JAEA-Review
2020-057
DOI:10.11484/jaea-review-2020-057

放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発（委託研究）

ー令和元年度　英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業ー

Development of Thin SiC Neutron Detector with High Radiation Resistance (Contract Research)
-FY2019 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

January 2021
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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（https://www.jaea.go.jp）
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, 2021

JAEA-Review 2020-057

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－

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

（2020 年 11 月 18 日受理）

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

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等を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」の令和元年度の研究成果について取りまとめたものである。

燃料デブリの取り出し作業時には非常に高線量の γ 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、γ 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

JAEA-Review 2020-057

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

－ FY2019 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project －

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

Kyoto University

(Received November 18, 2020)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to "the Project") in FY2019.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields. The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2018, this report summarizes the research results of the "Development of Thin SiC Neutron Detector with High Radiation Resistance" conducted in FY2019.

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 radiation monitors is difficult because heavy radiation shields are needed. In the present study, we will develop a neutron detector using thin, light-weight and radiation-resistive silicon carbide (SiC) that has low sensitivity to gamma-rays as well as the data collection system in collaboration with the U.K. Using this system, the performance tests will be conducted supposing the real debris retrieval 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（継続分） 2

3.　令和元年度　採択課題 5

付録　成果報告書 9

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project .. 1

2. Accepted Proposal in FY2018 ~Continued~ 2

3. Accepted Proposal in FY2019 5

Appendix Result Report 9

This is a blank page.

1.　英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

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

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

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

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

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

2.　平成 30 年度　採択課題（継続分）

平成 30 年度採択課題（継続分）については以下のとおりである。

課題数：19 課題
　共通基盤型原子力研究プログラム　11 課題
　　（若手研究 6 課題、一般研究 5 課題）
　課題解決型廃炉研究プログラム　　6 課題
　国際協力型廃炉研究プログラム　　2 課題
　　（日英共同研究）

平成 30 年度　採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

3.　令和元年度　採択課題

令和元年度は、4 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

・　公募期間：平成 31 年 4 月 24 日～令和元年 6 月 7 日
　　令和元年 5 月 30 日～令和元年 7 月 18 日　※日露共同研究のみ

・　課題数：19 課題
　共通基盤型原子力研究プログラム　7 課題
　　（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）
　課題解決型廃炉研究プログラム　4 課題
　国際協力型廃炉研究プログラム　4 課題
　　（日英共同研究 2 課題、日露共同研究 2 課題）
　研究人材育成型廃炉研究プログラム　4 課題

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議での審議を経て、採択課題を決定した。

令和元年度　採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

研究人材育成型廃炉研究プログラム

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

本報告書は、採択課題のうち、国際協力型廃炉研究プログラム「放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発」の令和元年度の研究成果について記したものである。

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録

成果報告書

This is a blank page.

令和元年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

放射線耐性の高い
薄型 SiC 中性子検出器の開発
（契約番号　31I054）

成果報告書

令和 2 年 3 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」の令和元年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略 iv

1. はじめに 1

2. 業務計画 6
   2.1 全体計画 6
   2.2 令和元年度の成果の目標及び業務実施方法 10

3. 令和元年度の実施内容及び成果 12
   3.1 検出器開発（SiC、プリアンプ回路） 12
   3.2 信号伝送系の開発 15
   3.3 データ収集装置の開発 21
   3.4 照射試験 28
   3.5 研究推進 32

4. 結言 33

表一覧

表 2.1　本事業の全体スケジュール 8
表 2.2　業務実施計画の項目別スケジュール 11
表 3.3.1　A 体系での解析結果 27
表 3.3.2　B 体系での解析結果 27

図一覧

図 2.1　研究実施体制図 9
図 2.2　測定システム全体の構成図 9
図 3.1.1　SiC ベース検出器の想定図 13
図 3.1.2　熱中性子に対する応答計算結果 13
図 3.1.3　中性子に対する検出効率の B_4C 厚さ依存性 14
図 3.1.4　ガンマ線に対する応答計算結果 14
図 3.2.1　データ転送装置（左：受信側、右：出力側） 18
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） 18
図 3.2.3　光ファイバー接続用コネクタ部分拡大写真（出力側） 19
図 3.2.4　受信側外形図 19
図 3.2.5　出力側外形図 20
図 3.2.6　ゲイン変更による性能確認 20
図 3.3.1　測定システム全体図 24
図 3.3.2　KUCA 固体減速炉心（B 架台） 24
図 3.3.3　測定システム構成図 25
図 3.3.4　炉心配置図（A）（LiF あり） 25
図 3.3.5　炉心配置図（B）（LiF なし） 26
図 3.3.6　2/8” p23EUEU 燃料体の構成図 26
図 3.3.7　炉心配置（A）での Feynman-α法の Y 値 26
図 3.3.8　燃料デブリ取り出し時の中性子検出器配置 27
図 3.4.1　コバルト 60 ガンマ線照射装置 30
図 3.4.2　照射台の見取り図 30
図 3.4.3　γ線照射実験の装置配置 30
図 3.4.4　光ファイバーケーブル 31
図 3.4.5　受信側出力 31
図 3.4.6　検出器と送信装置の配置の概念図 31
図 3.4.7　ランカスター大学での中性子照射実験、配置図 32
図 3.4.8　英国での討論会 agenda（一部） 32

略語一覧

SiC　　：Silicon Carbide（シリコンカーバイド）

IRID　　：International Research Institute for Nuclear Decommissioning
（技術研究組合　国際廃炉研究開発機構）

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）を測定する装置。未臨界度を測定する手法としては、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間を測定し（通常は1 μ秒以下の時間分解能）その時系列分布を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、福島第一原子力発電所の廃炉作業ではこれら2つの方法を併用し、中性子雑音解析法で絶対値を測定し中性子源増倍法で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。

京都大学研究用原子炉（KUR）　京都大学複合原子力科学研究所にある最大出力が5000 kWの研究用原子炉。中性子利用のための原子炉で様々な中性子照射設備を有している。本研究ではその照射設備のうち最も中性子束が高く（10^{13} n/s/cm^2）、ガンマ線量の高い（10^6 Gy/h）傾斜照射孔を用いる。

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。福島第一原子力発電所で用いための未臨界監視モニタの開発はこの装置を用いてIRIDが実施している。

コバルト60照射設備　京都大学複合原子力科学研究所にあるコバルト60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10^3 Gy/hまでの照射線量率で照射することができる。

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γ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（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、3 カ年計画の 2 年目である令和元年度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、国際廃炉研究開発機構（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、および 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 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、臨界実験装置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、京都大学複合原子力科学研究所附設の Co-60 照射設備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日本原子力研究開発機構 廃炉国際共同研究センター（JAEA/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。

1. はじめに

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、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の中止または中性子吸収材の追加投入を速やかに実施できるように、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必要がある。

現在、京都大学複合原子力科学研究所（以下、京大複合研）の研究用原子炉である KUCA では、2013 年よりこの未臨界監視モニタを開発するための実験を国際廃炉研究開発機構（IRID）や原子力メーカ等と共同で実施している。これまでの実験を通じて、測定した中性子の信号から未臨界の程度（未臨界度）を推定する手法については開発が順調に進められているが、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}B 塗布型検出器を使用することを前提に実験を行ってきたものの、福島第一内部の調査が進むにつれ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鉛などによりガンマ線遮蔽をする必要性が指摘されるようになった。さら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 以上ある硬い多重シールド同軸ケーブルを用いており、実際に KUCA での実験で使用してみると取り回しが難しく、福島第一での遠隔操作での使用はさらに難しくなることが予想され、この信号伝送系についても再検討の必要があることがわかってきた。

