



## 放射線耐性の高い薄型SiC中性子検出器の開発 (委託研究)

—令和2年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

Development of Thin SiC Neutron Detector with High Radiation Resistance  
(Contract Research)

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

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター  
京都大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,  
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development  
Kyoto University

May 2023

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

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

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発  
(委託研究)

—令和 2 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

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

京都大学

(2022 年 11 月 21 日受理)

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

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

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

本研究は、研究課題のうち、平成 30 年度に採択された「放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発」の平成 30 年度から令和 3 年度の研究成果について取りまとめたものである (令和 3 年度まで契約延長)。本課題は令和 3 年度が最終年度となるため 4 年度分の成果を取りまとめた。

燃料デブリの取り出し作業時には、非常に高線量の  $\gamma$  線場において、長時間にわたり確実に機能する未臨界監視モニタの設置が求められているが、既存の検出器では重い鉛遮蔽体を併用する必要があり、遠隔操作が難しい等の問題がある。本研究は、 $\gamma$  線に対して感度が低く、薄型軽量で放射線耐性の高い炭化ケイ素 (SiC) をもとにした中性子検出器とデータ収集系まで含めたシステムを英国と分担して開発し、照射試験を含めた燃料デブリ取り出しを想定した性能試験を実施し、廃炉作業ですぐに使用できる状態にまですることを目指す研究・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、京都大学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 Thin SiC Neutron Detector with High Radiation Resistance  
(Contract Research)

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

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

Kyoto University

(Received November 21, 2022)

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

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

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

Among the adopted proposals in FY2018, this report summarizes the research results of the “Development of thin SiC neutron detector with high radiation resistance” conducted from FY2018 to FY2021 (this contract was extended to FY2021). Since the final year of this proposal was FY2021, the results for four fiscal years were summarized.

In the works for debris retrieval, it is required to install subcritical surveillance radiation monitors that can surely work for long time under extremely high gamma-ray radiation environment. However, there have been problems such as remote control of conventional neutron detectors is difficult because heavy radiation shields are needed. In the present study, we will develop a neutron detector using thin, light-weight and radiation-resistant silicon carbide (SiC) that has low sensitivity to gamma-rays as well as the neutron detection signal transfer and data analysis system to monitor subcriticality of debris in collaboration with the U.K. Using this system, the performance tests will be conducted supposing the real debris retrieval at critical assembly including the irradiation tests. Based on the results, we will conduct research and development aiming to make the system ready for use in real decommissioning works.

Keywords: Thin SiC Neutron Detector, Debris, High Radiation Resistance, Decommissioning, Subcritical Surveillance

---

This work was performed by Kyoto University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

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

Contents

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

This is a blank page.

## 1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

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

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

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

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

このため、本事業では平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省からJAEAに移行することで、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来のプログラムを、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

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

## 平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

## 【若手研究】

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

## 共通基盤型原子力研究プログラム

## 【一般研究】

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

## 課題解決型廃炉研究プログラム

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

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一郎	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 (~R2. 3. 31) 大曲 新矢 (R2. 4. 1~)	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号機ペダ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	渡邊 大輔	日立GE ニュークリ ア・エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二 (~R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1~)	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 (~R3. 3. 31) 岡山大学 (R3. 4. 1~)

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

## 研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とティアップ型人材育成	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 (~R2. 3. 31) 竹下 健二 (R2. 4. 1~)	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

## 4. 令和2年度 採択課題

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

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

課題数：10 課題

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

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

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

## 令和2年度 採択課題一覧

## 課題解決型廃炉研究プログラム

## 【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍 （～R4. 7. 31） 村上 健太 （R4. 8. 1～）	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料 研究機構

## 課題解決型廃炉研究プログラム

## 【一般研究】

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

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

本報告書は、以下の課題の平成 30 年度から令和 3 年度の研究成果について取りまとめたものである（令和 3 年度まで契約延長）。本課題は令和 3 年度が最終年度となるため 4 年度分の成果を取りまとめた。

## 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

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録  
成果報告書

This is a blank page.

令和 2 年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

放射線耐性の高い  
薄型 SiC 中性子検出器の開発  
(契約番号 R02I031-1)

成果報告書

令和 3 年 9 月

国立大学法人京都大学

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、国立大学法人京都大学が実施した「放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発」の平成 30 年度から令和 2 年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略 .....	vii
1. はじめに .....	1
2. 業務計画 .....	9
2.1 全体計画 .....	9
2.2 各年度の成果の目標及び業務実施方法 .....	14
2.2.1 平成 30 年度の成果の目標及び業務実施方法 .....	14
2.2.2 令和元年度の成果の目標及び業務実施方法 .....	16
2.2.3 令和 2 年度の成果の目標及び業務実施方法 .....	18
3. 業務の実施内容及び成果 .....	20
3.1 検出器開発 (SiC、プリアンプ回路) 【平成 30 年度～令和 2 年度】 .....	20
3.2 信号伝送系の開発 【平成 30 年度～令和 2 年度】 .....	28
3.3 データ収集装置の開発 【平成 30 年度～令和 2 年度】 .....	40
3.4 照射試験 【平成 30 年度～令和 2 年度】 .....	56
3.5 研究推進 .....	66
4. 結言 .....	67
参考文献 .....	68

執筆者リスト

事業代表者 国立大学法人京都大学

教授

三澤 毅

准教授

北村 康則

准教授

堀 順一

助教

高橋 佳之

## 表一覧

表 2.1	本事業の全体スケジュール.....	12
表 2.2	平成 30 年度業務実施計画の項目別スケジュール.....	15
表 2.3	令和元年度業務実施計画の項目別スケジュール.....	17
表 2.4	令和 2 年度業務実施計画の項目別スケジュール.....	19
表 3.2.1	データ送信機の基本情報.....	33
表 3.3.1	A 体系での解析結果.....	49
表 3.3.2	B 体系での解析結果.....	50
表 3.3.3	各未臨界度における実験値と参照値の $\alpha$ の比較 (Feynman- $\alpha$ 法).....	52
表 3.3.4	各未臨界度における実験値と参照値の $\alpha$ の比較 (Rossi- $\alpha$ 法).....	53
表 3.4.1	福島第一 2 号機の運転履歴.....	63
表 3.4.2	燃料デブリから放出されるガンマ線.....	64

## 図一覧

図 2.1	研究実施体制図.....	13
図 2.2	測定システム全体の構成図.....	13
図 3.1.1	ランカスター大学での測定実験.....	23
図 3.1.2	SiC ベース検出器の想定図.....	24
図 3.1.3	SiC ベース検出器の構造.....	24
図 3.1.4	熱中性子に対する応答計算結果.....	25
図 3.1.5	中性子に対する検出効率の B <sub>4</sub> C 厚さ依存性.....	25
図 3.1.6	ガンマ線に対する応答計算結果.....	26
図 3.1.7	SiC ウェハ.....	26
図 3.1.8	SiC ベース検出器とプリアンプ.....	27
図 3.1.9	SiC ベース検出器のプリアンプ出力.....	27
図 3.2.1	データ転送装置.....	33
図 3.2.2	光ファイバー接続用コネクタ部分拡大写真（受信側）.....	33
図 3.2.3	データ送信機.....	34
図 3.2.4	光ファイバー接続用コネクタ部分拡大写真（出力側）.....	34
図 3.2.5	送信側装置配置図.....	35
図 3.2.6	受信側装置配置図.....	35
図 3.2.7	出力側外形図.....	36
図 3.2.8	装置外形図.....	36
図 3.2.9	装置の性能テスト.....	37
図 3.2.10	ゲイン変更による性能確認.....	37
図 3.2.11	隣接する信号間の頻度分布.....	38
図 3.2.12	<sup>137</sup> Cs のエネルギースペクトルの測定結果.....	38
図 3.2.13	<sup>60</sup> Co のエネルギースペクトルの測定結果.....	38
図 3.2.14	ガンマ線エネルギーと MCA のチャンネル番号の関係.....	39
図 3.2.15	光ファイバーケーブル.....	39
図 3.3.1	測定システム構成図.....	47
図 3.3.2	KUCA 固体減速炉心（B 架台）.....	47
図 3.3.3	測定装置配置図.....	48
図 3.3.4	炉心配置図（A 体系）.....	48
図 3.3.5	炉心配置図（B 体系）.....	48
図 3.3.6	2/8” p23EUEU 燃料体の構成図.....	49
図 3.3.7	炉心配置（A 体系）での Feynman- $\alpha$ 法の Y 値.....	49
図 3.3.8	炉心配置図（臨界近傍）.....	50
図 3.3.9	3/8” p36EU 燃料体の構成図.....	50
図 3.3.10	未臨界度が 1.08% $\Delta k/k$ のときの Feynman- $\alpha$ 法の Y 値.....	51
図 3.3.11	未臨界度が 1.08% $\Delta k/k$ のときの Rossi- $\alpha$ 法の結果.....	52
図 3.3.12	各未臨界度における実験値と参照値の $\alpha$ の比較（Feynman- $\alpha$ 法）.....	53
図 3.3.13	各未臨界度における実験値と参照値の $\alpha$ の比較（Rossi- $\alpha$ 法）.....	54

図 3.3.14	2 分割炉心での実験炉心配置図	54
図 3.3.15	2 分割炉心での実験の Feynman- $\alpha$ 法の Y 値	55
図 3.3.16	2 分割炉心での即発中性子減衰定数	55
図 3.4.1	コバルトガンマ線照射装置	60
図 3.4.2	ガンマ線照射実験の装置配置	60
図 3.4.3	照射台の見取り図	61
図 3.4.4	受信側出力	61
図 3.4.5	電子線型加速器のターゲット室	62
図 3.4.6	電子線型加速器での照射実験の装置配置	62
図 3.4.7	オシロスコープでの信号波形	63
図 3.4.8	Cs の残量を変化させたときの線量率の変化	64
図 3.4.9	検出器と送信装置の配置の概念図	65
図 3.4.10	鉛遮蔽厚さを変化させた時の耐久時間	65
図 3.4.11	作製した鉛遮蔽体	65

## 略語一覧

- SiC : Silicon Carbide (炭化ケイ素)  
 IRID : International Research Institute for Nuclear Decommissioning  
 (技術研究組合 国際廃炉研究開発機構)  
 KUCA : Kyoto University Critical Assembly (京都大学臨界集合体実験装置)

## 主な用語の略語集

**未臨界監視モニタ**

燃料デブリ取出し時に体系の未臨界度（臨界からどのくらい離れているかの指標であり、臨界から離れているほど値が大きくなる）を測定する装置。未臨界度を測定する手法としては、燃料デブリ近傍に設置した中性子検出器からの信号を取り込みその計数率の変化から未臨界度を測定する方法（中性子源増倍法）、中性子検出器からの信号の検出時刻を測定し（中性子減速が十分でない場合1 μ秒以下、軽水減速体系では10 μ秒以下の時間分解能）、その時系列分布を統計的に処理して解析することで未臨界度を測定する手法（中性子雑音解析法）などが知られており、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、「福島第一」と略す。）での燃料デブリ取出し時には作業と作業の間では検出器を燃料デブリに近づけて中性子雑音解析法で未臨界度の絶対値を測定し、デブリ取り出し作業中には燃料デブリからやや離れた位置に設置した検出器により中性子源増倍法で未臨界度の相対値を測定する手法で未臨界監視を行うことを計画している。

**京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA)**

京都大学複合原子力科学研究所（以下、「京大複合研」と略す。）にある、最大出力が100 Wの研究用原子炉の1つである臨界実験装置。炉心の構造を容易に変更することができるため、様々な原子炉の体系を模擬することができる。福島第一で用いるための未臨界監視モニタの開発は、KUCAに燃料デブリ取り出し時に想定される未臨界体系炉心を構築して、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構（以下、「IRID」と略す。）が京都大学と国内原子力関連メーカーと共同で実施している。

**コバルト60ガンマ線照射設備**

京大複合研にある<sup>60</sup>Coの密封ガンマ線源を用いてガンマ線を照射することができる実験装置。最大10<sup>3</sup> Gy/hまでの照射線量率で照射することができる。

**電子線型加速器 (KURNS-LINAC)**

京大複合研にある加速器で、電子線を加速して重金属に照射することによりパルス状の高エネルギー中性子を発生させることができる実験装置。ターゲット表面では最大3×10<sup>11</sup> n/s/cm<sup>2</sup>の中性子束を得ることができる。

## 概略

福島第一の廃炉作業における燃料デブリの取り出し作業においては、作業中においても燃料デブリ近傍に設置した中性子検出器からの信号を処理して体系が未臨界状態であることを確認するための未臨界監視モニタを設置する必要がある。この中性子検出器としては中性子に対する検出効率が高いこと、燃料デブリ近傍の高線量場でも利用することができるようにガンマ線に対して感度が低く放射線耐性が高いこと、さらに薄型軽量であることが要求されるが、本業務においてはこれらの要求を満足することができる炭化ケイ素（以下、「SiC」と略す。）をベースにした新しい中性子検出器と、検出器からの信号を伝送して未臨界度モニタとして用いるためのデータ収集系まで含めた計測システムを英国のランカスター大学と共同で開発することを目的とする。以下に、3年間の3年目である令和2年度から令和3年度（一部延長）の業務の実績について概略を述べる。

### (1) 検出器開発（SiC、プリアンプ回路）

SiCをベースとした中性子検出器の開発において、英国側で実施する試作器の照射試験（中性子、ガンマ線測定実験）と解析についての検討会（9月に実施）に参加して実験結果（検出効率、ガンマ線ノイズレベル等）についての議論を行った。英国でのプリアンプの設計結果についても議論し、それらの結果を元に中性子コンバータ物質の種類や厚さ等を決定した。(2)信号伝送系の設計について両国で情報交換を行いながら計測システムに齟齬が生じないように実施した。

また、検出器の求められる性能については、IRID等からの情報を元に当初予定した性能を向上させるために英国側と十分に情報交換を行った。

### (2) 信号伝送系の開発

平成30年度の検討結果を踏まえ、高線量場で使用することが可能な信号伝送系として、光ファイバーを主として一部で多重同軸ケーブルを使用した伝送システム（データ転送装置及びデータ収集機能を含む。）の設計を行い、3系統のSiC検出器からのアナログ信号を同時に取り込み2本の細径の光ファイバーにより信号を伝送させる装置、および光ファイバーからの信号を受けて元の3種類のアナログ信号とSiCで中性子を検出した時刻情報（1 μ秒単位）のみをUSB経由でPCに取り込むことができる機能も一緒に組み込んだ装置を試作した。この装置の耐放射線性能を確認するために、コバルト60ガンマ線照射施設での照射実験、原子炉での利用実験を実施し、その試験結果を最終的な設計に生かす知見を得た。

### (3) データ収集装置の開発

平成30年度に行った最適なシステム検討の結果、(2)の伝送システムにデータ収集機能を組み込むことが可能となったため、(2)の予備試験においてデータ収集機能の性能確認試験として、KUCAにて燃料デブリを模擬した体系での未臨界度測定実験（解析ソフトの作成を含む）を行い、

この装置を燃料デブリの未臨界度監視モニタとして利用するために、最適な検出器の数量や配置などを解析により検討した。

#### (4) 照射試験

英国で実施する予定の検出器の中性子、ガンマ線の照射試験に参加した。また、京大複合研附設のコバルト 60 ガンマ線照射装置を用いた照射予備試験を行った。

#### (5) 研究推進

研究代表者の下で英国ランカスター大学ならびに廃炉環境国際共同研究センター（以下、「CLADS」と略す。）等との連携を密にして、京都大学側が開発全体を把握しながら研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための英国との打合せや会議等を開催した。

3年間の研究の成果として、当初の目的としていた、燃料デブリ取り出し時の未臨界モニタとして使用するために、SiC をベースにした新しい中性子検出器の性能を確認し、高線量下で使用できる検出器からの信号を伝送するための新しいシステムを開発し、未臨界を監視できるモニタとして使用できるようなシステムを開発することができた。SiC の中性子検出器は、今後の原子炉での原子炉物理の革新的な新しい実験にも用いることができると考えられ、また、信号伝送システムについては、高線量下での適切な信号伝送が求められる加速器周辺の測定系や発電炉の過酷事故時でも使用できるような装置として利用できるものと考えられる。

前年度までの報告書：

- ・放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発（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 2019-042  
<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2019-042>
- ・放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発（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， JAEA-Review 2020-057  
<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2020-057>

## 1. はじめに

福島第一の廃止措置において最も重要な作業は、燃料や構造材が混ざった状態で炉心及び格納容器内に分散している燃料デブリの取り出し作業である。燃料デブリは現状では十分に深い未臨界状態になっていると考えられるが、今後の燃料デブリ取り出し作業時においては、その形状や水との混合状態の変化に伴い臨界状態に近づく可能性が危惧されている。そのため燃料デブリ取り出しの作業時には、燃料デブリ近傍に中性子検出器を設置して体系の未臨界状態を監視しながら作業を行うことが必須であると考えられている。このような装置を未臨界監視モニタと呼び、もし仮に臨界に近くなった場合には取り出し作業を直ちに中止し、さらに中性子吸収材の追加投入を速やかに実施できるように準備しておくことが考えられており、燃料デブリの未臨界の状態をリアルタイムで正確に監視できるようにしておくことが必須であると考えられる。

福島第一の廃止措置に向けた中長期ロードマップを元に選定された、廃炉に必要となる研究開発のニーズとして6つの項目が提案されており、その中に「画期的なアプローチによる放射線計測技術」の開発が挙げられている。特に燃料デブリの取り出し作業においては非常に高い放射線線量率の環境において利用することができ、高ガンマ線場において未臨界度を監視することができる程度の高い検出効率を有する中性子検出器が必要である。さらに、その放射線計測技術には、中性子検出器をロボットアーム等に取り付けて遠隔で操作することを可能にするために、ロボットアームの荷重制限内での軽量の装置であること、高い放射線線量率の環境の中で中性子検出信号を炉外の測定装置まで適切に伝送することができること、伝送ケーブルや装置への電源供給等のためのケーブルの取り回しを適切に行うことができること、伝送ケーブル自体も耐放射線性を有することなどの様々な厳しい要求事項が考えられる。

京大複合研の研究用原子炉である KUCA では、2013 年よりこの福島第一の燃料デブリの未臨界監視モニタを開発するための実験を、IRID や東芝エネルギーシステムズ株式会社、三菱重工業株式会社、株式会社日立製作所の原子力メーカと京都大学が共同で実施している。これまで実験を通じて、測定した中性子の信号から体系が臨界状態からどの程度離れた未臨界の状態になっているのかの定量的な指標である未臨界度を推定する手法についての開発が進められているが、燃料デブリ近傍に設置する中性子検出器については、既存の  $^{10}\text{B}$  塗布型検出器（直径約 1 インチ）を使用することを前提に実験を行ってきた。しかしながら、福島第一内部の調査が進むにつれて、予想以上にガンマ線線量が高いことが判明してきたため、検出器を厚い鉛で囲んでガンマ線遮蔽をする必要性が指摘されるようになり、軽量の検出器であるとの要求事項を満足できない可能性が生じてしまった。さらに、 $^{10}\text{B}$  塗布型検出器に使用する信号伝送ケーブルは、高ガンマ線線量場においてノイズが混入しないようにするために、直径 1 cm 以上ある多重シールド同軸ケーブルを 1 本の検出器について 1 本ずつ用いることが考えられているが、実際に KUCA での実験でこの多重シールド同軸ケーブル（KUCA では 3 本の検出器を使用したため 3 本のケーブル）を使用してみると、ケーブルが硬いため取り回しが非常に難しく、福島第一でのデブリ取り出し作業のような遠隔操作での使用はさらに難しくなることが予想されるため、実際の使用は困難であると考えられる。以上の通り、現行の放射線測定装置および信号伝送系では、福島第一の燃料デブリの未

臨界監視モニタとして使用する上では性能・機能上に限界があると考えられるため、中性子検出器やデータ伝送系を総合的に再検討する必要があると考えられる。

そこで本研究においては、燃料デブリ取り出しの未臨界監視モニタに使用することができる、放射線耐性が高く、ガンマ線の影響を受け難く、高温環境でも使用することができ、薄型軽量で遠隔ロボットでの取り扱いも容易である検出器を開発することを目的とする。さらに、ガンマ線やデブリ掘削装置等に起因するノイズにも強い信号伝送系も含めて、遠隔作業において取り扱いが容易な中性子検出器装置系の開発を行い、この測定系を用いて未臨界度を測定することができる装置とすることを旨とする。

放射線耐性の非常に高い検出器としてダイヤモンド検出器が考案され、これまでにガンマ線や中性子の検出器の開発も行われている。ダイヤモンドは 5.6 eV という広いバンドギャップを有しており、高温においても利用できるという特徴を有しているが、ダイヤモンド検出器の製作上の制限から小型の中性子検出器に限られてしまうという問題があるため、検出効率が低く、中性子束が低い場所での未臨界監視モニタの検出器としての使用は難しいと考えられる。

今回提案する中性子検出器は SiC を用いたものである。SiC のバンドギャップは 3.25 eV であり、これは Ge の 0.74 eV や Si の 1.1 eV に比べて大きな値であり、また漏洩電流が極めて低いため、検出効率は低いものの、冷却無しで低エネルギーのガンマ線や X 線であればスペクトル測定が可能であるという特徴がある。また、構造的にはダイヤモンドに類似した安定な結晶構造を有しており、原子を結晶格子からはじき出すために必要なエネルギーが大きいため、放射線損傷への抵抗性が他の放射線検出器に比べて大幅に高いこと、高温においても使用可能であるという特徴を有している。また、SiC は高耐圧、低損失、高周波動作および高温動作が可能という優れた特性を持っているため、近年パワー半導体デバイスとして盛んに利用されるようになり、例えば最新の新幹線の電源のコンバーター・インバーターに採用されるなどしており、SiC を製作するための技術が十分に確立され量産化による価格低下も期待できる。

既に英国のランカスター大学においては、SiC を用いたガンマ線検出器 (1 cm×1 cm×300 μm) の開発を実施しているため、その検出器をベースに全く新しい SiC 中性子検出器の開発を行うことになる。これまでにランカスター大学では、中性子フルエンス  $10^{13}$  n/cm<sup>2</sup> に対して、またガンマ線照射線量が 22.4 MGy に対しても検出器として健全であることを確認している [4]。さらに 500 °C という非常に高温の環境下においても検出効率が落ちることなく測定可能であることを実験により確認している。

本研究は、この SiC 検出器に新たに中性子コンバータの薄膜を付けることにより、薄くて軽量な中性子検出器を製作するという新規性に富む先端的研究である。もともと SiC は非常に薄く原子番号も小さいため、ガンマ線に対する検出効率は低いが、その SiC 検出器に中性子コンバータの薄膜を付ける、または中性子コンバータをドーピングすることにより中性子を検出できるようになり、中性子コンバータの種類や厚さなどを適切に設計することにより、十分な中性子検出効率を持つ中性子検出器として機能させることが可能であると考えている。

福島第一での燃料デブリ取り出し作業において、燃料デブリの近傍に設置して未臨界監視モニタとして使用することを考えて、SiC 中性子検出器の目標とする性能としては以下の通りである。

