



JAEA-Review

2024-013

DOI:10.11484/jaea-review-2024-013

非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化 (委託研究)

—令和4年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

Fuel Debris Criticality Analysis Technology Using Non-contact Measurement Method
(Contract Research)

-FY2022 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
東京工業大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development
Tokyo Institute of Technology

July 2024

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 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
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 Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化
(委託研究)

—令和4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

東京工業大学

(2024年3月19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4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、令和3年度に採択された研究課題のうち、「非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化」の令和4年度分の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、非接触のアクティブ中性子法により燃料デブリの臨界安全上の特性を評価する測定システムの開発と、燃料デブリ取出し作業員の安全確保方策の確立に資する基盤技術として多領域積分型動特性解析コードの開発により燃料デブリ臨界解析技術を高度化することを目的としており、令和3年度から令和5年度の3年計画の2年目として東京工業大学、産業技術総合研究所、長岡技術科学大学が連携して実施した。検出器設計最適化のために新たに基礎実験を行って取得したデータを用いて、中性子輸送計算コードの妥当性及び不確かさを評価することで解析精度の向上を図った。この基礎データを基にした輸送計算コードを用いたパラメトリックサーベイにより、検出器の配置や³He ガス圧、減速材、遮蔽材、中性子源配置の最適化を実施することにより検出器を設計した。

遅発中性子による核分裂も考慮可能な多領域積分型動特性解析コード MIK2.0-MVP を開発し、予備検証として GODIVA 炉超臨界実験の再現解析を実施した。この結果より、MIK2.0-MVP コードでは、MIK1.0 コードが有する計算機能に加えて、遅発中性子による核分裂の効果を考慮することができるようになり、MIK2.0-MVP コードと粒子法コードの弱連成解析の土台となる新たな機能を確立することができた。以上の活動により本研究の令和4年度の目的を達成することができた。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、東京工業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

Fuel Debris Criticality Analysis Technology Using Non-contact Measurement Method
(Contract Research)

— FY2022 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

Tokyo Institute of Technology

(Received March 19, 2024)

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 FY2022.

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 FY2021, this report summarizes the research results of the “Fuel debris criticality analysis technology using non-contact measurement method” conducted in FY2022.

The purpose of research was to improve the fuel debris criticality analysis technology using non-contact measurement method by the development of the fuel debris criticality characteristics measurement system and the multi-region integral kinetic analysis code. It was performed by Tokyo Institute of Technology, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, and Nagaoka University of Technology as the second year of three years research project. The accuracy of the analysis was improved by evaluating the validity and uncertainty of the neutron transport calculation code using data obtained from new experiments for the optimization of the detector design. A parametric survey using the transport calculation based on these data was used to design the detector system by optimizing the detector configuration. The multi-region integral kinetic analysis code MIK2.0-MVP, which can also take into account fission by delayed neutrons, was developed and an analysis of the GODIVA reactor supercriticality experiment was carried out as a preliminary validation. The results show that the MIK2.0-MVP code is able to take into account the effects of fission due to delayed neutrons. By the activities, the purpose of the research of the year was achieved.

Keywords: Fuel Debris, Criticality Safety, Non-contact Measurement, Kinetic Analysis Numerical Simulation, International Collaboration

This work was performed by Tokyo Institute of Technology 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
5. 令和 3 年度 採択課題	10
6. 令和 4 年度 採択課題	12
付録 成果報告書	15

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
5. Accepted Proposal in FY2021.....	10
6. Accepted Proposal in FY2022.....	12
Appendix Result Report	15

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 (~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 (~R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 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
α / β / γ 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
β 、 γ 、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

5. 令和3年度 採択課題

令和3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3年3月16日～令和3年5月17日（課題解決型）
 令和3年4月13日～令和3年7月1日（国際協力型 日英共同研究）
 令和3年7月12日～令和3年8月18日（国際協力型 日露共同研究）

課題数：12 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）、2 課題（日露）

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・日露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）会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和3年度 採択課題一覧

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
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学
燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブリの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性データベースの高度化	宇埜 正美	福井大学
ジオポリマー等による PCV 下部の止水・補修及び安定化に関する研究	鈴木 俊一	東京大学
世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの性状把握分析手法の確立	坂本 哲夫	工学院大学
アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分析法の高度化	豊嶋 厚史	大阪大学

課題名	研究代表者	所属機関
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究	人見 啓太郎	東北大学
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニタリング手法の開発	安原 亮	自然科学研究機構
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価	中瀬 正彦	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
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性エアロゾル制御及び除染に関する研究	Erkan Nejdet (~R4. 1. 31) 三輪 修一郎 (R4. 2. 1~)	東京大学
燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御	浅間 一	東京大学

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
福島第一発電所 2、3 号機の事故進展シナリオに基づく FP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状況・デブリ性状の把握	小林 能直	東京工業大学
非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化	小原 徹	東京工業大学

6. 令和4年度 採択課題

令和4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4年3月1日～令和4年5月6日（課題解決型）

令和4年4月7日～令和4年6月16日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：8 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）

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）会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和4年度 採択課題一覧

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
革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニタの実用化とその応用	黒澤 俊介	東北大学
3次元線量拡散予測法の確立と γ 線透過率差を利用した構造体内調査法の開発	谷森 達	京都大学
α 汚染可視化ハンドフットクロスモニタの要素技術開発	樋口 幹雄	北海道大学
高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発	奥野 泰希	京都大学
障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発	新井 宏之	横浜国立大学

課題名	研究代表者	所属機関
無線 UWB とカメラ画像分析を組合せたリアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価	松下 光次郎	岐阜大学

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
耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発	渡邊 実	岡山大学
マイクロ・ナノテクノロジーを利用したアルファ微粒子の溶解・凝集分散に及ぼすナノ界面現象の探求	塚原 剛彦	東京工業大学

本報告書は、以下の課題の令和4年度分の研究成果について取りまとめたものである。

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
非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化	小原 徹	東京工業大学

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 4 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

非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化

(契約番号 R04I037-2)

成果報告書

令和 5 年 3 月

国立大学法人 東京工業大学

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、国立大学法人東京工業大学が実施した「非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化」の令和4年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略	vi
1. はじめに	1-1
1.1 研究目的	1-1
1.2 研究概要	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 実施体制	2-3
2.3 令和4年度の成果の目標及び業務の実施方法	2-4
2.3.1 燃料デブリの臨界特性測定システムの開発	2-4
2.3.2 燃料デブリの臨界特性測定システムの性能試験【再委託先：産総研】	2-4
2.3.3 燃料デブリ弱結合炉体系臨界影響解析手法の高度化【再委託先：長岡技科大】	2-4
2.3.4 研究推進	2-5
3. 実施内容及び成果	3-1
3.1 燃料デブリの臨界特性測定システムの開発（令和3年度～令和4年度）	3-1
3.1.1 検出器の設計（令和3年度～令和4年度）	3-1
3.1.2 まとめ	3-6
3.2 燃料デブリの臨界特性測定システムの性能試験（令和3年度～令和4年度）	
【再委託先：産総研】	3-7
3.2.1 検出器の基礎実験（令和3年度～令和4年度）	3-7
3.2.2 まとめ	3-11
3.3 燃料デブリ弱結合炉体系臨界影響解析手法の高度化（令和3年度～令和4年度）	
【再委託先：長岡技科大】	3-12
3.3.1 開発環境構築（令和3年度）	3-12
3.3.2 開発・予備検証（令和4年度）	3-12
3.3.3 まとめ	3-13
3.4 研究推進（令和3年度～令和4年度）	3-14
4. 結言	4-1
参考文献	5-1

執筆者リスト

研究代表者

国立大学法人東京工業大学

教授
助教

小原 徹
西山 潤

再委託先

国立大学法人長岡技術科学大学

准教授

竹澤 宏樹

国立研究開発法人産業技術総合研究所

グループリーダー

原野 英樹

表一覧

表 3.1-1	C-nat に対する評価済み核データライブラリの熱中性子捕獲断面積	....	3-2
表 3.2-1	基礎実験の実施体系一覧	....	3-8
表 3.3-1	MIK2.0-MVP コード予備検証の計算条件	....	3-13

図一覧

図 2. 2-1	実施体制	....	2-3
図 3. 1-1	臨界特性測定システムの概要図	....	3-1
図 3. 1-2	ポリエチレン減速材体系における中性子束分布測定実験計算体系	....	3-2
図 3. 1-3	ポリエチレン減速材体系における金線飽和放射能計算と実験値	....	3-3
図 3. 1-4	水減速体系における信号時間間隔分布の実験値（左）と計算値（右）	....	3-3
図 3. 1-5	ポリエチレン層の厚さによる直管 ^3He 比例計数管の検出効率	....	3-5
図 3. 1-6	直管 ^3He 比例計数管の円環ポリエチレンにおける挿入位置に対する検出効率	....	3-5
図 3. 1-7	燃料デブリ量に対する各 ^3He 比例計数管の検出効率の変化	....	3-6
図 3. 1-8	水分量に対する各 ^3He 比例計数管の検出効率の変化	....	3-6
図 3. 2-1	黒鉛減速体系（体系 1）の測定概要	....	3-8
図 3. 2-2	軽水減速体系（体系 2）の測定実施風景	....	3-9
図 3. 2-3	導入した MCA4A と PC	....	3-9
図 3. 2-4	同時計数測定の測定システム画面	....	3-10
図 3. 2-5	リストモードの解析結果	....	3-10
図 3. 2-6	ポリエチレン減速体系（体系 3）の測定実施の様子	....	3-10
図 3. 2-7	ボナー球測定体系（体系 4）の測定実施の様子	....	3-11
図 3. 3-1	MIK2. 0-MVP コードの概要	....	3-12
図 3. 3-2	MIK2. 0-MVP コード予備検証の計算結果の例	....	3-13

略語一覧

JAEA	: Japan Atomic Energy Agency	(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science	(廃炉環境国際共同研究センター)
東電	: 東京電力ホールディングス株式会社	
1F	: 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所	
AWCC	: Active Well Coincidence Counter	(アクティブ井戸型同時計数装置)

概略

燃料デブリ取出し作業を安全かつ効率的に行うためには、事前情報が限られる取出し直後の燃料デブリについて、1次スクリーニングにより臨界安全上のリスクを迅速に測定・評価することで燃料デブリの仕分けと核分裂性物質の計量を行う必要がある。また、臨界が発生した場合の影響評価のため、燃料デブリ取出し作業の影響（振動、水流、落下など）によって燃料デブリ粒子が水中を移動する可能性も考慮した核的な結合炉体系について、適切な対策を検討・実装しておくことが望まれている。

