JAEA-Review 2019-033 DOI:10.11484/jaea-review-2019-033



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)

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業ー -平成 30 年度 Development of Dosimeter for Severe Radiation Environment near Reactor Pressure Vessel (Contract Research) -FY2018 Center of World Intelligence Project for Nuclear Science/Technology and Human Resource Development-

> 廃炉国際共同研究センター 木更津工業高等専門学校

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science National Institute of Technology, Kisarazu College

> 福島研究開発部門 福島研究開発拠点

Fukushima Research Institute Sector of Fukushima Research and Development

March 2020

日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

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(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) 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 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. 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, 2020

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 -

> 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

> > 廃炉国際共同研究センター

木更津工業高等専門学校

(2019年11月25日受理)

日本原子力研究開発機構(JAEA)廃炉国際共同研究センター(CLADS)では、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(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(IF)の廃炉等を始めとした 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「過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発」 について取りまとめたものである。

IF の炉内及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、IF 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た開発を行った。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の委託業務として、木更津工業高等専門学校が実施した成果に関するものである。

廃炉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

JAEA-Review 2019-033

Development of Dosimeter for Severe Radiation Environment near Reactor Pressure Vessel (Contract Research) – FY2018 Center of World Intelligence Project for Nuclear Science/Technology and Human Resource Development –

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science

National Institute of Technology, Kisarazu College

Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development Japan Atomic Energy Agency Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

(Received November 25, 2019)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Center of World Intelligence Project for Nuclear Science/Technology and Human Resource Development (hereafter referred to "the Project") in FY2018. The Project aims to contribute to solving problems in nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F), Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. 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 Dosimeter for Severe Radiation Environment near Reactor Pressure Vessel".

Since the radiation level in the reactors and buildings of 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	2
付納	禄 成果報告書	5

Contents

1.	Outline	e of Center of World Intelligence Project for Nuclear Science/Technology and Human Reso	ource
	Develo	opment	1
2.	Accept	ted Proposal in FY2018	2
Ap	pendix	Result Report	5

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。)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(平成 31 年度より新設)に再編した。

2. 平成 30 年度採択課題

平成 30 年度は「共通基盤型原子力研究プログラム」、「課題解決型廃炉研究プログラム」、「国際協力型廃炉研究プログラム」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 30 年 5 月 22 日 (火) ~6 月 22 日 (金)

平成 30 年 5 月 22 日 (火) ~7 月 12 日 (木) ※日英共同研究のみ

· 提案数:

共通基盤型原子力研究プログラム 49 課題(若手研究 14 課題、一般研究 35 課題)

課題解決型廃炉研究プログラム 28課題

国際協力型廃炉研究プログラム 5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、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、表 2-1 に掲げる 19 の採択課題を決定した。

表 2-1 平成 30 年度採択課題一覧(1/3)

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評価	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変 異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学

表 2-1 平成 30 年度採択課題一覧 (2/3)

課題名	研究代表者	所属機関
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

【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

表 2-1 平成 30 年度採択課題一覧 (3/3)

課題名	研究代表者	所属機関
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	大学共同利用機 関法人高エネル 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

国際協力型廃炉研究プログラム(日仏共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
採択なし	—	_

本報告書は上記のうち、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」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.

平成 30 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 301115)

成果報告書

平成 31 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 JAEA-Review 2019-033

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平成 30 年度「過酷炉心放射 線環境における線量測定装置の開発」の成果を 取りまとめたものです。

目次

概略 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	V
1. はじめに	1–1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2.1-1
2.2 平成 30 年度の成果の目標および業務の実施方法	2. 2–1
3. 平成 30 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
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) ···································	3.1-6
3.2 高放射線耐性微少電流計測システム開発(再委託先:京都大学) ・・・・・・・	3. 2–1
3.2.1 試験の目的	3. 2–1
3.2.2 太陽電池の非放射線環境下および放射線環境下における特性評価 ・・・・・・	3. 2–1
3.2.3 伝送線路の非放射線環境下および放射線環境下における特性評価 ・・・・・・	3. 2–3
3.2.4 電流増幅器およびケーブルの選定と電流測定精度の確認	3. 2–6
3.2.5 まとめと今後の課題	3.2–6
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. 3–7
3.3.3 線照射試験(連携先:JAEA) ···································	3.3–11
3.4 線量解析システムの作製(連携先:JAEA) ···································	3. 4–1
3.5 研究推進	3. 5–1
4. 結言	4-1

表一覧

ii

1	表 3. 1. 2-1	3種の太陽電池の短絡電流密度(Isc)の統計値 ······	3. 1–7
1	表 3.3.1-1	ラジオクロミックフィルムで測定した CW 加速器からの電子線線量位置依存	产性
			3. 3–4
Т.	表 3. 3. 3-1	太陽電池構成元素のクーロン障壁	3. 3–13
叉-	一覧		
	図 2.1-1 税	録量計開発に関する概要図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2. 1–2
	図 2.1-2 矽	研究計画の概要図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.1-2
	図 2.1-3 オ	≤研究の全体計画図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2.1–3
	図 3.1.1-1	スーパーストレート型 CdTe 太陽電池の構造	3. 1-1
	図 3.1.1-2	典型的なストレート型 CdTe 太陽電池の電流電圧特性 ・・・・・・・・・・	3. 1-2
	図 3.1.1-3	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	3.1-2
	⊠ 3.1.1−4	サブストレート型 CdTe 太陽電池の構造	3. 1–3
	⊠ 3.1.1−5	(a)face-to-face アニール、2nd CdCl₂処理のどちらも行わなかった場合	(b)
		face-to-face アニールを行わず、2nd CdCl2処理のみを行った場合、(c)	face-
		to-face アニールのみを行い、2nd CdCl2処理を行わなかった場合、(d)	face-
		to-face アニール、2nd CdCl2処理をともに行った場合のサブストレート	텔 CdTe
		太陽電池の Ⅰ-٧ 特性 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 1-4
	図 3.1.1-6	(a) face-to-face アニール、2nd CdCl2処理のどちらも行わなかった場	合、(b)
		face-to-face アニールを行わず、2nd CdCl2処理のみを行った場合、(c)	face-
		to-face アニールのみを行い、2nd CdCl2処理を行わなかった場合、(d)	face-
		to-face アニール、2nd CdCl2処理をともに行った場合のサブストレート	텔 CdTe
		太陽電池の分光感度特性	3. 1–4
	図 3.1.1-7	サブストレート型 CdTe 太陽電池のゼロバイアス時の空乏層幅および変換	効率
			3.1-5
	⊠ 3.1.2−1	線量計デバイス候補とした3種の太陽電池の外観と試料形状	3.1-9
	図 3.1.2-2	3種の太陽電池の典型的な光電流-電圧特性(AMO、136.7 mW/cm²)	
			3.1-9
	図 3.1.2-3	3種の太陽電池の短絡電流密度(Isc)値のヒストグラム ・・・・・・・	3. 1–10
	図 3.1.2-4	湿度耐性評価試験に用いた恒温恒湿槽(ESPEC SH-221) ······	3. 1-10
	⊠ 3.1.2−5	3種の太陽電池の短絡電流密度(Isc)値の恒温恒湿試験による変化	3. 1-11
	図 3. 2. 2-1	試験に用いた太陽電池の電流電圧特性の例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–2
	⊠ 3. 2. 2−2	太陽電池のガンマ線照射に伴う出力電流の線量率依存性	3. 2–2
	ً⊠ 3. 2. 3−1	90 mの RG58A/U ケーブルへのガンマ線照射の様子 ・・・・・・・・・・	3. 2–3
	ً⊠ 3. 2. 3−2	90 m の RG58/U ケーブルに 1 pA から 100 pA の電流を流した際の観測電波	充
			3.2–4

図 3.2.3-3	異なる長さの RG58A/U ケーブルにおけるガンマ線による電離損傷ノイズ	
		3.2–5
図 3.2.3-4	信号線に電圧を印加した場合の RG58A/U の電流電圧特性 ・・・・・・・・	3. 2–5
図 3.3.1-1	照射用試料ホルダー端栓の概略図	3. 3–2
図 3.3.1-2	第2照射室での照射時起電力測定のセットアップ ・・・・・・・・・・・	3. 3–2
図 3.3.1-3	第 2 照射室での TLD バッジ校正の様子 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3–2
図 3.3.1-4	(左)照射前の CIS 太陽電池と InGaP 太陽電池 (右)内径 10 cm の照射容	器
		3.3–3
図 3.3.1-5	CW 加速器電子線照射用ホルダーとラジオクロミックフィルムによる測定位	置
		3.3–4
図 3.3.1-6	ラジオクロミックフィルムの比吸光度と吸収線量の関係 ・・・・・・・・	3. 3–4
図 3.3.1-7	電子線照射時における CdTe 太陽電池の誘起電流および電子線フラックス	
		3.3–6
図 3.3.2-1	中性子照射設備 RANS 全景 ···································	3.3–7
図 3.3.2-2	中性子発生ターゲット(中心)と遮蔽体ならびに横穴の位置	3. 3-8
図 3.3.2-3	本研究で製作した遮蔽体内部において材料照射を行うための遮蔽材と治具	
		3.3-8
図 3.3.2-4	減速材厚さ20、40、60 mmに設定した場合の中性子エネルギースペクトル	計算
	結果	3.3–9
図 3.3.2-5	中性子照射した CdTe 太陽電池のガンマ線エネルギースペクトル ·····	3.3–9
図 3.3.2-6	GM 管により測定した中性子照射 CdTe 太陽電池の表面計数率	3. 3–10
図 3.3.3-1	軽イオン照射用チャンバー	3. 3–13
図 3.3.3-2	ビーム電流および太陽電池の電流の同時測定用治具	3. 3–13
図 3.3.3-3	CdTe 太陽電池の予備試験時の写真 ······	3.3–14
図 3.3.3-4	CdTe 太陽電池の 5 MeV ヘリウムイオン照射時の電流挙動 ······	3. 3–14
図 3.4-1 大	、陽電池用電極の写真	3. 4–1
図 3.4-2 と	ピコアンメータの写真 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3.4-2
図 3.4-3 電	『流取得ソフト動作時の写真 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 4–2