- 耐性温度は 60 °C（性能的には 300 °C 以上まで可能であるはずである）
- 深さ 1 m の水中使用可能
- 検出器とプリアンプを一体化し全体厚さは 3 mm 以下
- 1000 Gy/h のガンマ線場において使用可能
- 中性子束  $10^7$  n/cm<sup>2</sup>/s の場において適切に中性子計測が可能
- 高線量下において中性子検出信号を 100 m 以上離れた場所まで適切に伝送可能

ここで、「中性子束  $10^7$  n/cm<sup>2</sup>/s の場において適切に中性子計測が可能」であることを目標として記載したが、実際には燃料デブリ中の中性子源は Cm などのマイナーアクチニドの自発核分裂によるものであり、中性子源としてはそれほど強いものではなく、また、実効増倍率も現状では 0.5 程度以下と臨界状態からは遠く離れていると考えられるため、燃料デブリ中の核分裂連鎖反応による中性子増倍も少ないため、結果として燃料デブリ近傍における中性子束は  $10^2$  n/cm<sup>2</sup>/s 以下と中性子計測としてはかなり低いレベルであると考えられる。そのため、その程度の低い中性子束場でも検出効率を高めるために中性子コンバータの設計を工夫するか、または、複数の SiC からなる中性子検出器を使用することにより適切に中性子計測が可能であることが求められる。なお、高い中性子束場での計測が必要となった場合には、SiC 検出器に取り付ける中性子コンバータ薄膜の種類（例えば薄膜に付ける <sup>10</sup>B 塗布量や厚さ）を変更する（塗布量を減らすか厚さを減らす）ことにより容易に可能とすることができる。

本検出器の利用目的は燃料デブリ取出し時の未臨界監視モニタという先端的な測定装置での使用であり、その目的をもとに今回の SiC 中性子検出器に要求する性能を定めているが、このような中性子検出器が利用できるようになれば、福島第一以外でも高いガンマ線線量の過酷な環境下での利用や通常の円筒形の検出器（例えば標準的な大きさとして直径 1 インチ）を挿入できないような隙間に挿入しての利用など、様々な応用が期待できる。ただし、この検出器についてはガンマ線との弁別、すなわちガンマ線のバックグラウンド信号をどの程度除去することが可能であるかはよく判っておらず、さらに SiC には  $^{30}\text{Si}(n, \gamma)^{31}\text{Si}$ （半減期 2.7 h で <sup>31</sup>P を生成）による半導体特性に影響を及ぼす可能性がある核反応が生じるため長期にわたる中性子照射効果については十分な検証が必要である。

未臨界監視モニタとして用いる方法としては、原子炉で利用されてきた未臨界度測定技術を用いることになる。未臨界度測定方法として最も精度の良い方法としては、体系に外部から中性子パルスを繰り返し打ち込んでその後の中性子束の変化を測定するパルス中性子法が知られているが、今回のような燃料デブリ取り出し時にパルス中性子源を持ち込むことは現実的ではないため、この手法は用いることができない。指数実験法も未臨界度測定方法として知られているが、体系

内の中性子束分布を測定する必要があるため採用することはできない。固定された中性子検出器からの信号のみを解析することで未臨界度を測定する方法としては、中性子源増倍法または中性子雑音解析法がある。

中性子源増倍法は、中性子検出器の位置は固定して中性子計数率を測定してその値の変化から未臨界度の変化を相対的に測定する手法であり、未臨界度が判っている基準となる状態での中性子計数率を測定すれば、別の状態での計数率を測定することにより、その状態での未臨界度を知ることができるという方法である。非常に簡単な測定手法であるが、その測定では中性子源の強度と中性子検出効率が変化しないと仮定する必要がある。燃料デブリ取り出し時には、燃料の一部を掘削して取り出すので中性子源強度は変化し（ $C_m$ 等の自発核分裂性核種が燃料デブリと一緒に取り出すことにより、核分裂連鎖反応の元となる中性子源強度は弱くなると考えられる）、中性子検出器と燃料デブリの幾何学的配置が変化するので中性子検出効率も変化する可能性があるが、1回の燃料デブリを掘削して取り出す量は燃料デブリ全体に比べてごく僅かであるため、中性子源強度と中性子検出効率の変化量は非常に小さいと考えられるため、精度はあまり高くないが中性子源増倍法で未臨界度の変化を測定することができると考えられる。

一方、中性子雑音解析法は中性子測定時刻（中性子検出時刻）を統計的に処理することにより炉心パラメータを測定する方法であり、処理方法としては検出時刻の間隔に着目する方法（Rossi- $\alpha$ 法）、ある時間幅における計数率に着目する方法（Feynman- $\alpha$ 法）、および時刻情報を周波数解析する方法が知られているが、これまでの KUCA での実験経験から周波数解析法は深い未臨界度測定には向かないと考えられるため、今回の目的としては Rossi- $\alpha$ 法または Feynman- $\alpha$ 法が適切であると考えられる。両手法共に、未臨界度がパラメータとして入っている即発中性子減衰定数（ $\alpha$ 値）を含む理論式を測定結果にフィッティングすることにより $\alpha$ 値を求め、さらに $\alpha$ 値に含まれる実効遅発中性子割合と中性子平均寿命については事前の数値解析により求めることにより未臨界度を推定するという方法である。実効遅発中性子割合と中性子平均寿命は体系の形状や中性子減速度合いにより異なるが、今回の燃料デブリを含む体系であれば、この2つのパラメータ共にデブリ周囲にある軽水が影響しており、デブリ取り出し作業中の工程の前後であまり大きくは変化しないものと考えられる。さらに精度の良い未臨界度の測定を行うためには、燃料デブリ取り出しにより形状が変化した体系について再度解析を行ってこれらのパラメータの値を逐次更新することも重要となるが、この解析には若干の時間を要するため、予め想定される体系の形状について実効遅発中性子割合と中性子平均寿命を求めておくことも良い方法といえる。中性子雑音解析法は中性子源増倍法と異なり中性子検出効率が変化してもフィッティングで得られる $\alpha$ 値には影響せず（中性子検出効率は理論式の $\alpha$ 値とは別のパラメータに含まれている）、未臨界度を直接求めることができるという利点があるが、中性子源増倍法に比べて測定時間が掛かるという問題がある（なお、測定データの炉雑音解析に要する時間は現在の最新のパソコンであれば数分程度であり実際の測定現場で問題になるようなことはないと思われる）。

そこで、燃料デブリ取り出し時に用いる未臨界度モニタとしては、中性子源増倍法と中性子雑音解析法の両手法を併用することが適切であると考えている。すなわち、燃料デブリ取り出し工

程の合間に中性子検出器を検出効率が高くなるように、燃料デブリの近傍に設置して中性子雑音解析法により未臨界度の絶対値を測定し（計数率にもよるが、例えば 10～30 分くらいの測定時間）、燃料デブリ取り出し作業中にはその検出器は取り出し作業の邪魔にならないように移動させ、燃料デブリからやや離れた場所に常時設置している検出器、または先ほど移動させた検出器（同じ場所に戻すことが必要）で中性子計数率の変化を測定して中性子源増倍法により未臨界度をほぼリアルタイムで監視するという方法が好ましいと考えている。未臨界度監視モニタとしては、取り出し作業中の燃料デブリ取り出しの前後で、急に臨界状態に近づいていないかどうかを確認することが主目的である。取り出し作業では燃料デブリが取り出されるため少しずつ未臨界が深くなること（未臨界度が大きくなること）が予想されるが、燃料デブリの形状の変化状態や水との混ざり具合によっては、例えば燃料デブリが細かな粉末状になって水と混ざるような場合には未臨界度が小さくなる（臨界に近づく）可能性もあるが、1 回の燃料デブリ取り出し量は少ないと考えられるため、中性子雑音解析法により未臨界度の絶対値を測定する間、すなわち精度はあまり高くない中性子源増倍法ではあるが、燃料デブリ取り出し中にリアルタイムで未臨界状態を監視している間に急に臨界に近くなるとは考えられず、両手法を併用して未臨界度を監視することにより臨界安全性の確保を行うことができると考えられる。

上述の通り、中性子源増倍法は中性子計数率を測定する方法で、中性子雑音解析法は中性子を検出した時刻を統計処理により解析する方法であるため、測定に必要な量としては中性子検出時刻情報が正確に測定できさえすれば十分であるので、ガンマ線等のバックグラウンドノイズを除くことができれば最終的なデータ収集装置に入力する信号としては中性子検出器からの波高や波形に関する情報は不要で、放射線回路系で良く用いられている TTL ロジック信号（通常の NIM モジュールであれば幅 0.5  $\mu$  秒で高さ 5 V の矩形信号）のようなパルス信号をデータ収集装置に送ってそれを連続的に収集することができる装置を準備する。

本研究においては、福島第一での燃料デブリ取り出し作業に使用できる放射線耐性の高い薄型で軽量の SiC 中性子検出器を開発することを目的としているが、この中性子検出器については以下のような様々な応用が期待できる。

- ① 臨界実験装置のような研究用原子炉において、通常のは直径 1 インチ)  $^3\text{He}$  検出器（良く用いられるものは直径 1 インチ)などは挿入ができない薄い隙間（例えば隣り合った燃料集合体の間や、燃料板の間で幅数mm程度の隙間）に挿入することができるようになれば、体系に外乱を与えずに炉心の状況を測定することができるため、原子炉物理実験の精度を大幅に向上させることができ、解析結果と比較することが容易になり、さらに新しい実験手法を開発することも可能になる。
- ② 発電用原子炉において過酷事故時の炉心状況や格納容器内の状況を把握するためには、非常に高い線量下でしかも高温高压の過酷な状態で使用する必要があるが、この SiC 中性

子検出器であればそのような状況でも適切に中性子を測定することができる。

- ③ パルス状中性子を発生させる加速器（例えば電子線型加速器）において飛行時間測定を行う際には、中性子発生直後のガンマ線が強いため検出器に光速で到達するガンマ線が測定されている間は中性子の検出ができず、少し時間を空けないと中性子計測が可能とならない。しかし、ガンマ線の検出効率が低く中性子の検出効率の高い検出器であればその空ける時間を短くすることができ、その結果、現在より高エネルギー中性子まで測定することができるようになり、例えば、断面積測定実験においては測定できるエネルギー範囲を広くすることができる。
- ④ SiC 検出器は信号の応答が速いという特徴があるため、小さいサイズの検出器を組み合わせることにより中性子カメラや中性子ラジオグラフィ等の動的解析に使用することが可能である。
- ⑤ 英国ではこの SiC 中性子検出器を開発し、セラフィールドの核燃料再処理工場の廃止措置における高線量下での臨界安全管理に用いる中性子モニタに使用することを検討しており、その経験は日本国内で核燃料再処理工場の廃止措置にも役立てることができる可能性がある。

本研究では、新しい中性子検出器について SiC の検出部のみならず、直結したプリアンプや信号伝送系の開発、その中性子検出器としての性能や耐放射線性の実験的検証、及びその後の福島第一での利用のすべての項目を有機的に結合させて実施していくが、研究目的が達成された後は、日本側の拠点である京大複合研において開発した検出器を、研究用原子炉、中性子発生電子線型加速器において使用し、今後の研究に役立てていく。必要であれば、英国側の検出器の開発を行っている共同研究者に京大複合研における利用結果をフィードバックして、さらなる検出器の改良に役立ていく。

実施体制については英国側と日本側で役割分担する。英国側はこれまでの経験を生かして半導体、放射線検出器、放射線物理の数値解析、プリアンプ設計の各分野の専門の研究者が共同で検出器開発（SiC、中性子コンバータ、プリアンプ等の設計）を実施する。SiC 検出器及びその初段階の回路系は、現在のところ直径 4 インチの SiC ウェハから製作する。このような SiC を設計し製作（SiC ウェハの製作は国外の企業に外注）することは英国のランカスター大学がこれまでに十分な経験を有しており、その経験を生かすことで検出器を含めた装置の開発を実現できると考えられる。

一方、日本側では、英国側で設計したプリアンプからの信号を外部まで伝送する系統の設計と、その伝送された信号のデータ収集系の設計を担当する。研究担当者は京大複合研に所属している

が、異なる研究分野の研究者が本事業のためにグループを組んで研究開発を進めることにする。信号伝送系については放射線計測が専門の研究者が中心となり、さらに放射線検出器の信号伝送についての十分な技術的能力がある専門業者と協力することで、高線量下での信号伝送系を設計することができる。これらの両国の技術を結集することで、最終的な目標としている中性子検出器を開発することが可能となる。本研究に携わるのは京大複合研の30代から40代の研究者が中心であり、本研究のような新しい分野の研究活動を通じて、各人の研究能力の向上、海外との共同研究を通じての国際的な視野の拡大に大いに役立つと考える。

英国には検出器の性能を確認することができる研究用原子炉がないため、京大複合研の放射線物理と原子炉物理が専門の研究者が実施する研究用原子炉での照射試験、および福島第一でのデブリ取出し時の未臨界監視モニタ試験での使用による検出器の性能試験は本研究において重要な位置づけとなる。

SiC を元にした新しい中性子検出器の開発は、①検出器部、②プリアンプ部、③プリアンプから外部までの信号伝送系、④データ収集系に分けて実施する。このうち①②は英国側が、③④は日本側が中心となって開発を進める。

- ① 検出器部については既に開発が進められている SiC ガンマ線検出器の表面に新たに中性子コンバータ物質 ( $^{10}\text{B}$  または  $^{157}\text{Gd}$ ) の薄膜層を付けたものを開発する。中性子コンバータ物質の選択、厚さ等については MCNP や Geant4 のモンテカルロ計算コードにより解析を実施して検討し、その結果を元に検出器を製作する。
- ② プリアンプ部は SiC をベースに検出器と一体化したものを設計する。英国のランカスター大学を中心としたグループはこれまで SiC を用いた放射線検出器の開発についての十分な実績があり、また、その検出器の出力を受けるプリアンプの回路の設計及び製作についても既に携わっていることから、3 年間でこれらの開発計画は問題無く進めることができると考えている。
- ③ プリアンプからの信号伝送系については、高いガンマ線線量場において、ガンマ線等に起因するノイズを低減させて体系外まで伝送させる必要がある。その手法については同軸ケーブルを用いた方法、光ファイバーを用いる方法などを検討している。
- ④ 未臨界監視モニタに使用できるようなデータ収集系については、検出器の中性子を検出した時刻のデータを連続的に取り込むことができる時系列測定装置を用いることを予定しており、リアルタイムで取り込んだデータを解析して未臨界度を求めるための解析ソフトも同時に開発する。

プリアンプからの信号の伝送方法については、英国で開発する検出器の性能が確定した段階で最終的な検討を行うが、日本側では回路系や放射線計測の信号伝送システム設計の経験が豊富な日本国内の専門の業者と共同で開発する予定であるので、3年間の期間内に開発を行うことは可能であると考えている。また、データ収集系については京大複合研での未臨界監視モニタの開発に携わっている原子炉物理が専門の研究者、また放射線計測を専門としている研究者の組織が共同で検討することで開発を達成することが可能である。

検出器の性能評価試験については、英国側では英国内で利用できるコバルト 60 ガンマ線照射施設を用いた高線量場での性能評価、中性子計測については  $^{252}\text{Cf}$  中性子線源を用いて試験を行う。これらの計測試験については英国側では既に十分な経験を有しており問題は無い。また日本側は京大複合研での研究用原子炉、KUCA やコバルト 60 ガンマ線照射装置を利用して実施するが、これらの施設等についての利用経験は豊富であるので問題は無い。

これらの検出器の開発、および検出器の性能確認試験については英国側と日本側で各々の役割分担をして実施するとは言え、両者の間で情報交換を行いながら進めていくことが重要となる。定期的に日本と英国との間で、4~5名が参加した Web Conference を開催した。このような Web Conference を定期的に行うことで、開発に必要な情報について意見交換を行い、目標となる中性子検出器の開発を目指すこととする。さらに Web Conference だけでは情報交換が不十分となることがあるので、研究期間中には英国または日本において双方が集まった会議を行い、日本で開催するときには燃料デブリ取り出しを計画している IRID 関係者も交えた情報交換の場を設けることを計画する。

## 2. 業務計画

### 2.1 全体計画

福島第一の廃炉作業における燃料デブリの取り出し作業においては、作業中においても燃料デブリ近傍に設置した中性子検出器からの信号を処理して体系が未臨界状態であることを確認するための未臨界監視モニタを設置する必要がある。この中性子検出器としては、中性子に対する検出効率が高いこと、燃料デブリ近傍の核分裂生成物等から放出されるガンマ線による高線量場でも利用することができるようにガンマ線に対して感度が低く放射線耐性が高いこと、遠隔操作によるロボットアームに取り付けるため薄型軽量であることが要求される。さらに検出器からの信号伝達系はガンマ線等によるノイズを受けにくいこと、信号伝達系のケーブルが軽量で取り回しが容易であることなどの様々な条件が要求されるが、本研究においては、これらの要求を満足することができる SiC をベースにした新しい中性子検出器と、検出器からの信号を伝送して未臨界度モニタとして用いるためのデータ収集系まで含めた計測システムを英国のランカスター大学と共同で開発することを目的とする。

以下に、本事業の各研究項目の概要とそのスケジュール並びに、これらを遂行するための研究体制を示す。

#### (1) 検出器開発 (SiC、プリアンプ回路)

##### [研究目標]

SiC 検出器に中性子コンバータを取り付けた新しい SiC 中性子検出器と、その検出器に接合されたプリアンプ回路の開発を行う。

検出器としては、耐性温度は 60 °C 以上 (性能的には 300 °C 以上まで可能)、深さ 1 m の水中で使用可能、検出器サイズは 1 cm×1 cm 程度、検出器とプリアンプを一体化し全体厚さは 3 mm 以下、1000 Gy/h のガンマ線場において使用可能、中性子束  $10^7$  n/cm<sup>2</sup>/s の場において適切に中性子計測が可能であることを目指す。

##### [方法]

既に関開を行ってある SiC ガンマ線検出器 (1 cm×1 cm×300 μm) を元に中性子コンバータ物質 (<sup>10</sup>B または <sup>157</sup>Gd) の薄膜層を SiC 表面に付けたものを製作する。中性子コンバータ物質の選択、厚さ等については MCNP や Geant4 のモンテカルロ計算コードにより解析を実施して検討し、その結果を元に検出器を製作する。検出器からのプリアンプについては目標とする環境下において使用できるような性能を持つものとし、TTL 信号のようなパルス状の中性子検出の時間情報を適切に出力できるようにする。

#### (2) 信号伝送系の開発

##### [研究目標]

プリアンプからの信号を 1000 Gy/h のガンマ線場においてもガンマ線の影響をできる限り

小さく抑え、高線量場においても性能が劣化しにくく、30 m 離れた場所まで適切に信号を伝送することができるような伝送系の開発を行う。

[方法]

プリアンプからの信号伝送については、高線量場においてガンマ線等に起因するノイズをできる限り受けずに体系外まで伝送させる必要がある。その手法については同軸ケーブルを用いた方法、光ファイバーを用いる方法等があると考えられるが、同軸ケーブルは通常の放射線検出器系で用いる方法であり、確実な方法ではあるものの、十分なノイズ対策を行うためには多重シールド線を使う必要があり、ケーブルの取り回しが難しくなる。光ファイバーを使用する方法では、プリアンプの近傍に光変換装置を置き、光ファイバーで外部まで伝送するもので、近年開発が進められている高放射線場でも利用できる光ファイバーを用いることにより実現可能で、複数の検出器からの信号であっても 1 本の光ファイバーで伝送させることができるので、この方法が有力な候補である。

開発は京都大学のみでは難しいので、電子回路系やデータ入力系の設計経験が豊富なメーカーと共同で実施し、この信号伝送系の設計に関する打合せを行って、これまでの幾つかの試作機を製作してテストを行っている。

(3) データ収集装置の開発

[研究目標]

検出器から伝送されてきた信号を用いて燃料デブリ取出し時に使用する未臨界監視モニタとして利用できるデータ収集装置の開発を行う。

[方法]

検出器から送られてきた信号には、中性子信号とガンマ線等の外部ノイズの影響を受けた信号とが混在しており、それを分離して中性子のみの信号を取り出すことができるような装置（回路系）を(2)の信号伝送系の設計と合わせて構築を行う。未臨界監視モニタに使用できるようなデータ収集系については、時系列測定装置を用いて、その結果を PC に取り込み中性子源増倍法または中性子雑音解析法で、できる限りリアルタイムで処理することにより未臨界度を求めることができるよう解析プログラムを用いて実施する。

(4) 照射試験

[研究目標]

検出器、プリアンプ、信号伝送系からなるシステムの性能を確認するための試験を実施し、目標とした性能を有していることを確認する。

[方法]

ランカスター大学では高線量場での性能を確認するために、英国のコバルト 60 照射施設を用いて本システムの照射実験を実施する。また、京都大学のコバルト 60 ガンマ線照射装置および電子線型加速器を用いても照射実験を行い、ここでは中性子検出の応答についての確認試験を実施する。また、KUCA ではシステムを用いて未臨界監視モニタとして使用できる性能を有していることを確認する。

(5) 研究推進

研究代表者の下で英国ランカスター大学ならびに CLADS 等との連携を密にして、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。

表 2.1 に、本事業の全体スケジュールを示す。

表 2.1 本事業の全体スケジュール

実施項目	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度
(1) 検出器開発 (SiC、 プリアンプ回路) (英国、京都大学)	英国での開発への協力 ←→	英国での開発への協力 ←→	英国での開発への協力 ←→
(2) 信号伝送系の開発 (京都大学)	伝送系の検討 ←→	伝送系の開発 ←→	伝送系の開発 ←→
(3) データ収集装置の 開発 (京都大学)	収集装置の予備検討 ←→	収集装置の開発 (未臨界監視モニタ試験 準備) ←→	未臨界監視モニタ試験 ←→
(4) 照射試験 (京都大学、英国)	照射試験の準備 ←→	照射試験(英国) 照射予備試験(京大) ←→	照射試験(日本、英国) ←→
(5) 研究推進 (京都大学、英国)	調査、会議 ←→	調査、会議 ←→	調査、会議 ←→

