DOI:10.11484/jaea-review-2020-051

# **TOYION**

# 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)

- 令和元年度 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) -FY2019 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource

> 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

**Development Project-**

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

February 2021

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。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<a href="https://www.jaea.go.jp">https://www.jaea.go.jp</a>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  $\overline{\phantom{a}}$   $\overline{\phantom{a$ 

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2021

# 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)

- 令和元年度 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

(2020年10月29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、令和元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」の令和元年度の研究成果について取りまとめたものである。

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。これまでの研究で、太陽電池素子を応用した線量計は、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が検証されてきており、本研究は、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た開発を行う。

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)

FY2019 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 29, 2020)

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 FY2019.

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 in FY2019.

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 the previous studies, it has been verified that dosimeters using solar cell devices can be used for dose evaluation under high dose rate near the reactor pressure vessel because they have advantages such as unnecessity of a high-voltage source, ultra-compactness, lightweight, and high radiation resistance. Through this study, we will develop technologies towards practical application of revolutionary radiation measurement system based on the dose measurement technology utilizing solar cell devices.

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(継続分)	2
3.	令和元年度 採択課題	5
付銀	录 成果報告書	9
	Contents	
1.	Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	. 1
2.	Accepted Proposal in FY2018 ~Continued~	2
3.	Accepted Proposal in FY2019	. 5
Λn	pendiv Result Report	Q

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)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、従来のプログラムを、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(継続分)

平成30年度採択課題(継続分)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	山﨑 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	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	渡邉 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

令和元年度は、4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: 平成 31 年 4 月 24 日~令和元年 6 月 7 日 令和元年 5 月 30 日~令和元年 7 月 18 日 ※日露共同研究のみ

· 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

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	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 号機ペデスタル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	渡邉 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

#### 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	慶應義塾大学

# 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	淺間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティックスを融合したデ 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	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

本報告書は、採択課題のうち、共通基盤型原子力研究プログラム (一般研究)「過酷炉心 放射線環境における線量測定装置の開発」の令和元年度の研究成果について記したもので ある。

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.

# 令和元年度

# 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 31I045)

# 成果報告書

令和 2 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」の令和元年度の研究成果を 取りまとめたものです。

## 目次

概略···········vii
1. はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-1
2. 業務計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3. 令和元年度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       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. 1-10         3. 2 高耐放射線性微少電流計測システム開発(再委託先: 京都大学)       3. 2-1         3. 3 放射線照射実験       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. 3-14         3. 3. 3 アルファ線照射試験(連携先: 原子力機構)       3. 3-16         3. 4 線量解析システムの作成(連携先: 原子力機構)       3. 4-1
3.5 研究推進····································

#### Contents

Abstract vi
1. Introduction
2. Project plan
2.1 Master plan
2.2 Targets and approaches for activities in FY2019
3. Implemented measures and results in FY2019
3.1 Studies on solar cell type dosimeter devices
3.1.1 Fabrication of CdTe solar cell type dosimeter devices
3.1.2 Device characterization and selection through space solar cell technologies3.1-1
(Recommission to JAXA)
3.2 Development of super radiation tolerant minute current measurement system
(Recommission to Kyoto University)
3.3 Radiation tests 3.3-
3.3.1 Gamma-ray and electron irradiation tests
(Recommission to Osaka Prefecture University)
3.3.2 Neutron irradiation tests
(Recommission to Riken)
3.3.3 Alpha-ray irradiation tests
(Collaboration with JAEA)
3.4 Development of radiation dose analysis system
(Collaboration with JAEA)
3.5 R&D promotion 3.5-
4. Conclusion

表	一覧	
	表 3.1.2-1	CIGS 太陽電池の He イオン照射における Isc と Voc の保存率導出結果 · · 3. 1-11
	表 3.3.1-1	コバルト 60 照射プール 10 cm 容器内の線量率分布 ····· 3.3-7
	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 3.3-17
	表 3. 4-1	太陽電池型線量計 (0SAM) の試作機の構成 · · · · · · · 3.4-2
図	一覧	
	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 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2. 1-2
	図 2.1-3	本業務の全体計画図 · · · · · · · · · 2.1-3
	図 3.1.1-1	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. 1-2
	図 3.1.1-2	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. 1-2
	図 3.1.1-3	作製したサブストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な電流電圧特性 ···· 3. 1-3
	図 3.1.1-4	作製したサブストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な分光感度特性 ···· 3. 1-3
	図 3.1.1-5	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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1-4
	図 3.1.1-6	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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1-5
	図 3.1.1-7	観測された CdTe 太陽電池の電流と陽子線電流 · · · · · · · 3.1-6
	図 3.1.1-8	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・3.1-6
	図 3.1.1-9	CdTe 太陽電池の誘起電流と陽子線電流の関係・・・・・・・・ 3. 1-7
	図 3.1.1-10	サブストレート型 CdTe 太陽電池の温度特性 · · · · · · · 3.1-8
	図 3.1.1-11	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 ···· 3.1-9
	図 3.1.2-1	5 MeV He <sup>+</sup> 照射による光電流-電圧特性の変化······ 3.1-15
	図 3.1.2-2	1 MeV 電子線照射による光電流-電圧特性の変化・・・・・・ 3.1-15
	図 3.1.2-3	5 MeV He イオン照射による短絡電流 Isc および開放電圧 Voc の劣化特性
		3. 1–15
	図 3.1.2-4	1 MeV 電子線照射による短絡電流 Isc および開放電圧 Voc の劣化特性
		3. 1–16
	図 3.1.2-5	2 MeV 電子線照射による短絡電流 Isc および開放電圧 Voc の劣化特性
		3. 1–16
	図 3.1.2-6	3 MeV 陽子線照射による短絡電流 Isc および開放電圧 Voc の劣化特性
		3. 1–16
		InGaP 太陽電池の非イオン化エネルギー損失 (NIEL) 値 · · · · · · · 3. 1-17
		CIGS 太陽電池の非イオン化エネルギー損失 (NIEL) 値 · · · · · · 3. 1-17
	図 3.1.2-9	CdTe 太陽電池の非イオン化エネルギー損失 (NIEL) 値 · · · · · · 3. 1-18

図 3.2.2-1	太陽電池へのガンマ線照射実験の概念図(a) InGaP 太陽電池および CIGS
	太陽電池、(b) CdTe 太陽電池····· 3.2-2
図 3.2.2-2	太陽電池のガンマ線照射に伴う電流密度の線量率依存性(a) InGaP 太陽
	電池、(b) CIGS 太陽電池、(c) CdTe 太陽電池 ······ 3.2-4
図 3.2.3-1	ケーブルにおいて生じる電離損傷ノイズ計測方法 3.2-5
図 3.2.3-2	$Z=\infty$ の場合に同軸ケーブルに誘起する電離損傷ノイズの線量率依存
	性の例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.2-6
図 3.2.3-3	Zを $Si$ ダイオードとした場合に同軸ケーブルに誘起する電離損傷ノイズ
	の線量率依存性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2-6
図 3.2.3-4	ガンマ線源が格納容器から照射室に出入りする際の検出電流の変化
	(a) 格納容器から照射室に現れるとき、(b) 照射室から格納容器に入る
	とき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2-7
図 3.2.3-5	同軸ケーブルの被覆線の接地・非接地による検出電流の違い(高速モード)
	(a) 非接地の場合、(b) 接地の場合 ····· 3.2-7
図 3.2.3-6	被覆線を接地した場合にガンマ線源が格納容器に出入りする際の検出電
	流の変化 (a) 格納容器から照射室に現れるとき、(b) 照射室から格納
	容器に入るとき・・・・・・・・・・・・3.2-8
図 3.2.3-7	同軸ケーブルの被覆線を接地したときの電離損傷ノイズの線量率依存性
	3. 2-8
図 3.2.3-8	ガンマ線照射下において同軸ケーブル内で生じている現象の概念図 ‥‥ 3.2-9
図 3.2.4-1	設計した微少電流計測システムの総合遮蔽構造 ・・・・・・・・・・ 3.2-11
図 3.2.4-2	遮蔽構造の性能を検証するための実験回路 (a) 三重同軸ケーブルと同
	軸ケーブルを市販の変換コネクタで接続する場合 (b) 三重同軸ケーブ
	ルの内側被覆線を電離損傷ノイズ抑制のために使う場合 3.2-12
図 3.2.4-3	三重同軸・同軸ケーブル変換コネクタを用いた場合に三重同軸ケーブル
	で観測される電離損傷ノイズ
図 3.2.4-4	三重同軸ケーブルの内側被覆を遮蔽に用いる構造において観測される電
	離損傷ノイズ (a) 芯線で信号伝送した場合、(b) 内側被覆線で信号伝
	送した場合・・・・・・・・・・3.2-14
図 3.3.1-1	プール照射用 10 cm 試料容器と線源容器(線源容器はダミー) ····· 3.3-2
図 3.3.1-2	照射前(青)および93.1 kGy 照射後(赤)のCIGS 太陽電池LIV 特性・3.3-2
図 3.3.1-3	今年度製作した照射時起電力測定用試料容器
図 3.3.1-4	照射時温度測定のために太陽電池を模したガラス板上に熱電対を 4 組実
	装した試料ホルダー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3-2
図 3.3.1-5	照射時起電力測定用試料容器図面 · · · · · · · · · · · · · · · · · 3.3-3
図 3.3.1-6	AD8495 チップを使用した 4ch 熱電対アンプ・ノイズフィルター ····· 3.3-4
図 3.3.1-7	熱電対アンプからのアナログ出力を TUSB-1612ADSM-S AD コンバーター
	に入力し、PC 取込を行うシステム・・・・・・・・・・ 3.3-4

図 3.3.1-8	コバルト 60 照射プールでの 4.3 kGy/h 照射時温度測定結果 ····· 3.3-4
図 3.3.1-9	照射前(左)後(右)のラジオクロミックフィルム 3.3-6
図 3.3.1-10	プール照射用 10 cm 照射容器にラジオクロミック線量計を格納した様子
	3. 3-6
図 3.3.1-11	プール照射用 10 cm 照射容器用の線源容器内での線量率位置依存性の計
	算結果 · · · · · · · · 3.3-6
図 3.3.1-12	ラジオクロミックフィルムを暗室内で蛍光灯および LED 光源下に曝した
	際の吸光度変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3-7
図 3.3.1-13	TLD 線量計を用いて評価した照射容器内線量と容器がない場合の空間線
	量との比・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.3-7
図 3.3.1-14	InGaP 太陽電池と ADCMT 社製 6241 電流計を用いて 447 Gy/h で測定した
	照射時電流・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3-8
図 3.3.1-15	InGaP 太陽電池と iDC12 電流計を用いて 16 Gy/h で測定した照射時電流
	3. 3-8
図 3.3.1-16	InGaP 太陽電池と iDC12 電流計、シールド線を用いて第 2 照射室におい
	て 5.5 Gy/h~400 Gy/h の範囲で測定した照射時電流の線量率依存性·· 3.3-9
図 3.3.1-17	コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器の写真 3.3-10
	コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器の照射体系 3.3-10
図 3.3.1-19	コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器の試料台 3.3-10
図 3.3.1-20	(a) InGaP 太陽電池および(b) CIGS 太陽電池における電子線誘起電流 3.3-11
図 3.3.1-21	InGaP 太陽電池における各電子線エネルギーの吸収層厚さ方向に対する
	付与エネルギー分布・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3-11
図 3.3.1-22	(a) InGaP 太陽電池および(b) CIGS 太陽電池における 400 keV 電子線照
	射時の劣化挙動・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3-12
図 3.3.2-1	RANS の加速器 · · · · · · 3.3-14
図 3.3.2-2	中性子発生ベリリウムターゲットおよびホルダー 3.3-14
図 3.3.2-3	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 3.3-15
図 3.3.2-4	RANS 中性子発生ターゲットステーション・・・・・・・・ 3. 3-15
図 3.3.2-5	遮蔽体を開放して露出させた陽子ビームライン末端部 3.3-16
図 3.3.2-6	試料照射場所における中性子スペクトルの計算結果 3.3-16
図 3.3.2-7	ターゲットステーション内の吸収線量率 · · · · · · · · · · · 3.3-17
図 3.3.2-8	ターゲットステーション内で 10 分間照射した直後および 1 週間後にゲ
	ルマニウム検出器で測定した各試料のガンマ線スペクトル 3.3-18
図 3.3.3-1	軽イオン照射用チャンバー ・・・・・・・・・・・・・・ 3.3-20
図 3.3.3-2	ヘリウムイオンの均一照射 ・・・・・・・・・・・・・・ 3.3-20
図 3.3.3-3	ビーム電流および太陽電池の電流の同時測定用治具 ・・・・・・・・ 3.3-20
図 3.3.3-4	He イオンビーム照射時の InGaP 太陽電池の放射線誘起電流挙動 · · · · · 3. 3-21
図 3.3.3-5	He イオンビームフラックスの InGaP 太陽電池の誘起電流依存性 · · · · · 3.3-21

図 3.3.3-6	太陽電池の放射線誘起電流発生機構・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3–23
図 3.3.3-7	InGaP 太陽電池の吸収層におけるアルファ線の付与エネルギー分布 · · ·	3. 3-23
図 3.3.3-8	He イオン照射試験における CdTe 太陽電池の劣化傾向 ·····	3. 3-24
図 3.4-1	太陽電池型線量計(OSAM)の試作機の概要図 ·····	3. 4-2
図 3.4-2	太陽電池のアルミシールドの内部 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 4-2
図 3.4-3	太陽電池のステンレスシールドの外装	3. 4-3
図 3.4-4	電流信号解析ソフトのユーザーインターフェース	3. 4-4
図 3.4-5	iDC12 の外装と電流値表示機······	3.4-4

略語一覧

1F : Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

(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 (近接昇華法)

CVD: chemical vapor deposition (化学気相成長法)

CW : Cockcroft-Wolton (コッククロフト・ウォルトン型)

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-current-voltage (光電流電圧)

ITO: indium tin oxide (インジウム・スズ 酸化物)

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

(太陽電池応用線量測定システム)

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 (1F) 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 30 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 cm³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指している。3 カ年計画の2年目である今年度は、下記の成果が得られた。

- (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、光電流一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量研機構高崎研にて、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一電圧特性を取得し、エネルギーおよびフルエンスごとに光電流一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、量研機構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( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ )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) 高耐放射線性微少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いだし、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はなく、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 30 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。コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器(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、関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)

理研加速器駆動小型中性子源 (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少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ヤ生成量を解析した。

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。

ラボビュー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廃炉国際共同研究センター(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。

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 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。

平成 30 年度においての研究成果は、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。

#### 1. はじめに

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)の廃炉現場において炉内状況や建屋内状況を調査する上で、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 cm φ以下の小型化、2. 30 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、研究開発を実施する。

太陽電池は現在、一般消費用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。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 CuInGaSe (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。また、半導体放射線検出用材料である CdTe を用いた CdTe 太陽電池も木更津工業高等専門学校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。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する。

1F 環境下において、太陽電池型線量計を実用化するためには、主に以下の3つの課題がある。 それは1. 高線量率ガンマ線環境での高精度測定、2. 高耐放射線性測定システムの実現、3. 遠 隔化・小型化モジュールの構築である。

「1. 高線量率ガンマ線環境での高精度測定」:1F 炉心付近想定線量を測定するためには、それぞれの太陽電池素子が数 Gy/h-数 kGy/h の線量率範囲で測定可能であることを解明する必要がある。また、高精度に測定するためには、S/N 比を向上させる必要があり、ノイズ源として、素子の中性子放射化や、電流信号輸送ケーブルの放射線絶縁破壊によるリーク電流の増大がある。そのため、本研究では、放射線感受素子と微少電流解析装置の間のケーブルのノイズ除去や、信

号減衰防止のための最適な構造および放射線感受素子の電流信号の出力向上を行い、遠隔地点の 線量率のその場線量測定システムを開発する。

「2. 高耐放射線性システム開発」:廃炉作業を実施する場所は極めて高い放射線環境であり、直接放射線に曝されることから、放射線の検出器として太陽電池には、高い放射線耐性が求められる。1F の原子炉格納容器内部では、アルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子線といった、様々な放射線が存在することが想定され、これらの放射線が、太陽電池の劣化に及ぼす影響を明らかにすることは、重要である。そのため、各々の太陽電池に対し、アルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子線を照射することで、それぞれの放射線に対する照射損傷による性能劣化挙動を解明し、放射線耐性の高い太陽電池素子を探索する。また、中性子は、太陽電池素子の放射化も引き起こす。素子の放射化による放射線は、素子外部からの放射線との区別がつかないため、線量信号のエラーにつながる。そのため、照射損傷だけでなく、太陽電池素子の放射化によるノイズに関しても高い S/N 比を持つ太陽電池素子の探索を行う。

「3. 遠隔化・小型化モジュール構築」: 炉心へのアクセスは、高い放射線環境、漏水環境および瓦礫などによる空間的制限環境である。現状ではロボットによる炉心への接近が計画されているため、線量計の体積削減および測定の遠隔化が必要となる。太陽電池は素子の薄膜化および高耐放射線性が実現されており、小型でかつ貼付シールのような放射線測定素子を作製することが可能と期待される。また素子だけでなく、微少電流測定装置などのシステム全体が放射線に曝されることも想定されており、シミュレーションによる放射線の遮蔽設計により、最小限の遮蔽のみでシステム全体の放射線耐性を向上させる。また、水中の動的環境下でも、小型・遠隔化の動作可能なシステムを開発するため、約100 kGy/hのガンマ線環境で試験を行うことで、開発した小型線量測定システムの動的な環境下での実証試験を実施する。

#### 2. 業務計画

#### 2.1 全体計画

本研究において開発する線量計の概要図を図 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しての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、木更津工業高等専門学校(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、太陽電池の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しての選定を行う。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、原子力機構(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用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原子力機構(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) 高耐放射線性微少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原子力機構が担当する。(4)については原子力機構が担当する。研究推進では各年度に 2~3 回の研究推進員会を開催し、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

		1年目	2年目	3年目
1	耐放射線性の 高い太陽電池 型放射線検出 素子の開発	太陽電池の作製	放射線照射試験	高放射線耐性検出器の検討
2	放射線環境下 での、A/D変 換データ輸送 技術	電流計および ケーブルの選定	放射線照射試験	最適なケーブル長さの決定
3	英知を結集し た線量測定シ ステムの作製	線量解析システム の作成準備	試作機の作製	製品化の検討

