

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 (委託研究)

－令和5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－

Establishment of 3-D Dose Dispersion Forecasting Method and
Development of In-structure Survey Using the Transparency Difference
of Each Line Gamma-ray
(Contract Research)

－ FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
Development Project –

福島廃炉安全工学研究所 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 and Engineering Institute
Kyoto University

October 2025

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

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
(委託研究)

—令和5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 福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター

京都大学

(2025年4月11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5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(1F)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4年度に採択された研究課題のうち、「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」の令和5年度分の研究成果について取りまとめたものである。

我々は核ガンマ線の方法を完全に決定し、光学カメラと同じ全単射によるガンマ線画像(線形画像)が測定できる電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)を実現、今までに世界初の銀河拡散ガンマ線の直接観測及び1Fでは1~3号炉建屋群を含む1 km四方の撮像による約100か所のスペクトル同時測定と敷地全体を覆うスカイシャインの撮像にも成功し、さらには京都大学複合原子力科学研究所の原子炉建屋内の3次元線量測定などの革新的な成果を出してきた。

本研究は前研究の成果を基に、(1)サブmSv/h環境での3次元放射性物質飛散検知・予測システムの構築、(2)ETCCのMeV以上のガンマ線撮像能力を生かし透過性の高い ^{134}Cs ガンマ線を利用した炉建屋内の3次元透視Cs分布測定法を開発及び1Fの炉建屋周辺からの測定、(3)数mSv/hでの動作を実現し、炉建屋内で同測定法を開発を行う。

そのために令和5年度は、シミュレーションに基づくサブmSv環境での軽量遮蔽設計手法の開発及びETCCへの遮蔽を搭載した。同時にJAEAのFRS施設で高線量場を用いて、(1)の遮蔽能力の検証、同時にETCCデータ収集系、画像処理系の検証実験を行う。その結果を反映した改善をETCCに施した後、令和6年3月に1F内の炉建屋群全体を異なる2方向から測定する3次元線量測定を実施した。この測定でETCCの能力の検証と1F全域の3次元線量分布を今後求めていく。また、ETCCで炉建屋を数方向から計測を行い、建屋内部線量のCTスキュンの可能性をシミュレーションで検証、4方向から測定で複数のホットスポットの分布が求められる可能性が出てきた。

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、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

Establishment of 3-D Dose Dispersion Forecasting Method and Development of In-structure Survey Using
the Transparency Difference of Each Line Gamma-ray
(Contract Research)

— FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

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

Kyoto University

(Received April 11, 2025)

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 FY2023.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F), 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 FY2022, this report summarizes the research results of the “Establishment of 3-D dose dispersion forecasting method and development of in-structure survey using the transparency difference of each line gamma-ray” conducted in FY2023.

We realized an electron track detecting Compton camera (ETCC) that can measure gamma-ray images (linear images) with the bijective projection. In the “Quantitative analysis of radioactivity distribution by imaging of high radiation field environment using gamma-ray imaging spectroscopy” (hereinafter referred to as the previous project) adopted in FY2018, the 1 km square area including the reactor buildings was imaged at once. In FY2021, 3-D dosimetry in the reactor building of the Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science was carried out, and 3-D imaging of gamma-rays was successfully obtained. This project will build on the results of the previous project to develop a practical 3-D contaminant dispersion detection and prediction system for sub-mSv/h environments. In addition, a 3-D radiographic Cs distribution measurement method inside the reactor building using highly penetrating ^{134}Cs gamma-rays will be developed. In FY2023, we fabricated a lightweight and highly effective shielding specifically for the TPC of ETCC based on simulations. In addition, by conducting calibration experiments at the FRS facility, we were also able to repair bugs in the signal processing circuit. Those meticulous advance preparations enabled us to successfully conduct a 3-D experiment within 1F in March 2024.

Keywords: Gamma-ray Imaging Spectroscopy, 3-D Gamma-ray Imaging, Electron Tracking Compton Camera
This work was performed by Kyoto University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要	1
2. 平成 30 年度 採択課題	2
3. 令和元年度 採択課題	5
4. 令和 2 年度 採択課題	8
5. 令和 3 年度 採択課題	10
6. 令和 4 年度 採択課題	12
7. 令和 5 年度 採択課題	14
付録 成果報告書	17

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
7. Accepted Proposal in FY2023.....	14
Appendix Result Report	17

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）

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 2 課題、日露 2 課題）

研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一郎	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (～R2. 3. 31) 大曲 新矢 (R2. 4. 1～)	産業技術総合 研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペDESTAL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・ エネルギー
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	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）

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）

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
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

課題名	研究代表者	所属機関
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）

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 (～R5.3.31) 理化学研究所 (R5.4.1～)
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
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

7. 令和 5 年度 採択課題

令和 5 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 5 年 3 月 1 日～令和 5 年 4 月 14 日（課題解決型）

令和 5 年 4 月 12 日～令和 5 年 6 月 15 日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：9 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 7 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 5 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
遮蔽不要な耐放射線性ダイヤモンド中性子計測システムのプロトタイプ開発	金子 純一	北海道大学
簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発	鎌田 圭	東北大学
ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究	五十嵐 豪	名古屋大学
動画像からの特徴量抽出結果に基づいた高速 3 次元炉内環境モデリング	中村 啓太	札幌大学
放射性コンクリート廃棄物の減容を考慮した合理的処理・処分方法の検討	小崎 完	北海道大学

課題名	研究代表者	所属機関
高バックグラウンド放射線環境における配管内探査技術の開発	鳥居 建男	福井大学
PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発	椎名 達雄	千葉大学

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
革新的分光画像解析による燃料デブリの可視化への挑戦と LIBS による検証	牟田 浩明	大阪大学
燃料デブリ除去に向けた様々な特性をもつメタカオリンベースのジオポリマーの設計と特性評価	Yogarajah Elakneswaran	北海道大学

本報告書は、以下の課題の令和5年度分の研究成果について取りまとめたものである。

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
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

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 5 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

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

(契約番号 R05I055)

成果報告書

令和 6 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「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」の令和5年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略	vii
1. はじめに	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5年度の成果の目標及び業務の実施方法	2-4
3. 実施内容及び成果	3-1
3.1 3次元線量拡散予測システムの構築（京都大学、再委託先：J-BEAM、連携先：原子力機構） 【令和4年度～令和5年度】	3-1
3.1.1 実施内容	3-1
3.1.2 成果	3-1
3.1.3 まとめ	3-6
3.2 1 mSv/h 環境での ETCC 画像取得法の開発（京都大学、再委託先：J-BEAM） 【令和4年度～令和5年度】	3-7
3.2.1 実施内容	3-7
3.2.2 成果	3-7
3.2.3 まとめ	3-14
3.3 構造体内部3次元線量分布測定法の開発（京都大学、連携先：原子力機構） 【令和4年度～令和5年度】	3-15
3.3.1 実施内容	3-15
3.3.2 成果	3-15
3.3.3 まとめ	3-24
3.4 高線量 ETCC の製作（京都大学）【令和4年度～令和5年度】	3-25
3.4.1 実施内容	3-25
3.4.2 成果	3-25
3.4.3 まとめ	3-28
3.5 10 mSv/h での遮蔽技術（京都大学、再委託先：J-BEAM）【令和4年度～令和5年度】 ...	3-29
3.5.1 実施内容	3-29
3.5.2 成果	3-29
3.5.3 まとめ	3-33
3.6 ガンマ線によるデブリ探索の調査（京都大学、再委託先：J-BEAM、連携先：原子力機構） 【令和4年度～令和5年度】	3-34
3.6.1 実施内容	3-34
3.6.2 成果	3-34
3.6.3 まとめ	3-36
3.7 研究推進	3-38
4. 結言	4-1
参考文献	5-1

執筆者リスト

事業代表者

国立大学法人京都大学

非常勤研究員
准教授
助教
特定研究員

谷森達（名誉教授）
高田淳史
谷垣実
園田真也

再委託先

株式会社 J-BEAM

社員
社員

水本哲矢
古村翔太郎

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

副センター長
研究主幹
研究主幹

永井晴康
中山浩成
佐藤大樹

表一覧

表 3. 2. 2-1	FRS と福島 1F での各 ETCC の計数率の差から換算率の算出表	....	3-13
表 3. 3. 2-1	第 2 の解析手法により 1 m×1 m×1 m メッシュの計算格子で 逆解析して得られた線源の放射エネルギー	....	3-24
表 3. 7-1	打ち合わせ・会議の日程とその概要	....	3-38

図一覧

図 1-1	電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC)	....	1-1
図 1-2	前研究で開発した軽量型 ETCC	....	1-1
図 2. 1-1	年次計画	....	2-2
図 2. 2-1	実施体制図	....	2-3
図 3. 1. 2-1	令和 5 年 3 月 FRS 実験で起こった不感時間急増の再現実験	....	3-3
図 3. 1. 2-2	令和 5 年 3 月 FRS 実験の結果	....	3-3
図 3. 1. 2-3	令和 5 年 3 月 FRS 実験のドリフト時間分布の再現実験	....	3-4
図 3. 1. 2-4	トリガー方式を令和 2 年度方式に変更後の実用化 ETCC の ドリフト分布	....	3-4
図 3. 1. 2-5	令和 5 年 11 月 FRS 実験で起こったトリガー不感時間の急増	....	3-5
図 3. 1. 2-6	実用化 ETCC の野外試験の様子	....	3-6
図 3. 1. 2-7	ETCC のオンライン操作のためのノート PC 上の GUI	....	3-6
図 3. 2. 2-1	11、12 月 FRS 実験のセットアップと実用化、J-BEAM 社各 ETCC	....	3-9
図 3. 2. 2-2	FRS 実験と福島 1F で放射線場の違いの模式図	....	3-10
図 3. 2. 2-3	実用化 ETCC の FRS 実験の高線量場での画像結果	....	3-10
図 3. 2. 2-4	J-BEAM 社 ETCC の FRS 実験の TPC、PSA の計数率と線量の関係	....	3-11
図 3. 2. 2-5	J-BEAM 社 ETCC の FRS 実験の高線量場での実用化 ETCC の画像結果	....	3-11
図 3. 2. 2-6	FRS 実験の高線量場での J-BEAM 社、実用化各 ETCC の ^{60}Co の 画像結果	....	3-12
図 3. 2. 2-7	FRS と福島 1F での放射線環境のモデル化	....	3-12
図 3. 2. 2-8	実用化モデルと FRS と福島 1F で得られるスペクトルの シミュレーション結果	....	3-13
図 3. 2. 2-9	FRS の各 ETCC のスペクトルから福島 1F 測定に対しての予想と 最適化	....	3-14
図 3. 3. 2-1	ETCC のガンマ線画像生成用の計算格子体系	....	3-17
図 3. 3. 2-2	逆解析用の計算格子体系	....	3-17
図 3. 3. 2-3	ETCC の設置地点と計測方向	....	3-18
図 3. 3. 2-4	線源配置と生成したガンマ線画像 (ケース 1 については、炉建屋内部空間に内部壁が存在しないと仮 定したガンマ線画像も作成し、内部壁の有無による相違を示した)	....	3-19
図 3. 3. 2-5	ケース 1 について ^{134}Cs の 0. 796 MeV のラインガンマ線のみ利用 した場合の第 1 の解析手法 (スケールファクター $A=100$) による 解析結果	....	3-20
図 3. 3. 2-6	ケース 1 について ^{134}Cs の 0. 796 MeV と 1. 365 MeV の両方のライ ンガンマ線を利用した場合の第 1 の解析手法 (スケールファクター $A=100$) による解析結果	....	3-21
図 3. 3. 2-7	ケース 1~3 について ^{134}Cs の 0. 796 MeV と 1. 365 MeV の両方のラ インガンマ線を利用した場合の第 1 の解析手法 (スケールファクター $A=10$) による解析結果	....	3-22

図 3.3.2-8	ケース 1～3 について ^{134}Cs の 0.796 MeV と 1.365 MeV の両方の ラインガンマ線を利用した場合の第 2 の解析手法による解析結果	....	3-23
図 3.4.2-1	50 $\mu\text{Sv/h}$ の 5 mm 厚、1 mm 厚遮蔽データに MLEM を適応した画像	....	3-26
図 3.4.2-2	令和 6 年度制作予定の高線量 ETCC の概念図	....	3-27
図 3.4.2-3	令和元年度の福島 1F 全域の 662 keV 画像 ([9]の図 3.3.2-6 参照) を TPC 深さで 3 分割した画像	....	3-27
図 3.4.2-4	高線量 ETCC の新型ガス容器及び遮蔽支援治具の設計図案	....	3-28
図 3.5.2-1	実用化 ETCC の鉛遮蔽厚無、5 mm、30 mm での TPC と PSA の 計数率の変化	....	3-30
図 3.5.2-2	実用化 ETCC の鉛遮蔽厚無、5 mm、30 mm での TPC と PSA の スペクトルの変化	....	3-30
図 3.5.2-3	実用化 ETCC の TPC 及び PSA の鉛遮蔽厚と減衰率の関係	....	3-31
図 3.5.2-4	TPC 内の電子飛跡	....	3-32
図 3.5.2-5	FPGA での事象選別の効果	....	3-32
図 3.6.2-1	福島 1F 内で ETCC 撮像を提案した地点 (左) とスペクトル測定地点 (右)	....	3-35
図 3.6.2-2	スペクトル測定に使用した浜松ホトニクス C12137 (左) 京大理で制作した CeBr_3 スペクトルメータ (右)	....	3-36
図 3.6.2-3	B 地点での ETCC 測定 (左)、A 地点から ETCC で測定した視野領域 (右)	....	3-36

略語一覧

原子力機構	: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	
東電	: 東京電力ホールディングス株式会社	
福島 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	
日立 GE	: 日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社	
京都大学	: 国立大学法人京都大学	
京大理	: 京都大学大学院理学研究科	
複合研	: 京都大学複合原子力科学研究所	
福島 SiC	: 福島 SiC 応用技研株式会社	
J-BEAM	: 株式会社 J-BEAM	
千代田 テクノ	: 株式会社千代田テクノ	
デブリ	: Debris	溶融核燃料
BNCT	: Boron Neutron Capture Therapy	ホウ素中性子捕捉療法
CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science	廃炉環境国際共同研究センター
cps	: counts per second	一秒あたりの計数値
ETCC	: Electron-Tracking Compton Camera	電子飛跡検出型コンプトンカメラ
FPGA	: Field-Programmable Gate Array	フィールドプログラマブルゲートアレイ
FRS	: Facility of Radiation Standards	放射線標準施設（原子力機構）
FWHM	: Full Width at Half Maximum	半値全幅
GAGG	: $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$	ガドリウム・アルミニウム・ガリウム ・オキサイド
GSO	: Gd_2SiO_5	ガドリウム・シリコン・オキサイド
MLEM	: Maximum Likelihood Expectation Maximization	逐次近似画像再構成
MPPC	: Multi Pixel Photon Counter	多重ピクセル光子計数器
PHITS	: Particle and Heavy Ion Transport code System	粒子及び重粒子輸送コードシステム
PMT	: Photomultiplier Tube	光電子増倍管
PSA	: Pixel Scintillation Array	ピクセル シンチレーション アレイ
PSF	: Point Spread Function	点像分布関数
SPEEDI	: System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information	緊急時環境線量情報予測システム
TPC	: Time Projection Chamber	タイム プロジェクション チェンバー
WSPEEDI	: Worldwide version of SPEEDI	SPEEDI のワールドワイド版
μ PIC	: Micro Pixel Chamber	マイクロピクセルチェンバー

概略

我々は、核ガンマ線の方角を完全に決定し、光学カメラと同じ全単射によるガンマ線画像（線形画像）が測定できる電子飛跡検出型コンプトンカメラ（以下、ETCC と表記。）を実現、令和 4 年度には世界初の銀河拡散ガンマ線の直接観測にも成功した。この特徴を生かし、平成 30 年度英知事業に採択された「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」（以下、前研究と表記。）では、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（以下、福島 1F と表記。）免振棟から炉を含む 1 km 四方を一度に撮像、約 100 か所のスペクトル測定を一度に実現、空からはスカイシャイン、炉からは 662 keV ガンマ線が明瞭に測定でき、見晴台 50 $\mu\text{Sv/h}$ でも無遮蔽で撮像に成功した。令和 3 年度には、京都大学複合原子力科学研究所（以下、複合研と表記。）の原子炉建屋内の 3 次元線量測定を実施し、動作中の原子炉からのガンマ線の 3 次元撮像に成功した。さらに、炉壁から放出された微量な ^{41}Ar のガンマ線（1290 keV）を動画で捉え、放射性物質拡散のガンマ線画像モニタリングが可能であることを実証した。本研究は、前研究の成果を基にサブ mSv/h 環境での 3 次元汚染物質飛散検知・予測システムの福島 1F 内で使用可能な実用化を行う。また、ETCC の MeV 以上のガンマ線撮像能力を生かし透過性の高い ^{134}Cs ガンマ線を利用した炉建屋内の 3 次元透視 Cs 分布測定法を開発する。さらに、数 mSv/h での動作を実現し炉建屋内で同測定を実施し、1.5 MeV 以上のデブリガンマ線の炉壁透過ガンマ線探査も同時に行い、デブリの全容把握の実現を目指す。

前年度までの成果報告書：

- ・ 3 次元線量拡散予測法の確立とガンマ線透過率差を利用した構造体内調査法の開発
（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

JAEA-Review 2023-028

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2023-028>

1. はじめに

我々は、核ガンマ線の方角を完全に決定し、光学カメラと同じ全単射によるガンマ線画像（線形画像）が測定できる ETCC を実現した（図 1-1）[1][2][3]。その技術を用いて、令和 4 年度には世界初の銀河拡散ガンマ線の直接観測にも成功し、技術の有効性を世界に示した[4]。この特徴を生かし、平成 30 年度に採択された前研究では、福島 1F 免振棟から炉を含む 1 km 四方を一度にイメージングスペクトル測定を実現した。また、複合研原子炉の 3 次元線量測定を実施し、動作中の原子炉からのガンマ線の 3 次元撮像に成功し、放射性物質拡散のガンマ線画像モニタリングが可能であることを実証した[5]。

本研究では、前研究で開発した軽量型 ETCC（図 1-2）を基にサブ mSv/h 環境での 3 次元汚染物質飛散検知・予測システムの実用化を行う。また、ETCC の MeV 以上のガンマ線撮像能力を生かし、透過性の高い ^{134}Cs ガンマ線を利用した炉建屋内の 3 次元透視 Cs 分布測定法を開発する。さらに、数 mSv/h での動作が可能な高線量 ETCC を開発して建屋内で同測定を実施する。特に、炉建屋内外の測定から 1.5 MeV 以上のデブリガンマ線の炉壁透過ガンマ線を探査し、炉壁外からのガンマ線測定でデブリの全容把握のための研究を実施している。