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、しかも薄型軽量で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の開発を行うことを目的とする。この新しい中性子検出器は炭化ケイ素（SiC）をベースにしたもので（以下、SiC 中性子検出器）、3 年間の研究期間内に英国側と日本側とで役割分担をして開発を実施し、両国で性能試験を行い、最終的には京大複合研の研究用原子炉での照射実験での放射線耐性の確認、および臨界実験装置において未臨界監視モニタ試験で使用して検出器としての性能を確認することで、福島第一の廃炉作業においてすぐにでも使用できるようにすることを目標とする。

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の環境において利用できることが求められているが、現行の放射線測定装置および信号伝送系では性能・機能上に限界があると考えられる。

そこで本研究においては、放射線耐性が高く、ガンマ線の影響を受け難く、しかも高温環境でも使用することができ、薄型軽量で遠隔作業においても取り扱いやすい SiC 中性子検出器の開発を行うことを目的とする。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ので、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。SiC はダイヤモンドに類似した結晶構造であるため放射線耐性が高いと考えられており、実際にランカスター大学ではガンマ線や中性子の照射試験を実施してその放射線耐性の高さを確認している。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 ℃（性能的には 300 ℃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^2/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 30 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^2/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、燃料デブリ近傍における中性子束は 10^2 n/cm^2/s 以下であると考えられるので、その程度の低い中性子束場でも複数の SiC からなる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。高い中性子束場での計測は、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 B-10 塗布量）を変更することにより可能となる。

なお、未臨界監視モニタとして使用する際に、中性子源増倍法または中性子雑音解析法によって未臨界度を測定する場合、中性子を検出した時刻情報を正確に測定できさえすれば十分であるので、ガンマ線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検出器からの波高や波形に関する情報は不要で、例えば NIM モジュールの TTL ロジック信号を送ることができれば良い。

既に英国において SiC のガンマ線検出器としての性能は確認しているため、今回の 3 年間という短い期間内での新しい中性子検出器の開発は十分に可能であると考えている。

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、小型の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未臨界監視モニタの検出器としての使用は難しい。

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、さらに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。これまでにランカスター大学では1 cm×1 cmの大きさのSiCガンマ線検出器の開発を行っており、中性子フルエンス 10^{13} n/cm^{2}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。さらに500 ℃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。

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、その実験成果をもとに今回の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、通常の検出器を挿入できないような隙間に挿入可能になる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}Si(n, γ)^{31}Si（半減期2.7 hで^{31}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。

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な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^{3}He検出器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）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実験精度を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る。

② 発電用原子炉において過酷事故時の炉心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圧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利用可能である。

③ 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ー等の動的解析に使用することが可能である。

④ 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高線量下での臨界管理に用いる中性子モニタに使用することを検討している。

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させていくが、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、中性子発生の電子線型加速器において使用して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の役割分担をする。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 ウエハから製作する。このような SiC を設計し製作することは（SiC ウエハの製作は外注）英国のランカスター大学は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今回の限られた短い期間での検出器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をする。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}B または ^{157}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 年間での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 Co-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}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、臨界実験装置や Co-60 ガンマ線照射施設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、インターネットを通じて開催し、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、燃料デブリ近傍の高線量場でも利用することができるようにγ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、本研究においては、これらの要求を満足することができる炭化ケイ素（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 ℃以上（性能的には 300 ℃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^{2}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］

既に開発を行っている 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（^{10}B または ^{157}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、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。同軸ケーブルは通常用いる

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可能性がある。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と考えている。

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と共同で実施する。なお、このようなメーカとは既にこの信号伝送系の設計に関する打合せを実施している。

(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)の構築を行う。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にする。

(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 Co-60 照射施設を用いて本システムの照射実験を実施する。京都大学では研究用原子炉（KUR）の傾斜照射孔に挿入して照射実験を実施する（熱中性子に対して 10^{13} n/cm^{2}s、ガンマ線に対して 5×10^6 (Gy/h)）。また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 ではシステムを全て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、京大）	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（京大）	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（京大）	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（京大、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（京大、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。