略語一覧

1F	:	Fukushima Daiichi Nucler 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)
DEGBE	:	diethylene glycol monobutyl ether
		(ジエチレングリコールモノブチルエーテル)

iii

ITO	:	indium tin oxide	(イン	・ジウム	・スズ	酸化物)
LIV	:	light-current-voltage		(光電	流電圧)
PCV	:	primary containment ves	sel	(原子	炉格納	容器)
TLD	:	thermoluminescent dosime	eter	(熱蛍	光線量	計)

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30m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、医療分野において放射線治療などで高い 放射線耐性を有する CdTe 半導体検出器は、CdTe 太陽電池として実用化が進んでいる太陽電池の 一つである。この研究では、これらの太陽電池に焦点を絞り 1F 炉心の高レベル放射線環境下で の放射線耐性の向上および耐性の評価を行い、実用試験データを取得する。

本研究における線量計開発は、1F、PCV 内部環境でのガンマ線線量測定を想定しており、開発 のプロセスは、I.太陽電池の開発および評価、II.遠隔地点のリアルタイム測定システムの開発、 III.様々な放射線による模擬試験の3つに分けられる。

「I.太陽電池の開発および評価」では、木更津工業高等専門学校(代表者:岡本)および宇宙 航空研究開発機構(JAXA)(代表者:今泉)が担当している。ここでは、(甲)CdTe、(乙) CIGS、(丙)InGaP太陽電池の設計および作製から太陽電池としての性能評価を実施している。 線量計として求められる太陽電池は、小型、表面側のむき出し構造、および均一な性能であり、 それぞれの太陽電池にこの3点の現状を整理した。

(甲) 平成 30 年度では、CdTe 太陽電池に関しては、3×4 cm²の小型化を達成している。また、 十分な湿度耐性を確認した。均一な性能は、スーパーストレート構造における成膜技術では、再 現性の高い性能が期待できる結果となった。むき出し構造については、サブストレート構造を検 討しており、作製条件の検討を実施した。次年度は、サブストレート型についての高性能化を試 みる。また、CdTe 太陽電池のアルファ線、電子線(ベータ線)、ガンマ線による放射線劣化デ ータを取得し、劣化特性を明らかにするとともに使用限度の目安を得る。

(乙) 平成 30 年度では、CIGS 太陽電池に関しては、むき出し構造で 3×2 cm²の小型化を達成 している。また、太陽電池の電気特性を測定し、その電流出力(短絡電流密度)データの統計処 理から今後の検討に用いることが適当な太陽電池を選定した。さらに、十分な湿度耐性を確認し た。次年度は、CIGS 太陽電池のアルファ線、電子線(ベータ線)、ガンマ線による放射線劣化 データを取得し、劣化特性を明らかにするとともに使用限度の目安を得る。

(丙)平成 30 年度では、InGaP 太陽電池に関しては、むき出し構造で 1×1 cm²の小型化を達成

V

している。InGaP 太陽電池の電気特性を測定し、その電流出力(短絡電流密度)データの統計処 理から今後の検討に用いることが適当な太陽電池を選定した。さらに、十分な湿度耐性を確認し た。次年度は、InGaP 太陽電池のアルファ線、電子線(ベータ線)、ガンマ線による放射線劣化 データを取得し、劣化特性を明らかにするとともに使用限度の目安を得る。

「II.遠隔地点のリアルタイム測定システムの開発」では、京都大学(代表者:後藤)および日本原子力研究開発機構(JAEA)(代表者:奥野)が担当している。ここでは、検出器から取得される電流信号を長距離ケーブルで輸送し、線量の解析システムの構築を実施している。検討されている線量計では、太陽電池から出力される微少な電流を数十mのケーブルで輸送する。そして、 ピコアンメータで微少電流のA/D変換を行い、プログラムにて、電流信号から線量を解析する。 そのため、放射線環境中で、ケーブル内の電流ノイズやリーク電流が電流信号に与える影響を解 明する必要がある。平成 30 年度では、非照射環境およびガンマ線照射環境にて、ケーブルに生 じる電気的なノイズや電離損傷ノイズを観測しその値を定量的に求めた。また、その結果をもと に、電流増幅器および伝送線路を選定し、長距離ケーブルによる微少電流測定系を構築した。ま た、太陽電池の電流信号を取得するプログラムを作製し、放射線環境にて、太陽電池にガンマ線 を照射した場合、電流信号を取得することが可能であることを確認した。

「III.様々な放射線による模擬試験」では、大阪府立大学(代表者:秋吉)、理化学研究所 (RIKEN)(代表者:小林)、JAEA(代表者:奥野)が担当している。ここでは、PCV内部で想 定されるアルファ線、ガンマ線、電子線(ベータ線)、中性子線の模擬放射線を用いた太陽電池 の照射試験を実施している。太陽電池の照射試験において、放射線照射中に太陽電池の電流をそ の場で測定するシステムを構築することが重要である。平成 30 年度では、それぞれの機関の加 速器および放射性核種の線源にて、放射線照射中に太陽電池の電流を測定するシステムを構築し た。

また、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。CLADSの奥村啓介研究員と 1F 現場のニーズと本研究のシーズに関して意見を伺った。また、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。

平成 30 年度においての研究成果は、国内学会での発表:2件、委員会での報告: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太陽電池が、ガンマ線 環境下での電流挙動が線量計として十分使用可能であることを解明したこと」は、本研究におけ る重要な知見である。

次年度では、それぞれの太陽電池素子に対して、アルファ線、電子線(ベータ線)、ガンマ線、 中性子線の照射試験を行う。照射中の太陽電池の電流を測定し、線量計としての特性を取得する。 また、太陽電池型線量計の実現のため、ガンマ線線量測定のための試作機を作製する。 1. はじめに

IF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は、一般に製品化された放射線計 測装置では性能・機能上の限界があり、IF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。IF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 影響で、高電圧を印加することができない。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、医療用に開発されてきた 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. 高放射線耐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. 高放射線耐性測定システムの実現」: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、電子線(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、電子線(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 高放射線耐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、CIS 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 CIS 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、JAEA(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、電子線 (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 JAEA (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 RIKEN (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。

本研究の全体計画図を図 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) 高放射線耐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大、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 JAEA が担当する。(4)については JAEA 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



図 2.1-2 研究計画の概要図

	2019 年度	2019 年度	2020 年度
	(平成 30 年度)	(平成 31 年度/	(令和2年度)
		令和元年度)	
(1) 太陽雷池式放	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
射線感受素子に関		(木更津高専)	
する研究	宇宙用太陽電池の 選定・作製	宇宙用太陽電池の	選定・作製・評価
		(JAXA)	
(2) 高放射線耐性微少電流計測シス	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
アム開発		(京都大)	
	ガンマ線・電子線 照射試験の準備	ガンマ線・電	子線照射試験の実施
		(大阪府大)	
(3) 放射線照射実 験	中性子線照射試験 の準備	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	(RIKEN)	
	の準備	アルファ線照射	試験の照射試験の実施
	-	(JAEA)	
(4) 線量解析シス	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
アムの作衆		(JAEA)	
(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

図 2.1-3 本研究の全体計画図

2.2 平成 30 年度の成果の目標および業務の実施方法

平成30年度の計画の概要は下記の通りである。

- (1) 太陽電池式放射線感受素子に関する研究
- ① CdTe 太陽電池式放射線感受素子の作製

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

② 宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定(再委託先: JAXA)

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

(2) 高放射線耐性微少電流計測システム開発(再委託先:京都大学)

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

(3) 放射線照射実験

① ガンマ線照射、電子線照射実験(再委託先:大阪府立大学)

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

② 中性子線照射試驗(再委託先:RIKEN)

中性子束調整用照射治具の作製を行うとともに、エネルギー調整用減速材ブロックの調達 を行う。材料照射を行うための準備として、器具作製、物品調達を行い、中性子エネルギー スペクトルの取得を開始する。 ③ アルファ線照射試験(連携先: JAEA)

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

(4)線量解析システムの作製(連携先:JAEA)

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

(5)研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに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. 平成 30 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