図 2.1-2 研究計画の概要図

	2018 年度	2019 年度	2020 年度
	(平成 30 年度)	(令和元年度)	(令和2年度)
(1)太陽電池式放射線	CdTe 太陽電池 の作製と評価	CdTe 太陽電池のフレキ	·シブル化の検討 
感受素子に関する研	宇宙用太陽電池の	(木更津高専)	
究	選定・作製 	宇宙用太陽電池の     (JAXA)	選定・作製・評価 
(2)高耐放射線性微少電流計測システム開	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	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
発		(京都大学)	
	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
(3)放射線照射実験	中性子線照射試験 の準備	(大阪府立大学) 中性子線による放射化 の評価	中性子線照射試験 の実施
	アルファ線照射試験の	(理研) 準備 アルファ線照射 (原子力機構)	試験の照射試験の実施
(4)線量解析システム	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	製品規格の検討
の作製		(原子力機構)	
(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
	<u> </u>	-	

図 2.1-3 本業務の全体計画図

#### 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、光電流一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量研機構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一電圧特性を取得し、エネルギーおよびフルエンスごとに光電流一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) 高耐放射線性微少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30 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。コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器(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。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)

理研加速器駆動小型中性子源(RANS)のパルス長と周波数を調整することにより、中性子東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 0SAM 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少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ヤ生成量を解析する。

#### (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。

次章では、これらについての今年度の成果について述べる。

#### 3. 令和元年度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

#### 3.1.1 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 化の検討を行った。まず、ガンマ線、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 太陽電池の構造は、ガラス基板/ITO/n-CdS/p-CdTe/Cu ドープカーボン電 極/Ag 電極という構造を有している。この構造の太陽電池の作製方法は次の通りである<sup>(1),(2)</sup>。 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 (CVD 法) 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 430 ℃程度とした。CdS の厚さは 60~100 nm 程度である。次 に近接昇華法 (CSS 法) 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℃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 雰囲気で 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 600 ℃程度、CdTe 層の膜厚は 6 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な要因であると考えている。CdTe 膜に CdCl₂水溶液を塗布した後に、415 ℃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。

今年度は、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 μm 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 $10^{14}\sim10^{15}$  cm<sup>-3</sup>程度で、 空乏層幅は 2 μm 程度である。今年度は 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 3.1.1-1 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 3.1.1-2 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 3.1.1-1 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 3.1.1-2 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、キャリヤ収集効率が低下し、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)の電界でキャリヤ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。

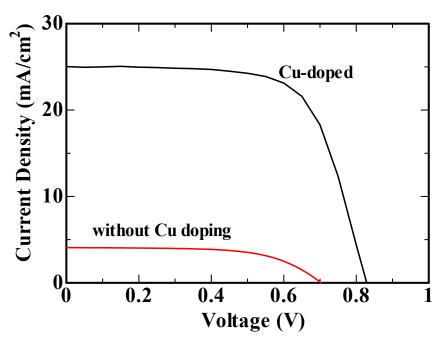


図 3.1.1-1 Cu ドーピングを行った場合および行わなかった場合のスーパーストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な電流電圧特性

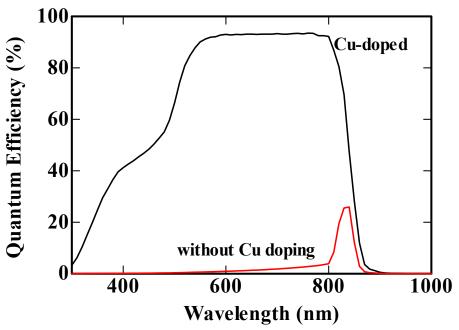


図 3.1.1-2 Cu ドーピングを行った場合および行わなかった場合のスーパーストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な分光感度特性

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、Ag/Zn0:A1/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、<math>415 ℃で  $CdC1_2$  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 ℃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 ℃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℃での face-to-face アニールおよび 2nd  $CdC1_2$  処理)を行った。さらに、2nd Cu ドーピング(Cu 密度 800 ~ 1,400 ppm)を行った。図 3.1.1-3 に作製したサブストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な電流電圧特性を示す。また、図 3.1.1-4 に作製したサブストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な分光感度特性を示す。

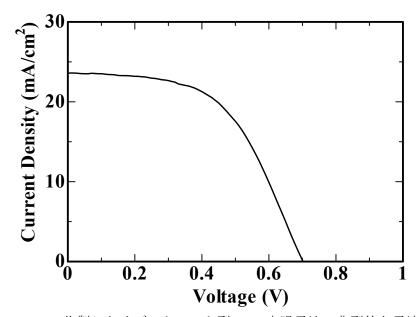


図 3.1.1-3 作製したサブストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な電流電圧特性

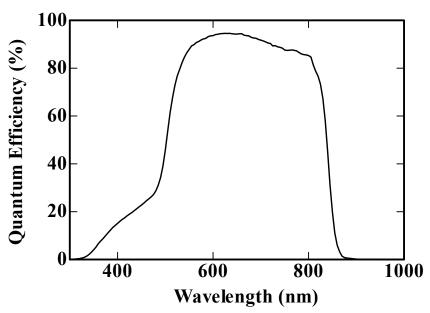


図 3.1.1-4 作製したサブストレート型 CdTe 太陽電池の典型的な分光感度特性

今年度は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開始した。アルファ線およびベータ線照射試験については、今年度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。ベータ線照射試験については、照射中の温度上昇などの問題点が確認された。こちらについては、他の太陽電池のベータ線照射試験と併せて3.1.2項で述べる。

図 3.1.1-5 に、スーパーストレート型 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<sup>(4)</sup>。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ヤ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。

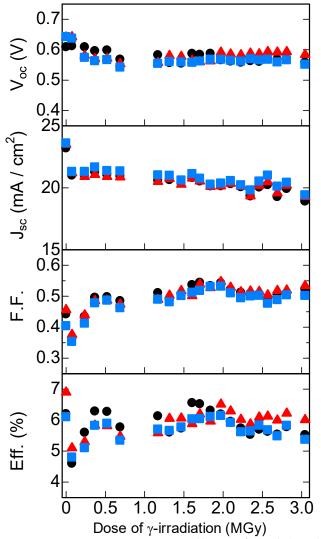


図 3.1.1-5 スーパーストレート型 CdTe 太陽電池の特性と コバルト 60 ガンマ線照射量との関係

次に、中性子線環境中での挙動を検討した。理研の RANS(RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source)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、 $15\sim35~\mu A$  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 3.1.1-6 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。

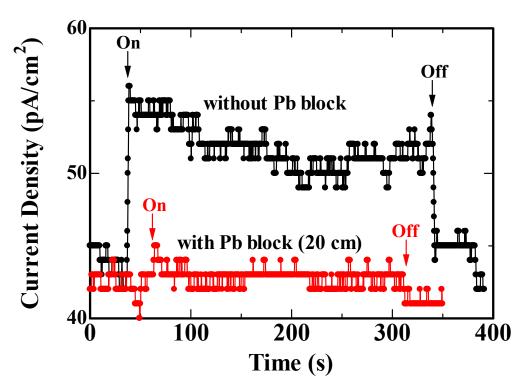


図 3.1.1-6 中性子線照射時の Pb ブロックありの場合、なしの場合の CdTe 太陽電池の誘起電流

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 3.1.1-7 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 3.1.1-8 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。

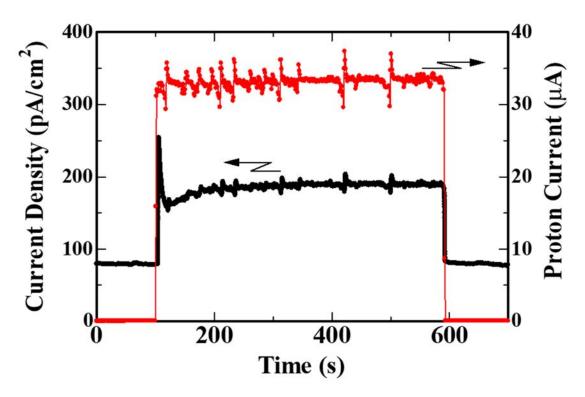


図 3.1.1-7 観測された CdTe 太陽電池の電流と陽子線電流

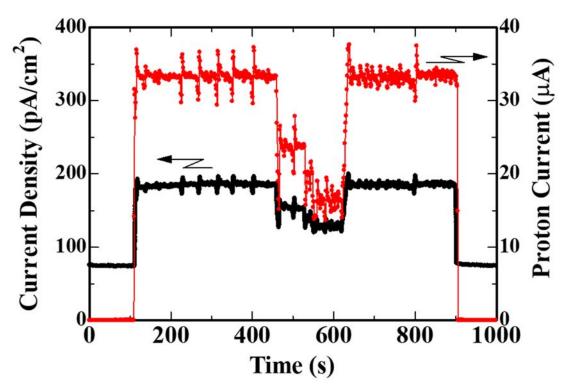


図 3.1.1-8 陽子線電流を変動させた場合の CdTe 太陽電池の誘起電流と陽子線電流

図 3.1.1-8 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 3.1.1-9 に示す。図 3.1.1-7 のオーバーシュートのように、陽子線を on した直後および off した直後は出力が不安定であるため、陽子線を on した直後(100  $s\sim120$  s)および off した直後(900  $s\sim910$  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 Be (p, n)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, y) 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/cm²程度である (3) 。また、3.3.2 項に示すように、陽子線電流が約 35  $\mu$ 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  $\mu$ A のときがしているとも、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。

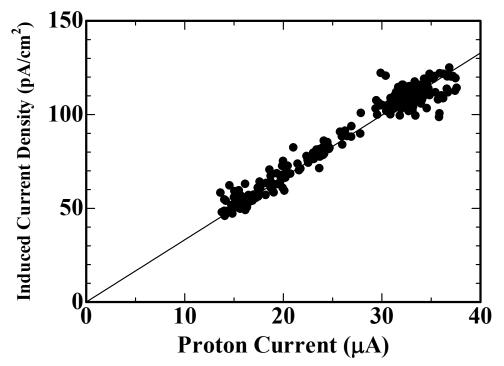


図 3.1.1-9 CdTe 太陽電池の誘起電流と陽子線電流の関係

なお、ベータ線照射試験の結果は、3.1.2節の p.3.1-13 に記載した。また、アルファ線照射試験の結果は、3.3.3 節の図 3.3.3-8 (p.3.3-24) に示した。

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  $^{\circ}$   $^$ 

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ヤが増加し、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 3.1.1-11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 層中のキャリヤ密度が増加して 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ヤ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 ℃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。

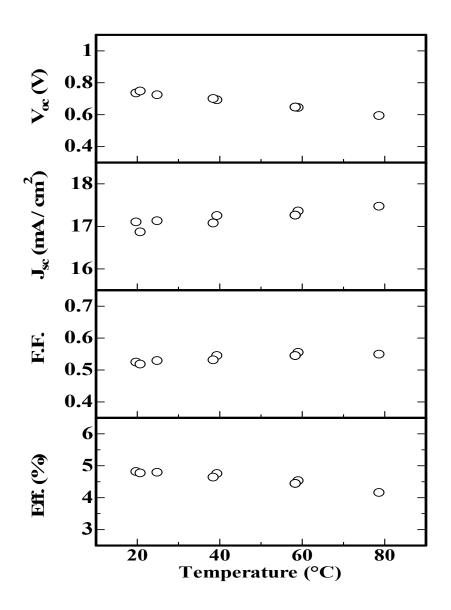


図 3.1.1-10 サブストレート型 CdTe 太陽電池の温度特性

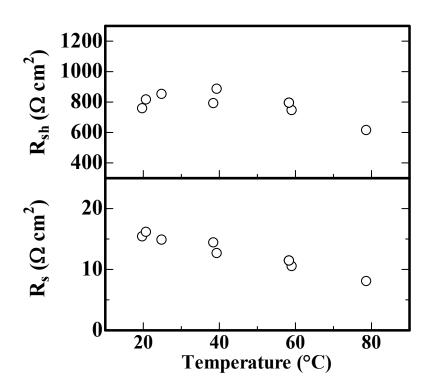


図 3.1.1-11 サブストレート型 CdTe 太陽電池の直列抵抗、並列抵抗の温度特性

#### 参考文献

- (1) T. Okamoto, Y. Shiina, and S. Okamoto, "Investigation of Cu-doping Effects in CdTe Solar Cells by Junction Photoluminescence with Various Excitation Wavelengths", Jpn. J. Appl. Phys. 56 08MC02 (2017).
- (2) T. Okamoto, R. Hayashi, S. Hara, and Y. Ogawa, "Cu Doping of CdTe Layers in Polycrystalline CdTe Thin-Film Solar Cells for Top Cells of Multijunction Solar Cells", Jpn. J. Appl. Phys. 52 [10], 102301 (2013).
- (3) T. Okamoto, A. Murata, Y. Hayashi, D. Watanabe, H. Araki, and H. Katagiri, "Effects of Cu Doping on CdTe Thin-Film Solar Cells in Substrate Configuration", Jpn. J. Appl. Phys. 58, SBBF08 (2019).
- (4) T. Okamoto, T. Igari, Y. Gotoh, N. Sato, M. Akiyoshi, and I. Takagi, "Gamma-Ray Tolerance of CdS/CdTe Photodiodes for Radiation Tolerant Compact Image Sensor with Field Emitter Array", physica status solidi (c) 13 [7-9], 635-638 (2016).
- (5) T. Okamoto, T. Igari, T. Fukui, Y. Gotoh, N. Sato, M. Akiyoshi, and I. Takagi, "Gamma-Ray Irradiation Effects of CdS/CdTe Photodiode for Radiation Tolerant FEA Image Sensor", 31st International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC2018), July 9-13, 2018, Kyoto, Japan, P1-56.

# 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) 検討対象の太陽電池

本研究における線量計デバイスの候補として、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検討対象素子として選定した。

- · InGaP 太陽電池
- ・CuInGaSe 太陽電池(以後、CIGS 太陽電池と略す)
- · CdTe 太陽電池

これらの太陽電池構造を有する素子に対し、アルファ線(He イオン)、ベータ線(電子) およびガンマ線(<sup>60</sup>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、太陽電池としての電気的出力特性すなわち光照射下電流ー電圧特性を測定・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。本節においては、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 太陽電池に関する結果は、3.3.3 節に記述する。大阪府立大学での400 kev 程度までの電子線照射及びガンマ

線照射の結果は、3.3.1節の図 3.3.1-20(p.3.3-11)及び図 3.3.1-2 に示した。

# (2) 放射線照射試験

InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池に対して He イオンないし電子線を照射し、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、宇宙用太陽電池においては陽子への耐性がよく議論される。そのため、本件等における参照データとして用いることを目的に、陽子線の照射も実施し、放射線劣化特性を比較・検討した。

He イオン照射試験は(国研)量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所(量研機構高崎研)の TIARA 照射施設にあるタンデム加速器およびその付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て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デバイスを置き、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き、照射量はフルエンス(単位面積当りの入射イオン数)にて  $3\times10^{10}\sim3\times10^{12}$  cm $^{-2}$  である。

電子線照射試験は同じく量研機構高崎研の1号加速器(コッククロフト・ウォルトン型) およびその付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  $3\times10^{14}\sim1\times10^{16}$  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付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き、照射量はフルエンスにて  $1\times10^{11}\sim3\times10^{12}$  cm<sup>-2</sup> 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、シミュレーション $^{(1)}$ にて確認している。

# (3) 太陽電池出力評価

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光照射下電流-電圧(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/cm²、光スペクトル:AMO(宇宙空間太陽光模擬)、試料温度:25 ℃である。取得したLIV データより短絡電流密度 Isc(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/cm²) および開放電圧 Voc(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、放射線照射前の値を 1 に規格化し、照射後の値を照射前の値に対する比を求めた。これは保存率(Remaining Factor)と呼ばれる。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 3.1.2-1 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 Isc について評価・解析を行った。加えて、Isc 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 Voc に対しても同様な評価・解析を行った。

Fluence (cm <sup>-2</sup> )		3.0E10	3.0E10	1.0E11	1.0E11	3.0E11	3.0E11	1.0E12	1.0E12	3.0E12	3.0E12
Isc (mA/cm²)	Initial	39.64	45.13	39.40	39.27	40.51	40.47	40.00	38.85	39.76	39.49
	Irradiated	39.36	39.29	38.77	38.60	38.97	38.94	37.14	36.03	35.28	35.02
	Remaining Factor	0.993	0.870	0.984	0.983	0.962	0.962	0.928	0.927	0.887	0.887
Voc (V) [Ref.]	Initial	0.708	0.685	0.707	0.701	0.706	0.701	0.710	0.706	0.707	0.709
	Irradiated	0.683	0.675	0.651	0.643	0.614	0.606	0.580	0.574	0.527	0.537
	Remaining Factor	0.965	0.985	0.921	0.917	0.870	0.864	0.817	0.812	0.745	0.758

表 3.1.2-1 CIGS 太陽電池の He イオン照射における Isc と Voc の保存率導出結果

### (4) 耐放射線性評価

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 3.1.2-1 および図 3.1.2-2 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。これが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=劣化していないことがわかる。

InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池における耐放射線性検討結果すなわち劣化特性を図 3.1.2-3~図 3.1.2-6 に示す。横軸はフルエンスで表した照射量、縦軸は Isc および Voc について初期値を 1 に規格化した保存率である。図 3.1.2-3 に示す 5MeV He 1 He 1

では、Isc の劣化は CIGS 太陽電池の方が InGaP 太陽電池よりも有意に小さい。一方、Voc おいて劣化は両者で同等である。図 3.1.2-4、図 3.1.2-5 に示す 1 および 2 MeV 電子線による劣化では、Isc、Voc ともに InGaP 太陽電池では保存率は高フルエンス領域においても十分大きく耐性は高いものの有意な劣化がみられるのに対し、CIGS 太陽電池では Isc、Voc 両者においてほとんど劣化がみられず、極めて高い耐性が示されている。図 3.1.2-6 に示したのは、参照データとしての 3 MeV 陽子線による劣化の比較である。但し、CIGS 太陽電池の図では横軸の値が 1 桁大きい。5 MeV He イオンによる劣化でみられたように、両太陽電池にて有意な劣化が確認されるが、同程度の劣化を与えるフルエンスには約 1 桁の差があり、耐性は CIGS 太陽電池の方が InGaP 太陽電池よりも高い。さらに、CIGS 太陽電池では Isc の劣化は Voc のそれより小さく、5 MeV He イオン照射の場合と同様な傾向が確認される。

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たが<sup>(2、3)</sup>、当時の CIGS 太陽電池の変換効率は AMO 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 AMO 光下で 20 %弱と高効率のもの<sup>(4)</sup>である。したがって、この結果は 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結果である。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<sup>(3)</sup>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<sup>(5)</sup>が起きると予測していた。しかし、結果的には劣化は陽子線と比較してそれほど大きくなく、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。特に 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<sup>(6)</sup>。

