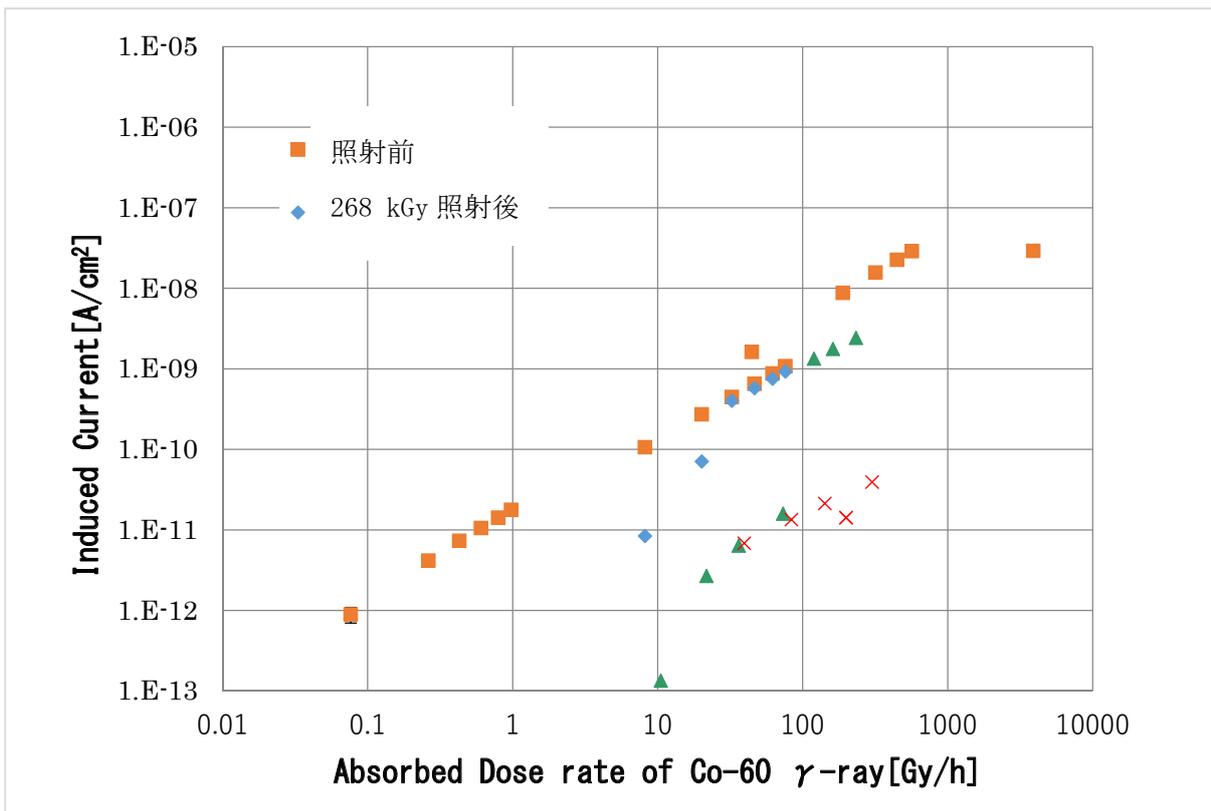


図 3.3.1-10 1 MGy まで照射後の InGaP 太陽電池の照射誘起電流の線量率依存性

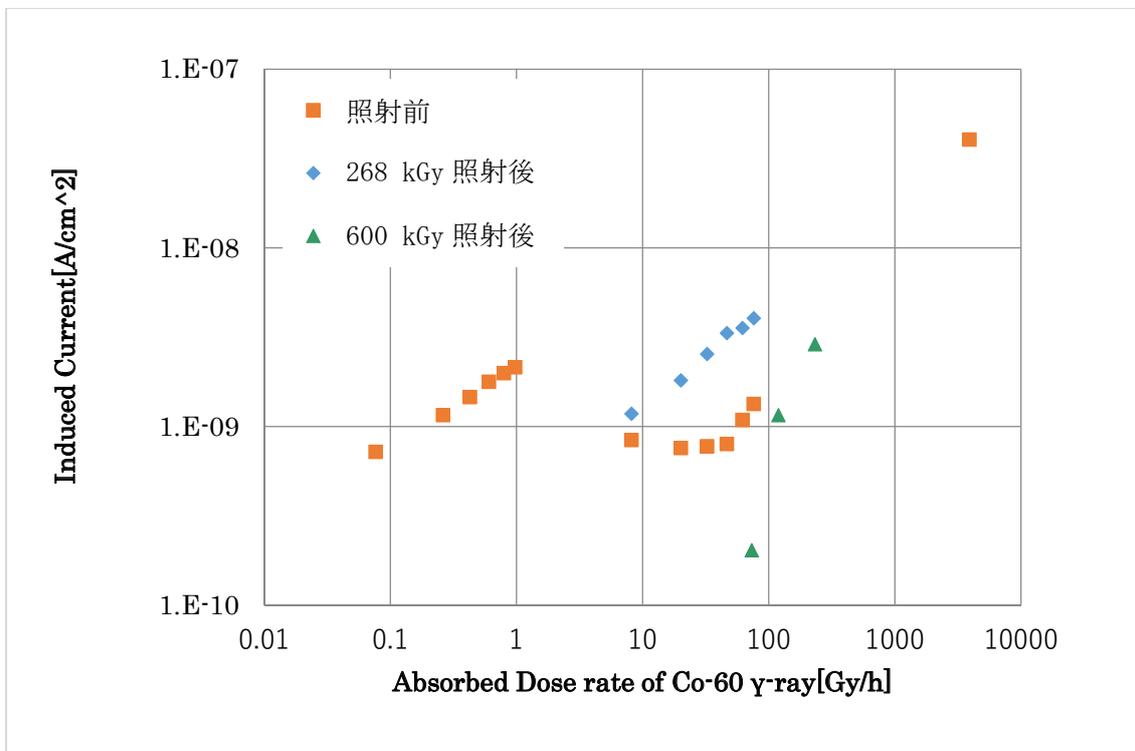


図 3.3.1-11 1 MGy まで照射後の CIGS 太陽電池の照射誘起電流の線量率依存性

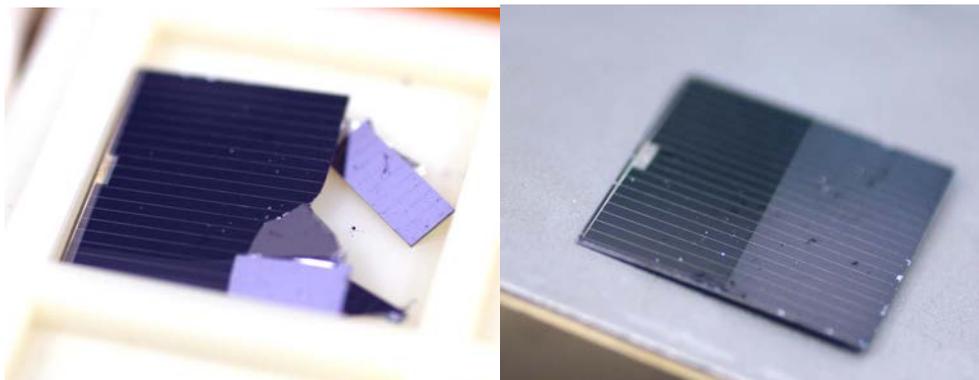


図 3.3.1-12 1 MGy まで照射した InGaP 太陽電池

左の素子は照射板への貼り付けテープ除去時に破損、右の素子は触る前から破損が確認された輸送時の振動の影響なのか、照射損傷によるものなのかは不明。

(4) <sup>90</sup>Sr 密封線源を使用した照射時誘起電流測定

チェックソースとして用いられる <sup>90</sup>Sr 密封小線源（電離箱による表面での 70 μm 線量等量率 0.11 mSv/h）を用いて実際のベータ線源を模擬した測定を行った。暗電流の測定、線源を InGaP 太陽電池素子に貼り付けての測定、再び線源を外して暗電流の測定を繰り返した。また、接地極として居室の分電盤に接続した場合と水道管に接続した場合の両方で測定を行った。結果を図 3.3.1-13 に示すが、誘起電流に対して暗電流のばらつきが大きく、また接地極の取り方によっても系統的に値が異なり、実際の廃炉現場での利用の際に信頼できる接地極の確保が重要であることが明らかとなった。

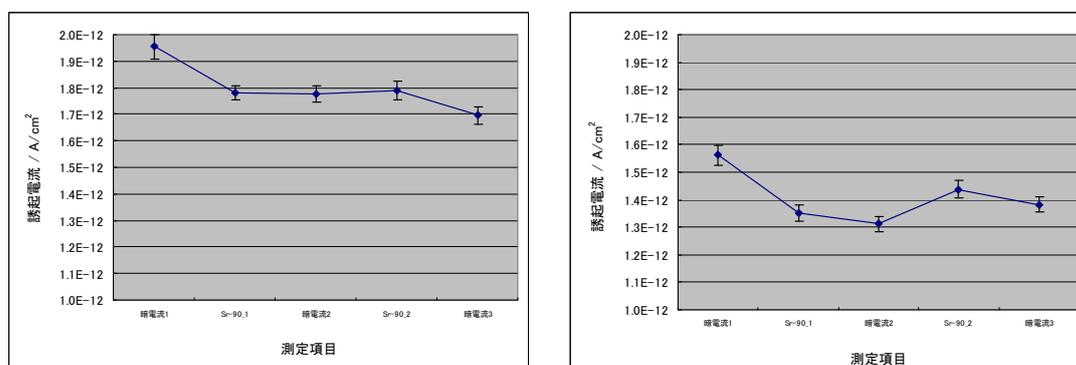


図 3.3.1-13 <sup>90</sup>Sr 密封小線源による InGaP 太陽電池誘起電流測定

左：接地極を分電盤から取った場合、右：接地極を水道管から取った場合

(5) CW 加速器による電子線照射

3 年間の実施内容の年次表を図 3.3.1-14 に示す。CW 加速器から生成される電子線を試料への照射試験を行う場合、真空の配管で電子線を輸送し、真空の照射チャンバー内で照射する。そのため、真空中に設置した試料から電流を測定するシステムを構築する必要がある。1 年目は、その場測定システムの開発、太陽電池設置用治具の作製および、CdTe 太陽電池を利用してその場測定システムの動作を確認した。2 年目では、1 年目で作製したその場測定システムを利用し、InGaP および CIGS 太陽電池へ電子線照射中の放射線誘起電流の線量率依存性およ

び劣化挙動を取得した。3年目では、CIGS および、CdTe 太陽電池のアルファ線誘起電流挙動を取得した。CW 加速器においては、平成 30 年度に発生したセレン整流器の故障は、ほぼ問題ないレベルにまで修復され 60 keV の低エネルギーから 500 keV までのエネルギー範囲でビーム電流値を変えて電子線照射を行い、太陽電池からの起電力をその場測定することでベータ線測定シミュレーションを行った。なお、当該の加速器は高電圧発生部において使用されている絶縁油において PCB の含有が確認されており、大阪府においては処分の期限が令和 3 年 3 月 31 日までであったため、9 月以降解体作業に入り、1969 年から加速器として利用されてきた長い歴史に終止符を打った。

	1 年目	2 年目	3 年目
電子線照射による太陽電池誘起電流挙動の解明	その場測定システムの開発	InGaP、CIGS太陽電池の線量依存性の取得	CdTe、CIGS太陽電池の線量依存性の取得
	測定治具の作製	InGaP、CIGS太陽電池の劣化特性の取得	CdTe太陽電池の劣化特性の取得
	CdTe太陽電池の照射実験	InGaP、CIGS素子の太陽電池の照射試験	CdTe・CIGS太陽電池の照射試験

図 3.3.1-14 電子線照射試験の年次計画

令和元年度に CIGS 太陽電池に関して電子線誘起電流を測定した結果、図 3.3.1-15 に示すようにフラックスに依存して電子線誘起電流は増加することが確認されたが、線形性を有しておらず、フラックスが高くなると飽和する挙動が確認された。これは、CIGS 太陽電池の直列抵抗成分が高く、電流増加に伴い信号が取り出しにくくなる傾向と考えられるため、直列抵抗成分を改善した CIGS 太陽電池を、令和 2 年度では作製した。新たに作製した CIGS 太陽電池の電子線誘起電流を測定した結果を図 3.3.1-16 に示す。この結果より、令和元年度に取得した結果に比べ、放射線誘起電流の直線性が改善していることがわかる。また、エネルギー依存性を詳細に取得するため、より広範囲なエネルギー範囲の 60~500 keV 電子線照射時の誘起電流挙動を測定した。その結果、エネルギーが高くなると、単位電子線当たりの誘起電流は低下することが観察された。この結果は、令和元年度の結果とほぼ同様の傾向を示している。しかし、60 keV および 100 keV を比較した場合、単位電子線当たりの誘起電流は、ほとんど同じであった。令和元年度に取得した InGaP 太陽電池の電子線誘起電流の結果を図 3.3.1-17 に示す。この結果では、80 keV および 150 keV の電子線エネルギーにおいても、エネルギーに依存して単位電子線当たりの誘起電流が低下していることが観察されている。InGaP および CIGS 太陽電池の構造的な違いとして、表面電極の形状が挙げられる。InGaP 太陽電池は、楕形の表面電極が表面に積層されており、電極外の面は、数十 nm の窓層の下に約 1 μm の InGaP の吸収層が作製されている。一方、CIGS 太陽電池においては、1 μm 程度の ZnO の透明電極が CIGS の吸収層が作製されている。そのため、100 keV 以下の低エネルギー電子線が入射した場合、吸収層に辿り着く前の表面電極層または、窓層における遮蔽が、太陽電池の放射線誘起電流に影響を及ぼしている可能性がある。