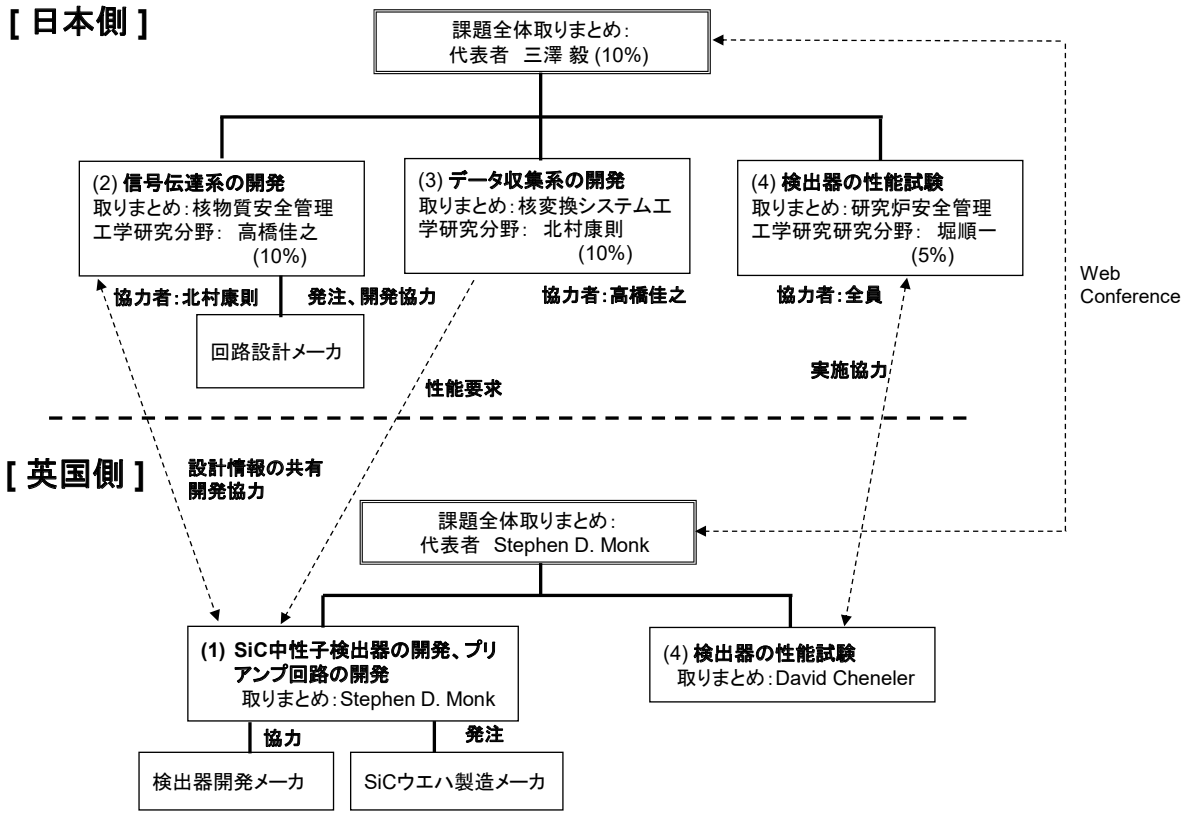

図 2.1　研究実施体制図

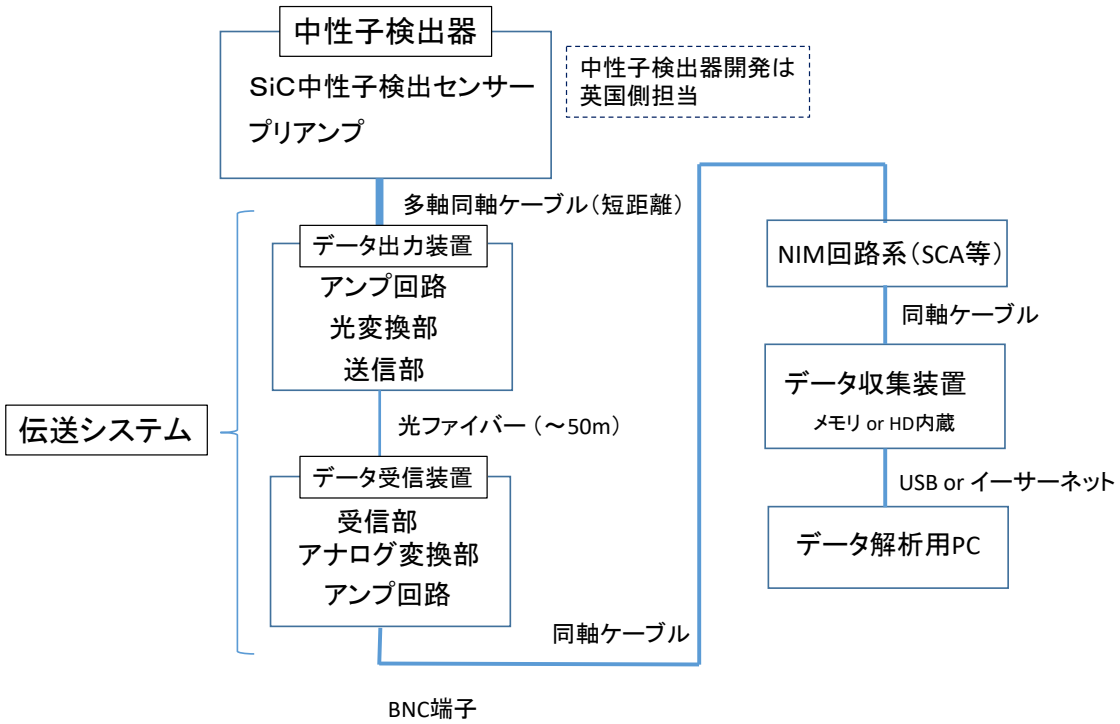

図 2.2　測定システム全体の構成図

2.2　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本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、国際廃炉研究開発機構（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、Co-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 Co-60 照射設備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 2.2　業務実施計画の項目別スケジュール

区分	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
(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. 令和元年度の実施内容及び成果

以下に、各研究項目における本年度の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）

(1) 実施内容

平成30年度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最終想定図を図3.1.1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。そこで、本年度は、検出器の最終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。

中性子コンバータの素材としては、検出器へのドーピングに適している^{10}B濃縮（解析では100 %濃縮）の炭化ホウ素B_4Cを選定した。解析では、このドーピング厚さを1 μmから4 μm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3.1.2に示す。この図は^{10}Bと中性子の反応により生成する^{4}Heまたは^{7}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 μmが適しているとの知見を得た。これは^{10}Bと中性子の反応により生成する^{4}Heと^{7}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}Heまたは^{7}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3.1.2のグラフを積分してResponseの平均値を求めるとイオンが信号生成確率となり、0.3 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3.1.3に示す。この図の“diffuse source”が4π方向から中性子が入射したときの結果で、厚さが2 μmのとき中性子の検出効率は約0.04となることが分かった。

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計算を実施した。計算に使用した検出器のサイズは、1 cm×1 cm×13 μm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}Csと^{60}Coを使用した。計算結果を図3.1.4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 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°）に入射したとき、中性子の場合と同様に0.3 MeV以下の信号をノイズとして除去すると検出効率は1.6×10^{-6}となり中性子に比べて4桁小さい値となる。ガンマ線が垂直方向（0°）に入射したときの検出効率は90°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}Csからのガンマ線が4πで入射したときの検出効率は9×10^{-8}となり中性子に比べて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十分に小さいことが分かった。

次に、検出器に取り付けるプリアンプの設計について英国側で検討を実施した。平成30年度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るとの見解を得ていたが、本年度、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。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。