本試験の結論として、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する。

また、来年度の劣化特性解析に向け、He イオン(アルファ線)、電子(ベータ線)、および参照用として宇宙用太陽電池の放射線劣化特性解析で用いられる陽子の3種の放射粒子について、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ついて行った。この計算には SR-NIEL といわれる計算コードを用いた $^{(7)}$ 。図 3. 1. 2-7 ~ 図 3. 1. 2-9 に得られた NIEL 値を示す。

### (5) 来年度に向けて

今年度の検討では、耐放射線性に関する限り 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理解された。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、来年度は光(本研究においては放射線)吸収層の厚さを現状の  $1.0~\mu m$  を約 1/2 にした InGaP 太陽電池を試作し、その放射線起電流と耐放射線性を検討・評価する。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  $1~cm^2$  から  $4~cm^2$  程度に拡大させる計画である。

CdTe 太陽電池に関しては、高エネルギーベータ線照射試験を実施したが、素子形状が大きく、既存の冷却台に設置できず、照射中の温度が高温になり、デバイスが故障する不具合が観測された、そのため、来年度では、素子形状の小型化または、電子線照射速度および、冷却用治具の変更といった照射条件の変更により、温度上昇を抑制することで、CdTe 太陽電池の電子線劣化挙動を取得する。

また、NIEL 値を用いることで、太陽電池デバイスの放射線劣化を変位損傷線量 (Displacement Damage Dose: DDD) という放射線種、粒子エネルギー、被曝量 (フルエンス) などのパラメータに対して統一した指標値に換算することが可能である。そこで、これを用いてアルファ線 (He イオン) およびベータ線 (電子) による劣化特性を統合してひとつの関係式で表すことを目指す。これが成功すれば、その関係式を検量線として用いることにより、アルファ線とベータ線の複合被曝による出力劣化を補正することが可能となり、実利用に大きく近づくと期待される。

本研究では、CdTe 太陽電池と宇宙用太陽電池を用いた放射線検出器を検討しているが現時点では、次のようにすみ分けられると考えている。CdTe 太陽電池はガンマ線感度が高く、ガンマ線耐性も高いのでガンマ線検出器として有効であると考えている。InGaP 太陽電池はアルファ線、ベータ線の検出の他に中性子線検出器としても有望であると考えている。また、CIGS 太陽電池はガンマ線検出器、ベータ線検出器として有望であると考えている。

#### 参考文献

- (1) J.F. Ziegler, J. P. Biersack, "SRIM The Stopping and Range of Ions in Solids", http://www.srim.org/.
- (2) K.W. Weinert, A. Jasenek, U. Rau, "Consequence of 3MeV electron irradiation on the photovoltaic output parameters of Cu (In, Ga)Se<sub>2</sub> solar cells", Thin Solid Films, 431, 453-456 (2003), DOI: 10.1016/S0040-6090(03) 00181-0.
- (3) Y. Hirose, M. Warasawa, K. Takakura, S. Kimura, S.F. Chichibu, H. Ohyama, M. Sugiyama, "Optical and electrical properties of electron-irradiated Cu (In, Ga)Se<sub>2</sub> solar cells", Thin Solid Films, 519, 7321-7323 (2011), DOI: 10.1016/j.tsf.2010.12.132.
- (4) H. Sugimoto, T. Yagioka, M. Nagahashi, Y. Yasaki, Y. Kawaguchi, T. Morimoto, Y. Chiba, T. Aramoto, Y. Tanaka, H. Hakuma, S. Kuriyagawa, K. Kushiya, "Achievement of over 17% efficiency with 30×30cm²-sized Cu (InGa)(SeS)<sub>2</sub> submodules", Conf. Rec. 37th IEEE Photovol. Special. Conf., June 19-24, Seattle

- (2011), DOI: 10.1109/PVSC.2011.6186681.
- (5) S. Kawakita, M. Imaizumi, K. Kibe, T. Ohshima, H. Itoh, S. Yoda, O. Odawara, "Analysis of Anomalous Degradation of Cu (In, Ga)Se<sub>2</sub> Thin-Film Solar Cells Irradiated with Protons", Japanese J. Applied Physics, 49, 042302 (2010), DOI: 10.1143/JJAP.49.042302.
- (6) M. Sugiyama, T. Yasuniwa, H. Nakanishi, S.F. Chichibu, S. Kimura, "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", Japanese J. Applied Physics, 46, L670-L672 (2007).
- (7) M. J. Boschini, P. G. Rancoita and M. Tacconi (2014), "SR-NIEL Calculator: Screened Relativistic (SR) Treatment for Calculating the Displacement Damage and Nuclear Stopping Powers for Electrons, Protons, Light- and Heavy- Ions in Materials" (version 6.2.4); [Online] available at INFN sez. Milano-Bicocca, Italy [2020, March]: http://www.sr-niel.org/.

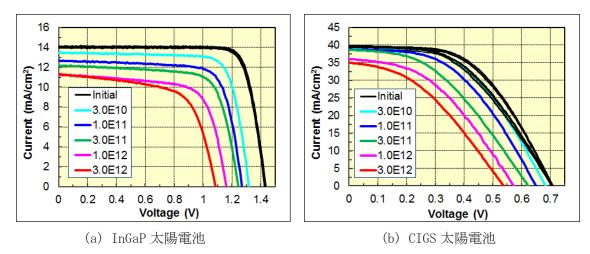


図 3.1.2-1 5 MeV He<sup>+</sup>照射による光電流-電圧特性の変化(凡例中の数値はフルエンス)

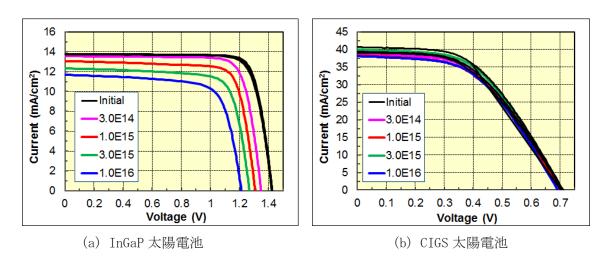


図 3.1.2-2 1 MeV 電子線照射による光電流-電圧特性の変化(凡例中の数値はフルエンス)

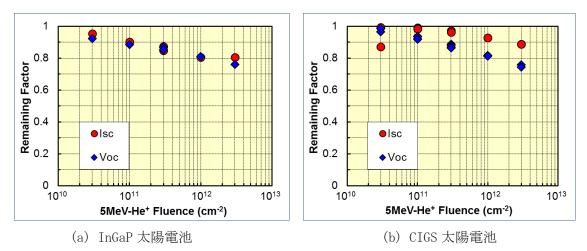


図 3.1.2-3 5 MeV He イオン照射による短絡電流 Isc および開放電圧 Voc の劣化特性

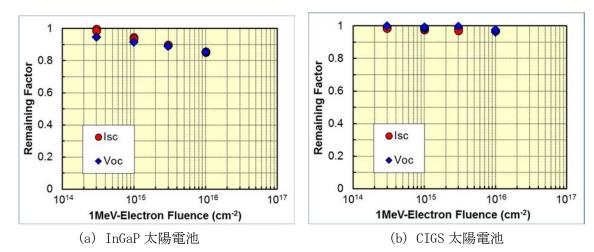


図 3.1.2-4 1 MeV 電子線照射による短絡電流 Isc および開放電圧 Voc の劣化特性

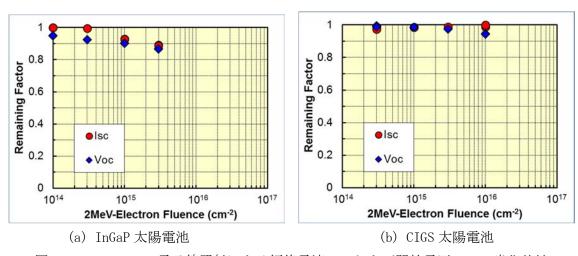


図 3.1.2-5 2 MeV 電子線照射による短絡電流 Isc および開放電圧 Voc の劣化特性

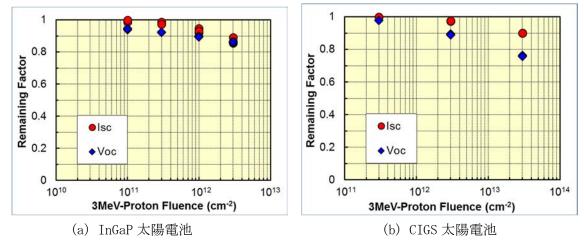


図 3.1.2-6 3 MeV 陽子線照射による短絡電流 Isc および開放電圧 Voc の劣化特性

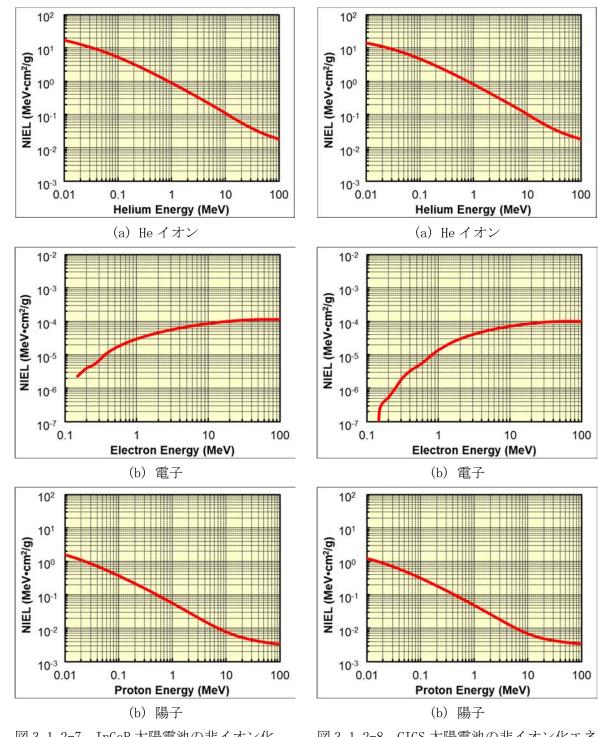
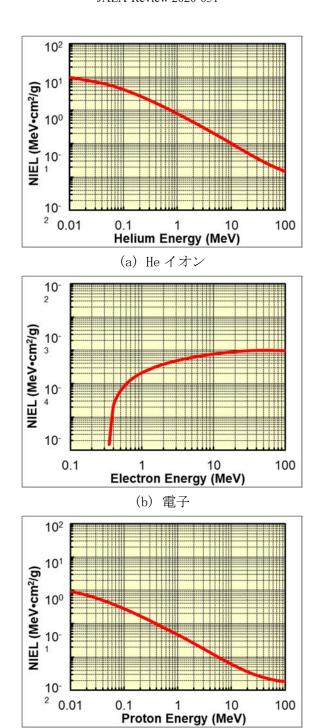


図 3.1.2-7 InGaP 太陽電池の非イオン化 エネルギー損失 (NIEL) 値

図 3.1.2-8 CIGS 太陽電池の非イオン化エネ ルギー損失 (NIEL) 値



(b) 陽子 図 3.1.2-9 CdTe 太陽電池の非イオン化エネルギー損失 (NIEL) 値

# 3.2 高耐放射線性微少電流計測システム開発(再委託先:京都大学)

# (1) 試験の目的と概要

1F の廃炉作業においては、線量率の測定を行う圧力容器から線量率の計測を行う作業者の場所まで 80 m から 100 m に及ぶ長い伝送線路が必要となる。伝送線路は放射線環境下に曝されるため、伝送線路内部で放射線励起により電荷が生成すると、電離損傷ノイズが発生する。放射線以外にも、電源から来る電磁ノイズなどもあり、これらのノイズが放射線検出器の出力強度よりも大きいと、線量率の計測を行うことができなくなってしまう。このため、放射線を検出するセンサーの出力電流の大きさと伝送線路に生じる電離損傷ノイズ、電磁ノイズの大きさなどを予め把握するとともに、その知見からこれらのノイズを低減する手法を検討することで、電流計測の精度を確保することが本試験の目的である。

本研究においては放射線検出器の候補となっている太陽電池について、平成 30 年度に選定した伝送線路と増幅器を用いて通常環境および放射線環境下における出力電流の計測を行い、その特性を把握した。また上記の伝送線路と増幅器を用いて実際の計測を行うシステム構成における検出器出力計測の課題を抽出するとともに、電離損傷ノイズ低減のための配線等の接続方法等を検討した。それらの知見をもとに、検出器、伝送線路、増幅器の総合的な遮蔽構造を検討した。

# (2) 平成30年度に選定した機器による太陽電池の放射線検出特性の評価

#### ① 試験に用いた太陽電池

本試験では、放射線検出器として候補に挙がっている太陽電池、すなわちテルル化カドミウム (CdTe) およびインジウムガリウムリン (InGaP)、銅インジウムガリウムセレン化物 (CIGS) の特性を評価した。CdTe 太陽電池は木更津高専より提供を受け、InGaP 太陽電池、CIGS 太陽電池については宇宙航空研究開発機構より提供を受けた。各太陽電池における電極の取り方は以下のとおりである。CdTe 太陽電池については、ばね式のプローブを有する専用の治具を用いて行った。この治具を用いた場合には、太陽電池部分を金属容器で遮蔽していないため、電気的なノイズの影響が考えられる。このため、測定系をアルミフォイルで遮蔽することで、外部からの電磁ノイズを遮蔽することを試みた。ただし、測定系の端子部分はターミナル端子であるので、伝送線路(同軸ケーブル)との接続をミノムシクリップ-BNC端子を持つ同軸ケーブルを用いて接続した。InGaP 太陽電池、CIGS 太陽電池については、太陽電池に電気的接触を取る部分をアルミ製の容器の中に格納し、接続は同軸のレセプタクルを利用したため、電磁ノイズの影響は小さいものと考えられる。いずれもアノードを同軸ケーブルの芯線に、カソードを同軸ケーブルの被覆に接続した。

# ② 測定方法

実際に放射線環境下における太陽電池出力を評価するのに先立ち、使用した測定治具における太陽電池への電気的接続の良否を確認した。太陽電池評価用の光源を利用することができなかったので、室内の蛍光灯照明下で評価を行い、光の量は市販の照度計を用いて評価した。一定の光量の元、出力電圧をディジタルテスタ(三和電気計器、CD800a)で測定した。電気的接触の確認後、CdTe 太陽電池は測定治具をアルミフォイルで、InGaP 太陽電池および

CIGS 太陽電池はアルミ容器の蓋をして光を遮り、無出力状態を実現できるか試みた。放射線環境下における測定に用いた機材は、平成30年度に選定した同軸ケーブル(1.5D-QEV)および微少電流計(泰榮エンジニアリングiDC12)である。放射線検出特性の評価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て行った。測定は、照射室内に太陽電池を設置し、15mの同軸ケーブル(1.5D-QEV)を介して、敷設してある同軸ケーブル(RG58A/U)に接続した。1.5D-QEV ケーブルは、平成30年度同様、直径20cm程度にまとめて、太陽電池の5cmから10cm程度後ろに配置した。RG58A/Uケーブルにより信号を照射室外に取り出したうえで、微少電流計を接続して行った。測定の概念図を図3.2.2-1に示す。図3.2.2-1(a)はInGaP太陽電池およびCIGS太陽電池を測定した場合、図3.2.2-1(b)はCdTe太陽電池を測定した場合である。この測定では、同軸ケーブルの被覆線を実験室配電盤のアースに接続して接地した。この接地の効果については次節で詳述する。測定時に、特定の条件下で同軸ケーブルを取り除いた状態での測定も行い、同軸ケーブルを接続することが結果に与える影響を評価した。

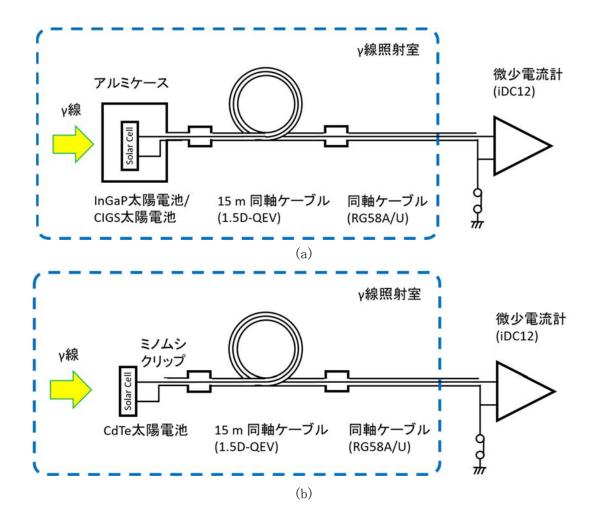


図 3.2.2-1 太陽電池へのガンマ線照射実験の概念図
(a) InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池、(b) CdTe 太陽電池

太陽電池を線源から異なる距離に配置することで、40 Gy/h から850 Gy/h 程度の間の線量率(水に対する吸収線量)における特性を評価した。線量率の評価は、過去に行われた線量率の実測結果に半減期を考慮した減衰係数を乗ずることで行った。今回の実験では、太陽電池を格納する容器ないしは測定治具を、位置の定めやすいところに置いたため、線源と太陽電池の間の距離は、線量率の実測値のない場所になる。このため、線源と太陽電池の位置を容器ないしは治具の構造を加味して算出し、得られた位置における線量率は上記の実測値をべき関数近似して求めた。

ガンマ線照射下における電流の測定は、ガンマ線源が格納場所から照射室内に移動してから2分程度経過するのを待って行った。iDC12の低速モード(サンプリングタイム 200 ms)および高速モード(10 ms)を利用して 500 点取得した。本節では主に低速モードの測定結果を述べる。

# ③ 測定結果

各太陽電池の出力電圧は、室内の照明下(560 lux 程度)において、CdTe で 0.6 V、InGaP で 1.0 V、CIGS で 0.1~0.2 V であった。小型のスタンド(蛍光灯)を用いて照度を 4.8 klux 程度とすると、CIGS 太陽電池でも 0.4~0.5 V 程度の出力電圧が得られた。これらの値は、太陽電池のいわゆる「開放電圧」と比較するとやや低い。この理由は、今回の評価環境では、通常太陽電池を評価する環境と比較して光の量が少ないことに起因する。しかしながら、電極への接触は取れているものと考えた。

次に、光を遮断した状態で上記太陽電池の出力電流を評価した。InGaP 太陽電池は、測定治具の蓋を閉め、室内の照明を消灯することで、ほぼ出力電流は 0 となった(検出限界は 1 pA)。CdTe 太陽電池は、測定治具に取り付けた後、アルミフォイルで試料面を覆うなどの結果、5 pA 程度まで電流を低減することができた。CIGS 太陽電池については、InGaP と同じ条件でも 70 nA 程度の電流が観測された。