図 2.1 に、本事業の研究実施体制図を示す。また図 2.2 に測定システム全体の構成図を示す。

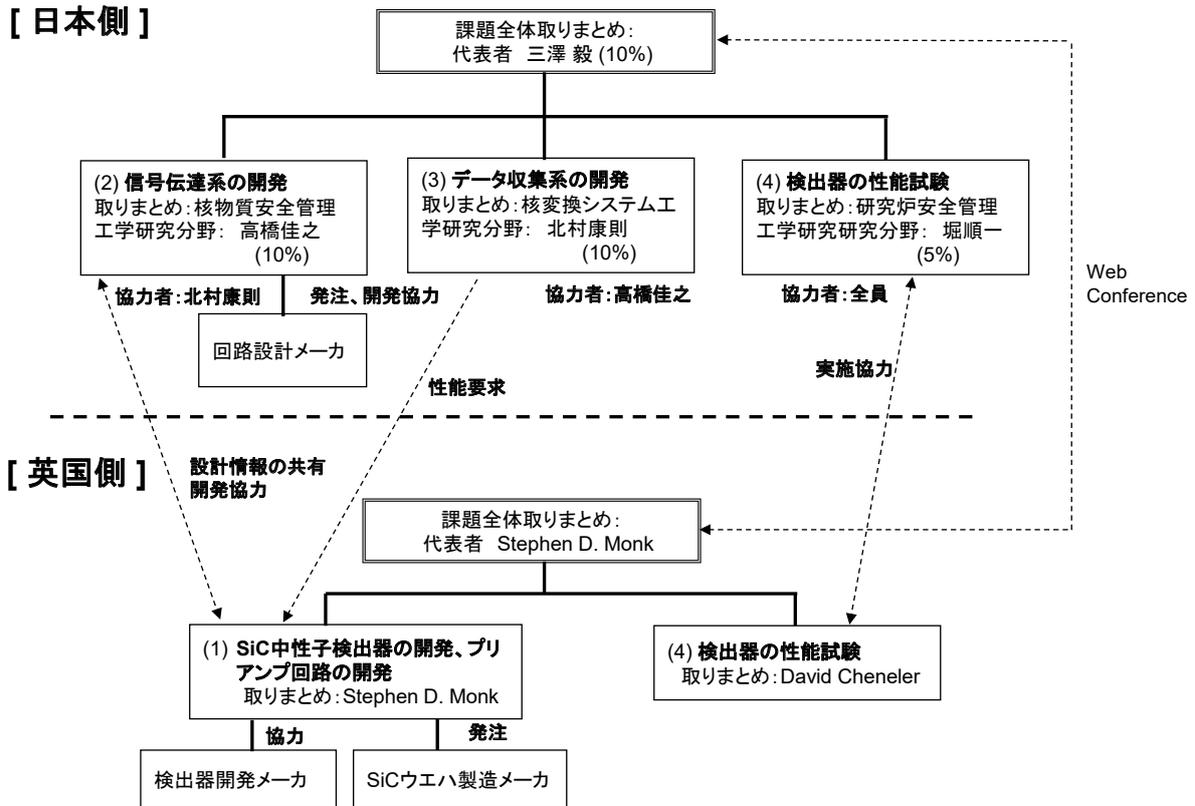


図 2.1 研究実施体制図

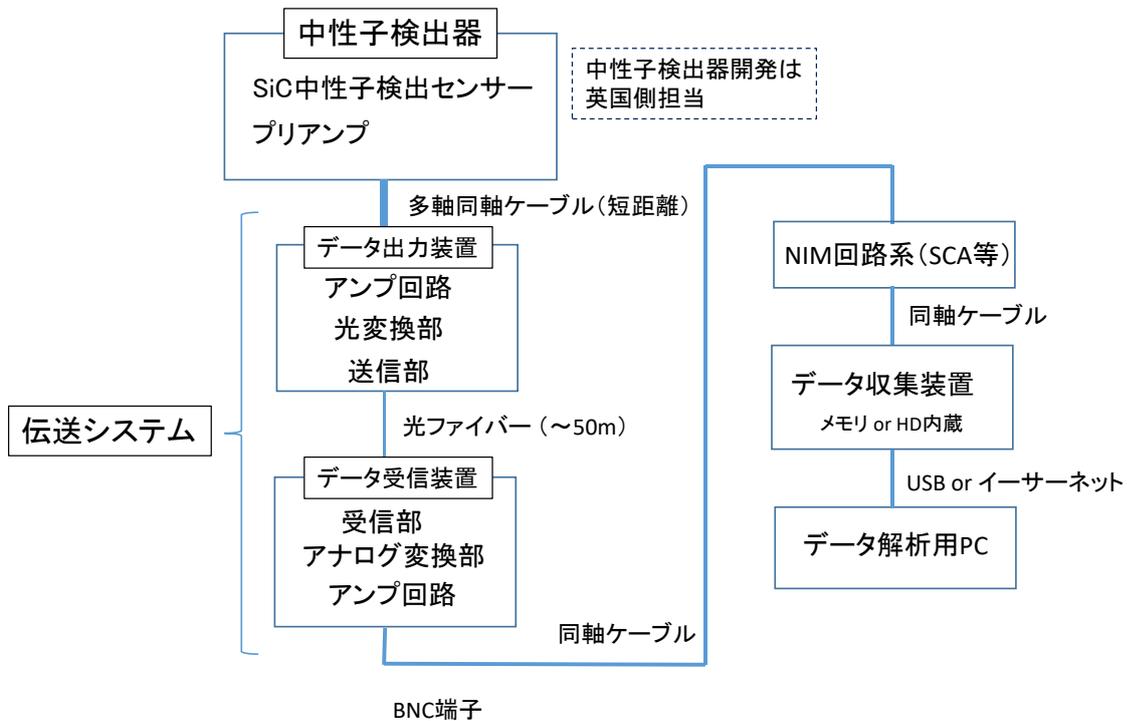


図 2.2 測定システム全体の構成図

## 2.2 各年度の成果の目標及び業務実施方法

### 2.2.1 平成 30 年度の成果の目標及び業務実施方法

以下に、各研究項目における平成 30 年度の成果の目標及び業務実施方法、表 2.2 に業務実施計画の項目別スケジュールを示す。

#### (1) 検出器開発 (SiC、プリアンプ回路)

SiC をベースとした中性子検出器の開発は主に英国側で実施する予定であり、英国にて実施する予定の試作器の性能確認実験 (中性子、ガンマ線照射実験) に参加すると共に、検出器の性能解析の解析結果の検討を共同で実施する。また、検出器の求められる性能について IRID 等からの情報を元に英国側と十分に情報交換を行う。

平成 30 年度中に試作器の性能確認 (検出効率の測定、ノイズレベルの確認等)、SiC 表面に使用する中性子コンバータ物質の種類や厚さ等を決定することを目標とする。

#### (2) 信号伝送系の検討

高線量場で使用することが可能な信号伝送系の設計の検討を行う。多重同軸ケーブルまたは光ファイバーを使用した伝送系を考えているが、英国での検出器開発の状況を確認しながらどのような方法が最適であるかを検討する。特に、伝送系の第 1 候補である光ファイバーを使用することを想定して、耐放射線性の高い光ファイバーを用いてコバルト 60 照射施設等での照射試験、信号伝送の試験を実施し、平成 30 年度中に伝送系の方針を決定することを目標とする。

#### (3) データ収集装置の開発

検出器からの信号を元に、未臨界監視モニタに使用することができるデータ収集系について、検出器から伝送される信号について幾つかの波形を想定した上で、それらに対応した最適なシステムの検討を行う。

#### (4) 照射試験

令和元年度以降に予定されていた検出器の照射試験を行うための準備として、中性子束測定用の検出器とその回路系などを購入して、それらの運用のための予備試験を行う。

#### (5) 研究推進

研究代表者の下で英国ランカスター大学との連携を密にして、京都大学側が開発全体を把握し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英国との打合せや会議等を開催する。

表 2.2 平成 30 年度業務実施計画の項目別スケジュール

区分	平成 30 年									令和元年		
	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
(1) 検出器開発 (SiC、 プリアンプ回路)							←	→				
(2) 信号伝送系の検討							←	→				
(3) データ収集装置の 開発							←	→				
(4) 照射試験							←	→				
(5) 研究推進							←	→				

## 2.2.2 令和元年度の成果の目標及び業務実施方法

以下に、各研究項目における令和元年度の成果の目標及び業務実施方法、表 2.3 に業務実施計画の項目別スケジュールを示す。

### (1) 検出器開発 (SiC、プリアンプ回路)

SiC をベースとした中性子検出器の開発において、英国側で実施する試作器の照射試験 (中性子、ガンマ線測定実験) に参加すると共に、日本側でも当該試作器の(4)に記載の照射予備試験を実施し、実験結果の検討を共同で行う。プリアンプの設計製作と(2)信号伝送系の設計は両国で情報交換を行いながら計測システムに齟齬が生じないように実施する。

また、検出器の求められる性能については、IRID 等からの情報を元に当初予定した性能を向上させるために英国側と十分に情報交換を行う。

### (2) 信号伝送系の開発

平成 30 年度の検討結果を踏まえ、高線量場で使用することが可能な信号伝送系として、光ファイバーを主として、一部で多重同軸ケーブルを使用した伝送システム (データ転送装置及びデータ収集機能を含む。) の設計と試作器の製作を行う。その後、コバルト 60 照射施設等での高線量場での予備試験を実施し、その試験結果を最終的な設計に生かす。

### (3) データ収集装置の開発

平成 30 年度に行った最適なシステム検討の結果、(2)の伝送システムにデータ収集機能を組み込むことが可能となったため、(2)の予備試験においてデータ収集機能の性能確認試験を併せて実施する。また、この装置を燃料デブリの未臨界度監視モニタとして利用するために、最適な検出器の数量や配置などを解析により検討する。

### (4) 照射試験

英国で実施する予定の検出器の中性子、ガンマ線の照射試験に参加する。また、京都大学の研究用原子炉やコバルト 60 ガンマ線照射装置を用いた照射予備試験を行う。

### (5) 研究推進

研究代表者の下で英国ランカスター大学ならびに CLADS 等との連携を密にして、京都大学側が開発全体を把握しながら研究を進める。研究実施計画を推進するための英国との打合せや会議等を開催する。



### 2.2.3 令和2年度の成果の目標及び業務実施方法

以下に、各研究項目における令和2年度の成果の目標及び業務実施方法、表2.4に業務実施計画の項目別スケジュールを示す。

#### (1) 検出器開発 (SiC、プリアンプ回路)

SiCをベースとした中性子検出器の開発において、英国側で実施する試作器の照射試験(中性子、ガンマ線測定実験)に参加すると共に、日本側でも当該試作器の(4)に記載の照射予備試験を実施し、実験結果の検討を共同で行う。プリアンプの設計製作と、(2)信号伝送系の設計は両国で情報交換を行いながら計測システムに齟齬が生じないように実施する。

また検出器の求められる性能については、IRID等からの情報を元に当初予定した性能を向上させるために英国側と十分に情報交換を行う。

#### (2) 信号伝送系の開発

令和元年度の検討結果を踏まえ、高線量場で使用することが可能な信号伝送系として、光ファイバーを主として一部で多重同軸ケーブルを使用した伝送システム(データ転送装置及びデータ収集機能を含む。)の設計と試作器の製作を行う。その後、コバルト60照射施設等での高線量場での予備試験を実施し、その試験結果を最終的な設計に生かす。

#### (3) データ収集装置の開発

令和元年度までに行った最適なシステム検討の結果、(2)の伝送システムにデータ収集機能を組み込むことが可能となったため、(2)の予備試験においてデータ収集機能の性能確認試験を併せて実施する。また、この装置を燃料デブリの未臨界度監視モニタとして利用するために、最適な検出器の数量や配置などを解析により検討する。

#### (4) 照射試験

英国で実施する予定の検出器の中性子、ガンマ線の照射試験に参加する。また京都大学の研究用原子炉やコバルト60ガンマ線照射装置を用いた照射予備試験を行う。

#### (5) 研究推進

研究代表者の下で英国ランカスター大学ならびにCLADS等との連携を密にして、京都大学側が開発全体を把握しながら研究を進める。研究実施計画を推進するための英国との打合せや会議等を開催する。

表 2.4 令和 2 年度業務実施計画の項目別スケジュール

区分	令和 2 年			令和 3 年		
	4～6 月	7～9 月	10～12 月	1～3 月	4～6 月	7～9 月
(1) 検出器開発 (SiC、プリアンプ回路)	←					→
(2) 信号伝送系の開発	←					→
(3) データ収集装置の開発	←					→
(4) 照射試験	←					→
(5) 研究推進	←					→

### 3. 業務の実施内容及び成果

以下に、各研究項目における実施内容及び成果を示す。

#### 3.1 検出器開発 (SiC、プリアンプ回路) 【平成 30 年度～令和 2 年度】

SiC をベースとした中性子検出器の開発は主に英国側で実施することになっている。英国では SiC 検出器の前に Si 中性子検出器を試作した。その Si 検出器は約 1.5 cm×0.5 cm で Si 検出器の表面に、中性子コンバータとして B<sub>4</sub>C を蒸着した薄い膜を貼り付けてある。その最初の中性子、ガンマ線照射による性能確認実験を、平成 30 年 12 月に英国ランカスター大学にて実施した。実験ではランカスター大学の実験室に設置された黒鉛パイル (約 1.5 m×1.5 m×1.5 m) に Am-Be 中性子源を入れた中性子照射設備の近傍に検出器を置き、試作検出器のプリアンプからの信号波形、ノイズレベルの確認等の性能確認試験を行った (図 3.1.1)。その結果、以下のことが判った (①～③については図 3.1.1 のオシロスコープの表示より)。

- ① プリアンプからの信号の波高は数十 mV、減衰定数は 50 μ 秒程度で、波形はこれまで使用経験の多い He-3 検出器等の中性子検出器からのものと大差は無い
- ② 信号はマイナス
- ③ 信号のバックノイズレベルがやや高い
- ④ 中性子の検出効率は 1 インチ直径の He-3 に比べて 1/10 程度と下がるが、ある程度の個数を集めることで実用上十分な検出効率にすることは可能と思われる。

実験前、プリアンプからの信号としては波高が低いのではと懸念していたが、通常の中性子検出器からの信号の波高、波形と大差は無く、その後の回路系として通常のもので使用できることが判った。一方、信号のノイズレベルがやや高いことは大きな問題であったが、現場を再確認したところ、この原因としてはプリアンプからデータ収集装置までの距離が長く、しかも、その間を外部ノイズに強い同軸ケーブルを使用せずにフラットケーブルを用いていたためと考えられるため、今後はケーブルを同軸ケーブルにするなどの変更を行うことで解決できるとした。検出効率が低いため、検出器としては複数のものを同時に使用することが求められるので、データの伝送装置としては複数の検出器の信号を同時に取り込む能力が必要になることが判った。

これらの実験結果や打ち合わせを元に、英国で開発中の SiC をベースとした中性子検出器の想定図を図 3.1.2、図 3.1.3 に示す。検出器の中性子に対する検出効率の向上やガンマ線に対する検出効率の低減を実現するために、検出器に取り付ける中性子コンバータの素材やその厚みは非常に重要な要素となる。中性子コンバータの素材としては、候補として考えられたホウ素 (中性子吸収により (n, α) 反応で高エネルギーの <sup>4</sup>He イオンと <sup>7</sup>Li イオンを発生) とガドリニウム (中性子吸収によりベータ線、すなわち電子を発生する) の化合物を比較検討した結果、検出器へのドーピングに適している <sup>10</sup>B 濃縮 (解析では 100%濃縮) の炭化ホウ素 B<sub>4</sub>C を選定した。

検出器の仕様の決定に資するため、モンテカルロ計算コード MCNP ならびに Geant4 を用いて検出器性能の解析を実施した。解析ではこの  $B_4C$  のドーピング厚さを  $1\ \mu\text{m}$  から  $4\ \mu\text{m}$  まで変化させて熱中性子に対する応答を計算した。計算結果を図 3.1.4 に示す。この図は  $^{10}\text{B}$  と中性子の反応により生成する  $^4\text{He}$  または  $^7\text{Li}$  の 1 つのイオンのエネルギーに対する SiC が信号を出す確率を示したものであり、 $B_4C$  のドーピング厚さは  $2\ \mu\text{m}$  が適しているとの知見を得た。これは、 $^{10}\text{B}$  と中性子の反応により生成する  $^4\text{He}$  と  $^7\text{Li}$  の両イオンの  $B_4C$  中での飛程が短いため、ドーピング厚さを増やしても SiC まで届くイオン数に限りがあるためと考えられる。生成された  $^4\text{He}$  または  $^7\text{Li}$  イオンが  $B_4C$  中に均一に生成され SiC までに届く途中で、飛程に比例してエネルギーを失うとすると、図 3.1.4 のグラフを積分して Response の平均値を求めると信号生成確率となり、 $0.3\ \text{MeV}$  以下の信号をノイズとして除去したときの検出効率の  $B_4C$  厚さ依存性を図 3.1.5 に示す。この図の“diffuse source”が  $4\ \pi$  方向から中性子が入射したときの結果で、厚さが  $2\ \mu\text{m}$  のとき中性子の検出効率は約  $0.04$  となることがわかった。

中性子への応答計算に次いで、検出器全体に対するガンマ線への応答についても同様の解析計算を実施した。計算に使用した検出器のサイズは  $1\ \text{cm} \times 1\ \text{cm} \times 13\ \mu\text{m}$  とし、デブリ中に存在すると考えられる代表的なガンマ線源として  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{60}\text{Co}$  を使用した。計算結果を図 3.1.6 に示す。中性子の場合と同様に、このグラフを積分して Response の平均値を求めると、最も検出効率が高い  $1\ \text{MeV}$  以上の高エネルギーガンマ線が、有感部に対して水平方向 ( $90^\circ$ ) に入射したとき、中性子の場合と同様に  $0.3\ \text{MeV}$  以下の信号をノイズとして除去すると、検出効率は  $1.6 \times 10^{-6}$  と、中性子の検出効率の  $0.04$  に比べて 4 桁小さい値となる。ガンマ線が垂直方向 ( $0^\circ$ ) に入射したときの検出効率は  $90^\circ$  の場合より小さくなり、燃料デブリ中で一番重要なガンマ線源である  $^{137}\text{Cs}$  からのガンマ線が、 $4\ \pi$  で入射したときの検出効率は、 $9 \times 10^{-8}$  と中性子に比べて 5 桁小さい値となり、ガンマ線への検出効率が中性子に比べて十分に小さいことがわかった。

当初の計画では、これらの解析結果を元に SiC 検出器の表面に所定の厚さの  $B_4C$  をドーピングする中性子検出器を製作する予定であったが、ヨーロッパでのコロナ禍の影響により、ドーピングを発注する予定の SiC ウエハ (図 3.1.7) を製造しているスウェーデンの企業の工程が進まず、解析通りのドーピング作業まで進めることができなかった。そのため、SiC 中性子検出器としては、検出器の表面に  $B_4C$  を蒸着した薄いフィルムに貼り付けたものを製作することとした (図 3.1.8)。

検出器に取り付けるプリアンプの設計について日英両国で情報交換を行いながら検討を実施した。令和元年度までの試作器を用いた実験では、信号のノイズレベルがやや高く、プリアンプの設計やプリアンプからのケーブル等に問題があった。その後、ケーブル等の変更を行い、英国側でプリアンプ回路の再評価を実施したところ、ノイズレベルは低減され、問題ないことを確認した (図 3.1.9 は中性子照射時の結果)。また、中性子とガンマ線による波形については、平成 30 年度の英国での実験で確認したもので問題が無いことを確認したが、波

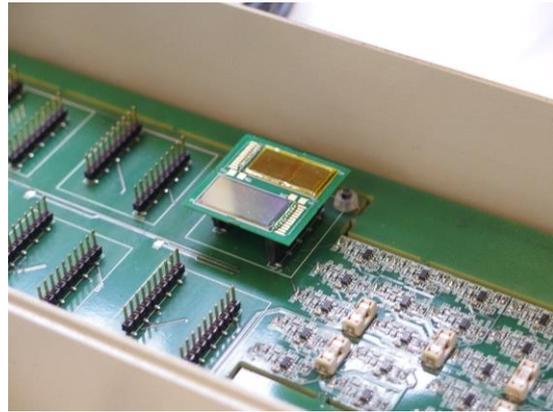
高レベルについては変動する可能性があることがわかり、その結果を元に後述する信号伝達系の設計でアンプのゲインを自由に変更することができるように変更したものを試作し（図 3.2.10）、変動した場合でも容易に対応できるようにした。

英国で作成した B<sub>4</sub>C 蒸着フィルム付きの SiC 検出器と厚さの非常に薄いプリアンプ回路系を備えた初期段階の試作器を入手し（図 3.1.8）、改良した信号中性子やガンマ線を照射して信号波形やノイズレベル等の確認を行った（図 3.1.9）。この基板には 1 cm×1 cm の SiC 中性子検出器が 3 枚取り付けられており、プリアンプを通して信号を出すことができるようになっている。

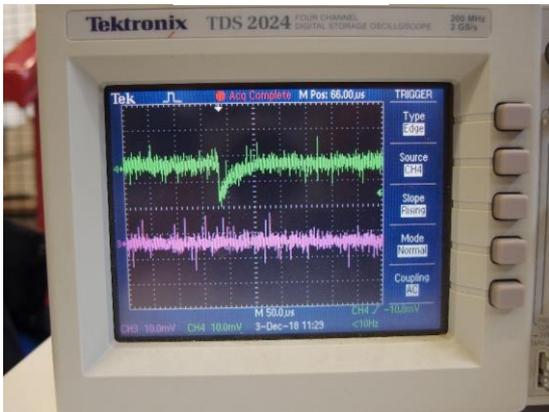
以上の通り、英国での検出器開発については、既に開発されていた Si 検出器を利用して、その回路系を設計から開始したもので、検出器と回路系の性能確認については英国での共同実験でも確認した。その後、SiC 検出器のシミュレーション解析、およびプリアンプ回路の設計までは順調に行われていたが、その後のコロナ禍の影響で、SiC 検出器を製作するスウェーデンの会社での実際の製作遅れがあり、SiC 検出器としては当初の目標としていた性能のものを開発することができたものの、SiC ウエハに検出器とプリアンプ系を組み込んだ薄型形状のシステムを作製するところまでは開発を進めることができなかった。