本研究は、非接触のアクティブ中性子法により燃料デブリの臨界安全上の特性を評価する測定システムの開発と、燃料デブリ取出し作業員の安全確保方策の確立に資する基盤技術として多領域積分型動特性解析コードの開発により燃料デブリ臨界解析技術を高度化することを目的とする。令和3年度から令和5年度の3年計画の2年目として国立大学法人東京工業大学（以下、「東京工業大学」という。）、国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、「産総研」という。）、国立大学法人長岡技術科学大学（以下、「長岡技科大」という。）が連携して実施した。開発する臨界特性測定システムは、アクティブ中性子法を用いて、誘導核分裂中性子と減速・熱化中性子を同時に測定することにより、核分裂性ウラン、プルトニウム、含有水素量を定量化し、燃料デブリの臨界安全上の特性を評価する。検出器は中性子源、中性子検出器、減速材、遮蔽体を適切に配置する必要があり、モンテカルロ中性子輸送計算でシステム性能の確認と設計の最適化を行う。多領域積分型動特性解析コードの開発については、燃料デブリの動きを含む燃料デブリ弱結合炉体系の臨界影響評価を行えるようにするため、東京工業大学が独自に開発した弱結合炉体系にも適用可能な空間依存動特性解析コードである多領域積分型動特性解析コード (Multi-region Integral Kinetic code) MIK2.0 と、日本で開発された汎用連続エネルギー中性子輸送モンテカルロ計算コード (Monte Carlo code for Vector Processors version 3) MVP-3 を結合した MIK2.0-MVP コードを開発する。多様な臨界シナリオに対応するため、「燃料デブリの移動」と「燃料デブリ弱結合炉体系」の組合せに加えて、燃料デブリ取出し作業中に想定される状況を考慮して、水中を落下する燃料デブリ多粒子体系と底部に存在する塊状燃料デブリベッドからなる燃料デブリ弱結合炉体系の遅発超臨界を臨界シナリオとして想定し、MIK2.0-MVP コードと MPS (Moving Particle Simulation) 計算コードから得られる結果を結合させた MIK2.0-MVP/MPS 弱連成解析を行う。

令和4年度は、東京工業大学では令和3年度に収集・整理した産総研が保有する中性子減速場における中性子測定実験のデータ、加えて検出器設計最適化のために新たに基礎実験を行って取得したデータを用いて、中性子輸送計算コードの妥当性及び不確かさを評価することで解析精度の向上を図った。この基礎データを基にした輸送計算コードを用いたパラメトリックサーベイにより、検出器の配置や³He ガス圧、減速材、遮蔽材、中性子源配置の最適化を実施することにより検出器を設計した。

産総研では、基礎実験として減速材（ポリエチレン、軽水、黒鉛）と中性子源（²⁵²Cf 線源、²⁴¹AmBe 線源、加速器線源）の組合せからなる体系において、金箔・金ワイヤーを用いた放射化法による中性子束分布の詳細測定、³He 比例計数管を用いた同時計数実験を実施した。この実験により、減速材体系における中性子源の中性子エネルギー依存性、減速時間や中性子透過の減速材厚さ依存性を検証するための比較用実験データを取得した。同時計数測定システムの動作検証を行い、正常に動作することを確認した。

長岡技科大では、遅発中性子による核分裂も考慮可能な多領域積分型動特性解析コード MIK2.0-MVP を開発し、予備検証として GODIVA 炉超臨界実験の再現解析を実施した。この結果

より、MIK2.0-MVP コードでは、MIK1.0 コードが有する計算機能に加えて、遅発中性子による核分裂の効果を考慮することができるようになったことを確認した。令和4年度の検討を通じて、MIK2.0-MVP コードと粒子法コードの弱連成解析の土台となる新たな機能を確立することができた。

前年度までの成果報告書：

非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化（委託研究）；令和3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 2022-043

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2022-043>

1. はじめに

1.1 研究目的

燃料デブリは、その溶融過程で炉内構造材などと混合または付着しており、その形状及び組成が多岐にわたっている。詳細な情報が不明な取出し直後の燃料デブリを、核分裂性物質の有無やその臨界安全上のリスクに応じて迅速にスクリーニングすることが可能になれば、燃料取出し作業を安全かつ効率的に行うことができる。ウラン・プルトニウムの非破壊による計量方法には、中性子照射によって誘導核分裂中性子を測定するアクティブ中性子法や自発核分裂などによって発生する中性子を利用するパッシブ中性子法、ガンマ線を測定する方法などがある。また、中性子源として加速器を使用する方法も提案されている。しかしながら、格納容器内は大量の放射性核分裂性物質によって汚染され、高線量ガンマ線環境であり、アクセスなどが限られた条件にある。また、燃料デブリは、多孔質化し、冷却水を含有したり、コンクリートと混合することで水素を含んだりしているため、中性子法を適用する場合、中性子の減速によってより多くの核分裂反応が誘導される。したがって、含まれる水素量も併せて推定することがこのような条件下での核分裂性核種の定量精度に重要となる。水素含有については、中性子源を用いて、熱化した中性子を計数することによって水分量を測定する中性子水分計が鉄鋼業や土木工事の分野において利用されている。ウラン計量、水分計の測定はともに中性子を計数する技術が基になっており、この機能を1つの測定システムに統合できれば、スクリーニングを効率的に行うことができる。

燃料デブリ取出し時等に万が一臨界事故が発生した場合の影響について評価し、適切な対策を検討・実装しておくことが望まれている。万が一臨界が発生した場合に安全を確保するために、臨界発生時の挙動評価を通じた作業員の安全確保対策の確立が望まれている。しかし現状では、燃料デブリ取出し時等における臨界を未然に防ぐための臨界監視や臨界管理のためのシステム構築が進められているが、臨界が発生した場合の影響の見積もりや具体的な対策の検討は十分に進んでいない。このため、臨界が発生した場合の構造物や作業員への影響評価や、その評価結果に基づいた合理的な安全を確保するための考え方や具体的な対策検討が課題と考えられている。燃料デブリ取出し時の臨界影響評価にあたっては、損傷した原子炉圧力容器内の燃料デブリは、核的な結合炉体系となっている可能性も考慮する必要がある。例えば、再凝固した塊状燃料デブリベッド内では、セラミックス層（増倍系）が金属層（非増倍系）で分離されている可能性がある。塊状燃料デブリベッドの上に空隙を保ちながら堆積する燃料デブリ多粒子体系は、空隙が冷却水で満たされると、高速中性子スペクトル体系（下部）と熱中性子スペクトル体系（上部）からなる結合炉体系と見なすことができる。さらに、燃料デブリ粒子は、燃料デブリ取出し作業の影響（振動、水流、落下など）によって水中を移動する可能性も考慮する必要がある。

このような背景の下、本研究は、非接触のアクティブ中性子法により核分裂性ウラン、プルトニウム、含有水素量を定量化し、燃料デブリの臨界安全上の特性を評価することができる測定システムを開発し、同時に燃料デブリ取出し作業員の安全確保方策の確立に貢献する基盤技術として多領域積分型動特性解析コードを開発し、燃料デブリの動きを含む燃料デブリ弱結合炉体系の臨界影響評価を実施できるようにすることを目的とする。

1.2 研究概要

本研究は、臨界特性測定システムと多領域積分型動特性解析コードの開発を行う。

燃料デブリの臨界特性測定システムについては、東京工業大学、産総研が連携して研究開発を実施する。開発する測定システムは、アクティブ中性子法を用いて、誘導核分裂中性子と減速・熱化中性子を同時に測定する検出器を設計する。検出器は中性子源、中性子検出器、減速材、遮蔽体を適切に配置する必要があり、モンテカルロ計算ベースで性能の確認と設計の最適化を行う。最適化にあたっては計算コード及び核データの妥当性を検証するために、新たに取得する実験データとの比較を行う。設計した検出器について、測定結果から核分裂性核種の量、水素含有用への換算するための手法について、計算ベースで検証を行う。最終的に開発した検出システムについて、検出限界や測定時間、精度、ガンマ線バックグラウンド下での影響などシステムの性能について比較を行う。

多領域積分型動特性解析コードの開発については、燃料デブリの動きを含む燃料デブリ弱結合炉体系の臨界影響評価を行えるようにするため、東京工業大学が独自に開発している弱結合炉体系にも適用可能な空間依存動特性解析コードである多領域積分型動特性解析コード MIK2.0 と、日本で開発された汎用連続エネルギー中性子輸送モンテカルロ計算コード MVP-3 を結合した MIK2.0-MVP コードを開発する。多様な臨界シナリオに対応するため、「燃料デブリの移動」と「燃料デブリ弱結合炉体系」の組合せに加えて、燃料デブリ取出し作業中に想定される状況を考慮して、水中を落下する燃料デブリ多粒子体系と底部に存在する塊状燃料デブリベッドからなる燃料デブリ弱結合炉体系の遅発超臨界を臨界シナリオとして想定する。この臨界シナリオに対して MIK2.0-MVP コードと MPS 計算コードから得られる結果を結合させた MIK2.0-MVP/MPS 弱連成解析を行う。MIK2.0-MVP コードの検証には、結合炉体系における超臨界/パルス中性子源実験の出力動特性データが不可欠である。そこで MIK2.0-MVP コードの開発では、(1) 結合炉超臨界/パルス中性子源実験データの詳細調査、(2) MIK2.0-MVP コードの開発（コーディング）と (3) 結合炉超臨界/パルス中性子源実験データを用いた MIK2.0-MVP コードの予備検証、(4) MIK2.0-MVP/MPS 弱連成解析を実施する。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本研究は、臨界特性測定システムと多領域積分型動特性解析コードの開発にあたり、東京工業大学、産総研、長岡技科大が連携して実施する。本研究の目的達成のための実施項目は下記の3項目である。

- (1) 燃料デブリの臨界特性測定システムの開発
- (2) 燃料デブリの臨界特性測定システムの性能試験
- (3) 燃料デブリ弱結合炉体系臨界影響解析手法の高度化

臨界特性測定システムは、非接触のアクティブ中性子法による誘導核分裂中性子と含有水素による熱化中性子を同時に測定することにより核分裂性ウラン、プルトニウム、含有水素量を定量化し、燃料デブリの臨界安全上の特性を評価することができる測定システムを開発する。この測定システムの開発では、検出器の設計、最適化、性能評価について中性子輸送計算を基に数値解析によって行う「(1) 燃料デブリの臨界特性測定システムの開発」と、検出器の設計に必要な中性子計測の基礎データの取得や製作した測定システムの試験を行う「(2) 燃料デブリの臨界特性測定システムの性能試験」により実施する。