図 3.2.2-2 にガンマ線照射下で生じる太陽電池の電流密度の線量率依存性を示す。図 3.2.2-2(a)は InGaP 太陽電池、図 3.2.2-2(b)は CIGS 太陽電池、図 3.2.2-2(c)は CdTe 太陽電池、の結果である。なお、InGaP 太陽電池では、非照射環境において電流出力は見られなかったが、CdTe 太陽電池では 5 pA 程度、CIGS 太陽電池では、100 nA 程度の出力電流が検出された。CdTe および InGaP 太陽電池では、出力電流密度が線量率の増加に対してほぼ直線的に増加しており、検出器としてよい特性を示している。接続している同軸ケーブルにおいて発生しているであろう電離損傷ノイズを評価するために、一部の実験条件の下で、15 mの同軸ケーブルのある場合、ない場合で検出電流の違いを調べたところ CdTe 太陽電池の場合、線量率約 200 Gy/h の照射位置 40 cm で 0.1 nA、InGaP 太陽電池の場合、線量率約 300 Gy/h の照射位置 30 cm で 0.2 nA であり、それぞれの検出器出力 21 nA、9 nA と比較して十分小さかった。

感度は、CdTe 太陽電池で 100 (pA/cm²)/(Gy/h)、InGaP 太陽電池で 30 (pA/cm²)/(Gy/h) 程度であり、平成 30 年度のソースメータを用いた測定結果 $^{(1)}$ とほぼ同様の値である。CIGS 太陽電池は、やや上に凸の曲線となっており、感度の計算は難しいが、InGaP 太陽電池よりも若干大きい。図には示していないが、CdTe 太陽電池および InGaP 太陽電池の特性をべき関数で近似したところ、いずれも線量率の 0.95 乗程度に比例することが示され、よい線形性

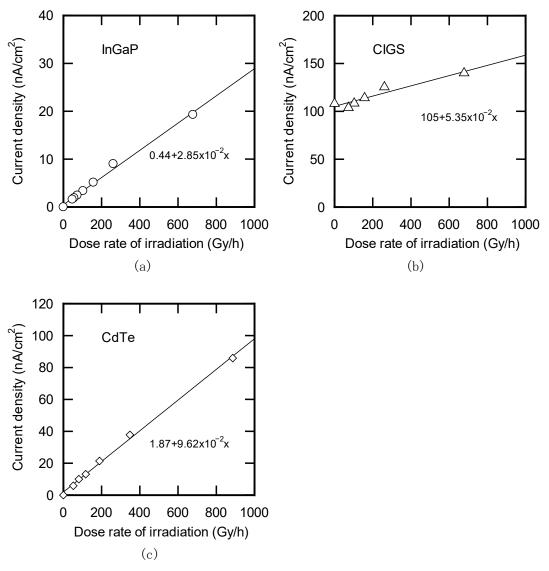


図 3.2.2-2 太陽電池のガンマ線照射に伴う電流密度の線量率依存性 (a) InGaP 太陽電池、(b) CIGS 太陽電池、(c) CdTe 太陽電池

が得られた。CdTe 太陽電池および InGaP 太陽電池については平成 30 年度と同様の結果を得た。iDC12 を用いてガンマ線検出信号を取り出すことができたと考えられる。

### 4) 考察

CdTe 太陽電池において、非照射時において数 pA の電流が観測された。この理由は現時点では明らかではない。しかしながら、太陽電池特性測定に使用する測定治具をガンマ線の照射室に設置し、消灯した状態でも 10 nA 程度の電流が観測され、アルミフォイルで遮蔽を治具の片面に施して 100 pA 程度、両面に施して数 pA となったことから、主に電磁ノイズを拾っている可能性がある。この点については、今後詳しく検討する。

一方、CIGS 太陽電池においては、非照射時消灯した状態でも数十 nA の電流を観測した。 同じ測定系で InGaP 太陽電池においては、電流値が 0 であったことを考えると、外部からの 電磁ノイズとは考えにくい。この点についても今後検討する予定である。

# (3) 伝送線路の放射線環境下における電離損傷ノイズ評価

# ① 評価する伝送線路の形態

平成 30 年度の測定では、純粋に伝送線路に生じる電離損傷ノイズを評価するという観点から、同軸ケーブルを、ガンマ線照射環境下を通す形で設置した。今年度は、実際に太陽電池を検出器として計測を行う状況を模擬しつつ、ガンマ線が伝送線路に与える影響を検討した。すなわち、同軸ケーブルの端部がガンマ線環境下にあるような状況で、どのような電磁ノイズ、電離損傷ノイズが観測されるかを評価した。

### ② 測定方法

測定に用いた同軸ケーブルと微少電流計は3.2.2と同様である。ガンマ線の照射は3.2.2 同様、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。測定系の構成を図3.2.3-1に示す。同軸ケーブルは、昨年同様直径20cm程度にまとめた。太陽電池を接続した状態では、同軸ケーブルにおいて生成する電離損傷ノイズのみを評価することは難しい。同軸ケーブル末端にはステンレス缶にBNCコネクタを取り付けた模擬検出器を取り付けた。模擬検出器には以下に示すように異なるインピーダンス2を持つ素子を接続して計測を行った。

- (a)  $Z = \infty$  (開放)、同軸ケーブル外側被覆は接地せず。
- (b) Z として小信号整流用シリコン(Si)ダイオード(以下、Si ダイオード)を接続、同軸ケーブル外側被覆は接地せず。
- (c) 同軸ケーブルの外側被覆を接地

ここで (b) において Si ダイオードを利用しているのは、太陽電池と比較して、光起電力出力が小さいという理由による。ここで用いた Si ダイオードは 1S1588 である。室内の蛍光灯により 30 pA 程度の光電流を生じるが、図 3.2.3-1 に示したステンレス缶に収納すると、電流は 0 となる。 (2) 節同様、同軸ケーブルをガンマ線源から異なる距離に置くこ

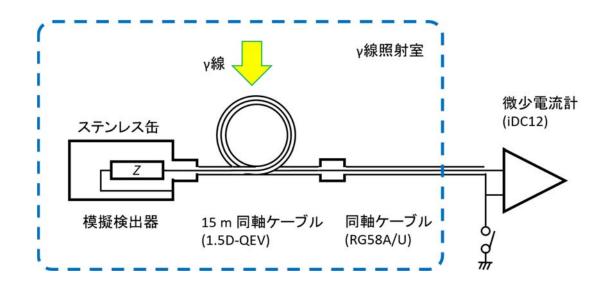


図3.2.3-1 ケーブルにおいて生じる電離損傷ノイズ計測方法

とで異なる線量率において生成する電離損傷ノイズを計測した。3.2.2 とは異なり、ここで は模擬検出器は単に同軸ケーブルの末端処理のためにあるので、模擬検出器にはガンマ線は あまり入射していない。電流値の取得は3.2.2と同様、ガンマ線照射開始から2分程度経過 したのちに低速モードおよび高速モードを利用して行った。1.5D-QEV ケーブルは線源から見 ると比較的広い断面積を有しているので、正確な線量率を求めるのは簡単ではない。今回は ケーブルの中心の位置における線量率を基準とした。

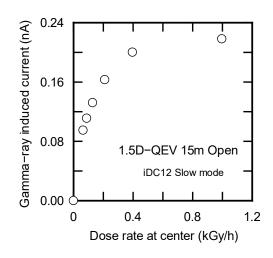
### ③ 測定結果

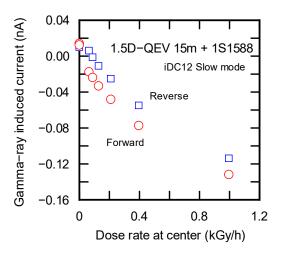
# 1) Z = ∞ (開放) の場合、被覆線非接地

図 3.2.3-2 に同軸ケーブルの測定器側を開放した場合に観測される電離損傷ノイズの線量 率依存性を示す。この場合、電離損傷ノイズは被覆線から芯線側に流れていることがわかる。 電離損傷ノイズは、中心における線量率が高くなるに従い、低い線量率の領域では急激に増 加しているが、線量率が高くなるとともに飽和する傾向がみられた。この測定は異なる日に 3 回実施したが、2 回は正極性の電流が観測されたものの、電流値に若干違いがみられたほ か、1回は、負極性の電流が観測された。

### 2) ZをSiダイオードとした場合、被覆線非接地

図 3.2.3-3 にケーブル端を Si ダイオードで終端した場合の結果を示す。赤丸は Si ダイオ ードを太陽電池使用時と同様にアノードを同軸ケーブルの芯線に接続した場合、青四角は逆 接続とした場合である。Si ダイオードを接続した場合には、接続の向きに関わらず、負極性 の電流が流れた。ただし、非放射線環境ではどちらも正極性の電流を観測した。





ルに誘起する電離損傷ノイズの線量率依 存性の例

図 3. 2. 3-2  $Z = \infty$  の場合に同軸ケーブ 図 3. 2. 3-3 Zを Si ダイオードとした場合 に同軸ケーブルに誘起する電離損傷ノイズ の線量率依存性

平成 30 年度の実験結果で観測された電離損傷ノイズの経時変化を確認するために以下の実験を行った。Si ダイオードを接続した状態で、ガンマ線源が格納容器から照射室に現れるとき、また逆に照射室から格納容器に入る時の電流を計測した。図 3.2.3-4 に結果を示す。図 3.2.3-4(a)はガンマ線源が現れるとき、図 3.2.3-4(b)は線源が格納されるときの 200 秒 (3分20秒)の間の時間変化である。ガンマ線源が現れるときにはいったん正極性の電流が流れた後、急激に負極性の電流へと変化する。ガンマ線源が照射室に移動してしまうと、負極性の電流は徐々に小さくなる。ガンマ線源が格納容器に入るときには、電流は減少して極性が正極性に変わり、格納後はその正極性の電流が徐々に低下した。

### 3) 外側被覆を接地した場合

1)および2)では、被覆線を接地していなかった。ここでは被覆線を接地した結果について述べる。まず、コバルト 60 ガンマ線照射装置における測定系において、ガンマ線照射しない状態での電流波形を観測した。結果を図 3.2.3-5 に示す。同軸ケーブル端は開放し

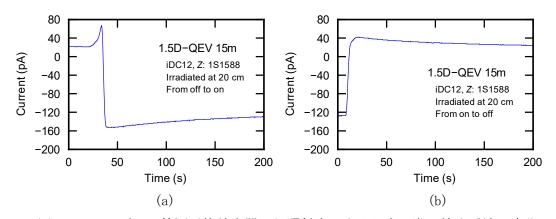


図 3.2.3-4 ガンマ線源が格納容器から照射室に出入りする際の検出電流の変化 (a) 格納容器から照射室に現れるとき、(b) 照射室から格納容器に入るとき

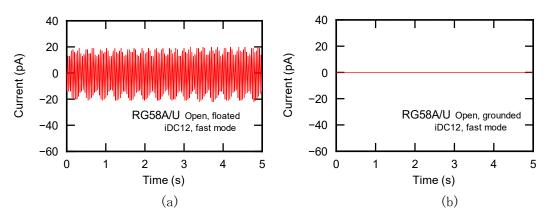


図 3.2.3-5 同軸ケーブルの被覆線の接地・非接地による検出電流の違い (高速モード) (a) 非接地の場合、(b) 接地の場合

ており、図 3.2.3–5(a) は非接地の場合、図 3.2.3–5(b) は接地した場合の高速モードにおける電流波形である。低速モードでは、被覆線を接地しなくても安定した値を表示していたが、高速モードでは、図に見られるように商用周波の影響とみられる信号を含んでいた。被覆線の接地をすることで安定に測定ができることが明らかとなった。また、これだけではなく、接地の効果は電離損傷ノイズの経時変化の低減にも効果があることが明らかとなった。図 3.2.3–6 に被覆線を接地した場合にガンマ線源が格納容器に出入りする際の電流の変化を示す。図 3.2.3–6(a) は線源が現れるとき、図 3.2.3–6(b) は線源か格納されるときの 200 秒(3 分 20 秒)の間の時間変化である。図 3.2.3–4 と比較すると明らかであるが、電流の変化はガンマ線源の移動の時間に限られており、その後の変化もわずかであった。これらの原因については後述する考察の項で詳しく述べる。

図 3.2.3-7 に被覆線を接地した際の同軸ケーブルに見られた電離損傷ノイズの測定結果を示す。赤丸がケーブル端開放としたとき、青三角が Si ダイオードを接続したとき、マゼンタ色のひし形は Si ダイオードのカソードを回路から切り離したときの結果である。

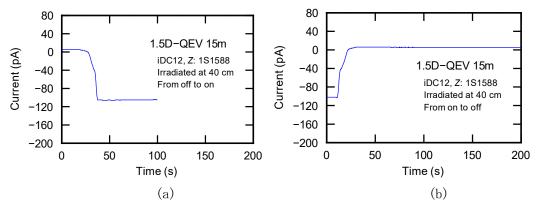


図 3.2.3-6 被覆線を接地した場合にガンマ線源が格納容器に出入りする際の検出電流の変化 (a) 格納容器から照射室に現れるとき、(b) 照射室から格納容器に入るとき

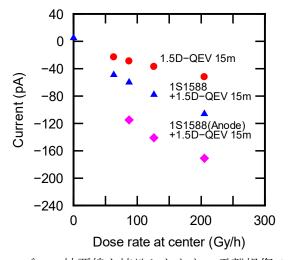


図 3.2.3-7 同軸ケーブルの被覆線を接地したときの電離損傷ノイズの線量率依存性

いずれも負極性の電流を観測している。図 3.2.3-2、図 3.2.3-3 と比較すると、測定したときの線量率が低いことに留意するべきであるが、開放の場合、200 Gy/h のところでは、非接地のとき +160 pA、接地して -50 pAであった。Si ダイオードを接続すると、非接地のとき -50 pA程度、接地のとき -100 pA程度であった。接地により、開放、ダイオード接続いずれの場合も得られる電流は負側にシフトすることが明らかとなった。興味深いのは、Si ダイオードのアノードのみ接続したときに絶対値の大きな負極性の電流が観測されることである。いずれにしても、観測された電流は巻いた同軸ケーブル中心における線量率に対して直線的ではなく、下に凸の曲線となっている。これは、線量率が高くなるにつれて、すなわち同軸ケーブルとガンマ線源との距離が近づくにつれて、中心における線量率と実際にケーブルに入射する線量率の差が大きくなることに起因していると考えられる。

# 4) 考察

まず、同軸ケーブルの被覆線の接地の電磁ノイズに対する効果について考える。今回の測定で使用した微少電流計は電源系から接地されていないことから電位的には浮いている。このため、被覆線があっても、それ自身が電源の信号を拾ってしまう。接地をすることで被覆線の電位が固定され、安定して計測を行うことができるものと考えられる。

次に、ガンマ線照射下において、同軸ケーブル内で生じる現象を考える。概念図を図 3.2.3-8 に示した。同軸ケーブルがガンマ線に曝されると、芯線、絶縁体、被覆線のそれぞれの内部でガンマ線による電子の励起が生じる。この時励起された電子のエネルギーが十分高いと、芯線、絶縁体、被覆線のそれぞれから光電子放出される。これをそれぞれ  $I_{pel}$ 、 $I_{pe2}$ 、 $I_{pe3}$  とする。回路的には被覆線、芯線については外部から強制電流が流れるのと同等となる。絶縁体では、光電子放出電流  $I_{pe2}$  に対応する電流が外部から流れることになるが、これは状況に応じて芯線または被覆線に流れるものと考えられる。ケーブル外に放出されうる

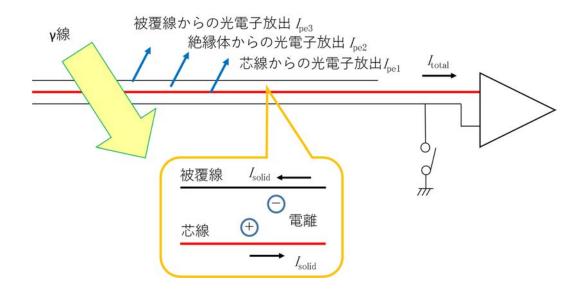


図3.2.3-8 ガンマ線照射下において同軸ケーブル内で生じている現象の概念図

だけのエネルギーを持たない低エネルギーの励起電子も生じる。このような電子も、状況により芯線、被覆線のいずれかに向かって流れるものと考えられる。この電流を  $I_{\rm solid}$  とする。ここまでは同軸ケーブルを接地する、しないに関わらず同様である。また、同軸ケーブル端部に接続する Z によらず同様である。

まず、 $Z=\infty$  の場合を考える。同軸ケーブルは接地されていないと、全体が正に帯電することになる。この電荷が空気中を含む周囲からの電荷補償で緩和されなくてはならない。このために長い緩和時間を要すると考えられる。被覆線を接地すると、被覆線の帯電は接地端子から供給される電荷で短時間に補償される。このため安定した計測が可能となるものと考えられる。芯線の光電子電流  $I_{\rm pel}$  は微少電流計に流れることができる。ただし、観測された電流は被覆線を接地した場合は負極性であった。光電子電流  $I_{\rm pel}$  のみであれば正極性となるはずである。芯線に流れる電流は、 $I_{\rm pel}$  のみではなく、絶縁体の電離に伴う電流  $I_{\rm solid}$  など、他の要因に基づく電流も含んでいることを示唆している。

次に Si ダイオードを接続した場合を考える。芯線をアノード側に接続した場合、カソード側に接続した場合のいずれも、ガンマ線照射に伴い負極性の電流が流れた。またその電流量は  $Z=\infty$  の場合と比較して大きな値(絶対値)であった。このことは  $Z=\infty$  のときよりも微少電流計に多量の電子が流入していることを示している。Si ダイオードの両端の電圧は立ち上がり電圧以下であると考えられ、順方向、逆方向ともわずかではあるが電流が流れると考えられる。接続方向による若干の違いは、順方向と逆方向でわずかに抵抗が異なることに関係していると考えられる。Si ダイオードのアノードのみ接続した際に大きな電流が観測される原因については明らかではない。

このほか、検出器を収納しているステンレス缶からの光電子放出が考えられる。この場合、 芯線側の光電子電流  $I_{pel}$  と被覆線側の光電子電流  $I_{pel}$  は異なると考えられ、これらも結果に 影響を与えている可能性もある。

同軸ケーブル開放時の電離損傷ノイズは、中心における線量率が 200 Gy/h 程度のとき、-50 pA 程度であった。つまり、同軸ケーブル 1 m、線量率 1 Gy/h 当たり、-16 fA となる。 3.2.2 節の結果から、CdTe 太陽電池の場合で検出器の感度は 1 Gy/h 当たり 100 pA 程度である。同軸ケーブルの長さが 100 m と仮定すると、同軸ケーブルにおいて生成する電離損傷ノイズは -1.6 pA と見積もられる。しかしながら、上に示した図においては、線量率は巻いた同軸ケーブルの中心の値であった。実際の同軸ケーブルにおける線量率はさらに低い値であると考えられる。より精度の高い計測には、同軸ケーブルの電離損傷ノイズの低減が求められる。