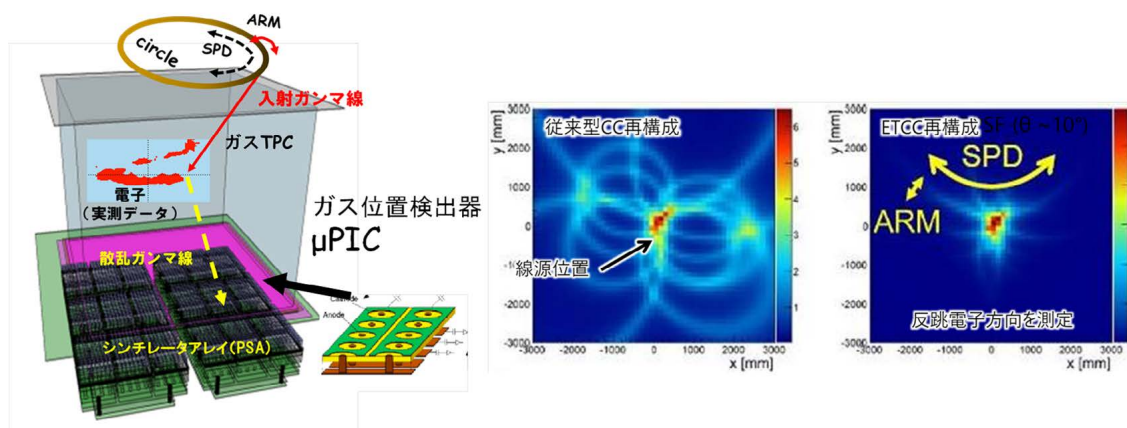


図 1-1 電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC)

（左は ETCC の構造及び原理の模式図。右は実測による従来型のコンプトンカメラと ETCC によるガンマ線画像の見え方の例。点状のガンマ線放射源があった場合でも、従来型コンプトンカメラでは円環の重ね合わせで疑似画像を描くことしかできないが、ETCC であれば広範囲の情報を混合してしまうことはない。）

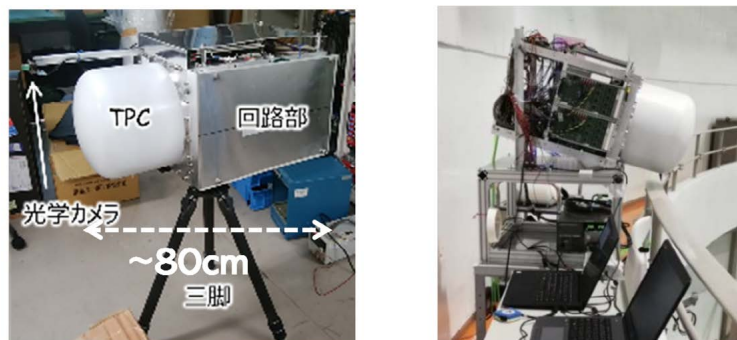


図 1-2 前研究で開発した軽量型 ETCC

（左は令和元年度に福島 1F で使用した装置。右は多重ピクセル光子計数器 (MPPC) を導入し軽量化を図った軽量型 ETCC。）

2. 業務計画

2.1 全体計画

我々が開発した ETCC は、0.1～10 MeV の核ガンマ線に対してガンマ線の方角を完全に決定できる世界で唯一のガンマ線カメラであり、光学カメラと同じ全単射画像(線形画像)が得られる。線形画像は逆写像が解析的に一意に決まるため、定量的画像解析が実現され、光学カメラのような多様な画像解析が可能になる。それを利用し前研究では、福島 1F 内約 1 km 四方を一度に撮像し 100 か所以上のガンマ線スペクトルを 1 つの画像から取得した。また、複合研では光学カメラと同様なステレオ投影法により原子炉建屋内の 3 次元線量測定を実施し、動作中の原子炉の 0.1～5 MeV の 3 次元撮像に成功した。特に建屋内の線量 (1～3 mSv/h) より 2 桁低い ^{41}Ar のガンマ線 (1290 keV) から、 ^{41}Ar が炉壁から拡散していく過程を動画で捉え、空気中での拡散を画像としてモニタリングできることを示した。また、3 次元分布解析にも成功し、福島 1F 解体の際の微弱な汚染物質拡散に対するオンライン検知、拡散予測の実現可能性を実証した。

本研究は、これらの成果を発展させ、以下の 4 つの目標の達成を目指す。

- (1) 前研究の成果に基づき、福島 1F 炉建屋の周辺、約 100 $\mu\text{Sv/h}$ 環境で安定動作する 3 次元 Cs 汚染物質拡散予測システムを実用化する。具体的には、前研究で改良した軽量 ETCC 及び線量拡散予想プログラムを基に実用版に改良して、実際の作業現場で使用可能なシステムを実現する。
- (2) 上記の軽量 ETCC を運用型にした実用化 ETCC を用いて、ETCC の 1 MeV 以上での高いガンマ線画像化能力(複合炉実験で実証)を用いて透過性が ^{137}Cs の 662 keV より 1 桁以上高い ^{134}Cs の 1.36 MeV ガンマ線による炉建屋内全域(炉内以外)の 3 次元 Cs 分布測定の可能性を示す。
- (3) 数 mSv/h 以上対応可能な高線量 ETCC を開発する。(1)の実用化 ETCC は計算上 100 $\mu\text{Sv/h}$ まで無遮蔽で動作可能である。それを基に簡易遮蔽、ガスの選択などを実施し数 mSv/h で使用可能な可搬型の ETCC を開発する。
- (4) この高線量 ETCC を用いて、炉壁透過ガンマ線によるデブリ探査の可能性を調査する。具体的には、炉建屋近傍と内部で炉壁方向からのデブリ特有で、且つ透過性が非常に高い 1.5 MeV 以上のガンマ線放射探査を行う。

この 4 つの目標を達成するため、ETCC を開発した複合研と京都大学大学院理学研究科(以下、京大理と表記。)並びに放射性物質拡散予想モデル(WSPEDI)を開発した国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構と表記。)、ホウ素中性子捕捉治療用小型加速器開発とともに、ETCC の導入による治療時の線量可視化を目指し、高線量場での ETCC 測定に豊富な実績のある福島 SiC 応用技研株式会社(令和 5 年度に社名を株式会社 J-BEAM(以下、J-BEAM と表記。)に変更)が連携する。具体的には、以下の 7 項目に研究課題を分け、各組織がそれぞれの項目を分担・担当することで効率よく開発を推進する。

- 1 3 次元線量拡散予測システムの構築(京都大学、再委託先: J-BEAM、連携先: 原子力機構)
- 2 1 mSv/h 環境での ETCC 画像取得法の開発(京都大学、再委託先: J-BEAM)
- 3 構造体内部 3 次元線量分布測定法の開発(京都大学、連携先: 原子力機構)
- 4 高線量 ETCC の製作(京都大学)
- 5 10 mSv/h での遮蔽技術(京都大学、再委託先: J-BEAM)
- 6 ガンマ線によるデブリ探査の調査(京都大学、再委託先: J-BEAM、連携先: 原子力機構)
- 7 研究推進

上記 7 項目を図 2.1-1 にある年次計画で推進する。

題目 「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」 年度別全体計画

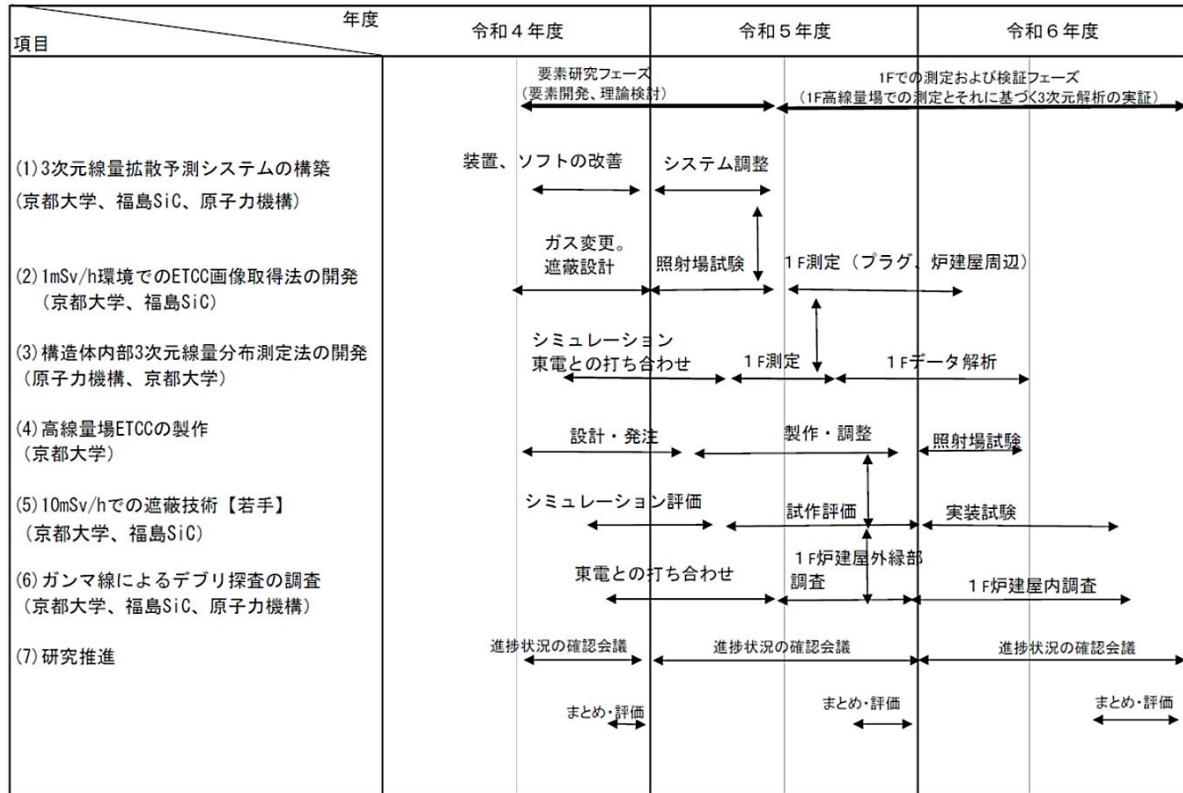


図 2.1-1 年次計画 (福島 SiC は令和 5 年度に J-BEAM に社名変更)

2.2 実施体制

実施体制を図 2.2-1 に示す。

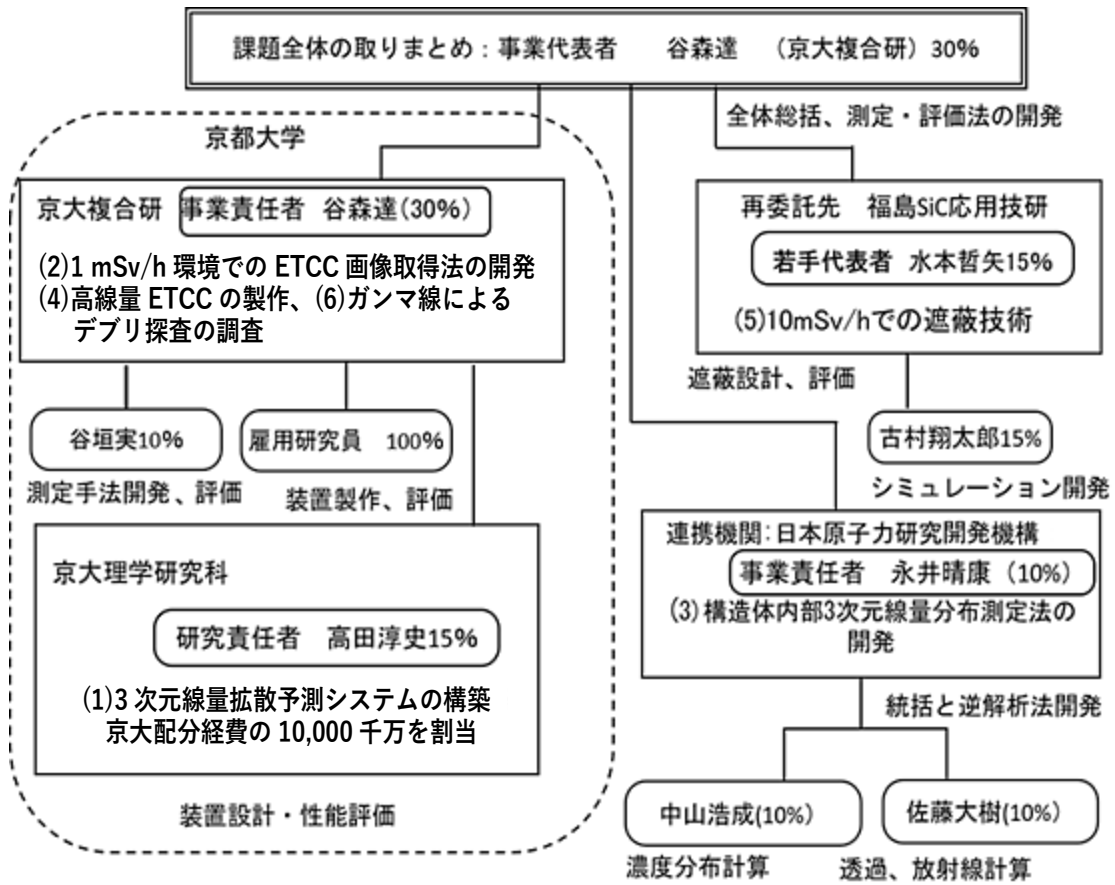


図 2.2-1 実施体制図

2.3 令和 5 年度の成果の目標及び業務の実施方法

2.1 節に述べた 7 項目について成果目標と実施方法を述べる。分担機関の先頭に記載した機関が、その項目の責任機関である。

- (1) 3 次元線量拡散予測システムの構築（京都大学、再委託先：J-BEAM、連携先：原子力機構）
令和 4 年度に製作した 3 次元線量拡散予測システムの野外環境での長時間使用試験を実施する。測定場所で得られた解析結果を Wi-Fi で送信し、3 次元解析及び拡散予測プログラムによる解析がオンラインに近い形で実行できることを確認する。
- (2) 1 mSv/h 環境での ETCC 画像取得法の開発（京都大学、再委託先：J-BEAM）
1 mSv/h 環境下で ETCC が対応できるよう、(1) のシステムに電子密度の高い Ne-Ar-CF₄ ガスを使用するとともに、タイム プロジェクション チェンバー（以下、TPC と表記。）周囲の 0.5 mm 鉛シート及び他のシンチレータ部等に 3~5 mm 程度の鉛板による遮蔽対策を実施する。
本システムを用い、原子力機構の放射線校正施設で試験を実施する。また、福島 1F 内にて、このシステムが動作可能な炉建屋周囲から炉建屋周辺全域＋スカイシャインの 3 次元分布の測定を実施する。
- (3) 構造体内部 3 次元線量分布測定法の開発（京都大学、連携先：原子力機構）
¹³⁴Cs の 0.79 MeV、1.36 MeV 等の各ラインガンマ線の透過率を考慮した逆写像投影プログラムを作成し、炉建屋周辺からの 2 次元計測から内部を透視して Cs の 3 次元分布を推定する手法を開発する。
- (4) 高線量 ETCC の製作（京都大学）
(2) で得られた高線量場測定のデータを基に、高線量 ETCC の TPC のガス圧、シンチレータ部のエネルギー領域短縮によるデータ量低減及び(5)で開発した飛跡長トリガーの検討を行い、実行可能な方法の調査を実施する。
- (5) 10 mSv/h での遮蔽技術（京都大学、再委託先：J-BEAM）
令和 4 年度に策定した素案を基に、フィールドプログラマブルゲートアレイ（以下、FPGA と表記。）ソフトを完成させ、飛跡長トリガーの最適化を行い、ETCC の動作確認を行う。
Ne-Ar-CF₄ ガス、FPGA での雑音除去、簡易遮蔽による効果を整理して、数 mSv/h でエネルギー閾値 1 MeV 以上の測定に必要な遮蔽量をシミュレーションにより求める。また、シミュレーションに基づき、遮蔽材を制作し原子力機構の線量校正施設での動作確認を行う。
- (6) ガンマ線によるデブリ探査の調査（京都大学、再委託先：J-BEAM、連携先：原子力機構）
東京電力ホールディングス株式会社（以下、東電と表記。）との協議に基づき、福島 1F 内での調査を行う。炉建屋周辺部から複数方向からの測定を行い、建屋内の 3 次元 Cs 分布測定法の試験を想定している。それが困難な場合は、炉建屋から 200 m 程度の距離を置き、複数方向からの測定を行い、建屋全域＋スカイシャインの 3 次元分布計測を実施する。
- (7) 研究推進
研究代表者の下で各研究項目間並びに廃炉環境国際共同研究センター（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ち合わせや会議等を開催する。さらに、本研究では福島 1F 内での測定試験を予定しているため、CLADS 及び東電と協議を開き、測定試験の円滑な実施に向けて検討を行う。

3. 実施内容及び成果

3.1 3次元線量拡散予測システムの構築（京都大学、再委託先：J-BEAM、連携先：原子力機構） 【令和4年度～令和5年度】

3.1.1 実施内容

令和4年度に製作した、3次元線量拡散予測システムの野外環境での長時間使用試験を実施した。測定場所で得られた解析結果をWi-Fiで送信し、3次元解析及び拡散予測プログラムによる解析が、オンラインに近い形で実行できることを確認した。

3.1.2 成果

【令和4年度までの概要】

(1) 予測システム

令和4年度には、前研究で作成した軽量ETCCで実用化に必要な電源、トリガー部、冷却系ハードウェアの大半の開発を終え、装置として組み上げた。この装置を用いて原子力機構の放射線標準施設（以下、FRSと表記。）で実験を行い、基本的な測定が行えたことを確認した。

(2) 野外試験

野外環境での長時間使用試験を実施した。測定場所で得られた解析結果をWi-Fiで送信し、3次元解析及び拡散予測プログラムによる解析がオンラインに近い形で実行できることを確認した。

【令和5年度実施内容及び成果】

(1) 予測システム

令和4年度に、3次元線量拡散予測システム用ETCCを制作し、原子力機構のFRSで10～100 $\mu\text{Sv/h}$ の高線量試験を実施した。令和5年度当初は、まずそのデータ解析を行った。大学で使える密封線源では、数 $\mu\text{Sv/h}$ を再現するのが限界であるため、前回の英知事業（平成30年度～令和2年度）に開発したピクセルシンチレータアレイ（以下、PSAと表記。）信号処理回路及び高線量対応トリガーの高線量状況での動作試験を行うためFRSで実験を行った。この解析から以下の仮量を実施した。