「(1) 燃料デブリの臨界特性測定システムの開発」では、①検出器の設計、②補正・換算係数の評価、③性能評価の段階で研究を進める。①検出器の設計では、検出器システムの検出効率と計量精度の向上のため、中性子源と検出器、減速材と遮蔽材の配置について、モンテカルロ計算により最適化を行う。計算コード及び核データの妥当性検証には、(2)-①の基礎実験において新たに取得する実験データを用いて比較・検討する。計算結果と実験データの比較を行い、解析精度の評価を行う。評価済み核データライブラリ間の比較や熱中性子散乱則の評価を行い、解析精度の向上を図る。精度の向上、評価を行った解析コードを用いて、臨界特性測定システム用の検出器の設計を行う。検出器は中性子源 ($^{241}\text{AmBe}$ 中性子源、 ^{252}Cf 中性子源)、中性子検出器 (^3He 比例計数管)、減速材 (ポリエチレン、黒鉛、軽水) と遮蔽材 (鉛、鉄、ホウ素入りポリエチレンなど) を組み合わせたものになる。誘導核分裂中性子の高効率測定と含有水素による減速中性子の分離測定を両立させる減速材の大きさや検出器の配置を計算によって最適化させる。②補正・換算係数の評価では、開発した検出器を用いて得られた測定データから核分裂性ウラン、プルトニウムの計量、水素含有量、臨界安全上の特性を導出するための手法を検討・評価する。燃料デブリに関する取得可能なデータと測定データを基にする入力群に対して、核分裂性ウラン、プルトニウム (^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu) 量、水素含有量 (H/U)、燃料デブリの無限増倍率 (k_{∞}) を出力とするための補正・換算係数を計算により導出する。様々な形状、組成、水素含有量の燃料デブリに対して計算を行い、測定値との相関を評価する。導出手法としては機械学習の適用も行い、最適な方法を検討・評価する。③性能評価では、開発した検出器と核分裂性ウラン、プルトニウムの計量、水素含有量、臨界安全上の特性を導出するための手法を組み合わせた検出システムについて、産総研が担当する(1)-③の性能試験結果を用いて核分裂性核種の検出限界、精度、適応可能な燃料デブリ形状や測定時間などの性能を評価する。

「(2) 燃料デブリの臨界特性測定システムの性能試験」では、①検出器の基礎実験、②検出器の実証実験、③検出システムの性能評価試験の段階で研究を進める。①検出器の基礎実験では、測定システムを開発するにあたって、計算コードと核データの検証用に必要となる実験データの収集と整理を行う。対象となる実験データはポリエチレン、黒鉛、軽水などの減速材と ^3He 比例計数管を用いた実験である。収集・整理した実験データは東京工業大学が担当する(1)-

①検出器の設計において利用する。計算の高精度化には、比較対象となる実験の高精度化が必要になる。減速体系における中性子束の絶対測定には金の放射化法が用いられる。放射化金試料から放出されるガンマ線の井戸型 NaI (Tl) シンチレーション検出器での検出効率を高精度で校正する。また、アクティブ中性子法で使用する中性子源 (^{252}Cf 中性子源) について、中性子放出率を高精度で校正する。検出器の設計の最適化 (東京工業大学担当 (1)-①) のため、減速材厚さに対する熱中性子束、検出効率に関する実験を実施する。放出中性子エネルギーが異なる中性子源 ($^{241}\text{AmBe}$ 線源、 ^{252}Cf 線源、加速器線源) について減速材中の熱中性子束分布を金の放射化、 ^3He 比例計数管での測定で行う。測定データは計算結果との比較・検証に使用する。誘導核分裂中性子の同時計数を検証するための実験を実施する。誘導核分裂で発生する中性子は、減速材で減速して、主に熱中性子になってから ^3He 比例計数管で (n, p) 反応により検出される。減速時間が同時計数の精度に影響するため、計算の検証用に実験を実施する。異なる減速材、異なる体系の大きさでゲート時間を変えた実験を行うことで、計算によって減速時間が精度良く計算できているかの比較用実験データを取得する。②検出器の実証実験では、熱中性子の国家標準場において、購入した ^3He 検出器の検出効率を高精度で校正する。開発した検出器に対して、誘導核分裂中性子を模擬した ^{252}Cf 自発核分裂から発生する中性子の測定を行う。測定は同時測定で行い、同時計数の検出効率を導出する。③検出システムの性能評価試験では、水素含有した模擬燃料デブリを用いた性能試験を実施し、性能評価のための基礎データを取得する。水素含有物として、ポリエチレン、コンクリート、軽水などを組み合わせて開発した検出器を使用して、測定を実施し、核分裂性ウラン量、水素含有量の導出方法が適用可能か検証する。

多領域積分型動特性解析コードの開発のため、「(3) 燃料デブリ弱結合炉体系臨界影響解析手法の高度化」を実施する。この研究は、①開発環境構築、②開発・予備検証、③臨界影響解析の3段階で実施する。①開発環境構築では、MIK2.0-MVP コードの開発専用メニーコアマルチノード並列計算・データサーバーを導入する。導入したサーバーにおいて、既存の MIK2.0 コードと MVP コードの動作確認を行う。また、結合炉超臨界/パルス中性子源実験データの詳細調査を実施する。MIK2.0-MVP コードの開発には、計算ジョブ予約の必要性やユーザー使用状況 (繁忙期など) の影響があるクラウドサーバーではなく、トライアンドエラーに不可欠な即時応答性を確保できる開発専用のサーバーが必要となる。また、MIK2.0 コードは遅発中性子に関連した積分型動特性パラメータを、中性子輸送モンテカルロ計算を繰り返すことによって計算するため、中性子輸送モンテカルロ計算から得られる膨大な核分裂中性子のデータを保持・直接編集が可能なデータサーバー機能を兼ね備えた大規模な並列計算サーバーが必要となる。このような背景から、令和3年度は MIK2.0-MVP コード開発専用のメニーコアマルチノード並列計算・データサーバーを導入する。導入したサーバーにおいて、既存の MIK2.0 コードと MVP コードをインストールし、両コードの動作確認を行う。結合炉超臨界/パルス中性子源実験データの詳細調査では、実験に用いられた結合炉体系の仕様、反応度投入条件、出力動特性データなどを可能な限り明らかにし、令和5年度に実施する MIK2.0-MVP コードの検証に用いる代表的な解析条件を決定する。②開発・予備検証では、MIK2.0-MVP コードの開発と予備検証を実施する。MIK2.0-MVP コードの開発では、MIK2.0 コードが必要とする積分型動特性パラメータを計算できるように、汎用連続エネルギー中性子輸送モンテカルロ計算コード MVP のソースプログラムを改造する。予備検証では、米国ロスアラモス国立研究所で実施された GODIVA 炉超臨界実験の出力動特性データを、MIK2.0-MVP コードを用いて再現解析する。再現解析では、東京工業大学で実施された MIK1.0 コードによる GODIVA 炉超臨界実験再現解析の知見を参考とする。③臨界影響解析では、燃料デブリの動きに対応できるように MIK2.0-MVP コードを改良し、MIK2.0-MVP/MPS 弱連成計算の動作確認を実施する。MIK2.0-MVP コードの改良では、燃料デブ

りの動きに関わるタームを MIK2.0 コードの積分型動特性計算モジュールに組み込む。また、令和5年度に実施する MIK2.0-MVP コードの検証から得られる知見を MIK2.0-MVP コードの改良作業にフィードバックする。MIK2.0-MVP/MPS 弱連成計算の動作確認では、水中を落下する燃料デブリ多粒子体系の既存の MPS 計算結果をインプットとして用いて、フィードバック効果を考慮せずに改良版 MIK2.0-MVP コードの動作確認を行う。ここでは、クラウドサーバーを用いた動作確認も行う。

2.2 実施体制

実施体制を図 2.2-1 に示す。

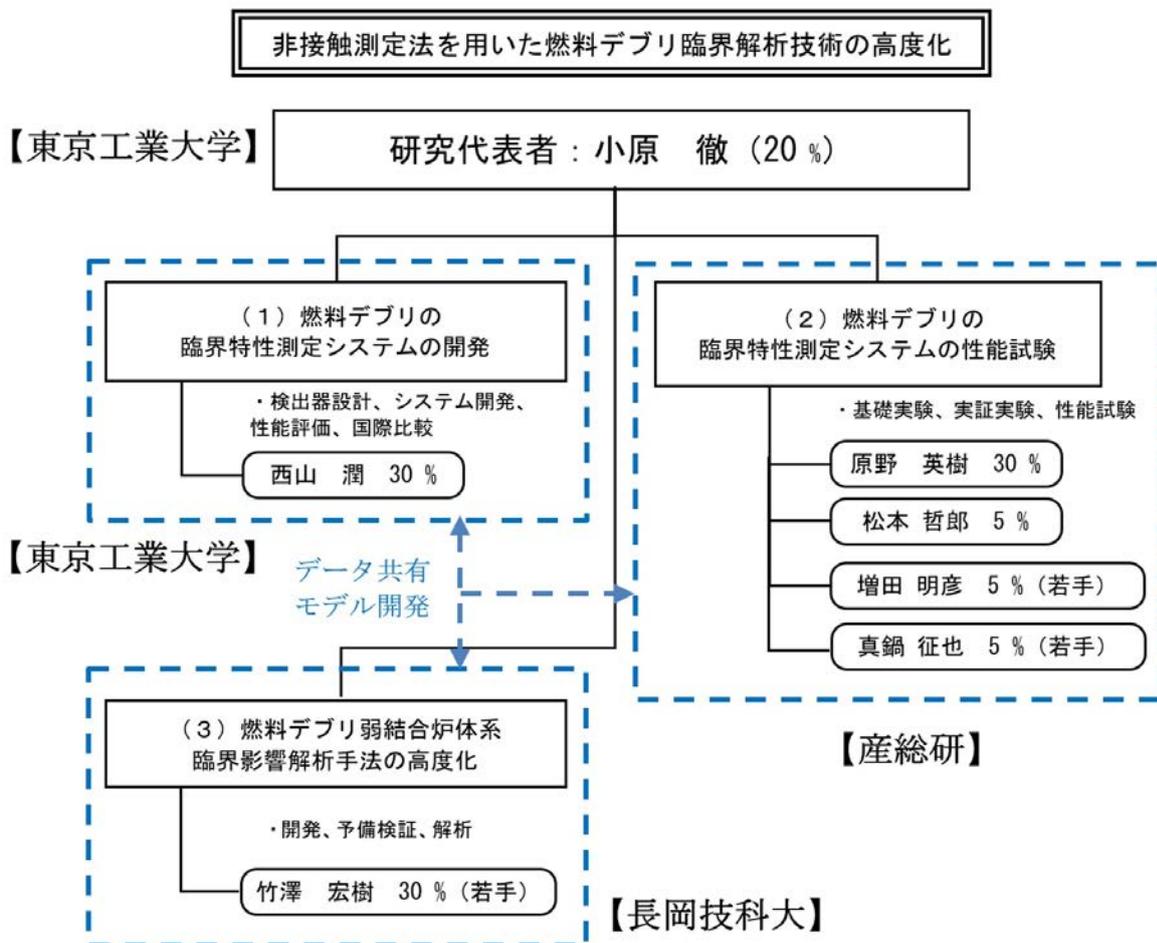


図 2.2-1 実施体制

2.3 令和4年度の成果の目標及び業務の実施方法

2.3.1 燃料デブリの臨界特性測定システムの開発

(1) 検出器の設計

非接触のアクティブ中性子法による誘導核分裂中性子と含有水素による熱化中性子を同時に測定することにより核分裂性ウラン、プルトニウム、含有水素量を定量化し、燃料デブリの臨界安全上の特性を評価することができる測定システムを開発するにあたって、令和3年度に引き続き、計算コードと核データライブラリの検証を行う。モンテカルロ中性子輸送計算コードとしてMCNP6.2[1]、PHITS3[2]、MVP-3[3]、Serpent2[4]の4コードと評価済み核データライブラリとしてJENDL-4.0[5]、ENDF/B-VII.1[6]、ENDF/B-VIII[7]、JEFF-3.3[8]を比較対象とする。また、令和3年度に収集・整理した産総研が保有する中性子減速場における中性子測定実験のデータ、既存のAWCCの測定データ、加えて検出器設計最適化のために新たに基礎実験を行って取得するデータを用いて、中性子輸送計算コードの妥当性及び不確かさを評価することで解析精度の向上を図る。この基礎データを基に、検出器の配置や ^3He ガス圧、減速材、遮蔽材、中性子源配置の最適化を輸送計算コードを用いたパラメトリックサーベイによって実施することにより検出器を設計する。