#### ⑤ まとめ

同軸ケーブル 1.5D-QEV にガンマ線照射を行った際に観測される電流を計測し、ガンマ線 照射下で 1.5D-QEV ケーブルに生じる諸現象を推測した。被覆線を接地することで、電磁ノイズ、電離放射線ノイズとも低減できることが明らかとなった。検出器と比較して電離損傷 ノイズは小さいものと考えられるが、正確な評価を行うためには、今後、同軸ケーブルへのガンマ線照射時における線量率をより詳細に評価する必要がある。

# (4) 微少電流計測システムの遮蔽構造の設計と試作

### ① 遮蔽構造の設計

以上の測定結果をもとに、微少電流計測システムの総合的遮蔽構造の設計と試作を行った。 伝送線路として同軸ケーブルを選定したが、ここでは新たにトライアキシャルケーブル(以 下、三重同軸ケーブル)と呼ばれる二重に遮蔽された同軸ケーブルを用いることを考えた。 通常、三重同軸ケーブルは、信号の往来する芯線と被覆(外側被覆)線の内側にもう一重遮 蔽となる被覆(内側被覆)を設けるものである。主に微少電流の計測の際、ケーブルの漏れ 電流の影響を抑える目的で用いられる。今回検討している微少電流計測システムでは、芯線 と被覆線の間にはほとんど電位差が生じない。このため、電流が微少であっても、三重同軸 ケーブルを使用する必要はない。ここでは、三重同軸ケーブルの内側被覆を芯線と外側被覆 の間に流れる電離損傷ノイズを遮断する目的で使用することを考えた。図 3.2.4-1 に設計し た遮蔽構造の概念図を示す。線が多いため色分けしている。赤は三重同軸ケーブルの芯線、 緑は内側被覆線、黒は外側被覆線である。通常は、太陽電池出力を赤と緑に接続し、黒を全 体の遮蔽として設置する配線となる。ここでは上述のように、太陽電池の出力は赤と黒に接 続し、緑の内側被覆を用いて赤と黒の間に流れる電離損傷ノイズを遮断する。内側被覆線は、 接地しなければ浮遊電位となり、芯線、外側被覆線からの荷電粒子の流れを阻止することが できると考えられる。あるいは接地することでアースに逃がすことができる。このほか、任 意の電圧を与えることもできる。

太陽電池を格納する遮蔽体は、可視光等が入ることを防ぐために、真空部品のシールを行うメタルガスケットを用いて封止することが望ましい。この場合、遮蔽体内部を不活性気体で置換することも可能となる。

# ② 遮蔽構造の試作

市販されている三重同軸ケーブルと同軸ケーブルの変換コネクタは、大部分、外側被覆と 内側被覆を接続するものか、絶縁するもののいずれかである。市場調査の結果、海外メーカ が内部被覆を浮遊電位とするコネクタを販売していることが明らかとなったが、

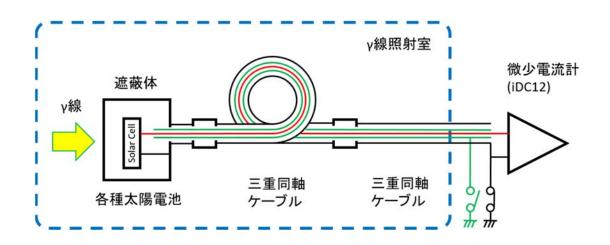


図 3.2.4-1 設計した微少電流計測システムの総合遮蔽構造

このコネクタも、内側被覆に積極的に電位を与えることのできる構造にはなっていない。内側被覆線を電位的に浮かせることで電離損傷ノイズを低減できるかどうかは、内側被覆線を電位的に浮かせる、あるいは固定の電位を与える場合に、電離損傷ノイズがどのように計測されるかを実際に測定して検証する必要がある。このような実験が可能となるように、三重同軸ケーブルを通常の同軸ケーブルに分配する変換器を作製した。図 3. 2. 4-2 に概念図を示す。図 3. 2. 4-2 (a) は市販の三重同軸ケーブル・同軸ケーブル変換コネクタを用いて三重同軸ケーブルと同軸ケーブルを接続する場合、図 3. 2. 4-2 (b) は三重同軸ケーブルを図 3. 2. 4-1 の設計通りに運用するための接続方法である。

### ③ 遮蔽構造の性能評価

試作した微少電流計測システムを用いて、どのような条件で最も電離損傷ノイズが少なくなるかを検討した。いずれもケーブル端は開放とした。まず、図 3.2.4-2(a)で示した、

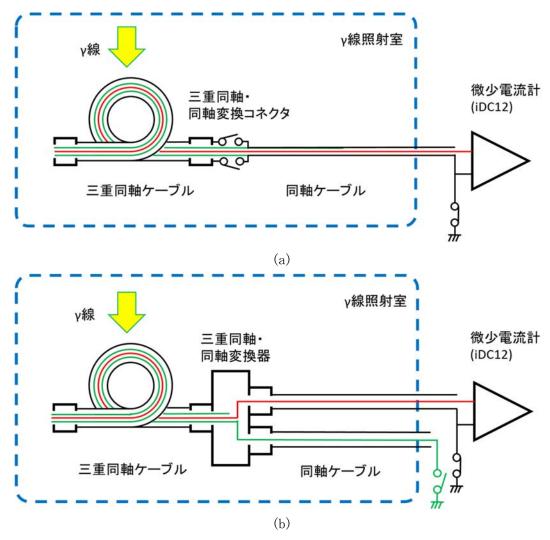


図 3.2.4-2 遮蔽構造の性能を検証するための実験回路

- (a) 三重同軸ケーブルと同軸ケーブルを市販の変換コネクタで接続する場合
- (b) 三重同軸ケーブルの内側被覆線を電離損傷ノイズ抑制のために使う場合

三重同軸ケーブルと同軸ケーブルを通常の方法で接続する場合について、三重同軸ケーブルの外側被覆線と同軸ケーブルの被覆線を接続する場合、しない場合で電離損傷ノイズがどのように異なるかを調べた。結果を図 3.2.4-3 に示す。●が非接続で同軸の被覆線を接地したとき、●が接続で、同軸の被覆線を接地したとき、●が接続で、同軸の被覆線を接地したときの結果を示す。いずれも大きな違いは見られなかったが、非接続で同軸の被覆線を接地しなかったときは線量率の低いところで電離損傷ノイズが少なくなった。しかしながら、概ね、いずれも電離損傷ノイズの値はほぼ同じで、200 Gy/h のところで -40 pA 程度となった。

次に、三重同軸ケーブルの内側被覆を別の同軸ケーブルの芯線として取り出し、内側被覆に電位を与えられる構造とした場合の結果について述べる。図 3.2.4-4 に結果を示す。図 3.2.4-4(a)は、三重同軸ケーブルの芯線で信号伝送し、内側被覆に電位を与えない場合、接地した場合の電離損傷ノイズの線量率依存性を示している。この場合観測されたのは負極性の電流で、線量率に対してほぼ直線的に増えている。内側被覆を接地した場合は -25 pA、接地しなかった場合は -20 pA 程度の値であった。図 3.2.4-4(b)は、三重同軸ケーブルの内側被覆線で信号伝送し、芯線に電位を与えない場合、接地した場合の電離損傷ノイズの線量率依存性を示している。この場合も観測されたのは正極性の電流で、接地の有無、線量率にかかわらず +400 pA 程度の電流が得られた。

### 4) 考察

三重同軸ケーブルにおいて、芯線と外側被覆線を用いて電流計測を行い、電離損傷ノイズを約半分程度に低減できた。絶縁体を流れる励起電流を内側被覆線で阻止できたと考えることができる。また、内側被覆で電流を計測して大きな電流が流れたことは、内側被覆における励起電子が多い、または芯線と外側被覆からの電流の流入が原因と考えられる。

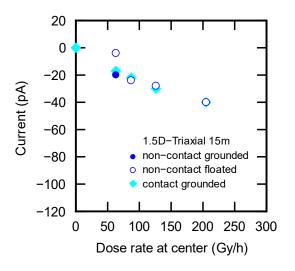


図3.2.4-3 三重同軸・同軸ケーブル変換コネクタを用いた場合に 三重同軸ケーブルで観測される電離損傷ノイズ

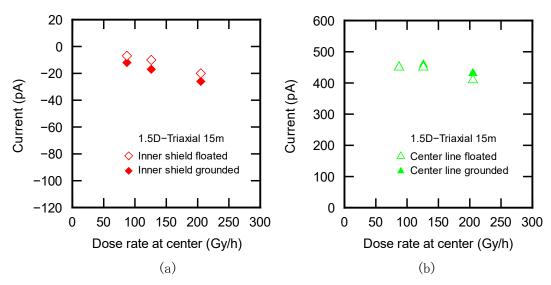


図 3.2.4-4 三重同軸ケーブルの内側被覆を遮蔽に用いる構造において観測される電離 損傷ノイズ (a) 芯線で信号伝送した場合、(b) 内側被覆線で信号伝送した場合

### ⑤ まとめ

三重同軸・同軸ケーブルを通常の同軸ケーブルとのコネクタを用いて接続した場合には、中心における線量率 200 Gy/h において、-40 pA 程度の値を観測した。1.5D-QEV を用いた場合は -50 pA であったことから、三重同軸ケーブルを使用することで電離損傷ノイズを若干低減できることが明らかとなった。また被覆線の接続を変更し、内側被覆線をフロートとすることで、-20 pA 程度まで低減できることが明らかとなった。

#### (5) まとめと今後の課題

平成 30 年度に構築した微少電流計測システムを用いて、放射線検出器として候補となっている太陽電池のガンマ線照射下および非照射下の出力を測定した。太陽電池の背後に 15 mの同軸ケーブルを接地した状態で、得られた電流出力は、太陽電池の出力とほぼ同じであることが明らかとなった。また、伝送線路がガンマ線照射によって受ける電離損傷ノイズについても評価した。その結果、同軸ケーブルにおける電離損傷ノイズは検出器出力と比較して小さいものと判断できた。

しかしながら、実際の廃炉作業においては、同軸ケーブルの長さは 100 m 近くになると考えられ、このような長さにおいても、増幅器側における接地の効果や内側被覆線の遮蔽効果があるかどうかについては検討する必要がある。

### 参考文献

(1) 日本原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター、木更津工業高等専門学校、「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) - 平成 30 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 -」、JAEA-Review 2019-033 57P.

# 3.3 放射線照射実験

# 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)

コバルト 60 照射施設により、大線量率(最大 30 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。

コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器 (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。損傷評価については JAXA 側が行った。

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。この照射容器を利用して来年度に大線量率での照射時起電力測定を行う。

また、第3照射室を利用した1 Gy/h 以下の低線量率での測定においては起電力が小さくノイズの除去が困難であったため、今年度の京都大学の成果を反映して、来年度に低線量率での照射時起電力測定を行う。

コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器で用いられているセレン整流器の予期せぬトラブルのため、起電力測定を行ったエネルギーは 60-400 keV までと、計画に対して不十分な結果となったが、500 keV での電子線照射のテストは完了しており、来年度に 500 keV 程度までの電子線照射を行う。

具体的には以下の通りである。

まず、コバルト 60 照射施設により、プールを用いた水中照射を行った。試料は CIGS および InGaP 太陽電池であり、照射線量率は  $4.9~\mathrm{kGy/h}$  で、 $3~\mathrm{BH}$  目間にわたり合計  $19~\mathrm{h}$ 、積算線量  $93.1~\mathrm{kGy}$  の照射を行った。照射は外径約  $100~\mathrm{mm}$ 、内径  $90~\mathrm{mm}$ 、深さ  $290~\mathrm{mm}$  の円筒形水密容器(図 3.3.1-1)の中で行った。照射後試料を原子力機構側に送り、LIV 特性の評価を行ったところ、InGaP 太陽電池については若干の開放端電圧の低下が見られたが短絡電流には変化が無く、検出器として問題は無かったが、CIGS 太陽電池に関しては、コンタクトが悪くなっており、ダイオード特性を正常に取得できなかった(図 3.3.1-2)。これは、密閉された照射容器内で高線量の照射を行ったため、ガンマ線による放射線分解により空気中に生じたオゾンが表面の配線を腐食したことによる影響であると考えられる。このため、プールを含むコバルト  $60~\mathrm{KR}$  所記を照射用は料容器を設計、製作(図  $3.3.1-3\sim5$ )した。



図3.3.1-1 プール照射用10 cm試料容器と 線源容器 (線源容器はダミー)

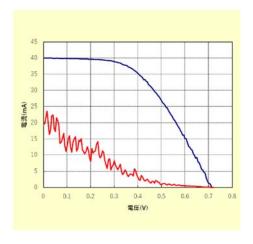


図 3.3.1-2 照射前(青) および 93.1 kGy 照射後(赤)の CIGS 太陽電池 LIV 特性



図 3.3.1-3 今年度製作した照 射時起電力測定用試料容器

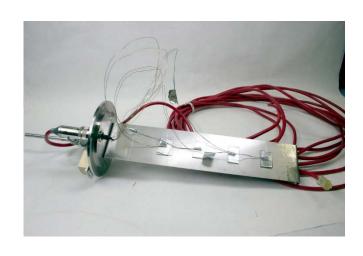


図3.3.1-4 照射時温度測定のために太陽電池を 模したガラス板上に熱電対を4 組実装した試料 ホルダー

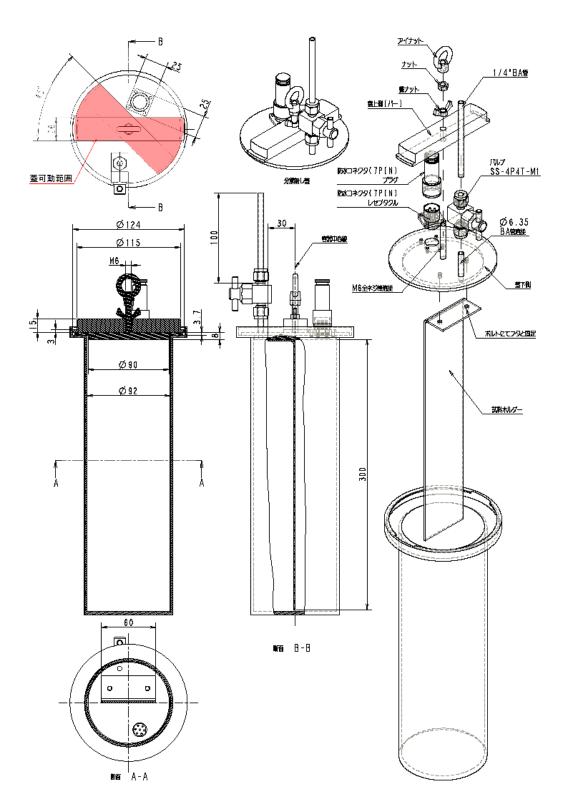


図 3. 3. 1-5 照射時起電力測定用試料容器図面

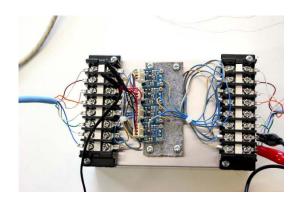


図 3.3.1-6 AD8495 チップを使用した 4ch 熱電対アンプ・ノイズフィルター

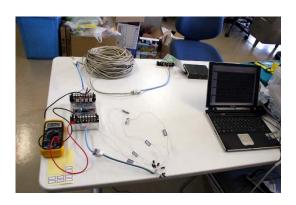


図 3.3.1-7 熱電対アンプからのアナロ グ出力を TUSB-1612ADSM-S AD コンバータ ーに入力し、PC 取込を行うシステム

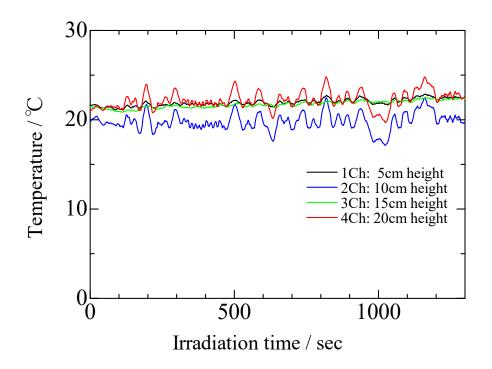


図 3.3.1-8 コバルト 60 照射プールでの 4.3 kGy/h 照射時温度測定結果

試料容器下から 5 cm 間隔で 1、2、3、4ch とした。出力端子が 7 pin であるためクロメル極 (-極) 側は共通とした。1-3、2-4ch で同様のノイズが乗っている原因は不明だが、良好な接地極に接続することで改善可能と考えられる。

高線量率のガンマ線照射を行う際には、コバルト 60 線源に照射容器が密接しており、ガンマ発熱だけでなく、線源内部でのベータ線による発熱の影響が無視できない。線量評価を行うラジオクロミック線量計には、測定時の温度依存性があるため、今年度製作した容器を用いてプール中のコバルト 60 による高線量率のガンマ線照射を行い、熱電対を用いて照射中の温度測定を行った。試料容器内の熱電対は出力端子の物理的な大きさの制約のため 7 pin しか取れず、クロメル極側(-極側)を共通化して出力した。出力端子から熱電対アンプまでの接続は 10 m のカテゴリー5e のツイストペアケーブルを使用した。AD8495 チップを使用した熱電対アンプ・ノイズフィルター(図 3.3.1-6)を使用して増幅し、アナログ出力をタートル工業製 TUSB-1612ADSM-S AD コンバーターで PC への取込を行った(図 3.3.1-7)。

その結果、外径 10 cm の試料容器を照射するための線源・線源容器の組み合わせでは、4.3 kGy/h で 20 分間の照射でせいぜい  $1\sim2$   $\mathbb{C}$ 程度しか温度上昇が見られず、温度上昇は無視できることが明らかとなった(図 3.3.1-8)。温度上昇がある場合にはラジオクロミック線量計を用いた線量評価を行う際に照射時の温度による補正が必要であるが、この結果から室温での校正のみを行えばよいと言える。また、湿度に関しても、アルゴンガスパージを行うため湿度 0 の一定条件下での照射が可能である。

これらの検討結果を元にして、外径 10 cm の照射用試料容器内の線量率分布評価を行った(図 3.3.1-9,10、表 3.3.1-1)。計算により求めた直径方向の線量分布(図 3.3.1-11)同様に、中心から試料容器外壁に近付くと線量率は高くなり、また線源のステンレス直管容器内におけるコバルト 60 ペレットの配置を反映して、軸方向中央部分の線量率が高く、公称値よりも高めの値を示した。この結果から、来年度以降照射時起電力を評価する際の線量を評価できるとともに、ある程度の線量率の幅を取れることが明らかとなった。なお、ラジオクロミック線量計は蛍光灯照明でも感光することが確認されたため、試料板への貼付けなど取扱いに際しては紫外線を含まない LED 照明下で作業を行い、同一環境下で取り扱った未照射フィルムの測定を行うなどの測定プロトコルを確立した(図 3.3.1-12)。