① ETCCはTPC部とPSA部が独立にデータを取り、それをデータ収集PC上で同じ事象のデータを探し合わせてETCCの事象を構成する。しかし、FRS実験ではこの事象再構成がずれてしまうデータが多発した。解析では原因が不明で、大学で線源を用いて再現を試みたができなかった。令和5年度のFRS試験の際、移動架台のモータがオン状態のとき、雑音が発生しトリガーに影響することが判明、測定時にモータをオフにするとデータ再構成の失敗はなくなり、これが原因であることが判明した。

② トリガーが200 Hz以上から急激に不感時間が増加し、1 kHz以上（30 $\mu\text{Sv/h}$ 以上）では不感時間が80%以上になり予想より1桁以上低い結果となってしまった。図3.1.2-1では、大学でTPC部のみを動作させ再現実験を実施、予定より1桁以上低い計数率でデータ転送が飽和している現象が見られた。原因として大学での実験では、トリガーが100 Hz前後のためデータ転送の待ち時間を100 msとしていたためであった。それ以後は1 m秒とした。1回のデータ転送で数十事象分をまとめて転送するため、原理的に10 kHz程度まで対応できる。

③ 図3.1.2-2 a、bは、数十 $\mu\text{Sv/h}$ の高計数率状態でのTPCのドリフト時間分布である。図3.1.2-2 cは、以前に得られた高計数率でのドリフト分布で、図3.1.2-2 fの原理図と一致している。これらを比較すると、まずドリフト時間の早いほうが大きく減衰している。また、高計数率ではドリフト時間幅5 μs 以上には偶発事象の分布が確実に見えるはずだが、それが

見えない。この 2 点の異常が見つかった。まず、偶発事象が見えない原因として、少し計数率を下げた図 3.1.2-2 d ではドリフト分布に段差が見え偶発事象の部分が見え始め、これで TPC の信号を測定するゲート幅が $5.2 \mu\text{s}$ と予想ドリフト時間と同程度であり、偶発事象を判定する余分の $3 \mu\text{s}$ が設定されてなかったためであった。ゲート幅を $8 \mu\text{s}$ に増やしたドリフト分布を図 3.1.2-2 e に示す。偶発事象が見えるようになったが、ドリフト分布前方の計数率減少は残っている。

④ このドリフト分布の変形現象は、同じく高線量場で測定を行った令和元年度の福島 1F 内実験では発生していない。大学で複数線源を用い線源の距離を接近させることで高計数率を再現し、ドリフト時間分布の変化を図 3.1.2-3 a のように明瞭に再現できた。令和 2 年度に、トリガーのスタート信号を計数率の高い PSA から 1 桁ヒット数の少ない TPC 信号に変えることでデータ収集の不感時間を 1 桁削減した。令和 2 年度当初の試験では、高計数率でもこの現象は起こらなかった。その後、より不感時間を減らすためにタイミングの微調整を実施した。令和 3 年度の複合研原子炉試験にこのトリガー法を採用したが、計数率が低く今回の問題は弱くしか発生せず気が付かなかった。しかし、再度見返すとわずかだが同様な変形が確認できた。対処療法であるが J-BEAM 社 ETCC は、令和 2 年度当初の最初の開発時と同じトリガー方式を採用し、すでにホウ素中性子捕捉療法（以下、BNCT と表記。）の高計数率実験（ $50 \mu\text{Sv/h}$ 程度）でこのような問題がないことが報告されていた（図 3.1.2-3 b）。そのため、実用化 ETCC も同じ初期トリガー形式を使用することで、この問題を図 3.1.2-4 に示すように解決した。

⑤ 令和 5 年 11 月の FRS 実験では、上記②の問題は解決されたが、新たにトリガーが 500 Hz 以上で急に不感時間が数%から 20%以上へと 1 桁の急激な増加が、図 3.1.2-5 のように観測された。画像試験は 3.2 節に述べるように、不感時間があってもデータは取得できたため実施できたが、原理的には数 kHz まで 10%以下の不感時間のはずであり、J-BEAM 社 ETCC は実際にこの不感時間で数十 $\mu\text{Sv/h}$ で動作した。後日、大学で PSA 部のみの計数率を変化させ調査すると、同様な不感時間の急激な増加を再現でき、その原因が ETCC に搭載された小型の基板 CPU の転送能力のパワー不足のため、ネットワークへのデータ転送が追い付かなくなったために発生したことがわかった。実用化 ETCC の PSA 部は、波形記録を採用しパイルアップ等に対応可能としたため、データ量が以前の ETCC と比べて倍近く増加したことで起こった問題であった。現在は外部のノート PC に肩代わりをさせることで、図 3.1.2-5 右のように 10 kHz 程度と予定通りの能力が得られ、令和 6 年 3 月の福島 1F 内測定実験に支障がないようにした。

⑥ 令和 5 年 11 月の FRS 試験は、 $10 \sim 25 \mu\text{Sv/h}$ 環境下での TPC 鉛遮蔽を 3.2 節で述べるようにシミュレーションに基づき設計し、TPC 前面、側面を 1 mm 、 3 mm 、 5 mm 厚と変えながら試験を実施し、最適な線量に対しての最適な遮蔽厚を求めた。結果は 3.2 節で述べる。

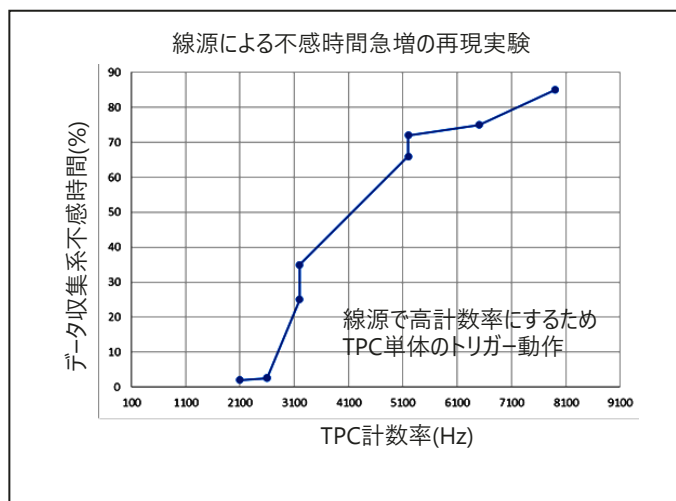


図 3.1.2-1 令和 5 年 3 月 FRS 実験で起こった不感時間急増の再現実験

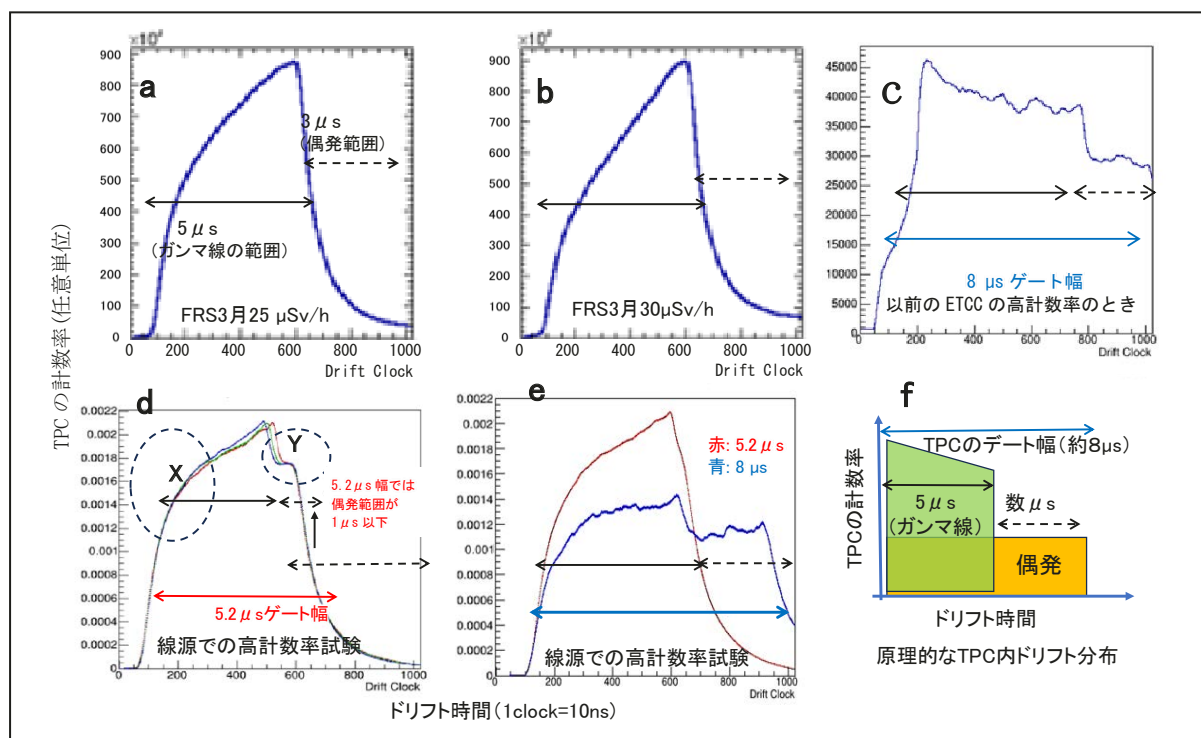
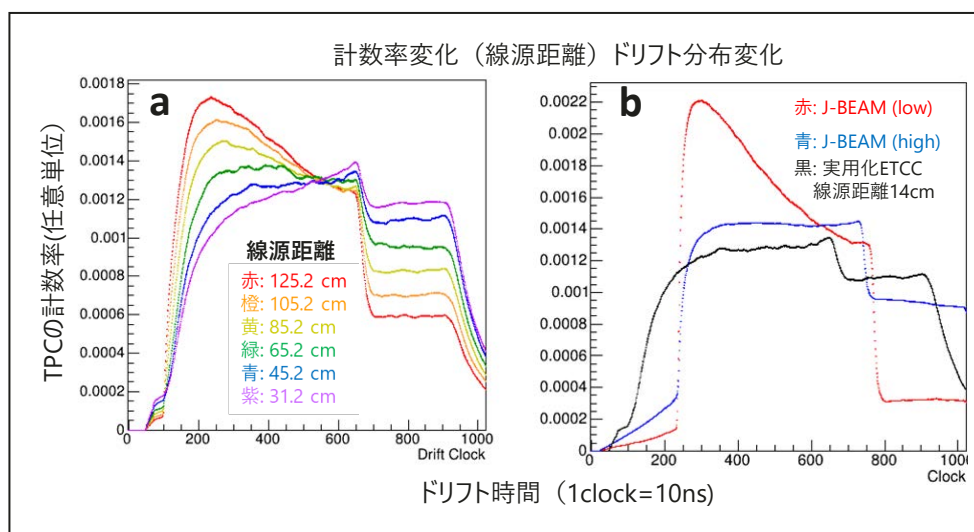


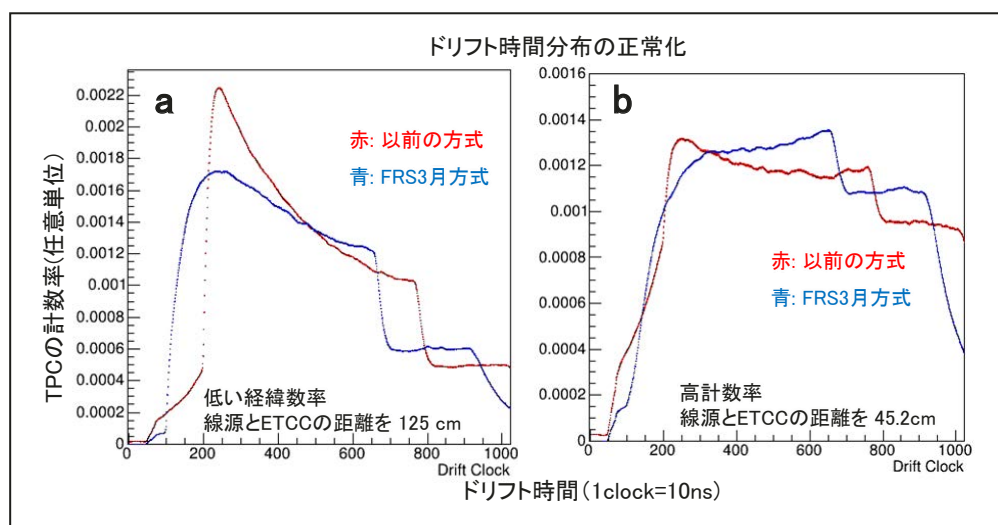
図 3.1.2-2 令和 5 年 3 月 FRS 実験の結果

- a) 25 $\mu\text{Sv/h}$ 強度での TPC のドリフト時間分布
- b) 30 $\mu\text{Sv/h}$ 強度での TPC のドリフト時間分布
- c) 令和 2 年度以前に高計数率で得られたドリフト時間分布
- d) 3 月 FRS 実験の大学での再現、TPC ゲート幅が 5.2 μs と短い (通常 8 μs)
- e) ゲート 8 μs に変更後のデータ
- f) 想定される高計数率でのドリフト時間分布



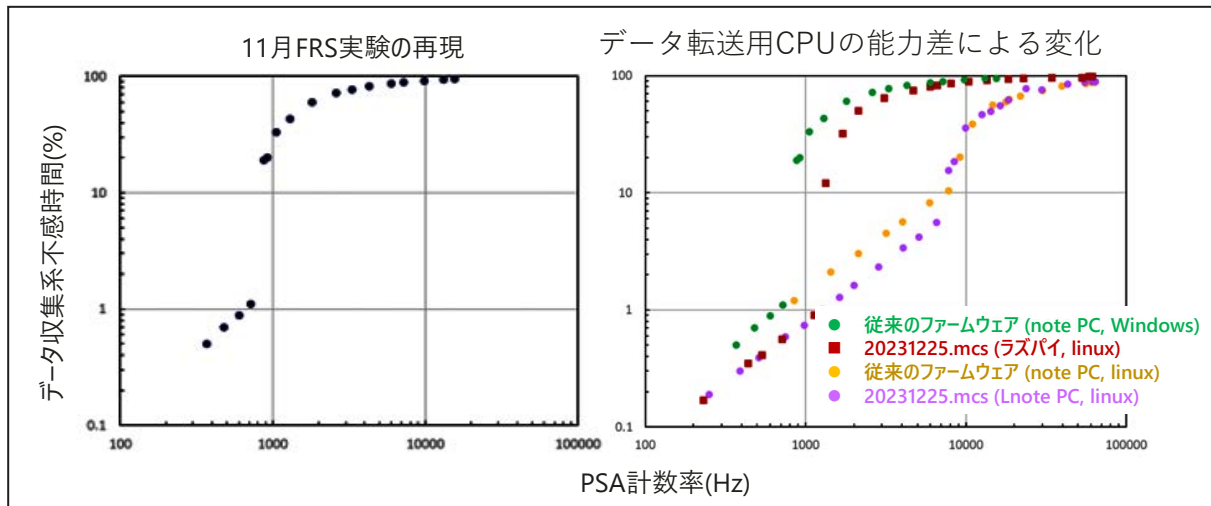
a) 計数率の増加とドリフト分布の変化測定、b) J-BEAM 社 ETCC の高計数率でのドリフト時間分（高計数率の場合分布がフラットになるが、時間が早い領域で効率が落ちる現象は出ない。）

図 3. 1. 2-3 令和 5 年 3 月 FRS 実験のドリフト時間分布の再現実験



a) 低い計数率、b) 高計数率、低クロックでの感度低下は改善した。

図 3. 1. 2-4 トリガー方式を令和 2 年度方式に変更後の実用化 ETCC のドリフト分布



大学での再現結果（左）、データ転送 CPU の能力による不感時間急増の発生する計数率変化（右）

図 3.1.2-5 令和 5 年 11 月 FRS 実験で起こったトリガー不感時間の急増

(2) 野外試験

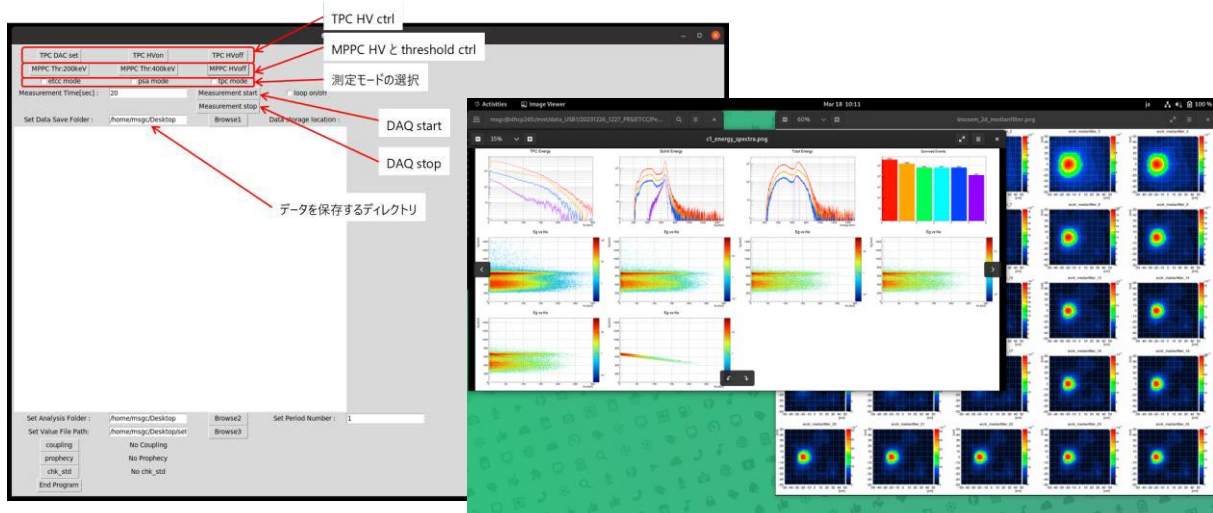
野外試験は、図 3.1.2-6 のように福島 1F 試験の準備として、令和 5 年 3 月 19 日に京都大学で実施した。福島 1F 測定と同程度の長時間（4 時間）の動作を行い、安定な動作を確認した。図 3.1.2-6 に示すように、福島 1F と同じ ETCC 本体とバッテリーとノート PC のみで測定を実施した。ETCC の操作は、すべて図 3.1.2-7 左に示すような GUI で操作可能となっている。