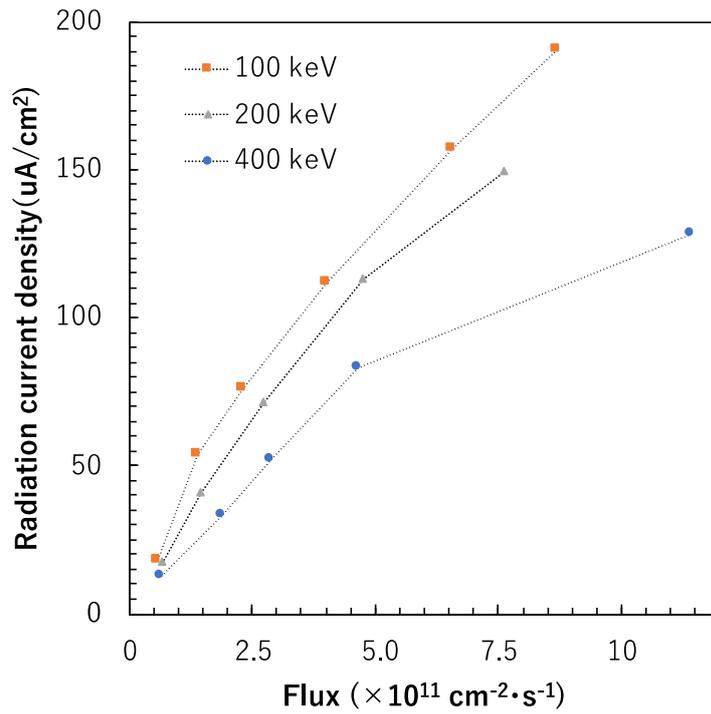


図 3.3.1-15 令和元年度取得した CIGS 太陽電池における電子線誘起電流挙動

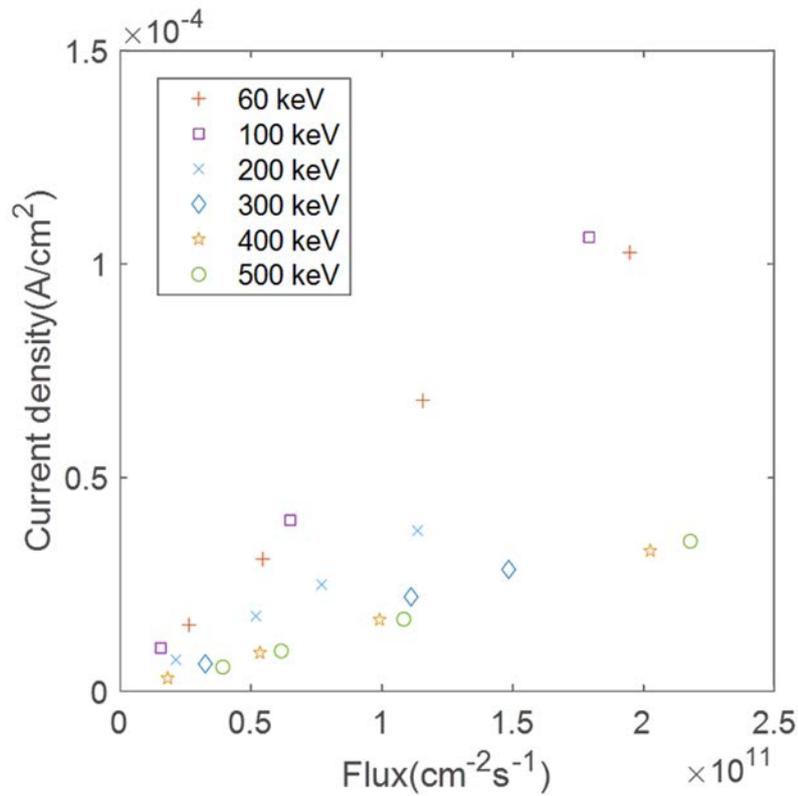


図 3.3.1-16 直列抵抗を改善した CIGS 太陽電池における電子線誘起電流挙動

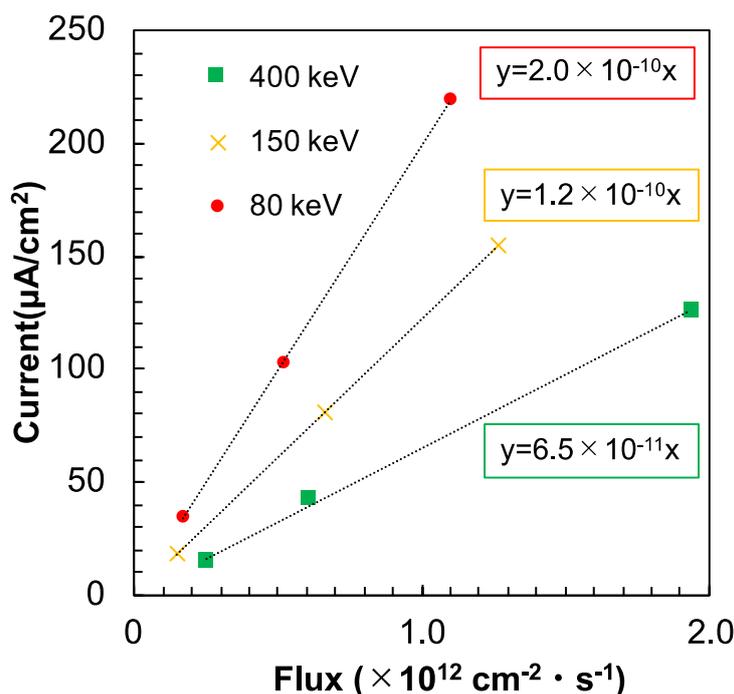


図 3. 3. 1-17 InGaP 太陽電池における電子線誘起電流挙動

CdTe の電子線照射劣化挙動は、図 3. 1. 1-20 および図 3. 1. 1-21 に示すように、200 keV および 400 keV の電子線照射により取得した。PHITS による計算結果では、200 keV および 400 keV の電子線に対する CdTe の吸収線量は、それぞれ  $3.49 \times 10^{-10}$ 、および  $2.22 \times 10^{-10}$  Gy/source であった。そのため、200 keV 電子線をフルエンス  $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  にて照射された CdTe 素子は 10 MGy の吸収線量に当たる。そのため、低エネルギー電子線照射により CdTe 太陽電池において 10 MGy の吸収線量に対してほとんど劣化がないことを確認した。

また、令和元年度に InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池の耐放射線性を評価するため、400 keV 電子線を照射中の電子線誘起電流効率 ( $Q$ ) の劣化挙動に関して測定した結果を図 3. 3. 1-18 に示す。この結果より、InGaP 太陽電池は、400 keV 電子線約  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  以上の照射の際に、劣化が観測されており、その挙動は、フルエンスに依存し徐々に劣化していることが観察された。InGaP 太陽電池の NIEL を計算した結果を図 3. 3. 1-19 に示す。NIEL は、照射損傷である一次はじき出し損傷を引き起こすのに使用されたエネルギーであるため、この結果より、400 keV 電子線によりはじき出し損傷が InGaP 中に生じることが考えられる。宇宙用太陽電池の光の発電特性劣化予測の先行研究において、この NIEL から太陽電池の劣化挙動を予測する事ができ、その式は以下の式 3. 3. 1-1、式 3. 3. 1-2 で表される。

$$\frac{A(D_d)}{A_0} = 1 - C \cdot \log \left( \frac{D_d(E, \phi)}{D_x} \right) \quad (\text{式 3. 3. 1-1})$$

$$D_d(E, \phi) = \phi \times NIEL(E) \quad (\text{式 3.3.1-2})$$

ここで、 $\phi$ は、フルエンス、 $C$ および $D_x$ は、フィッティングパラメータ、 $A(D_d)$ は、 $D_d$ における太陽電池のパラメータ値、 $A_0$ は、照射前の太陽電池のパラメータ値である。この計算式を用いて、 $C: 0.28$ および $D_x: 1.5 \times 10^{10}$ にて、太陽電池の劣化をフィッティングした結果を図3.3.1-20に示す。横軸は、図3.3.1-18のフルエンスから式3.3.1-2により $D_d$ を計算した結果である。この結果より、太陽電池の放射線誘起電流挙動は、宇宙用太陽電池の劣化予測式を用いることにより可視光だけでなく、放射線誘起電流のフィッティングができることが明らかになった。劣化が予測できるということは、使用中に発生する電流量から電子線の入射フルエンスを見積もり、太陽電池素子が劣化する量を予測し、劣化補正をすることができると考えられる。電流の劣化は、キャリアの再結合により外部に取り出されるキャリアが確率的に減少すると考えられるため、劣化補正後の信号 ( $S_c$ ) は、照射損傷エネルギー $D_d$ を受けて劣化補正した信号 ( $S_{D_d}$ ) から劣化割合の補正として以下の式3.3.1-3で表すことができる。

$$S_c = S_{D_d} \times \frac{1}{\frac{Q(D_d)}{Q_0}} \quad (\text{式 3.3.1-3})$$

上記式を用いて図3.3.1-18の劣化挙動を補正した結果を、図3.3.1-21に示す。この結果より、照射中半分程度に劣化した電流信号においても、補正され照射前に近い値で出力されていることがわかる。本結果より、照射環境下の放射線が予測できた場合、 $D_d$ を計算することにより劣化補正が使用でき、素子の長時間の使用が達成されることが考えられる。