2.3.2 燃料デブリの臨界特性測定システムの性能試験【再委託先：産総研】

(1) 検出器の基礎実験

非接触のアクティブ中性子法による誘導核分裂中性子と含有水素による熱化中性子を同時に測定することにより核分裂性ウラン、プルトニウム、含有水素量を定量化し、燃料デブリの臨界安全上の特性を評価することができる測定システムを開発するにあたって、検出器の設計最適化に必要な基礎実験を実施する。収集・整理した実験データは東京工業大学が担当する検出器の設計において利用する。基礎実験として、減速材（ポリエチレン、軽水、黒鉛）と中性子源（ ^{252}Cf 線源、 $^{241}\text{AmBe}$ 線源、加速器線源）の組合せからなる体系において、金箔・金ワイヤーを用いた放射化法による中性子束分布の詳細測定、 ^3He 比例計数管を用いた同時計数実験を行う。この実験により、減速材体系における中性子源の中性子エネルギー依存性、減速時間や中性子透過の減速材厚さ依存性を高精度で検証するための比較用実験データを取得する。また、同時計数実験では同時計数測定システムの動作検証も併せて実施する。

2.3.3 燃料デブリ弱結合炉体系臨界影響解析手法の高度化【再委託先：長岡技科大】

(1) 開発・予備検証

MIK2.0-MVPコードの開発と予備検証を実施する。MIK2.0-MVPコードの開発では、MIK2.0コードが必要とする積分型動特性パラメータを計算できるように、汎用連続エネルギー中性子輸送モンテカルロ計算コードMVPのソースプログラムを改造する。予備検証では、米国ロスアラモス国立研究所で実施されたGODIVA炉超臨界実験の出力動特性データを、MIK2.0-MVPコードを用いて再現解析する。再現解析では、東京工業大学で実施されたMIK1.0コードによるGODIVA炉超臨界実験再現解析の知見を参考とする。

2.3.4 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター（以下、CLADSという。）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。

3. 実施内容及び成果

3.1 燃料デブリの臨界特性測定システムの開発（令和3年度～令和4年度）

3.1.1 検出器の設計（令和3年度～令和4年度）

(1) 令和3年度の概要

臨界特性測定システムの開発における検出器の設計、最適化、性能評価に必要となるモンテカルロ中性子輸送計算の解析環境を整備した。予備解析として、ポリエチレン減速材と³He 比例計数管の組合せによる中性子計数体系に対する解析を実施し、計算コードと核データライブラリの検証を行った。産総研が保有する中性子減速場における中性子測定実験のデータ、既存 AWCC の測定データを収集・整理し、計算結果との比較用のデータを準備した。これらのデータは、令和4年度に測定するデータを加えて、数値解析精度の確認及び高度化に利用される。

(2) 令和4年度の実施内容

① 臨界特性測定システムの概要

臨界特性測定システムは²⁴¹AmBe 外部中性子源、2種類（球形、直管それぞれ2台）の³He 比例計数管、減速材、遮蔽材で構成される。図 3.1-1 に基本的な配置を示す。検出器システムは熱中性子遮蔽材で分けられた内側と外側の円環にそれぞれ球形と直管の³He 比例計数管が2台ずつ配置される。²⁴¹AmBe 線源から放出された中性子がサンプル内で直接または減速され、ウランなどの核分裂性核種が存在すれば誘導核分裂を起こす。発生した誘導核分裂中性子を主に外側の2台の検出器で測定する。外側の直管³He 比例計数管は核分裂反応で発生した高速中性子が取り囲むポリエチレンで減速され、熱中性子となって計測される。外側と内側の間には B₄C シートにより熱中性子を遮蔽する。これにより外側のポリエチレンで減速された熱中性子が内側の球形³He 比例計数管で計数されるのを防ぐ。内側の球形³He 比例計数はポリエチレン減速材で囲われたものと減速材がない裸の検出器の2種類がある。ポリエチレン減速材付きの検出器は高速中性子がこのポリエチレンで減速され、熱中性子となって検出されることで高エネルギー中性子に対しても感度がある検出器となる。一方、裸の球形³He 比例計数管は熱中性子に対しては感度があるが、高エネルギーに対しては感度が小さい検出器となる。燃料デブリ中に含まれる水分の量に応じて内側での熱中性子量が変化するため、この中性子エネルギー感度特性が異なる検出器を使用することで、燃料デブリ中に含まれる水分量を推定する。

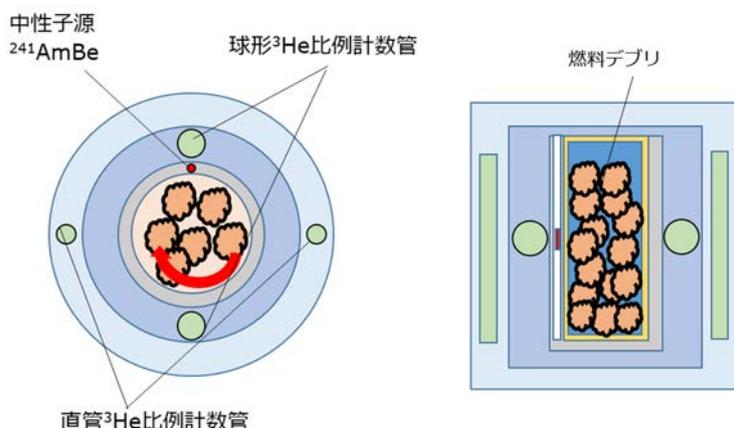


図 3.1-1 臨界特性測定システムの概要図

② 計算コードと核データライブラリの検証

臨界特性測定システムの検出下限値や精度は、使用する ^3He 比例計数管の中性子検出効率、ポリエチレン減速材や燃料デブリに含まれる水分での減速による検出効率への影響が重要となる。 ^3He 比例計数管の熱中性子に対する検出効率は、産総研の黒鉛パイルと $^{241}\text{AmBe}$ 線源を用いた熱中性子国家標準場において校正する。そのため、減速材として、黒鉛、ポリエチレン、軽水に対する計算における精度が重要となる。令和3年度に引き続き、各減速体系に対する計算コード (PHITS3、MVP-3、Serpent2、MCNP6.2) と評価済み核データライブラリ (JENDL、ENDF/B、JEFF) の比較検討を行った。その結果、計算コード間には大きな差はなかったが、核データに起因する一部の減速材体系において1%を超える差があった。1つは黒鉛パイル減速体系材体系(3.2節で説明)における計算で、ENDF/B-VII.0を使用した場合、他のライブラリと比較して最大で10%弱過大な値となった。これは黒鉛の熱中性子吸収断面積が他のライブラリと異なっているためである。表3.1-1に、天然同位体存在比の炭素(以下、「C-nat」という。)に対する各評価済み核データライブラリの熱中性子 ($E = 0.0253 \text{ eV}$) の捕獲断面積を示す。ENDF/B-VII.0はJENDL-4.0と比較して熱中性子捕獲断面積が10%以上小さい値となっている。この値は過去の実験と比べても小さい値である。ただし、ENDF/B-VII.1以降は値が修正されている。もう1つの異なる例は、ポリエチレン減速体系における熱中性子散乱則である。図3.1-2に、ポリエチレン減速材体系における中性子束分布測定実験(3.2節で説明)の計算体系を示す。また、図3.1-3に金線の飽和放射能の計算値と実験値を示す。計算はPHITSを用いて行い、核データライブラリとしてJENDL-4.0、JENDL-5.0、ENDF/B-VIII.0の結果を示す。おおむね熱中性子束分布の形状を再現しているが計算精度としては最大10%程度実験値との差がある。線源に近い位置での差が大きく、線源と金線の設置精度が影響していると考えられる。また、核データライブラリ間の比較ではJENDL-5.0とENDF/B-VIII.0の計算値がJENDL-4.0と比較して1%小さな値となっている。これはJENDL-5.0とENDF/B-VIII.0からポリエチレン中の水素に対する熱中性子散乱則の評価が更新されたためと考えられる。

表 3.1-1 C-nat に対する評価済み核データライブラリの熱中性子捕獲断面積

評価済み核データライブラリ	捕獲断面積(MT = 102) [mb]	JENDL-4.0 との相対値
JENDL-4.0	3.86139	-
ENDF/B-VII.0	3.36822	0.8722
ENDF/B-VII.1	3.86139	1.0000
ENDF/B-VIII.0 (C-12)	3.862	1.0002
JEFF3.3	3.81622	0.9883