図3.3.1-9 照射前(左)後(右) のラジオクロミックフィルム 照射後の中列上から3番目のみ色 が濃いのは2枚フィルムが重なっ ていたため。



図 3.3.1-10 プール照射用 10 cm 照射容器にラジオクロミック線量計を格納した様子

試料板の幅は照射容器内径に合わせた。

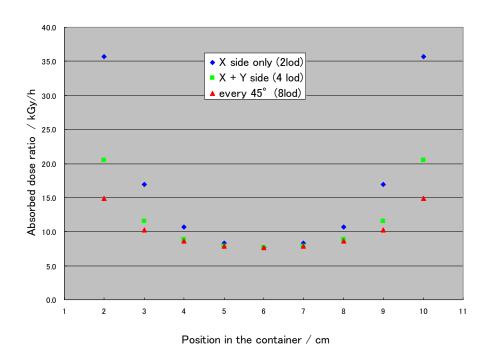


図 3.3.1-11 プール照射用 10 cm 照射容器用の線源容器内での 線量率位置依存性の計算結果

線源位置を直径 12 cm として、合計 90TBq となる線源を、2 本、 4 本、 8 本に配分した場合で計算。実際には 20 本の線源を使用しており多少位置が変化しても線量率の変化は小さい。 試料容器による遮蔽は考慮しておらず、また同一平面上に線源が存在するとした。実際には 30 cm の線源ロッドの軸方向の分布があるため、もう少し線量率が小さくなる。 表 3.3.1-1 コバルト 60 照射プール 10 cm 容器内の線量率分布 位置 A-I は軸方向上から 2.5 cm お き。

	線量率[kGy/h]		
位置	左	中	右
A	4.0	3.7	4.0
В	4.6	4.4	4.7
С	4.9	4.6	4.9
D	4.8	4.9	5.0
Е	5.1	4.9	4.9
F	5.0	4.9	5.0
G	4.9	4.9	5.0
Н	4.7	4.7	4.9
Ι	4.4	4.3	4.8

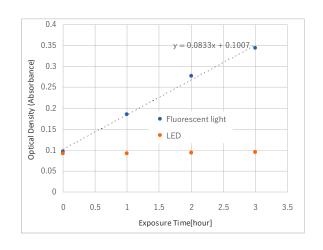
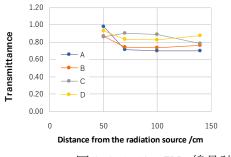


図 3.3.1-12 ラジオクロミックフィルム を暗室内で蛍光灯および LED 光源下に曝した際の吸光度変化

コバルト 60 照射プールよりも低線量率での第 2、第 3 照射室での線量率評価は、ラジオクロミック線量計の測定限界以上に照射するためには非常に長い時間を要するため TLD 線量計を使用した。それに先立ち、個々の TLD バッジの校正を行った上で、アルゴンガスパージ可能な試料容器内での線量率評価を行った。線源からの距離を変えての測定を行った結果を図 3.3.1-13 に示す。照射容器の遮蔽による  $20\sim30$  %程度の減衰が見られるとともに、第 2 照射室においては、70 cm よりも線源に近い距離では試料容器によるパイルアップの影響が見られることが明らかとなった。来年度以降はステッピングモーター駆動の 1 m のリニアステージにより照射時起電力の測定を行うが、第 3 照射室においては 70 cm  $\sim170$  cm の範囲で測定を行うことでフラットな線量率評価が可能である。



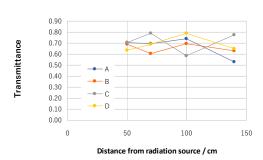


図 3.3.1-13 TLD 線量計を用いて評価した照射容器内線量と 容器がない場合の空間線量との比

左図が第2照射室(9.7~65Gy/h)、右図が第三照射室(78~530 mGy/h)。第3照射室では非破壊検査用に点線源に近い線源が使用されている。TLD線量計は照射容器内に上から A→D と5 cm 間隔で設置した。パナソニックの UD-802 TLD バッジを使用しており、評価に用いたのは70  $\mu$ m線量当量評価用のE1素子。

照射時の太陽電池起電力測定は、まず第2照射室を使用して5.5 Gy/h~400 Gy/h の範囲で行 った(図 3.3.1-14)。泰榮エンジニアリング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、図 3.3.1-15 に示すように従来 の照射時測定よりもノイズが低減され太陽電池起電力の線量率依存性を取得することができたが (図 3.3.1-16)、従来のケーブル長 10 mから 50 mに延長して照射場に設置したため、ケーブル に対する電離損傷ノイズにより出力信号が 1/500 程度に低下した。このケーブルに対する電離ノ イズの解析結果は、3.2 節の高耐放射線性微少電流計測システム開発にて解析を進めており、グ ラウンドの設置方法およびトライアキシャルケーブルの使用により、低減可能であると示唆され ている。図 3.3.1-15 の実験において、グランドに関しては、十分考慮されていなかったため、 ケーブルからの電流が、太陽電池からの信号を減少させたと考えられる。また、16 Gy/h の環境 下で4 pAであり、ピコアンメータ iDC12 の検出下限値が、1 pAであるため、1 Gy/h での照射の 場合は、0.25 pA 程度であると想定されるため、1 Gy/h 以下の線量環境下での測定を 2019 年 8 月 23 日に試みたが、出力信号は検出ができなかった。シールドケーブルの被覆線を正常に接地す ればノイズ低減が可能であると考えられるが、実験に使用した大阪府立大学線源棟の電気設備的 な問題のため、接地極自体にノイズが乗っており、今年度はこれ以上の精度での測定ができなか った。その後の調査で良好な接地が得られる接続箇所が確立されており、京都大学の研究成果に よるトライアキシャルケーブル、より精度の高いピコアンメータ iDC13 の使用でより良好な S/N 比を達成可能であるとの見込みが得られている。また、低線量の感度増幅のために、太陽電池の 素子面積を大きくし、簡易的に感度を増感させる構造も検討している。これらのことを踏まえ、 来年度以降に1 Gy/h 以下の信号の取得を改めて実施する。

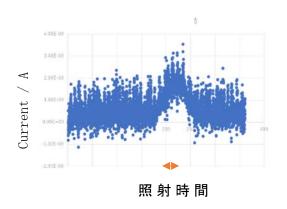


図 3.3.1-14 InGaP 太陽電池と ADCMT 社製 6241 電流計を用いて 447 Gy/h で測定した照射時電流 試料、ケーブルともにシールドは 行っていない。

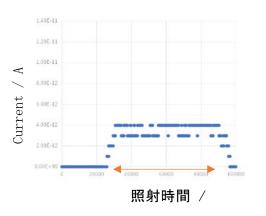


図 3.3.1-15 InGaP 太陽電池と iDC12 電流計を用いて 16 Gy/h で測 定した照射時電流

試料、ケーブルともに電磁シールドを行った。ノイズは低減されたが電流値が大幅に小さくなった。

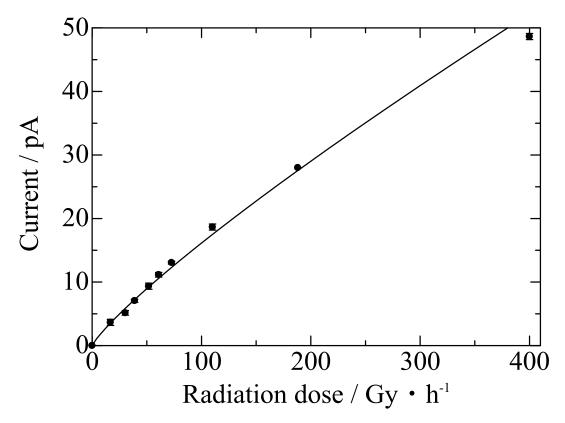


図 3.3.1-16 InGaP 太陽電池と iDC12 電流計、シールド線を用いて第 2 照射室 において 5.5 Gy/h~400 Gy/h の範囲で測定した照射時電流の線量率依存性

電子線照射試験では、図 3.3.1-17 に示すコッククロフト・ウォルトン型電子線加速器 (CW 加速器) で 60 keV の低エネルギーから 500 keV までの範囲でビーム電流値を変えて電子線照射を行った。平成 30 年度末のセレン整流器の予期せぬトラブルのため 500 keV での照射は短時間のテストのみ行い、また、60 keV においても、電子線のビームカレントが小さくファラデーカップでの検出における誤差が大きいため短時間のテストのみ行った。80~400 keV の範囲で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。

CW 型電子線加速器では、図 3.3.1-18 に示すように、加速管により加速された電子線は、エネルギー選定のため 90 度方向に曲げられ、収束コイルにより絞られた後に、スキャンコイルにて、スキャンされた電子が、試料全面に均一に照射される。試料台は、図 3.3.1-19 に示すように、試料からの放射線誘起電流を測定できるように、プローブが設置されている。また、冷却水およびヒーターを使用することにより試料温度を任意の温度にて照射することができる。

InGaP 太陽電池および CIGS 太陽電池に関して、電子線誘起電流を測定した結果を図 3.3.1-20 に示す。図 3.3.1-20(a)に示すように、InGaP 太陽電池に関しては、80、150、および 400 keV の電子線照射時の誘起電流量に関して観測した。その結果、すべてのエネルギーにおいて、フラックスに依存して電子線誘起電流は線形的に増加することが確認された。



図 3.3.1-17 コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器の写真

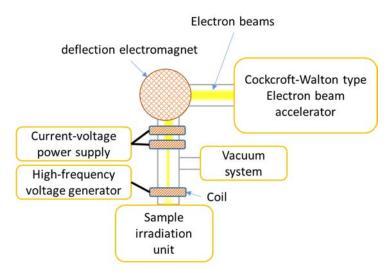


図3.3.1-18 コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器の照射体系

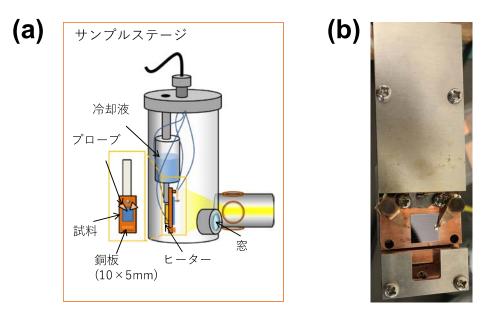


図3.3.1-19 コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器の試料台

また、電子線エネルギー増加に伴い1電子線あたりの電子線誘起電流の発生効率が低下していくことが確認された。図3.3.1-21に示すようにPHITSにより計算したInGaP太陽電池の吸収層深さ方向に対する付与エネルギー分布から、電子線エネルギーが増加すると単位厚さの吸収層へ与える付与エネルギーの平均値(LET)が減少していることが確認できる。そのため、InGaP太陽電池の電子線誘起電流が、エネルギー増加に従って減少したことは、素子の吸収層における付与エネルギーが減少したためであると考えられる。

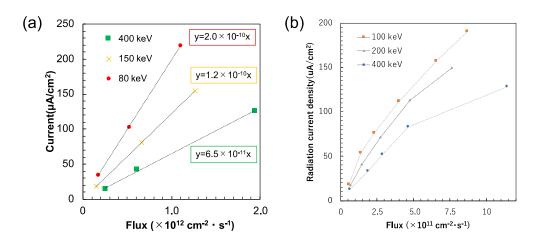


図 3.3.1-20 (a) InGaP 太陽電池および(b) CIGS 太陽電池における電子線誘起電流

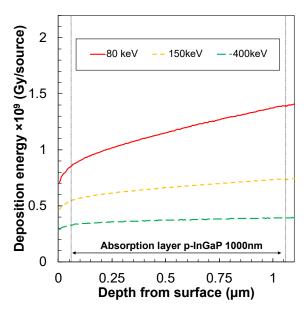


図 3.3.1-21 InGaP 太陽電池における各電子線エネルギーの 吸収層厚さ方向に対する付与エネルギー分布

一方、図 3.3.1-20(b)に示すように CIGS 太陽電池の場合は、エネルギー依存性は、InGaP 太陽電池同様に、エネルギーが高いほど、1 電子当たりの電子線誘起電流の発生効率は低下しているが、フラックス依存性は、線形性を示しておらず、電流が増加するにつれて、飽和しているような傾向が観測されている。この電流傾向は、太陽電池の低照度環境下での測定でよく観測されて

いるが、直列抵抗成分の高い太陽電池に起きる減少であると考えられる。ただ、線量計として、使用した場合、校正曲線を取得することによって線量率を正確に見積もることが可能であり、また、高線量率側での電流飽和挙動は、ダイナミックレンジの向上というメリットがある。そのため、CIGS 太陽電池は、高い線量率環境下で、広いダイナミックレンジが求められる際に、大きなメリットがあると考えられる。また、InGaP 太陽電池に対して、同条件の照射試験において 2 倍程度大きな電流量が発生していることから、感度としても優れていることが示唆される。

次に、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、継続して照射した際の、電子線誘起電流効率の保存率に関して測定した結果を図 3.3.1-22 に示す。

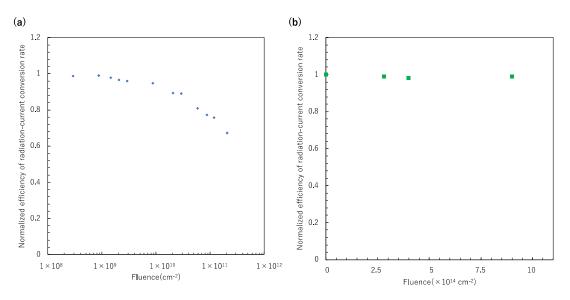


図 3.3.1-22 (a) InGaP 太陽電池および(b) CIGS 太陽電池における 400 keV 電子線照射時の劣化挙動

InGaP 太陽電池では、約 10<sup>10</sup> cm<sup>-2</sup>のフルエンスから劣化が見られている。一方、CIGS 太陽電池では、約 10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup>のフルエンスまで、電子線を照射したが、劣化がほとんど見られなかった。欠陥生成を予測する NIEL の計算結果において、400 keV 電子線照射によって InGaP 太陽電池だけでなく、CIGS 太陽電池にも、欠陥が生成されていると見積もられている。一般的に、太陽電池の短絡電流の劣化は、照射によって生成された欠陥がバンド内に再結合中心を作ることで引き起こされるキャリヤ拡散長の低下が、主な要因であると考えられている。また、生成される欠陥量は、フルエンスに比例することから、先行研究でも、フルエンスの増加に伴い太陽電池特性の劣化が進行することが観測されている。そのため、InGaP 太陽電池においては、フルエンスの増加に対して放射線誘起電流が低下している要因は、照射欠陥によるキャリヤ拡散長の低下によるものであると示唆される。CIGS 太陽電池に関しては、先行研究において、1 MeV 電子線照射試験においても、太陽電池特性が劣化しないことが報告されている。太陽電池では、欠陥生成量、欠陥回復量、および欠陥影響率の3つの要因が、耐放射線性を決めると考えられる。CIGS 太陽電池では、

#### JAEA-Review 2020-051

欠陥が生成されるが、欠陥回復や、影響率の小さい 2 次欠陥への安定が、先行研究で報告されている。そのため、この電子線誘起電流の保存率がほとんど劣化していない要因は、照射によりできた欠陥が、直ちに回復または、2 次欠陥へ安定することによるものであると考えられる。非常に高い線量率を測定する素子として CIGS 太陽電池は、ダイナミックレンジの広範囲化および、高い耐放射線性により、有用であると考えられる。

セレン整流器の自己修復が進み、500 keV でのテストでは、特に問題は無かったため、来年度 に照射時起電力評価を行う。また 60 keV においては、ピコアンメータの更新によりファラデー カップの検出感度を向上させることにより改善する。

# 3.3.2 中性子線照射試験(再委託先:理化学研究所)

### (1) 中性子発生量の最大化

理研加速器中性子源(RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source, RANS)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(図 3.3.2-1)。それぞれが同期してパルス駆動し、陽子を加速している。加速された陽子は、ベリリウムターゲット(図 3.3.2-2)に照射され、 $^9$ Be (p, n)  $^9$ B 反応によって中性子を放出する。

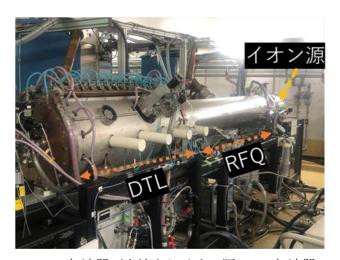


図 3.3.2-1 RANS の加速器 (上流よりイオン源、RFQ 加速器、DTL 加速器)



図 3.3.2-2 中性子発生ベリリウムターゲットおよびホルダー

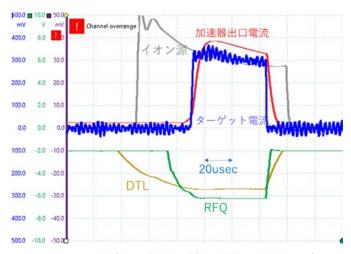


図 3.3.2-3 オシロスコープで記録した機器動作タイミングと陽子電流の例

### (2) 減速材厚みの変化と中性子スペクトル

RANS においては図3.3.2-4に示すターゲットステーション(中性子発生ターゲットを内蔵した 遮蔽体)の孔から放出される中性子を利用するのが通常である。本件研究では、可能な限り大き な中性子線量を確保するため、ターゲットステーション内部に太陽電池サンプルを挿入している。図3.3.2-5 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。



図3.3.2-4 RANS 中性子発生ターゲットステーション 中心にベリリウムターゲット、その周囲をホウ素ポリエチレンと鉛の多層遮蔽で囲む 画面中央は中性子東取り出し孔



図 3. 3. 2-5 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

試料設置場所における中性子エネルギースペクトルを PHITS コード (ver3.11)  $^{(1)}$ 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 cm、4 cm(常用)、8 cm、10 cm と変化させた。陽子電流は  $^{100}$   $^{100}$   $^{100}$   $^{100}$   $^{100}$   $^{100}$   $^{100}$   $^{100}$   $^{100}$   $^{100}$   $^{100}$   $^{110}$   $^$ 