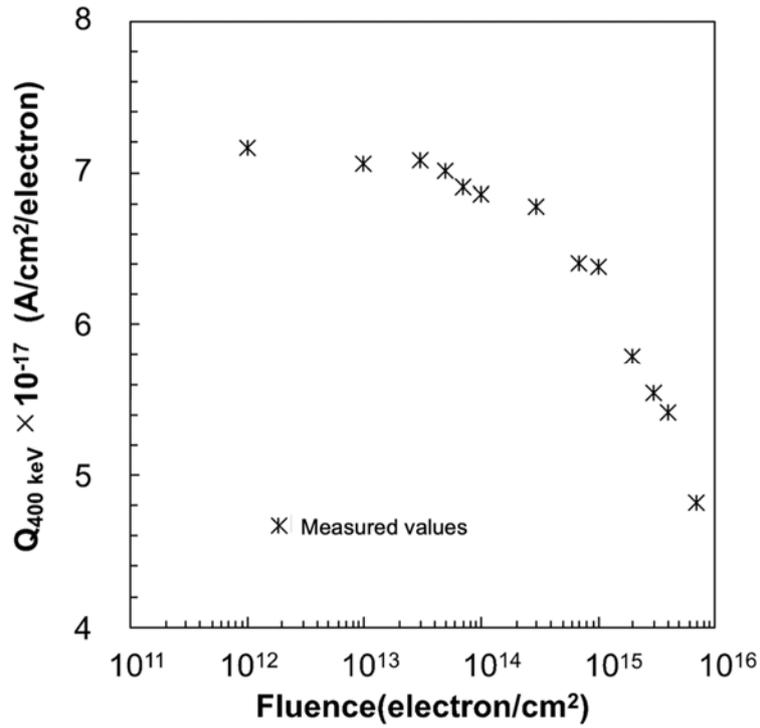


図 3.3.1-18 InGaP 太陽電池における 400 keV 電子線照射時の劣化挙動

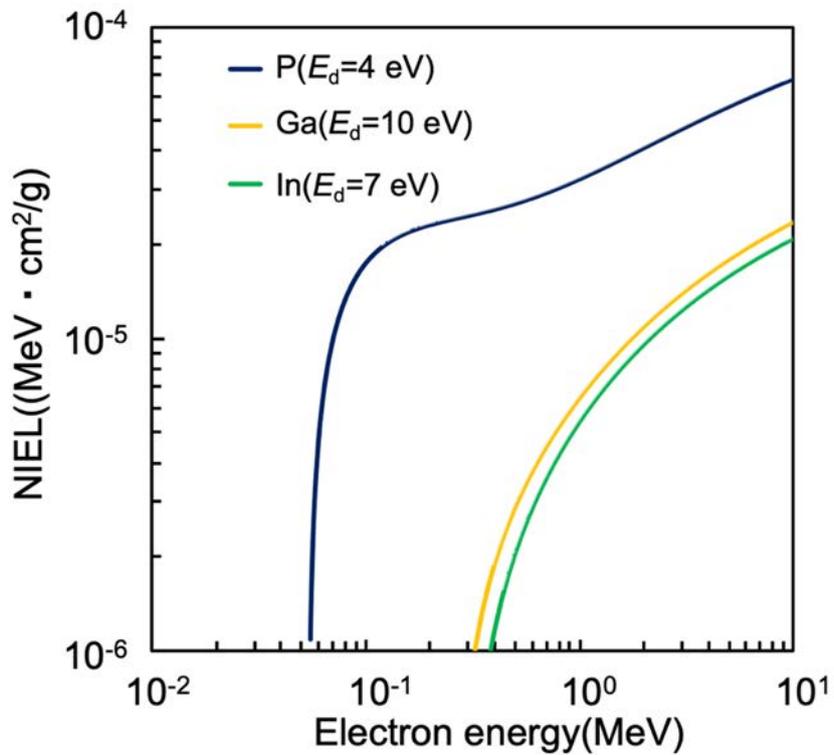


図 3.3.1-19 InGaP 太陽電池の NIEL 計算結果

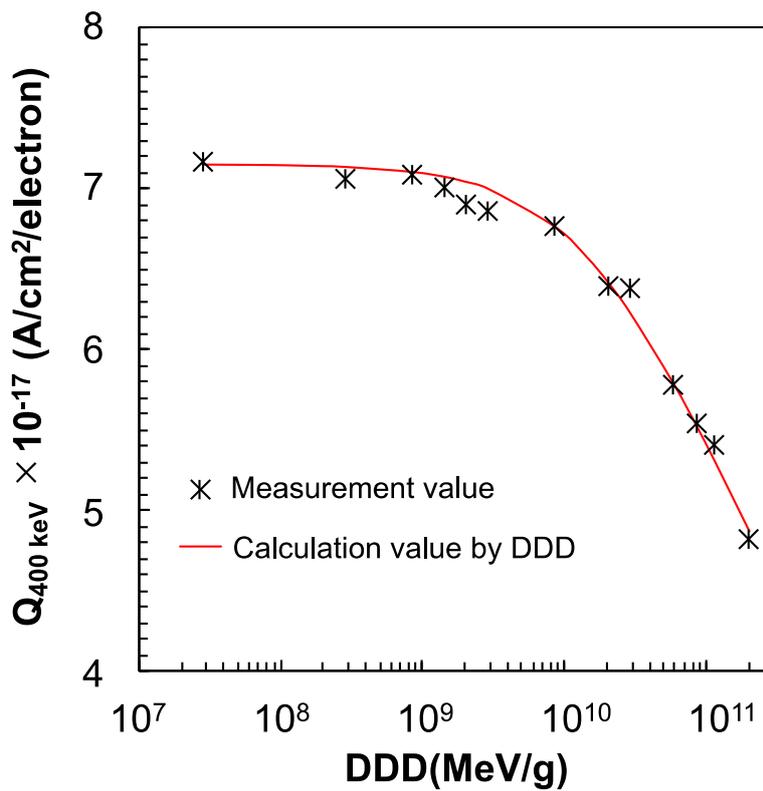


図 3.3.1-20 InGaP 太陽電池の劣化フィッティング結果

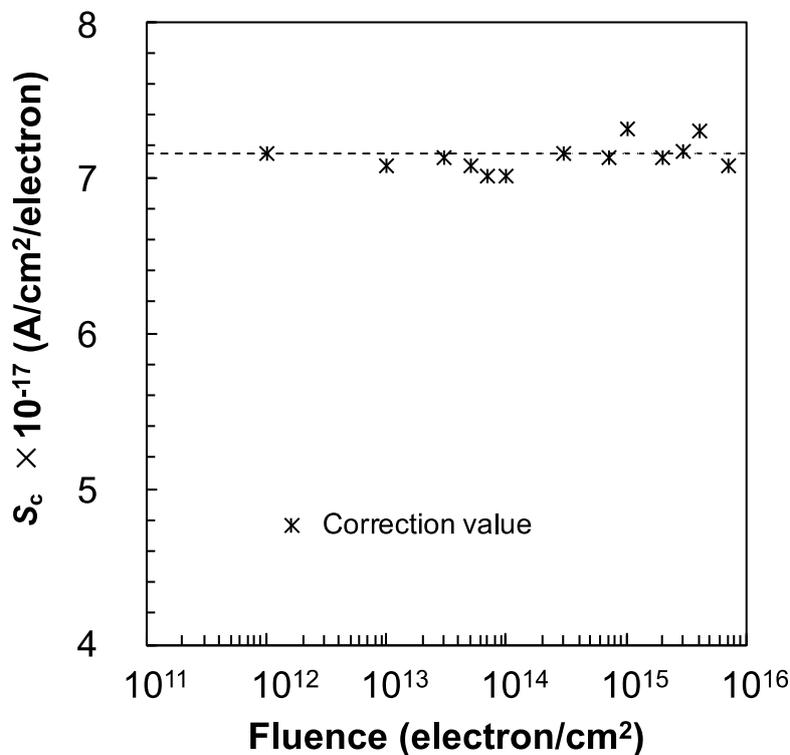


図 3.3.1-21 InGaP 太陽電池の電子線誘起電流劣化補正

### 3.3.2 中性子線照射試験（再委託先：理化学研究所）

#### (1) 小型加速器中性子源によるデバイスの照射

中性子照射設備は理化学研究所光量子工学研究センター中性子ビーム技術開発チームにあるRANS[1]を利用した。RANS 全景を図 3.3.2-1 に示す。RANS は陽子線加速器(図 3.3.2-2)、ベリリウムターゲット(図 3.3.2-3)および遮蔽体(図 3.3.2-4)、中性子ビームラインから構成されている。中性子ビームラインはイメージング、回折試験を行うために設計されており、中性子束は  $10^4$  n/cm<sup>2</sup>/sec 程度と小さい。最大  $10^9$  n/cm<sup>2</sup>/sec 程度の可能性があり 1F の環境を模擬するには大幅に不足しており、これまで行ったことのない遮蔽体内（ベリリウムターゲット近傍）での照射を試みる必要がある。占有マシンタイム中ではベリリウムターゲット正面に試料を設置して照射を行うことが可能である。それ以外にも照射機会を確保するために、平成 30 年度においては、遮蔽体を開けた横穴を用いて遮蔽体内部で照射を行うための遮蔽材と治具を調達した（図 3.3.2-5）。遮蔽材は黒鉛、ホウ素含有ポリエチレン（アルミ板で補強）、鉛のブロックからなり、順に横穴に詰めて使用する。ホウ素含有ポリエチレン、鉛はそれぞれ中性子、ガンマ線を遮蔽する。最も内側に設置する黒鉛ブロックにはポケットを設け、被照射試料をセットする。In-situ で電流測定を行う場合には、外部から黒鉛ブロックまでリード線を通すことが可能である。この治具は中性子ビームラインに出射される中性子束にはほぼ影響を与えないことから、他グループのマシンタイム中にも試料を長期間残置して照射量を積み増すことが可能である。これらの遮蔽体の装荷・取り出し作業の負担を減ずるため、令和 2 年度に備品として油圧リフターを調達した。

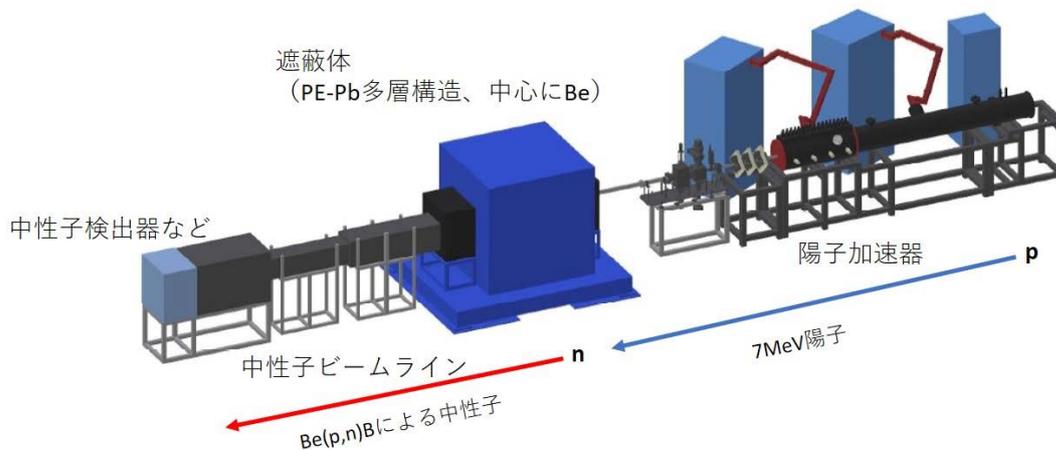


図 3.3.2-1 中性子照射設備 RANS 全景

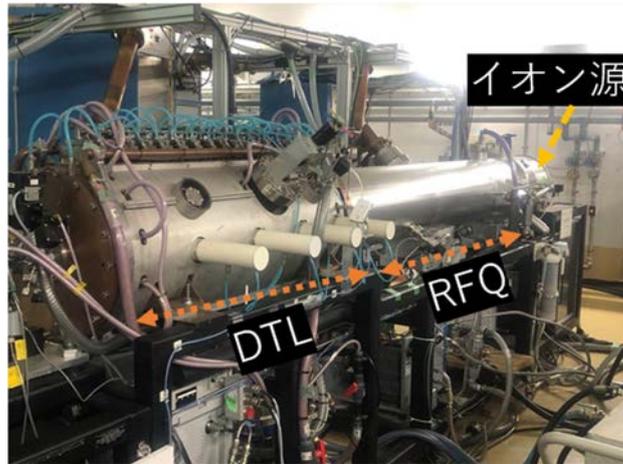


図 3.3.2-2 RANS の陽子線加速器  
(上流よりイオン源、RFQ 加速器、DTL 加速器)



図 3.3.2-3 中性子発生ベリリウムターゲットおよびバナジウム製ホルダー

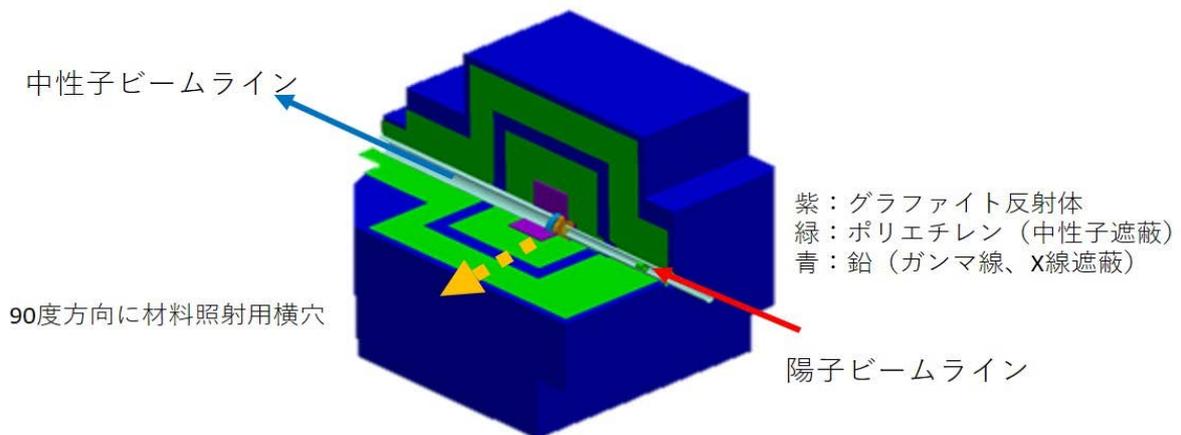


図 3.3.2-4 遮蔽体内部および横穴の位置

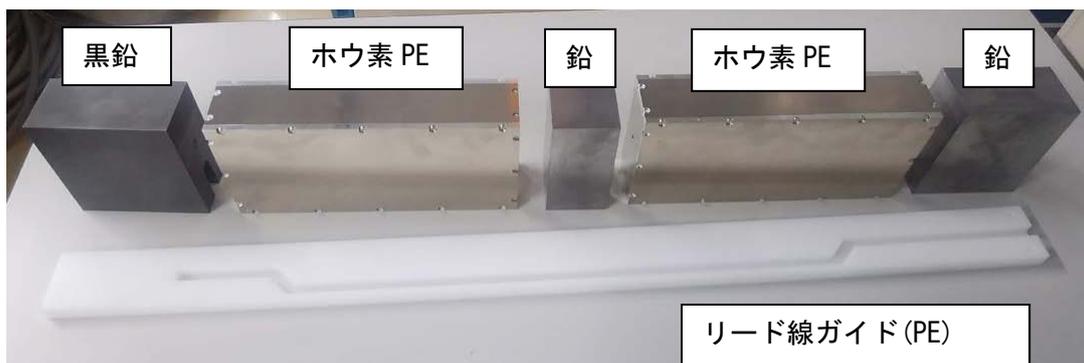


図 3.3.2-5 本研究で製作した遮蔽体内部において材料照射を行うための遮蔽材と配線治具

RANS の加速器は水素ガスを解離させて陽子 (H イオン) を発生するイオン源、陽子を 3.5 MeV まで加速する高周波四重極 (Radio-Frequency Quadrupole、RFQ) 加速器、さらに 7 MeV まで加速するドリフトチューブライナック (Drift Tube Linac、DTL) 加速器からなる。それぞれが同期してパルス駆動し、陽子を加速して  ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$  反応によって中性子を放出する。これらの機器は約 20~100 Hz のパルス運転にて中性子を発生する。幅広いレンジの中性子束を得ることと、少しでも多いフルエンスでデバイスの劣化挙動を検証可能とするため、陽子電流の最大化を行った。各機器の動作タイミングおよび加速電流の時間変化を記録したオシロスコープ画面の例を図 3.3.2-6 に示す。本研究に割り当てられたマシンタイムの一部を利用して、その繰返し周期およびパルス長、イオン源-RFQ-DTL の動作タイミングを変化させて陽子線電流の増加を図った。最適化の結果、これまでの最大陽子電流である 57  $\mu\text{A}$  (時間平均値) を超え過去最大値の 63  $\mu\text{A}$  が得られた。

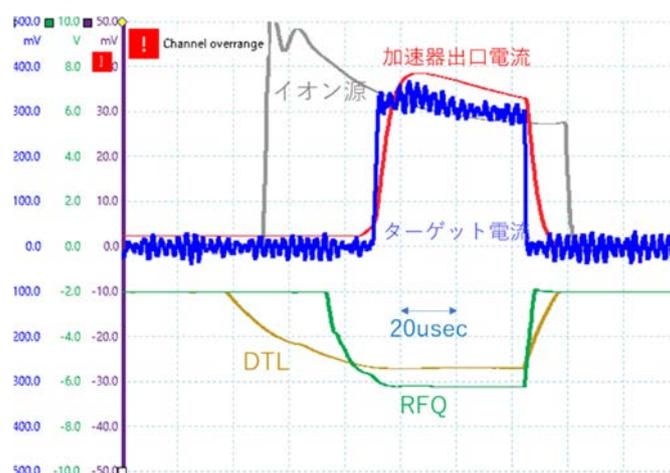


図 3.3.2-6 オシロスコープで記録した機器動作タイミングと陽子電流の例

以上のグレードアップを行いながら平成 30 年度、令和元年度においては各 2 日程度の予備試験照射を行った。令和 2 年度では太陽電池デバイス照射のための正式なマシンタイムを 3 回 (5 日間) 確保し、約 40 時間 (ビーム調整時間を含む) の中性子照射を行った。これらの照射時におけるデバイスの発電挙動については連携先 (木更津高専および東北大学) の結果にまとめられている。

(2) 中性子エネルギースペクトルの評価

中性子エネルギースペクトルをシミュレーションにより算出した。核データ ENDF/B-VII (Evaluated Nuclear Data File) をライブラリに追加したモンテカルロ粒子輸送計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System ver. 2.93) [2] を使い、7 MeV の陽子をベリリウムに照射した際の発生中性子エネルギースペクトル (全方向積分値) を計算した (図 3.3.2-7)。RANS ではベリリウムターゲット下流にポリエチレンの板を置いて中性子を減速している。今回の計算ではポリエチレン減速材の厚さを 20 mm、40 mm、60 mm とした。減速材の厚さを調整することにより、試料の放射化に対する影響が大きい熱中性子の量を制御できるほか、熱中性子と高速中性子の比率を大幅に変更可能であることが示された。

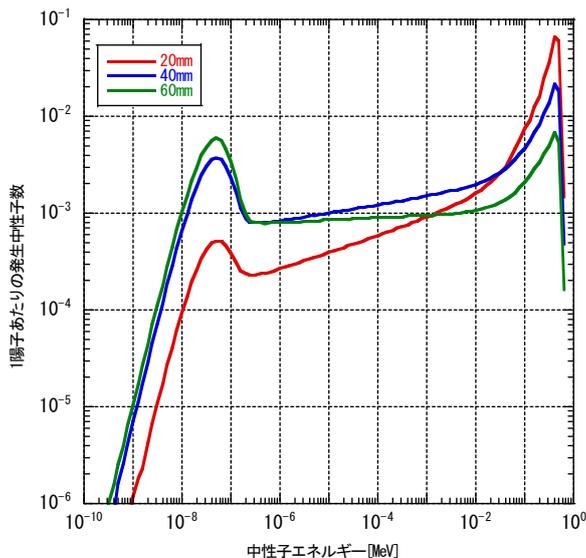


図 3.3.2-7 中性子エネルギースペクトル計算結果 (全方向積分値)

次に実際の試料照射位置における中性子束を計算した。図 3.3.2-8 にターゲットステーションの上部遮蔽を撤去し、陽子ビームライン先端部を露出させた際の写真を示す。最も高線量が確保できる照射位置は減速材表面であるが、設置安定性の問題から本実験ではベリリウムターゲットより約 20 cm 離れた遮蔽体内の中性子ビームライン (赤点線で囲った部分) に設置している。中性子エネルギースペクトルは PHITS コード (ver. 3.11) を用いて評価した。このとき、ターゲット下流に設置するポリエチレン製の減速材の厚さを 0 mm、40 mm (常用)、80 mm、100 mm と変化させた。陽子電流は定格の 100  $\mu$ A (時間平均値) とした。結果を図 3.3.2-9 および表 3.3.2-1 に示す。 ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$  反応断面積は ENDF ではなく低エネルギーにおける実験値を重視した Wakabayashi ら [3] の評価値を用いた。



図 3.3.2-8 遮蔽体を開放して露出させた陽子ビームライン末端部  
(赤印部分は照射試料設置場所)