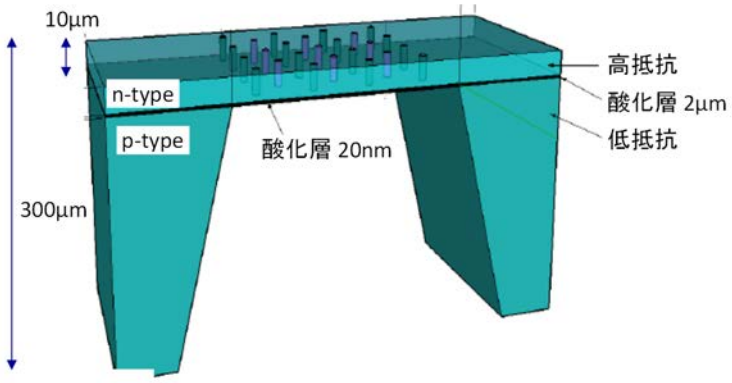

図 3.1.1　SiC ベース検出器の想定図

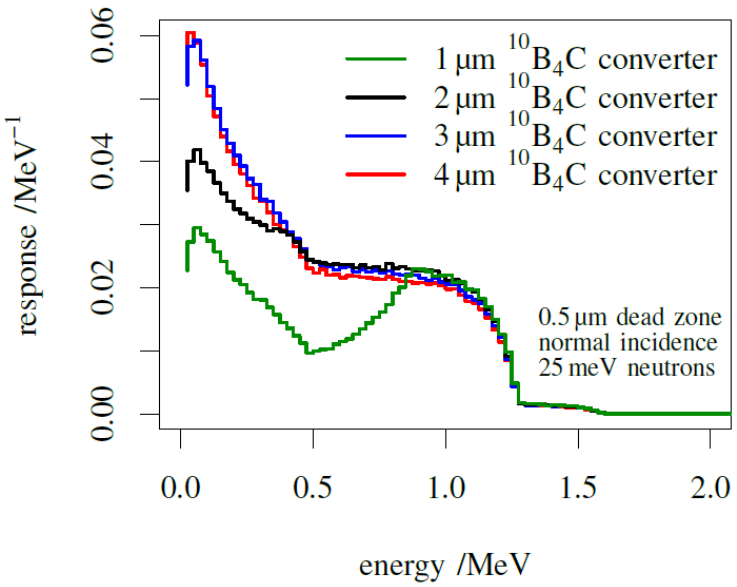

図 3.1.2　熱中性子に対する応答計算結果

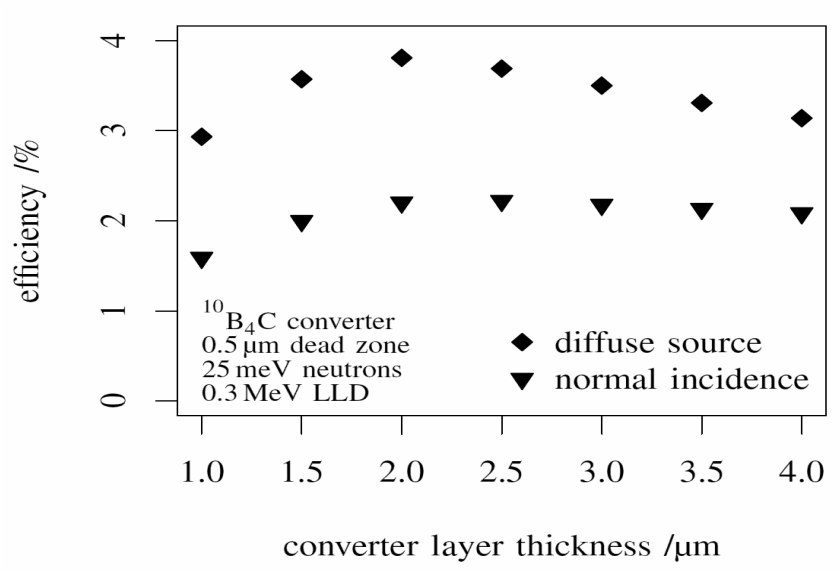

図 3.1.3　中性子に対する検出効率の B_4C 厚さ依存性

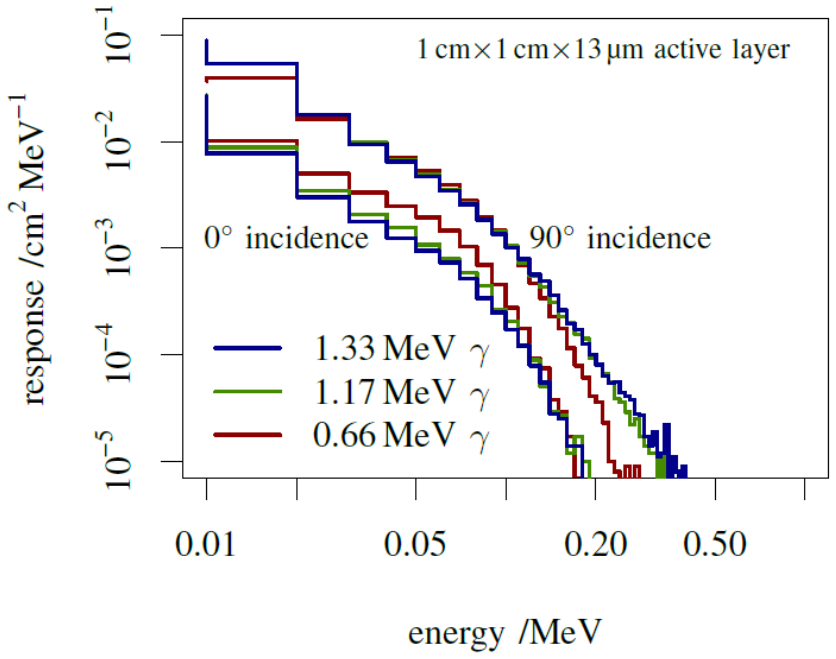

図 3.1.4　ガンマ線に対する応答計算結果

3.2 信号伝送系の開発

(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、平成30年度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 μsec) 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ィ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 出力される光ディジタル信号の波長は1000～1500 nmとし、光ディ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ィジタル信号であること。

⑥ 光ファイバーケーブルは京大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DC 24 V以下とする。

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ィ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、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 μsec 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）にイーサーネット、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 AC 100 V または DC 24 V 以下とする。

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 μ 秒単位で、USB ケーブルでパーソナルコンピュータ（PC）に転送することができるデータ転送装置が完成した（図 3.2.1、図 3.2.2、図 3.2.3、図 3.2.4、図 3.2.5）。

平成 30 年度の設計では基板の大きさは出力側、受信側共に 12 cm×8 cm×1 cm であったが、燃料デブリ近傍に設置される出力側ボードについては高線量率でも利用できるようにするために鉛遮蔽材で覆う必要があるため、鉛の重量でできる限り軽くすることを目的として、当初の平板状の形状ではなく、基板を 2 分割して上下に重ねて小さくするようにした。その結果、基板の大きさは 8 cm×5.5 cm×2 cm とコンパクトにすることができ、周囲を囲む鉛の重量を減らすことができる。

データ送信側のシステムの概要は以下の通りである。

・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。

データ送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ィ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。
・光ディ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 μsec、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×5～×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 3.2.6)。

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 μsec 間“H”を出力する。
・パルス“H”出力期間（0.5 μsec）は検出を行わない。
・SiC 検出器出力の最小パルス幅 1 μsec 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×8 cm（受信側)、8 cm×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、平成 30 年度の試作器では入力側、受信側共に基板サイズが 12 cm ×8 cm を使用し、素子等の高さや横にはみ出す端子等も含めて体積は約 500 cm^3 であったが、今年度は大きさが問題となる入力側については基板サイズが 8 cm×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^3 まで小型化することができた。

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 Co-60 照射施設での高線量場での性能確認実験を実施した。