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

スーパーストレート型 CdTe 太陽電池の構造を図 3.1.1-1 に示す。この構造の太陽電池の 作製方法は次の通りである^{(1), (2)}。ITO 付きのガラス基板上(Corning Eagle XG あるいは Corning1737) に化学気相成長法 (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 420~440℃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400~600℃の範囲で変化させて成膜を行った。 CdTe 層の膜厚は1~10 μm程度である。CdTe 膜の成膜後に、CdTe 層の高品質化のためにCdCl₂ 処理を行った。CdCl₂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℃で ある。



light 図 3. 1. 1-1 スーパーストレート型 CdTe 太陽電池の構造

この構造の太陽電池の作製を行い、太陽電池特性の測定を行ったところ、特に短絡光電流 密度について 24~25 mA/cm²程度の値が再現性よく得られた。図 3.1.1-2 に典型的なストレ ート型 CdTe 太陽電池の電流電圧特性を示す。なお、試料のサイズについては、3×4 cm²の 小型を達成した。



図 3.1.1-2 典型的なストレート型 CdTe 太陽電池の電流電圧特性

今年度はこれらの試料へのガンマ線、電子線(ベータ線)、アルファ線、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。電子線(ベータ線)、アルファ線、 中性子線照射試験については試験方法、結果を一括して 3.3 節で述べる。図 3.1.1-3 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。



図 3.1.1-3 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

この実験は前年度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今年度も本 プロジェクトにて継続して実施したものである⁽³⁾。この結果より、ガンマ線の線量が 2.6 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。

さらに、フレキシブル放射線感受素子の作製を目指して、従来のスーパーストレート型と は逆の構造を有するサブストレート型 CdTe 太陽電池の作製・評価を行った。本研究では、 図 3.1.1-4 に示すような 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⁽⁴⁾。CSS 法による CdTe 膜の成膜後、415℃で CdCl₂処理を行った。 その後、Cu 添加したジェ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 CdCl₂処理)を行った。さらに 2nd Cu ドーピング (Cu 密度 1,400 ppm)を行った。今年度は、CdS 成膜後の熱処理を行った場合、行わなかった場 合の試料を作製し、これらの熱処理の効果を検討した。



図 3.1.1-4 サブストレート型 CdTe 太陽電池の構造

図 3.1.1-5 に (a) face-to-face アニール、2nd CdCl₂処理のどちらも行わなかった場合、(b) face-to-face アニールを行わず、2nd CdCl₂処理のみを行った場合、(c) face-to-face アニールのみを行い、2nd CdCl₂処理を行わなかった場合、(d) face-to-face アニール、2nd CdCl₂処理をともに行った場合の I-V 特性を示す。(a) ~ (d) は 2nd Cu ドーピングを行っている。比較のために、2nd Cu ドーピングを行わない場合で、(i) face-to-face アニール、2nd CdCl₂処理のどちらも行わなかった場合、(ii) face-to-face アニール、2nd CdCl₂処理のどちらも行わなかった場合、(ii) face-to-face アニールおよび 2nd CdCl₂処理 をともに行った場合の結果を破線で示す。まず、(i) と (a) を比較すると、混晶化促進のための熱処理を行わない場合でも、2nd Cu ドーピングの効果によりセル特性がわずかに改善している。また、(a) ~ (c) を比較すると face-to-face アニール、2nd CdCl₂処理のいずれかのみ

でも特性が改善している。しかし、(d)に比べると変換効率は非常に低く、face-to-face ア ニール、2nd CdCl₂処理の両方が高効率化のために必要であることがわかる。図 3.1.1-6 に 図 3.1.1-5 に示した試料の分光感度特性を示す。(ii)の場合のみ、800 nm 付近の感度が増加 している。これは、熱処理により Cu アクセプタが不活性化し、CdS/CdTe 付近の内部電界が 弱まり、裏面電極付近の内部電界でキャリヤが収集されていることを示唆している。(a)~ (d)については、2nd Cu ドーピングによるアクセプタ密度の増加によりそのような現象は見 られていない。



図 3.1.1-5 (a) face-to-face アニール、2nd CdCl₂処理のどちらも行わなかった場合、(b) face-to-face アニールを行わず、2nd CdCl₂処理のみを行った場合、(c) face-to-face アニールのみを行い、2nd CdCl₂処理を行わなかった場合、(d) face-to-face アニール、2nd CdCl₂処理をともに行った場合のサブストレート型 CdTe 太陽電池の I-V 特性



図 3.1.1-6 (a) face-to-face アニール、2nd CdCl₂処理のどちらも行わなかった場 合、(b) face-to-face アニールを行わず、2nd CdCl₂処理のみを行った 場合、(c) face-to-face アニールのみを行い、2nd CdCl₂処理を行わな かった場合、(d) face-to-face アニール、2nd CdCl₂処理をともに行 った場合のサブストレート型 CdTe 太陽電池の分光感度特性

face-to-face アニールおよび 2nd CdCl₂処理の効果を明らかにするために、C-V 測定を行った。それぞれの試料のキャリヤ密度を比較するために、ゼロバイアス時の空乏層幅を比較した。図 3.1.1-7 に各試料のゼロバイアス時の空乏層幅および変換効率を示す。これまでに報告した通り、2nd Cu ドーピングを行わない場合で(i) face-to-face アニール、2nd CdCl₂処理のどちらも行わなかった場合、(ii) face-to-face アニールおよび 2nd CdCl₂処理をともに行った場合の結果を見ると、face-to-face アニールおよび 2nd CdCl₂処理の効果で空乏層幅が大幅に増加している。これは熱処理により Cu アクセプタが拡散あるいは不活性化したためと考えられる。CdS/CdTe 界面混晶化により変換効率はわずか増加はしているが、2%以下の変換効率である。これはアクセプタ密度の減少が原因であると考えらえる。そのため、(d) では 2nd Cu ドーピングの効果で変換効率が大幅に増加したと考えらえる。(a)、(b)、(c) では(d) に比べると空乏層幅が小さくなっている。これは、熱処理によるアクセプタ密度の低下の程度が(d) よりも小さく、同条件で 2nd Cu ドーピングを行ったことにより過度に Cu が添加されたためと考えらえる。そのために(d) に比べると変換効率が低くなったと考えることもできる。

face-to-face アニールおよび 2nd CdCl₂処理をともに行い、2nd Cu ドーピングを行うこと で、現在までのところサブストレート型 CdTe 太陽電池で変換効率 9.9% (Jsc: 22.6 mA/cm², Voc: 0.704 V, FF: 0.619)を達成している⁽⁴⁾。



の空乏層幅および変換効率

参考文献

- 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 (2017) 08MC02.
- (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] (2013) 102301.

- (3) 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] (2016) 635-638.
- (4) 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 (2019) SBBF08.

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

(1) 検討対象とする太陽電池種の選定

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

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

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

(2) 供試体の準備と選定

供試体として用いる前記3種の太陽電池を、以下のように入手した。

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

これらの太陽電池試料に対し、太陽電池の基本出力特性である光照射下電流-電圧(LIV) 特性を測定した。測定条件は、光強度:136.7 mW/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。3 種の太陽電池の典型的な LIV 特性を図 3.1.2-2 に示 す。本研究では、太陽電池デバイスを線量検知デバイスとして用いる可能性を検討する。し たがって、最も重要な出力特性パラメータは電流出力である。一方、太陽電池の代表的な電 流出力特性パラメータは短絡電流密度 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)である。そこで、取得した LIV データより Isc 値に対して統計処理を行った。その結果を表 3.1.2-1 に示す。また、度数分布(ヒスト グラム)を図 3.1.2-3 に示す。これらそれぞれの試料母集団の中から、Isc 値が±σ (標準 偏差)の範囲に入る試料を抽出し、以後の実験的検討の供試体として選定した。その数は表 3.1.2-1 最下段に示している。CdTe 太陽電池については試料の母数が少ないため、統計値の 信頼性が低くあまり参考とならない。次年度以降の供試体としては、今後作製する試料に対 して同様の出力評価を行い、供試体を抽出・選定する予定である。

	InGaP 太陽電池	CIGS 太陽電池	CdTe 太陽電池
サンプル数	104	73	9
平均值	13.34 mA/cm ²	52.83 mA/cm ²	29.16 mA/cm ²
中心值	13.37 mA/cm ²	52.76 mA/cm 2	29.3411 mA/cm 2
標準偏差σ	0. 142 mA/cm^2	0.828 mA/cm ²	0.461 mA/cm ²
土σ内サンプル数	59	52	6

表 3.1.2-1 3種の太陽電池の短絡電流密度(Isc)の統計値

ここで、Isc の絶対値について述べる。太陽電池は基本的に太陽光という白色光を受光し て発電するデバイスであり、その光吸収端波長はその半導体材料のエネルギーギャップ Eg に対応して決定される。今回検討対象とした3種の太陽電池材料のEg 値は InGaP: 1.85 eV、 CIGS: 1.1 eV、CdTe: 1.4 eV であり、これより各々の光吸収端波長はおよそ InGaP: 670 nm、 CIGS: 1130 nm、CdTe: 880 nm となる。したがって Isc 値の大きさは吸収波長領域幅によっ て CIGS>CdTe>InGaP となるが、これは当然太陽光を吸収した場合である。本研究では線量計 としての出力電流を検討するが、対象とする放射線すなわちアルファ線、電子線(ベータ 線)、ガンマ線は太陽光のフォトンと比較して極めて大きいエネルギーを有する。このため、 これら放射線による発生電流(の大きさ)について、太陽光照射時の Isc 値の大小で優劣を 判断するのは適当ではない。したがって、Isc の絶対値は特に意味を持たない。