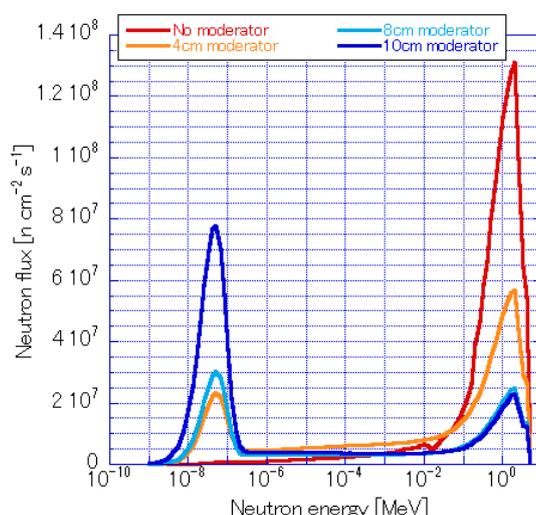


図 3.3.2-9 試料照射場所における中性子スペクトルの計算結果

表 3.3.2-1 全中性子束と熱中性子・高速中性子のモデレータ厚さ依存性

	全中性子束 [n cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	E < 1eV [n cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	E > 1keV [n cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
無し	1.48 × 10 <sup>9</sup>	1.20 × 10 <sup>7</sup>	1.41 × 10 <sup>9</sup>
40 mm	1.15 × 10 <sup>9</sup>	2.25 × 10 <sup>8</sup>	7.59 × 10 <sup>8</sup>
80 mm	6.83 × 10 <sup>8</sup>	2.64 × 10 <sup>8</sup>	3.27 × 10 <sup>8</sup>
100 mm	1.09 × 10 <sup>9</sup>	6.71 × 10 <sup>8</sup>	39 × 10 <sup>8</sup>

モデレータを取り外した場合、全中性子束の 99 %以上が 1 keV 以上で、その平均エネルギーはおよそ 2 MeV となる。これは原子炉における即発中性子の平均エネルギーにほぼ等しい [4]。モデレータ厚さの増加に伴い、1 eV 以下の中性子の割合は 20 %、39 %、62 %と増加した。以上の評価結果より、燃料の減速材（水）への浸漬状態に応じた中性子エネルギースペクトルの模擬 [5] が RANS において可能であることが明らかになった。

本研究にて実際の試料を照射した際の陽子電流値は概ね 50 μA（時間平均）であった。そのときの吸収線量率(Gy)を PHITS により評価した（図 3.3.2-10）。中心にベリリウムターゲットを配置し、左側より陽子ビームが照射される。モデレータは常用の 4 cm とした。斜線で示

した試料設置部における吸収線量率は中性子に対して 3 Gy/h、ガンマ線に対して 0.4 Gy/h と計算された。

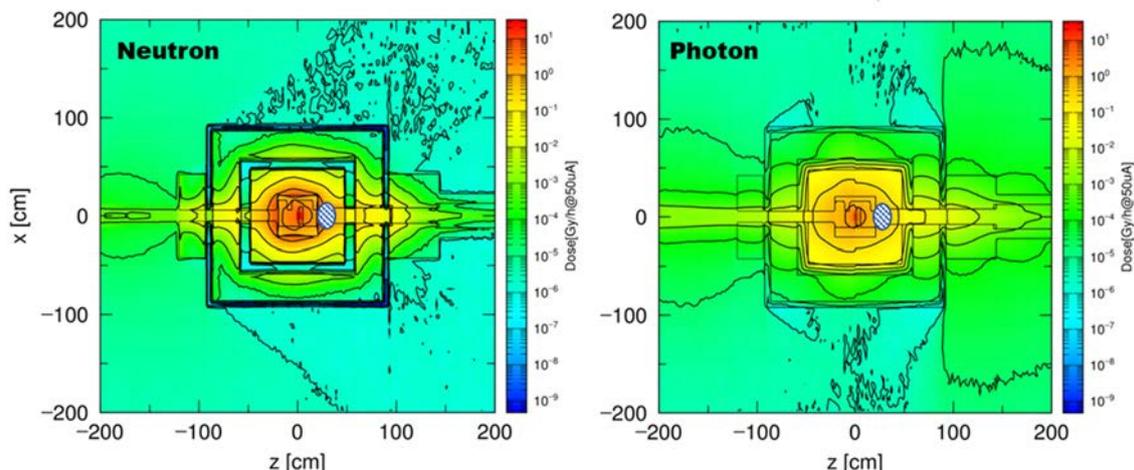


図 3.3.2-10 ターゲットステーション内の吸収線量率

(3)放射化測定による使用材料の検討

ベリリウムターゲット側方の黒鉛内に CdTe 太陽電池を留置し、他グループの実験に相乗りして平均陽子電流 50 uA、一日平均 4 時間の照射を 9 日間行った。約 3 日冷却後、ゲルマニウム半導体検出器を用いて測定したガンマ線スペクトルを図 3.3.2-11 に示す。代表的なピークとしては、110mAg、114In、124Sb、131Ba が確認された。銀とインジウムについては、壊変形式としてベータ崩壊も存在する。その際放出された電子の分だけ電流が流れるが、1 g 当たりの飽和値[6]は高々  $10^{11}$  Bq のオーダーとなり大量に存在しない限り問題とはならない。また、銀およびインジウムそれぞれの由来は電極と透明導電膜と考えられ、ほかの材料に置き換えることは可能である。

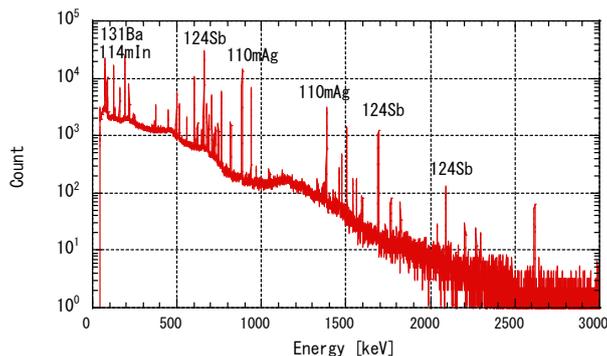


図 3.3.2-11 中性子照射した CdTe 太陽電池のガンマ線エネルギースペクトル

続いて、他の太陽電池やコネクタ、収納容器等の材質について検討を行った。InGaP 太陽電池 (1 cm<sup>2</sup>)、CIGS 太陽電池 (1 cm<sup>2</sup>)、配管用 SUS34 (約 10 g)、配線用 BNC レセプタクル (樹脂および黄銅製、約 10 g) をそれぞれ 10 分間 RANS のターゲットステーション内で照射し、直後および 1 週間後にゲルマニウム検出器でそれぞれ 1000 秒間測定を行った。いずれの試料も照射直後は kcpm オーダーの測定値であったが、1 週間後には数十 cpm 以下に低下した。銀電極を用いた CdTe 試料を照射したケースでは 110mAg の半減期が約 250 日と長いことから施

設外への持ち出しに時間を要したが、今回のケースでは長半減期の核種はみられず、比較的短時間で持ち出し評価が可能である。短半減期の核種によるガンマ線の影響は図 3.1.1-10～図 3.1.1-12 の陽子ビーム停止後もわずかに残る発電電流として表れている。このように、周辺およびデバイスの放射化が、照射終了直後の発電電流に影響を及ぼすことがわかった。

#### 参考文献

- [1] Otake, Y., RIKEN Compact Neutron Systems with Fast and Slow Neutrons, Plasma and Fusion Research, vol. 13, 2018, 2401017-1-4.
- [2] Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Tsai, Pi-En, Matsuda, N., Iwase, H., Shigyo, N., Sihver, L. and Niita, K., Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol., vol. 55, no. 6, 2018, pp. 684-690.
- [3] Wakabayashi, Y., Taketani, A., Hashiguchi, T., Ikeda, Y., Kobayashi, T., Wang, S., Yan, M., Harada, M., Ikeda, Y. and Otake, Y., A Function to Provide Neutron Spectrum Produced from the  ${}^9\text{Be} + \text{p}$  Reaction with Protons of Energy below 12 MeV, J. Nucl. Sci. Tech., vol. 55, no. 8, 2018, pp. 859-867.
- [4] 日野正裕, 川端裕司, 原子炉中性子源, 日本中性子科学会誌「波紋」, vol. 27, no. 4, 2017, pp. 151-154.
- [5] 岩村公道, 低減速スペクトル炉におけるプルトニウム利用, JAERI-Conf 2001-013, 2001, pp. 97-116.
- [6] 井戸達雄 編, アイソトープ手帳 11 版, 日本アイソトープ協会, 2011, 124p.

3.3.3 アルファ線照射試験（再委託先：東北大学）

1F の廃炉のために、燃料デブリの位置を特定し、これを取り出すことが求められている。デブリからは、ウラン燃料特有のアルファ線が放出されるため、アルファ線を検出する必要がある。しかし、1F 環境下の一次原子炉格納容器 (PCV) に溶け落ちたデブリから放出されるアルファ線を検出できる線量計は、現状ない。そのため、本研究では、OSAM を用いてアルファ線の検出特性を解明する。1F 環境下のデブリのアルファ線を再現する場合、濃縮されたアイソトープを大量に使用する必要がある。しかし、アイソトープは、取り扱いが困難であり、太陽電池へ入射させる線量を変更することも容易ではない。そのため、アイソトープを使用せずに、アルファ線と同じ原子核である He イオン照射時の線量計挙動を解明することが有効である。原子力機構や QST 高崎研のタンデム型加速器は、He イオンを加速することが可能である。また、<sup>241</sup>Am などのアルファ線放出核種のエネルギーに近い 5 MeV の He イオンを照射することができる。そのため、本研究では、タンデム加速器を使用し、5 MeV に加速した He イオンを太陽電池へ照射した際の電流挙動を解明する。

3 年間の実施内容の年次表を図 3.3.3-1 に示す。加速器から生成される He イオンを試料への照射試験を行う場合、真空の配管で He イオンを輸送し、真空の照射チャンバー内で照射する。そのため、真空中に設置した試料から電流を測定するシステムを構築する必要がある。1 年目は、その場測定システムの開発、太陽電池設置用治具の作製および、CdTe 太陽電池を利用してその場測定システムの動作を確認した。2 年目では、1 年目で作製したその場測定システムを利用し、InGaP 太陽電池へ 5 MeV He イオン照射中の放射線誘起電流の線量率依存性を取得した。3 年目では、InGaP 太陽電池に加えて、CIGS および、CdTe 太陽電池のアルファ線誘起電流挙動を取得した。また、He イオンの連続照射を実施し、太陽電池のアルファ線誘起電流の劣化挙動を解析した。

	1 年目	2 年目	3 年目
ヘリウムイオン照射による太陽電池誘起電流挙動の解明	その場測定システムの開発 (JAEA)	線量依存性の取得 (JAEA)	線量依存性の取得 (東北大学)
	測定治具の作製 (JAEA)		劣化特性の取得 (東北大学)
	CdTe太陽電池の照射実験 (JAEA、木更津高専)	InGaP太陽電池の照射試験 (JAEA、JAXA)	CdTe・CIGS太陽電池の照射試験 (東北大学)

図 3.3.3-1 アルファ線照射試験の年次計画

(1) タンデム加速器における照射体系

照射試験は、図 3.3.3-2(a) に示す QST 高崎研のタンデム加速器にて実施した。タンデム加速にて加速された He イオンビームは、真空配管内を通り、試料照射時に使用するチャンバーへ輸送される。He イオンは、スキャンコイルにより、縦および横幅が 3 および 2 cm へスキ

ランされ試料全体に均一に照射された。また、スキャン速度は、太陽電池の応答速度および、ピコアンメータの信号積算時間を考慮し、縦方向 500 Hz および、横方向 1000 Hz とした。また、照射中の太陽電池の誘起電流を測定するために、図 3.3.3-2(b)に示すように太陽電池にプローブを設置し、図 3.3.3-2(c)に示すように、照射チャンバー側面に設置した真空導入端子から電流信号を取り出した。太陽電池の放射線誘起電流および光電流電圧特性を真空チャンバー内で測定した。測定は、ソースメジャーユニット(B2901A、Keysight Technologies 製)を利用した。また、太陽電池に入射する He イオンフラックスは、照射前後においてファラデーカップを用いて測定された。

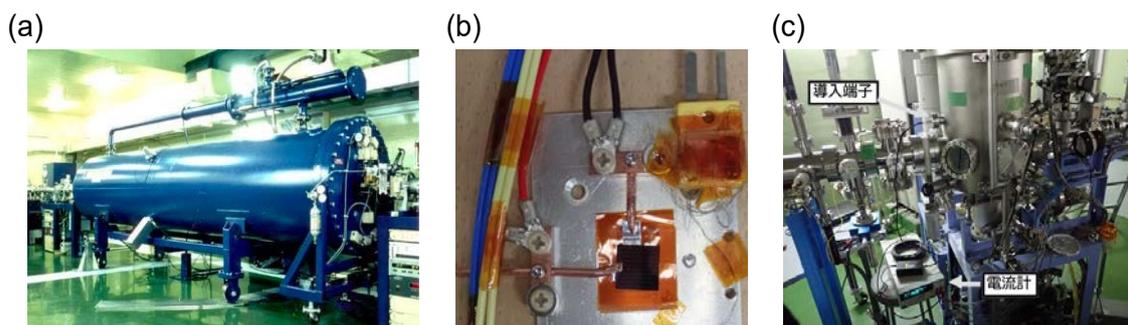


図 3.3.3-2 QST 高崎研におけるタンデム加速器と太陽電池測定時の体系

## (2) He イオン照射試験の結果

図 3.3.3-3 にタンデム加速器により発生した He イオンビームを CdTe、CIGS および InGaP 太陽電池へ照射した際の誘起電流挙動を示す。それぞれの太陽電池において、He イオンフラックスに対して、直線的に誘起電流密度が増加している。このことから、OSAM は、ガンマ線だけでなく、飛程の短く検出の難しいアルファ線に対して感度があることが明らかになった。また、1He イオン当たりの放射線誘起電流量は、InGaP、CIGS および、CdTe の順番で増加している。この傾向は、ガンマ線誘起電流傾向ともおよそ一致しているが、CdTe は、他の太陽電池に対してガンマ線照射時よりも差が小さい。この傾向は、CdTe 太陽電池の構造がガンマ線の際はスーパーストレート型、He イオンの際はサブストレート型の構造を有しており、それぞれの構造によって放射線誘起電流の取り出し効率に差があるためと考えられる。