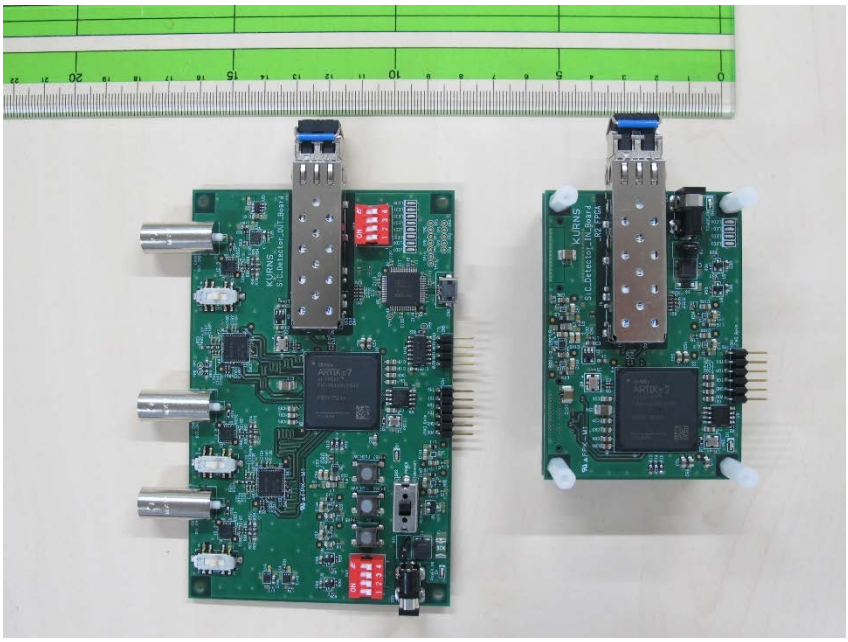

図 3.2.1　データ転送装置（左：受信側、右：出力側）

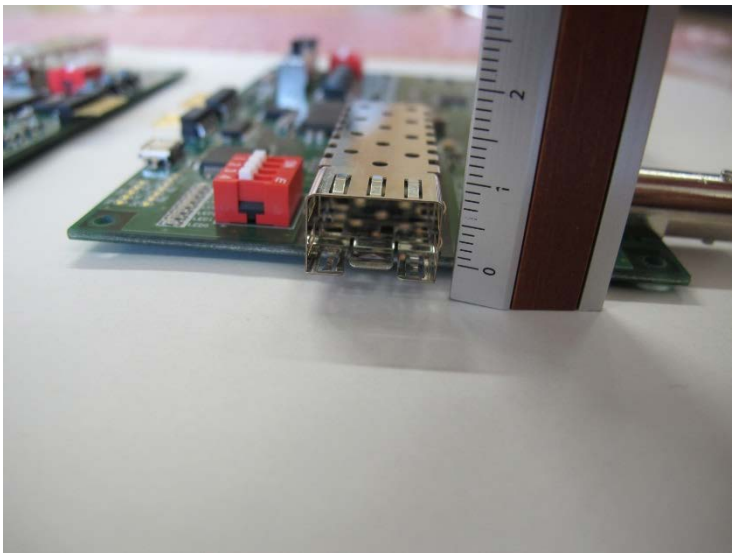

図 3.2.2　光ファイバー接続用コネクタ部分拡大写真（受信側）

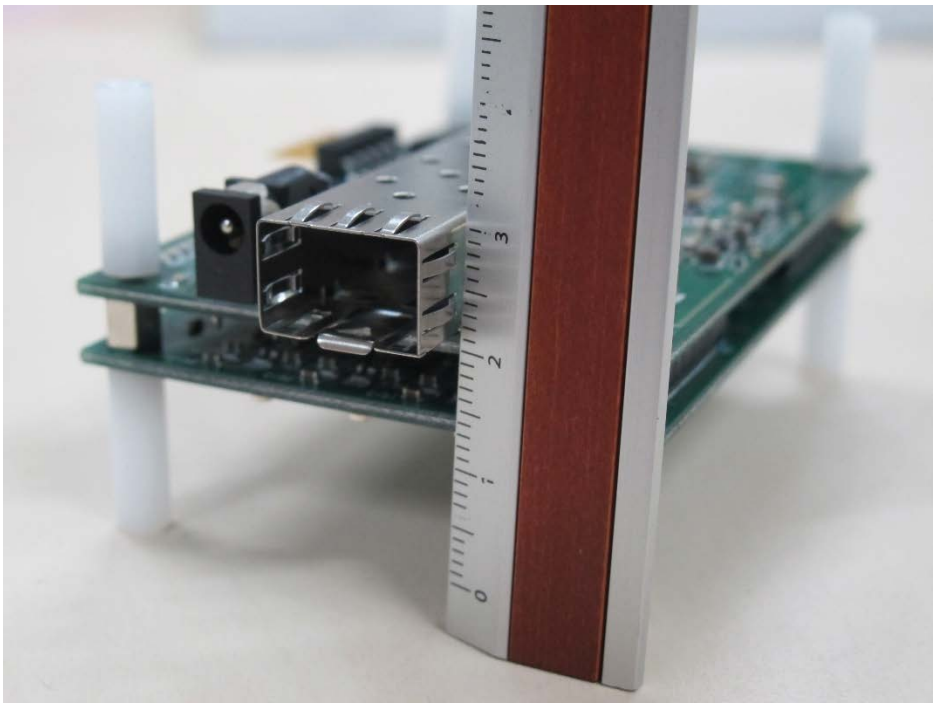

図 3.2.3　光ファイバー接続用コネクタ部分拡大写真（出力側）
（4 隅の白い棒は一時的に取り付けたもので取り外し可能）

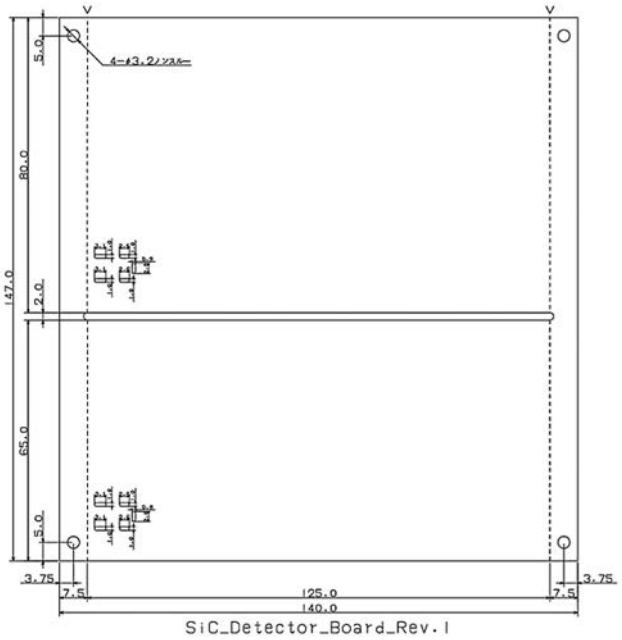

図 3.2.4　受信側外形図

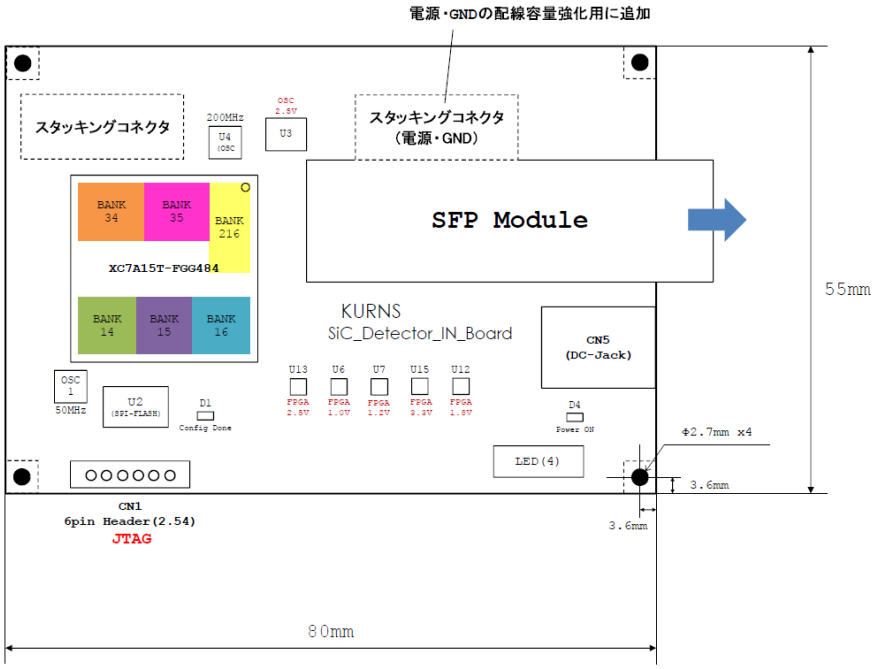

図 3.2.5　出力側外形図

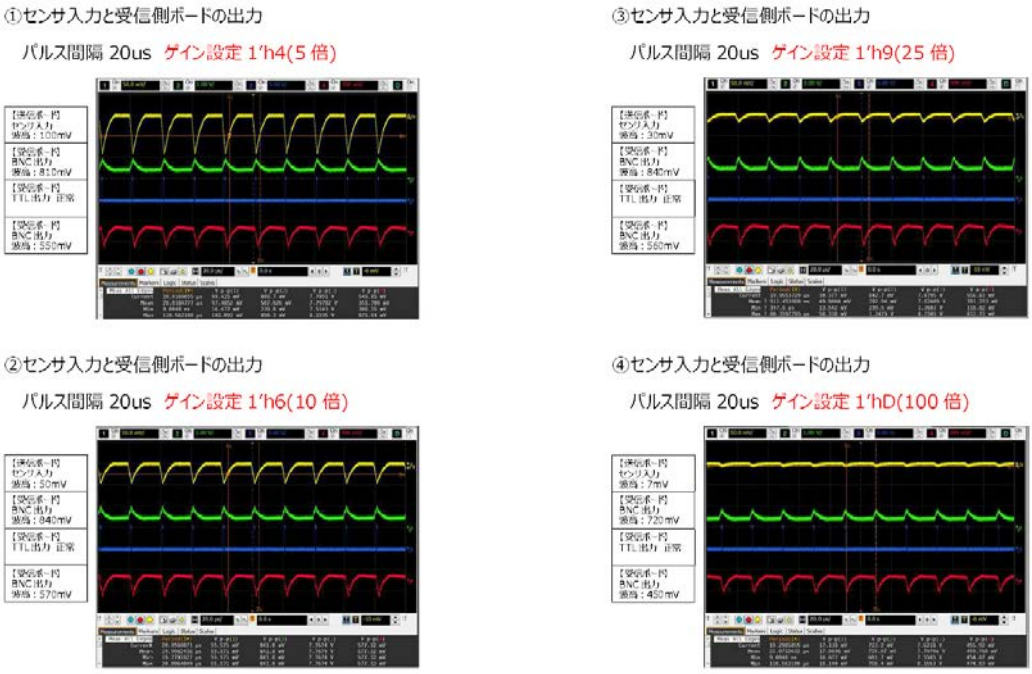

図 3.2.6　ゲイン変更による性能確認

黄色：出力側装置への入力信号、青色：TTL ロジック信号（PC へ）、

赤色：受信側の BNC 出力信号

3.3 データ収集装置の開発

(1) 実施内容

平成 30 年度の研究において、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、前項目で述べたようなプロトタイプの装置を開発することができた。測定装置の全体概念図を図 3.3.1 に示す。令和元年度は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。