(3) 湿度耐性の検討

前項にて選定した太陽電池 3 種の供試体より各 6 サンプルを任意抽出し、湿度耐性を評価 すべく恒温恒湿試験を実施した。試験条件は、1F 炉内環境に近いと考えられる、雰囲気:大 気、温度:30 ℃、湿度:95 %、試験時間:≧1000 hとした。また、太陽電池供試体はすべ て被覆、被膜、保護材などのないベア状態で試験に供した。これは、特に検知面側について 放射線の入射を考慮した場合、そのエネルギーや線量の低減を避けるためにもベア状態で使 用される可能性が高いと想定したからである。ただし、CdTe 太陽電池についてはスーパース トレート構造であるため、半導体検知層の前面に厚さ 1.0 mm のガラス基板が存在する。な お、試験装置として、図 3.1.2-4 に外観を示す ESPEC SH-221 を使用した。また、性能の変 化・劣化を評価する方法として、LIV 特性を測定し、Isc の変化をみた。

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

本試験の結論として、選定した3種の太陽電池デバイスは、1F 炉内の線量計デバイス候補 として、いずれも十分な耐湿性を有していると判断する。

参考文献

- (1) M. Imaizumi, T. Nakamura, T. Takamoto, T. Ohshima, M. Tajima, "Radiation degradation characteristics of component subcells in inverted metamorphic triple-junction solar cells irradiated with electrons and protons," Prog. Photovolt: Res. Appl., Vol. 25, pp. 161-174 (2017), DOI: 10.1002/pip.2840.
- M. Imaizumi, T. Sumita, S. Kawakita, K. Aoyama, O. Anzawa, T. Aburaya, T. Hisamatsu, S. Matsuda, "Results of Flight Demonstration of Terrestrial Solar Cells in Space," Prog. Photovolt: Res. Appl., Vol. 13, pp. 1-10 (2005), DOI: 10.1002/pip.601.
- (3) 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)₂ submodules," Conf. Rec. 37th IEEE Photovol. Special. Conf., June 19-24, Seattle (2011), DOI: 10.1109/PVSC.2011.6186681.
- (4) J. Klaer, R. Klenk, A. Boden, A. Neisser, C. Kaufmann, R. Scheer, H.-W.

Schock, "Damp heat stability of chalcopyrite mini-modules: evaluation of specific test structures," Conf. Rec. 31st IEEE Photovol. Special. Conf., Jan. 3-7, Lake Buena Vista (2005), DOI: 10.1109/PVSC.2005.1488137.



図 3.1.2-1 線量計デバイス候補とした3種の太陽電池の外観と試料形状



図 3.1.2-2 3 種の太陽電池の典型的な光電流-電圧特性 (AMO, 136.7 mW/cm²)



図 3.1.2-3 3種の太陽電池の短絡電流密度(Isc)値のヒストグラム。青線は中心値と±σの 範囲を示す。



図 3.1.2-4 湿度耐性評価試験に用いた恒温恒湿槽 (ESPEC SH-221)





図 3.1.2-5 3種の太陽電池の短絡電流密度(Isc)値の恒温恒湿試験による変化。縦軸は初期 値を1に規格化した保存率。

3.2 高放射線耐性微少電流計測システム開発(再委託先:京都大学)

3.2.1 試験の目的

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、商 用周波のラインから来るノイズなどもあり、これらのノイズが信号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の大きさなどを予め把握し、必要となる電 流計測の精度を確認することが本試験の目的である。

そこで、本研究においてはセンサの候補となっている太陽電池について、通常環境および 放射線環境下における出力電流と、実環境に近い長さの伝送線路において発生する電離損傷 ノイズを評価することで、センサと測定系に求められる感度と精度を評価した。また適切な 伝送線路を選定するために、異なる伝送線路の電離損傷ノイズを評価した。以上の結果から、 センサ出力の微少電流を測定するための電流増幅器を選定し、その電流測定精度を通常環境 で確認した。

3.2.2 太陽電池の非放射線環境下および放射線環境下における特性評価

(1) 試験に用いた太陽電池

本試験では、放射線検出センサとして利用する太陽電池の候補のうち、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)の特性を評価した。CdTe 太陽電池は木更 津工業高等専門学校により提供を受け、InGaP については宇宙航空研究開発機構より提供を 受けた。それぞれの写真は図 3.1.2-1 に示したとおりである。

(2) 測定方法

太陽電池の電流電圧特性は、電圧印加と電流測定を同時に行うことのできるソースメータ (ケースレー 2612B)を用いて行った。測定には同社が提供したソフトを用いた。太陽電池 と測定系の接触は、CdTe 太陽電池については、プローブを抑えつける専用の治具を用いて行 った。InGaP 太陽電池については、電極に銅線を半田付けすることで行った。放射線として はコバルト 60 のガンマ線を利用した。ガンマ線照射は、京都大学複合原子力科学研究所の コバルト 60 ガンマ線照射装置を利用した。照射室内に同軸ケーブル(RG58A/U)を複数本導 入し、ガンマ線照射時の電流電圧特性の測定を行った。太陽電池を線源から異なる距離に配 置することで、100 Gy/h から1 kGy/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 ディケイファクターを乗ずることで行った。

(3) 測定結果

図 3.2.2-1 に太陽電池の電流電圧特性を示す。図 3.2.2-1(a)は CdTe 太陽電池、図 3.2.2-1(b)は InGaP 太陽電池の特性で、それぞれ光を照射しない状態と、室内の光を照射した場合の特性を同じ図に示している。前者は、以前に得た結果を描きなおしたものである⁽¹⁾。いずれも、光を照射した場合には、暗時の電流電圧特性がシフトした形になっており、光の検出 を行っていることがわかる。InGaP については、立ち上がり電圧が通常のものと比較してや





図 3.2.2-2 に太陽電池のガンマ線照射下で生じる電流の線量率依存性を示す。図 3.2.2-2(a)は CdTe 太陽電池、図 3.2.2-2(b)は InGaP 太陽電池であり、これについても、CdTe のデータは以前のデータをガンマ線検出器の観点で見直したものである⁽¹⁾。太陽電池には電圧は印加していない(短絡電流)。いずれもガンマ線の線量率の増加に対して出力電流が直線的に増加しており、ガンマ線センサとして有効な特性を示し、1 kGy/h といった高い線量率では 10 nA を超える電流が得られている。これらのグラフの傾きから、ガンマ線検出感度は



(a) CdTe 太陽電池⁽¹⁾、(b) InGaP 太陽電池

CdTe、InGaP それぞれ 120 pA/Gy、20 pA/Gy である。比較的低い線量率の領域、例えば 1 Gy/h といった線量率を測定するためには、数十 pA の電流検出を精度よく行う必要があるこ とが明らかとなった。

3.2.3 伝送線路の非放射線環境下および放射線環境下における特性評価

(1) 試験に用いた伝送線路

試験に用いた伝送線路は、一般に使用されている同軸ケーブル 2 種類(RG58A/U、1.5D-2V)、同軸ではないケーブルとして RS-232C である。後述するように伝送線路の特性を把握 するために、異なる長さにおける伝送線路の受ける放射線の影響を評価することを考慮して、 同軸ケーブルは 15 m のものを複数購入し、接続端子を用いて接続することで、最長 90 m の 計測まで行った。RS-232C ケーブルは 6 m のものを複数購入し、同様に接続端子を用いて長 い伝送線路を実現できるようにした。

(2) 測定方法

測定に用いた機材は 3.2.2 と同様である。試験の対象となる伝送線路の両端に、照射室外 から導入したケーブルをそれぞれ接続し、伝送線路に一定の電流を流す。ガンマ線照射の有 無により、測定される電流がどのように変化するかを調べることでガンマ線が伝送線路に及 ぼす影響を調べた。実際にセンサを使用する場合には、検出する放射線量によって流れる電 流の大きさが変化することを考慮して、異なる電流を流した場合について、ガンマ線がどの ように影響するかを調査した。後述するように、外部からの電気的なノイズと考えられる脈 動が観察された。このノイズの影響を考慮するために、測定は、30 秒程度の電流変化を記録 し、外部電界の影響と考えられる変動分を除去した。また、上記の測定回路では回路のイン ピーダンスは低い。実際にセンサを使用する場合には、センサ自身の持つインピーダンスが 影響する可能性があるため、開放した場合についても測定を行った。また、伝送線路の線間 に電位差が生じた場合に生じる効果についても検証した。詳しい測定は主に RG58A/U を用い て行い、その結果を元に、1.5D-2V および RS-232C の比較を行った。いずれの場合も、伝送 線路は直径 20 cm 程度の円形になるように束ね、それを上下にややつぶした形でガンマ線