CIGS 太陽電池において、He イオン照射時の誘起電流のその場測定を行い、放射線誘起電流劣化挙動のリアルタイムモニタリングを実施した結果を図 3.3.3-4 に示す。ビーム電流は、10 分毎にファラデーカップにて測定を行った結果から、 $73 \pm 15$  pA であった。縦軸の保存率 (Remaining Factor) は、照射直後の放射線誘起電流を 1 として規格化した値である。この結果より、照射フラックスに応じて、CIGS 太陽電池の放射線誘起電流は、徐々に劣化していくことが明らかになった。宇宙利用の先行研究において太陽電池の放射線損傷による劣化挙動は、キャリア拡散長に関連された劣化として以下の式 3.3.3-1 にてフィッティングできることが知られている。

$$\frac{A}{A_0} = 1 - C \log \left( 1 + \frac{\phi}{\phi_0} \right) \quad (\text{式 3.3.1-1})$$

ここで、 $A$ は、フラックス $\phi$ 照射後の特性値、 $A_0$ は、照射前の初期特性値、 $C$ および、 $\phi_0$ はフィッティングパラメータである。この式を用いてCIGS太陽電池の放射線誘起電流の劣化傾向をフィッティング( $C=0.1788$ 、 $\phi_0=6.501 \times 10^9$ )した結果を図3.3.3-3中の点線で示している。その結果、フィッティング曲線は、放射線誘起電流の劣化挙動によく一致している。そのため、放射線誘起電流の劣化は、キャリア拡散長に関連した劣化であると考えられる。

また、劣化試験後に、再度フラックス依存性を取得し、劣化前後での放射線誘起電流挙動を比較した結果を図3.3.3-5に示す。この結果より、劣化前に比べて劣化後には、放射線誘起電流は、およそすべて同じ割合でその発生量が低下しているが、直線性を維持していることが明らかになった。そのため、放射線誘起電流の劣化割合を予測または測定することにより劣化後も放射線検出器として使用できると考えられる。

本研究では、放射線検出素子として太陽電池を使用していることから、可視光を用いた太陽電池の評価手法を用いて素子の放射線誘起電流挙動を予測できることが期待できる。従来の放射線検出器では、ラジオアイソトープなどの基準線源を利用し、使用前に検出素子の健全性を確認する工程が必要であるが、OSAMにおいて、可視光でこの健全性評価が行えた場合、低コスト化、簡易化および、非放射線物質化を行うことができるため非常にメリットがある。図3.3.3-4の劣化挙動取得中に、 $5.3 \times 10^9$ 、 $1.0 \times 10^{10}$ および、 $1.0 \times 10^{10}$  cm<sup>2</sup>のフルエンスにおけるCIGS太陽電池の光電流電圧特性を図3.3.3-6に示す。この結果より、フルエンスの増加により、短絡電流、開放端電圧の劣化が増加していることがわかる。また、リーク電流の増加も確認されていることから、Heイオン照射によるダメージはp-n接合界面の損傷を引き起こし、リークパスを生成していることが考えられる。短絡電流挙動および放射線誘起電流の各フルエンスにおける保存率を図3.3.3-7に示す。この結果より、光誘起電流および放射線誘起電流は、およそ同様の傾向にてフルエンスに依存した劣化が観察された。しかし、高フルエンス領域では、光誘起電流より放射線誘起電流の劣化割合が大きい。そのため、図3.3.3-8に、光誘起電流および放射線誘起電流の劣化傾向の比較するため、縦軸および横軸にそれぞれの保存率をプロットした結果を示す。この傾向から、光誘起電流により放射線誘起電流の劣化割合を予測する場合、放射線誘起電流量の劣化は低く見積もられることが明らかになった。しかし、図3.3.3-8に示すプロットを線形近似した直線を点線で示した結果から、放射線誘起電流の劣化の割合は、およそ光誘起電流と1.1倍程度高いと見積もられるので、この傾向を取得することで放射線誘起電流の補正が行えると考えられる。