また、測定時にオンラインでの解析プログラム等の実証試験は、福島 1F 同等の高線量場、つまり、高計数率での大量のデータ転送を伴った試験が必要となるが、福島 1F 以外では FRS 試験でのみ実証可能となる。FRS では厚い遮蔽壁で覆われた実験室に装置を設置、データ解析 PC 等は外部の部屋に設置するため、Wi-Fi を用いたデータ転送は不可能である。しかし、現在 5G 規格の Wi-Fi は、一般の有線接続以上のデータ転送能力が保証されている。実用化システムは、ETCC と PC 間にはすべて標準ネットワークを使用しているため、Wi-Fi 利用でも同等以上の性能が得られる。令和 5 年 12 月の FRS 試験で、データ収集用ノート PC と高速ノート PC をネット接続しデータ収集と解析を並行して実行できることを確認した。そのときの高速ノート PC の解析データの表示を図 3.1.2-7 右に示す。また、別途原子力機構で開発された拡散予想プログラム及び 3 次元再構成プログラムともに高速ノート PC 上で動作することを確認した。

ネット接続で何台もの PC の並列処理が可能のため、福島 1F で炉建屋群を覆う数台の ETCC システム（データ収集用小型 CPU 搭載）と建屋外の簡易的な設置場所に設置した大容量タイプの 2～3 台のノート PC を組み合わせることで、放射能拡散の 3 次元モニター及び拡散時の拡散予想がオンラインでできることを原理的に証明した。現在の 5G 規格の Wi-Fi は、有線ネットワーク以上のデータ転送能力があるので、無線ネットワーク利用による心配は建物等の通信障害がなければ問題ない。



図 3.1.2-6 実用化 ETCC の野外試験の様子



ETCC 操作用 (左)、データ表示用 (右)

図 3.1.2-7 ETCC のオンライン操作のためのノート PC 上の GUI

3.1.3 まとめ

福島 1F 内での ETCC の実用化を実現するためには、高線量場でのシステムの実証試験が不可欠であることが、当然であるが不可欠なことが明確にわかった。実用化 ETCC システムは、前回の英知事業で複合研原子炉内の約 $2 \mu\text{Sv/h}$ 環境で長時間測定を実施したが、今回の問題は顕著に出ず見落とされた。FRS を用いることで初めて多くの問題が検知でき、福島 1F 内実験前に改善を行うことができた。但し、FRS の線量と福島 1F での線量の空間分布の違いを考慮しないと、FRS の線量が過大な負荷となる可能性もあり、シミュレーションとの併用の重要性も判明した。詳細は 3.2 節で述べる。

今まで福島 1F に導入されたガンマ線撮像装置は、このような高線量場での特性を事前に詳しく調査された報告は見ない。今後は我々のような手法が、高線量場での計測を正確に予想できる手法として確立させ、福島 1F の高線量場の正確な理解に繋がることを期待する。

3.2 1 mSv/h 環境での ETCC 画像取得法の開発（京都大学、再委託先：J-BEAM）

【令和 4 年度～令和 5 年度】

3.2.1 実施内容

1 mSv/h 環境下で ETCC が対応できるよう、(1) のシステムに電子密度の高い Ne-Ar-CF₄ ガスを使用するとともに、TPC 周囲の 0.5 mm 鉛シート及び他のシンチレータ部等に 3～5 mm 程度の鉛板による遮蔽対策を実施した。

本システムを用い、原子力機構の放射線校正施設で試験を実施した。また、福島 1F 内にて、このシステムが動作可能な炉建屋周囲から炉建屋周辺全域＋スカイシャインの 3 次元分布の測定を実施した。

3.2.2 成果

【令和 4 年度までの概要】

令和 4 年度は TPC 用のガスとして、偶発事象が 1 桁低減できる Ne-Ar-CF₄ ガスを用い、大学で使用可能な線源による ETCC の照射試験を行った。また、福島 1F 内の線量場をシミュレーション上に再現して、無遮蔽での ETCC の高線量率特性を推定評価した。なお、1 mSv/h で ETCC が対応できるよう、第一段階の遮蔽として TPC 部には ¹³⁷Cs からの 32 keV X 線対策の 0.5 mm 鉛シートで覆った。また、PSA 部にシミュレーションに基づき、側面及び低面を 1 cm 厚の鉛遮蔽で上面を 1 mm 厚鉛で遮蔽した。そのため PSA 部の熱を外部に逃がす水冷式冷却装置を導入した。

【令和 5 年度実施内容及び成果】

1 mSv/h 環境に近い高線量場で、ETCC が対応できるよう電子密度の高い Ne-Ar-CF₄ ガスの使用を考慮し、昨年は線源を用いた基礎性能の確認を行った。令和 5 年度は、高線量場での使用を確認し、さらには実績のある Ar ガスとの比較検討を行うことを考えた。そのため、現在 1.5 気圧 Ne-Ar-CF₄ ガスを充填している実用化 ETCC（令和 4 年度評価にも使用）のと同じ TPC を持つ、J-BEAM 社 ETCC と 2 気圧 Ar が充填してある実用化 ETCC の 2 つを用いて、FRS で 10 μSv/h-50 μSv/h 線量下での動作試験を令和 5 年 11 月（実用化 ETCC）、12 月（J-BEAM 社 ETCC）に分けて実施した。図 3.2.2-1 にそれぞれの FRS でのセットアップを示す。最初に行った実用化 ETCC では、TPC 前面、側面の遮蔽をともに行っている。12 月に実施した J-BEAM 社 ETCC では、11 月の結果及び以下に述べる FRS のビームの指向性から側面遮蔽が不要なことが判明したため、前面遮蔽のみで実験を行っている。両実験とも図 3.2.2-1 左に示すように線源方向を視野中心から 3～5 度ずらしてある。このような高計数率では、偶発事象の影響が大きく偶発事象は緩やかな前方集中を示す場合が多い。偶発事象と線源由来のガンマ線が識別できているかをこのずれの検出で判定する。

また、シミュレーションから求めた数十 μSv/h 環境で有効な 3～5 mm 厚鉛の TPC での鉛遮蔽の確認も実施した。但し、FRS は図 3.2.2-2 のようにガンマ線が ETCC の前方からのみ照射され線量がすべて前面からの入射となる。一方、福島 1F では線量は全方向から寄与すると考えられる。令和元年度の測定でも炉建屋から 100 m 以上離れた箇所ではほぼ様な線量分布であった。このような点を考慮し、FRS 実験の結果から福島 1F で ETCC が測定可能な線量強度の予想も実施した。

令和 5 年度の 1 回目は、11 月 21 日に実用化 ETCC を用いて行った。線源は主に ¹³⁷Cs を用い、⁶⁰Co の試験も実施した。3.1 節で述べたように、令和 4 年度の最初の FRS 実験で判明したトリ

ガー系の問題点を改善し、10～25 $\mu\text{Sv/h}$ の線量強度で測定を行った。トリガー系についての改善は、3.1 節で述べたように、この測定では 15 $\mu\text{Sv/h}$ 以上でトリガーが 500 Hz を超え不感時間が数十%と増大はしたが、取得したデータに問題はなく、TPC 遮蔽を前面、側面それぞれに 1 mm、3 mm、5 mm 厚遮蔽の効果を画像で確認した。TPC の遮蔽、特に側面は PSA 部上面から入り込む雑音ガンマ線に対して遮蔽効果が大きく、PSA 部上面に 1 mm、3 mm、5 mm の遮蔽を設置したのと同様な効果がある（図 3.5.2-1 参照）。また、TPC 周囲に 0.5 mm 鉛シートを配置し低減効果がなかったことから 1 mm の鉛で覆った。

また、2 回目は 12 月 22 日に実施し、上に述べたように J-BEAM 社 ETCC を用いた。この ETCC は、シンチレータ部の回路が BNCT 環境の高計数率に対応するため、実用化 ETCC と異なりパルスの電荷のみを記録しパルス波形は記録しないため、データ数が少なく実用化 ETCC より高計数率の面では優れている。そのため、実際の BNCT 環境での実績もあり、FRS 実験でも実用化 ETCC のようなトリガー系やデータ転送の問題は起きず、ガス及びシンチレータの種類、遮蔽構造による画像への効果を明確に確認できることが期待できた。今回は、FRS の 10～50 $\mu\text{Sv/h}$ 環境で画像測定を実施した。

上記試験結果に基づき、令和 6 年 3 月 26、27 日に福島 1F 内にて、このシステムが動作可能な炉建屋周囲から炉建屋周辺全域＋スカイシャインの 3 次元分布の測定を実施した（3.6 節参照）。このデータについては、現在データの解析中である。

以下に、2 回の FRS 実験から得られた成果（FRS 実験での画像データ解析の結果）を述べる。

① 11 月の実用化 ETCC の試験では予期せぬ不感時間の増加問題が発生し、その原因究明、その画像へ影響がないことの確認でかなりの時間が取られ、測定項目を FRS 実験で有効な TPC 前面の鉛厚の効果判定に絞った。特に、令和 6 年 3 月に予定した福島 1F 全域の測定で有効を考えられる TPC 前面 5 mm 厚、側面 3 mm 厚のデータを十分に取得した。線量は 10、15、25 $\mu\text{Sv/h}$ に設定。測定された等角射影の画像を図 3.2.2-3 に示す。線量調整は、線源と ETCC の距離で行うため、線源の角度が 1 度程度変化していくが、それが明確に測定できている。また、線源の方向へのガンマ線の集中も明確に測定できた。 ^{60}Co の画像も同様な精度で測定できた（図 3.2.2-6）。このように実用化 ETCC は、不感時間増加の問題が解決できれば FRS で 25 $\mu\text{Sv/h}$ 以上、福島 1F 環境で 100 $\mu\text{Sv/h}$ 程度で測定できることがわかった。

② 12 月の J-BEAM 社 ETCC を用いた試験は、すでにこの ETCC が BNCT 環境で 50 $\mu\text{Sv/h}$ 以上での動作実績があること、また、TPC 部の構造が実用化 ETCC と全く同じ点を考慮し、TPC 部の鉛遮蔽の画像に対する効果の検証を主に実施した。今までの FRS 実験から、ガンマ線は装置前方向の成分が大半であり、TPC 前方以外の遮蔽の効果は小さいことがわかっているため、TPC 前面遮蔽の厚みのみを 1 mm、5 mm の 2 つに対して実験を行った。図 3.2.2-4 に TPC 及び PSA の計数率と線量の関係を示す。まず、鉛 1 mm でも TPC、PSA ともに線形性を維持している。実用化 ETCC の PSA は、 Gd_2SiO_5 (GSO) で J-BEAM 社 ETCC の $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (GAGG) より短パルスなので、実用化 ETCC も同等以上の線形性が期待できる。鉛 5 mm 厚にすることで計数率が約半分に減衰（鉛の放射線長は 5 mm を反映している）している。また、鉛 5 mm 厚のとき、50 $\mu\text{Sv/h}$ においても不感時間は 10% 台と低く、問題なく動作することがわかった。図 3.2.2-5 に、10～50 $\mu\text{Sv/h}$ の線量での画像の変化を示す。11 月 FRS 試験より見やすくするため画像にスムージングを加えている。線源の画像中央からのずれは、11 月 FRS 実験と同じで度数である。このずれは、50 $\mu\text{Sv/h}$ で鉛厚 1 mm 以外は正確に検出できている。50 $\mu\text{Sv/h}$ の 1 mm 厚でも位置のずれは検出できたが、非常に広がりばやけた画像となり、ずれを数値的に判断するのが困難である。それ以外の線量では、1 mm 厚でも線源はしっかり画像化できているが、ど

の線量でも 5 mm 厚のほうが、ぼけが少ない画像が得られている。これらの結果から福島 1F と FRS 実験の線量換算率を考慮すると、福島 1F では鉛 5 mm 厚遮蔽（TPC 部）で、200 μ S 付近の撮像が可能となる可能性が高いことがわかった。

③ 11 月、12 月の FRS 実験の結果と FRS の線量の角度分布と福島 1F の線量の方向依存性から両者の線量換算率を求めることで、上記の結果から福島 1F で使用可能な線量を推定することができる。定量的に行うため図 3.2.2-7 に示すように、FRS と福島 1F での放射線場をシミュレーション内に再現した。それを基に、各場所での TPC 及び PSA のスペクトルを図 3.2.2-8 のように求めた。これを基に、表 3.2.2-1 に FRS と福島 1F である線量のとときの TPC、PSA 部の予想計数率を求めた。それらの計数率を比較し、表にあるように PSA 部に遮蔽を設けた実用化 ETCC は、福島 1F では FRS の 3 倍の線量、さらには表にあるようなトリガーの工夫で 2～3 倍の改善が期待でき、約 300 μ Sv/h 環境まで使用の可能性が出てきた。これくらいの高線量場では、PSA のシンチレータを半分の 1 放射線長で十分であり（実際 J-BEAM 社 ETCC は 1 放射線長のシンチレータを使用）、この変更も行えば、さらに安定した使用が期待される。また、FRS 実験での実用化 ETCC の 1 cm 厚遮蔽有の PSA 部と遮蔽がない J-BEAM 社 ETCC のスペクトルを、図 3.2.2-9 に示すように比較することで、実用化 ETCC では PSA 部の遮蔽により 400 keV 以下のガンマ線と 662 keV のラインガンマ線の比率が、J-BEAM 社 ETCC より 1 桁近い低下が見られ、前年のシミュレーションでの予想スペクトルの特徴と一致する。これに TPC 部に 5 mm 厚遮蔽の本実験で得られた減衰率を考慮すると、令和元年度に実施した遮蔽のない ETCC を用いた福島 1F 計測のスペクトル（図 3.2.2-9 右）を基に上の減衰率を加えると、図に示す赤線のようにガンマ線が減少し、以前のトリガーの計数率 3～5 kHz の 1 桁以上の削減が期待できる。実際、令和 6 年 3 月に実施した福島 1F 試験では、前回と同様な線量下で 100～500 Hz と 1 桁以上のトリガーの低減が測定された。

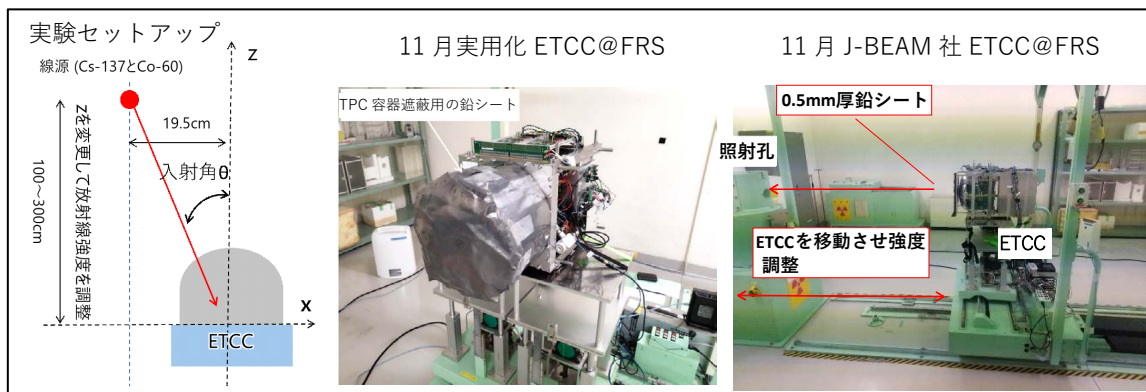


図 3.2.2-1 11、12 月 FRS 実験のセットアップと実用化、J-BEAM 社各 ETCC

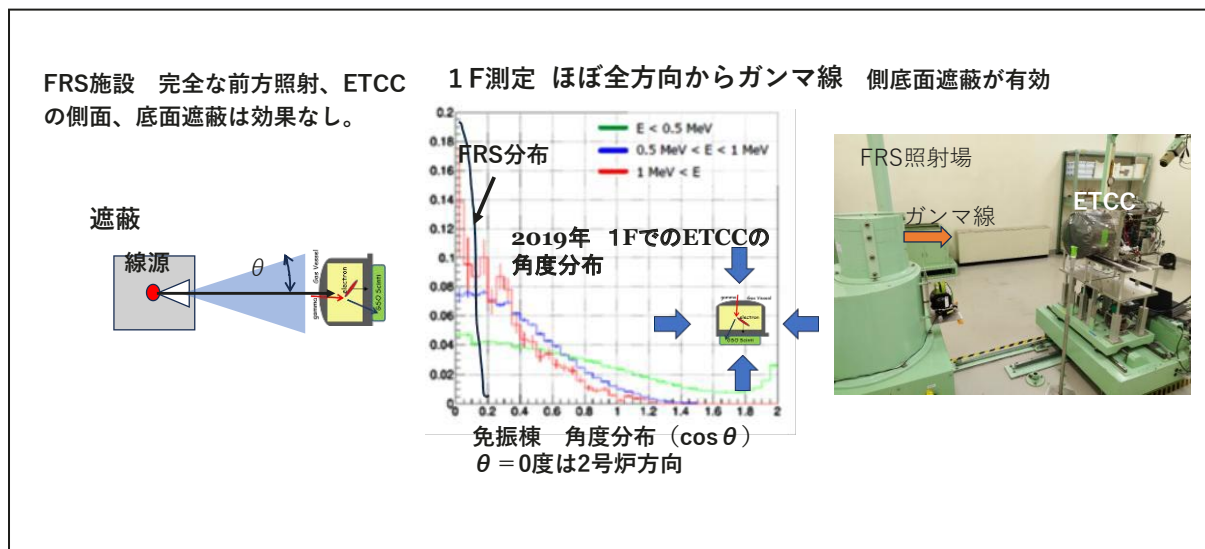
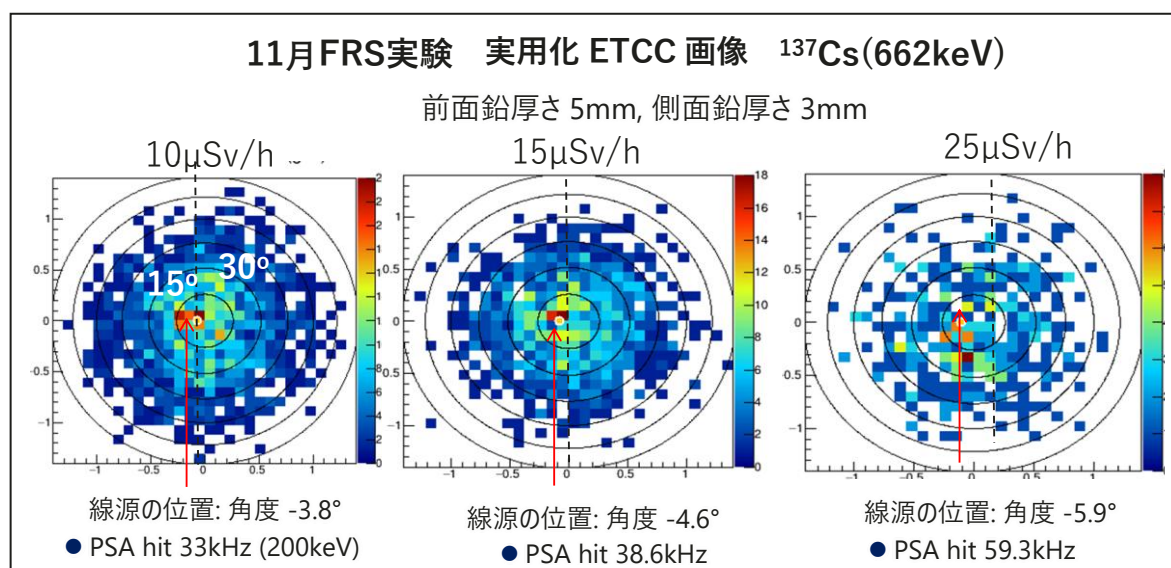