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。

実験で使用した炉心配置を図 3.3.4 と図 3.3.5 に示す。今回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拡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}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。

未臨界度の解析方法としてはこれまでに様々な手法が研究されているが、ここでは中性子雑音解析法を用いる。この手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、これまでの KUCA での IRID との共同研究でもこの手法を用いてきた。ここでは中性子雑音法から Rossi-α法と Feynman-α法の 2 つを用いて解析することとする。なお本研究の範囲には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含まれている。

Rossi-α 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 τ として記録する方法であり、横軸に時間間隔 τ 、縦軸に τ 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、α 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、

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

と書くことができる。β_{eff}は実効遅発中性子割合、ρ は反応度、Λ は中性子生成時間、k は実効増倍率、ℓ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 ρ 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十%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が、今後の燃料デブリ取り出し前にはサンプルを取り出して形状などを調べることにより、ある程度確定できると考えられる。今回の Rossi-α の解析の時間間隔は、50000 μ 秒で行い、すべての中性子をトリガーとして用いることとした。

一方、Feynman-α 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。

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

ここで t は計数する時間間隔（ゲート幅）、σ^2は計数 n の分散、$\overline{n(t)}$ は計数 n の平均値である。Y 値は一点炉近似において以下のように書くことができる。

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

ここでαはRossi-α法の場合と同様に即発中性子減衰定数、εは検出効率、νは核分裂による即発中性子生成数、τ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。測定では時間間隔を変更して 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、その値から未臨界度ρを求めることができる。

Feynman-α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-α法と Rossi-α法の結果の比較であり、両者のα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を測定することができることが判った。

KUCA の未臨界度測定実験とは別に、燃料デブリ取出し時の中性子検出器の配置方法について理論と解析により検討を行った。燃料デブリは半径が 4～6 m、厚さが 1 m 程度と大きな扁平円柱のような形状であることが予想されるため、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一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。そのため二点炉近似に基づく未臨界度評価方法を採用する必要があると考えられ、解析等による検討の結果、中性子検出器の配置は図 3.3.8 のように 2 本の検出器を体系の中心に対して対称な位置に置くことが望ましいことが示された。この検討結果については次年度以降も引き続き検討を行う。