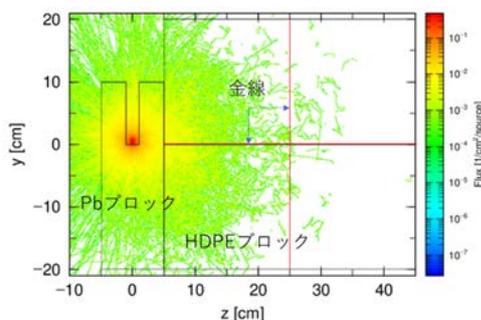


図 3.1-2 ポリエチレン減速材体系における中性子束分布測定実験計算体系

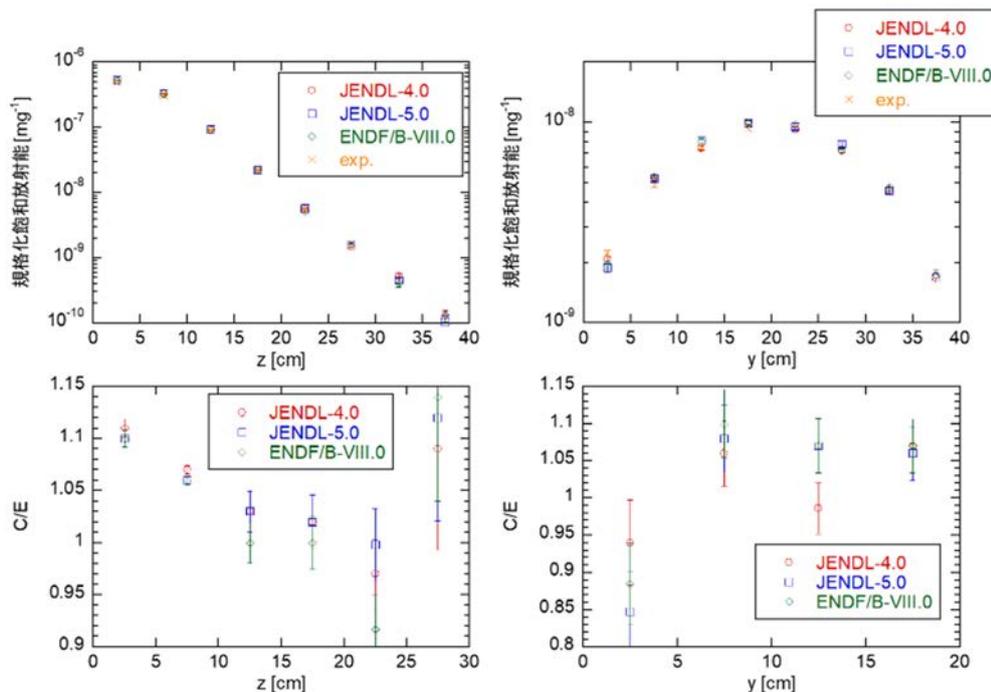


図 3.1-3 ポリエチレン減速材体系における金線飽和放射能計算と実験値

同時計数実験の再現性の確認のため、図 3.2-2 に示す水減速体系 (3.2 節で説明) における実験を計算で再現し、実験との比較を行った。計算は PHITS を用いて行い、各検出器の応答及び反応時間分布を計算する。²⁵²Cf の中性子放出率と多重度から 2 台の球形 ³He 比例計数管の応答を再現するコードを作成し、信号間の時間間隔分布を計算した。信号間の時間間隔分布の実験値と計算値を図 3.1-4 に示す。計算ではポリエチレン密度の実測と調整、熱中性子散乱則の選択によって解析精度の向上を図った。計算値はおおむね実験値の形状を再現する結果が得られている。それぞれの結果は 2 つの指数関数の成分からなり、時間間隔が小さく、急激に減衰する成分が同一核分裂から放出された中性子を検出した事象に対応し、もう一方はランダムに中性子を検出した事象に対応する。同時計数イベントとして、減衰の早い成分を指数フィッティングによって導出した。その全計数に対する同時計数イベントの割合は、実験値 0.61 %、計算値 0.69 % となった。現状では 13 % ほど過大な値となっており、測定システムの高精度化にはさらなる精度向上が必要である。

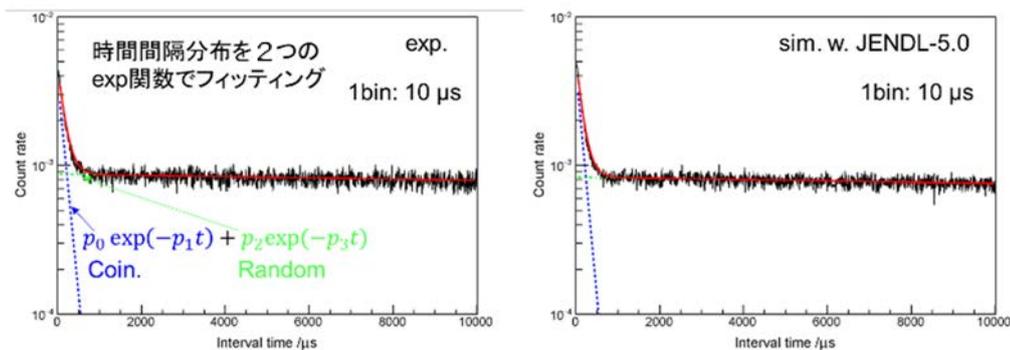


図 3.1-4 水減速体系における信号時間間隔分布の実験値 (左) と計算値 (右)

③ 検出器の最適化

検出器の配置や³He ガス圧、減速材、遮蔽材、中性子源配置について輸送計算コードを用いたパラメトリックサーベイを実施することで最適化し、検出器を設計した。

外側ポリエチレン層の厚さを最適化するために、²⁴¹AmBe 線源と ²⁵²Cf 線源から放出される中性子エネルギースペクトル[9]の中性子源に対する中性子検出効率についてパラメトリックサーベイを行った。既存の AWCC[10]は内径 22 cm 外径 48.3 cm の構造となっているが、今回の設計は、厚さ 1.0 cm の B₄C を遮蔽材としてポリエチレン層の内側に設置した 2 層構造かつ燃料デブリを収納するユニット缶（直径 21 cm×高さ 40 cm）を収納するため、ポリエチレンの内径 40 cm とした。ポリエチレン層の中心に直径 2.54 cm×高さ 40 cm の直管³He 比例計数管を設置して、内側のサンプル挿入領域から均一に発生させたそれぞれの中性子線源に対する検出効率を計算した。検出効率の計算結果を図 3.1-5 に示す。核分裂中性子のエネルギースペクトルを持つ ²⁵²Cf 線源に対する感度は、ポリエチレン厚さが 10 cm の時に最大となった。ポリエチレン層が薄い時は中性子の熱化が不十分かつ中性子の漏れの影響で検出効率が低い。ポリエチレン層が厚くなるにつれ中性子の熱化が十分になり中性子の漏れも小さくなるため、検出効率が大きくなる。さらにポリエチレン層が厚くなると熱中性子の平均自由行程以上になり、遮蔽効果により検出効率が減少する。一方で核分裂中性子より放出中性子エネルギーが高い ²⁴¹AmBe 線源では、検出効率の最大は厚さ 12 cm になる。直管³He 比例計数管は核分裂中性子を計測するための検出器であり、²⁴¹AmBe 線源からの直接線、散乱線はバックグラウンド成分となる。核分裂から発生する中性子の検出効率を最大化し、²⁴¹AmBe 線源からの影響を相対的に低くするためにポリエチレン層の厚さは 10 cm に決定した。

次に直管³He 比例計数管の円環ポリエチレンにおける挿入位置について、パラメトリックサーベイにより検討した。中性子源と検出器の相対位置として、²⁴¹AmBe 線源から測定システム中心方向を 0° とし、45° ごとに検出器を配置して検出効率を計算した。直管³He 比例計数管の挿入位置による ²⁴¹AmBe 線源に対する検出効率を最大値に対する相対値として図 3.1-6 に示す。180° 方向、つまり線源の最も近くに設置した場合が最大となり、90°、270° 方向が最小の検出効率となった。距離的には 0° 方向が線源から離れているが燃料デブリ挿入空間の影響を受け、今回の挿入していない場合では検出効率が高くなった。90°、270° 方向は直接線が SUS 中を通過するため、遮蔽効果で最小となっていると考えられる。このことから直管³He 比例計数管の挿入位置は、バックグラウンド成分の影響を最小化し、燃料デブリの遮蔽効果の影響を受けづらい位置である 90°、270° 方向とした。

決定した減速材厚さ、検出器配置に対して、燃料デブリ量（ウラン含有量）について検証した。計算では MCNP6.2 と ENDF/B-VIII.0 を用いて行い、均質化した燃料デブリ（5 wt% UO₂ と構造材の混合物）を内部に配置した場合の中性子検出効率を導出した。裸の球形³He 比例計数管の³He ガス圧を 2.0 atm、それ以外を 0.2 atm とした。燃料デブリ体積割合に対する各検出器の検出効率を図 3.1-7 に示す。左図に ²⁴¹AmBe 線源からの 1 中性子発生に対する検出効率の絶対値を、右図に燃料デブリ割合 0%、つまり燃料デブリが入っていない時の値に対する相対値を示す。直管³He は燃料デブリ量の増加に従って検出効率が増加することが確認された。内側の球形³He 比例計数管については、裸の検出器はほぼ一定、減速材付きの検出器は燃料デブリ中での遮蔽効果により減少する形となっている。次に燃料デブリ割合 60% の場合に水を追加した場合の結果を図 3.1-8 に示す。

左図に $^{241}\text{AmBe}$ 線源からの 1 中性子発生に対する検出効率の絶対値を、右図に水 0 %、つまり水が入っていない時の値に対する相対値を示す。直管、減速材付き検出器の計数率が一定なのに対し、裸の検出器が水の増加とともに検出効率が増加しているのが分かる。これは、サンプル中の水により減速し熱中性子化した中性子が、裸の検出器で計測されるからである。以上より、ウラン量、水分量に感度を持つ検出器システムになっていることを確認した。