(a)
 (b)
 図 3. 2. 3-1 90 mの RG58A/U ケーブルへのガンマ線照射の様子
 (a)線源の側から映した写真、(b)横から映した写真

源に対向させた。図 3.2.3-1 に 90mの RG58A/U にガンマ線照射を行った際の線源との位置関係を示す。図 3.2.3-1(a)の手前に見える金属の筒状のものの内部に線源が導入される。問題となるのは、線量率の見積もりである。過去に測定された、線源に対して横方向と縦方向の線量率の分布、さらに線源からの距離のデータから実験当日の線量率分布を求め、どの程度の範囲にあるかを粗く見積もった。

(3) 測定結果

前項で述べたように、測定される電流には脈動が含まれた。これは外部電界の影響と考え られる。伝送線路がうける影響というよりは、ソースメータ入出力部における端子が同軸構 造でないため、遮蔽効果が弱く、この部分が受ける影響と結論付けた。このことは、伝送線 路の長さを変えた場合でも強度に顕著な違いがなかったためである。この効果を除くために、 電流測定の測定時間・回数に加え、測定の間の時間を変化させるなどして測定を行ったが、 検討した範囲では大きな改善は見られなかった。このため、測定方法で述べたように、一定 時間の電流値を取得し、それの平均をとることで実質的な電流とした。また、この測定を複 数回行い、平均値を取って最終的な評価値とした。

図 3.2.3-2 に RG58A/U ケーブルに送り側のソースメータから 1 pA から 100 pA までの 電流を流した場合の受け側のソースメータへの流入電流と、それから算出した電離損傷ノイ ズを示す。線源からの距離は約 40 cm であり、線量率はおよそ 100 ~ 200 Gy/h 程度であ る。図 3.2.3-2(a)は 90 m のケーブルで観測された電流そのものであり、青の空丸は非照射 環境、赤の空丸はガンマ線照射環境下の値を示す。図から、300 pA 程度の電流が流れてい ることがわかる。図 3.2.3-2(b)は異なる長さの RG58A/U ケーブルおよび 15 m の 1.5D-2V ケ ーブルに誘起される電離損傷ノイズを示す。赤丸は 90 m の RG58A/U に、紫ひし形は 45 m の RG58A/U に、青三角は 15 m の 1.5D-2V に、水色三角は 15 m の RG58A/U に誘起する電離 損傷ノイズを示す。90 m の RG58A/U ケーブルが突出して高い電流を示している。あるいは、 15 m のケーブルの値が大きく、45 m のケーブルの電流値が低いとみることもできる。いず れのケーブルにおいても、ケーブルに流す電流の増加とともにガンマ線誘起電流が減少して



図 3.2.3-2 90m の RG58/U ケーブルに 1 pA から 100 pA の電流を流した際の観測電流 (a) 90 m ケーブルのソースメータでの電流値、(b) (a) から計算した電離損傷ノイズ

いる。90 mのRG58A/Uの結果が顕著であるが、45 m、15 mのRG58A/Uの場合も徐々に減少 しており、1.5D-2V についても同様である。測定は低い電流から高い電流へと変化させて行 った。すなわち、図中のプロットは同じ記号でみれば、左側が時間的に先になり、右に行く ほど時間的には後になる。一連の測定には 30 分程度の時間を要していることを考えると、 30 分間の時間変化と考えることもできる。このような現象が実際にあるとすれば、線量率測 定の上で大きな問題となる。

時間変化の問題はあるが、長さ依存性をわかりやすくするために、図 3.2.3-3 に RG58A/U ケーブルの電離損傷ノイズのケーブル長さ依存性を示した。青丸は RG58A/U の特性を、赤丸 は 1.5D-2V の特性を示す。なお、測定対象のケーブルまでの導入ケーブルの影響はほとんど ないことを確認した。15 mの 1.5D-2V ケーブルで観測された電流は 15 mの RG58A/U で観測 された電流と大きな違いはなかった。図中に示した破線は上側が 10 pA/m、下側が 3 pA/m である。仮に、100 m のケーブルを使用するとすれば、電離損傷ノイズ電流は最大で 1 nA 程度になる。この時の線量率を 100~ 200 Gy/h と見積もっているので、太陽電池の出力は 1 nA/Gy から 20 nA/Gy であろう。良好な S/N 比を得るためには、検出器の感度向上が望ま れる。

図 3.2.3-4 に信号線に電圧を印加した場合の 45 m および 15 m の RG58A/U に流れる電流を 示す。線源からの距離は 40 cm で、線量率は 100 ~ 200 Gy/h である。青い線が非放射線環 境、赤い線がガンマ線照射下であり、実線が電圧上昇時、破線が電圧降下時の特性である。 上昇と降下で電流値が異なるのは、ケーブルが長いことによる充電電流がそれぞれ逆向きに 流れるためである。この時は昇圧時の待ち時間を長く設定しなかったが、別の実験で、電圧 印加の後、電流測定までに時間を取った場合にはこのようなヒステリシスは観測されないこ とを確認した。ケーブルへの電圧印加で電流が流れることは、ケーブル自身もガンマ線に対 して感度を持つことを示す。太陽電池を放射線検出器として利用する上では、太陽電池はほ ぼ短絡状態になると考えられるので、電圧は発生しないものと考えられるが、注意が必要で ある。



図 3.2.3-3 異なる長さの RG58A/U ケーブルに おけるガンマ線による電離損傷ノイズ



図 3.2.3-4 信号線に電圧を印加した場合の RG58A/Uの電流電圧特性

9 ピンの RS-232C ケーブル 6 m および 12 m について同様の測定を試みた。最も離れたピン1 組を用いた。しかしながら、ガンマ線照射下でなくとも端子間電圧 0 V において 10 nA のオーダーの漏れ電流が発生した。接続に用いた BNC-蓑虫クリップの漏れ電流はガンマ線照射時でも 15 pA 程度であることから 10 nA オーダーの漏れ電流の原因とは考えにくい。RS-232C ケーブルの比較的大きな漏れ電流の起源は不明である。このケーブル自身は今回の用途には使用できない。ただし、ガンマ線照射を行った際、線間に電圧を印加した場合でも、電流の変化は見られなかった。漏れ電流が大きいために観測できなかったか、同軸ケーブルのように信号線とアース線が対向していないことから漏れ電流が流れにくいことが原因と考えられる。

3.2.4 電流増幅器およびケーブルの選定と電流測定精度の確認

適切な電流増幅器として iDC-12 (泰榮エンジニアリング)を選定した。この電流増幅器は、 ダイナミックレンジを 8 桁有し、5 桁の精度で電流計測を行うことができる。ノイズ抑制機 能も持つため今回の信号増幅に適している。内部に A/D 変換回路を擁しており、デジタル信 号出力を行う。附属のメーカ提供のソフトウェアを本委託研究費で購入したデスクトップ PC にインストールして測定環境を立ち上げた。上記の結果から、今回試験したケーブルの中で は、同軸ケーブルのほうが特性がよく、また RG58A/U と 1.5D-2V でほとんど特性が変わらな かったことから、1.5D-2V を採用することにした。1.5D-2V ケーブル 75 m を用いて電流測定 精度を確認した。開放時には電流は検出されなかった。時間変化を測定しても外部電界の影 響はほとんど見られなかった。伝送線路の評価のところで述べたように、実際にセンサを利 用するときには回路のインピーダンスは比較的低くなることを考慮して、伝送線路を抵抗で 終端したところ、抵抗に反比例する電流が検出された。インピーダンスが低いことによる回 路からの漏れ電流と考えられるが、ダイオードを接続した場合にはこのような問題は見られ なかった。太陽電池接続時には問題ないと考えられる。

3.2.5 まとめと今後の課題

平成 30 年度の試験により、太陽電池のガンマ線に対する感度を求めることができ、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。長いケーブルへの ガンマ線照射における線量率評価が課題であることが明らかになった。線量率の評価が難し いものの、100 Gy/h 程度の線量率の下では、電離損傷ノイズの評価においては、ケーブルに 発生する電離損傷ノイズが比較的長い時間ゆるやかに変化する事象も見いだされた。その結 果次年度は、今年度構築した微少電流測定システムを用いた評価を行うことになるが、その 際、伝送線路を含め、線量率をどのように見積もるかが課題となる。

参考文献

(1) 平成 27 年度 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 英知を結集した原子力科 学技術・人材育成推進事業「微小真空電子源アレイを用いた高い放射線耐性を持つ小 型軽量撮像素子の開発」成果報告書(平成 28 年 3 月).