図 3.2.2-2 FRS 実験と福島 1F で放射線場の違いの模式図

図 3.2.2-3 実用化 ETCC の FRS 実験の高線量場での画像結果
(ガンマ線の集中した箇所と線源の中心からの移動角度の一致で精度を判定)

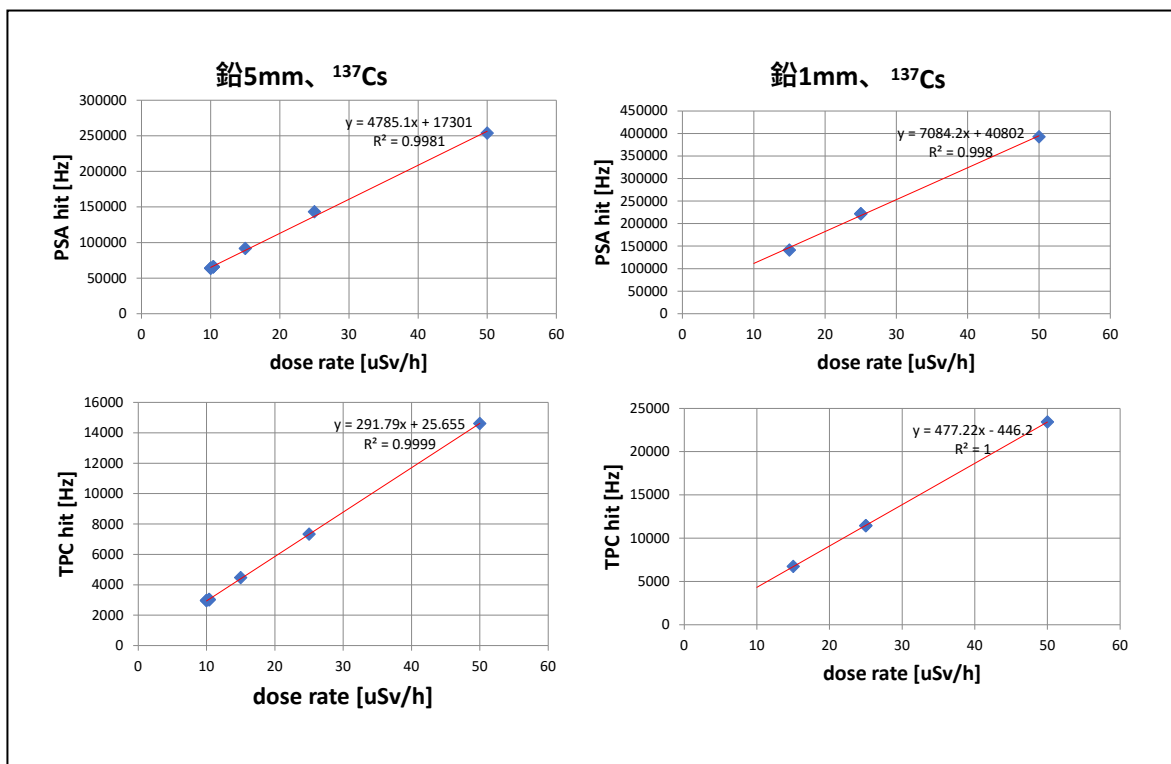


図 3.2.2-4 J-BEAM 社 ETCC の FRS 実験の TPC、PSA の計数率と線量の関係

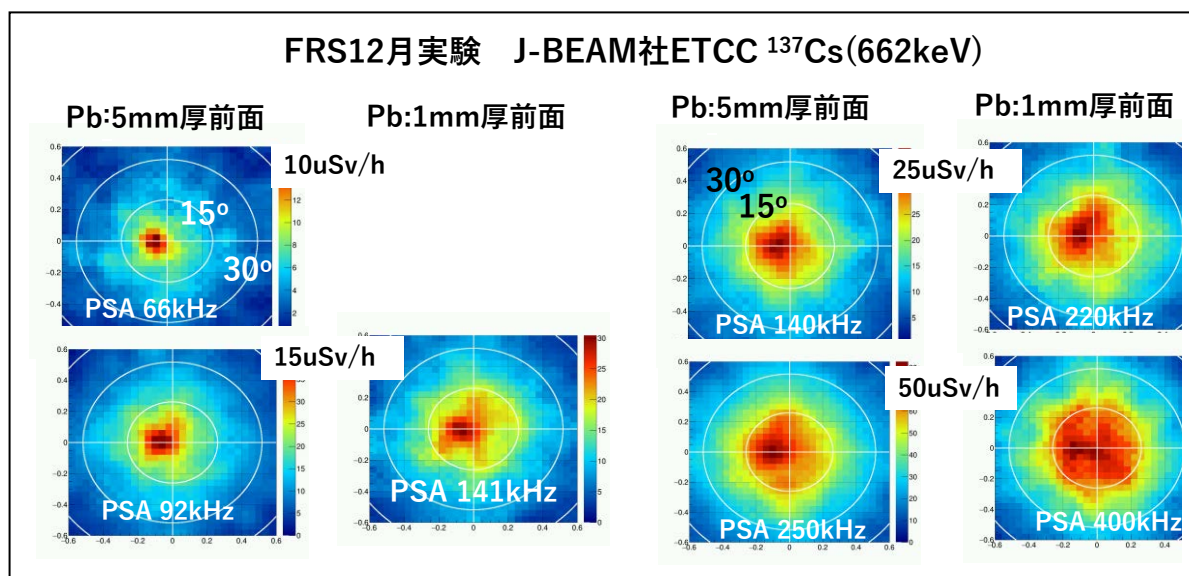


図 3.2.2-5 J-BEAM 社 ETCC の FRS 実験の高線量場での実用化 ETCC の画像結果
 (画像には、実用化 ETCC と異なり見やすいようにスムージングがほどこされている。
 精度は同じく角度のずれで判定、1 mm 厚遮蔽では像が大きくぼやけるのがわかる。)

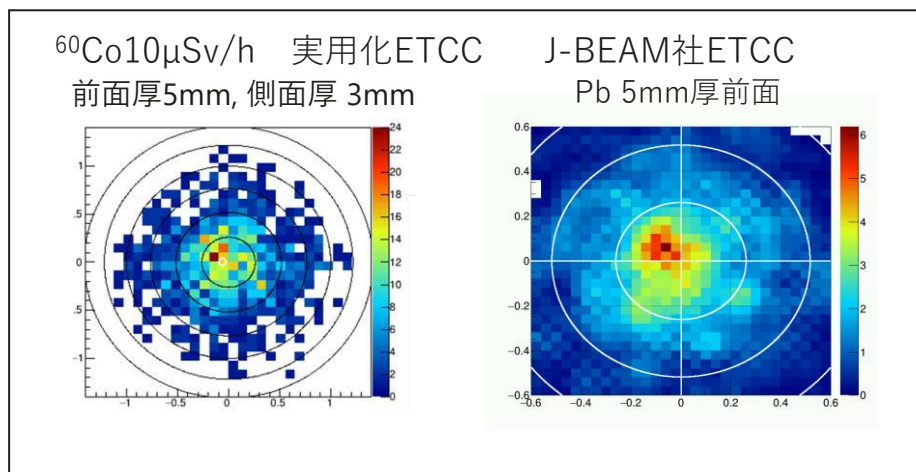


図 3. 2. 2-6 FRS 実験の高線量場での J-BEAM 社、実用化各 ETCC の ^{60}Co の画像結果

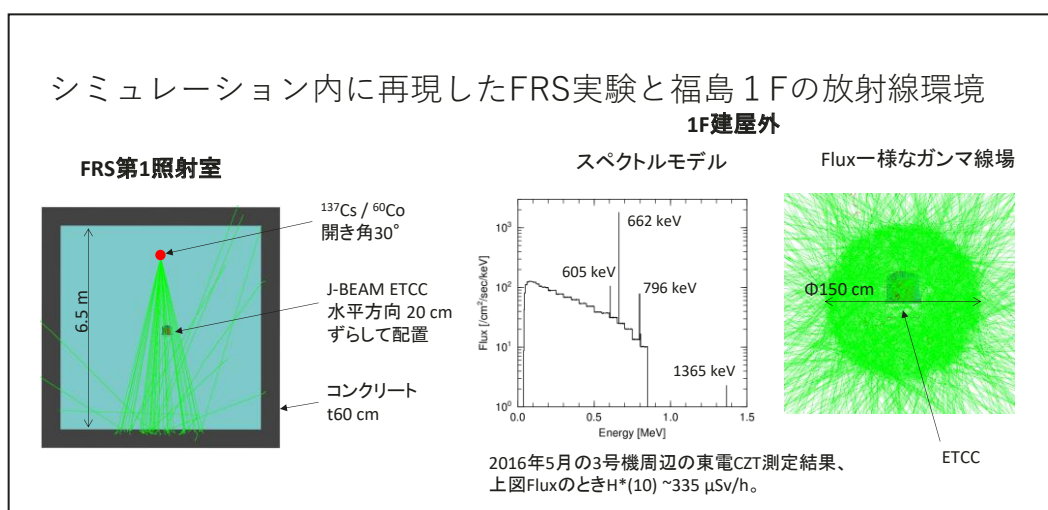


図 3. 2. 2-7 FRS と福島 1F での放射線環境のモデル化

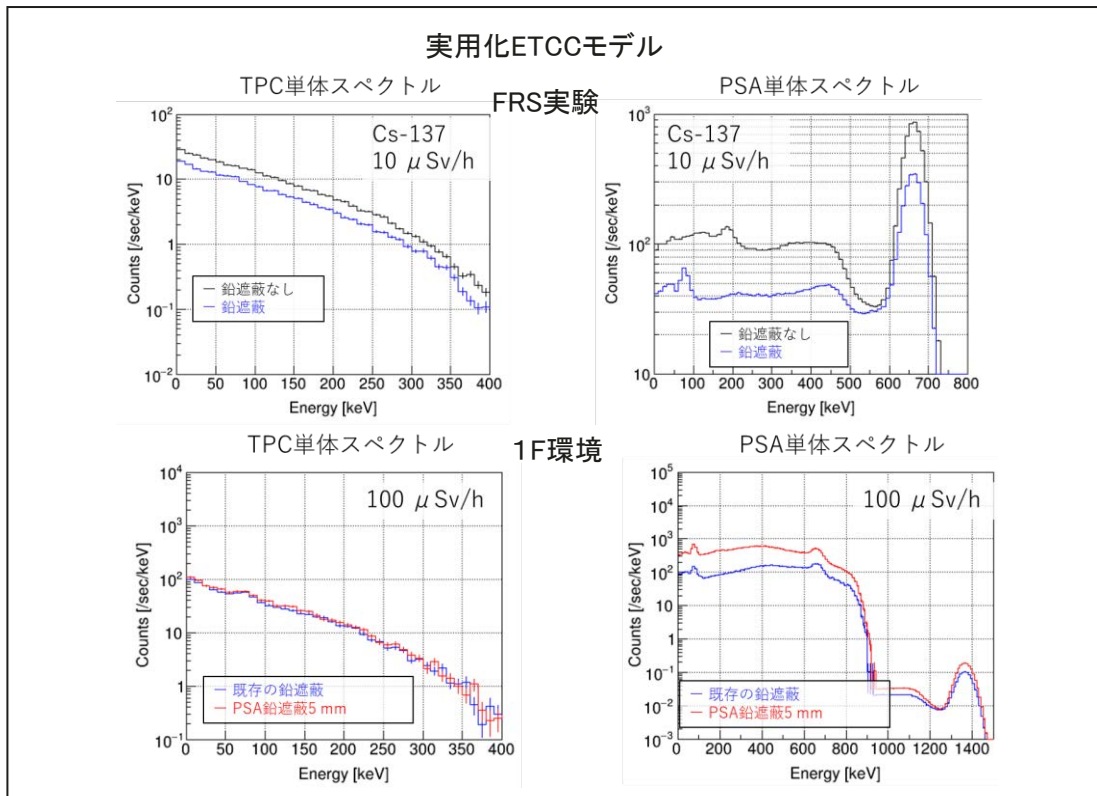


図 3.2.2-8 実用化モデルと FRS と福島 1F で得られるスペクトルのシミュレーション結果

表 3.2.2-1 FRS と福島 1F での各 ETCC の計数率の差から換算率の算出表

実用化ETCCモデル Sim.計数率の比較		
	FRS Cs-137	1F建屋外
H*(10)線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	50	100
鉛遮蔽	p1の遮蔽	p3の遮蔽
TPC計数率 (kHz)	10	9.4
PSA計数率 > 300 keV (kHz)	165	95

J-BEAM ETCCモデル Sim.計数率の比較		
	FRS Cs-137	1F建屋外
H*(10)線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	50	100
鉛遮蔽	前面 5 mm	全周 5mm
TPC計数率 (kHz)	10	9.6
PSA計数率 > 300 keV (kHz)	140	140
コインシデンス (kHz)	0.24	0.12

実用化ETCC FRS 50 $\mu\text{Sv/h}$ は、1F建屋外 170 $\mu\text{Sv/h}$ に相当(PSA 計数率から推定)
J-BEAM-ETCC FRS 50 $\mu\text{Sv/h}$ は、1F建屋外 100 $\mu\text{Sv/h}$ に相当

改善策として、

- オンラインでfully contained判定 → TPC計数率 4分の1
- PSA閾値を400 keVに引き上げ → PSA計数率 1.5分の1

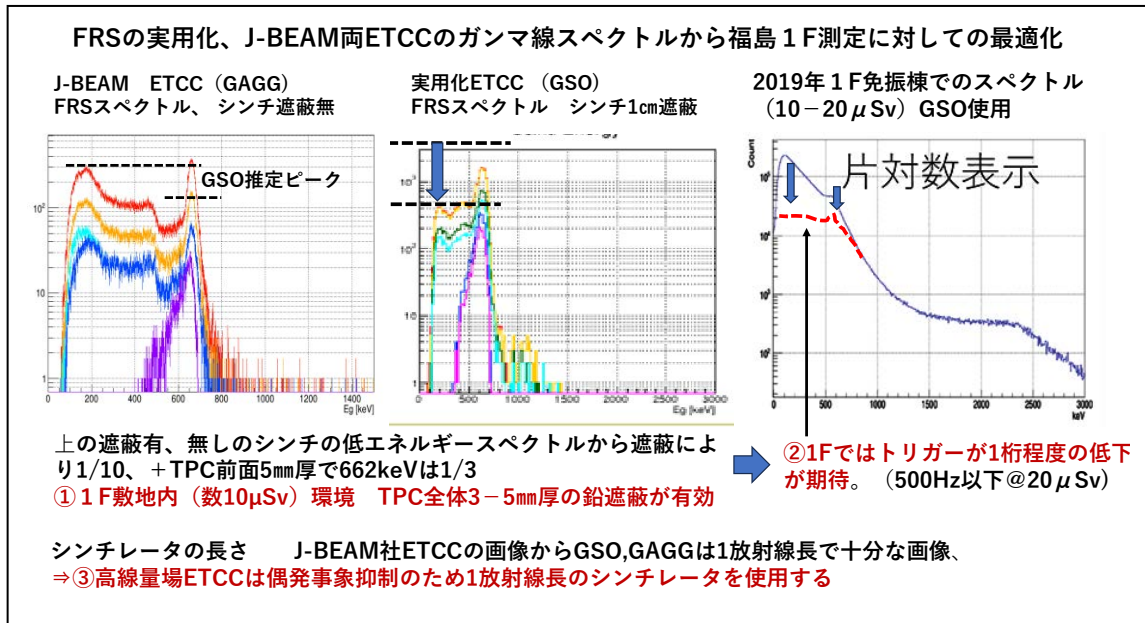


図 3.2.2-9 FRS の各 ETCC のスペクトルから福島 1F 測定に対しての予想と最適化

3.2.3 まとめ

コンプトン散乱を用いるガンマ線カメラは高線量場では、偶発事象が線量の約2乗で急激に増加する。そのため、今までは福島 1F 以外の除染現場でその使用可能性が試験されてきた。一方、福島 1F 内では、小型で3~5 cm 厚の鉛遮蔽が可能な小型のピンホール型のガンマ線カメラが用いられてきたが、シミュレーションと校正線源場を用いて系統的に遮蔽設計を行った報告はほとんどなかった。ETCC は電子飛跡を測定するため、ある程度のガス体積を有する TPC が必要となり、ピンホールカメラのような 10 cm 立方程度の小型化は無理であり、5 cm 厚鉛で全体を覆うのはかなり困難である。そのため、詳細な検討を行い有効な鉛遮蔽厚の最適化を行った。この研究により TPC 及び PSA 部の遮蔽厚と使用可能な線量の予想が可能となった。本研究で令和 6 年度に目指す原子炉建屋周辺の 100~300 μ Sv/h 環境下では、今までと同じようなワゴン車に ETCC を搭載、設置後に鉛遮蔽を人力により、短時間で設置することが可能な範囲の遮蔽 (5 mm 厚程度の鉛遮蔽) で測定を実現できると考えている。

3.3 構造体内部 3 次元線量分布測定法の開発（京都大学、連携先：原子力機構）

【令和 4 年度～令和 5 年度】

3.3.1 実施内容

^{134}Cs の 0.79 MeV、1.36 MeV 等の各ラインガンマ線の透過率を考慮した逆写像投影プログラムを作成し、炉建屋周辺からの 2 次元計測から内部を透視して Cs の 3 次元分布を推定する手法を開発した。