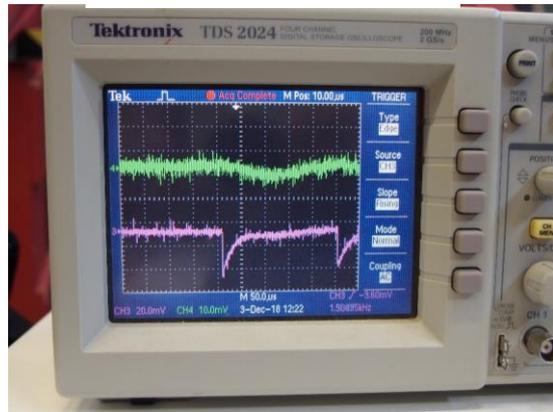
Si 検出器



Si 検出器+プリアンプ



プリアンプ出力



プリアンプ出力



Am-Be 中性子照射設備



プリアンプ内部

図 3. 1. 1 ランカスター大学での測定実験

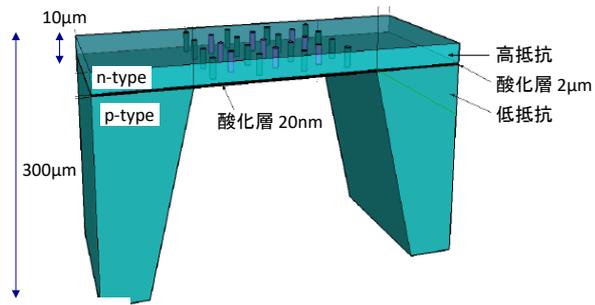


図 3.1.2 SiC ベース検出器の想定図

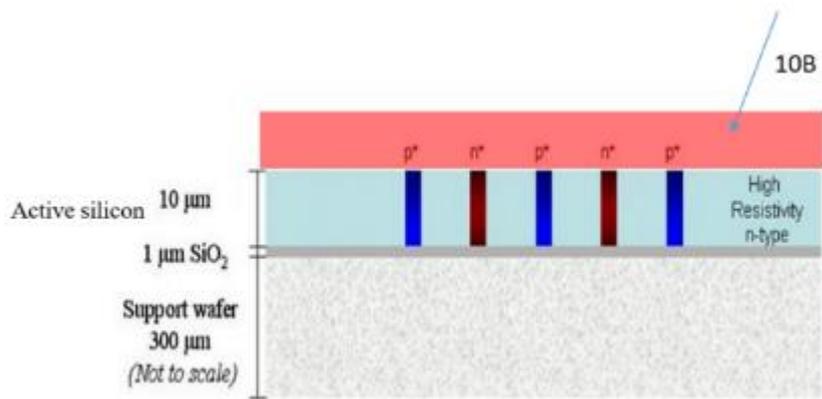


図 3.1.3 SiC ベース検出器の構造

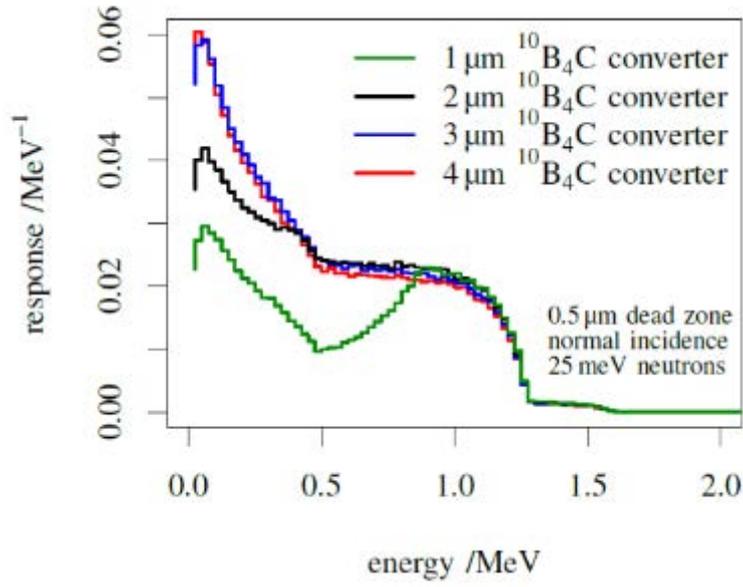


図 3.1.4 熱中性子に対する応答計算結果

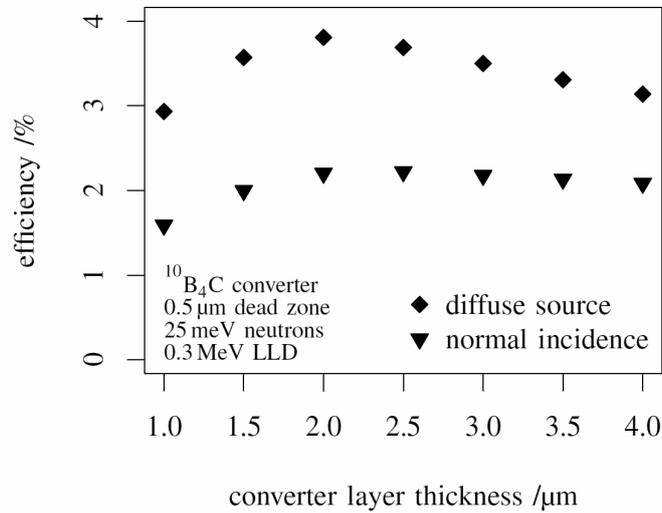


図 3.1.5 中性子に対する検出効率の  $\text{B}_4\text{C}$  厚さ依存性

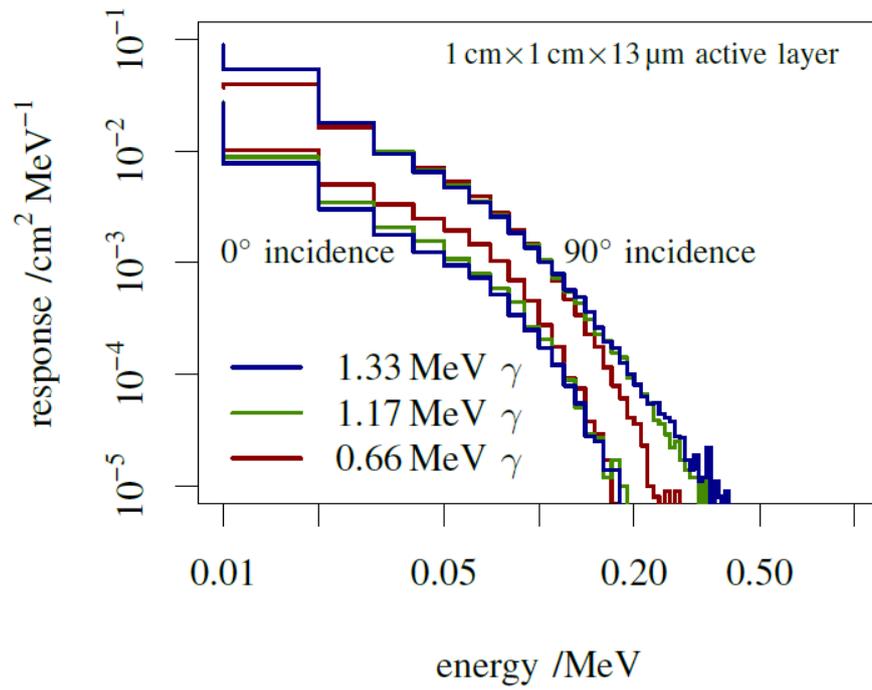


図 3.1.6 ガンマ線に対する応答計算結果

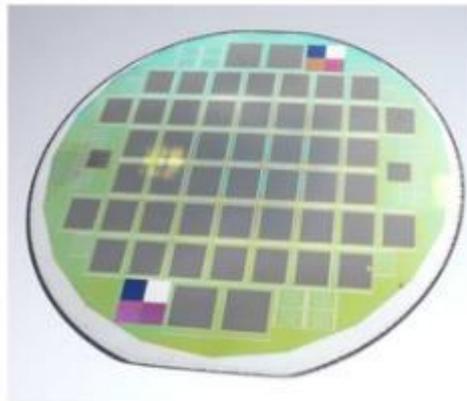


図 3.1.7 SiC ウエハ

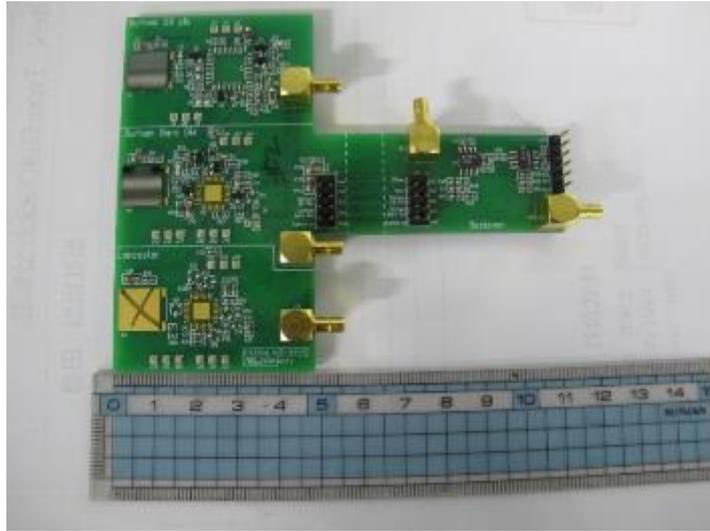


図 3.1.8 SiC ベース検出器とプリアンプ

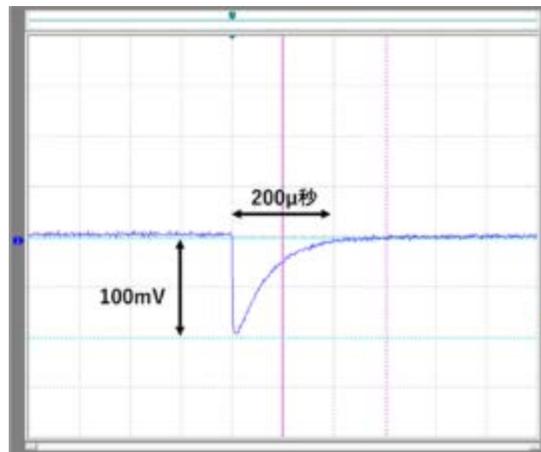


図 3.1.9 SiC ベース検出器のプリアンプ出力

### 3.2 信号伝送系の開発【平成30年度～令和2年度】

#### (1) 信号伝送系の設計と製作

高線量場で使用することが可能な信号伝送系として光ファイバーと多重同軸ケーブルについて検討した結果、耐放射線性、ノイズ低減、ケーブルの重量や取り回し易さ等の観点から光ファイバーを信号伝送に用いた装置が適当であると判断し、令和元年度までの検討を元に新しい仕様を決定し、それを元に詳細設計と装置製作を業者に発注した。主な設計仕様は以下の通りである。

#### (a) 構成

- データ出力装置 1台
- データ受信装置 1台
- 光ファイバーケーブル 一式

#### (b) 仕様

##### データ出力装置

- ① SiC中性子検出器、またはSiC中性子検出器と同等性能を有するSi中性子検出器に接続された、2系統以上のプリアンプから出力されるアナログ信号(1～50 mV、パルス幅1～50  $\mu$ 秒)を入力するチャンネルを有すること。ただし、パルスの極性はプラスでもマイナスでも対応することができること。
- ② 3系統以上のプリアンプからの設定値以上の波高のアナログ信号を、別々に光デジタル信号に変換することができること。この設定値は可変であること。
- ③ 入力チャンネルについて、各チャンネルの計数率の合計が50 kcps以上の入力に対応することができること。
- ④ 出力される光デジタル信号の波長は1000～1500 nmとし、光デジタル信号を石英製光ファイバーケーブル(長さ100 m以上、ケーブル数は4本以下)を通してデータ受信装置まで転送することができること。
- ⑤ データ受信装置において入力チャンネル番号を識別することができる光デジタル信号であること。
- ⑥ 光ファイバーケーブルは京都大学から支給するものを使用すること。
- ⑦ データ出力装置に供給する電圧はDC24 V以下とする。
- ⑧ 回路は2段重ねとして、全体積をできる限り小さくする。

##### データ受信装置

- ① データ出力装置から石英製光ファイバーケーブルを通じて転送された光デジタル信号を受信できること

- ② データ出力装置の入力信号数と同じ数の BNC 端子または LIMO 端子を有し、データ出力装置の②で変換されたアナログ信号をデータ出力装置の入力チャンネル番号に応じた番号の端子から別々に出力することができること。
- ③ アナログ信号のゲインを変更することが可能であり、10 mV から 1 V の入力信号に対応することができること。
- ④ プリアンプから入力されたアナログ信号の入力時刻のデータを 1  $\mu$  秒以内の単位で測定し、結果をデータ受信装置からパーソナルコンピュータ (PC) にイーサネット、または USB 経由で転送して PC 上に時刻データのテキストファイルとして保存できること。
- ⑤ ③のデータ転送を行うための PC (Windows) 上のソフトウェアがあること。
- ⑥ データ受信装置に供給する電圧は AC100 V または DC24 V 以下とする。
- ⑦ データ受信装置に供給回路は 2 段重ねとして、全体積をできる限り小さくする。

その結果、3 系統の SiC 検出器からのアナログ信号を同時に取り込んで、2 本の細径の光ファイバーにより信号を伝送させるデータ入力装置とデータ出力装置が設計され、プリアンプからの信号 (LIMO 端子入力) を光信号に変換して光ファイバーで伝送し (光の波長は光ファイバーで一般的に用いられている 1310 nm)、その光信号を光ファイバーからの信号を受けて元の 3 種類のアナログ信号に変換して BNC 端子から外部に出力し、さらに入力されたアナログ信号の入力時刻のデータを 1  $\mu$  秒単位で、USB ケーブルで PC に転送することができるデータ転送装置 (基板の大きさは 8 cm $\times$ 5.5 cm $\times$ 2 cm) を製作した (図 3.2.1~図 3.2.8)。

図 3.2.1、図 3.2.2 にデータ転送装置の出力側と受信側の写真を、図 3.2.5 と図 3.2.6 にその図面を示す。図 3.2.1 は最初に性能を確認するために設計したもので、その後、新たな機能の組み込みや不要な機能の削除を行った最低限の機能を残し、さらに体積を減少させるために二段重ねにした出力側装置の写真を図 3.2.3、図 3.2.4 に、図面を図 3.2.7、図 3.2.8 に示す。

データ送信側のシステムの概要は以下の通りである (サイズ等については表 3.2.1)。

- ・ SiC 中性子検出器 4 チャンネル (CH0-3) のアナログ信号を AD 変換し SFP モジュールを用いてデータ受信装置に転送する。
- ・ データ受信装置へは SiC 中性子検出器 3 チャンネルのデータを転送する。
- ・ 1 チャンネル目に ADC#0-A、2 チャンネル目に ADC#0-B、3 チャンネル目に ADC#1-A または ADC#1-B を転送する。3 チャンネル目の ADC#1-A、ADC#1-B の選択は、データ受信装置からの設定に従うことにする。

- ・SiC 検出器アナログパルスの極性は、ADC 入力段のプリアンプでプラス極性に変換する（実装固定）。
- ・ADC 以降は、SiC 検出器アナログパルスはプラス極性として動作する。

データ受信側のシステムの概要は以下の通りである。

- ・データ出力装置から光デジタル信号で入力される SiC 中性子検出器データ (CH0-3) をアナログ信号に復元する。
- ・光デジタル信号の閾値越えの判定を行い、閾値越えを検出した場合、パルス出力と検出間隔のシリアル通知を行う (SiC 中性子検出器チャンネル毎に閾値を USB ケーブルで接続した PC から連続的に変更可能)。
- ・シリアルポートを 4 ポート有し、3 ポートは、未使用、1 ポートは、データ受信装置 FPGA のレジスタ設定に使用する。
- ・SiC 検出器のアナログ信号は、パルス幅最小 1  $\mu$  秒、10 kcps に対応。
- ・入力信号の波高値が変動したことに対応するため、ゲインを  $\times 5 \sim \times 100$  までほぼ連続的に変更することが可能 (USB ケーブルで接続した PC から変更) (図 3.2.3)。

SiC 検出器データの閾値判定については以下のようにした。

- ・SFP 受信パケット ADC データ CH0-2 とチャンネル毎のパルス検出判定閾値レジスタ設定を比較し、パルス検出判定閾値設定値を超えた場合にパルス出力する。
- ・検出条件としては、  
「SiC 検出器データ (ADC データ) > パルス検出判定閾値設定値」  
とする。
- ・パルス出力は、検出条件を満たした場合に 0.5  $\mu$  秒間 “H” を出力する。
- ・パルス “H” 出力期間 (0.5  $\mu$  秒) は検出を行わない。
- ・SiC 検出器出力の最小パルス幅 1  $\mu$  秒であれば、SiC 検出器出力周期に関わらずパルス出力が可能。

設計された基板の概略は以下の通りである。

- ・材質：FR4-1.6t
- ・基板サイズ：12 cm $\times$ 8 cm (受信側)、8 cm $\times$ 5.5 cm (入力側)
- ・層数：6 層
- ・表面処理：無電解金フラッシュ

基板の大きさは基板サイズが 8 cm $\times$ 5.5 cm を使用し、2 段に重ねる、不要な端子を取り外すなどの設計変更を行うことで体積を約 150 cm<sup>3</sup> と小型化することができた。

装置の基本性能を確認するために、SiC 検出器のプリアンプからの信号を模擬したパルサーからの信号を送信側の 3 入力端子に同時に入れて、光ファイバーで接続された受信側の信号を確認した結果を図 3.2.9 に示しており、信号の波形が適切に受信側に送信されていることを確認することができた。また新たに追加したゲイン変更機能を用いたときに、ゲインを適切に変更することができて受信側に送られていることも確認することができた (図 3.2.10)。

後述する伝送装置を用いた未臨界度測定の実験により、伝送装置を用いて検出器からの時刻情報のデータを PC に転送して保存することができることを確認した。また、入力側ボードの送信装置についてはコバルト 60 照射施設、および電子線型加速器での高線量場での性能確認実験を実施した。

データ転送に使用する光ファイバーとしては、株式会社フジクラ製の耐放射線性シングルモード光ファイバーケーブル (SMF-RRSMFB) (図 3.2.15) を使用した。

この光ファイバーは、コア及びクラッドにフッ素と含むファイバー (F-SiO<sub>2</sub>、フッ素含有量はコアで 0.8 wt%、クラッドで 2.2 wt%) で、コア外径が 0.008 mm でクラッド外径 0.125 mm、伝送損失は 1310 nm の波長の光信号に対して 0.6 dB/km と、今回の目的としている 100 m 程度の距離であれば、ほとんど減衰を問題にする必要は無いと考えられる。さらに従来の光ファイバーであれば、例えば 10 kGy の照射を受けたときに約 13 dB/km と伝送性能が大きく低下してしまうが、この光ファイバーは 100 kGy という放射線環境下においても、約 2 dB/km、1 MGy でも約 5 dB/km の伝送性能の低下に押さえられるため、福島第一の燃料デブリ取り出し環境においても十分に使用することができると考えている。実験では、この光ファイバーをポリエチレン製またはテフロン製のチューブに挿入して使用した (一部はアルミニウム管を使用) (テフロン製のチューブのほうが光ファイバーの挿入を行いやすいため使用)。光ファイバーのコネクタは本研究経費で購入した作成器具等を用いて製作し、そのコネクタの性能確認は同じく本研究経費で購入した光テストと光源を使用した。

本装置を用いて、NaI (Tl) シンチレーション検出器のプリアンプ信号を送信装置に入力し、光ファイバーでデータ転送して受信装置による受信信号を MCA に入力してガンマ線エネルギースペクトルを求める実験を行った。

最初に隣接する信号間の頻度分布を測定した。結果を図 3.2.11 に示す。これは測定装置系の不感時間を測定するための実験であり、NaI (Tl) シンチレーション検出器とプリアンプ、データ転送装置を含めた検出器系の不感時間は 5~6  $\mu$  秒以内であることが判った (図の時間間隔が小さいところで頻度が下がっているところが不感時間の影響のある箇所)。この不感時間は、通常の NaI (Tl) シンチレーション検出器と NIM モ

ジュールを用いた回路系での不感時間である 3~5  $\mu$  秒とほとんど変わっておらず、この不感時間であれば中性子検出器により燃料デブリ体系（水減速体系）において未臨界度を測定する上で問題は無いと考えられる。

図 3. 2. 12 に  $^{137}\text{Cs}$  の測定結果、図 3. 2. 13 に  $^{60}\text{Co}$  の測定結果を示す。両結果共にエネルギースペクトルの形状は  $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV のピーク、および、 $^{60}\text{Co}$  の 1. 17 MeV と 1. 33 MeV の 2 本の光電ピークの特徴をよく表していることが判る。ガンマ線エネルギーと MCA のチャンネル番号の関係を図 3. 2. 14 に示しており、両者は直線性の関係を示していることから本データ転送装置により波高データも光ファイバーにより適切に転送することができることが判った。