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

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

(1) ガンマ線線量測定環境整備

大阪府立大学放射線研究センターの RI 事業所は極めて大規模な施設であり、平成 29 年に交付された改正後の法令における区分 1 に該当する。このため、危険時の措置の強 化、セキュリティの向上が求められており、大幅な利用形態の変更が検討されている。 既に本年度4月より、コバルト60 ガンマ線照射施設に於ける 24時間照射は実施できな くなっており、9-17時の担当者勤務時間内の照射に限られている事が明らかとなった。

このため限られた時間で大線量の照射を行うためには高い線量率での照射が必要とな り、線源に隣接した照射容器での照射が不可欠となる。コバルト 60 線源からは、ガン マ線と同時に電子線(ベータ線)も放出されており、すべての電子線(ベータ線)はステ ンレス容器内でエネルギーを失い熱に変わるため、線源表面はかなり高い温度となって いる。最も密に線源を配置した内径 40mmの照射ホルダーを利用する場合、線源を新規導 入直後は 150℃程度まで温度上昇が確認されている。現在当初の半分以下に線源強度が 減衰しているため、そこまでの温度上昇は考えられないが、何らかの方法で照射時の温 度を測定する必要がある。

さらに、以前から使用されてきた内径 40mm の試料ホルダーは、前回のコバルト 60 線 源交換から線源の長さが 30 cm から 40 cm に変わっており、線源ホルダー側を改修しな いと使用することができない事も明らかとなった。以前からこのホルダーは線源ホルダ ー側と干渉して試料引き上げの際に線源ホルダーごと上がってきてしまうことがあるこ とが知られており、放射線安全管理上問題があったため、温度測定が可能な試料ホルダ ー開発と同時に、線源ホルダーの開発も行う必要がある。

平成30年度は、上記の理由により温度測定、線量率測定は行っていないが、これまで に新しい試料ホルダーの設計は完了しており(図 3.3.1-1)、端栓の製作まで完了した。 平成31年度に水密試験を行い、問題がなければ熱電対信号取り出し用の端子取り付けな どを行っていき、ラジオクロミック線量計を用いた線量率評価を行う。



図 3.3.1-1 照射用試料ホルダー端栓の概略図。内径 30 mm のステンレスパイプ上下にダブル 0 リングのアルミ端栓を付け、0 リングの外側をネジで固定。水上までの信号伝達はカテゴリー6 の Ether ケーブルで行う。照射による劣化があるため、端栓より下側にトランシーバーを入れて 毎回交換する。

一方で、数100 mGy/h~数10 Gy/h 程度の線量率において、照射しながらの太陽電池からの起 電力測定を行うために大阪府立大学放射線研究センターの第2照射室を用いた照射試験を行った (図 3.3.1-2)。また、様々な環境での10 Gy 程度までの正確な線量測定を可能とするために、 TLD バッジを用いた線量計測を試みた。これまでに保有していた TLD バッジは過去の研究で大線 量の照射により正常な計測ができなくなってしまっていたため、平成30 年秋頃に米国にて新た な素子を入手し、本研究において標準場での校正を行い(図 3.3.1-3)、校正定数を個々のバッ ジについて確認した。



図 3.3.1-2 第 2 照射室での照射時起電 力測定のセットアップ



図 3.3.1-3 第2照射室での TLD バッ ジ校正の様子

(2) 1MGy 以上のガンマ線照射による影響評価

既存の太陽電池モジュールへの照射影響を評価するために、InGaP 太陽電池、CIS 太陽電 池について 1MGy 以上の大線量のガンマ線照射による線量増加に伴う影響評価を試みた(図 3.3.1-4)。しかしながら(1)で説明した理由により、内径10 cmの線量率の低い照射ホル ダーを利用せざるを得ないため、照射装置の占有状態と研究期間の関係で4.9 kGy/h × 19 h = 93.1 kGy の照射に留まった。照射後の試料は JAEA に送付しており、特性評価を行っ た。



図 3.3.1-4 (左) 照射前の CIS 太陽電池と InGaP 太陽電池 (右) 内径 10 cm の照射容器

(3) 電子線照射時線量測定を行うための測定環境整備

電子線照射時に使用しているホルダーは、試料を照射している部分と別の場所で電流測定 を行っており、電子ビームはスキャナーを用いて振動させることで均一化を図っているが、 線量の位置依存性が問題となっていた。これまでに JAXA との共同研究によりファラデーカ ップ位置をスキャンしていくことにより上下方向の線量率位置依存性を評価してきたが、時 間依存性も入るため明確な傾向は得られていなかった。そのため、ラジオクロミックフィル ムを用いて照射ホルダーの各部分での線量測定を行った(図 3.3.1-5)。照射後のフィルム は汎用の吸光光度計を用いて、波長 510 nm での吸光度を評価し、カタログデータをデジタ イザーで取込みフィッティングした関数(図 3.3.1-6)から線量を求めた((表 3.3.1-1))。照射は200 keV および40 keV で行い、照射量はそれぞれ 6.0×10¹³ e/cm²、3.0×10¹³ e/cm²(3.8 μC/cm², 1.9 μC/cm²)までファラデーカップからの電流を積算して測定した。



図3.3.1-5 CW加速器電子線照射用ホルダー とラジオクロミックフィルムによる測定位 置(#1の側が上方)。フィルムは1 cm 角 で、厚さ50µm。



図 3.3.1-6 ラジオクロミックフィルム の比吸光度と吸収線量の関係

存性

	Absorbed dose / kGy				
Desition	200keV		40keV		
POSILION	6×10^{13}	3×10^{13}	6×10^{13}	3×10^{13}	
	e/cm^2	e/cm^2	e/cm^2	e/cm^2	
1	61.4	45.1	30.8		
2	61.7	43.8	34.8	14.7	
3	56.8	45.0	38.1	23.6	
4	44.1	27.6	25.8		
5	62.3	28.0	34.6		
6	55.9	32.7	35.5	18.3	

照射に当たって、過度な照射によりフィルムが分解しガスの発生により加速器に重大な影響を与えることを防ぐために、線量の見積を行った。これまでに行われたファラデーカップでの測定から、代表的な照射条件 10¹² e/cm²・s @ 200 keV として線量を計算すると、全エネルギーフラックスは $2 \times 10^5 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{12} = 3.2 \times 10^{-2}$ J/cm²・s となる。ここで、200 keV 電子線の飛程は、アルミ(2.7 g/cm³) で 164 μ m, 1 cm² の質量は 4.4×10⁻² g となる (水でも全く同じ 4.4×10⁻² g であまり材質に依存しない)。

最大飛程までの範囲で平均化した吸収線量率は、

 3.2×10^{-2} J/cm² · s / 4.4×10⁻⁵ kg/cm² = 0.73 kGy/s

となり、同様に 40 keV では 0.15 kGy/s として見積られた。ラジオクロミックフィルムで 510 nm での吸光度計測に適した線量は数 Gy~200 kGy 程度の範囲であり(より高感度な 600 nm での吸光度計測は数 Gy~20 kGy 程度)、60 s で 200 keV では 44 kGy、40 keV では 8.8 kGy となるため、上記の条件で 60 s, 30 s 相当の、 6×10^{13} , 3×10^{13} e までビーム電流を積 算してターゲットホルダ上の線量分布測定を行う照射計画を策定した。

今回の計測では線量分布を把握するためにフィルム一枚での計測を行ったが、200 keV で は密度1 g/cm³ では最大飛程 440 µm にもなる一方でフィルム厚さは約 50 µm であり、実際 の太陽電池が受ける吸収線量を反映できていない。一方で 40 keV では組織透過プラスチッ ク (1.127 g/cm³) の場合で、最大飛程は 25.5 µm であり、全量がフィルムに吸収されている ため、試料への吸収線量を反映しているといえる。

いずれにしても測定結果は電流量から見積った線量よりも大幅に大きい値(40 keV で3 倍 程度、200 keV では厚さに対して均等割すると 10 倍以上)を示しており、電流計測の際に二 次電子の影響などを考慮する必要性と、カタログデータではなく、標準場での同じロットの ラジオクロミックフィルムの校正の必要性、2 mm 程度の厚さがある PMMA 線量計など他の線 量計を用いた線量測定の必要が示唆された。

なお、大阪府立大学放射線研究センターの CW 加速器は平成 30 年 11 月 20 日に加速電圧が 全く上がらなくなるトラブルが発生した。オシレーター側に問題はなく、高圧タンク内の CW 回路の短絡によるものと考えられた。このため高圧タンク開けの手順などについて検討を行 っていたが、平成 31 年 1 月 9 日に状態確認を行ってみたところ、やや印加電圧が不安定な がらも少なくとも 400 kV までは電圧上昇が可能であり、ビーム照射も問題無く実施できた。 情報収集により、セレン整流器の破損と、自己修復による物であると結論づけた。エージン グを行うことで印加電圧も安定し、60 kV での照射もほぼ問題無く実施できるようになった。 その後、平成 31 年 1 月 29 日に再度試運転を行い、照射試験を行うのに問題ないレベルの安 定度を達成しており、時々電圧がスパイク状に上がることがあるが、90°マグネットでビー ムを曲げておりエネルギーが変動するとターゲットからビームが外れる(ターゲットに当た る電子のエネルギーは目標エネルギーの±10%以内に収まる)ため、照射試験を行う上で問 題がないことを確認した。

(4) 弾き出し損傷評価のための数十 keV 程度の低エネルギー電子線照射

従来、大阪府立大学放射線研究センターの CW 加速器では、60 keV 以上での電子線照射を 行う事が可能であり、 様々な材料中の元素の弾き出ししきいエネルギーを求める研究に用 いられてきた。今回、CW 加速器の不調に伴い様々な運転条件を調整する中で、40 keV 程度 でも安定した照射を行うことが可能であることが見いだされた。これにより従来評価ができ なかった、弾き出ししきいエネルギーが低い元素についても検証を行う事が可能となった。 本年度は平成 31 年 3 月 19-22 日のマシンタイムにおいて 40 keV での照射を CdTe 太陽電池 に対して行っており、JAEA 側でその評価を行った。