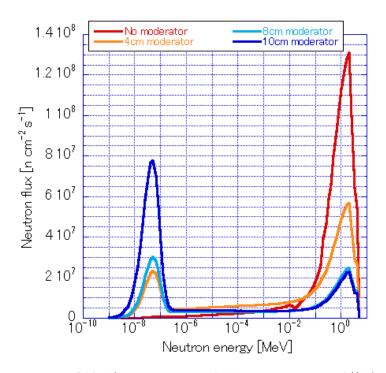


図3.3.2-6 試料照射場所における中性子スペクトルの計算結果

	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	$1.48 \times 10^9$	$1.20 \times 10^7$	$1.41 \times 10^9$
4 cm	$1.15 \times 10^9$	$2.25 \times 10^{8}$	$7.59 \times 10^{8}$
8 cm	$6.83 \times 10^{8}$	$2.64 \times 10^8$	$3.27 \times 10^8$
10 cm	$1.09 \times 10^9$	$6.71 \times 10^{8}$	$3.09 \times 10^{8}$

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

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<sup>(3)</sup>。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。本計算結果より、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が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  $\mu$ A (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 3.3.2-7)。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。

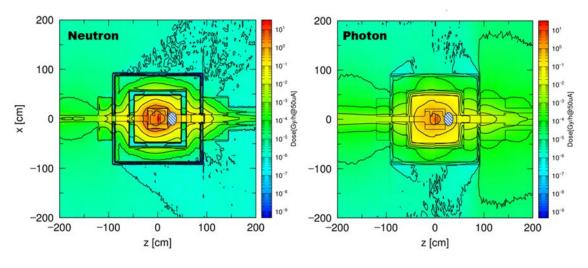


図3.3.2-7 ターゲットステーション内の吸収線量率

### (3) システムの放射化評価

中性子場における使用を考えた場合、システムの放射化は避けられない問題である。今年度の照射実験および評価により、検出部(太陽電池)そのものが放射化することによる計測電流の変化は小さいことが分かった。一方、放射線管理区域外における事後評価や改良が直ちに行えるかどうかを検証するため、InGaP 太陽電池(1 cm²)、CIGS 太陽電池(1 cm²)、配管用 SUS304(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。結果を図 3.3.2-8 に示す。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。平成 30 年度に行った多量の銀電極を用いた試料を照射したケースでは 110 mAg の半減期が約 250 日と長いことから施設外への持ち出しができていない。今回のケースでは長半減期の核種はみられず、比較的短時間での持ち出し評価が可能である。引き続き 0SAM システムに適した材料選定を行う。

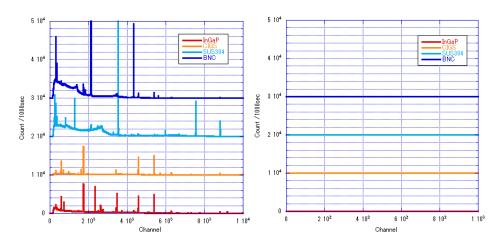


図3.3.2-8 ターゲットステーション内で10分間照射した直後および 1週間後にゲルマニウム検出器で測定した各試料のガンマ線スペクトル

### 参考文献

- (1) Y. Wakabayashi, A. Taketani, T. Hashiguchi, Y. Ikeda, T. Kobayashi, S. Wang, M. Yan, M. Harada, Y. Ikeda and Y. Otake, "A function to provide neutron spectrum produced from the 9Be + p reaction with protons of energy below 12 MeV", JAEA-Conf 2016-004, 135-140 (2016).
- (2) T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Pi-En Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita, "Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02", J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018).
- (3) 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」27、4、151-154 (2017).

# 3.3.3 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少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ヤ生成量を解析した。

# (1) 原子力機構のタンデム加速器を利用したアルファ線模擬照射試験の目的

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<sup>(1), (2)</sup>。 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、太陽電池型線量計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。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、エネルギーを 3~8 MeV の範囲で選択することができる。1Fで想定されている核種は、5 MeV 程度のエネルギーのアルファ線を放出するものが考えられているため、5 MeV の He イオンの挙動を取得することが可能である。そのため、本研究では、原子力機構の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ことを目的とする。

#### (2) 原子力機構タンデム加速器における照射体系

照射試験は、原子力機構タンデム加速器建屋内には、軽イオンターゲット照射室にて実施した。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、図 3.3.3-1 に示す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、図 3.3.3-2 に示すように、スキャンコイルにより発生した磁場により、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、太陽電池の誘起電流を正確に測定するためには、照射中のビーム電流をモニタリングする必要がある。そのため、試料台には、図 3.3.3-3 に示す試料取り付け用治具およびファラデーカップを設置した。この治具では、電流取り出し用電極およびファラデーカップを設置し、太陽電池の電流およびビーム電流を同時に取得できる構造である。



図 3.3.3-1 軽イオン照射用チャンバー

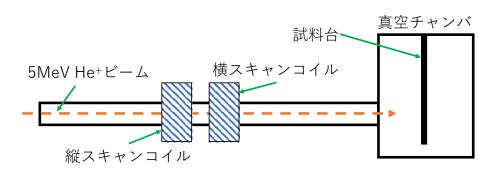


図 3.3.3-2 ヘリウムイオンの均一照射

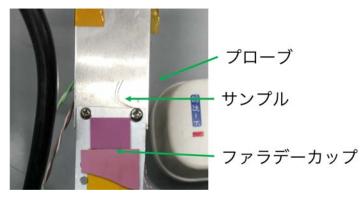


図3.3.3-3 ビーム電流および太陽電池の電流の同時測定用治具

### (3) He イオン照射試験の結果

図 3.3.3-4 にタンデム加速器により発生した He イオンビームを InGaP 太陽電池へ照射した際の He イオンビーム誘起電流挙動を示す。この結果より、He イオンが InGaP 太陽電池へ入射した際に、約  $0.5~\mu A/cm^2$ の電流密度が観測された。ファラデーカップによる観測により He イオンのフラックスは、 $5\times10^7~cm^2s^{-1}$ であったため、He イオン 1~dl 個当たりの電流発生率は、約  $1\times10^{-8}~\mu A/He^+$ であると見積もられた。

図 3.3.3-5 に、InGaP 太陽電池の放射線誘起電流におけるヘリウムフラックスの依存性を示す。この結果より、InGaP 太陽電池の He イオン誘起電流は、He イオンフラックスに対して、線形的に増加することが明らかになった。そのため、アルファ線入射時においても、InGaP 太陽電池は、アルファ線粒子束に応じた電流量を出力することが可能であり、アルファ線線量計として使用できることが確認された。また、ケーブル、太陽電池、およびピコアンメータ等の、電流計測系の特徴から、電流測定限界は、数 pA と予測されている。この値より、InGaP 太陽電池を使用した現行で検討している線量計のアルファ線フラックスの検出下限値は、約 10² cm²s⁻¹であると考えられる。この結果より、1F のデブリ中のアルファ線フラックスを検出できる可能性は、十分にあることが示唆される。また、検出下限値をより改善することは可能と考えており、ケーブルの調整や、素子構造の工夫によるノイズ低減や、素子の感度調整を実施することが改善策となると考えられる。しかし、現状の検出器の状態であった場合、太陽電池素子がむき出し構造での検出であり、実際の使用状況によっては、可視光に対するノイズや、素子自体の破損を招く可能性がある。そのため、シミュレーション等による構造の最適化が、今後重要であると考えられる。

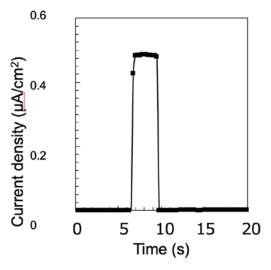


図 3.3.3-4 He イオンビーム照射時の InGaP 太陽電池の放射線誘起電流挙動

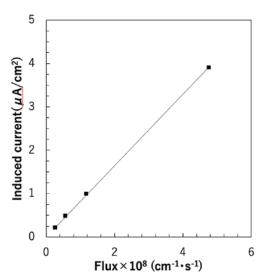


図 3.3.3-5 He イオンビームフラックスの InGaP 太陽電池の誘起電流依存性

## (4) 放射線挙動解析による InGaP 太陽電池の放射線誘起電流の解明

太陽電池型線量計を 1F へ導入する場合、アルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子線の複合した環境中での測定となる。そのため、アルファ線の正確な測定には、太陽電池の放射線発電挙動を解明し、1F環境中で使用された際の、検出挙動予測が重要である。先行研究において、太陽電池の放射線発電挙動に関しては、図 3.3.3-6 に示すように、「1, エネルギーの付与」、「2, キャリヤの生成」、および「3, 外部回路の電流発生」の3つの過程であるモデルを構築している。太陽電池が同じ場合、線種やエネルギー依存性は、エネルギーの付与を解析することにより、電流信号強度および、検出感度を予測できると考えられる<sup>(3)</sup>。

放射線のエネルギー付与を計算する手法として、放射線挙動シミュレーションが有効であ る。国内において、原子力機構が開発している放射線挙動解析ソフトウェアである PHITS は、 構造中の放射線の付与エネルギーを計算することが可能であり40、太陽電池に入射した放射 線が、素子へ与えるエネルギーを計算することに適している。InGaP太陽電池は、1000 nmの 吸収層を有しており、素子は、むき出し構造である。この太陽電池の体系を、PHITS を用い て構築し、0.1~5 MeV のアルファ線入射時の付与エネルギー分布について計算した。その結 果を、図 3.3.3-7 に示す。縦軸、および横軸は、付与エネルギーおよび、InGaP 太陽電池の 吸収層表面からの距離を表している。タンデム加速器による照射試験で利用した He イオン は、5 MeVのエネルギーを有しているため、計算結果の5 MeVアルファ線と同様の付与エネ ルギー挙動であると考えられ、素子厚さ方向に対して、均一にエネルギーが付与されている ことが示されている。また、アルファ線のエネルギーが減少した場合、素子に対する付与エ ネルギーが平均的に増加していることがわかる。粒子線の場合、エネルギーが増加すること は、粒子速度の増加を意味している。粒子線速度の2乗に反比例して、線エネルギー付与は、 低下するため、アルファ線に見られる平均付与エネルギーの変化は、線エネルギー付与の低 下に関係した現象であると考えられる。また、厚さ方向の後方にかけてのエネルギー付与の 増加が見られるのは、0.1 MeV を除く低エネルギーアルファ線で見られているが、これは、 アルファ線の散乱による影響であると考えられる。0.1 MeV は、素子後半にかけて、低下し ているが、これは、エネルギーが低く、アルファ線の殆どが、素子の途中で遮蔽されてしま ったためであると考えられる。しかし、素子表面における付与エネルギーが観測されている ことから、InGaP 太陽電池のような素子がむき出しの構造であれば、0.1 MeV のような低い エネルギーのアルファ線であっても、検出できることが示唆される。デブリから放出される アルファ線は、最大エネルギーが約5 MeV であるが、内部からアルファ線が放出された場合 や、デブリ表面に水がついていた場合、遮蔽によりアルファ線のエネルギーが減衰すること が考えられる。しかし、この計算結果より、その場合でも、太陽電池型線量計は、アルファ 線に対する感度が十分であると考えられる。

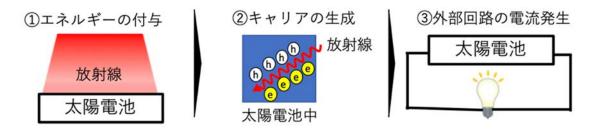


図3.3.3-6 太陽電池の放射線誘起電流発生機構

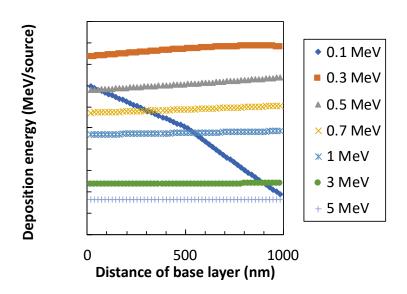


図 3.3.3-7 InGaP 太陽電池の吸収層におけるアルファ線の付与エネルギー分布

#### (5) CdTe 太陽電池のHe イオン劣化挙動

CdTe 太陽電池のアルファ線耐性を評価するため、原子力機構タンデム加速器を利用した He イオン照射試験を実施した。太陽電池素子としての特性による評価を実施するため、照射前後で、光電流電圧特性を取得した。素子に関しては、6 つ準備し、 $3\times10^{11}$ 、 $3\times10^{12}$ 、および  $3\times10^{13}$  cm<sup>-2</sup>のフルエンスを 2 枚ずつ照射した。照射試験結果を、図 3.3.3-8 に示す。縦軸は、照射前の特性を 1 とした保存率(remaining factor)を表している。(a)、(b)、および(c)は、それぞれ、短絡電流( $I_{SC}$ )、開放端電圧( $V_{SC}$ )、最大電力( $P_{m}$ )の劣化傾向を示している。 $10^{11}$  cm<sup>-2</sup>の照射試験結果において、CdTe 太陽電池の  $I_{SC}$  および  $V_{SC}$  の特性は、劣化していない。しかし、 $P_{m}$  のみ劣化していることが確認された。また、 $10^{12}$  cm<sup>-2</sup> の照射結果においては、 $I_{SC}$  および  $P_{m}$  において、急激な低下が見られた。 $V_{SC}$  に関しては、劣化傾向にばらつきが大きいが、平均的には、フルエンスに依存して、緩やかに低下している。

線量計の駆動として、放射線誘起電流を測定することから、 $I_{SC}$  の劣化傾向が重要である。 CdTe 太陽電池の劣化は、 $10^{11}$  cm $^{-2}$ までのフルエンスにおいて、劣化がほとんど起きないと考えられるため、1F 環境中で予測されているアルファ線環境( $<10^4$  cm $^{-2}$ )において、CdTe 太陽電池は、十分な性能が得られることが確認された。来年度の照射試験によって、アルファ線誘起電流のフラックス依存性を解明する。

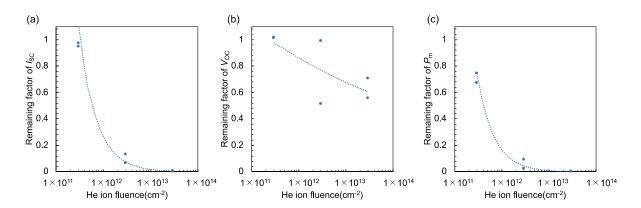


図 3.3.3-8 He イオン照射試験における CdTe 太陽電池の劣化傾向

### 参考文献

- (1) K. Yano, T. Kitagaki, H. Ikeuchi, et al., Proceedings of GLOBAL 2013: International Nuclear Fuel Cycle Conference; 2013 Sep 29-Oct 3; Salt Lake City, UT.
- (2) C. Journeau, D. Roulet, E. Porcheron, P. Piluso and C. Chagnot, J. Nucl. Sci. Technol., 55, 985-995 (2018).
- (3) Y. Okuno, N. Okubo, and M. Imaizumi, J. Nucl. Sci. Technol., 56, 1-8 (2019).
- (4) T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T., P. Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018).

# 3.4 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。

# (1) 線量計試作機の構成

太陽電池型線量計では、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、④ デジタル信号輸送ケーブル、⑤ PC が必要である。本研究では、これら5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 太陽電池は、木更津工業専門学校および JAXA から提供されたものを使用した。② 電流信号ケーブルは、ノイズの影響を減らすため10 mの BNC ケーブルを使用した。③ 太陽電池の信号はピコアンペア程度が想定されているため、電流計は、ピコアンメータ(iDC12、泰栄エンジニアリング社製)を使用した。④ デジタル信号輸送ケーブルは、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, BUFFAL0 社製)を使用した。⑤ PC は、1F での作業者の使用環境に耐えることができるように、衝撃耐性の高い PC (Let's note, Panasonic 社製)を使用した。

#### (2) 線量計試作機の構成

線量計の基本的な構成としては、図3.4-1に示す。太陽電池の裏面、表面電極を、ケーブルを利用し、ピコアンメータに接続する。ピコアンメータは、USB ケーブルを利用し PC に接続される。PC および、ピコアンメータは、電源供給のため、バッテリーに接続される。今年度に作成した試作機の構成を、表3.4-1に示す。信号輸送ケーブル(50 m)および、デジタル信号輸送ケーブル(40 m)の合計の長さは、90 m であり、観測用 PC から 80 m 以上先の線量信号を取得できる仕様となっている。また、太陽電池は、可視光を遮光するため、図3.4-2に示すようなアルミケースに設置した。またケーブルを接続した際のアルミケールの外観を図3.4-3に示す。このアルミケースの外形は、5 cm $\phi$ ×7 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。

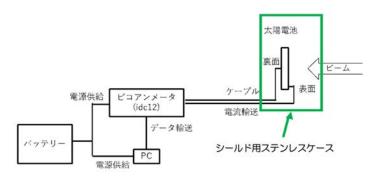
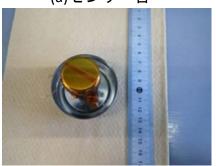


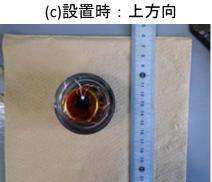
図 3.4-1 太陽電池型線量計 (OSAM) の試作機の概要図

表 3.4-1 太陽電池型線量計 (OSAM) の試作機の構成

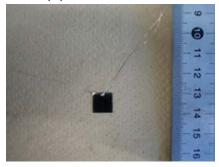
構成機器名	製品名
太陽電池	JAXA InGaP 太陽電池
電流信号輸送ケーブル	ミスミ PRCO5P-SS-D-6-50
電流計	泰栄エンジニアリング iDC12
デジタル信号ケーブル	サンワサプライ KB-USB-R220 2 連結
PC	パナソニック Let's note SV7
ソフトウェア	ナショナルインストルメンツ LabVIEW

# (a)センサー台





(b)InGaP太陽電池



(d)設置時:横方向



図 3.4-2 太陽電池のアルミシールドの内部



図 3.4-3 太陽電池のステンレスシールドの外装

### (3) 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、予め測定した校正曲線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により解析することが重要である。本研究では、PCによる装置制御のため、ナショナルインスツルメンツ社製のLabVIEWにより、iDC12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う。今年度では、iDC12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。

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 3.4-4 に示す。iDC12 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:high/low、およびノイズフィルター:on/off の設定を、iDC12 へ書き込みにより変更できる仕様となっている。また、測定されている電流信号を、PC へ要求するモードとして、ワンデータ要求モードと連続データ要求モードを変更できるようになっている。また、iDC12 から PC へ送られてきた電流信号は、16 進数であり、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、測定されている、電流値および経過時間を任意のファイルパスを指定することで記録することができる。また、測定中に、電流値データの横に任意のマークを記入する機能を有している。

図3.4-4に表示されているチャートは、アルミシールドへ少し隙間を導入し、可視光を入射した際の電流挙動を示している。図3.4-5に示すようにiDC12には、測定中の電流信号は本体上部の表示機に表示されている。この本体の電流値と、プログラムの電流値の一致を確認しており、作成されたプログラムは正常に動作していることを確認した。