図 3.2.1 データ転送装置（左：出力側、右：受信側）

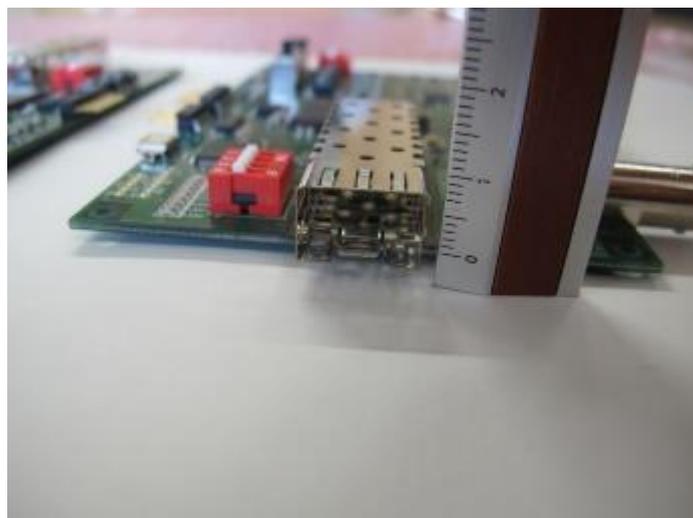


図 3.2.2 光ファイバー接続用コネクタ部分拡大写真（受信側）

表 3.2.1 データ送信機の基本情報

	データ送信機
縦 [cm]	5.5
横 [cm]	8.0
高さ [cm]	2.5
重さ [g]	63.0



図 3.2.3 データ送信機

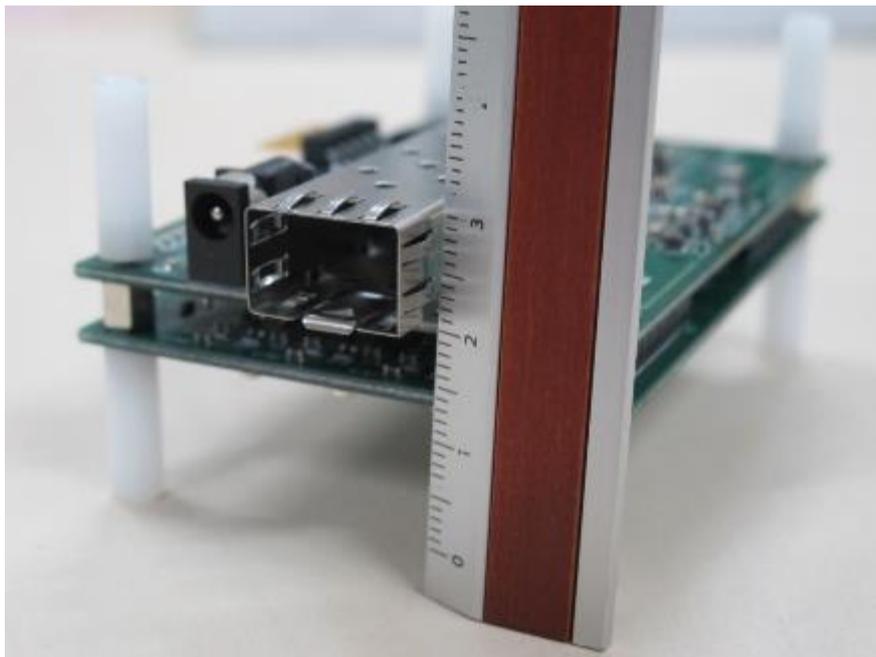


図 3.2.4 光ファイバー接続用コネクタ部分拡大写真（出力側）  
（4隅の白い棒は一時的に取り付けたもので取り外し可能）

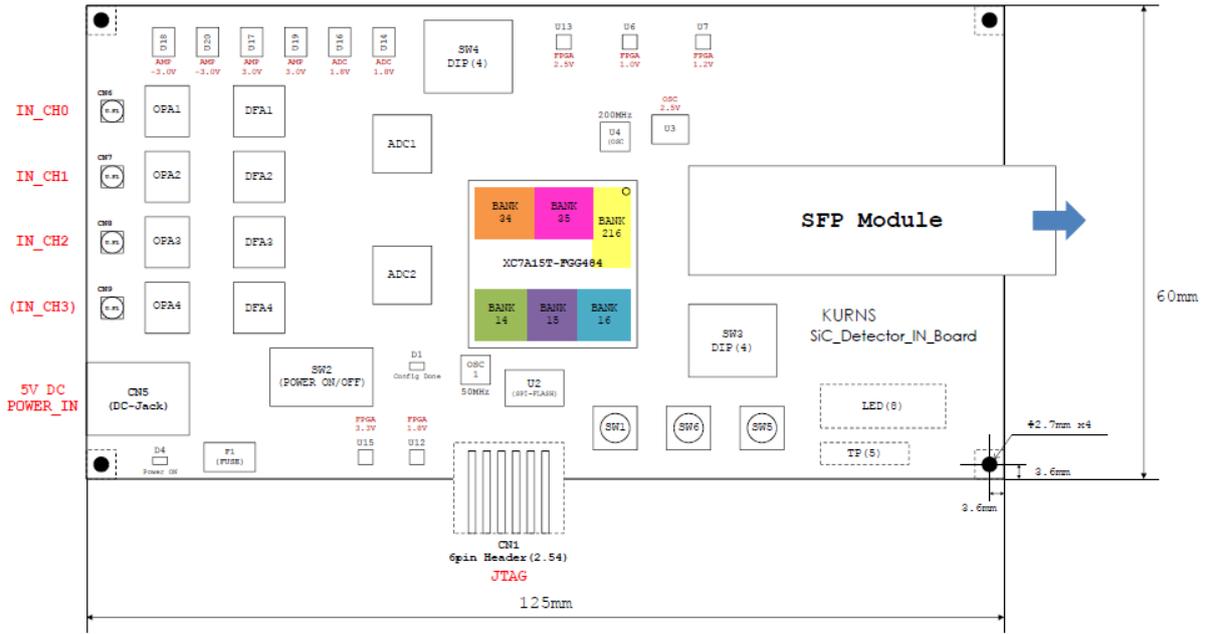


図 3.2.5 送信側装置配置図

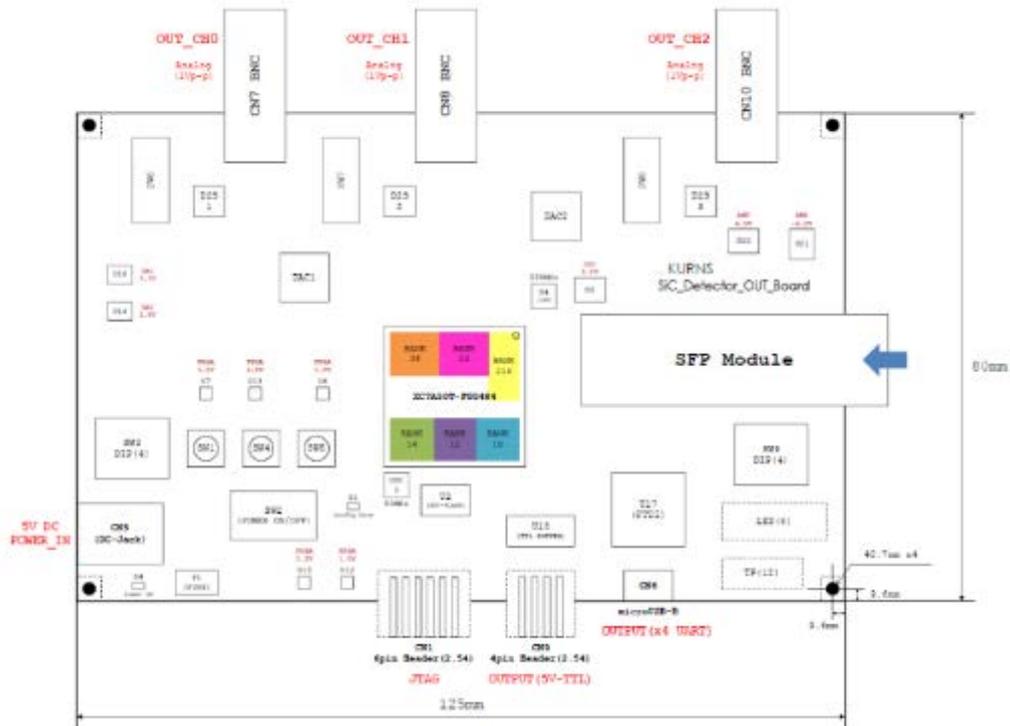


図 3.2.6 受信側装置配置図

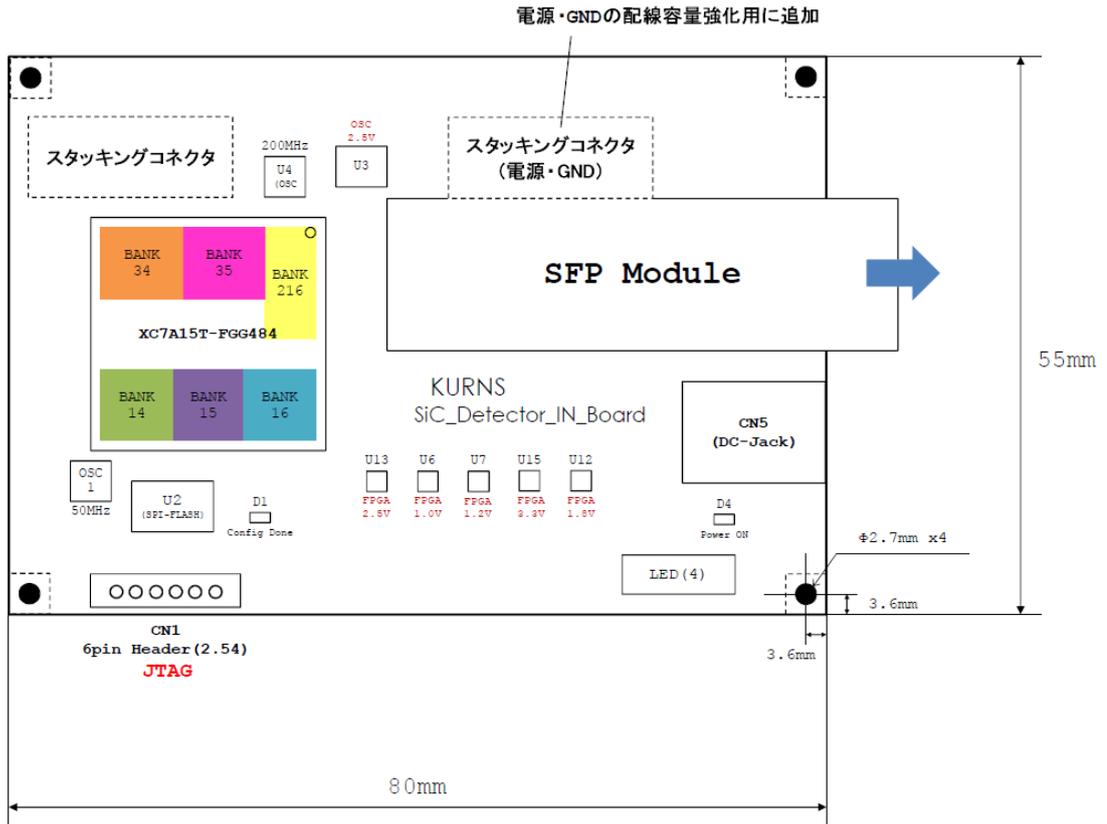


図 3.2.7 出力側外形図

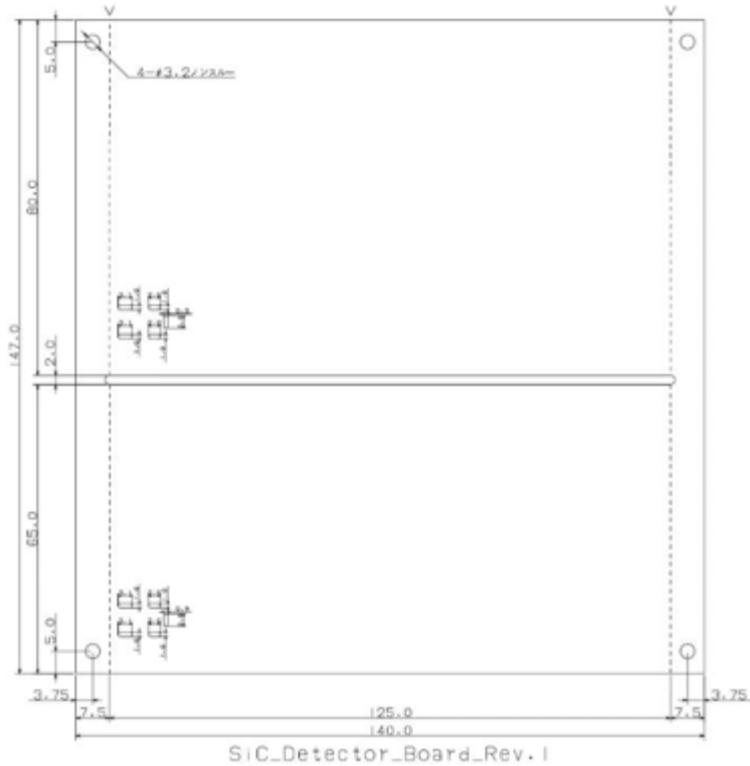


図 3.2.8 装置外形図

送信ボードセンサ入力  
CH0~CH2  
波高：26mV

受信ボード BNC 出力  
CH0 波高：266mV  
CH1 波高：272mV  
CH2 波高：274mV

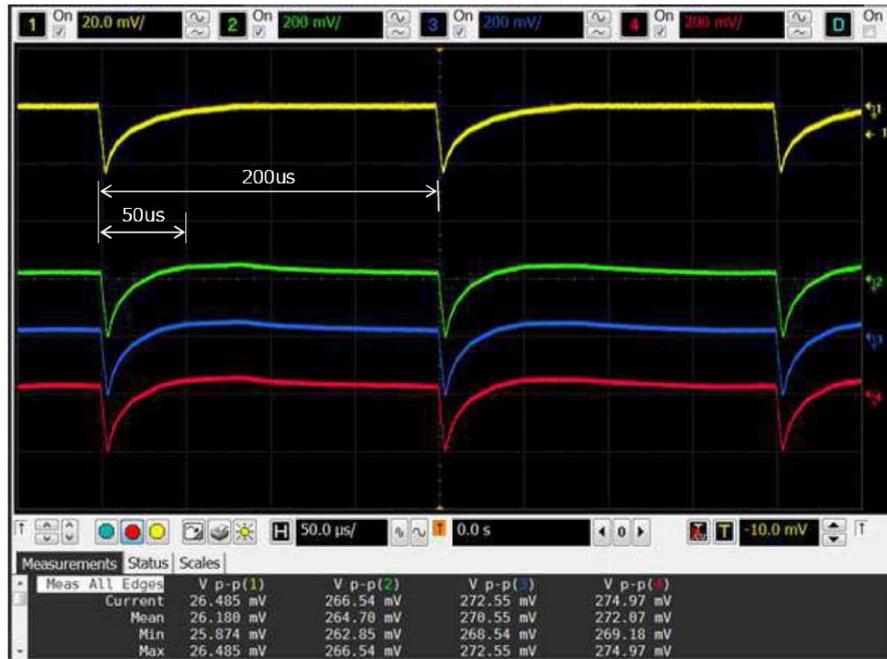
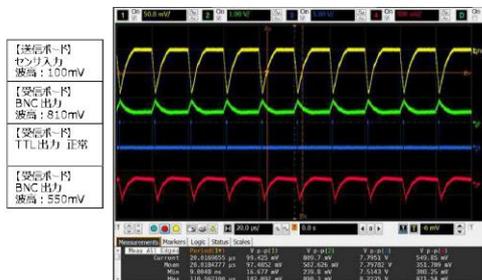


図 3.2.9 装置の性能テスト

黄色：入力信号、緑、青、赤：出力信号

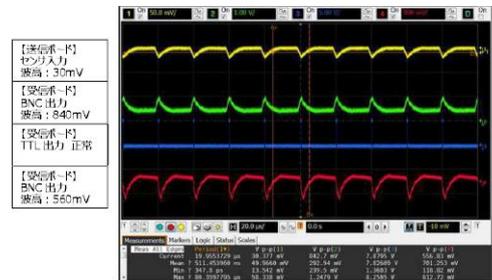
①センサ入力と受信側ボードの出力

パルス間隔 20us ゲイン設定 1'h4(5 倍)



③センサ入力と受信側ボードの出力

パルス間隔 20us ゲイン設定 1'h9(25 倍)



②センサ入力と受信側ボードの出力

パルス間隔 20us ゲイン設定 1'h6(10 倍)



④センサ入力と受信側ボードの出力

パルス間隔 20us ゲイン設定 1'hD(100 倍)

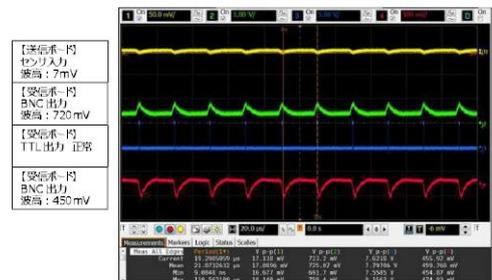


図 3.2.10 ゲイン変更による性能確認

黄色：出力側装置への入力信号、青色：TTL ロジック信号 (PCへ)

緑色：受信側の BNC 出力信号 (正極性)、赤色：受信側の BNC 出力信号 (負極性)

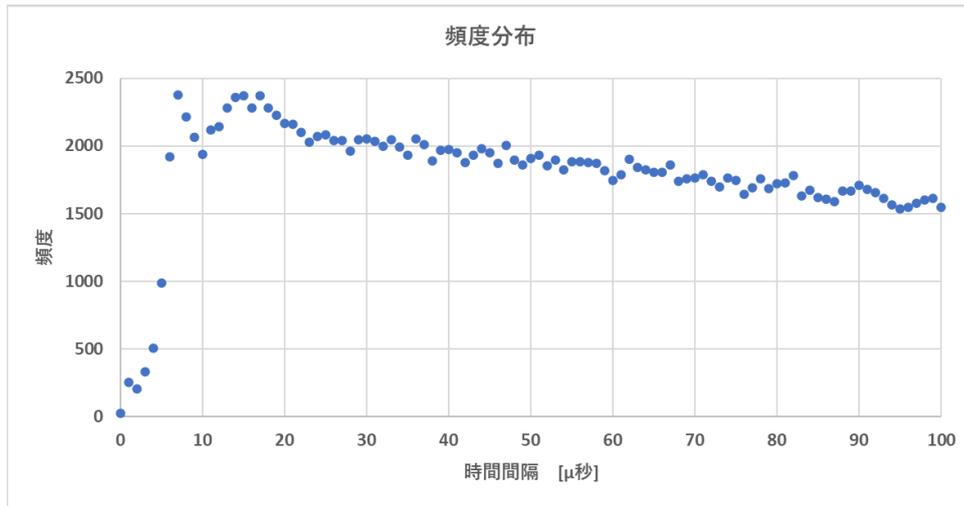


図 3.2.11 隣接する信号間の頻度分布

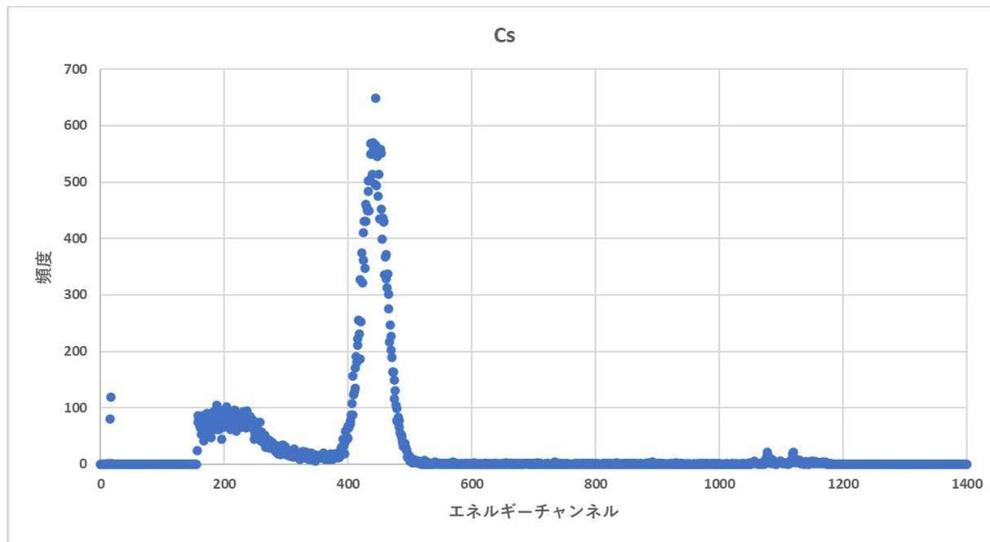


図 3.2.12  $^{137}\text{Cs}$  のエネルギースペクトルの測定結果

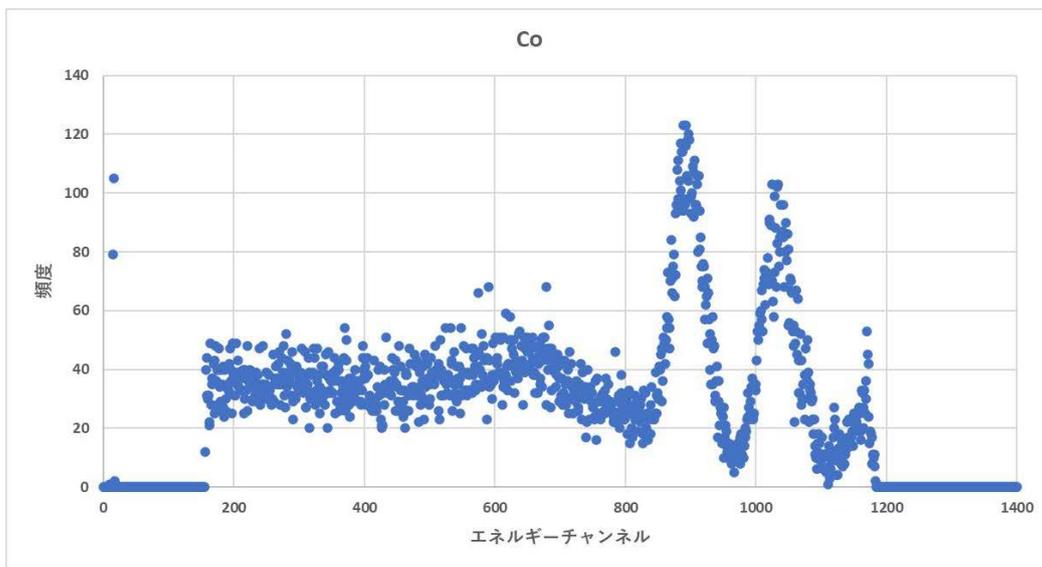


図 3.2.13  $^{60}\text{Co}$  のエネルギースペクトルの測定結果

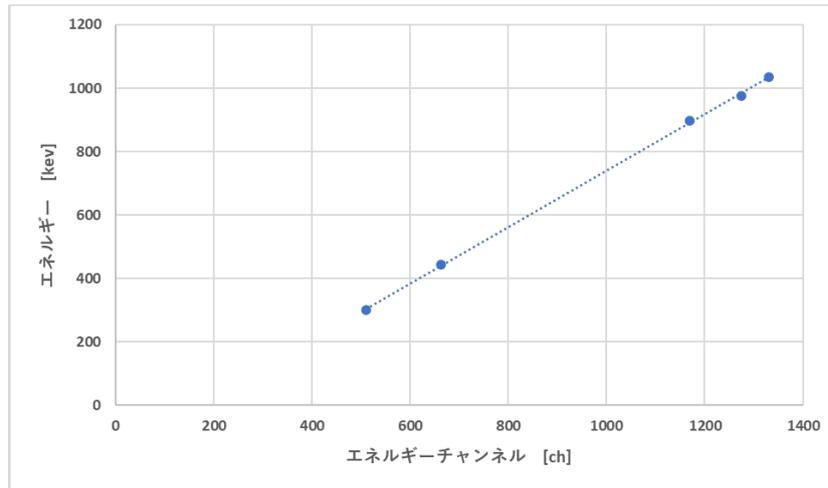


図 3.2.14 ガンマ線エネルギーと MCA のチャンネル番号の関係

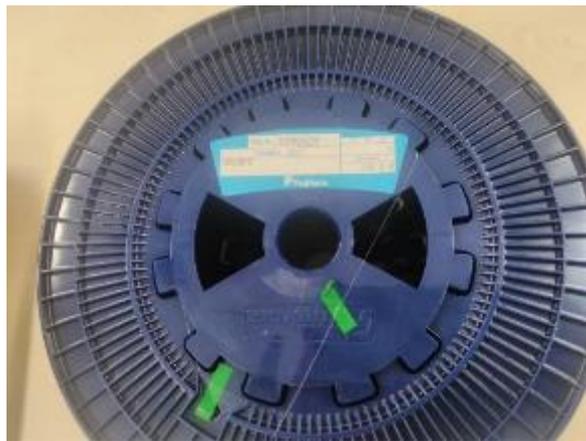


図 3.2.15 光ファイバーケーブル

### 3.3 データ収集装置の開発【平成30年度～令和2年度】

平成30年度は、検出器からのデータを収集して燃料デブリの未臨界監視を行うためのデータ収集装置の設計について、以下のような方法でデータ収集を行うことを想定していた。

- ① データ転送装置の受信装置側の BNC 端子からアナログ信号を取り出し、それを線形増幅器で波形成型と波高増幅する。
- ② シングルチャネル波高分析器で不要なノイズをカットして TTL 信号を取り出す。
- ③ TTL 信号をデータ収集装置に入力し、信号の時系列データをデータ収集装置内のメモリに保存する。
- ④ 信号の時系列データを PC に転送し、PC の解析ソフトにより未臨界度を求めるためのデータ解析を行う。

しかし、データ転送装置の設計について検討したところ、アナログ信号と同時に SiC 検出器で中性子を検出した時刻情報（1  $\mu$  秒単位）を USB 経由で PC に直接転送することができる機能も、データ転送装置内部に一緒に組み込むような設計が可能であることが判った。この方法であれば上記の①～③の装置が不要となり、装置が簡略化でき、しかも測定精度を高くすることができると考えられるため、3.2 で示したようなデータ転送装置の設計において本データ収集装置の機能を組み込むこととした。

令和元年度までの研究において、信号のデータ収集系についてはデータ送信装置に組み込むことができることが判り、その結果を元にプロトタイプの装置を開発してきた。令和2年度は3.2の信号伝送系を用いて中性子検出信号を伝送させ、この装置を用いて未臨界度監視モニタとして利用するための研究を実施した。概念図を図 3.3.1 に示す。

実験は京大複合研の KUCA において実施した。KUCA は様々な炉心体系を構築することができる研究用原子炉であり、これまでに KUCA の固体減速炉心（図 3.3.2）を用いて IRID との共同研究で燃料デブリを構築して未臨界度監視モニタを開発するための実験を実施してきた。

現在、IRID が検討している燃料デブリ取り出し作業時の未臨界の確認方法は以下の様な手順である。

- ① 燃料デブリ取り出し作業の合間に燃料デブリに近傍に中性子検出器を置き、中性子雑音解析法により未臨界度の絶対値を求める。即発中性子減衰定数から未臨界度を求める際に使用する実効遅発中性子割合と中性子平均寿命は予め数値計算により求めておく。
- ② 燃料デブリ取り出し作業中は中性子検出器をやや離れた場所に移動させて中性子計数の変化のみを測定し、①で得られた取り出し作業前に測定した未臨界度の