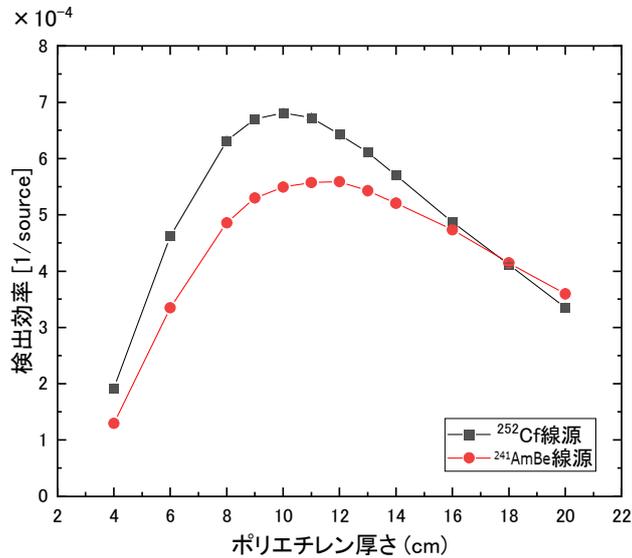


図 3.1-5 ポリエチレン層の厚さによる直管 ^3He 比例計数管の検出効率

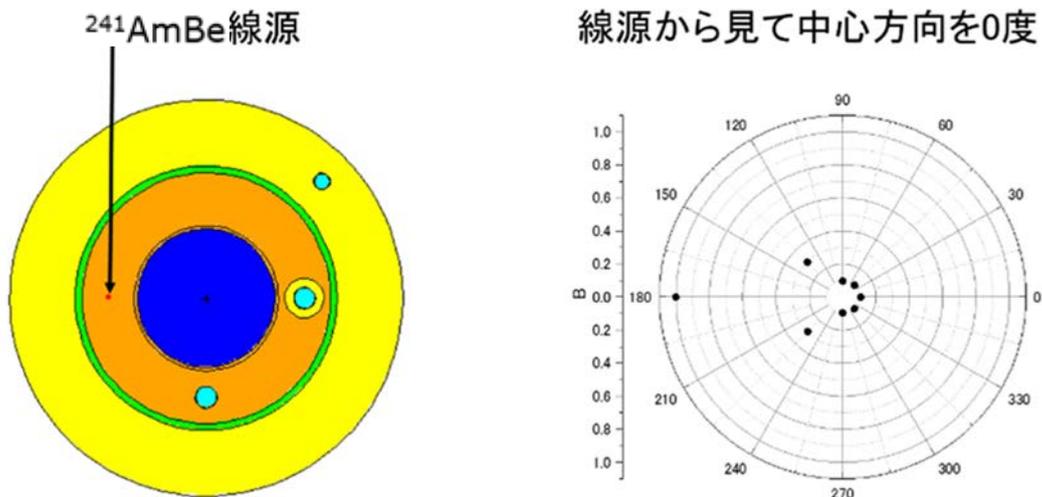


図 3.1-6 直管 ^3He 比例計数管の円環ポリエチレンにおける挿入位置に対する検出効率

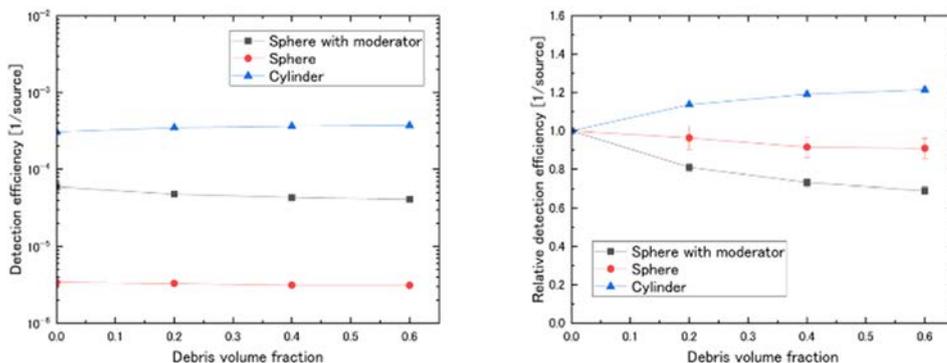


図 3.1-7 燃料デブリ量に対する各 ³He 比例計数管の検出効率の変化

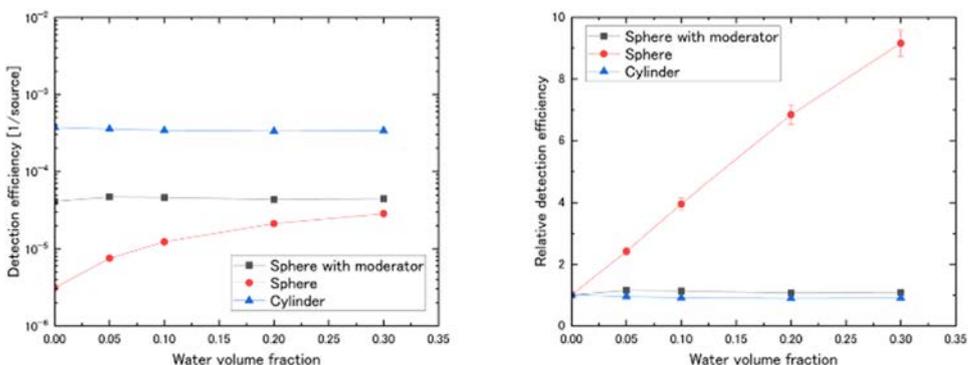


図 3.1-8 水分量に対する各 ³He 比例計数管の検出効率の変化

3.1.2 まとめ

燃料デブリ臨界特性測定システムを開発するにあたって、令和 3 年度に引き続き、計算コードと核データライブラリの検証を行った。また、令和 3 年度に収集・整理した産総研が保有する中性子減速場における中性子測定実験のデータ、既存の AWCC の測定データ、加えて検出器設計最適化のために新たに基礎実験を行って取得するデータを用いて、中性子輸送計算コードの妥当性及び不確かさを評価することで解析精度の向上を図り、検出器の配置や ³He ガス圧、減速材、遮蔽材、中性子源配置の最適化を、輸送計算コードを用いたパラメトリックサーベイにより実施することで検出器を設計した。設計した検出器は燃料デブリ量、水分量に感度がある検出器であることを確認した。

3.2 燃料デブリの臨界特性測定システムの性能試験（令和3年度～令和4年度）

【再委託先：産総研】

3.2.1 検出器の基礎実験（令和3年度～令和4年度）

(1) 令和3年度の概要

臨界特性測定システムの開発にあたって、計算コードと核データの検証用に必要となる黒鉛、ポリエチレンなどの減速材と³He 比例計数管を用いた実験データの収集と整理を行った。また、中性子束分布測定に用いられる放射化金箔から放出されるガンマ線の井戸型 NaI(Tl) シンチレーション検出器での検出効率を高精度で校正した。校正には²⁴¹AmBe 中性子源と黒鉛パイルを使用した熱中性子国家標準場で金箔を照射し、誘導放射能を $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時計数装置で絶対測定し、同じ金箔を井戸型 NaI(Tl) シンチレーション検出器で測定して、411.8 keV ガンマ線に対する検出効率を校正した。また、アクティブ中性子法で使用する中性子源(²⁵²Cf 中性子源)について、黒鉛パイルと校正済みの²⁴¹AmBe 中性子源との相対測定によって中性子放出率を高精度で校正した。

(2) 令和4年度の実施内容

基礎実験として、減速材（ポリエチレン、軽水、黒鉛）と中性子源（²⁵²Cf 線源、²⁴¹AmBe 線源、加速器線源）の組合せからなる体系において、金箔・金ワイヤーを用いた放射化法による中性子束分布の詳細測定、³He 比例計数管を用いた同時計数実験を行った。表 3.2-1 に、実施した基礎実験の体系の概要を示す。

黒鉛減速材体系（体系 1）は熱中性子国家標準場である産総研の黒鉛パイル（幅 230 cm × 奥行 190 cm × 高さ 190 cm）を使用した。黒鉛パイルの概要と中性子源と検出器の位置関係を図 3.2-1 に示す。中性子源として、²⁴¹AmBe 中性子源は黒鉛パイル中心、²⁵²Cf 中性子源は中心から 10 cm 位置に装荷し、中性子検出器として黒鉛パイル中心から 90 cm 位置に設置した金箔（直径 2.0 cm × 厚さ 25 μ m）と球形³He 比例計数管を用いて測定を行った。金箔は $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時計数装置により放射能の絶対値を測定した。それぞれの検出器における測定において、中性子発生数あたりの金箔飽和放射能、球形³He 比例計数管の計数率を導出した。放出中性子エネルギーの異なる²⁴¹AmBe と²⁵²Cf に対する中性子束のエネルギー依存性について、測定により黒鉛パイル減速体系において、²⁵²Cf/²⁴¹AmBe 比として、 0.991 ± 0.018 の値を得た。水減速体系（体系 2）では、軽水が入ったアクリル製の水槽（水ファントム）に、2つの減速材付き³He 比例計数管を設置して計数実験を行った。実験の様子を図 3.2-2 に示す。水ファントム中心に中性子線源（²⁴¹AmBe、²⁵²Cf）を設置し、線源をはさむ形で2つの検出器の間に線源を設置した。測定では本年度購入した FastComTec 社製マルチチャンネルアナライザー MCA4A（図 3.2-3）を使用し、核分裂中性子と熱化中性子の同時計数の動作検証も併せて実施し、計算との比較用の実験データを取得した。測定ではコインシデンス時間をあらかじめ設定した測定と入力信号の時刻情報をすべて記録するリストモードの測定を実施した。同時計数の測定状況を図 3.2-4 に示す。右上と左下のスペクトルはそれぞれの³He 比例計数管により測定された波高スペクトルであり、右下が2つの検出器の同時計数（コインシデンス時間 100 μ s）の2次元マップとなる。この測定により同時計数実験が正常に動作することを確認した。図 3.2-5 に、²⁵²Cf 中性子源に対するリストモードの解析結果を示す。横軸は2つの信号の時間間隔に対する計数率を示している。²⁵²Cf は自発核分裂中性子源であり、1度の放射性崩壊で複数の中性子が同時に発生する。計数率の曲線は2つの成分からなり、時間間隔の短い急激に減衰している成分が同じ核分裂に起因する中性子を計測した事象である。一方

で、緩やかに減衰する成分はランダムな計数、つまり別の核分裂からの中性子を計数した事象である。これによりリストモード測定により、より詳細な中性子検出過程の解析が可能であることが分かった。

ポリエチレン減速体系（体系 3）では、本年度購入したポリエチレンブロック、鉛ブロック、SUS ブロック、 B_4C 中性子遮蔽シートを組み合わせた実験を行った。図 3.2-6 に、実験例を示す。左図はポリエチレン減速材体系における球形 3He 比例計数管による同時計数実験、右図はポリエチレン減速体系における金ワイヤーの放射化による中性子束分布測定である。放射化した金ワイヤーを井戸型 NaI(Tl) ガンマ線検出器で測定することで飽和放射能分布を導出した。また、鉛ブロック、SUS ブロックによるガンマ線遮蔽や中性子計数率への影響を比較するための測定を行った。加えて B_4C 中性子遮蔽シートを 2 つの 3He 比例計数管の間に挿入し、熱中性子が十分遮蔽されるか確認を行った。

ボナー球測定体系（体系 4）は、中性子検出器として球形のポリエチレン減速材（直径 5、6、8 インチ）中に球形 3He 比例計数管を配したボナー球検出器を用いた測定である。ボナー球検出器に対して、産総研の加速器を用いた 14.8 MeV の標準場で測定（図 3.2-7）を行い、検出効率を導出した。また、 $^{241}AmBe$ 中性子源に対するボナー球の測定を行い、検出効率を導出した。

以上の 4 つの体系で測定した実験データは東京工業大学が担当する検出器の設計で利用された。

表 3.2-1 基礎実験の実施体系一覧

No	中性子源	減速材	中性子検出器
体系 1	$^{241}AmBe$ 、 ^{252}Cf	黒鉛	球形 3He 比例計数管、金箔
体系 2	$^{241}AmBe$ 、 ^{252}Cf	水	ポリエチレン減速材付き球形 3He 比例計数管
体系 3	$^{241}AmBe$ 、 ^{252}Cf	ポリエチレン	球形 3He 比例計数管、金ワイヤー
体系 4	加速器中性子源、 $^{241}AmBe$	ポリエチレン	ポリエチレン減速材付き（ボナー球）球形 3He 比例計数管