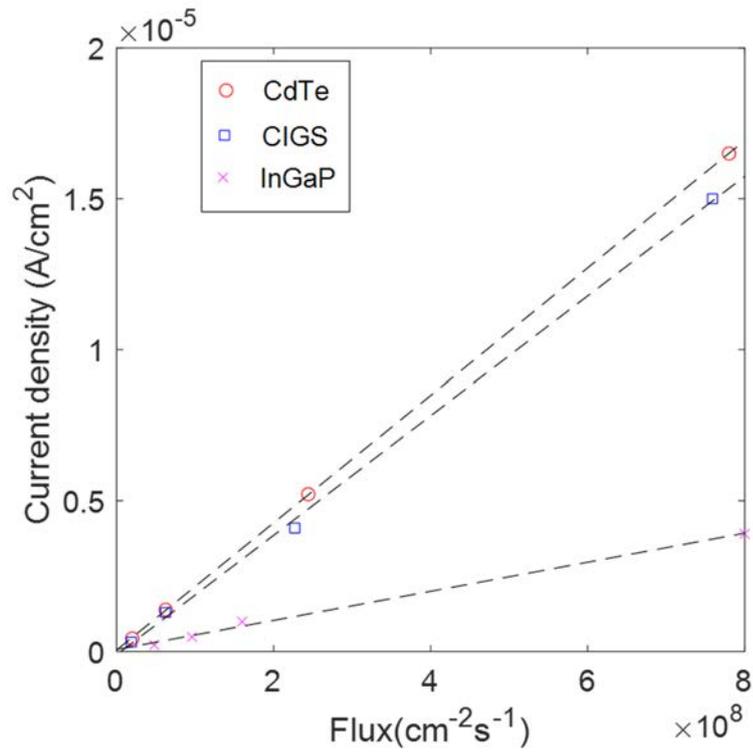


図 3.3.3-3 サブストレート型 CdTe 太陽電池のアルファ線検出特性

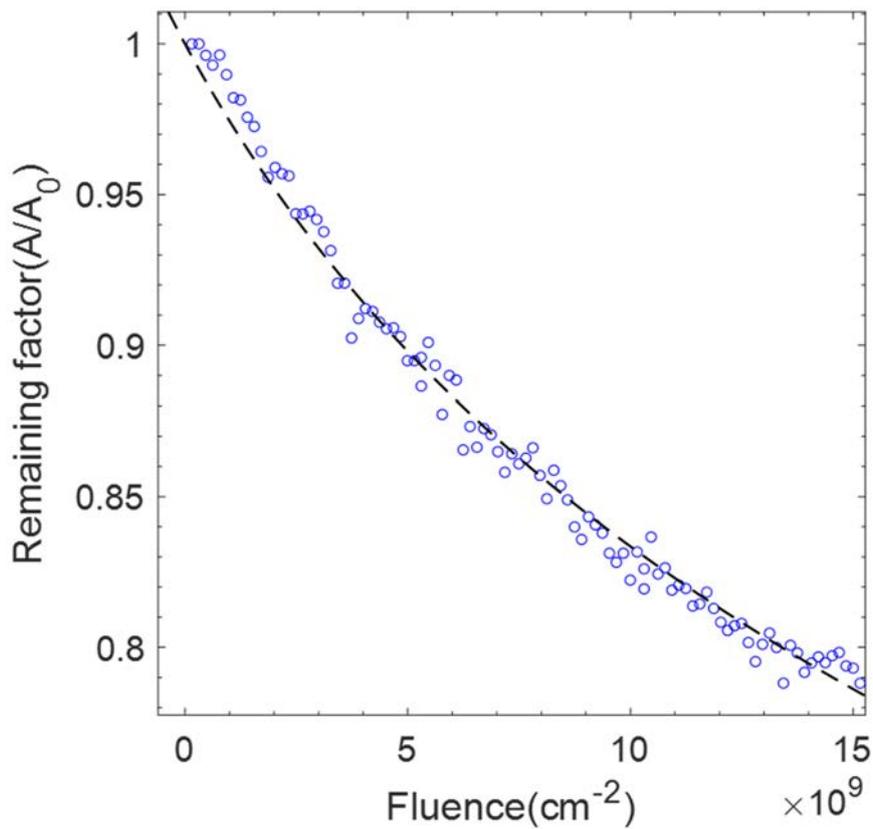


図 3.3.3-4 CIGS 太陽電池のアルファ線誘起電流のフルエンス依存性

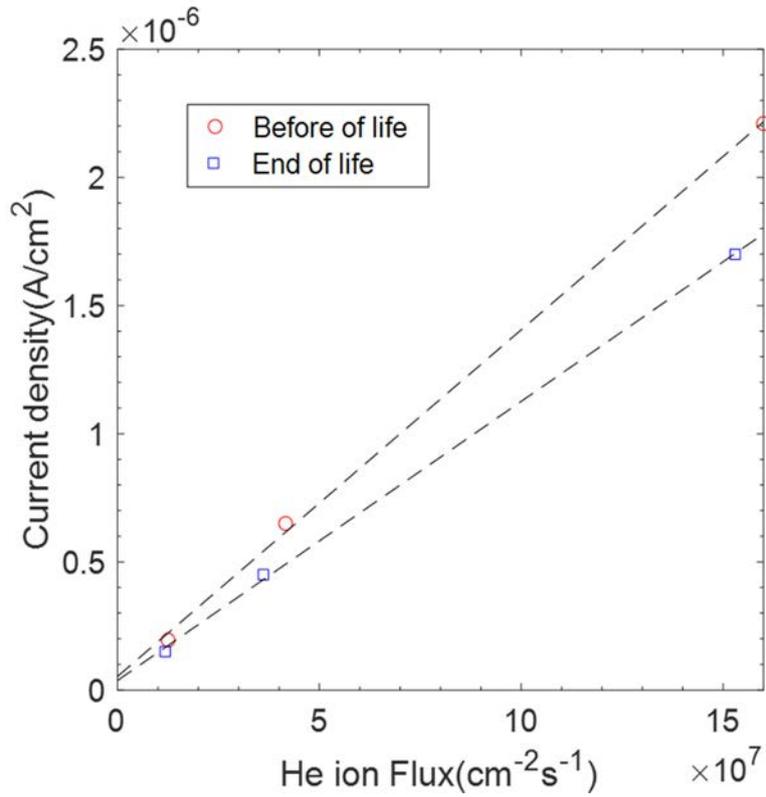


図 3.3.3-5 劣化前後の CIGS 太陽電池のアルファ線誘起電流挙動

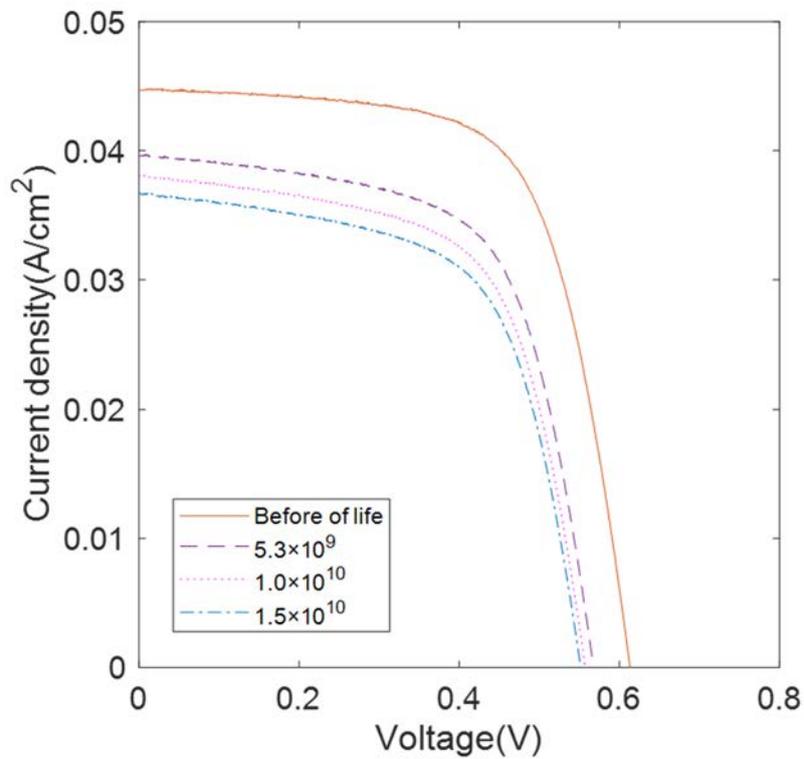


図 3.3.3-6 各フルエンスにおける CIGS 太陽電池の光電流電圧特性

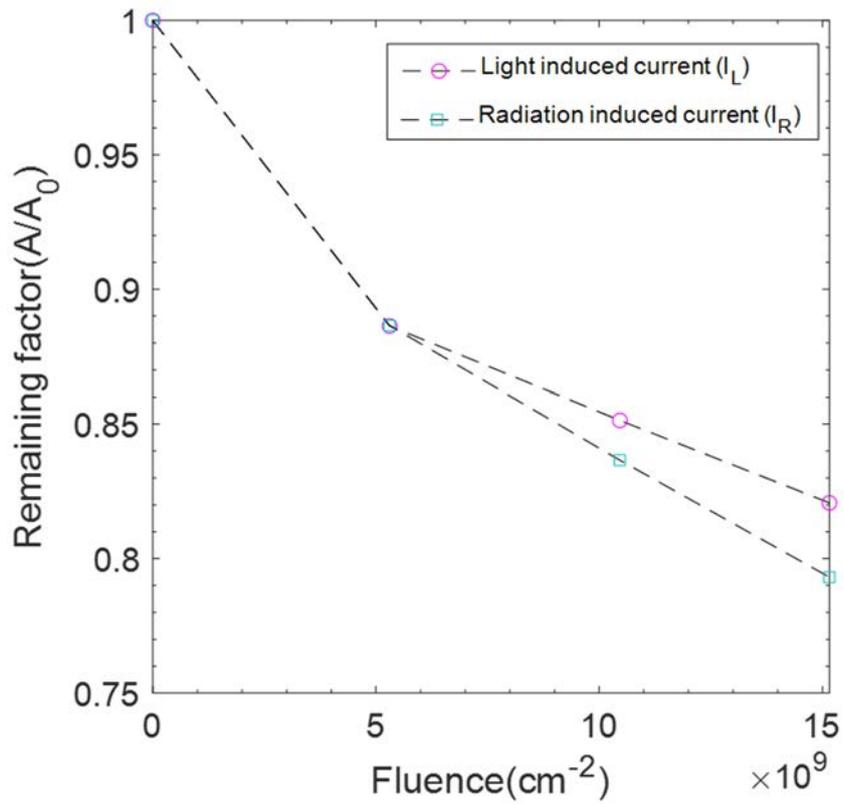


図 3.3.3-7 フルエンスを関数とした CIGS 太陽電池の光誘起電流および放射線誘起電流の劣化特性

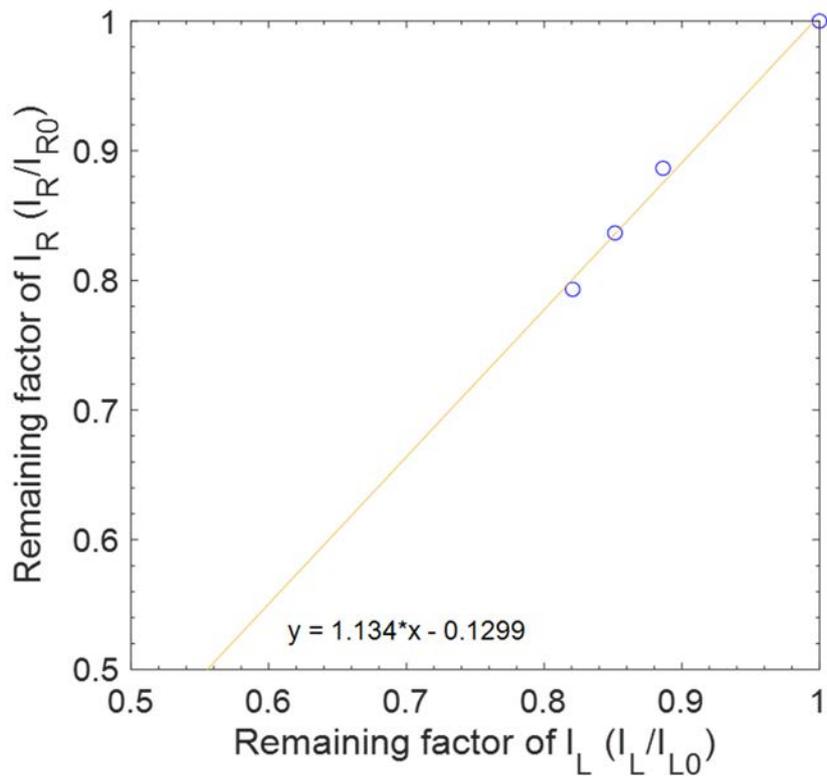


図 3.3.3-8 CIGS 太陽電池の光誘起電流および放射線誘起電流の劣化傾向の比較

3.4 線量解析システムの作成（再委託先：東北大学）【平成30年度～令和2年度】

令和2年度にて、センサ外装をジュラルミン等にて作製した。作製した外装にて、ガンマ線照射試験を実施し、その放射線誘起電流のガンマ線線量率依存性を取得した。高エネルギーHeイオン、電子線、ガンマ線の照射試験の結果より、放射線誘起電流は線種によらず、素子吸収線量に依存して増加することが解明された。この傾向を利用し、アルファ線、ベータ線、およびガンマ線線量の解析プログラムを作成した。

(1) 線量解析システムの作成の年次計画と研究概要

平成30～令和2年度の3年間を通して図3.4-1に示すようにOSAMの開発を実施してきており、試作機の作製、ガンマ線検出特性の取得および測定システムの開発を実施した。試作機の作製では、1年目では、太陽電池素子選定を行い、先行研究からCIGS、InGaP、CdTe太陽電池の3種類の太陽電池を選定した。2年目では、InGaP太陽電池を用いて試作機を作製し、ガンマ線環境下での電流信号について取得した。3年目では、これまでの結果を踏まえ、1F環境下での使用を想定した試作機を作製した。ガンマ線検出器特性については、最終的な試作機に使用する太陽電池を選定するため、主に、線量率依存性および、放射線耐性を3年間通して取得してきた。その結果より、CIGS太陽電池を選定し、最終的な試作機を作製した。測定システムについては、OSAMから出力される電流信号を輸送および解析するために最適なシステム、例えば、ピコアンメータ、ケーブル、解析ソフトについて検討および選定を行い、線量を測定できるシステムについて開発を行った。以下、開発されたOSAMについて、詳細に報告する。

	1年目	2年目	3年目
線量解析システムの作成	測定システムおよび素子選定 (JAEA)	太陽電池型線量計試作機の作製 (JAEA)	太陽電池型線量計試作機の改善 (東北大学)
	$\gamma$ 線照射試験の準備 (阪府大)	線量依存性の取得 (阪府大)	長期間測定時の校正曲線の取得 (阪府大、JAXA)
	測定システムおよびソフトウェアの選定 (JAEA)	測定システムおよびソフトウェアの開発 (JAEA)	測定システムおよびソフトウェアの改善 (東北大学)

図3.4-1 線量解析システムの作製の年次計画

(2) 線量計試作機の構成

OSAMでは、放射線が入射した際に太陽電池に発生する電流を測定することによって、線量率を解析するシステムが考えられている。そのため、システムには、①太陽電池、②電流信号輸送ケーブル、③電流計、④PCへの通信と線量解析ソフトが必要である。本研究では、これら4つを組み合わせることにより、線量計として動作するシステムを構築することを目的とする。

① 最終的な試作機に使用した太陽電池は、表 3.4-1 に示す各太陽電池の検出器特性より JAXA から提供された CIGS 太陽電池を選定および使用した。太陽電池の選定基準は、感度、ノイズ特性、放射線耐性、加工難度を基準に選定した。感度およびノイズにおいては、検出の下限値を決める要因であるため、それぞれの太陽電池で、ほとんど特性に優越はなかった。CIGS 太陽電池は、放射線耐性および、加工性に優れており、OSAM の素子として優れている。放射線耐性においては、ガンマ線環境下にて発生する 2 次電子が素子中に引き起こすはじき出し損傷が劣化の主な要因であると考えられている。CIGS 太陽電池は、前述の電子線照射試験において、優れた耐性を示していた。また、CIGS は、ガラス状に成膜された多結晶の半導体素子であり、ガラスカッターで切ることで簡単に素子形状を変えることが可能である。また、素子形状の調整時に発生する破面が、ノイズの要因となる素子のリーク電流を増加させることが知られているが、メサエッチングやメカニカルスクライブによりリーク電流を低減させることが先行研究により知られている。本試作機用の素子を作製するにあたっては、形状をガラスカッターで整形し、メサエッチングをすることで、素子を作製した。

表 3.4-1 各太陽電池の検出器特性

太陽電池	感度	ノイズ	放射線耐性	加工性
CIGS	○	○	◎	◎
InGaP	△	◎	△	△
CdTe	◎	△	○	○

② 電流信号ケーブルは、ノイズの影響を減らすための同軸ケーブルを使用した。

太陽電池から出力される信号は、電流信号であるためカソードとアノードをピコアンメータへ接続する必要がある。CIGS 太陽電池は、p-n 接合型半導体であり、表面が n 型、および裏面が p 型であるため、表面電極がアノード、および裏面電極がカソードとなる。そのため、裏面電極が同軸ケーブルの芯線に、および表面電極がシールド線に接続されるようにした。放射線環境中ではケーブル中に特有のノイズが発生する。例えば、電離箱などを使用する場合は、高電圧をケーブルのアノードとカソードの間に印加するため、放射線照射時にケーブル中に発生する電離作用により、ケーブルからリーク電流が発生するため、同軸ケーブルでは測定できない。そのため、カソードとアノードの間の電解を打ち消すため、トライアキシャルケーブルを使用する。しかし、OSAM の場合は、電離箱のように外部電源により高電圧を印加すること無く、太陽電池の内部電解により取り出された短絡電流を測定するため、ケーブルのアノードとカソードの間にかかる電圧はほとんどなく、放射線環境中にも関わらず、同軸ケーブルの使用で、pA オーダーの電流を測定することが可能であることが本研究により明らかになってきた。そのため、本試作機においては、同軸ケーブルを使用することで、OSAM の電流信号を放射線環境中で輸送する設計とした。

③ 太陽電池から出力される電流として pA~nA 程度が想定されているため、信号計測には、ピコアンメータ (iDC13、泰榮エンジニアリング株式会社製) を使用した。1F の PCV 内放射線環境は、数 Gy/h から数百 Gy/h が予測されており、その線量範囲を測定することが求められている。GIGS 太陽電池のガンマ線照射挙動を取得した結果から約 50 pA/cm<sup>2</sup>/(Gy/h) の電流量が出力されることが見積もられている。そのため、PCV 環境中では、pA-nA 程度の信号を測定する機器が求められる。iDC13 は、0.1 pA~10 μA の範囲で電流計測をすることが可能なピコアンメータ

であり、小型・省電力といった特徴を有している。また、上記で、同軸ケーブルの使用を想定しているが、iDC13の接続端子は、BNC であるため、同軸ケーブルの端子を BNC にすることで簡易な接続を可能とした。

④ PC への通信と線量解析ソフトは、ピコアンメータの端子である RS-232C から PC の USB-A へ接続する変換ケーブル (BSUSRC0610BS、株式会社バッファロー製) を使用した。PC には、素子から出力される電流信号から線量を解析するためのソフトとして LabVIEW を使用した。

### (3) OSAM 試作機の外装作製

試作機の外装においては、図 3.4-2 に示すように、令和元年度にて Ver.1 および、令和2年度にて Ver.2 および、Ver.3 を作製した。各外装における性能を表 3.4-2 に示す。令和2年度は、シールド構造のみを有しており、外形としては、5 cm φ × 7 cm であったため、太陽電池素子に比べてケースに余裕がある形状であったため更なる小型化が可能であった。また、放射線環境中で発生するオゾンによる電極酸化影響などを加味してアルゴンなどの不活性ガスの封止や、水環境を想定した防水構造が求められてきた。そのため、Ver.2 では、ジュラルミン加工による小型化により外形としては、12 mm φ × 6.5 cm の小型化および、気密構造を達成した。コネクタ部分においては、BNC コネクタを採用しており、BNC ケーブルを利用して、直接ピコアンメータに接続できるようになっている。また、Ver.3 では、コネクタ部分に改良を加え、SMA 端子を採用することにより、外形としては、10 mm φ × 4 cm の小型化および、市販のコネクタを使用できるように改良し、SMA 端子の選定により防水構造が可能である状態に改善した。SMA 端子は、変換ケーブルにて BNC コネクタに変換しており、Ver.2 同様に、BNC ケーブルを直接接続できる構造に作製された。

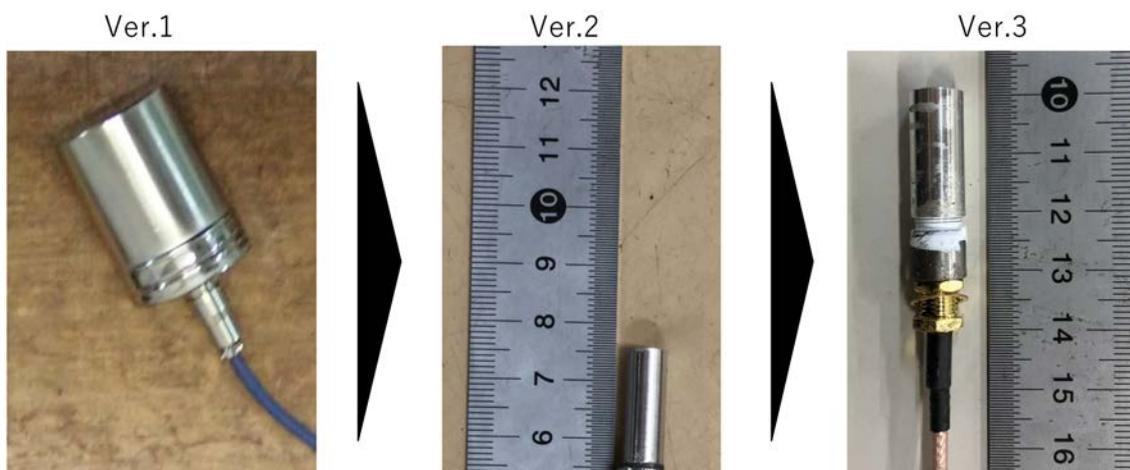


図 3.4-2 太陽電池のアルミシールドの内部

表 3.4-2 各外装における性能

Version	シールド	小型	防水	気密
No.1	○	△	×	×
No.2	○	○	△	○
No.3	○	◎	○	○

### 3.4-3

## (4) 線量計試作機の校正試験

OSAM 試作機システムの外観を図 3.4-3 に示す。作製された Ver. 2 および Ver. 3 の試作機外装の OSAM は、BNC コネクタで接続できる端子を有しているため、BNC 同軸ケーブルを利用することで、簡単にケーブルに接続可能である。ピコアンメータ iDC13 の接続端子も BNC コネクタであるため、OSAM を接続した BNC ケーブルが直接接続可能である。動作時には、ピコアンメータへ、通信用ケーブル (RS232C) と電源ケーブル (5 V) が接続される。通信ケーブルは、PC に接続し、LabVIEW にてデータの解析を行う。本研究において信号輸送ケーブルが BNC の場合でも、放射線環境中において 100 m の信号伝送が可能である。そのため、1F 廃炉作業において、ピコアンメータや PC などの測定系を線量が低い作業室に設置し、OSAM とピコアンメータを 100 m の BNC ケーブルで接続することで、ロボットアームを利用し 100 m 以上先の線量信号を取得できる仕様となっている。OSAM は、小型、防水、気密、および電磁波シールドの性能を有するジュラルミン製キャプセルを作製した。このジュラルミンケースの外形は、Ver. 3 において 10 mm  $\phi$   $\times$  4 cm であり、1F 環境中で求められている小型形状に適している。

作製された OSAM を  $^{60}\text{Co}$  ガンマ線環境下で照射試験を行い、ガンマ線線量率に対する電流挙動を取得した結果を図 3.4-4 に示す。この結果より、OSAM から出力されるガンマ線誘起電流は、数十 Gy/h～数百 Gy/h の範囲において直線的に増加していることが明らかになった。そのため、1F 環境下においては、電流出力の比例係数として  $2.7 \times 10^{-11}$  A/(Gy/h) を用いることにより、電流値を簡単に解析することにより線量率を解析できることが明らかになった。しかし、一般的に、半導体素子の電流出力として pA の領域では再結合電流の影響が見られることから、より低い電流領域においては、この直線性が保たれない可能性がある。また、高い電流領域においても直列抵抗成分が影響するため、直線性の傾きが変化する可能性がある。そのため、より広い領域において本線量計を適応する場合、さらに広範囲の線量率環境下にて校正曲線を取得する必要があると考えられる。

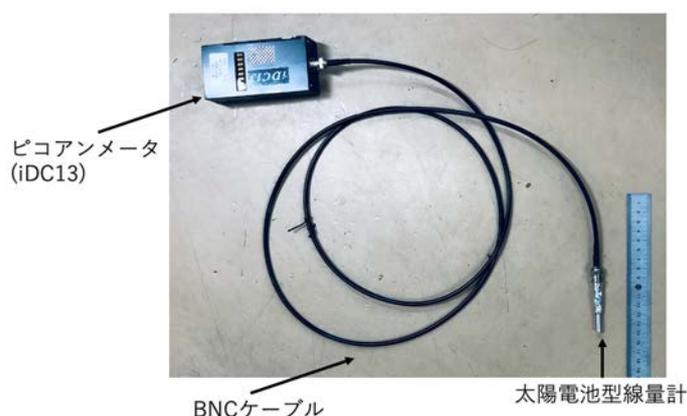


図 3.4-3 OSAM の試作機の概要図

また、非照射環境下および照射における電流のゆらぎはノイズとして、信号の S/N 比に関わる重要な要素である。図 3.4-5 に OSAM 試作機の非照射環境下および 219 Gy/h 環境下での照射環境下の電流信号分布を示す。非照射環境下では、リーク電流が観測されており、その値はおよそ、3 pA であった。これは、ピコアンメータのオペアンプからのオフセット電圧の印加により発生した電流であると考えられる。また、電流信号の分布をガウス分布でフィッティングカーブを点線で示しているが、信号分布傾向の一致が見られた。この結果より、標準偏差を用いて信号のゆらぎを解析した結果、 $1\sigma$  がおよそ 0.4 pA であった。ガンマ線誘起電流挙動の線形