絶対値を基準として中性子源増倍法により未臨界度を求める。

ここで用いる中性子雑音解析法は、中性子検出時刻の時間分布を測定することで未臨界度を求めることができるもので、ここでは中性子雑音法から Rossi- $\alpha$  法と Feynman- $\alpha$  法の 2 つを用いて解析することとする。本研究の範囲内で、これらの実験手法の解析を行うための解析プログラムの作成も行った。なお、②の中性子源増倍法は原理が簡単であり未臨界度を求めるための式自体も簡単であるため、本実験では①の手法により体系の未臨界度を精度良く求めることができれば十分であると考えられる。

Rossi- $\alpha$  法とは、トリガーとなる中性子が検出されてから間隔  $T$  以内に検出された中性子とトリガー中性子との時間間隔を  $\tau$  として記録する方法であり、横軸に時間間隔  $\tau$ 、縦軸に  $\tau$  の出現頻度をとったグラフを作成し、以下のような理論式にフィッティングを行うことにより体系の状態を推定できる。

$$P = A + B \exp(-\alpha\tau)$$

$A$  と  $B$  は定数、 $\alpha$  は即発中性子減衰定数であり、以下のように書くことができる。

$$\alpha = \frac{\beta_{eff} - \rho}{\Lambda}$$

ここで、

$$\rho = \frac{k-1}{k}, \quad \Lambda = \frac{\ell}{k}$$

と、書くことができる。 $\beta_{eff}$  は実効遅発中性子割合、 $\rho$  は反応度、 $\Lambda$  は中性子生成時間、 $k$  は実効増倍率、 $\ell$  は中性子平均寿命である。実験では即発中性子減衰定数を測定し、別途解析で求めた実効遅発中性子割合と中性子生成時間から反応度、すなわち未臨界度  $\rho$  を求めることができる（燃料デブリ体系では反応度は負の値となるが、その絶対値が未臨界度となる）。

燃料デブリの正確な組成等はまだまだよく判っていないので、この未臨界度の算出方法にはどうしても不確定性要素が含まれる。実効遅発中性子割合は体系の組成や体系の形状に依存した量であるが、燃料デブリ体系について考えると不確定性要素は大きくても数%程度であり、あまり大きく変化する量ではない。中性子生成時間または中性子平均寿命は、主に燃料デブリと減速材との混合割合に依存した量であり、これについても不確定性要素はあまり大きくないと考えられる。

一方、Feynman- $\alpha$  法は、時間領域における中性子検出器の計数値の分散と平均の比から体系の状態を推定できる方法であり、以下の式で定義される  $Y$  値を測定する。

$$\frac{\sigma^2}{n(t)} = 1 + Y$$

ここで、 $t$ は計数する時間間隔(ゲート幅)、 $\sigma^2$ は計数 $n$ の分散、 $\overline{n(t)}$ は計数 $n$ の平均値である。Y値はエネルギーを1群で考えて空間分布もある分布を仮定して(通常はコサイン分布)ポイントで代表することができる1点炉近似において、以下のように書くことができる。

$$Y(t) = \frac{\varepsilon\nu(\nu-1)}{\alpha^2\tau f^2} \left(1 - \frac{1-e^{-\alpha t}}{\alpha t}\right)$$

ここで、 $\alpha$ はRossi- $\alpha$ 法の場合と同様に即発中性子減衰定数、 $\varepsilon$ は1核分裂に対する中性子検出効率、 $\nu$ は核分裂による即発中性子生成数、 $\tau$ は中性子生成時間である。括弧の前の部分を定数 $C$ とすると、

$$Y(t) = C \left(1 - \frac{1-e^{-\alpha_p t}}{\alpha_p t}\right)$$

と、記載することができる。

これが一般的なFeynman- $\alpha$ 法の1点炉近似(炉心内の空間分布は基本モードだけで表され、炉心内の動的な振る舞いは位置に依らず同じであるとする)に基づく理論式であるが、これまでの原子炉での未臨界度測定実験の経験から、Y値が遅発中性子の影響を受けることが示されており、遅発中性子先行核を1群に近似し遅発中性子を考慮したFeynman- $\alpha$ 法の理論式は、ゲート幅 $t$ が小さい範囲において近似的に次式のように表される。

$$Y(t) = C_1 \left(1 - \frac{1-e^{-\alpha_p t}}{\alpha_p t}\right) + C_2 t$$

ここで、 $C_1$ と $C_2$ は定数で、第2項目が遅発中性子の影響を受ける項となる。

測定では、時間間隔 $t$ を変更して各 $t$ に対するY値を求め、その結果を上記の式にフィッティングすることにより即発中性子減衰定数を求めることができ、その値から、Rossi- $\alpha$ 法の解析の項目で述べたように、解析により求めたパラメータを用いることにより未臨界度 $\rho$ を求めることができる。

Feynman- $\alpha$ 法で求めたY値の分布の例を図3.3.10に示す。ここでは、約1200秒の時系列の測定データを3つの区間に区切って解析を行った結果を示す。このように時間を区切って解析を行うのは、計測の途中で何らかのノイズが入ったときには計数率の変化だけを見てもノイズの混入を判断することが難しいことがあるものの、その影響はY値の結果のグラフに明確に現れやすいことが判っているため、このような時間区間を区切って解析を行うことで、測定されたデータの信頼性を確かめるためである。図3.3.10はどれも同様の形状をしており、ノイズ混入などは見られないことが確認できた。

同様に Rossi- $\alpha$  法による測定結果を図 3.3.11 に示す。Rossi- $\alpha$  法は Feynman- $\alpha$  法と比べて一時的なノイズ等の影響を受けにくい測定方法であると考えられるが、ここでの解析も Feynman- $\alpha$  法と同様に時間領域を区切って解析を行って、測定されたデータの信頼性を確認している。

なお、今回の実験において、このような測定データの信頼性の確認をしたところ、何回かノイズ混入等の何らかの原因で Y 値が他の時間区間の結果と異なる形状を示した時があった。考えられる原因としては、中性子検出器の信号は転送装置のディスクリミネータによりガンマ線が起因すると考えられる低波高の信号はカットしているはずであるが、それにもかかわらずガンマ線の影響が入ってしまった、または信号伝達装置に電氣的なノイズが入ってしまったようなことが考えられる。Feynman- $\alpha$  法は測定途中でのノイズの影響を受けやすく、高線量場になればさらに多くのノイズが発生する可能性があるが、そのような場合であっても、今回のような手法により信頼できるデータを取り出して解析することでノイズ等の影響を除去した解析結果、すなわち未臨界度を算出することができると考えられる。(なお、次節 3.4 で述べるガンマ線照射設備での照射実験では、信号伝達装置にノイズが多く発生するという事象は見られなかった。)

KUCA で行った実験は大きく分けて以下の 3 種類となる。

- ① 燃料デブリを想定した深い未臨界状態（未臨界度が大きい状態）において、デブリ掘削作業中に体系の未臨界度が小さくなる方向（臨界に近づく方向）に変化することをモニタできるかを確認する。
- ② 未臨界状態から臨界に近づいたとき、すなわち、浅い未臨界状態となったとき、未臨界度を精度良く測定できるかを確認する。
- ③ 実際の燃料デブリは大きな扁平円柱のような形状になっていることが予想される（半径が 4~6 m、厚さが 1 m 程度を想定）。通常の未臨界測定方法の理論の元となっている原子炉の 1 点炉近似では、未臨界度を精度良く測定できない可能性があるため、2 点炉近似に基づく未臨界度評価方法を採用して実験を行い、この解析方法が有効であるかを確認する。

令和元年度の実験では、深い未臨界体系において未臨界度を測定したが、その炉心配置を図 3.3.4、図 3.3.5 に示す。令和 2 年度の実験では以下のようなデブリ燃料配置を模擬した。

- 1) 水の代わりにポリエチレン板を減速材として用いる。
- 2) デブリ燃料が薄く広く広がっていることを模擬するために、比較的短尺の燃料(2/8" p23EUEU 燃料体、図 3.3.6) を用いて水平方向に広く配置する。

- 3) 一部で水が抜けた箇所が出ることを模擬するために、ポリエチレン板の代わりに密度の低い黒鉛を用いた燃料体を配置する。
- 4) 未臨界度が低くなって臨界に近づいたときには、再臨界を防止するために外部から中性子吸収体を挿入することになっているが、その吸収材として Li を使用して炉心の一部に配置する（図 3.3.4 の体系）。（現場ではホウ素の化合物が使用される予定であるが、ここでは断面積の形状がホウ素とよく似た Li（Li-6：7.5%、形状は LiF）を用いた）。
- 5) 燃料デブリの近傍に中性子検出器（ホウ素塗布型比例計数管）を配置する。
- 6) 燃料デブリ中の中性子源は、Cm などのマイナーアクチノイド核種が主であると考えられるため、中性子源としては自発核分裂中性子源である小型の  $^{252}\text{Cf}$  を燃料体中に入れて用いた。

測定装置の配置を図 3.3.3 に示す。炉心に挿入した中性子検出器からの信号はプリアンプを通した後に炉心近傍に配置した光ファイバー伝送装置の出力装置に信号を入力し、光ファイバーを用いて炉心から離れた受信装置に信号を伝送し、中性子検出の時刻情報を USB ケーブルで PC に転送した。なお、PC は LAN ケーブルにより原子炉の制御室に設置したリモート PC から遠隔で操作できるようにした。

Feynman- $\alpha$  法で求めた Y 値の分布の例を図 3.3.7 に示す。測定により得られた即発中性子減衰定数を表 3.3.1 と表 3.3.2 に示す。表 3.3.1 は同じ A 体系（LiF あり）での Feynman- $\alpha$  法と Rossi- $\alpha$  法の結果の比較であり、両者の  $\alpha$  値はほぼ一致していることが判る。また、表 3.3.2 は体系 A（LiF あり）と体系 B（LiF なし）の結果を比較したものであり、LiF が入った場合のほうが即発中性子減衰定数の値が有意に大きくなっていることが判る。これは LiF が入ることで未臨界度が深くなるため、即発中性子減衰定数は大きくなるためである。

以上より、深い未臨界状態において、今回開発したデータ転送装置を用いて雑音解析法により未臨界度が変化したことを確認することができることが判った。

次に、②の目的での実験で使用した炉心配置を図 3.3.8 に示す。この実験では燃料デブリ体系を模擬した未臨界体系の未臨界度を正確に求めることができることを確認することを主目的とした。未臨界体系は以下のように構築した。

- 1) 水の代わりにポリエチレン板を減速材として用いる。
- 2) デブリ燃料がある程度固まっていることを模擬し、さらにデブリ燃料の周囲には多くの水が存在すると考えられるため、図 3.3.6 の燃料体に比べてポリエチレン減速材が多く十分に中性子が減速されている燃料(3/8" p36EU 燃料体、図 3.3.9) を用いて水平方向に広く配置する。

- 3) 燃料デブリの近傍に中性子検出器を配置する。
- 4) 燃料デブリ中の中性子源は、Cmなどのマイナーアクチノイド核種が主であると  
考えられるため、中性子源としては自発核分裂中性子源である小型の<sup>252</sup>Cfを燃料  
体中に入れて用いた。

測定により得られた即発中性子減衰定数を、表 3.3.3 (図 3.3.12) と表 3.3.4 (図 3.3.13) に示す。Feynman- $\alpha$ 法で求めた $\alpha$ の値と Rossi- $\alpha$ 法によって求めた $\alpha$ の値に大きな違いは見られず、両者の結果は解析により求めた参照値と概ねよく一致しているといえる。しかし両者の結果を比較すると、Rossi- $\alpha$ 法のほうが誤差が大きくなっており、また、未臨界度が深くなるにつれて参照値との誤差が大きくなっているため、深い未臨界度体系ではさらに測定精度が落ちることが考えられる。

この測定は臨界に比較的近いところでの測定であった。燃料デブリ取り出し作業中に何らかの原因で臨界に近づいたときに、確実にそのような危険な状態に近づいたことを精度良く判定することができることが重要であり、その観点から今回の実験により臨界近傍での未臨界度を精度良く測定できることが確認できたことは、未臨界度モニタの性能確認試験結果として重要である。

先の①の実験では深い未臨界状態で、吸収体の量が増えるなどすることにより未臨界度が変化したことを本手法により判定することができることを確認しており、②の実験である臨界近傍での結果と合わせて、燃料デブリ取り出し時の未臨界監視システムとして本手法が使用できると考えられる。

最後に、③の目的での実験で使用した炉心配置を図 3.3.14 に示す。この実験では燃料デブリ体系を模擬した燃料領域を 2 箇所に分割した体系 (2 分割炉心) を構築し、その各々の炉心近傍に中性子検出器を設置した。その他は②の実験を同様である。

炉雑音解析方法としては、Feynman- $\alpha$ 法で 2 本の検出器からの信号の分散と共分散を求めて解析を行う 2 点炉近似に基づく手法である。2 本の検出器を体系の 1 次モード固有関数の逆位相となる 2 つの腹の位置に設置したとする (例えば、体系を 2 つに分割したときの右側と左側で、検出器番号を 1 と 2 とする)。そのとき検出器 1 の計数率分布の  $C_1(T)$  の分散 (variance) と共分散 (covariance) は以下のように求められる。

$$Y_{\text{variance}}(T) = \frac{\overline{C_1(T)^2} - \overline{C_1(T)}^2}{\overline{C_1(T)}} - 1$$

$$Y_{\text{covariance}}(T) = \frac{\overline{C_1(T) \times C_2(T)} - \overline{C_1(T)} \times \overline{C_2(T)}}{\overline{C_1(T)}}$$

$\overline{C_1(T)}$  は平均値となる。このとき分散と共分散は体系の基本モードの即発中性子

減衰定数  $\alpha_0$  と 1 次モードの即発中性子減衰定数  $\alpha_1$  を用いて以下のように表すことができる。

$$Y_{\text{variance}}(T) = Y_0 \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha_0 T}}{\alpha_0 T} \right) + Y_1 \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha_1 T}}{\alpha_1 T} \right)$$

$$Y_{\text{covariance}}(T) = Y_0 \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha_0 T}}{\alpha_0 T} \right) - Y_1 \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha_1 T}}{\alpha_1 T} \right)$$

この分散と共分散の式を足し合わせると、以下のようになる。

$$Y_{\text{variance}}(T) + Y_{\text{covariance}}(T) = Y_0^+ \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha_0 T}}{\alpha_0 T} \right)$$

ここで、 $\alpha_0$  は①と②の実験で 1 点炉近似により解析を行った  $\alpha$  と同じ値となり、この値から未臨界度を求めることができる。

Y 値の分布の例（分散と共分散）を図 3.3.15 に示す。その結果から得られた即発中性子減衰定数を図 3.3.16 に示す。横軸は制御棒の挿入パターンを変更して未臨界度を変化させた個々の ID 番号で、各 ID での計算結果と 1 点炉近似、2 点炉近似の結果を示す。即発中性子減衰定数が小さくなる臨界に近い状態（ID の 1~3）においては、1 点炉近似より 2 点炉近似の結果が計算結果に近づいていることがわかる。このことから燃料デブリが拡がって存在している場合については、②の実験で示したような未臨界度が浅くて臨界状態に近付いた場合は、複数の検出器を配置して（例えば、燃料デブリの端と端の対角線上）、2 点炉近似で解析する必要があることがわかった。今回開発したデータ転送装置は複数の検出器の信号を同時に転送することができるため、このような 2 点炉近似に基づく実験解析にも対応できるといえる。

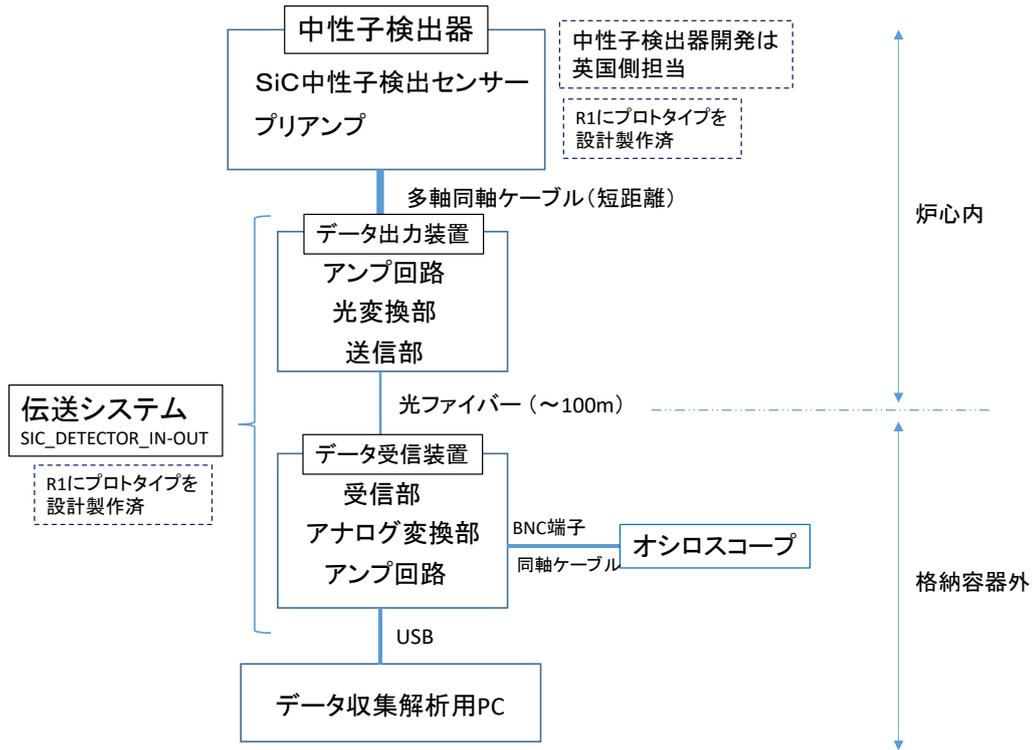


図 3.3.1 測定システム構成図



図 3.3.2 KUCA 固体減速炉心 (B 架台)

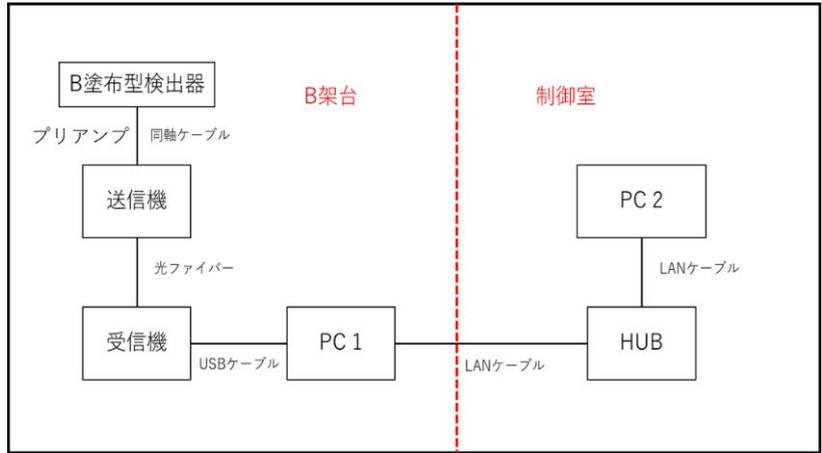


図 3.3.3 測定装置配置図

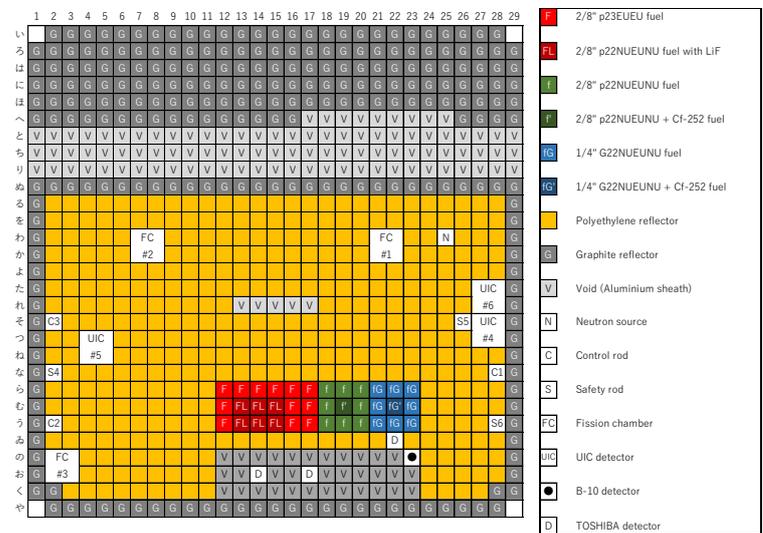


図 3.3.4 炉心配置図 (A 体系) (LiF あり)

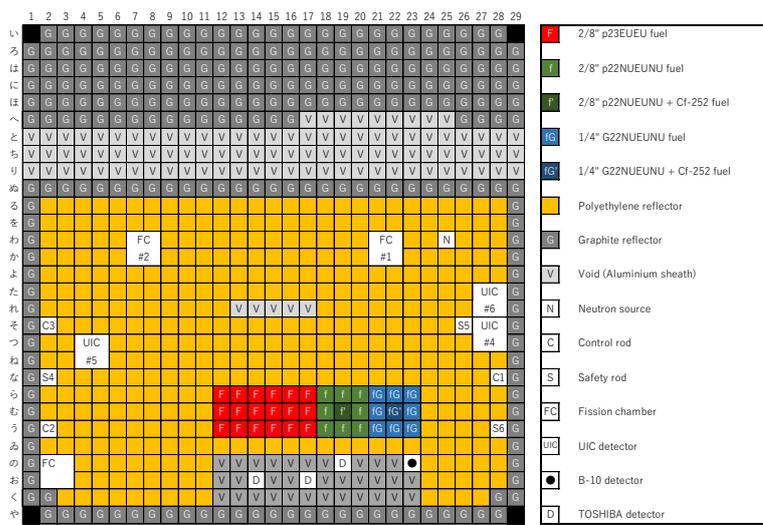


図 3.3.5 炉心配置図 (B 体系) (LiF なし)

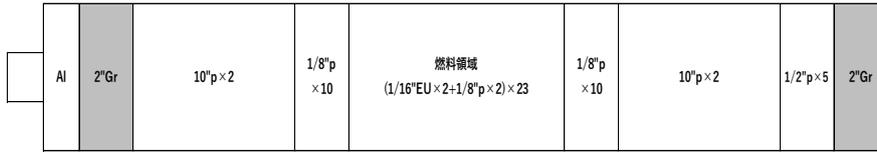


図 3.3.6 2/8” p23EUEU 燃料体の構成図

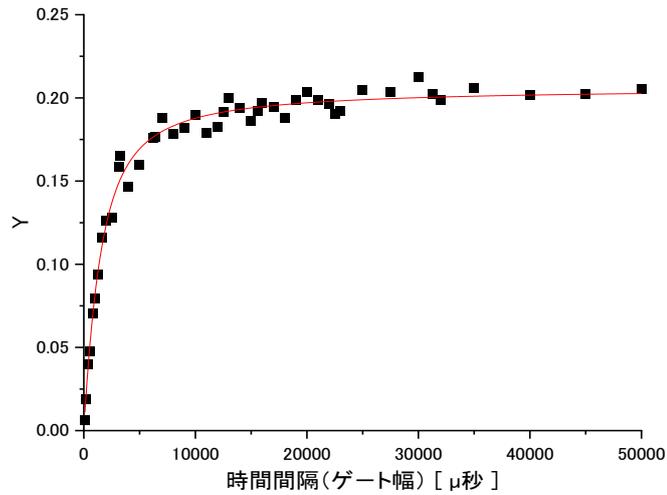


図 3.3.7 炉心配置 (A 体系) での Feynman- $\alpha$  法の Y 値  
(赤線はフィッティング曲線)