3.3.2 成果

【令和 4 年度までの概要】

令和 4 年度は、構造体内部の 3 次元線量分布を推定する手法の開発に向けた予備解析として、放射線挙動解析コード（以下、PHITS と表記。）[6]を用いて、単色エネルギーガンマ線を様々な厚みのコンクリート壁に入射し、透過後のフルエンスをシミュレーション解析した。コンクリート壁透過距離に対するガンマ線直達成分の強度のシミュレーション結果から、ガンマ線のコンクリートに対する質量減衰係数を導出した。この解析結果に基づき、コンクリート壁を透過したガンマ線のエネルギースペクトルからコンクリート壁の厚さを推定するプログラムを開発し、単色ガンマ線ピーク成分の比較によりガンマ線が透過したコンクリート壁の厚さを推定可能なことを確認した。この結果から、 ^{134}Cs の 0.79 MeV、1.36 MeV 等の各ラインガンマ線の透過率を考慮した解析により、炉建屋周辺からの 2 次元計測から内部を透視して Cs の 3 次元分布を推定する手法の実現可能性が示された。

【令和 5 年度実施内容及び結果】

炉建屋を取り囲むように複数地点に設置した ETCC のガンマ線画像を逆解析して、炉建屋内部の 3 次元線源分布を推定する手法を開発した。本推定手法は、令和 2 年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業「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」[5]において開発した、放射性プルームの定量可視化手法[7]及び複合研原子炉における ^{41}Ar のガンマ線画像から、炉壁から拡散した ^{41}Ar の 3 次元分布を解析した手法をベースにして、2 つの解析手法を開発した。また、開発した解析手法の有効性を確認するために、簡略化した炉建屋の条件で試験解析を実施した。

(1) 解析手法

第 1 の解析手法は、放射性プルームの定量可視化手法[7]で用いているベイズ推計に基づく逆解析法を適用したものである。元の解析手法では、時々刻々変化する大気中の放射性プルームの 3 次元濃度分布を推定するため、大気拡散シミュレーションによる濃度分布先験情報が必要であるが、炉建屋内部の線源分布の推定においては、濃度分布は時間変化しないとみなせるため、濃度分布先験情報は炉建屋内部空間として固定している。ETCC で得られるガンマ線画像データの全ピクセルの計数値を縦ベクトル $\mathbf{y}$ （1 画像あたりのピクセル数×画像枚数だけの要素を持つ）として、同様に逆解析領域の全セルの核種濃度を縦ベクトル $\mathbf{x}$ （逆解析領域の全セル数の要素を持つ）として表す。逆解析用の応答関数行列を $\mathbf{R}$ （行数： $\mathbf{y}$ の要素数、列数： $\mathbf{x}$ の要素数）とすると、 $\mathbf{y} = \mathbf{R}\mathbf{x}$ で関係付けられる。ETCC で得られたガンマ線画像データ $\mathbf{y}$ から逆問題を解くことによって、先験分布の範囲に限定された核種濃度分布 $\mathbf{x}$ を求める。この逆問題の解は、以下のコスト関数 J を最小化する最適化問題を解くことで得られる。

$$J = [(\mathbf{R}\mathbf{x} - \mathbf{y})^T \mathbf{C}(\mathbf{y})^{-1} (\mathbf{R}\mathbf{x} - \mathbf{y}) + (\mathbf{x} - r\mathbf{x}_0)^T \mathbf{C}(r\mathbf{x}_0)^{-1} (\mathbf{x} - r\mathbf{x}_0)]/2 \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_0$ は核種濃度の先験分布、 r は初期調整率で $\mathbf{R}\mathbf{x}_0$ の全要素の積分値と $\mathbf{y}$ の全要素の積分値が一致するようにスケーリングした値である。 $\mathbf{C}(\mathbf{X})$ は、ベクトル $\mathbf{X}$ に関する不確実性の共分散行列で、 $\mathbf{X}$ の要素とクロネッカー δ を用いて、以下のように定義される。

$$C(\mathbf{X})_{ij} = \sigma X_i^2 \delta_{ij} \quad (2)$$

コスト関数 J が最小になる大気中核種濃度分布 $\mathbf{x}$ は、以下の式で求められる[8]。

$$\mathbf{x} = r\mathbf{x}_0 + [\mathbf{R}^T \mathbf{C}(\mathbf{y})^{-1} \mathbf{R} + \mathbf{C}(r\mathbf{x}_0)^{-1}]^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{C}(\mathbf{y})^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{R}r\mathbf{x}_0) \quad (3)$$

逆解析では、式(3)で求まった推定分布 $\mathbf{x}$ を右辺の $\mathbf{x}_0$ に代入し、改めて $\mathbf{x}$ を求めるという逐次計算を繰り返し行い、推定分布の精度を高めていく。但し、式(3)右辺第2項の逆行列は非常に計算コストがかかるため、逆行列中の $\mathbf{x}_0$ だけは推定分布 $\mathbf{x}$ で置き換えず初期値 $\mathbf{x}_0$ に固定することで逆行列の再計算を省き計算時間の短縮を図っている。さらに、 $\mathbf{C}(\mathbf{y})$ と $\mathbf{C}(r\mathbf{x}_0)$ については、簡略化のために σ_{y_i} は $\mathbf{y}$ の要素の最大値、 σ_{rx_i} は $r\mathbf{x}_0$ の要素の最大値にスケールファクター A をかけたものを用いる。 A は、解析条件に依存するパラメータで解析領域ごとにチューニングする必要があるが、これまでの試験結果から10程度が最適な値である。

第2の解析手法は、スパースモデリングのL0ノルム最適化に基づく直交マッチング追跡法を用いた。第1の解析手法と同様に、ETCCで得られるガンマ線画像データ $\mathbf{y}$ と炉建屋内部の核種濃度分布 $\mathbf{x}$ は、応答関数行列 $\mathbf{R}$ を用いて $\mathbf{y} = \mathbf{R}\mathbf{x}$ で関係付けられる。ここで、 $\mathbf{x}$ の1つの要素 x_i (1つのセル i の核種濃度)だけが値を持つと仮定した場合のガンマ線画像($\mathbf{R}\mathbf{x}$)とETCCで測定されたガンマ線画像($\mathbf{y}$)の差異($\mathbf{R}\mathbf{x} - \mathbf{y}$)の各成分の2乗和が最小となるセル i を求める。このセルは、 $(\mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_i)^{-1} (\mathbf{R}_i^T \mathbf{y})^2$ が最大となるセルを探索することで特定され、 x_i の値は次式で求められる。

$$x_i = (\mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_i)^{-1} \mathbf{R}_i^T \mathbf{y} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{R}_i$ は $\mathbf{R}$ から i 列目だけを抜き出した縦ベクトル、上付きの T は転置を表す。次に、 x_i だけが値を持つ濃度分布 $\mathbf{x}_i$ によるガンマ線画像を元のガンマ線画像から差し引いた残差画像($\mathbf{y} - \mathbf{R}\mathbf{x}_i$)について、上記と同様に1つのセルだけが値を持つとした場合のガンマ線画像との差異の各成分の2乗和が最小となるセルを探索し、その濃度を求める。以上の操作を繰り返すことで、濃度が存在するセルの候補地点と濃度値をガンマ線画像に対する寄与度の高い順に求めることができる。また、第1の解析手法の式(3)右辺第2項のような逆行列($\mathbf{x}$ の要素数 $\times \mathbf{x}$ の要素数)の計算が必要ないことから、 $\mathbf{R}$ が大規模な行列の場合でも適用できる利点もある。

(2) 試験条件

簡略化した炉建屋として、外壁の厚さ1 m、内部空間の大きさが50 m $\times$ 50 m $\times$ 50 mの立方体建屋の中心に10 m $\times$ 10 m $\times$ 40 mの直方体形状の原子炉が配置され、内部空間には壁が均一配置(空間の1%)する体系を設定した。また、原子炉は外壁の10倍の遮蔽効果があると仮定し、外壁のコンクリートと同じガンマ線の質量減衰係数を用いるが、10倍の密度を与えることで遮蔽効果の違いを考慮した。この試験体系に対して、ETCCのガンマ線画像生成用と逆解析用の

2つの計算格子を設定した。ETCCのガンマ線画像生成用は、水平方向を炉建屋の周囲10 mまで拡張した70 m×70 m×50 mの解析領域を1 m×1 m×1 mメッシュで分割した70 m×70 m×50 mの計算格子とした(図3.3.2-1)。一方、逆解析用は、10 m×10 m×10 mメッシュの計算格子とし、原子炉及び内部空間は各セルがそのまま対応しているが、外壁については厚さが10 mとなってしまうことから、密度を1/10にすることで透過するガンマ線の減衰を厚さ1 mの場合と同等になるようにした。逆解析領域は、水平方向を外壁部分の10 mとその周囲10 mまで拡張した90 m×90 m×50 mを10 m×10 m×10 mメッシュで分割した9×9×5の計算格子とした(図3.3.2-2)。

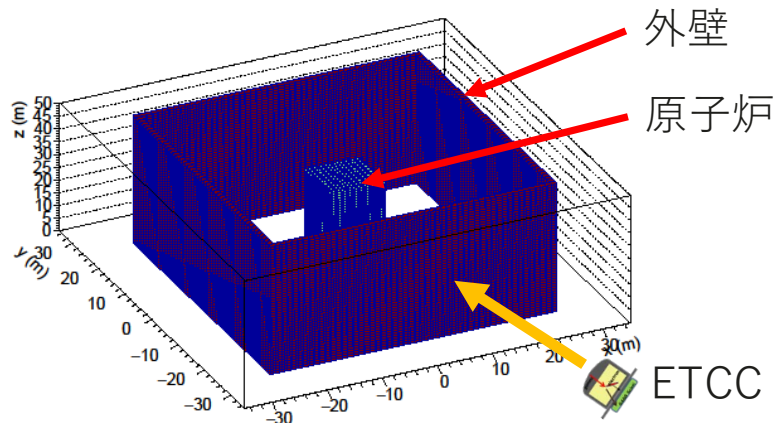


図 3.3.2-1 ETCCのガンマ線画像生成用の計算格子体系
(70 m×70 m×50 mの解析領域を1 m×1 m×1 mメッシュで分割)

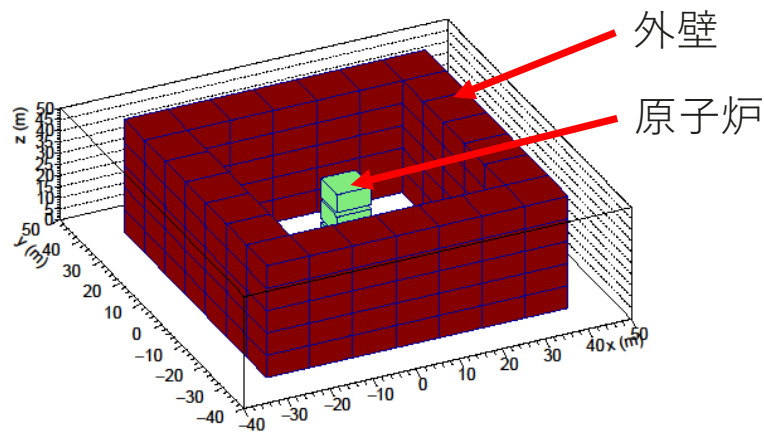


図 3.3.2-2 逆解析用の計算格子体系
(90 m×90 m×50 mの解析領域を10 m×10 m×10 mメッシュで分割)

これらの解析体系において、ETCC計測で想定されるガンマ線強度入射角度分布(ガンマ線画像)を各計算メッシュに存在する核種濃度を関連付ける応答関数行列を作成した。ここでは、原子炉中心を基準として、北、東、南、西方向50 m地点の地上1 mにETCCを配置し、原子炉

中心の高度 25 m 地点の方向を視野の中心として、100 度×100 度の撮像範囲を解像度 5 度（20×20 ピクセル）でガンマ線強度分布を計測すると設定した（図 3.3.2-3）。

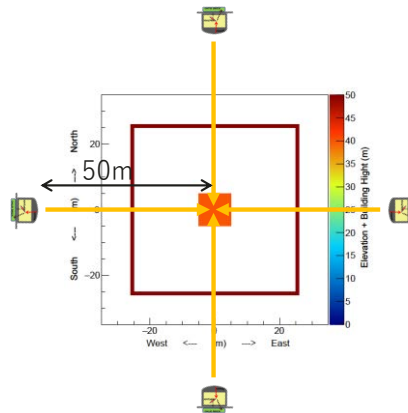


図 3.3.2-3 ETCC の設置地点と計測方向

炉建屋内の線源として ^{134}Cs を想定し、0.79 MeV、1.36 MeV の 2 つのラインガンマ線について、応答関数行列を 2 つの計算格子で ETCC の配置地点ごとに作成した。ETCC ガンマ線画像の生成においては、 ^{134}Cs がガンマ線画像生成用計算格子の 1 m×1 m×1 m の単一セル内に 1 TBq または 0.1 TBq 存在し、それぞれ 2 か所に配置された条件で次の 3 つの試験ケースを作成した。

ケース 1：

- ・線源 1：座標（-20 m、-20 m、25 m）放射能量 1 TBq
- ・線源 2：座標（20 m、20 m、25 m）放射能量 1 TBq
- ・線源 3：座標（-20 m、20 m、25 m）放射能量 0.1 TBq
- ・線源 4：座標（20 m、-20 m、25 m）放射能量 0.1 TBq

ケース 2：

- ・線源 1：座標（-20 m、0 m、25 m）放射能量 1 TBq
- ・線源 2：座標（20 m、0 m、25 m）放射能量 1 TBq
- ・線源 3：座標（0 m、20 m、25 m）放射能量 0.1 TBq
- ・線源 4：座標（0 m、-20 m、25 m）放射能量 0.1 TBq

ケース 3：

- ・線源 1：座標（-20 m、0 m、25 m）放射能量 0.1 TBq
- ・線源 2：座標（20 m、0 m、25 m）放射能量 0.1 TBq
- ・線源 3：座標（0 m、10 m、15 m）放射能量 1 TBq
- ・線源 4：座標（0 m、-10 m、15 m）放射能量 1 TBq

各ケースの線源配置と生成したガンマ線画像の例として、南に設置した ETCC のガンマ線画像を図 3.3.2-4 に示す。 ^{134}Cs のラインガンマ線は、発生率が小さく透過率の高い 1.365 MeV のほうが 0.796 MeV より検出強度が大きくなることからわかる。また、ケース 1 については、試験的に炉建屋内部空間に内部壁が存在しないと仮定したガンマ線画像も作成し、内部壁の有無によるガンマ線画像の相違を確認した。炉建屋内部の 4 隅の高度 25 m 地点に 4 つの線源を配置しているが、内部壁が存在しない場合は ETCC の設置地点から遠い線源のガンマ線強度に近い

線源のガンマ線強度より高くなった。これは、遠方の線源のほうが ETCC 設置地点からの俯角が小さく、外壁を通過する距離が短くなり減衰が少なくなったためである。これに内部壁を追加すると、遠方の線源の減衰が大きくなりガンマ線強度の大小関係が逆転したが、その差は小さい。さらに、試験的に炉建屋の対角線方向である北東方向 50 m 地点に ETCC を設置した場合のガンマ線画像を作成したところ、北方向や東方向に比べて同じ線源からのガンマ線強度が 10 桁近く低下する結果となった。これは、外壁を斜めに通過することで距離が長くなり減衰が大きくなったためであり、ガンマ線の検出強度を大きくするためには、ETCC に入射するガンマ線の方が外壁に対してなるべく垂直となるように ETCC を設置する必要がある。

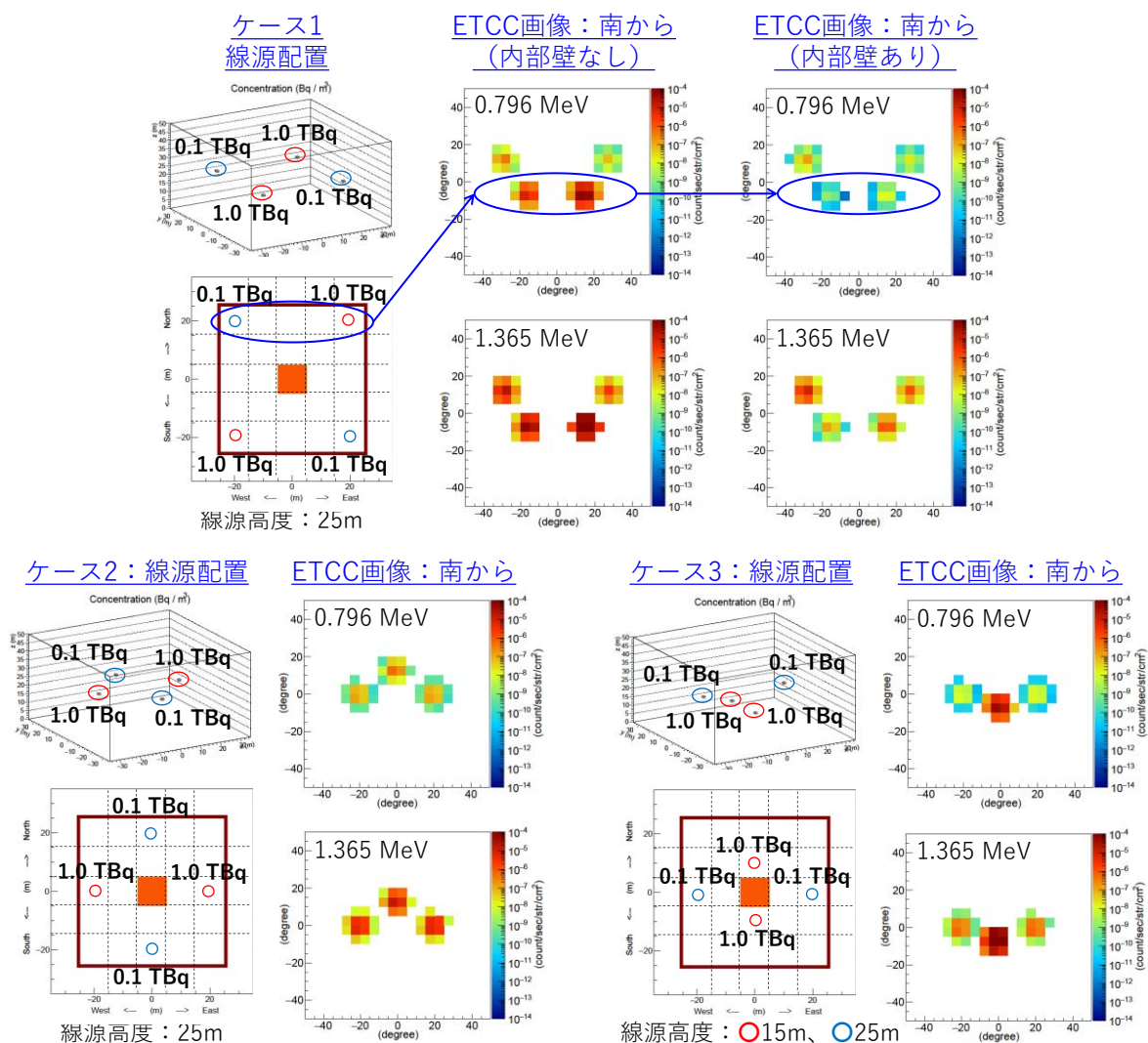


図 3.3.2-4 線源配置と生成したガンマ線画像

(ケース 1 については、炉建屋内部空間に内部壁が存在しないと仮定したガンマ線画像も作成し、内部壁の有無による相違を示した)