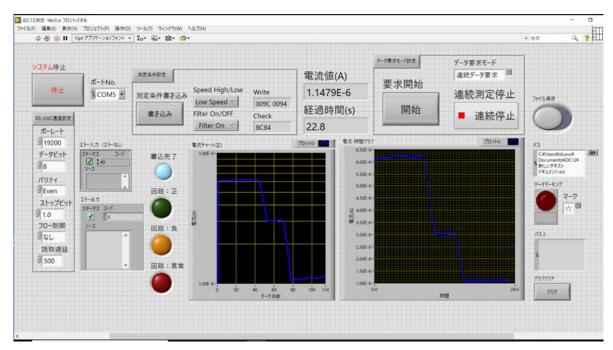


図 3.4-4 電流信号解析ソフトのユーザーインターフェース



図 3.4-5 iDC12 の外装と電流値表示機

## (4) 開発状況と次年度の整備

#### • 小型化

小型化に関して、センサー部分の大きさの目標を 10 cm³以下と設定している。太陽電池の素子形状においては、表面積 0.5~1 cm² および厚み 0.1 cm の形状を用いて、照射試験による信号を取得している。また、小型化によるセンサーの信号の大きさは、数 Gy/h で 数 pA であるため、ケーブル等からのノイズを踏まえて、S/N 比を考慮すると、信号を増幅する必要がある。しかし、太陽電池素子としての効率では、数%程度の向上のみが見込まれているため、シンチレータや、複数の太陽電池を並列接続することによって素子面積を増加させる方法により、S/N 比を向上させる。

また、外装においては、図 3.3.1–14 および、図 3.3.1–15 に示すように、電磁ノイズのシールドのため、金属製の容器を使用する必要が明らかになってきた。そのため、現在、図 3.4–3 に示しているように 5 cm  $\phi$  × 7 cm の円筒上の形状を作製しており、センサーとして使用する予定である。10 cm  $^3$  以下のセンサー形状であるため、現状は、小型化の目標を達成したと考えている。

#### • 遠隔化

遠隔化においては、信号を輸送するケーブルの長さの目標を80 mと設定している。ケーブルにおいては、2 つの種類があり、それらは、太陽電池から出力される電流をピコアンメータまで輸送する電流ケーブル、およびピコアンメータから出力されるデジタル信号をPCまで輸送する信号ケーブルである。今年度の実施内容として、信号ケーブルにおいては、USBケーブルであり、既存製品を利用すると、最長50 mまで延長することが可能となった。また、電流ケーブルとして50 mのシールドケーブル、および信号ケーブルとして、40 mのUSBケーブルで作製したシステムに、可視光を当てた場合のセンサーからの信号は、図3.4-4に示したように出力されている。そのため、目標80 mの遠隔測定に対して、信号取得においては、90 m先の太陽電池電流信号を取得することは達成している。

しかし、ピコアンメータの耐放射線性は、未測定であり、通常、太陽電池やケーブルに比べると耐放射線性が低いことが考えられるため、80 m 電流ケーブルで輸送することが望ましい。電流ケーブルを延長する場合、400 Gy/h の InGaP の電流信号を例にした場合、10 m のケーブルで、図 3. 2. 2-2(a)では 11 nA/cm²程度であるのが、50 m のケーブルで、図 3. 3. 1-16 では、50 pA/cm²程度と、太陽電池信号の電流信号が、低下することが確認されている。そのため、電流ケーブルの信号減少を改善し、80 m に延長することが重要である。3. 2. 4 項にて、トライアキシャルケーブルおよび回路を設計することにより、200 Gy/h の環境下で、通常の同軸ケーブルが 400 pA に対して、20 pA 程度まで抑えられることが明らかとなってきた。そのため、次年度では、ケーブルをトライアキシャルケーブルに変更を予定している。

また、遠隔測定において、1 箇所の線量を測定する測定時間の目標は、1 秒としている。太陽電池から出力される信号は、電流信号であるため、システムに使用しているピコアンメータの積算時間が、測定時間を決定している。現在、泰榮エンジニアリング社製の iDC12 を使用しているため、太陽電池からの電流を計測する上では、0.2 秒での信号出力である低速モード

を利用することによって、電源からのノイズもなく、測定することができている。そのため、遠隔測定における測定時間は、0.2秒であるため、目標を達成している。今後、PCでの電流信号からの線量率解析を行う予定であるが、最終的にユーザーインターフェースに出力される線量率の値は、1秒以内に、表示できるシステムを、LabVIEWを用いて作成する予定である。

# ・広範囲高精度ガンマ線線量測定

高精度ガンマ線線量測定の目標として、数 Gy/h〜数 kGy/h の範囲を目標としている。高精 度のガンマ線測定のためには、S/N 比および、ダイナミックレンジの 2 点が重要である。現在 では、電磁ノイズの除去のため、シールドケースおよびシールドケーブルを用いた測定シス テムを用いると、50 m 先の太陽電池からは、図 3.3.1-16 に示したように、16 Gy/h で 4 pA が 出力されている。そのため、単純な解析ではあるが、ピコアンメータ iDC12 の測定レンジが、 1 pA - 100 μAであるため、およその線量率測定の下限値は、4 Gy/h である。また、上限値 においての解析は、電流の線量依存性において、CIGS 太陽電池などは、曲線的な挙動を示し ているため、単純な解析では難しい。しかし、太陽電池の生成キャリアに対する外部量子効 率の研究は、低照度環境下での太陽電池の発電挙動に関する研究[1]で明らかにされており、 数 nA〜数 uA のほとんど直線的に増加することが報告されている。そのため、図 3.3.1-16 に 示す InGaP 太陽電池の傾向から、線量率の測定上限値は、およそ 850 MGy/h であると予測され る。線量測定の下限値および上限値が、それぞれ 4 Gy/h、および 850 MGy/h であることは、 目標である、数 Gy/h から数 kGy/h の線量率範囲の測定を達成したと考えられる。しかし、1F の PCV 内で予測されている放射線環境 1-1000 Gy/h を想定すると、欲しい検出範囲よりも高線 量側であることを示している。ダイナミックレンジは、太陽電池の面積の増加により、調整 できるため、次年度に改良を加える予定である。

また、前年度、5 m と短いケーブルをほとんど非照射環境下に設置した条件で取得した InGaP 太陽電池の発生電流は、1 Gy/h で 34 pA であったため、今年度の 50 m のシールドケースを用いた場合の 1 Gy/h で 4 pA という発生電流量は、予想よりも低いものであった。この低下した理由に関しても 3.2.4 項の結果から、ケーブルからの発生電流によるものと示唆されるため、ケーブルをトライアキシャルケーブルに変換することにより同様のセンサーを使用した場合でも、感度を少し向上させることが可能であると考えられる。そのため、次年度は、S/N 比を向上させるため、太陽電池の素子面積の増加、およびトライアキシャルケーブルの変更を行う予定である。

加えて、1F の PCV 内では、一度入れた線量計を取り出すことは容易ではない。そのため、長時間、挙動が変化しないセンサーは、高精度なセンサーであると考えられるため、本研究では、1 年以上の安定性を目標としている。1F の PCV 環境下において最大線量は 1 kGy/h 程度であると予測されていることから、約 370 kGy の線量照射時に、劣化がないことが目標である。シールドケースおよび、シールドケーブルを使用して照射中の電流挙動を測定されたInGaP 太陽電池では、図 3.3.1-16 でプロットされている点を取得する際も、各線量率において図 3.3.1-15 に示すように照射時間は、1 分程度であったが、すべての線量率において電流のゆらぎは、1 pA 以下であった。そのため、素子の劣化、電離ノイズ、および電源ノイズなどの影響は、殆どなかったと考えられる。しかし、現状では、システムとしては、1 分のみの

照射時間で、挙動が確かめられているため、さらなる長時間の照射を次年度実施する必要がある。一方、CdTe 太陽電池では、図 3.1.1-5 に示すように、3 MGy 照射後の劣化に関しても、報告されている。この結果では、3 MGy 照射後の CdTe 太陽電池の素子特性は、ほとんど劣化がないことが示唆されており、十分な耐性を有していることが考えられる。そのため、CdTe 太陽電池をセンサー素子として利用することで、1 年間の耐性を有するセンサーが開発できると期待される。一方、3.1.2 項の結果および、宇宙太陽電池の放射線劣化に関する先行研究から、太陽電池の放射線環境中での劣化は、放射線によって素子中に生成される欠陥量に依存している可能性が示唆されている。そのため、ガンマ線環境中の劣化機構としては、ガンマ線によって生成される2次電子が、素子中で欠陥を生成すると考えられる。そのため、電子線照射試験は、ガンマ線環境下での劣化の加速試験と位置づけることが可能であるため、図3.1.2-4の結果より、CIGS 太陽電池は、電子線照射時に劣化を示していないことから、ガンマ線環境下での耐性を有していることが示唆される。そのため、次年度の研究では、InGaP、CdTe、および CIGS 太陽電池から耐性および、感度を踏まえた上で、センサー素子を選定する。

# 参考文献

[1] A. Kassis, M. Saad, Solar Energy Materials and Solar Cells, 94, 2108-2112 (2010).

### 3.5 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。

(1) 研究推進に関する委員会

第1回 研究推進に関する委員会

日程 2019/5/25

メンバー 岡本 (木更津高専)、今泉 (JAXA)、小林 (理研)、後藤 (京大)、 (一部:山本 PO)

場所 J-village

内容

- ・各照射機関における今年度のマシンタイム、および実験準備状況関して情報を共有した。
- ・CdTe、InGaP、およびCIGS 太陽電池に関しての準備状況について情報を共有した。
- ・山本 PO を交えて、平成 30 年度報告内容におけるケーブルノイズの除去方法に関する議論 を実施した。

第2回 研究推進に関する委員会

日時 2019/06/28

参加者 岡本 (木更津高専) 今泉 (JAXA) 後藤 (京大) 小林 (理研) 奥野 (原子力機構)

場所 理化学研究所 和光 中性子工学棟

内容

- ・京都大学におけるケーブル照射試験に関しての準備状況の情報共有を実施し、太陽電池を 回路に接続した場合の、ケーブルノイズ測定に関する実験内容を議論した。
- ・各照射機関における照射環境の情報共有を実施し、CdTe 太陽電池のサンプル形状に関する 議論を実施した。
- ・理研 RANS のマシンタイムに合わせた、実験準備に関しての調整を行った。
- ・今年度実施する研究会の場所および招待講演者人数に関して決定した。

第3回 研究推進に関する委員会

日時 2019/9/19

場所 北海道大学

参加者 岡本(木更津高専)、今泉(JAXA)、後藤(京大)、奥野(原子力機構)

内容

・今年度実施予定の研究会の招待講演者の依頼者のリストを作成した。また、研究会の日程 に関して決定した。

- ・ JAXA 実施予定の電子線照射試験の日程の情報共有を行った。
- ・理研 RANS の照射試験日における実験工程を調整した。

第4回 研究推進に関する委員会

日時 2019/12/05

参加者 岡本 (木更津高専) 今泉 (JAXA) 後藤 (京大) 小林 (理研) 奥野 (原子力 機構)

場所 原子力機構 東京事務所

#### 内容

- ・線量計の試作機 OSAM の開発状況に関しての共有を行った。
- ・これまで取得したデータより、来年度の試作機開発に向けた方針を議論した。
- ・今年度実施予定の研究会の招待講演者、プログラムに関しての調整状況に関しての情報共 有を行った。

# (2) 本事業における研究会の実施

研究会名:「化合物太陽電池を応用した線量測定技術研究会」

研究会目的: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」の平成 30 年度採択研究課題として「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、2 年目の今年度に成果報告を兼ねた研究会を開催した。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専門家も含めた場で実施することで、今年度の開発の現状と、来年度の開発に向けた議論を行った。

日 時:令和2年1月24日(金)

場 所:いわき 岩惣 会議室

プログラム

10:00-10:05 開催の挨拶 岡本 保(木更津高専)

10:05-10:20 プロジェクト概要説明 岡本 保(木更津高専)

10:20-10:35 招待講演「福島第一原子力発電所燃料デブリ等分析について」

逢坂正彦 (原子力機構)

10:35-10:50 招待講演「宇宙放射線環境計測と検知器開発」 上野 遥(JAXA)

10:50-11:05 報告「放射線環境下における微少電流伝送技術」後藤康仁(京大)

11:05-11:20 報告「太陽電池放射線感受素子の耐放射線性」 今泉 充(JAXA)

11:20-11:35 報告「中性子線照射試験」 小林智洋(理研)

11:35-11:50 報告「太陽電池アルファ線誘起電流挙動の解明」奥野泰希(原子力機構)

11:50-12:00 総評 岡本 保(木更津高専)

実施による研究ニーズの把握・情報収集

・原子力機構 逢坂氏より、ご発表いただき、デブリおよび放射線物質の拡散状況に関す

る情報提供をいただいた。また、線量計に求める機能として、デブリの素性を特定するため 1 MeV 以上か、1 MeV 以下か区別できる程度の粗いガンマ線のエネルギー分解が重要との意見を頂いた。

・JAXA 上野氏より、ご発表いただき、宇宙過酷環境中での放射線計測手法に関しての情報 提供を頂いた。また、宇宙環境中での陽子線や電子線などの粒子線の種類分別方法として、 吸収線量率と、粒子数を測定することにより、線エネルギー付与量を測定し、粒子の種類を 分離する方法について議論を行った。この方法に関しては、太陽電池型線量計に関しても、 応用を検討することが可能であり、将来的な開発の方向性を議論した。

### 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、高耐放射線性微少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、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。

宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定では、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、光電流一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量研機構高崎研にてアルファ線(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一電圧特性を取得し、エネルギーおよびフルエンスごとに光電流一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、量研機構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。

高耐放射線性微少電流計測システム開発では、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いだし、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磁ノイズ、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磁ノイズを低減できるだけではなく、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。

ガンマ線照射、電子線照射実験では、コバルト 60 照射施設により、大線量率(最大 30 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。コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器(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。損傷評価については JAXA 側が行った。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。この照射容器を利用して来年度に大線量率での照射時起電力測定を行う計画である。また、第 3 照射室を利用した 1 Gy/h 以下の低線量率での測定においては起電力が小さくノイズの除去が困難であったため、今年度の京都大学の成果を反映して、来年度に低線量率での照射時起電力測定を行う計画である。コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器で用いられているセレン整流器の予期せぬトラブルのため、起電力測定を行ったエネルギーは 60~400 keV までと、計画に対して不十分な結果となったが、500 keV での電子線照射のテストは完了しており、来年度に 500 keV 程度までの電子線照射を行う計画である。

中性子線照射試験では、理研加速器駆動小型中性子源(RANS)のパルス長と周波数を調整することにより、中性子東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。

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。そのために照射設備に微少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ヤ生成量を解析した。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。

線量解析システムの作成では、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。ラボビュー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。

さらに、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。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 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。

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本i	単位
巫平里	名称	記号
長 さ	メートル	m
質 量	キログラム	kg
時 間	秒	s
電 流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光 度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
和工里	名称	記号	
面	責 平方メートル	m <sup>2</sup>	
体		$m^3$	
速 さ , 速 月	まメートル毎秒	m/s	
加 速 月		$m/s^2$	
波	毎メートル	m <sup>-1</sup>	
密度,質量密度	ま キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>	
面積密度	ま キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>	
比 体 和	責 立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg	
電流密度	まアンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>	
磁界の強き	アンペア毎メートル	A/m	
量濃度 <sup>(a)</sup> ,濃厚	ま モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>	
質 量 濃 月	ま キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>	
輝		cd/m <sup>2</sup>	
出 切 半	b) (数字の) 1	1	
比透磁率(	<sup>b)</sup> (数字の) 1	1	

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	回作の名称と記り	7 (1)(0		
			SI 組立単位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
	10 M	記り	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 (p)	m/m
立 体 角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 (b)	$m^2/m^2$
周 波 数	(d)	Hz		$s^{-1}$
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差 (電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静 電 容 量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁 束 密 度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	$^{\circ}\!\mathbb{C}$		K
光	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
	ルクス	lx	$lm/m^2$	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 (f)	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		$s^{-1}$
吸収線量, 比エネルギー分与,	グレイ	G	T/l	$m^2 s^{-2}$
カーマ	2 24	Gy	J/kg	m s
線量当量,周辺線量当量,	. (-)	_	7.0	9 -9
方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol
Charlest Contract and Contract			to the second second second	mm > f t = > >>f f t = >

- 酸素活性|カタール kat simple

  (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
  (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、患についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
  (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。(d)へルソは周朝現象についてのみ、ペクレルは放射性接種の統計的過程についてのみ使用される。(d)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度開局を表す数値はどもらの単位で表しても同じである。(f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。(g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM動告2(CI-2002)を参照。

表 4 単位の中に因有の名称と記号を含むSI組立単位の例

表 4. 単位 Ø	)中に固有の名称と記号を含		立の例
	S.	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量,エントロピー		J/K	$m^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg⁻¹ s A
吸 収 線 量 率	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射 強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m4 m-2 kg s-3=m2 kg s-3
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m³	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
$10^{24}$	ヨ タ	Y	10 <sup>-1</sup>	デ シ	d	
$10^{21}$	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c	
$10^{18}$	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	₹ <i>リ</i>	m	
$10^{15}$	ペタ	Р	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ	
$10^{12}$	テラ	Т	10 <sup>-9</sup>	ナーノ	n	
$10^{9}$	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p	
$10^{6}$	メガ	M	$10^{-15}$	フェムト	f	
$10^{3}$	丰 口	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a	
0			-01	18		

10-24 ヨクト

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位			
名称	記号	SI 単位による値	
分	min	1 min=60 s	
時	h	1 h =60 min=3600 s	
目	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	0	1°=(π/180) rad	
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad	
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>	
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg	

da

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で 表される数値が実験的に得られるもの

名称 記号		SI 単位で表される数値		
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J		
ダ ル ト ン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg		
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da		
天 文 単 位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m		

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
		1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノ ッ ト	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ ー パ	Np ¬	CI単位しの粉は的な関係は
ベル	В	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ シ ベ ル	dB ~	7.7.7.4.4.1.7.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダ イ ン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フ ォ ト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$
ガ ウ ス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 △ 」 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

	3	名利	ķ		記号	SI 単位で表される数値		
+	ユ		リ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq		
$\nu$	ン	卜	ゲ	ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ				k	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy		
$\nu$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv		
ガ		ン		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$		
フ	æ.		ル	131		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m		
メートル系カラット						1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg		
卜				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
力	П		IJ	ſ	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー),4.1868J (「IT」カロリー),4.184J(「熱化学」カロリー)		
3	ク		口	ン	μ	1 μ =1μm=10 <sup>-6</sup> m		