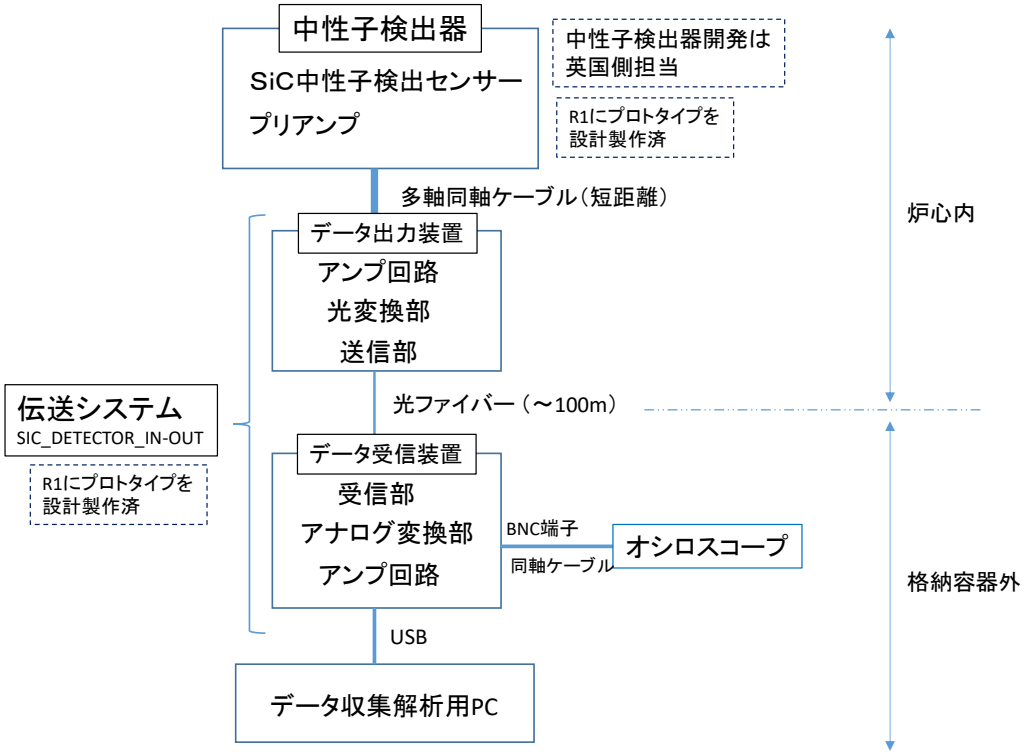

図 3.3.1　測定システム全体図

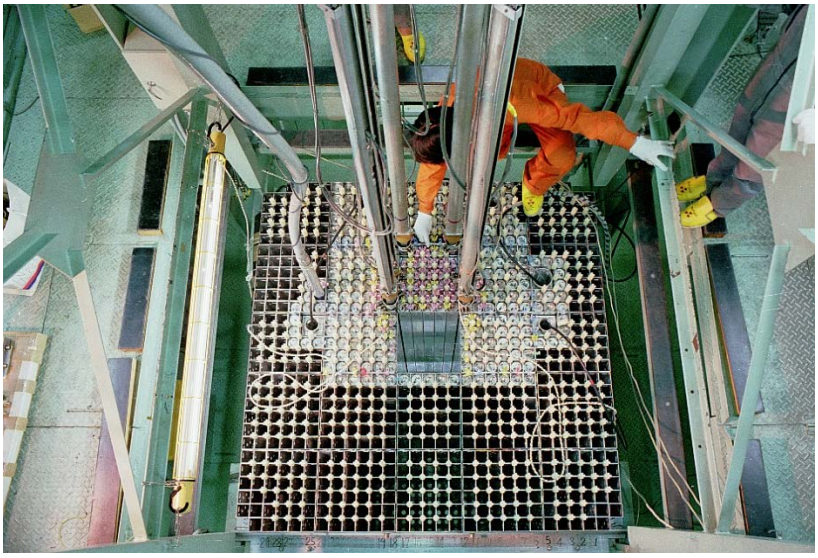

図 3.3.2　KUCA 固体減速炉心（B 架台）

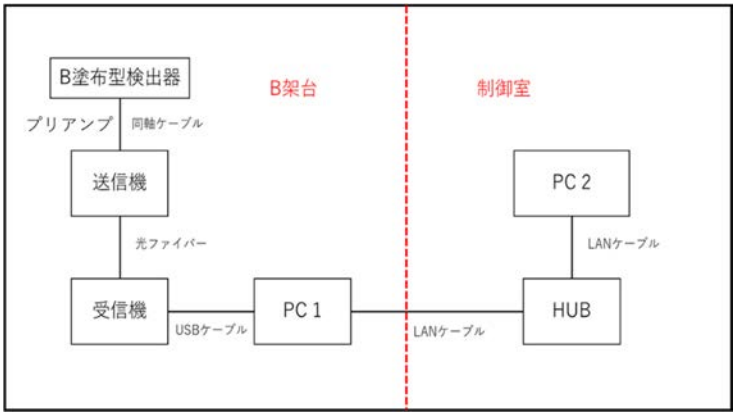

図 3.3.3　測定システム構成図

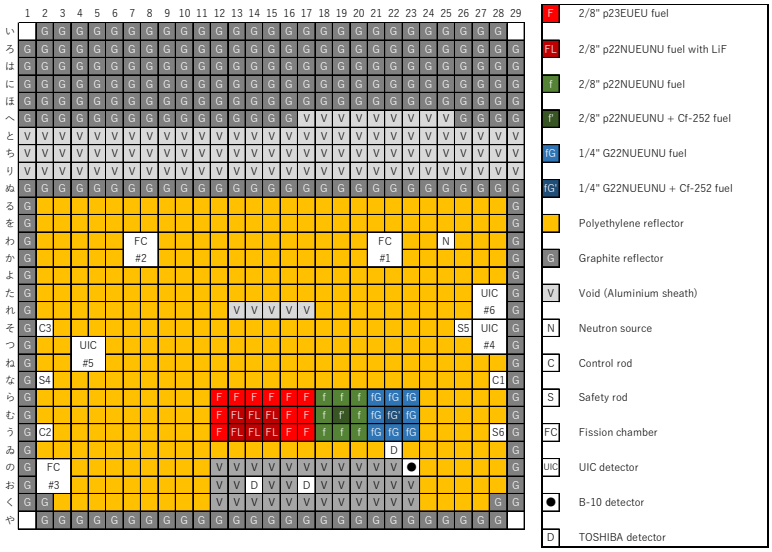

図 3.3.4　炉心配置図（A）（LiF あり）

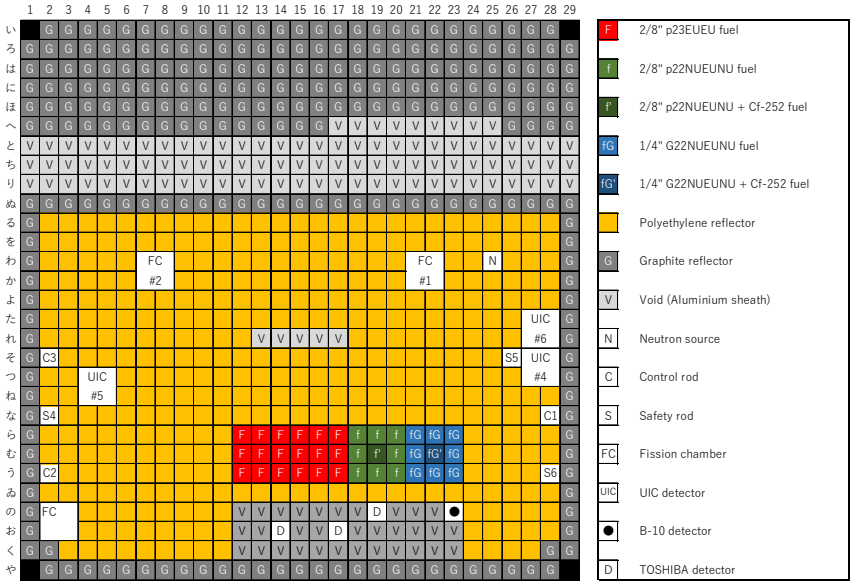

図 3.3.5　炉心配置図（B）（LiF なし）

図 3.3.6　2/8”p23EUEU 燃料体の構成図

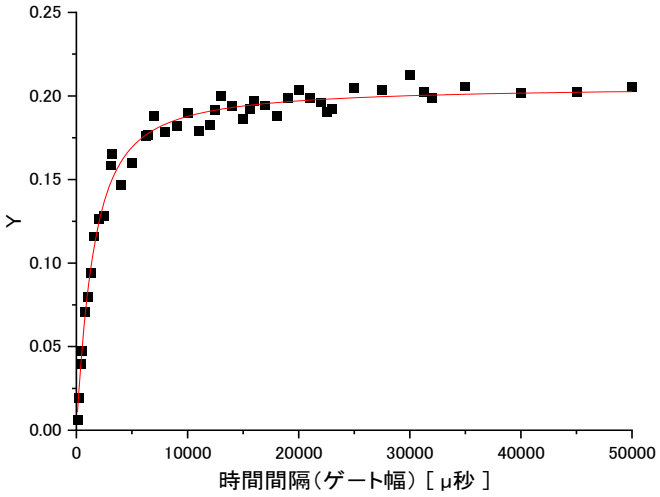

図 3.3.7　炉心配置（A）での Feynman-α 法の Y 値

表 3.3.1　A 体系での解析結果

	Rossi-α法	Feynman-α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
α [/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-α法	Rossi-α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
α [/秒]	1210	1560
標準誤差 [/秒]	4.04	5.87

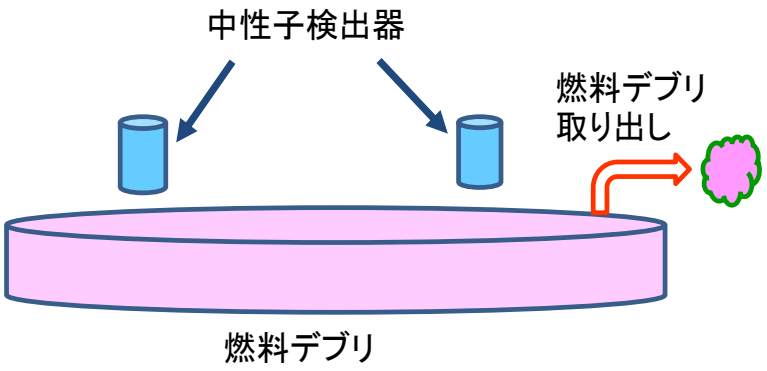

図 3.3.8　燃料デブリ取出し時の中性子検出器配置

3.4　照射試験

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ガンマ線照射施設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 3.4.3 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 3.4.2）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 3.4.5）。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 3.4.4）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することが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 3.4.5 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（γ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、出力装置を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成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＝3.13×10^{-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 3.4.6 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。

福島第一原子力発電所2号機のペデスタル内部については線量率測定が既に行われており、最大線量率は約 7.6 Gy/h と報告されている[1]。

この線量率であれば 100 時間の利用のために必要な鉛遮蔽材の厚さは約 0.1 cm（全体重量は約 0.2 kg、形状は上記の説明と同じようにボードを鉛で囲む)、500 時間利用でも約 0.2 cm（全体重量は約 0.4 kg）であり装置の重量についてはほとんど問題にはならないと考えられる。

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。

参考文献

〔1〕東京電力ホールディングス株式会社、2 号機原子炉格納容器内部調査　実施結果、廃炉・汚染水対策チーム会合　事務局会議（第 63 回)、資料 3-3、2019 年 2 月 28 日.