(5) CdTe 太陽電池の電子線照射の予備試験

木更津高専より提供された CdTe 太陽電池を用いて、CW 加速器において電子線照射試験を 実施した。CdTe 太陽電池の誘起電流および電子線フラックスを同時に測定した結果を図 3.3.1-7 に示す。この結果では、電子線照射中の CdTe 太陽電池に電流が発生していることが 明らかになった。そのため、CdTe 太陽電池では、線量計として電子線を検出することが可能 であると考えられる。電流挙動としては、照射開始直後の誘起電流および電子線フラックス の関係は、1.3×10⁻⁴ A および 7.1×10¹⁰ cm⁻² であった。しかし、38000 秒付近では CdTe 太陽 電池の誘起電流が少し低下している。これは、測定中に太陽電池に接触していた電極が、浮 き上がり、接触抵抗が増加しために発生したためである。そのため、38000 秒以前の CdTe 太 陽電池の電流挙動に着目すると、電子線フラックスの減少に対して、CdTe 太陽電池の誘起電 流も同様の傾向で減少している。そのため、フラックスに依存した誘起電流が生成している 可能性がある。次年度では、CdTe 太陽電池の誘起電流のフラックス依存性について解明を行 う。



図 3.3.1-7 電子線照射時における CdTe 太陽電池の誘起電流および電子線フラックス

3.3.2 中性子線照射試験(再委託先:理化学研究所)

(1) 中性子照射設備の構築

中性子照射施設は RIKEN 光量子工学研究センター中性子ビーム技術開発チームにある RANS (RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source) (1)を利用する。RANS は陽子線加 速器、ベリリウムターゲットおよび遮蔽体、中性子ビームラインから構成されている。図 3.3.2-1 に RANS の全景を示す。中性子ビームラインは主としてイメージング、回折試験を行 うために設計されており、中性子束は 10⁴ n/cm²/sec 程度と小さい。10⁹ n/cm²/sec 程度とさ れる 1F 環境には大幅に不足しており、ベリリウムターゲット近傍での照射が必須である。 そこで今年度は遮蔽体に開けた横穴(図 3.3.2-2)を用いて遮蔽体内部で照射を行うための 治具を調達した(図 3.3.2-3)。治具は黒鉛、ホウ素含有ポリエチレン(アルミ板で補強)、 鉛のブロックからなり、順に横穴に詰めて使用する。ホウ素含有ポリエチレン、鉛はそれぞ れ中性子、ガンマ線の遮蔽体である。最も内側に設置する黒鉛ブロックにはポケットを設け、 被照射試料をセットする。In-situ で電流測定を行う場合には、外部から黒鉛ブロックまで リード線を通すことが可能である。この治具は中性子ビームラインに射出される中性子束に はほぼ影響を与えないことから、他グループのマシンタイム中にも試料を長期間残置して照 射量を積み増すことが可能である。



図 3.3.2-1 中性子照射設備 RANS 全景



図 3.3.2-2 中性子発生ターゲット(中心)と遮蔽体ならびに横穴の位置



図 3.3.2-3 本研究で製作した遮蔽体内部において材料照射を行うための遮蔽材と治具

(2) 中性子エネルギースペクトルの評価

平成 30 年度は中性子エネルギースペクトルをシミュレーションにより算出した。ENDF/B-VII の核データをライブラリに追加したモンテカルロ粒子輸送計算コード PHITS (ver. 2. 93) (2)を用い、7 MeV の陽子をベリリウムに照射した際の発生中性子エネルギースペクトル (全 方向積分値)を計算した (図 3. 3. 2-4)。RANS ではベリリウムターゲット下流にポリエチレ ンの板を置いて中性子を減速している。今回の計算ではポリエチレン減速材の厚さを 20、40、 60mm とした。減速材の厚さを調整することにより、試料の放射化に対する影響が大きい熱中 性子の量を制御できるほか、熱中性子と高速中性子の比率を大幅に変更可能であることが示 された。今後行うべきは本デバイスの予想される投入環境に応じた照射条件の構築である。 また、放射化分析による実測を行い、計算の妥当性を評価したい。



図 3.3.2-4 減速材厚さ 20,40,60 mm に設定した場合の中性子エネルギースペクトル計算結果

(3) 中性子照射予備試験

ベリリウムターゲット近傍に CdTe 太陽電池を留置し、他グループの実験に相乗りして平 均陽子電流 50 µA、一日平均4時間の照射を9日間行った。今回は予備試験であるため、詳 細な照射パターン記録は省略した。約 30 日冷却後、ゲルマニウム半導体検出器を用いて測 定したガンマ線スペクトルを図 3.3.2-5 に示す。代表的なピークとしては、銀110m、インジ ウム 114m、アンチモン 124、バリウム 131 が確認された。量が最も多い銀とインジウムにつ いては、壊変形式としてベータ崩壊も存在する。その際放出された電子の分だけ電流が流れ るため、電流計測に影響がある。銀およびインジウムそれぞれの由来は電極と透明導電膜と 考えられ、ほかの材料に置き換えることは可能である。本結果はガラスやリード線の材質に ついても不純物を含めて吟味すべきことを示している。



図 3.3.2-5 中性子照射した CdTe 太陽電池のガンマ線エネルギースペクトル

図 3.3.2-6 に GM 管で測定した中性子照射 CdTe 太陽電池の表面計数率を示す。72 日経過時点 でも 2.7 kcpm を記録しており、管理区域外へ搬出して特性測定を行うことができない。こ の点においても材料選定に注意すべきといえる。銀110mの半減期は250 日、インジウム114m については 50 日である。



図 3.3.2-6 GM 管により測定した中性子照射 CdTe 太陽電池の表面計数率

参考文献

- Yoshie OTAKE: "RIKEN Compact Neutron Systems with Fast and Slow Neutrons", Plasma and Fusion Research, Vol. 13 pp. 2401017-1-4 (2018)
- (2) Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita, Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018).

3.3.3 アルファ線照射試験(連携先: JAEA)

タンデム加速器によるヘリウムイオンの照射試験の利用申請を行った。ヘリウムイオン照 射により試料の放射化がないことを放射線シミュレーションにより解析した。太陽電池にア ルファ線を照射する照射用試料台を設計した。CdTe太陽電池へヘリウムイオンを照射する予 備試験を実施した。

(1) JAEA 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環境中の線量挙動を理解するために、アルファ線照射時の電流挙動に関して解明する必要がある。しかし、1F環境下のアルファ線の線源を模擬するとき、濃縮されたアイソトープを大量に使用する必要がある。そのため、アイソトープを使用せずに、アルファ線の元素であるヘリウム照射時の線量計挙動を解明することが有効である。

JAEAのタンデム型加速器は、ヘリウム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 のヘリウムイオンの 挙動を解明できる JAEA のタンデム加速器は有効的である。そのため、本研究では、JAEA の タンデム加速器を使用し、5 MeV に加速したヘリウム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) JAEA のタンデム加速器の整備

JAEA タンデム加速器には、軽イオンターゲット照射室がある。本研究では、その照射室の ビームラインを使用する。試料照射時に使用するチャンバーを図 3.3.3-1 に示す。ヘリウム イオンビームは、矢印の方向で入射する。このチャンバーは、試料位置を上下方向に移動可 能であり、2 本の BNC 導入端子を有している。そのため、太陽電池の電流の測定に適したチ ャンバーである。しかし、試料ステージには、太陽電池を接続できる電極がない。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、ファラデーカップ付きの太陽電池の電流測定用治具を作製する必要があ る。本年度、設計したビーム電流および太陽電池の電流の同時測定治具を図 3.3.3-2 に示す。 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。次年度では、この治具を作製し、太陽電池の 照射試験を実施する。

(3) 試料の放射化に関する評価

加速器で加速された高エネルギーイオンをターゲットに照射する際、核同士の相互作用が 生じることによって放射化する可能性がある。放射化した場合、加速器の利用に制限がかか ること、また太陽電池の性能が変化することなどが発生する。そのため、試料の放射化の有 無を解明し、照射するヘリウムイオンのエネルギーにおいて、太陽電池の放射化がないこと が照射試験において重要である。イオン同士などの同符号の電荷を持つ素粒子の間のクーロ ン斥力に起因するポテンシャル障壁をもつ。原子核と他の素粒子を衝突させる場合には、タ ーゲット原子核の原子番号を Zx、ターゲット質量数を Ax、入射粒子の原子番号を Za、およ び入射粒子質量数 Aa とすれば、ポテンシャル障壁(Eb)は、以下の式で表される。

 $Eb=(Zx \times Za) / (Ax^{1/3}+Aa^{1/3})$ [MeV]

入射粒子はこの式で計算されるクーロン障壁を超えない限り、ターゲット原子核と反応を起 こしにくいので、放射化が起きにくいと考えられている。本試験では、InGaP、CIS、および CdTe 太陽電池を使用するため、それぞれの構成元素に関して、ヘリウムイオン入射時のクー ロン障壁の値を計算した結果を表 3.3.3-1 に示す。この結果、照射試験を予定している 5 MeV ヘリウムイオンにおいて、それぞれの太陽電池は、放射化がほとんどないことが明らか になった。