性が低い電流領域まで続いていると仮定した場合、このゆらぎ傾向から測定下限値を見積もると、数百 mGy/h の線量率から測定できると予測される。また同様の仮定にて測定上限値を見積もると、iDC13 を使用した場合、測定レンジは、0.1 pA~10 μA であるため、数百 kGy/h の線量率まで測定できると予測される。また、照射中の電流信号では、平均値 5.253 nA であり、非照射環境中の信号同様に、点線で示すガウス分布でフィッティングカーブと分布傾向が一致している。そのため標準偏差 1σ がおよそ 2 pA であった。この結果より信号が nA オーダーに対して、信号のゆらぎが pA オーダーであるため、非常に高い S/N 比と測定時の安定性を有した線量計であると言える。

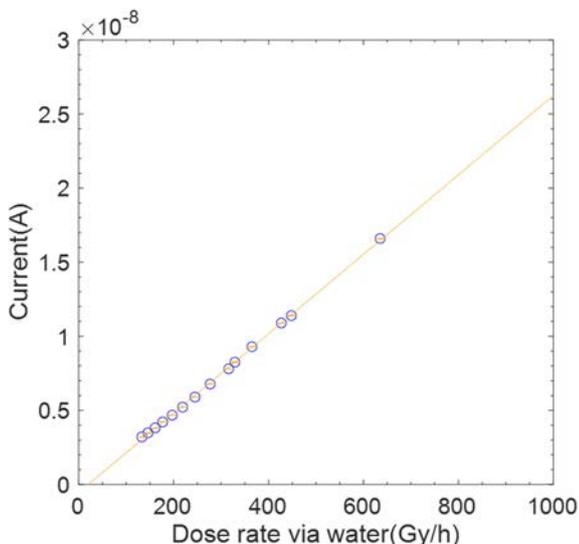


図 3.4-4 OSAM の試作機のガンマ線誘起電流出力挙動

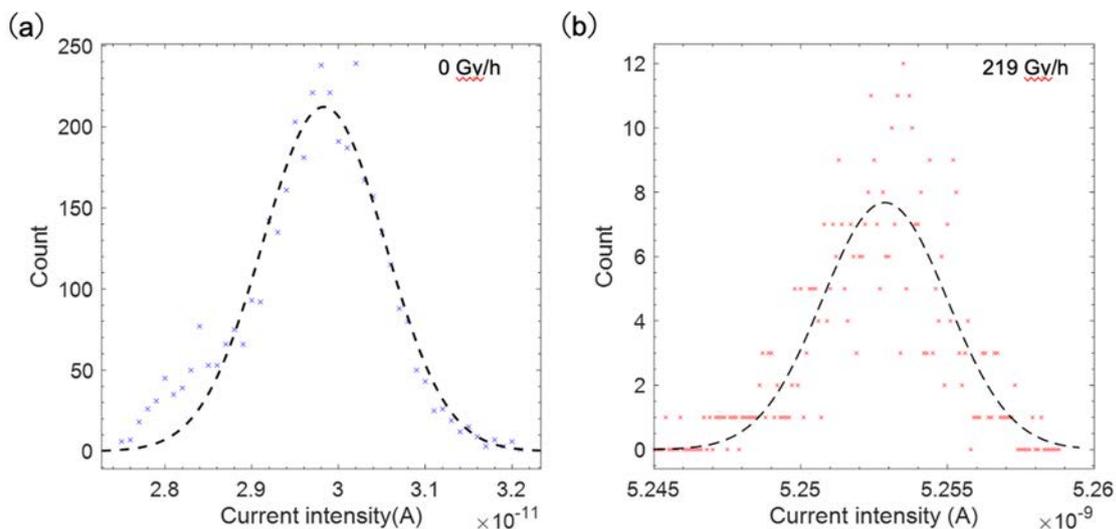


図 3.4-5 OSAM 試作機の (a) 非照射環境下および (b) 照射環境下の電流信号分布

(5) 電流解析用ソフトウェアの開発

線量計システムでは、太陽電池から出力される電流を、予め測定した線量換算係数をもとに解析することによって空間線量率を見積もることを想定している。そのため、太陽電池の電流信号をPCにより解析する。本研究では、PCによる装置制御のため、LabVIEWにより、iDC13からのデジタル信号の信号解析を行うソフトの開発を行った。令和元年度では、ピコアンメータから出力されるデジタル信号を、電流値として表示するソフトウェアを作成した。令和2年度では、線量率を表示できるための、解析プログラムを実装した。

LabVIEWにより、作成したソフトウェアのユーザーインターフェースを図3.4-6に示す。また、データを通信し、線量へ変換するまでの順序を図3.4-7に示す。iDC13は、RS-232Cによる通信であり、ボーレート：19200、データビット：8、パリティ：偶数、ストップビット：1.0、フロー制御：なし、読み取り遅延：500 msと設定した。また、読み込み速度：low、およびノイズフィルター：onの設定を、iDC13へ書き込みにより変更できる仕様となっている。そのため、測定されている電流信号を、PCへ要求する連続データ要求モードのデータ要求時間間隔は、約200 msとなった。また、iDC13からPCへ送られてきた電流信号は、ASKIIであり、これを10進数に変換し、電流値およびチャートとして、表示するプログラムを作成した。また、ファイル保存ボタンをONにしている間、任意のファイルパスを指定することで、測定している線量率、電流値、経過時間、コメントのデータを保存することができる。コメントは、測定中のデータにボックスへ入力した任意の文字または、マークを、ボタンを押している間、追加する機能を有している。線量率を見積もるためには、非照射環境下で測定されるバックグラウンドのリーク電流の平均値としてバックグラウンド補正係数および、ガンマ線校正場で取得した線量換算係数を手動にて入力することで、線量率を計算する事ができる。

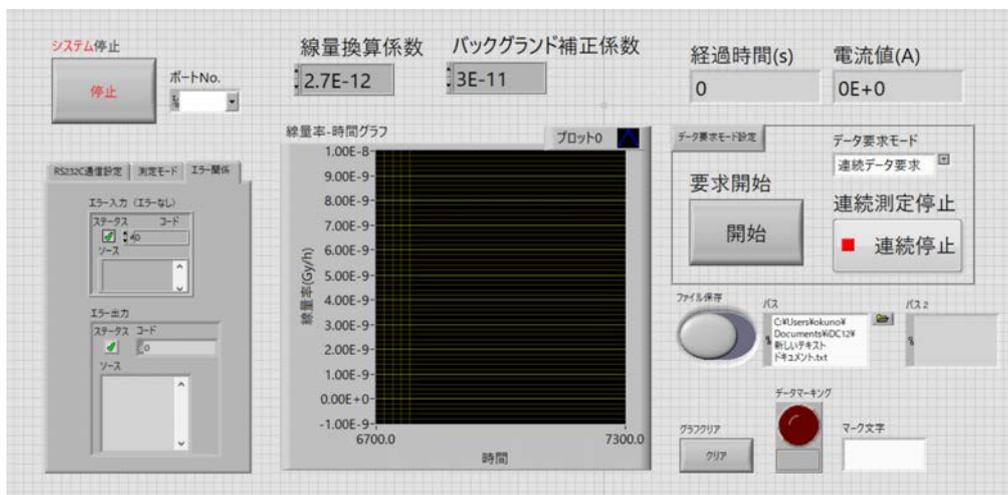


図 3. 4-6 電流信号解析ソフトのユーザーインターフェース

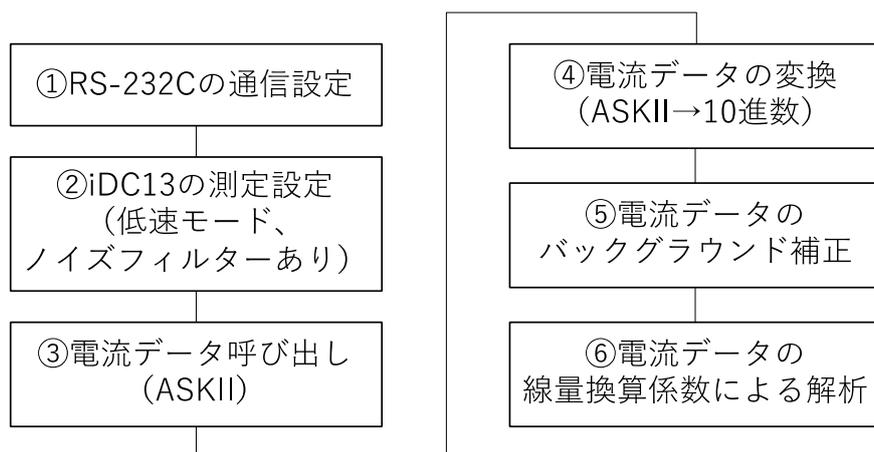


図 3. 4-7 電流信号通信から線量解析までの順序

#### (6) アルファ線検出器の検討

太陽電池素子は、ガンマ線だけでなく、飛程が短く検出が難しいアルファ線の感度を有していることが、本研究のアルファ線照射試験の結果より明らかになった。原子力機構との研究協力の一環で、PHITS を用いて放射線挙動計算を行っており、アルファ線、ベータ線、ガンマ線照射時に太陽電池素子中へ付与される吸収線量率を解析した。図 3. 4-8 に各放射線照射時の InGaP 太陽電池における素子吸収線量率と発生電流の関係を示す。この結果より、入射放射線に特有の発生電流量ではなく、InGaP 太陽電池の素子中への吸収線量率に応答した放射線誘起電流が出力された。電子線に関しては、ファラデーカップではなく、素子横に設置した銅板からグラウンドに流れる荷電数をフラックスとして換算しているため、2次電子などの補正が必要となる。しかし、電子線エネルギーを変化させた際の誘起電流は、素子吸収線量率に依存している。また、アルファ線に関しては、ファラデーカップからグラウンドに流れる電荷数からフラックスを見積もっているため、ガンマ線と放射線誘起電流傾向と良い一致を示している。そのため、アルファ線を検出する場合、ガンマ線と同様の線量換算係数を使用することで、素子吸収線量率を測定できると示唆される。

アルファ線を検出する場合は、飛程が短いため、素子に対して直接アルファ線源が接しているような体系が求められる。しかし、ガンマ線型 OSAM 線量計の外装は、図 3. 4-3 に示すようにシールドケースで覆われているため、そのままでは、アルファ線を検出できない。また、シールドケースから太陽電池を出した場合は、電磁波や、可視光からのノイズ対策をする必要がある。1つの手段として、シールドケースを大きくすることで、シールドケース内に、デブリと太陽電池素子を入れ、アルファ線を検出する方法が考えられる。この方法は、PCV 内からのガレキを取り出した際に、デブリを選定する方法として使用できることが期待できるが、PCV 内のガレキの診断には使用できない。そのため、2つ目の手段としては、Au などの電極材となる金属を太陽電池表面に数十 nm 積層することで、表面電極をシールド、および遮光として使用する方法が考えられる。数十 nm 程度の Au では、アルファ線の飛程よりも十分短いと考えられる。そのため、アルファ線は、電極を透過し、InGaP 素子へ到達できると考えられる。課題点としては、1F 運用時に表面が汚染された場合のノイズ成分を除去する方法や、半導体素子がむき出し状態であることから、表面に衝撃が加わった場合の素子の損傷について保護する方法を今後検討する必要がある。

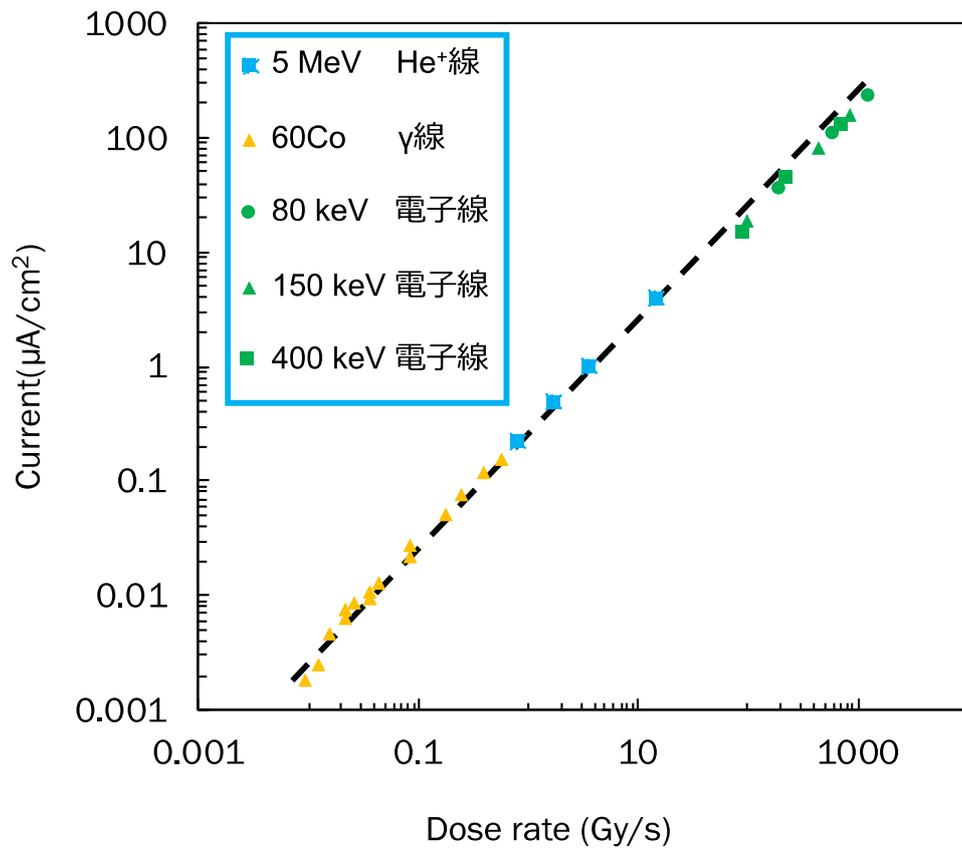


図 3.4-8 各放射線照射時の InGaP 太陽電池における素子吸収線量率と発生電流の関係

### 3.5 研究推進【平成30年度～令和2年度】

平成30～令和2年度の事業期間中に研究代表者の下で各研究項目間ならびにCLADS等との連携を密にして、ニーズの把握・整理を行いながら研究を進めた。福島にて研究会を開催し、廃炉、太陽電池、および線量計に関係する専門家を招くことによって、1F廃炉に使用できる線量計にするための課題点をより明白にした。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。以下、年度毎の会議内容について記載する。