図 3.4.1　コバルト 60 ガンマ線照射装置

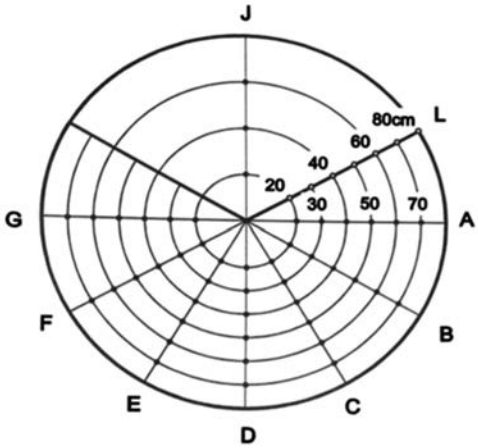

図 3.4.2　照射台の見取り図

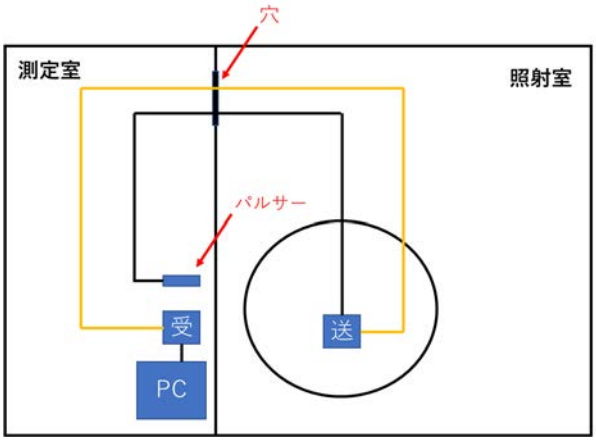

図 3.4.3　γ線照射実験の装置配置

図 3.4.4　光ファイバーケーブル

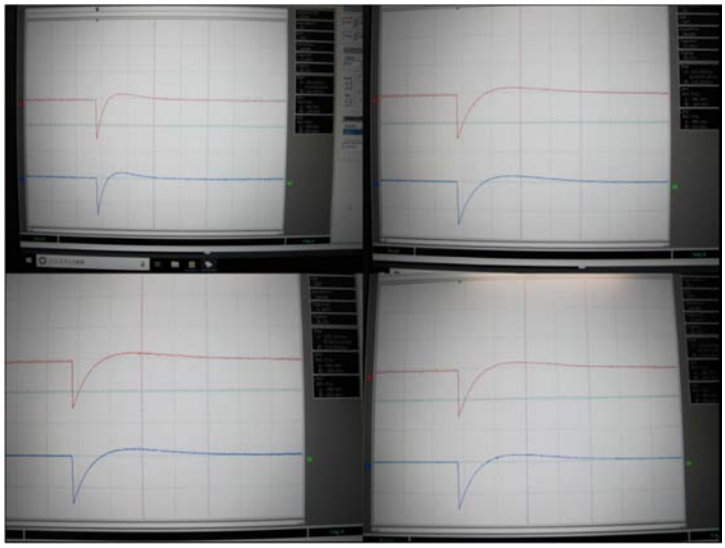

図 3.4.5　受信側出力
（青色：ch1 の受信側出力、赤色：ch2 の受信側出力
左上 4 分後、右上 9 分後、左下 14 分後、右下 19 分後）

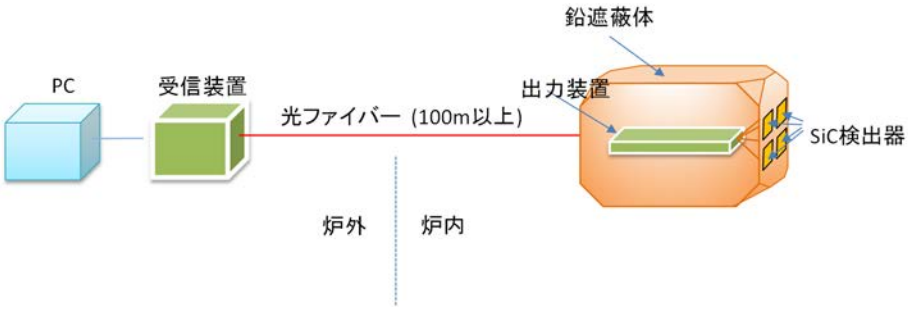

図 3.4.6　検出器と送信装置の配置の概念図

3.5　研究推進

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、研究実施計画を推進と照射実験（図 3.4.7）の検討を行うための英国での打合せ（9 月、図 3.4.8 に Agenda の一部）、Web 会議等を行って研究を進めることができた。

また、実験結果や英国との打合せ等により得られた情報を元に、データ転送装置の設計の担当者と密に連絡を行うことでデータ転送装置の製作を行うことができた。

燃料デブリ取り出しに関する最新情報の収集するため、CLADS 主催の富岡町での福島リサーチカンファレンスへの参加や、Web を通じての情報収集を行った。

上記のように各研究者が積極的に情報共有及び成果発表を行うことで、本研究を着実に推進した。

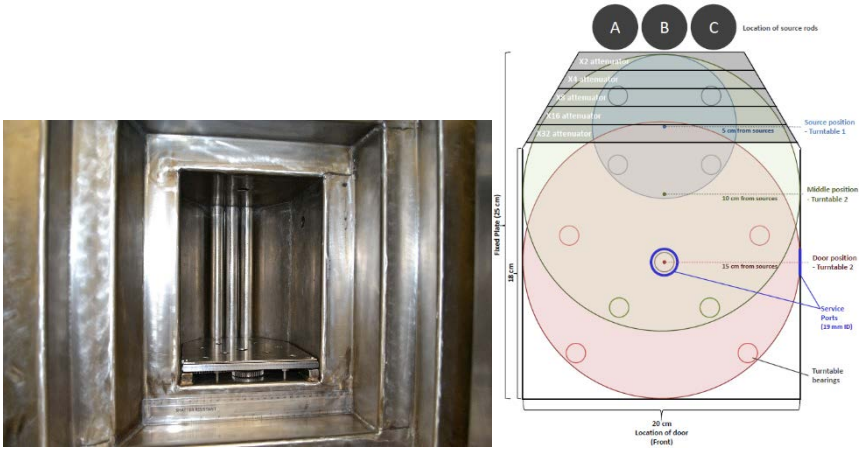

図 3.4.7　ランカスター大学での中性子照射実験、配置図

Draft Agenda

UK/Japan Thin Neutron Detector System progress meeting Thursday 12 September 2019

Appleton Room, IET Savoy Place https://savoyplace.theiet.org

Invitees:

Tsuyoshi Misawa (misa@rri.kyoto-u.ac.jp)
Yoshiyuki Takahashi (ytaka@rri.kyoto-u.ac.jp)
Kazushi Watanabe (kazushi.watanabe@inphys.com)
Mike Anderson (mike.anderson@inphys.com)
David Prendergast (david.prendergast@inphys.com)
Shaun August (shaun.august@inphys.com)
Mustafa Alhamdi (mustafa.alhamdi@inphys.com)
David Cheneler (d.cheneler@lancaster.ac.uk)
Simon Platt (s.p.platt1@lancaster.ac.uk)

Apologies for absence:

Stephen Monk (s.monk@lancaster.ac.uk)

1.30　Arrival & refreshments

2.00　Review of actions from March 2019

2.15　UK project

Progress/plans/risks

Technical report

Monte Carlo simulation of SiC radiation detectors

Front-end amplifier analysis and design

Test programme

3.15　JP project

Progress/plans/risks

Technical report

図 3.4.8　英国での討論会 agenda（一部）

4. 結言

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 中性子検出の開発」における、令和元年度の研究を令和元年 7 月 1 日～令和 2 年 3 月 31 日の期間で実施した。本年度は研究計画の内、(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(5) 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。これらの研究開発成果の詳細は第 3 章に記載している。

本研究開発では、日本と英国の研究者が協力し、福島第一や英国セラフィールドの廃止措置を念頭にした汎用性の高い新しい中性子検出器の開発を行う。本年度では、両国との打ち合わせにおいて、各研究者は自身の担当分野の報告を行うだけではなく、積極的な意見交換を通して基礎実験への参加や今後の研究計画の立案などを実施した。来年度は、本事業の最終年度として、これまでの研究成果で得た知見を反映し、両国での意見交換を密にしながら、更なる研究推進を実施する。

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	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^3
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

組立量	SI 組立単位			
	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
立体角	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	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，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	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
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	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	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		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、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。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベク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。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告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

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	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	$m^{-2}\ s\ A$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
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	グレイ毎秒	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}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

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	°	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 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
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
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10^{-19}J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10^{-27}kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10^{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=10^5Pa
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	M	1 M=1852m
バーン	b	1 b=100fm^2=$(10^{-12}cm)^2$=$10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
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	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =$1cm^2\ s^{-1}$=$10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド[a]	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		1 フェルミ=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）