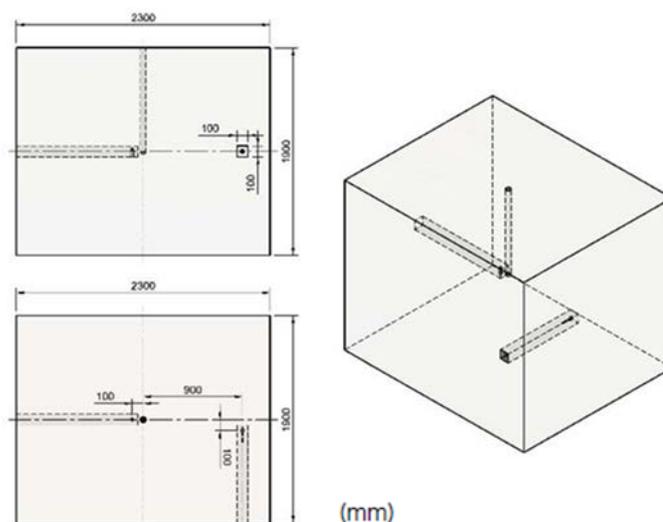


図 3.2-1 黒鉛減速体系（体系 1）の測定概要



図 3.2-2 軽水減速体系（体系 2）の測定実施風景

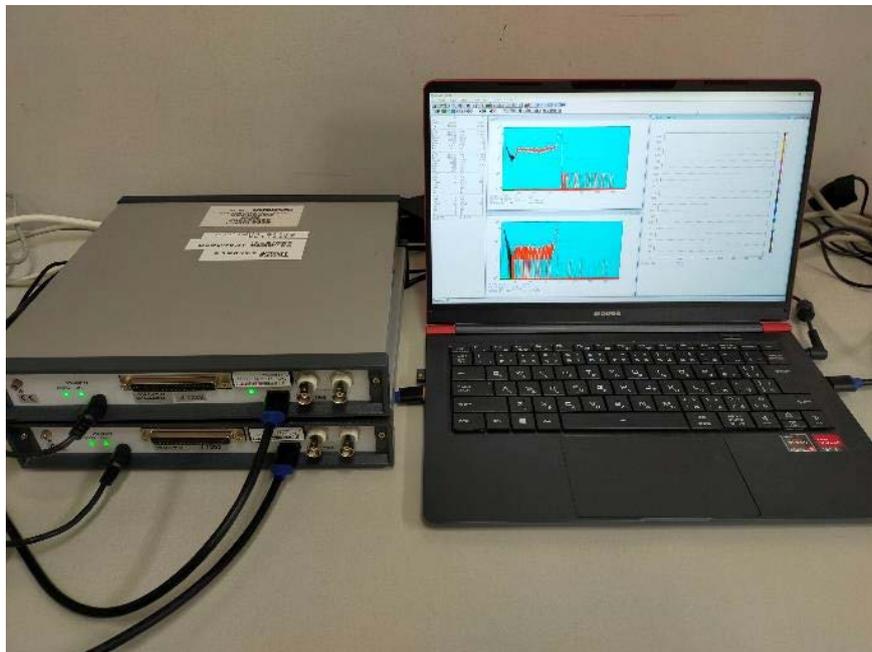


図 3.2-3 導入した MCA4A と PC

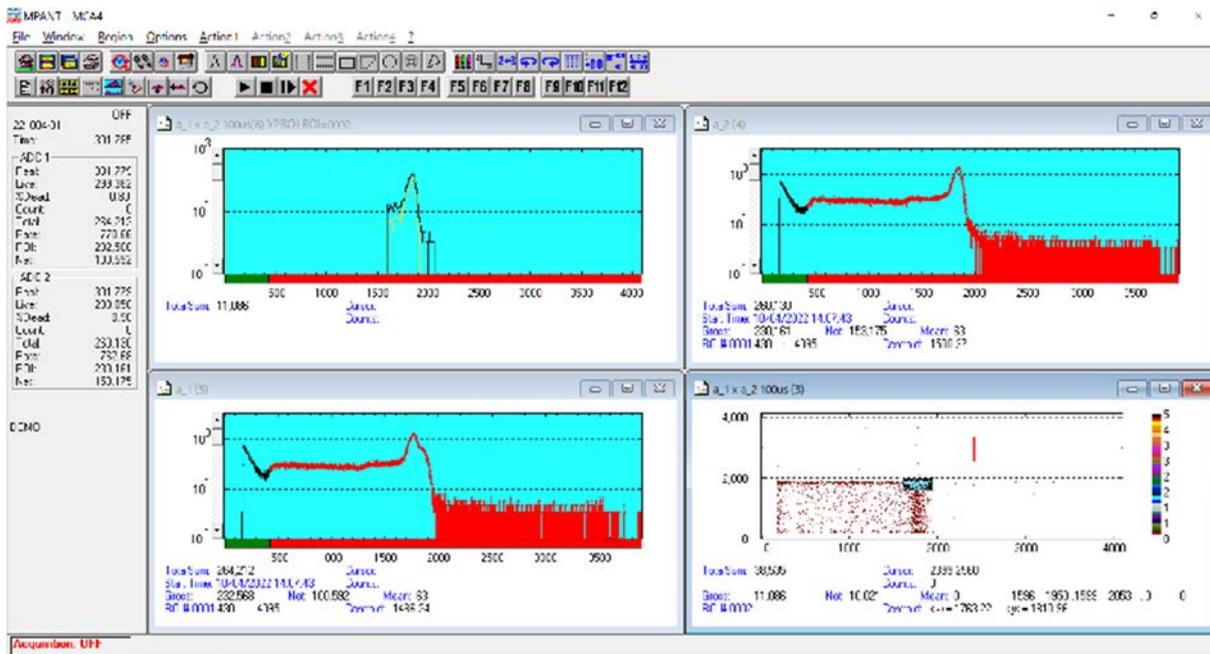


図 3.2-4 同時計数測定の実験システム画面

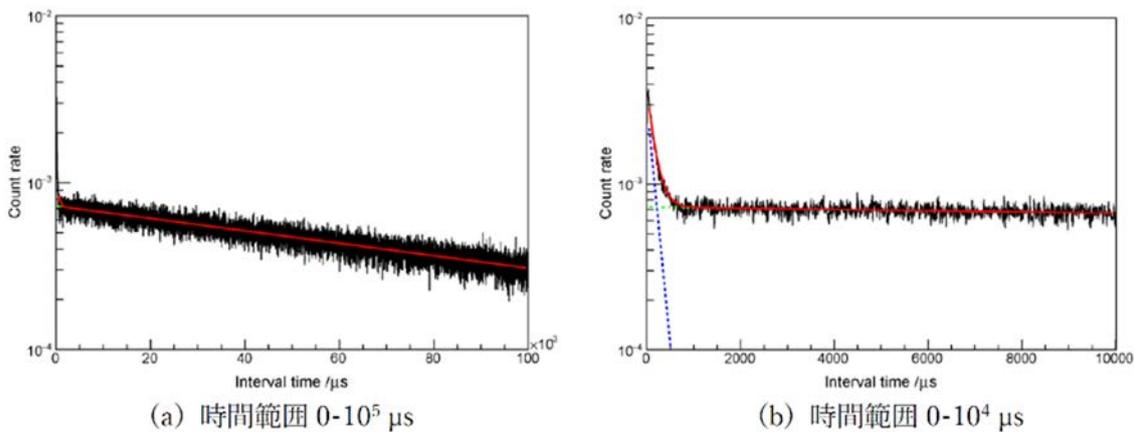


図 3.2-5 リストモードの解析結果

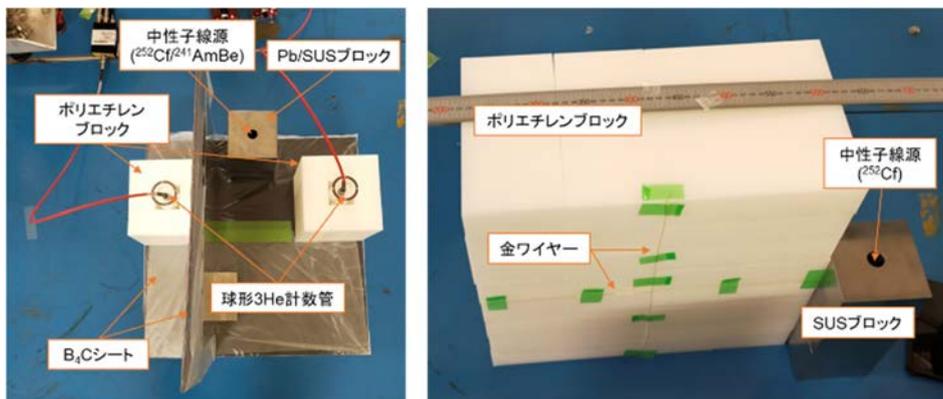


図 3.2-6 ポリエチレン減速体系（体系3）の実験の様子



図 3.2-7 ボナー球測定体系（体系 4）の測定実施の様子

3.2.2 まとめ

基礎実験として、減速材（ポリエチレン、軽水、黒鉛）と中性子源（ ^{252}Cf 線源、 $^{241}\text{AmBe}$ 線源、加速器線源）の組合せからなる体系において、金箔・金ワイヤーを用いた放射化学による中性子束分布の詳細測定、 ^3He 比例計数管を用いた同時計数実験を実施した。この実験により、減速材体系における中性子源の中性子エネルギー依存性、減速時間や中性子透過の減速材厚さ依存性を高精度で検証するための比較用実験データを取得した。同時計数測定システムの動作検証を行い、正常に動作することを確認した。

3.3 燃料デブリ弱結合炉体系臨界影響解析手法の高度化（令和3年度～令和4年度）

【再委託先：長岡技科大】

3.3.1 開発環境構築（令和3年度）

令和2年度に導入した並列計算ワークステーションの計算容量を増強する形で、令和3年度はMIK2.0-MVPコード開発専用のメニーコアマルチノード並列計算・データサーバーを導入し、開発環境を整備した。

ロシア国内で実施された結合炉超臨界／パルス中性子源実験データの詳細調査は、ロシア語公開文献を対象として実施した。令和3年度は、ロシア国立原子力研究大学モスクワ物理工学研究所（Moscow Engineering Physics Institute：以下、「MEPhI」という。）が対象となる文献を検索した結果、ロシア国立原子力機構（ロスアトム）の物理電力工学研究所（Institute of Physics and Power Engineering：以下、「IPPE」という。）の結合炉体系における超臨界実験結果に関する文献に着目することとし、同文献をMEPhIから入手した。日本側では翻訳アプリDeepL Proを用いてロシア語を英語に翻訳の上、解説した。実験に用いられた結合炉体系の仕様、反応度投入条件、出力動特性データなど、令和5年度に実施する予定のMIK2.0-MVPコードの検証に用いる代表的な解析条件を整理した[11]。