表 3.3.1 A 体系での解析結果

	Rossi- $\alpha$ 法	Feynman- $\alpha$ 法
測定時間 [ 秒 ]	2000	2000
炉心体系	A体系(LiFあり)	A体系(LiFあり)
計数率 [ 回/秒 ]	29.59	29.59
$\alpha$ [/秒]	1250	1110
標準誤差 [/秒]	24.10	44.65

表 3.3.2 B 体系での解析結果

	Rossi- $\alpha$ 法	Rossi- $\alpha$ 法
炉心体系	B体系(LiFなし)	A体系(LiFあり)
計数率 [ 回/秒 ]	24.85	29.63
$\alpha$ [/秒]	1210	1560
標準誤差 [/秒]	4.04	5.87

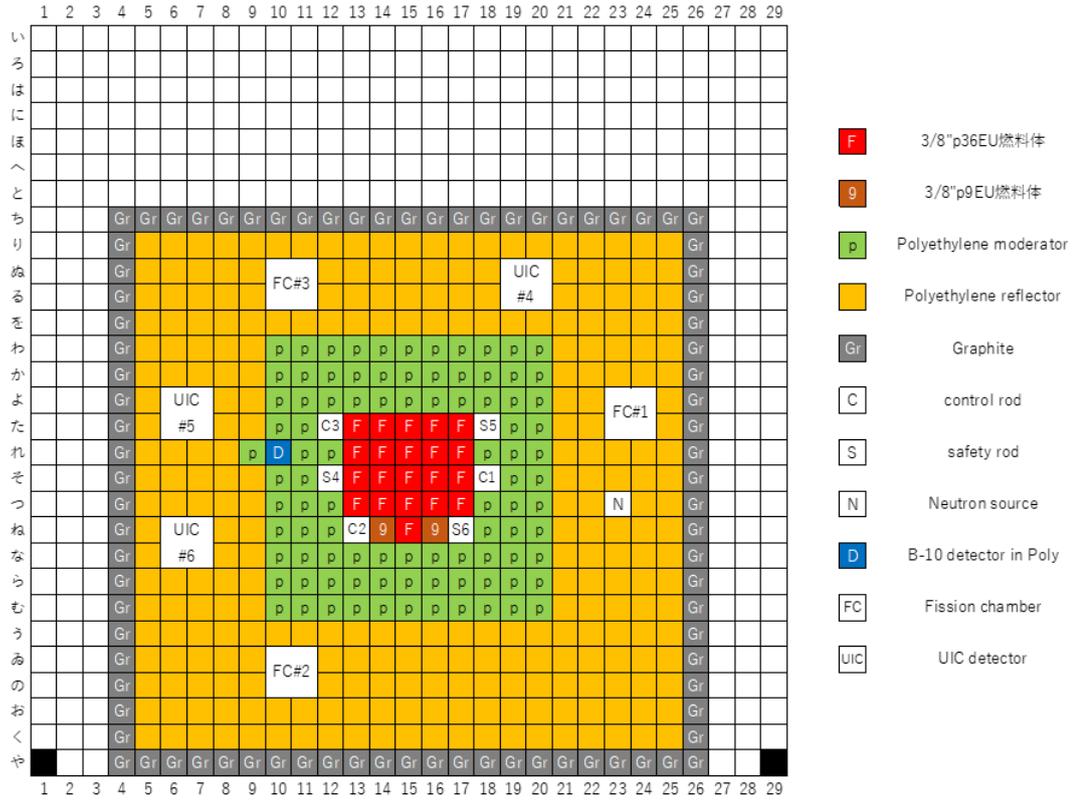


図 3.3.8 炉心配置図 (臨界近傍)

3/8" p36EU燃料棒

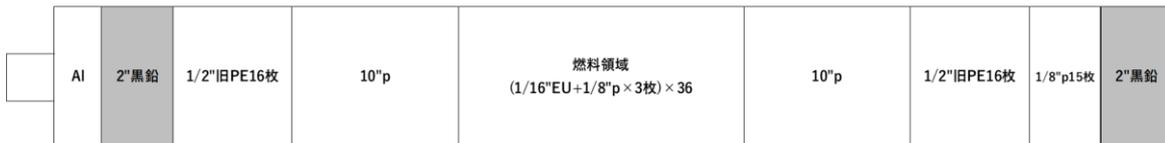


図 3.3.9 3/8" p36EU 燃料体の構成図

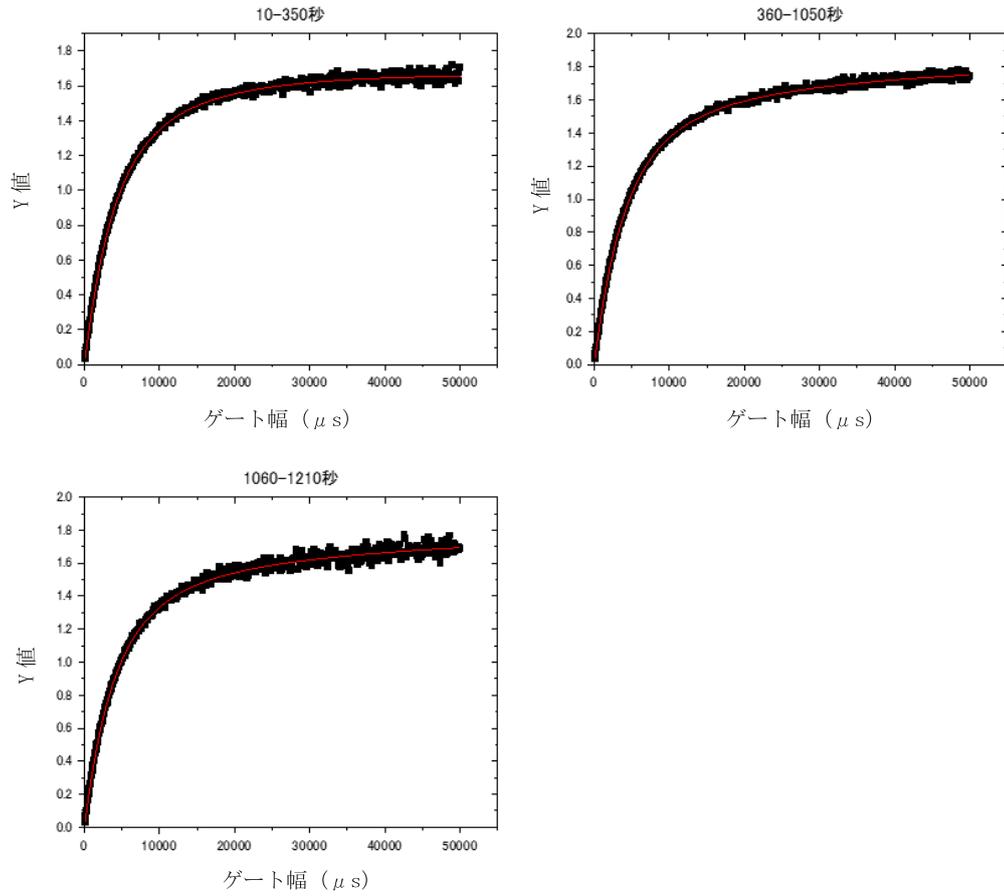


図 3.3.10 未臨界度が 1.08%  $\Delta k/k$  のときの Feynman- $\alpha$  法の Y 値  
 (測定時間を 3 つの領域に区切って解析した結果)  
 黒丸は測定結果、赤線はフィッティングした曲線

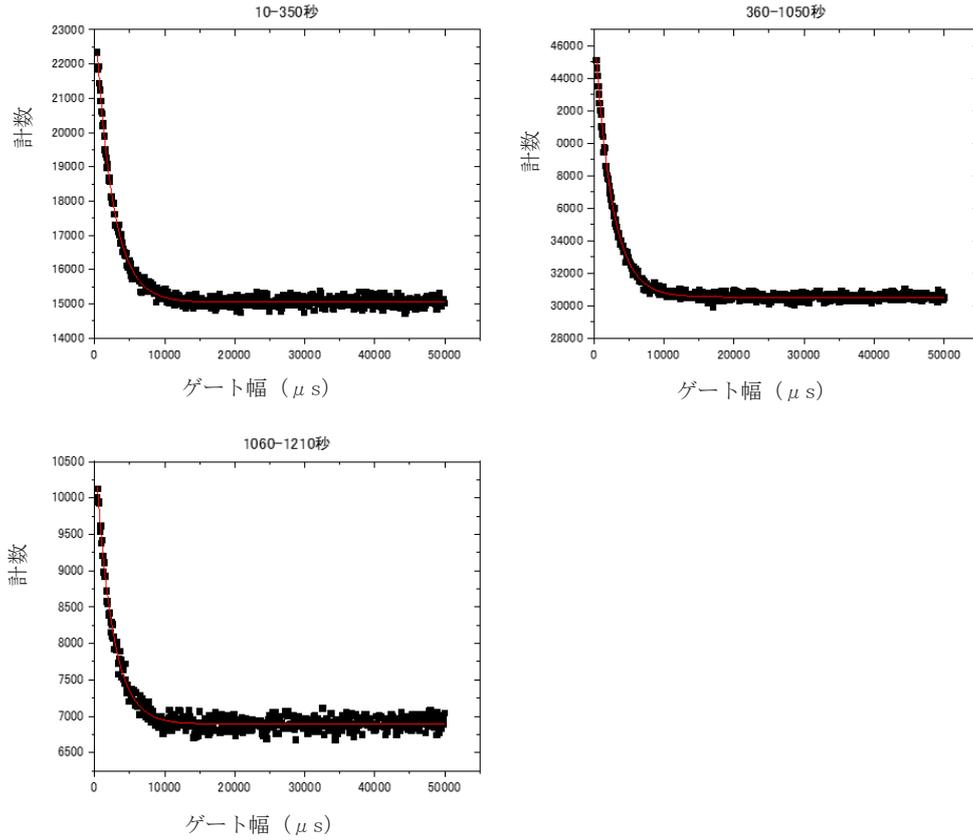


図 3.3.11 未臨界度が 1.08%  $\Delta k/k$  のときの Rossi- $\alpha$  法の結果  
 (測定時間を 3つの領域に区切って解析した結果)  
 黒丸は測定結果、赤線はフィッティングした曲線

表 3.3.3 各未臨界度における実験値と参照値の  $\alpha$  の比較 (Feynman- $\alpha$  法)

未臨界度 [ $\Delta k/k$ ]	参照値 $\alpha$ [/s]	実験値 $\alpha$ [/s]
1.08%	382	405 ± 2
1.38%	442	468 ± 2
1.60%	487	511 ± 2
1.90%	547	590 ± 4
2.11%	588	656 ± 3
2.41%	648	738 ± 4

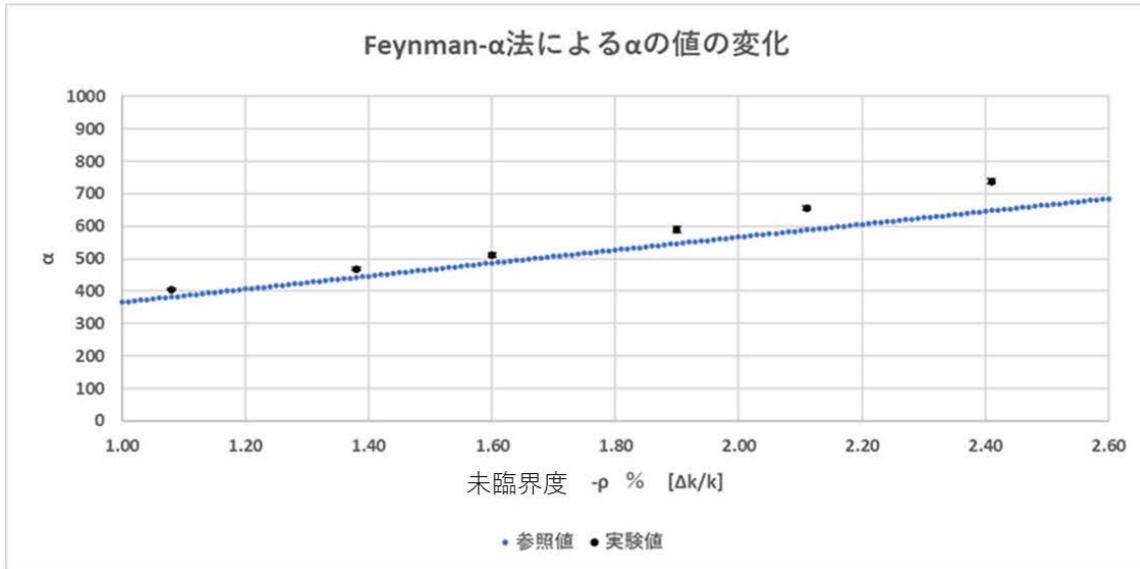


図 3.3.12 各未臨界度における実験値と参照値の  $\alpha$  の比較 (Feynman- $\alpha$  法)

表 3.3.4 各未臨界度における実験値と参照値の  $\alpha$  の比較 (Rossi- $\alpha$  法)

未臨界度 [ $\Delta k/k$ ]	参照値 $\alpha$ [/s]	実験値 $\alpha$ [/s]
1.08%	382	413 ± 2
1.38%	442	472 ± 3
1.60%	487	519 ± 4
1.90%	547	607 ± 5
2.11%	588	669 ± 6
2.41%	648	734 ± 7

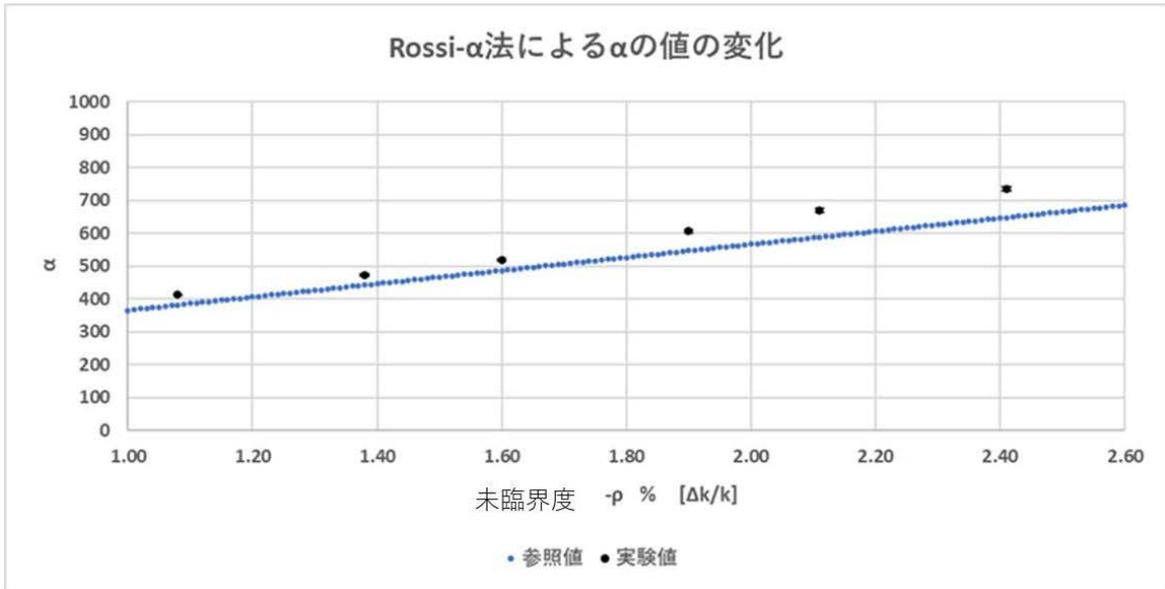


図 3.3.13 各未臨界度における実験値と参照値の  $\alpha$  の比較 (Rossi- $\alpha$  法)

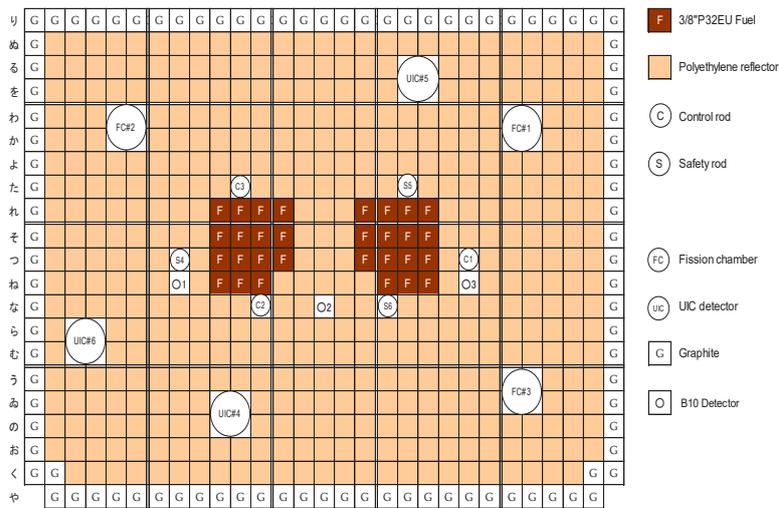


図 3.3.14 2分割炉心での実験炉心配置図



図 3.3.15 2 分割炉心での実験の Feynman- $\alpha$  法の Y 値  
 左：分散、右：共分散

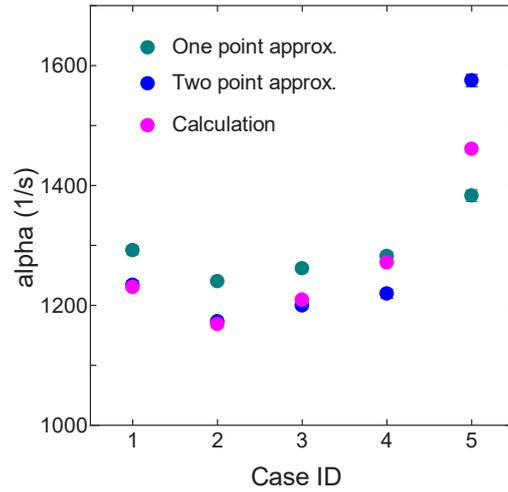


図 3.3.16 2 分割炉心での即発中性子減衰定数  
 (横軸は異なる制御棒挿入パターン ID)

One point は通常の解析方法、Two point は 2 点炉近似の結果

### 3.4 照射試験【平成30年度～令和2年度】

今回製作した信号伝送システムを高線量率場である燃料デブリ近傍で使用するためには、その耐放射線性能を確認する必要がある。その確認を行うために、京大複合研のコバルト60ガンマ線照射装置において伝送システムのガンマ線照射実験を行った。

この施設は、地下の線源格納容器内に格納されたコバルト60ガンマ線源を遠隔操作で床上まで押し上げることによってガンマ線照射を行う押上式のガンマ線照射装置で、広範な線量率で多様な種類、大きさ、形状の対象物に対してガンマ線の照射を行うことができる(図3.4.1)。

実験装置の配置を図3.4.2に示す。出力側装置を最も線量率の高い照射台のD20 cmの位置(図3.4.3)に設置し、出力側装置に外部パルサーからのパルス信号(電圧300 mV、周波数400 Hz)を2つのチャンネル(ch1とch2)に同時に入力し、2本の光ファイバー(約30 m)を隣の実験室まで延ばして、そこに設置した受信側装置で信号を受け、USBケーブルでPCに接続して信号の時刻情報を記録すると共に、BNCケーブルで受信装置からのアナログ信号の波形をオシロスコープで観察した(図3.4.4、照射位置での線量率は実験時で0.94 kGy/hであった。なお、使用した光ファイバーは、株式会社フジクラ製の耐放射線性のシングルモード光ファイバー(SMF-RRSMFB、被覆外径245 μm、伝送損失0.48 dB/km @1310 nm、図3.2.15)で、これまでの研究で100 kGyという線量に対しても、伝送損失増は7 dB/km以下という厳しい要求性能を満たすことができ、福島第一の廃炉作業にも使用できるとされている。今回は、この光ファイバーを外径約2 mmのポリエチレン製のチューブに入れて使用した(福島第一で使用するためには金属製の細管に入れる必要があると考えられる)。なお、光ファイバーを伝送装置に接続するために両端に取り付けるLCコネクタは、平成30年度に購入した光ファイバー製作キット等を用いて製作した。

図3.4.4に示すように、19分後まではch1とch2共に正常に信号を送信することができていることがわかるが、ch2は20分7秒後(1207秒後)に、ch1は20分17秒後に波形が観測することができなくなった(ガンマ線照射装置から外して別途同様に測定を行ったが正常に働くことは無かった)。

この結果と照射位置での線量率から、約0.313 kGyまでの積算線量のガンマ線に対してこの出力装置を使用できることが判った。その後、出力装置の詳しく調べたところ、基板のFPGAとADCの電源の電圧値が耐圧を越えた異常値になっているため正常に作動していなかったことを確認した。なお、基板のアンプは電源電圧値が若干下がっているものの動作していた。これまでのFPGAは数百Gy程度で使用できなくなるとの研究結果も報告されているので、本装置についてもほぼ同様の結果であることがわかった。

燃料デブリ取り出し位置での線量率についてはまだよくわかっていないが、仮に本装置を1 kGy/hの線量率場において100時間(1日4時間燃料デブリ近傍に設置してデブリ取り出し作業に使用するとすれば25日間)利用できるようにするとすれば、鉛遮蔽材によ

り  $0.313/100=3.13\times 10^{-3}$  までガンマ線を減衰させる必要があり、そのために必要な鉛厚さ (5.5 cm) からなる遮蔽体の重量は約 37 kg となる (図 3.4.9 に示すように入力側ボード (約 80 g) を 8 cm×5.5 cm×2 cm の周囲を鉛で囲む)。なお、入力側ボードにはガンマ線照射に脆弱な FPGA 周囲に鉛遮蔽板を追加できるように素子を配置している。検出器を移動させる装置の耐重量についてはまだ決まっていないが、この重量であれば大きな負担にはならないと考えられる。

燃料デブリ取り出し位置での線量率についてはまだよくわかっていない。現時点でわかっていることとして、2号機内の燃料デブリが原子炉压力容器内に多く堆積していること、ペDESTAL底部に落ち広がって堆積した燃料デブリの端から、高さ 20 cm の地点の線量率がおおよそ約 7.6 Gy/h であると報告されている[1]。

そこで、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 (JAEA) が先行研究で用いている 2号機の燃料組成や炉心条件、運転履歴 (表 3.4.1) 等のデータを参照し[2]、燃焼計算コード ORIGEN 2.2[3]を使用することで実際の現場でのガンマ線強度を求める。なお、今回の解析では福島第一 2号機内のペDESTAL底部に堆積した燃料デブリを対象とするため、半径 270 cm、高さ 30 cm の円柱の形状であると仮定した。

結果を表 3.4.2 に示す。このガンマ線のデータを用いて実測値のある先の燃料デブリの端から高さ 20 cm の地点の線量率である約 7.6 Gy/h と比較するとかなり値が異なっている。この原因の 1つとしては、デブリ中のセシウム (Cs) の量が不確定であることが考えられる。すなわち、メルトダウンが起こった際に Cs は気化して外部にかなりの量が放出されているが、正確な残量が求められないため、Cs の残量を変化させて各エネルギー帯におけるガンマ線の数のうち、Cs のガンマ線の数を減らすことによって測定位置での実測値と合うように調整した (図 3.4.8)。