#### (1) 平成30年度研究推進に関する会議

##### 第1回 研究推進に関する委員会

開催日：11月29日

参加者：岡本（木更津高専）、後藤（京都大学）、秋吉（大阪府立大学）、今泉（JAXA）、  
小林（理化学研究所）、奥野（原子力機構）

場 所：原子力機構 東京事務所

##### 第2回 研究推進に関する委員会

開催日：1月24日

参加者：岡本（木更津高専）、後藤（京都大学）、秋吉（大阪府立大学）、今泉（JAXA）、  
小林（理化学研究所）、奥野（原子力機構）

場 所：原子力機構 東京事務所

##### 第3回 研究推進に関する委員会

開催日：2月9日

参加者：岡本（木更津高専）、後藤（京都大学）、今泉（JAXA）、小林（理化学研究所）、  
奥野（原子力機構）

場 所：東京工業大学 大岡山キャンパス

#### 専門家による線量計のニーズ整理

専門家：CLADS 奥村研究員

応対者：原子力機構 奥野

開催日：11月2日

場 所：原子力機構原子力科学研究所 第3研究棟 345号室

#### (2) 令和元年度研究推進に関する会議

##### 第1回 研究推進に関する委員会

開催日：5月25日

参加者：岡本（木更津高専）、今泉（JAXA）、小林（理化学研究所）、後藤（京都大学）、  
（一部：山本P0）

場 所：J ヴィレッジ

##### 第2回 研究推進に関する委員会

開催日：6月28日

参加者：岡本（木更津高専）、今泉（JAXA）、後藤（京都大学）、小林（理化学研究所）、

奥野（東北大学）

場 所：理化学研究所 和光地区 中性子工学施設

第3回 研究推進に関する委員会

開催日：9月19日

参加者：岡本（木更津高専）、今泉（JAXA）、後藤（京都大学）、奥野（原子力機構）

場 所：北海道大学

第4回 研究推進に関する委員会

開催日：12月5日

参加者：岡本（木更津高専）、今泉（JAXA）、後藤（京都大学）、小林（理化学研究所）

奥野（原子力機構）

場 所：原子力機構 東京事務所

2020年度研究会

名 称：化合物太陽電池を応用した線量測定技術研究会

開催日：1月24日

場 所：いわき市 岩惣

(3) 令和2年度研究推進に関する会議

第1回 研究推進に関する委員会

開 催 日：7月10日

現地参加者：岡本（木更津高専）、秋吉（大阪府立大学）、今泉（JAXA）、奥野（東北大学）

Web参加者：小林（理化学研究所）、後藤（京都大学）

招待専門家：大島（QST）、佐藤（QST）

場 所：QST 高崎研

第2回 研究推進に関する委員会

開 催 日：9月9日

現地参加者：岡本（木更津高専）、今泉（JAXA）、小林（理化学研究所）、奥野（東北大学）

Web参加者：後藤（京都大学）、秋吉（大阪府立大学）

場 所：JAXA 筑波宇宙センター

第3回 研究推進に関する委員会

開 催 日：1月26日

現地参加者：岡本（木更津高専）、今泉（JAXA）、奥野（東北大学）

Web参加者：後藤（京都大学）、秋吉（大阪府立大学）、小林（理化学研究所）

招待専門家：牧野（QST）

場 所：JAXA 筑波宇宙センター

2021 年度研究会

件名：原子炉放射線場測定に向けた太陽電池型線量計の研究会

内容：文科省の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」の研究の一部において「過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発」を実施している。3年計画の本研究プロジェクトにおいて、最終年度の令和2年度に成果報告を兼ねた研究会を開催する。本研究会では、線量計開発のために、関連技術の専門家を招いて数件の招待講演を行う。また、本研究課題の成果報告を外部専門家も含めた場で実施することで、本研究開発成果の1Fへの適応、および社会への波及効果に向けた議論を行う。

1. 開催期間：令和2年11月11日～11月12日
2. 開催場所：東北大学 金属材料研究所 1号館 205号室（仙台市）+Web開催
3. 現地参加者：岡本保（木更津高専）、小林智洋（理化学研究所）、秋吉優史（大阪府立大学）
4. Web参加者：後藤康仁（京都大学）
5. 招待講演：大島武（QST）、牧野高紘（QST）中村徹哉（JAXA）

11月11日

15:00-16:00 金属材料研究所 テクニカルセンター 見学

11月12日

プログラム

10:30-10:35	開催の挨拶	岡本保（木更津高専）
10:35-10:50	プロジェクト概要説明	岡本保（木更津高専）
10:50-11:05	招待講演	大島武（QST）
11:05-11:20	招待講演	中村徹哉（JAXA）
11:20-11:35	招待講演	牧野高紘（QST）

お昼休憩 90分

13:00-13:15	報告	後藤康仁（京都大学）
13:15-13:30	報告	今泉充（JAXA）
13:30-13:45	報告	小林智洋（理化学研究所）
13:45-14:00	報告	秋吉優史（大阪府立大学）
14:00-14:15	報告	奥野泰希（東北大学）
14:15-14:20	総評	岡本保（木更津高専）

第1回 原子力機構 CLADS との連携会議

開催日：3月23日

Web参加者：奥村（原子力機構 CLADS）、奥野（東北大学）

第1回 東京電力との連携会議

開催日：1月15日

Web参加者：佐藤（東京電力）、服部（東京電力）、堂埜（東京電力）、高平（東京電力）、渡邊（東北大学）、青木（東北大学）、奥野（東北大学）

第2回 東京電力との連携会議

開催日：2月15日

Web参加者：佐藤（東京電力）、堂埜（東京電力）、渡邊（東北大学）、青木（東北大学）、  
奥野（東北大学）

第3回 東京電力との連携会議

開催日：3月2日

Web参加者：佐藤（東京電力）、堂埜（東京電力）、竹中（東京電力）、青木（東北大学）、  
奥野（東北大学）

#### 4. 結言

この研究では、太陽電池式放射線感受素子を用いることにより、炉心付近の高い線量率の放射線環境をリアルタイムで測定可能な電源レスの線量測定システムを開発することを目的とし、CdTe 太陽電池式放射線感受素子の作製、宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定、高耐放射線性微小電流計測システム開発、ガンマ線照射、電子線照射実験、中性子線照射試験、アルファ線照射試験、線量解析システムの作成を行った。

CdTe 太陽電池式放射線感受素子の作製では、放射線感受素子用 CdTe 太陽電池の成膜条件、構造の最適化を行った。また、フレキシブル放射線感受素子の作製を目指したサブストレート型 CdTe 太陽電池の作製・評価を行った。さらに、作製した試料のガンマ線、ベータ線、アルファ線、中性子線の照射試験を行うとともに、放射線耐性の評価を行った。さらに、ガンマ線に対する感度を向上させる方法を検討した。スーパーストレート型 CdTe 太陽電池において、ガンマ線、中性子線照射試験を行い、セルを重ねて並列接続することによりガンマ線感度を向上させることを明らかにするとともに、中性子線耐性を確認した。また、サブストレート型 CdTe 太陽電池において、ベータ線、アルファ線による誘起電流を確認するとともに、ベータ線耐性を確認した。

宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定では、検知素子候補である InGaP、CIGS 太陽電池の耐放射線性試験の結果に基づき、更なる耐性向上が期待されると判断した InGaP 太陽電池素子について、構造の改良を提案し、素子を試作した。この改良版 InGaP 太陽電池に対し、電子線、アルファ線 (He イオン) およびガンマ線を照射し、その前後で光電流-電圧特性を取得した。また、取得した放射線照射試験データを基に、宇宙用太陽電池の放射線劣化予測手法として確立されている DDD 法を応用し、原子炉環境でも太陽電池が劣化予測できるような手法を確立した。DDD 法により、出力の劣化予測や劣化補正に用いることができる、陽子線を基準としたアルファ線、ベータ線の劣化特性を統一して表す式および劣化特性を取得・確立した。

高耐放射線性微小電流計測システム開発では、遮蔽構造を持つ微小電流計測システムを用いた際にケーブルで発生する電離損傷ノイズを評価した。得られた値から、太陽電池センサ出力に対する電離損傷ノイズの影響を評価し、測定できる線量率下限を評価した。最終目標である 80 m 以上の長さのケーブルを用いて放射線環境下においてセンサ出力の伝送特性の評価を行い、構築した微小電流計測システムが廃炉作業において現実的に利用できるかどうかの総合的な評価を行った。1.5D タイプの三重同軸ケーブル 15 m に対して 40~60 Gy/h のガンマ線照射を行い、誘起電流を測定した。この値から 100 m のケーブルが 60 Gy/h の線量率のガンマ線に様に曝されていると仮定した場合の誘起電流値を求め、面積 1 cm<sup>2</sup> の太陽電池センサの出力電流値と比較して測定できる線量率下限を評価した。ガンマ線源に太陽電池センサを対向させた状態で 15 m ケーブルおよび 90 m ケーブルを経由してセンサ出力値計測を行い、両者に差異がないことを確認し、信号の長距離伝送に問題がないことを確認した。特性評価の実験において見られたその他の課題などを含めて微小電流計測システムが廃炉作業において現実的に利用できるかどうかを評価した。

ガンマ線照射、電子線照射実験では、開発した照射容器とコバルト 60 照射施設により、大線量率 (最大 10 kGy/h 程度まで) から低線量率 (数 mGy/h 程度) までのガンマ線照射時の太陽電池起電力測定を行い、出力電流の線量率依存性を広い線量率範囲に於いて評価した。また、1 MGy 程度までの積算の線量による起電力特性変化を評価することで耐性評価を行った。これにより、1F 内の過酷環境に於ける太陽電池の線量計としての信頼性を確認した。CW 加速器で 60 keV 程度の低エネルギーから 500 keV 程度までの範囲でビーム電流値を変えて電子線照射を行い、太陽電池からの起電力をその場測定することでベータ線測定の実験を行った。また、ガンマ線照射よりも高い線量に相当する照射が可能であるため、損傷評価のため積算線量 10 MGy 程度まで電子線照射を

行い、理論的な予測モデルの妥当性を確認した。さらに、ベータ線による起電力特性の検証のために、 $^{90}\text{Sr}$  密封線源を用いた実証試験を行った。

中性子線照射試験では、各機関より提供されたデバイスを RANS にて照射した。遮蔽体内部（線量未評価）で照射を行うため、熱中性子量に加えて、高速中性子量の評価を行った。照射誘起電流測定その他、素子に含まれる元素、システム全体（基板、ハンダ、配線類、コネクタ類、電源、計測機器など）の中性子照射場における放射化検討を Ge 半導体検出器にて行った。安全と放射線計測の両方の観点から、使用材料の検討、提言を行った。実際の RANS における照射は 3 回のマシンタイムを確保して行い、デバイスの発電特性測定に約 20 時間のビーム供給を行った。照射位置を変更することにより、高速中性子量を変化させることが可能であることを示した。照射終了直後に残存する発電電流は、周辺およびデバイスの放射化によるものであることが判明した。

アルファ線照射試験では、タンデム加速器で He イオンを加速しアルファ線照射試験および結果解析を行った。構築したその場測定システムを利用し、InGaP、CIGS、CdTe 太陽電池のアルファ線誘起電流挙動を取得した。また、He イオンの連続照射を実施し、太陽電池のアルファ線誘起電流の劣化挙動を解析した。タンデム加速器を用いて、アルファ線模擬の He イオンを InGaP、CdTe および CIGS 太陽電池に照射した。照射時に、放射線誘起電流と He イオンフラックスを取得した。また、He を長時間照射することにより、放射線誘起電流が照射フラックスにより劣化する挙動を取得した。

線量解析システムの作成では、1. 不活性ガスパージ、2. トライアキシャルコネクタ、3. 電磁波シールドの仕様を搭載したセンサ外装が有効であるため、外装の設計および、試作を行った。また、試作した外装を用いて、太陽電池型センサの線量計としての特性を、ガンマ線照射試験により解明した。また、OSAM 用アルファ線、ベータ線、ガンマ線線量校正データによる高精度な線量解析プログラムを開発した。センサ外装をジュラルミン等にて作製した。作製した外装にて、ガンマ線照射試験を実施し、その放射線誘起電流のガンマ線線量率依存性を取得した。高エネルギー He イオン、電子線、ガンマ線の照射試験の結果より、放射線誘起電流は線種によらず、素子吸収線量に依存して増加することが解明された。この傾向を利用し、アルファ線、ベータ線、およびガンマ線線量の解析プログラムを作成した。

さらに、1F 廃炉に関する学会・ワークショップ等に参加し、情報収集を実施した。研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、ニーズの把握・整理を行いながら研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。本課題におけるワークショップを東北大学にて開催し、SiC 線量計の専門家である QST 大島様、牧野様、および太陽電池の放射線発電効果をご研究されている JAXA 中村様に講演を頂いた。現場ニーズの把握のため、東京電力の佐藤様、竹中様、および原子力機構の奥村様との意見交換を行った。

本研究では、太陽電池式放射線感受素子を用いることにより、炉心付近の高い線量率の放射線環境をリアルタイムで測定可能な電源レスの線量測定システムを開発することを目的とする。具体的には、素子最小構成  $1\text{ cm}^3$  の小型化、最長 80 m の遠隔操作、数 Gy/h～数 kGy/h の高線量率ガンマ線測定、数 Gy/h～数 kGy/h のアルファ線測定、3 MGy 以上のガンマ線耐性を実現し、中性子で発生する素子の電流ノイズに対しては低放射化材料を使用し、線量計における信号エラーを数 Gy/h で検出される電流値以下で実現することを目的とした。素子最小構成  $1\text{ cm}^3$  の小型化については、 $0.5\text{ cm}^2 \times 0.1\text{ mm}^t$  の素子を実現した。最長 80 m の遠隔操作については、90 m のケーブルにて、素子からの信号を十分に検出できることを確認した。数 Gy/h～数 kGy/h の高線量率ガンマ線測定については、 $^{60}\text{Co}$  ガンマ線源を用いてこの範囲での放射線誘起電流の線形性を取得し、ガンマ線の線量率測定が可能であることを明らかにした。数 Gy/h～数 kGy/h のアルファ線測定につい

ては、5 MeV の He イオン照射実験および放射線シミュレーション結果よりこの範囲のアルファ測定が可能であることを明らかにした。3 MGy 以上のガンマ線耐性については、CdTe 太陽電池で 3 MGy 以上のガンマ線耐性を確認した。中性子環境下での数 Gy/h の検出については、使用する材料の放射化分析を行い、ノイズ対策を行った結果、中性子環境下で 0.1 Gy/h 程度のガンマ線を小ノイズで検出できることを確認した。

This is a blank page.