(3) 試験結果

上記 3 ケースについて作成したガンマ線画像から、10 m 分解能の計算格子での逆解析により線源の位置と存在量の推定を試みた。まず、ケース 1 で ^{134}Cs の 0.796 MeV のラインガンマ線のみ利用した場合について、ETCC の設置数による解析結果の変化を確認した。ETCC の設置

位置を北、東、南及び西の4方向、東、南及び西の3方向、東及び南の2方向（90度）、東及び西の2方向（対面）とした場合の第1の解析手法（スケールファクター $A=100$ ）による解析結果を図3.3.2-5に示す。配置した線源を含むセルの放射エネルギーを高く推定しており、線源位置の特定は概ねできているが、全体的に放射エネルギーを過小評価している。このケースでは、逆解析用の線源の体積が大きいいため、ETCCまでの距離が本来の線源位置より近い位置に分布している線源と遠い位置に分布している線源の寄与が相殺した結果、近い位置の線源を想定した解析となり、放射エネルギーを過小評価したものである。この過小評価傾向はETCCの設置数の減少に伴い大きくなり、2方向（90度）の配置では、0.1 TBqの線源の内1つが1/100程度となり推定できたとは言えない状況となっている。一方、2方向（対面）の配置では、すべての線源が3方向と同程度に推定できており、配置しだいでは2方向からの計測でも逆解析可能と考えられる。 ^{134}Cs の0.796 MeVと1.365 MeVの両方のラインガンマ線を利用し、ETCCを4方向及び2方向（対面）に設置した場合の第1の解析手法による解析結果を図3.3.2-6に示す。2つラインガンマ線の透過率の違いを利用することで線源の再現性が向上し、2方向からの計測でも単一ガンマ線の4方向よりも良好な結果を得ることができた。

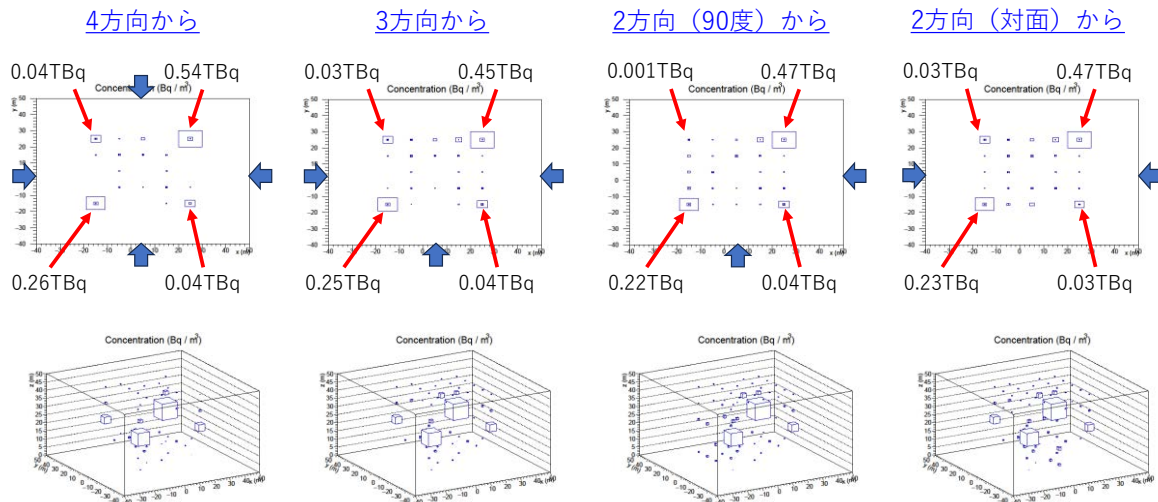


図 3.3.2-5 ケース 1 について ^{134}Cs の 0.796 MeV のラインガンマ線のみ利用した場合の第1の解析手法（スケールファクター $A=100$ ）による解析結果

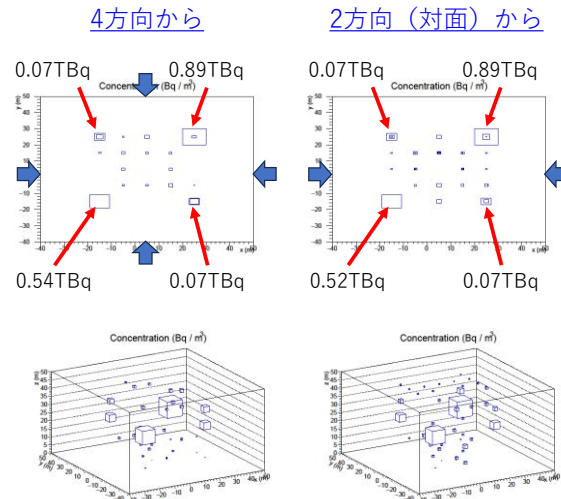


図 3.3.2-6 ケース 1 について ^{134}Cs の 0.796 MeV と 1.365 MeV の両方のラインガンマ線を利用した場合の第 1 の解析手法（スケールファクター $A=100$ ）による解析結果

ケース 2 及びケース 3 についても第 1 の解析手法を適用したが、スケールファクター $A=10$ を用いたほうが最適の結果が得られた。そこで、ケース 1 についてもスケールファクター $A=10$ を適用し、 ^{134}Cs の 0.796 MeV と 1.365 MeV の両方のラインガンマ線を利用して ETCC を 4 方向に設置した場合の 3 ケースの解析結果を図 3.3.2-7 に示す。ケース 1 は、図 3.3.2-6 の最適結果と比べて放射エネルギーが過小評価となっているが、線源位置は正しく再現できているため、様々なケースに適用できるスケールファクターとして $A=10$ に設定する。ケース 2 は、線源位置と放射エネルギーをほぼ再現できているが、線源が存在しないセルにも大きな放射エネルギーを推定している。これは、1 TBq の線源が最も近い ETCC から本来の位置より遠くにあると判定され、ETCC の視線方向の 2 つのセルにまたがって分布する推定結果となり、放射エネルギーも過大評価となったと考えられる。ケース 3 は、線源位置は特定し放射エネルギーは過大評価となっている。この結果より、逆解析用線源の体積の影響は、ケース 1 とケース 3 で逆の効果となっており、一律に扱うことはできないことが判明した。なお、これらの逆解析に要する計算時間は、4 方向の ETCC の 2 つのラインガンマ線を利用したケースでも 1 分 20 秒程度であった。

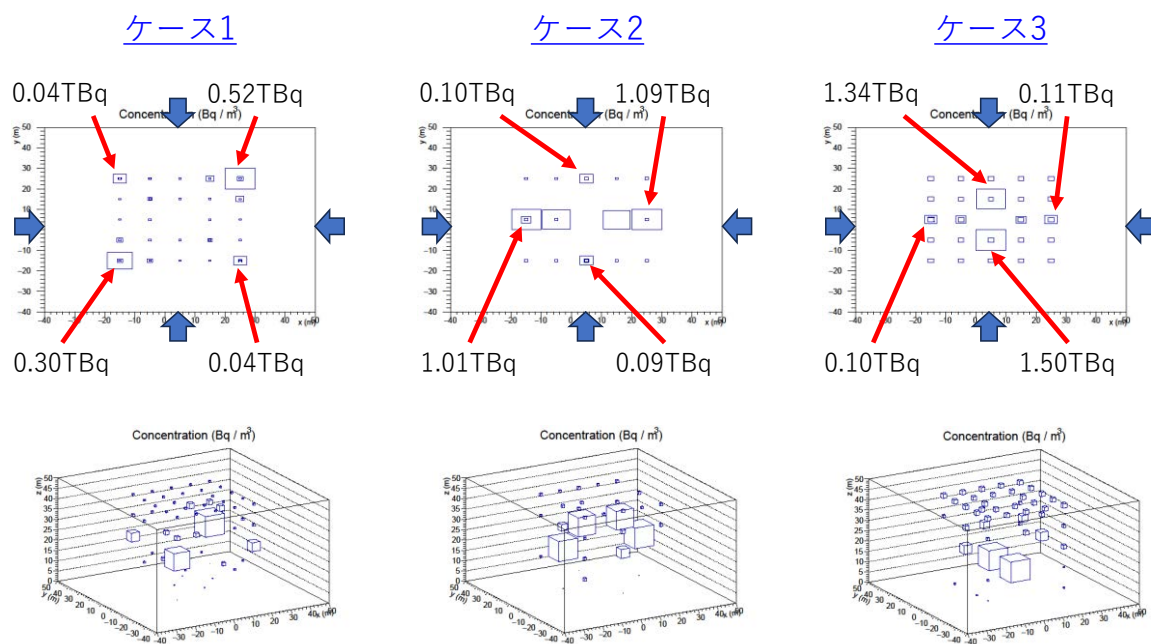


図 3.3.2-7 ケース1～3について ^{134}Cs の 0.796 MeV と 1.365 MeV の両方のラインガンマ線を利用した場合の第1の解析手法（スケールファクター $A=10$ ）による解析結果

次に、各ケースについて ^{134}Cs の 0.796 MeV と 1.365 MeV の両方のラインガンマ線を利用して第2の解析手法を適用した結果を図 3.3.2-8 に示す。ケース1とケース3については、第1の解析手法より線源の放射エネルギーの再現性が向上しているが、ケース2については線源位置の特定及び放射エネルギーの再現性が第1の解析手法より低下している。この逆解析に要する計算時間は、4方向のETCCの2つのラインガンマ線を利用したケースでも1秒程度であり、瞬時に結果が得られた。

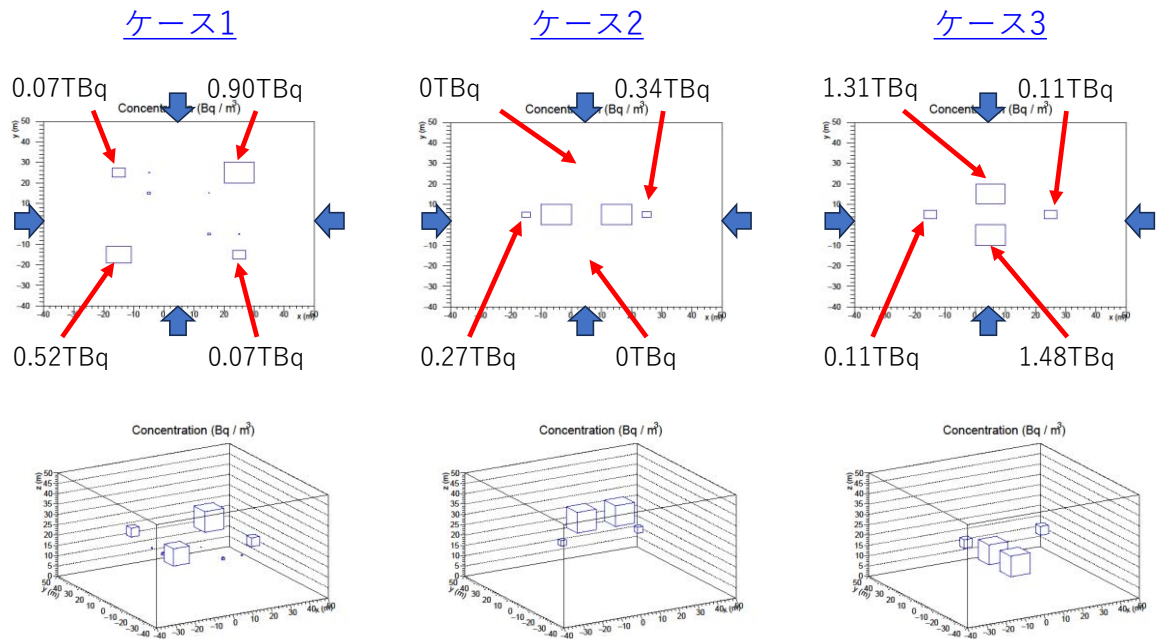


図 3.3.2-8 ケース 1～3 について ^{134}Cs の 0.796 MeV と 1.365 MeV の両方のラインガンマ線を利用した場合の第 2 の解析手法による解析結果

さらに、第 2 の解析手法における応答関数行列 $\mathbf{R}$ の要素数を大きくしても解析が実行できる特性を活用し、逆解析領域の計算格子をガンマ線画像生成用の計算格子と同じ $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ メッシュにした場合の解析を実施した。この解析では、ガンマ線画像生成過程と逆解析課程の計算格子と応答関数行列が同一であり、今回の試験ケースの 4 個に限定された線源は完全に再現可能であった。そこで、ガンマ線画像にランダムな誤差を与えて解析を実施し、誤差の増加に対する再現性の低下を確認した。誤差を持つガンマ線画像は、誤差設定値 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ の範囲内からランダムに抽出した値によりガンマ線画像の各ピクセル値を変化させることで作成した。各ケースの解析結果を、表 3.3.2-1 にまとめた。ケース 1 とケース 2 では、 $\pm 30\%$ の誤差まで線源位置及び放射エネルギーを再現できたが、それ以上の誤差では線源位置が数メッシュずれる結果が見られた。ケース 3 については、 $\pm 10\%$ の誤差でも 0.1 TBq の線源が特定できなくなっていたが、1 TBq の線源は $\pm 30\%$ の誤差まで再現できていた。この逆解析に要する計算時間は、4 方向の ETCC の 2 つのラインガンマ線を利用したケースで 10 秒程度であり、第 1 の解析手法の $1/8$ の計算時間で結果を得ることができた。この解析手法では、 $\pm 30\%$ 以上の誤差を与えた場合でも線源位置は数メッシュ以内のずれで再現できており、第 1 の解析手法で特定できなかったケース 2 の線源位置特定に有効な手法になり得ると考えられ、計算時間の観点でも 2 つの手法を併用して再現精度を向上する使用方法が有効である。

表 3.3.2-1 第2の解析手法により 1 m×1 m×1 m メッシュの計算格子で
逆解析して得られた線源の放射エネルギー

(ガンマ線画像の各ピクセル値を設定誤差範囲内のランダムに抽出した値で変化させた)

ケース	誤差 (%)	4 線源の放射エネルギー (TBq)			
1	0	1.000	0.100	0.100	1.000
	±10	1.005	0.107	0.107	1.013
	±20	0.900	0.112	0.088	1.186
	±30	1.149	0.082	0.112	1.020
2	0	1.000	0.100	0.100	1.000
	±10	0.948	0.095	0.092	0.990
	±20	0.987	0.093	0.103	1.169
	±30	0.818	0.126	0.112	1.356
3	0	0.100	1.000	1.000	0.100
	±10	0.000	0.963	0.994	0.000
	±20	0.000	1.131	1.045	0.000
	±30	0.000	1.251	1.088	0.000

3.3.3 まとめ

^{134}Cs の 0.79 MeV、1.36 MeV 等の各ラインガンマ線の透過率を考慮した逆写像投影プログラムを作成し、炉建屋を取り囲むように複数地点に設置した ETCC のガンマ線画像を逆解析して炉建屋内部の 3 次元線源分布を推定する手法を開発した。令和 2 年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業「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」[5]において開発した手法をベースにして、2 つの解析手法を開発した。第 1 の解析手法は放射性プルームの定量可視化手法[7]で用いているベイズ推計に基づく逆解析法を適用したもので、第 2 の解析手法はスパースモデリングの L0 ノルム最適化に基づく直交マッチング追跡法を用いたものである。簡略化した炉建屋の条件で試験解析を実施し、以下の結果が得られた。

- ・ ^{134}Cs ラインガンマ線は、発生率が小さく透過率の高い 1.365 MeV のほうが 0.796 MeV より検出強度が大きくなった。
- ・ガンマ線が外壁を通過する際の角度が変わるとガンマ線画像の強度分布が変化した。ガンマ線の検出強度を大きくするためには、ETCC に入射するガンマ線の方向が外壁に対してなるべく垂直となるように ETCC を設置する必要がある。
- ・4 方向からの計測で線源位置と放射エネルギーを概ね再現し、2 方向からの計測でも配置しただけで逆解析可能であった。
- ・2 つのラインガンマ線の透過率の違いを利用することで再現性が向上し、2 方向からの計測でも単一ガンマ線の 4 方向より再現性が向上した。
- ・逆解析の計算格子による線源の分解能(体積)の違いで放射エネルギーを過小評価や過大評価した。
- ・2 つの解析手法は、どちらも概ね有効に機能したが、再現性が低下したケースもあり、2 つの手法を併用して再現精度を向上する使用方法が有効と考えられる。

3.4 高線量 ETCC の製作（京都大学）【令和 4 年度～令和 5 年度】

3.4.1 実施内容

3.2 節で得られた高線量場測定データの基に、高線量 ETCC の TPC のガス圧、シンチレータ部のエネルギー領域短縮によるデータ量低減及び 3.5 節で開発した飛跡長トリガーの検討を行い、実行可能な方法の調査を実施した。

3.4.2 成果

【令和 4 年度までの概要】

炉建屋近傍の数百 $\mu\text{Sv/h}$ 環境でも ETCC が動作できるように、令和 4 年度に実施したシミュレーションに基づき、シンチレータ部の上面以外の測定面に 1 cm 厚鉛遮蔽を実施し、実用化 ETCC にすでに搭載した。しかし、遮蔽搭載で実用化 ETCC の重量が 42 kg となり、1 人での装置の移動は困難となった。高線量 ETCC では TPC 部と PSA 部が分離することで個別に移動ができ、測定箇所を組み合わせる構成とすることで各部が 20 kg 程度となるよう検討した。また、実用化 ETCC と共通な大半の部品を製作した。但し、この年度は電子部品の世界的供給不足のため、一部部品は令和 5 年度の購入となった。