その結果、Cs の残量がおおよそ 9.7%のときと線量が一致する結果となった。この残量がどのくらい正確であるかの確証はないが、この結果を用いると半径 270 cm の燃料デブリの中心においては高さ 20 cm の地点の線量率がおおよそ 14.2 Gy/h であることがわかった。すなわち、この値が最も線量率が高くなったときの値であると考えられる。

この放射線線量率でデータ転送装置の鉛で遮蔽したとき (図 3.4.9)、鉛の厚さを変化させた時の耐久線量に至るまでの時間を求めた結果を図 3.4.10 に示す。耐久時間はどのくらいにするべきかについては測定方法に依存するが、例えば、燃料デブリの取り出し作業の間に中性子検出器を近接させて 10 分間測定を行い、取り出し作業時にはデブリから離れた位置に移動させる (1 時間) という、現在考えられている測定方法を用いる場合を考える。デブリから離れた位置でのガンマ線線量は燃料デブリ近傍の 1/10 であると仮定したとき、100 回の測定を行うようにすれば、14.2 Gy/h の線量率での使用時間は、

$(10 \text{ 分} + 60 \text{ 分} \times 1/10) \times 100 = 26 \text{ 時間}$

となる。余裕をみて 100 時間に耐えることができるように鉛遮蔽を用いることを考えると、必要な鉛遮蔽体の厚さが 1.35 cm となる。現在のデータ送信機（図 3.2.1）のサイズは 5.5×8.0×2.5 cm であるので、その周囲をこの厚さの鉛遮蔽体で囲むと鉛の重量は約 4 kg となる。なお、送信機でガンマ線照射に脆弱な FPGA 周囲（約 1 cm 角）には追加の鉛遮蔽板を設置できるように素子を配置しており、その鉛を追加しても重量の増加はそれほど大きくない。株式会社日立製作所が開発した調査用小型ロボットでは、積算荷重が 20 kg であると報告されており、検出器、鉛遮蔽付きデータ送信機、光ファイバーを合わせた重量は 20 kg より十分に小さいので、この調査用小型ロボットで運搬することに問題は生じないと考えられる。作製した鉛遮蔽体の写真を図 3.4.11 に示す。

本研究では検出器の開発目標として 1000 Gy/h のガンマ線場において使用可能であると設定していた。一方、IRID で検討している半導体検出器（Si ダイオード、測定線種はガンマ線）の開発目標としては測定レンジが 1 mSv/h～1000 Sv/h、また、光ファイバー型線量率計の開発目標は 5 MGy ( $^{60}\text{Co}$ ) となっている。これまでの実験により、測定装置はそのままではこの強度のガンマ線線量率場で利用は難しく、データ送信機の耐放射線性能からみて積算線量である 5 MGy まで使用することは厳しいと考えられる。しかし上記の検討の通り適切な厚さの鉛遮蔽体を使用することにより、目標とした強度のガンマ線線量率場においても短時間であれば使用可能であり、さらに福島第一の燃料デブリ取り出し作業においては実用的な時間の範囲で利用できることが判った。

データ送信装置の中性子とガンマ線の混在場での照射実験は京大複合研の研究炉の 1 つである KUCA において実施した（この実験内容については「3.3 データ収集装置の開発」の項目で述べた）。原子炉炉心の近傍に出力装置を設置し、炉心内に挿入した中性子検出器からの信号を出力装置に入力し、2 本の光ファイバーで離れた位置に設置した受信側装置に送り、USB ケーブルで PC に接続して信号の時刻情報を記録した。約 1 週間の実験を実施したが（運転中以外は夜間や休日を含めて炉心内に中性子源を入れて測定）、この期間内にデータ送信装置に異常は発生しなかった。これは、この KUCA での実験でのガンマ線と中性子を合わせた積分線量は、上記のガンマ線照射施設での積分線量の 0.313 kGy に比べて 2 桁以上小さな値であったためと考えられる。

さらに中性子による耐放射線性能を確認するために、電子線型加速器において伝送システムの中性子照射実験を行った。電子線型加速器は 2 本の進行波型加速管で加速された電子ビームをタンタルなどの重金属ターゲットに照射し、 $(\gamma, n)$  反応を起こすことによってパルス状の中性子を得ることができる装置である（図 3.4.5）。

実験装置の配置を図 3.4.6 に示す。出力側装置をターゲット近傍に設置し、出力側装置に外部パルサーからのパルス信号（電圧 40 mV、周波数 1000 Hz）を 2 つのチャンネル（ch1 と ch2）に同時に入力し、2 本の光ファイバー（約 30 m）を隣の部屋まで延ばして、そこに設置した受信側装置で信号を受け、USB ケーブルで PC に接続して信号の時刻情報を記録すると共に、BNC ケーブルで受信装置からのアナログ信号の波形をオシロスコープで観察した（図 3.4.7）。使用した光ファイバーは上述したコバルト 60 ガンマ線照射装置での実験で用いたものと同じ株式会社フジクラ製の耐放射線性のシングルモード光ファイバー（SMF-RRSMFB）である。今回はこの光ファイバーを外径約 2 mm のポリエチレン製のチューブに入れて使用した（福島第一で使用する際には光ファイバーの外側に耐放射線性の別の保護部材（例えば、金属製網ネット等）で覆う必要があると考えられる）。なお、光ファイバーを伝送装置に接続するために両端に取り付ける LC コネクタは平成 30 年度に購入した光ファイバー製作キット等を用いて製作した。

データ転送装置の設置位置での中性子束は金線の放射化法により測定を行った。これは研究用原子炉の出力校正を行う際に標準的に用いられている方法である。

実験において、照射開始時刻からデータ送信機が故障するまでに経過した時間は 21 時間 23 分 32 秒であった。金線により測定した中性子束の値は約  $1.5 \times 10^6$  ( $1/\text{cm}^2/\text{s}$ ) であったので、それまでの積算の中性子束は約  $1.2 \times 10^{11}$  ( $1/\text{cm}^2$ ) と求めることができた。

燃料デブリ近傍での中性子束は  $10^2$  ( $1/\text{cm}^2/\text{s}$ ) 以下であると考えられるので、データ送信機を遮蔽なしで使用しても中性子によって壊れる心配は無いと考えられる。

令和 2 年 9 月及び令和 3 年 3 月に英国のランカスター大学の実験に参加する予定であったが、渡航自粛の影響で参加することができなかつたためメール等を通じての参加とし、実験結果についての情報を得た。

信号伝達系については研究用原子炉に代え、より高い中性子フルエンスが得られる電子線型加速器施設の中性子発生装置の近傍で中性子の照射を行い、その条件での性能の確認を行った。また、ガンマ線照射装置により信号伝達系の一部についての照射実験を行い、解析結果と併せて送信装置についてのガンマ線を遮蔽のための鉛遮蔽体の設計と製作を行った。

#### (a) 令和 2 年 9 月ランカスター大学における実験結果

ランカスター大学には黒鉛パイルを用いた中性子照射設備があり、中性子検出器の性能評価に用いている。令和元年にランカスター大学を訪問した際にこの中性子照射設備を用いた照射実験に参加していたため実験方法については十分に理解している。その設備を用いて新たに製作した Si 検出器の性能確認実験を行った。この実験の前に検出器の性能についてモンテカルロ計算コード MCNP によるシミュレーション解析を行っていた

ため、その結果との比較を行うことも実験目的であった。その結果、中性子検出効率について、解析結果と概ね一致したことが確認できた。

(b) 令和3年3月ランカスター大学における実験結果

(1)に引き続き、ランカスター大学の中性子照射設備を用いて新たに製作したSiC中性子検出器（中性子コンバータには $B_4C$ を使用）の性能評価実験を行った。Si検出器と同様のプリアンプ系を用いて実験を行い、同様の信号波形を得ることができていることを確認した。



図 3. 4. 1 コバルトガンマ線照射装置

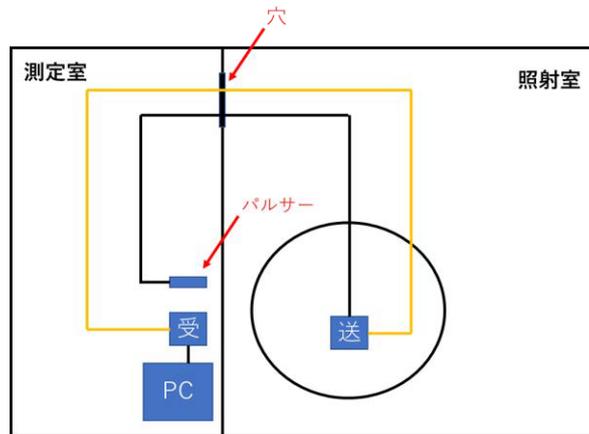


図 3. 4. 2 ガンマ線照射実験の装置配置

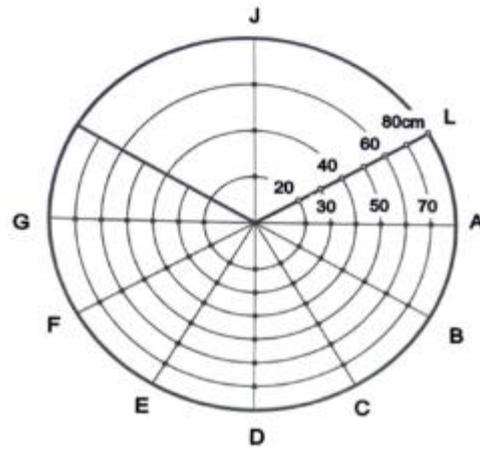


図 3.4.3 照射台の見取り図

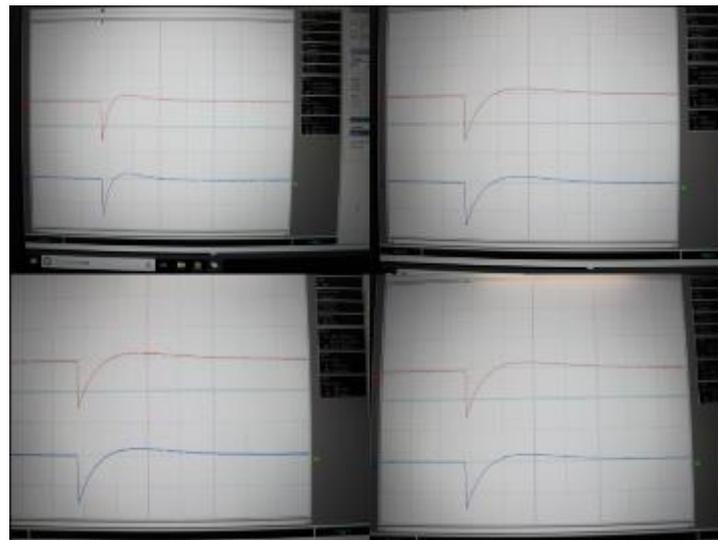


図 3.4.4 受信側出力

青色 : ch1 の受信側出力、赤色 : ch2 の受信側出力  
左上 4分後、右上 9分後、左下 14分後、右下 19分後

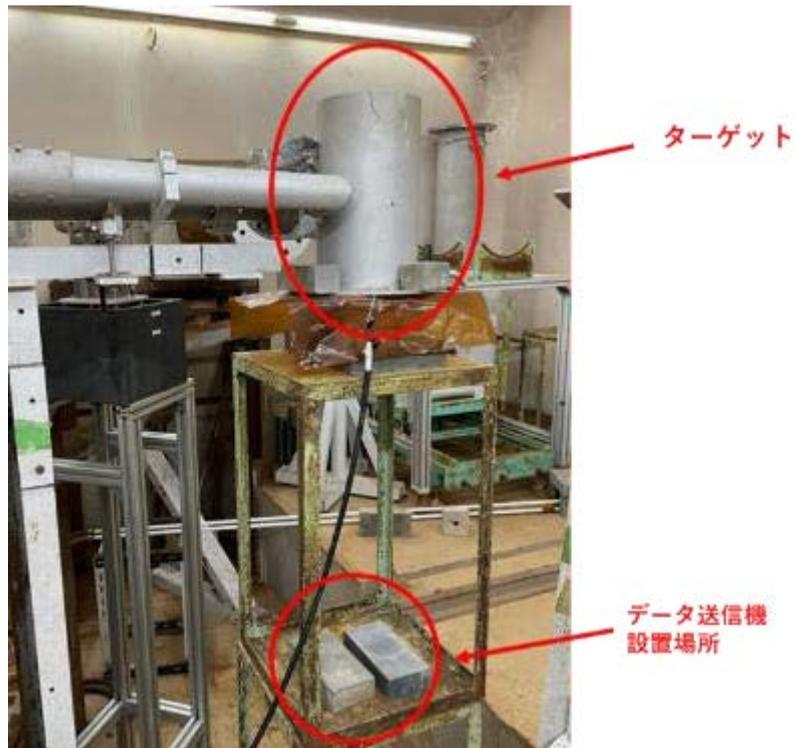


図 3.4.5 電子線型加速器のターゲット室

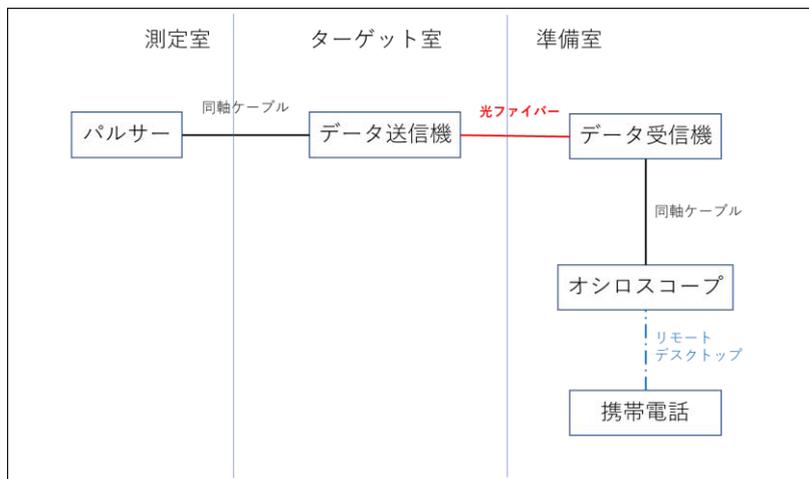


図 3.4.6 電子線型加速器での照射実験の装置配置



図 3.4.7 オシロスコープでの信号波形

表 3.4.1 福島第一 2 号機の運転履歴

サイクル	発電終了	発電開始	炉停止日数	炉停止後の 運転日数	取換本数
25	2010/9/16	2010/11/18	63	113	116
	2010/6/17	2010/7/19	32	59	
24	2009/4/22	2009/7/21	90	331	116
23	2008/3/12	2008/5/21	70	336	120
	2007/10/12	2007/10/21	9	143	
22	2006/9/4	2007/1/28	146	257	120
	2006/3/20	2006/5/20	61	107	
	2005/10/10	2005/11/12	33	128	
21	2005/4/18	2005/7/4	77	98	76

表 3.4.2 燃料デブリから放出されるガンマ線 (photons/s)

平均エネルギー [MeV]	アクチノイド由来 [photons/s]	核分裂生成物由来 [photons/s]	合計 [photons/s]
1.00E-02	1.46E+15	1.69E+17	1.70E+17
2.50E-02	8.04E+13	3.61E+16	3.62E+16
3.75E-02	8.43E+12	3.99E+16	3.99E+16
5.75E-02	1.17E+15	3.22E+16	3.34E+16
8.50E-02	8.29E+12	1.97E+16	1.97E+16
1.25E-01	8.02E+12	1.48E+16	1.48E+16
2.25E-01	4.91E+12	1.63E+16	1.63E+16
3.75E-01	6.82E+11	7.61E+15	7.61E+15
5.75E-01	6.51E+10	2.52E+17	2.52E+17
8.50E-01	6.36E+10	9.10E+15	9.10E+15
1.25E+00	3.46E+10	3.70E+15	3.70E+15
1.75E+00	3.13E+09	1.20E+14	1.20E+14
2.25E+00	1.83E+08	3.78E+12	3.78E+12
2.75E+00	6.45E+09	1.60E+11	1.66E+11
3.50E+00	9.51E+07	2.05E+10	2.06E+10
5.00E+00	4.05E+07	5.67E-03	4.05E+07
7.00E+00	4.65E+06	3.68E-04	4.65E+06
9.50E+00	5.33E+05	2.33E-05	5.33E+05

2021年3月の時点

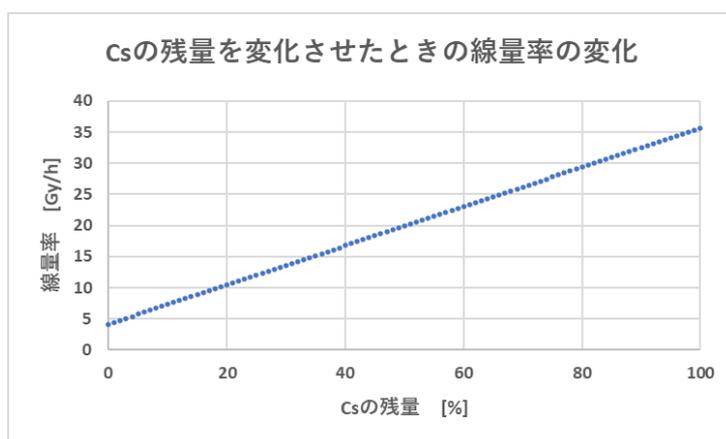


図 3.4.8 Csの残量を変化させたときの線量率の変化

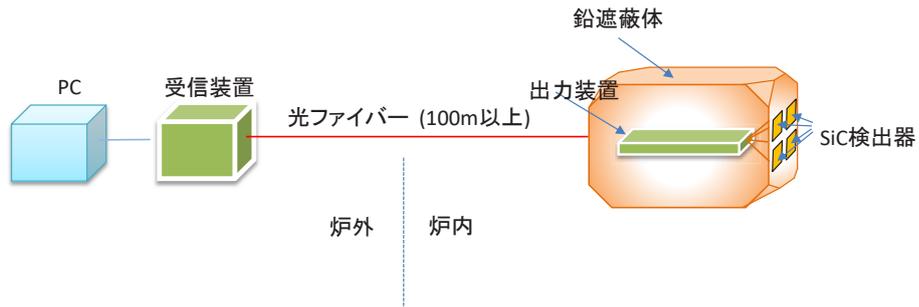


図 3.4.9 検出器と送信装置の配置の概念図

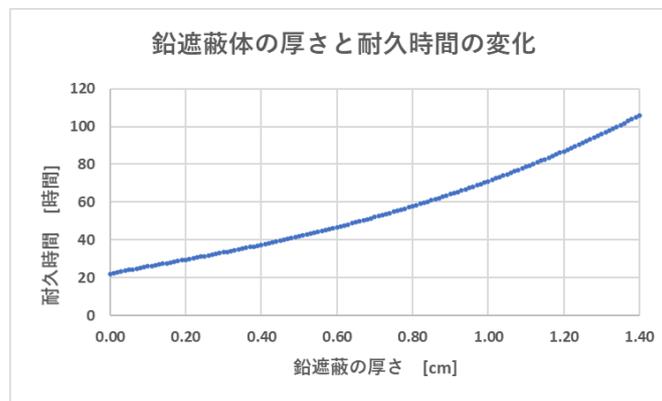


図 3.4.10 鉛遮蔽厚さを変化させた時の耐久時間



図 3.4.11 作製した鉛遮蔽体  
(約 12 cm×8 cm×6 cm、鉛厚さ約 1 cm)

### 3.5 研究推進

当初の予定では英国での打合せを行い、英国側が京都大学に来所して共同で実験を行うことを計画していたが、コロナ禍のため実施することができなかった。しかしながら、研究代表者の下で、英国ランカスター大学の本研究の担当教員と研究員、英国の検出器製作メーカーの担当者とその日本支社の担当者との連携を密にして、京都大学側が開発全体を把握しながら、Web会議、メールでの意見交換等を行って研究実施計画を推進することができた。

令和2年8月28日（Web）

英国での Si 検出器の実験結果についての情報交換を行い、照射実験の結果について議論した。

令和3年1月26日（メール）

英国での SiC 検出器の実験結果についての情報交換を行った。

令和3年5月21日（Web）

京都大学で実施する実験についての打合せを行った。

令和3年7月3日～5日（面談、メール）

京大複合研の KUCA での未臨界測定実験に、検出器を製作した英国の会社（IPL 社）の日本支社の担当者が参加して共同で実験を実施した。その中でデータ送信システムについての相談を行った。

#### 4. 結言

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「放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出の開発」における、令和 2 年度の研究を令和 2 年 7 月 1 日～令和 3 年 9 月 30 日の期間で実施した。令和 2 年度は、研究計画のうち、(1)検出器開発 (SiC、プリアンプ回路)、(2)信号伝送系の開発、(3)データ収集装置の開発、(4)照射試験、及び(4)研究推進の全ての研究開発項目について、当初の予定どおりに実施することができた。

3 年間の研究の成果として、当初の目的としていた燃料デブリ取り出し時の未臨界モニタとして使用するために、SiC をベースにした新しい中性子検出器の性能を確認し、高線量下で使用できる検出器からの信号を伝送するための新しいシステムを開発し、未臨界を監視できるモニタとして使用できるようなシステムを開発することができた。SiC の中性子検出器は、今後の原子炉での原子炉物理の革新的な新しい実験にも用いることができると考えられ、また、信号伝送システムについては、高線量下での適切な信号伝送が求められる加速器周辺の測定系や発電炉の過酷事故時でも使用できるような装置として利用できるものと考えられる。

今後の研究開発課題や開発のロードマップについては以下のように考えている。

今回の研究の内容は大きく分けて 3 つの項目があると考えている。まず、SiC 中性子検出器の開発についてである。現時点では SiC 検出器自体は利用できるところまで来ていると考えているが、当初の目的は SiC ウェハに検出器とプリアンプ系を組み込んだ薄型形状のシステムを作製することであった。プリアンプの設計までは進んだものの、プリアンプを組むところまでは到達していないが、これを製作することで今後現場対応ができると考えている。2 つ目は、高線量下での信号伝送システムの開発であり、今回耐放射線性の光ファイバーを用いたシステムを設計開発し、実際の原子炉や加速器施設での実験で使用してその性能を確認することができ、十分に現場で使用できるものになっているものとする。3 つ目は、測定データから未臨界状態を監視するシステムであり、これについても KUCA での実験を通じて十分に利用できる見通しが立っている。

参考文献

- [1] 東京電力ホールディングス株式会社, 1号機 X-2 ペネトレーションからの原子炉格納容器内部調査, 原子炉格納容器の減圧について, 2019年2月28日,  
[https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap\\_progress/pdf/2019/d190228\\_08-j.pdf](https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2019/d190228_08-j.pdf) (参照: 2020年7月30日) .
- [2] 久語輝彦他, シビアアクシデント後の再臨界評価手法の高度化に関する研究 (共同研究) ,  
JAEA-Research 2013-046, 2014, 53p.
- [3] A. G. Croff, A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code, ORNL/TM-7175, 1980,  
183p.
- [4] A. L. Giudice et al., Performances of 4H-SiC Schottky Diodes as Neutron  
Detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:  
Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol.583, no.1,  
2007, pp.177-180.