3.3.2 開発・予備検証（令和4年度）

MIK2.0-MVPコードの開発と予備検証を実施した。MIK2.0-MVPコードの開発では、MIK2.0コードが必要とする積分型動特性パラメータを計算できるように、汎用連続エネルギー中性子輸送モンテカルロ計算コードMVPのソースプログラムを改造した。また、改造したMVPコードから出力されるデータを用いて積分型動特性パラメータを計算するプログラムを作成した。MIK2.0-MVPコードの概要を図3.3-1に示す。

予備検証では、米国ロスアラモス国立研究所で実施されたGODIVA炉超臨界実験の出力動特性データを、MIK2.0-MVPコードを用いて再現解析した。再現解析では、東京工業大学で実施されたMIK1.0コードによるGODIVA炉超臨界実験再現解析の知見[12]を参考とした。予備検証の計算条件（表3.3-1）は文献[12]を参考にして決定した。GODIVA炉心の領域数は、コードの動作確認のため、2領域（内側・外側）とした。計算結果の例を図3.3-2に示す。MIK2.0-MVPコードでは、MIK1.0コードが有する計算機能に加えて、遅発中性子による核分裂の効果も考慮することができるようになったことを確認した。この機能は、令和5年度に予定しているMIK2.0-MVPコードと粒子法コードの弱連成解析の基本となる。フィードバック効果の反映クライテリア等と再現精度の関係の検討は、令和5年度の弱結合炉体系を対象とした予備検証と併せて実施する計画である。

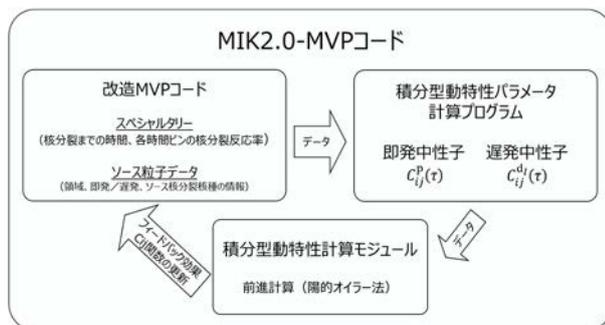


図 3.3-1 MIK2.0-MVPコードの概要

表 3.3-1 MIK2.0-MVP コード予備検証の計算条件

計算体系	GODIVA 炉心
組成	U234 : 1.00 wt%
	U235 : 93.71 wt%
	U238 : Remaining wt%
外径/内径 (2 領域分割)	8.85 cm/7.02 cm
初期温度	293 K
初期炉心出力	1 W (定常状態)
投入反応度	約 1.08 \$、ステップ投入 ($\beta_{eff} = 0.0067$)
タイムステップ Δt	2.0×10^{-10} s
計算ステップ数	1.0×10^6 (0.2 ms)
フィードバック効果	U238 ドップラー効果 スペクトルシフト (断熱近似)

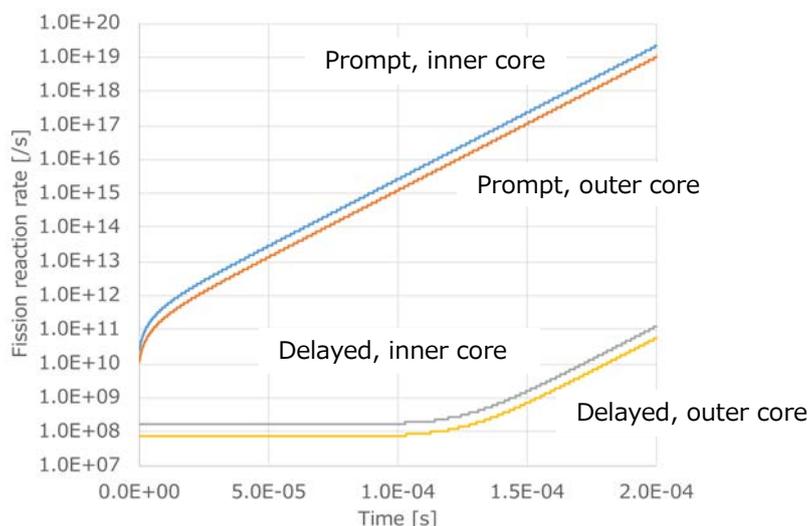


図 3.3-2 MIK2.0-MVP コード予備検証の計算結果の例

3.3.3 まとめ

遅発中性子による核分裂も考慮可能な多領域積分型動特性解析コード MIK2.0-MVP を開発し、予備検証として GODIVA 炉超臨界実験の再現解析を実施した。この結果より、MIK2.0-MVP コードでは、MIK1.0 コードが有する計算機能に加えて、遅発中性子による核分裂の効果を考慮することができるようになったことを確認した。令和 4 年度の検討を通じて、MIK2.0-MVP コードと粒子法コードの弱連成解析の土台となる新たな機能を確立することができた。

3.4 研究推進（令和3年度～令和4年度）

(1) 令和3年度の概要

本業務は、日本側実施機関である東京工業大学と産総研、ロシア側研究機関であるロシア国立原子力研究大学（MEPhI）が緊密に連携して実施した。

国内連携としては、令和4年2月3日のP0中間フォローにおいて、JAEA/CLADSのJAEAプログラムオフィサー（J-P0）も交えて計画概要及び進捗状況の説明と意見交換を行った。令和4年2月25日には、東京工業大学と産総研の関係者間でキックオフ会議を開催し、日本側研究計画のすり合わせと今後の活動について意見交換を行った。令和4年3月10日には、令和3年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業成果報告会に参加し、研究計画の概要を事前録画形式で多くの事業関係者と共有した。その他、日本側実施機関の担当者レベルでは、オンライン会議形式で研究進捗を緊密に共有しながら研究を推進した。

日露連携としては、令和4年2月22日にオンライン会議形式で日露ワークショップを開催し、両国の研究計画・進捗、連携に関わる期待、研究推進に関わる注意事項など詳細について確認と意見交換を行った。

(2) 令和4年度の実施内容

本業務は東京工業大学、産総研と長岡技科大が緊密に連携して実施した。

令和4年6月9日・12月27日・令和5年3月3日のP0中間フォローにおいて、JAEA/CLADSのJ-P0も交えて計画概要及び進捗状況の説明と意見交換を行った。令和4年8月29日に開催された第6回NDF廃炉国際フォーラムでポスター発表した他、令和5年3月15日には、日本原子力学会2023年春の年会において各3研究課題の研究進捗についてシリーズ発表として3件の発表を行った。その他、実施機関の担当者レベルでは、オンライン会議形式で研究進捗を緊密に共有しながら研究を推進した。

4. 結言

本研究は、非接触のアクティブ中性子法により燃料デブリの臨界安全上の特性を評価する測定システムの開発と、燃料デブリ取出し作業員の安全確保方策の確立に資する基盤技術として、多領域積分型動特性解析コードの開発により燃料デブリ臨界解析技術を高度化することを目的としており、令和3年度から令和5年度の3年計画の2年目として東京工業大学、産総研、長岡技科大が連携して実施した。

令和4年度、東京工業大学では令和3年度に収集・整理した産総研が保有する中性子減速場における中性子測定実験のデータ、加えて検出器設計最適化のために新たに基礎実験を行って取得したデータを用いて、中性子輸送計算コードの妥当性及び不確かさを評価することで解析精度の向上を図った。この基礎データを基にした輸送計算コードを用いたパラメトリックサーベイにより、検出器の配置や ^3He ガス圧、減速材、遮蔽材、中性子源配置の最適化を実施することにより検出器を設計した。

産総研では、基礎実験として減速材（ポリエチレン、軽水、黒鉛）と中性子源（ ^{252}Cf 線源、 $^{241}\text{AmBe}$ 線源、加速器線源）の組合せからなる体系において、金箔・金ワイヤーを用いた放射化学による中性子束分布の詳細測定、 ^3He 比例計数管を用いた同時計数実験を実施した。この実験により、減速材体系における中性子源の中性子エネルギー依存性、減速時間や中性子透過の減速材厚さ依存性を検証するための比較用実験データを取得した。同時計数測定システムの動作検証を行い、正常に動作することを確認した。燃料デブリの臨界特性測定システムの開発・性能試験では、本年度の設計を基に構築したシステムに対して、検出器の校正、測定データから核分裂性ウラン、プルトニウムの計量、水素含有量、臨界安全上の特性を導出するための手法に対する検討・評価を行い、現場適応へ向けての性能を実証することが今後の課題である。

長岡技科大では、遅発中性子による核分裂も考慮可能な多領域積分型動特性解析コードMIK2.0-MVPを開発し、予備検証としてGODIVA炉超臨界実験の再現解析を実施した。この結果より、MIK2.0-MVPコードでは、MIK1.0コードが有する計算機能に加えて、遅発中性子による核分裂の効果を考慮することができるようになったことを確認した。令和4年度の検討を通じて、MIK2.0-MVPコードと粒子法コードの弱連成解析の土台となる新たな機能を確立することができた。

以上の活動により本研究の令和4年度の所期の目的を達成することができた。

参考文献

- [1] Werner, C. J., et al., "MCNP Version 6.2 Release Notes," LA-UR-18-20808, 2018, 39p.
- [2] Sato, T., et al., "Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS Version 3.02," J. Nucl. Sci. Technol., 55 (6), 2018, pp.684-690.
- [3] Nagaya, Y., et al., "MVP/GMVP Version 3 : General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations Based on Continuous Energy and Multigroup Methods," JAEA-Data/Code 2016-018, 2017, 421p.
- [4] Leppänen, J., et al., "The Serpent Monte Carlo Code: Status, Development and Applications in 2013," Ann. Nucl. Energy, 82, 2015, pp.142-150.
- [5] Shibata, K., et al. "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol., 48 (1), 2011, pp.1-30.
- [6] Chadwick, M.B., et al., "ENDF/B-VII.1: Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data," Nucl. Data Sheets, 112 (12), 2011, pp.2887-2996.
- [7] Brown, D.A., et al., "ENDF/B- VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data," Nucl. Data Sheets, 148, 2018, pp.1-142.
- [8] Plompen, A.J.M., "The Joint Evaluated Fission and Fusion Nuclear Data Library, JEFF-3.3," Eur. Phys. J., A56 (181), 2020, pp.1-108.
- [9] International Standard, "Reference Neutron Radiations - Part 1: Characteristics and Methods of Production," International Organization for Standardization, ISO8529-1, Geneva, Switzerland 1998.
- [10] Menlove, H. O., "Description and Operation Manual for the Active Well Coincidence Counter," LA-7823-M, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 1979, pp.1-31.
- [11] 日本原子力研究開発機構, 東京工業大学, 非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化, JAEA-Review 2022-043, 2023, 52p.
- [12] Tuya, D., Takezawa, H., and Obara, T., "Improved Approach to Multiregion Supercritical Transient Analysis Based on the Integral Kinetic Model and Monte Carlo Method," Nucl. Sci. Eng., 188 (1), 2017, pp.33-42.