(4) CdTe 太陽電池の予備照射試験の実施

本年度は、JAEA のタンデム加速器を用いて、CdTe 太陽電池に関してヘリウムイオンを照 射する予備試験を実施した。図 3.3.3-2 の治具を用いた照射試験は次年度より行う予定であ るが、本年度は、CdTe 太陽電池にヘリウムイオンが入射した時に、電流が発生するかどうか 明らかにした。図 3.3.3-3 に本年度使用した照射試験の試料ホルダーの写真を示す。この試 料ホルダーは、CdTe 太陽電池に電極をハンダで接着し、ケーブルで信号を取り出す仕様であ る。また、このホルダーでは、試料に到達しているビーム電流は、測定できないため、ファ ラデーカップをビームラインにあるファラデーカップを使用し、太陽電池試料への照射前後 でビーム電流を測定した。CdTe 太陽電池の 5 MeV ヘリウムイオン照射時の電流挙動を図 3.3.3-4 に示す。照射前後でビームラインのファラデーカップによって測定したビーム電流 は、ヘリウムイオンの 15 nA であった。照射時の CdTe 太陽電池の電流挙動は、照射開始直 後から約 4 µA の電流が発生することが明らかになった。また、電流挙動は経時的に、少し 低下していくことが明らかになった。照射前後でヘリウムイオンのビーム電流が下がってい ないことから、これは CdTe 太陽電池がヘリウムイオンにより劣化している可能性がある。 そのため、ヘリウムイオン照射時の測定では、太陽電池の劣化を考慮した評価が重要である と考えられる。次年度の照射試験では、太陽電池のヘリウムイオン照射による劣化を詳細に 分析することにより、線量計素子としての挙動を明らかにする。

- 50 -

JAEA-Review 2019-033



図 3.3.3-1 軽イオン照射用チャンバー



図 3.3.3-2 ビーム電流および太陽電池の電流の同時測定用治具

元素	クーロン障壁 (MeV)
In	15
Ga	11
Ρ	6
Cu	10
Se	12
Cd	15
Те	16

表 3.3.3-1 太陽電池構成元素のクーロン障壁



図 3.3.3-3 CdTe 太陽電池の予備試験時の写真



図 3.3.3-4 CdTe 太陽電池の 5 MeV ヘリウムイオン照射時の電流挙動

参考文献

(1) Tayal D.C. (1997). Nuclear Physics. Himalaya Publishing House

3.4 線量解析システムの作製(連携先: JAEA)

現場技術員の作業では、様々な使用シーンが想定されるため、高耐衝撃性を持つ線量解析 用 PC を導入するとともに選定し、購入した。PC、微少電流測定装置、および太陽電池を接 続し、信号を取得するためのソフトウェアの作製をした。

(1) 線量計システムの構成に関する検討

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、⑤PCが必要である。 本試験では、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, BUFFALO 社製)を使用した。⑤PC 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) 電流測定システムの構築

図 3.4-1 に太陽電池の電極の写真を示す。本電極を用いて、太陽電池から電流信号を取り 出せることが可能になった。取り出された電流信号は、図 3.4-2 のピコアンメータに送られ、 A/D 変換が行われる。A/D 変換された信号は、PC で解析され、図 3.4-3 のようにモニターに 出力された。また、出力された信号は、ほとんどノイズがなく、光照射中のみに顕著な電流 信号が出力された。そのため、本システムで太陽電池の電流信号を PC へ取り込むことに成 功した。



図 3.4-1 太陽電池用電極の写真



図 3.4-2 ピコアンメータの写真



図 3.4-3 電流取得ソフト動作時の写真

3.5 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間の連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を 推進するための打合せや会議等を開催した。1F での線量計のニーズを整理するため、JAEA の CLADS 奥村研究員と打ち合わせを行った。

(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
開催日:11月29日
参加者:岡本(木更津高専)、後藤(京大)、秋吉(阪府大)、今泉(JAXA)、小林 (RIKEN)、奥野(JAEA)
場所:JAEA 東京事務所

第2回 研究推進に関する委員会

開催日:1月24日

参加者:岡本(木更津高専)、後藤(京大)、秋吉(阪府大)、今泉(JAXA)、小林 (RIKEN)、奥野(JAEA)

場所: JAEA 東京事務所

第3回 研究推進に関する委員会 開催日:2月9日 参加者:岡本(木更津高専)、後藤(京大)、今泉(JAXA)、小林(RIKEN)、奥野(JAEA) 場所:東京工業大学 大岡山キャンパス

(2) 専門家による線量計のニーズ整理

専門家: CLADS 奥村研究員 応対者: JAEA 奥野 2018/11/2 会議まとめ 場所 JAEA 原科研 第3研究棟 345号室

以下、議事録。

・福島第一原子力発電所(1F)の廃炉措置と英知事業の関係性に関するコメント -1Fの廃炉の実施部隊は IRID である。

-IRIDの中でも日立GEが主にロボットアームや線量測定の作業を行っている。 -2021年までに、一次原子炉格納容器(PCV)の周辺のデブリを取り出す予定。 -英知事業では、IFの過酷な環境を想定した新しい知見の想像を期待している。 -2019年度に燃料デブリの1回目の取り出し試験が行われる予定である。

・福島第一原子力発電所(1F)での線量測定の課題に関するコメント - 残留水素の影響で、高電圧を接続するシステムは、使用できない。 -PCV では、約10 Gy/h に相当する線量が実際に観測されている。

-IRID では、100 Gy 程度の線量に耐える線量計の開発が目標数値とされている。

-現状の線量計は、CeBr₄シンチレータと半導体検出器を組み合わせて電流モードで測定している。

-PCV 内の中性子フラックスはキュリウム 244 由来で、10²-10⁴ n/cm²/s と予想されている。 -燃料集合体付近では、500-1000Gy/h 程度の線量が予測されている。

-1 MeV 以上のユウロピウム 154 (1.3 MeV)、コバルト 60 (1.2 MeV)、 プラセオジム 144 (2.2 MeV)のガンマ線線量を検出したい。

-デブリを位置特定するために、放射線検出の指向性がほしい。

・奥村研究員からの本線量計開発へのコメント

-様々な検出器が検討されていることから、一つの武器に絞ってはどうか。特に、10MGyを 超える線量率での検出器の動作は、長期的な利用および 2021 年度より行われる燃料集合体 への調査において魅力的である。

-アクセス穴が10 cm Ф であるため、すべての投入機器を小さくすることが重要である。

ー遮蔽による指向性をもたせることが魅力的であるが、アクセス穴の 10 cm Φ に収めることができるかが課題である。

-ガンマ線エネルギー分解は、1 MeV 以上と以下を分析できる程度でも持つことができればいい。

-投入する機器の非電源化は、残留水素の爆発を低減するために魅力的である。

-デブリは、水中に落ちているので、水中環境での試験は魅力的である。

-デブリの位置特定のためには、ガンマ線測定および中性子測定を組み合わせた手法が有 効であると考えられているため、両方の測定に注力してはどうか。

-PCV内の溶融デブリからは、アルファ線は表面の酸化物で止まるため、ほとんど検出できないかもしれないので、必要性を考えること。

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、高放射線 耐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製を行った。

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

宇宙用太陽電池技術による素子の評価・選定では、InGaP太陽電池および CuInGaSe 太陽電池の 様々な構造の素子から宇宙工学で得られている知見を基に放射線耐性の高い太陽電池構造を有す るものを選択し、それらを入手した。上記 CdTe 太陽電池を加えた 3 種の太陽電池について初期 出力性能を測定・評価し、その母集団から出力性能分布において 1 σ 以内に入るものを選定し、 以後の検討に用いる供試体とした。また、その供試体用 InGaP 太陽電池、CuGaInSe 太陽電池およ び CdTe 太陽電池から各 6 素子を用いて恒温恒湿試験を 1000 時間まで実施し、湿度環境の影響を 明らかにした。

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

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

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

アルファ線照射試験では、JAEA タンデム加速器の利用申請が承諾され、次年度の照射試験の実施が可能になった。試料の放射化がないため、問題なく照射できることが明らかになった。

線量解析システムの作製では、PC、LabVIEW、C++、微少電流計、ケーブル、太陽電池を組み合わせて、太陽電池の電流信号を計測できるソフトウェアを作製した。

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

_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
本平里	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	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
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					
AI 立長 SI 組立単位	SI 組立単位				
名称	記号				
面 積 平方メートル	m ²				
体 積 立方メートル	m ³				
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s				
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2				
波 数 毎メートル	m ⁻¹				
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³				
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²				
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg				
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²				
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m				
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸				
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³				
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²				
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 ^(b) (数字の) 1	1				
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では	t物質濃度				

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI祖立単位			
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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。
 (h)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、量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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告2 (CI-2002) を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 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 ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
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	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
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)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
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	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
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 ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

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	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	۰	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 ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	$1 t=10^3 kg$	

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	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da	
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ 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 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	ci単位しの粉結的な間接け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

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 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
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 ⁻² =10 ⁻⁴ T		
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹		
(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						
名称				記号	SI 単位で表される数値	
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	11		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$