【令和 5 年度実施内容及び結果】

高線量 ETCC が数百 $\mu\text{Sv/h}$ 環境での安定動作を確実にするために、令和 4 年度及び令和 5 年度に実施した FRS での実用化 ETCC の実験では、トリガー系のバグが発見され十分なデータが取れなかった。また、FRS は多くの利用者がおり 1 回の測定は 1 日程度となる。また、京都から装置の輸送も大変であり、ETCC のガスやシンチレータの交換などの物理パラメータを変えながらの測定は困難である。その対策として J-BEAM 社の 20 cm 径 ETCC を利用した。TPC 部は全く同じであり、シンチレータの読み出し回路が異なるだけでデータ転送、解析も全く同じである。この装置はガスとして Ne-Ar- CF_4 を用い、シンチレータはエネルギー分解能がよい GAGG の 1 放射線長が搭載されている。BNCT のガンマ線画像装置利用を目的として複合研究原子炉の BNCT 治療室という 100 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の高線量場で多数の測定実績がある。この ETCC を用いて、12 月に FRS で 3.2 節に述べた実用化 ETCC と同様 10～50 $\mu\text{Sv/h}$ での照射試験を行った。3.5 節で行った高線量場での ETCC に必要な遮蔽シミュレーションの結果をある程度 11 月の RRS 実験の結果を反映させ、TPC 前面と側面の遮蔽を TPC に行った。

11 月、12 月の FRS 実験の結果については 3.2 節で詳細に述べたが、高線量になるにつれ徐々に偶発事象の影響が画像に現れてくるのが図 3.2.2-5 の線源周囲のぼけの広がりで見えるが、どの程度までの広がりが問題になるかは判定が難しい。そこで、医療のガンマ線画像分析に用いられる逐次近似画像再構成 (Maximum Likelihood Expectation Maximization: MLEM) 等の画像最適化アルゴリズムを適応してみた。結果は図 3.4.2-1 のように、5 mm 厚遮蔽では線源が明確に現れるが、1 mm 厚遮蔽では雑音全体に広がったままである。これは、今後高線量場で得られたガンマ線画像の偶発事象等の影響を MELM の適応などから推定できる可能性を示している。

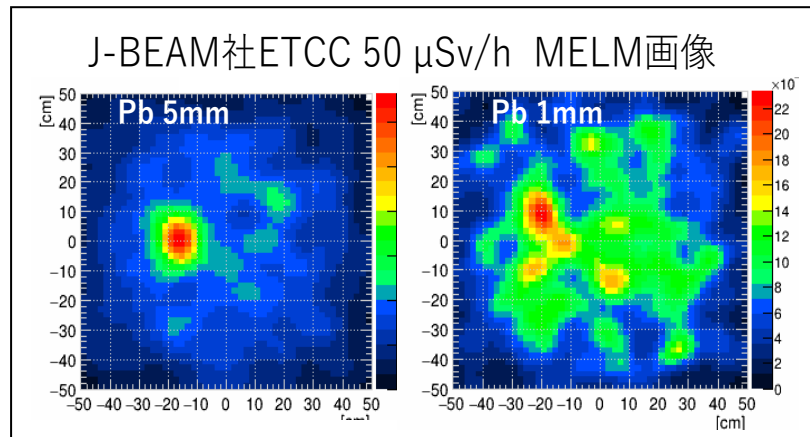


図 3.4.2-1 50 $\mu\text{Sv/h}$ の 5 mm 厚、1 mm 厚遮蔽データに MLEM を適応した画像

＊ 高線量 ETCC の耐放射線性の強化のための再設計

3.2 節及び 3.5 節の結果から、数百 $\mu\text{Sv/h}$ 環境で ETCC を使用するとき PSA 部の 1 cm 厚鉛遮蔽に加え TPC 部前面と側面を 5 mm 厚鉛で遮蔽すると、TPC (30 cm 径、30 cm 高) には前面 11 kg、合計 15 kg の重量が ETCC の前方に加わり、総重量 $42+15=57$ kg となる。特に、TPC ガス容器部も約 15 kg あり ETCC の前の 1/2 に半分以上の荷重があるため、三脚搭載時に前方へ倒れる可能性が出てきた。また、TPC 鉛遮蔽は 0.5 mm 厚板を重ねる構造のため、取り付けに大変時間がかかる。

よって移動性と扱いの簡便さを改善するため、図 3.4.2-2 のように TPC 内ドリフト高を 20 cm から 15 cm に短縮し TPC 容器高さを 30 cm から 20 cm に短縮し、TPC 側面遮蔽の重量を 2/3 に削減した。ガス層が薄くなることで検出効率は下がるが、TPC 部の直下に PSA 部を置いた場合、ガス層の下 5 cm はコンプトン散乱点と PSA 間の距離が近すぎ、ピクセルアレイのサイズによる誤差が角度分解能を劣化させ雑音としかになっていないことが、令和元年度の福島 1F 測定データの再解析 (図 3.4.2-3) や医療用 ETCC の画像試験で判明した。そのため、図 3.4.2-2 のように PSA を TPC 底面から 5 cm 離して設置することにより、15 cm 厚ガス層全域で高い角度分解能を維持し、今までと同等以上の画像性能が得られる。

このアイデアを基に、図 3.4.2-4 のようにガス側面鉛遮蔽にプラスチックの補助構造を持たせ、さらにガス TPC 容器に遮蔽取付治具を設けることで、適切な厚みの遮蔽を測定現場で迅速に取り付けられるようにする。令和 5 年度は、業者に強度計算も含めた設計を依頼し、この図にあるような 3 次元構造 TPC 容器を設計した。令和 6 年度に制作と組み上げを行い、令和 6 年度の福島 1F 測定で予定している炉建屋周辺測定で使用を検討している。

＊ TPC のガス圧、シンチレータ部のエネルギー領域等の効果

TPC のガス圧は、法令により 2.5 気圧以上では高压ガス容器とみなされ、TPC 容器が 2 倍程度重く可搬性を損なう、さらにはガンマ線を散乱させ雑音を増やす可能性も高く、メリットはない。また、容器はガスを長期に封じ込めて使用するため、ガス封入前に容器を真空に引く必要があり、容器は最低限、2 気圧の耐圧は持つ必要がある。令和 5 年度の 2 回の FRS 実験では、Ar で 2 気圧、Ne-Ar- CF_4 は 1.5 気圧で使用した。これは Ne-Ar- CF_4 ガスの場合、Ar よりドリフト領域に高電圧が必要となり、2 気圧では必要な高電圧が印加できないためである。この圧力

差による画質及びデータ取得率などによる有意な変化は測定できなかった。特に、高線量場では遮蔽の厚みの効果が大きく、ガス圧の多少の減圧は意味がないようである。そのため、ガス圧はそのガスで可能な最大圧を用いればよいと考えている。Ne-Ar-CF₄ ガスも電極等を改善し2気圧が可能になれば2気圧が望ましい。

令和元年度の前回の福島 1F 測定では、PSA のエネルギー閾値を 400 keV 以上に上げ、ガンマ線の取得するエネルギー範囲を限定することでデータ数は大きく削減され、不感時間を低減できた。しかし、今回は PSA の周囲に十分な遮蔽板を設置したため、図 3.2.2-9 に示すように 400 keV 以下の PSA の事象数を約 1 桁低減できた。福島 1F 測定では、662 keV 及びその散乱成分の分布も重要な意味を持つため、可能なら低エネルギーガンマ線は削減しないほうがよいことが判明した。今回の FRS 実験で PSA の遮蔽効果が十分確保できたため、福島 1F で 50 μ Sv/h までの環境では、現在の 200 keV 設定で行ったほうがよいと判断した。令和 6 年 3 月の福島 1F ではそのように実施した。

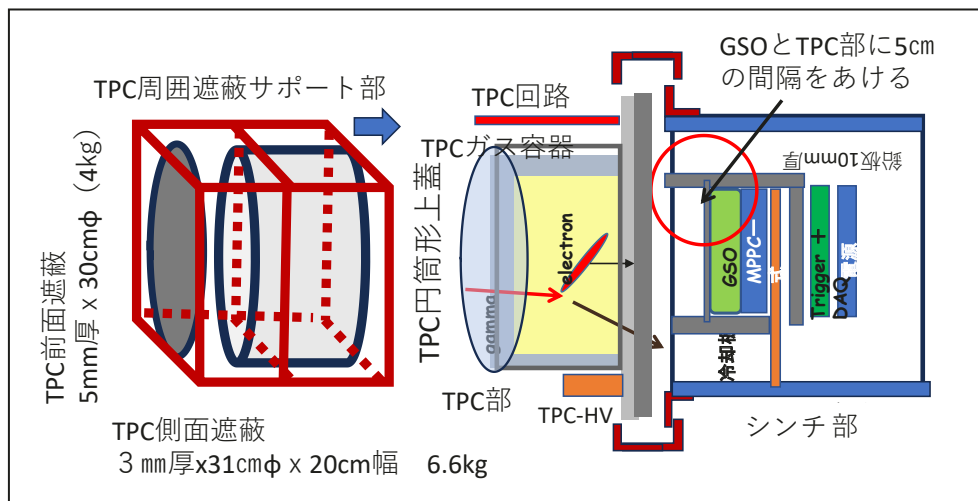


図 3.4.2-2 令和 6 年度制作予定の高線量 ETCC の概念図

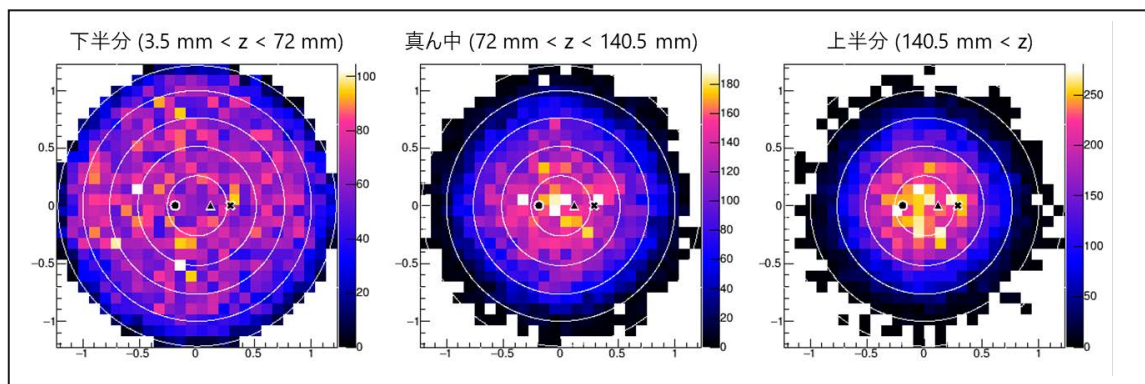


図 3.4.2-3 令和元年度の福島 1F 全域の 662 keV 画像
（[9]の図 3.3.2-6 参照）を TPC 深さで 3 分割した画像

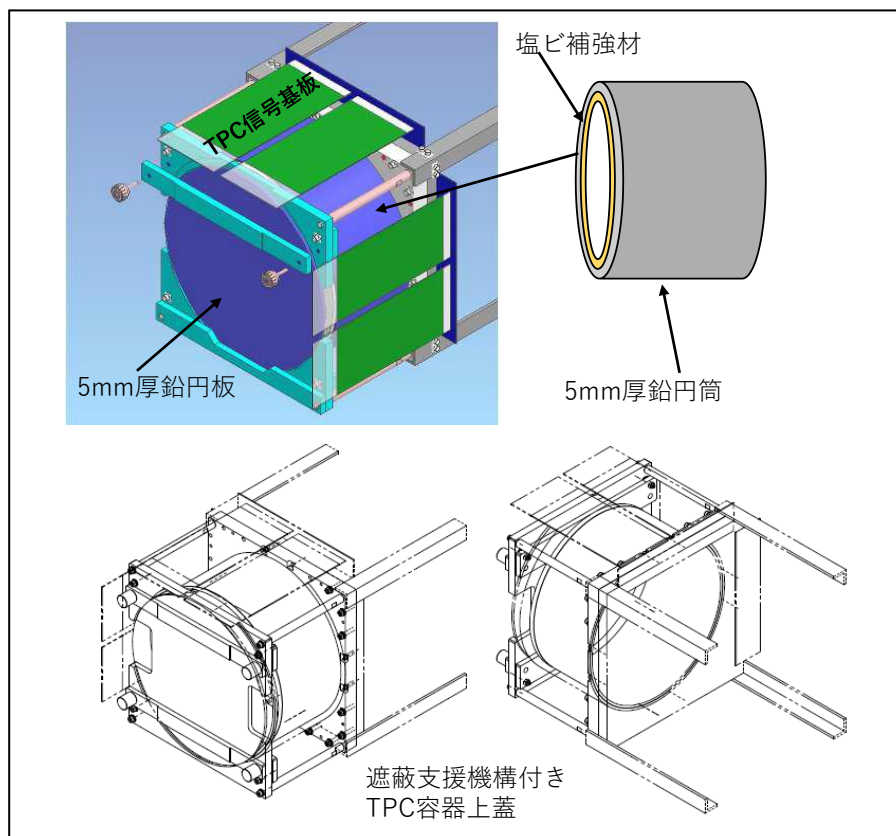


図 3.4.2-4 高線量 ETCC の新型ガス容器及び遮蔽支援治具の設計図案

3.4.3 まとめ

3.2 節の実用化 ETCC、J-BEAM 社 ETCC による FRS での高線量場画像試験と 3.5 節での遮蔽技術シミュレーションの結果を基に、まずは福島 1F で炉建屋周辺及び炉建屋入口付近のサブ mSv で、使用可能な ETCC として高線量 ETCC を制作する方針に決め、上記の TPC 容器と遮蔽支持具を一体とした構造を設計した。当初、前回の英知事業で開発した信号処理回路及びトリガー系から予想される不感時間が 50%程度になると予想される ETCC の計数率が、 10^4 Hz まで画像解析が可能と判断し、TPC 部 5 mm 厚、シンチレータ部 10 mm 厚の鉛遮蔽で mSv/h まで対応可能と考えたが、FRS 実験の結果からトリガーを約 1 kHz 程度に制限しないと偶発事象で画像解析が急激に劣化することが判明した。上記の鉛遮蔽は、移動測定が容易な重量約 50 kg (ETCC 固定部 40 kg、取り付け型 TPC 遮蔽 10 kg) に制限でき、サブ mSv/h に対応できる装置である。

炉建屋内で使用する場合は、ピンホールカメラでは 5 cm 厚鉛で全体を覆い重量が 80 kg を超えるピンホールカメラ等は使用されている。3.5 節に述べるように、5 cm 厚遮蔽は計数率を 2 桁半減少し、3 cm 厚は 2 桁近く減少する。本事業の ETCC を FRS 実験から推定して TPC 部が 15 mm 厚、シンチレータ部を 30 mm 厚とした場合、10 mSv/h 近くまで使用できる可能性があるが遮蔽重量は 80 kg となる。但し、3.5 節で述べるようにピンホールカメラでは遮蔽効果が弱い ^{134}Cs の 790 keV、1.36 MeV ガンマ線は画像化できないが、ETCC はシンチレータの閾値を上げ 1 MeV 以上の ^{134}Cs ガンマ線のみを撮像することで 100 mSv/h 以上の高線量場での Cs 分布の撮像の可能性があり、令和 6 年度に定量的なシミュレーションを行う。

3.5 10 mSv/h での遮蔽技術（京都大学、再委託先：J-BEAM）【令和 4 年度～令和 5 年度】

3.5.1 実施内容

令和 4 年度に策定した素案を基に、FPGA ソフトを完成させ、飛跡長トリガーの最適化を行い、ETCC の動作確認を行った。

Ne-Ar-CF₄ ガス、FPGA での雑音除去、簡易遮蔽による効果を整理して、数 mSv/h でエネルギー閾値 1 MeV 以上の測定に必要な遮蔽量をシミュレーションにより求めた。また、シミュレーションに基づき遮蔽材を制作し FRS での動作確認を行った。

3.5.2 成果

【令和 4 年度までの概要】

令和 4 年度には、まず福島 1F 内の高線量環境での ETCC 内のガンマ線反応を模擬できるシミュレーションを構築した。東電の資料から原子炉建屋周辺の測定スペクトルからガンマ線場をコンボリユートして求め、さらに ETCC の構造をシミュレーション内に再現した。これらのシミュレーションツールを開発したことで、福島 1F 内での ETCC の正確なシミュレーションコードを完成した。このシミュレーションを用い、まず PSA 周辺部の鉛射影を設計し測定面を約 1 cm 厚鉛で遮蔽することとし、令和 4 年度に制作した実用化 ETCC の PSA 部を覆った。

【令和 5 年度実施内容及び結果】

令和 4 年度は、第一歩として PSA 部の鉛遮蔽設計のため PSA 部単体のシミュレーションが中心だったが、令和 5 年度は、ガス TPC も含めた ETCC 全体のシミュレーションを完成し、TPC の遮蔽の設計を詳細に行った。PSA 部の表面積は約 600 cm²であるが、TPC 部は 3500 cm²と約 6 倍大きい。そのため、遮蔽重量を削減するためには TPC 部の遮蔽厚を最適化することが可搬型装置を作るうえでは不可欠である。このシミュレーションを用い、FRS 実験の結果と合わせ令和 5 年度末に予定した福島 1F 内測定実験で必要な遮蔽の設計、また、今後の炉建屋内の mSv/h 環境に対応するための条件を求めた。

① 福島 1F 内の測定実験で必要な遮蔽の設計

3.2 節で述べたが、福島 1F 内測定、特に炉建屋周辺の 100 μSv/h までの線量で確実に測定を行うためには TPC 部の遮蔽設計が重要である。図 3.5.2-1 に示すように、この線量で TPC 部の遮蔽厚とシンチレータ部の遮蔽厚の最適化を求めた。TPC 部は前面、側面 5 mm 厚で計数率が 1/4 まで減少でき、それ以上厚くしても削減率は大きく改善しない。また、PSA 部は現在の値 10 mm 厚以上にしても効果が小さいことが判明した。FRS の校正試験では TPC 部 5 mm 厚で 50 μSv/h までの撮像が実現できた。また、3.2 節の考察から、FRS でのビーム広がり福島 1F 内で想定されるような線量分布に基づき線量分布を仮定して、FRS の線量と同等の ETCC の計数率になる福島 1F の線量を求めると約 5 倍高い線量になることがわかり、福島 1F では約 300 μSv/h 線量での画像性能に対応している。

② mSv/h 環境下に対応することの可能性

図 3.5.2-2、図 3.5.2-3 は ETCC 全体を 50 mm 厚遮蔽まで行ったときの TPC 及びシンチレータの計数率の変化である。10 mSv/h に対応するには TPC 部、シンチレータ部ともに計数率 2 桁以上の低減が必要となる。これらの図の PSA 部は 2 放射線長を仮定しているが、高線量場では 1 放射線長で十分であり、このシミュレーションは、2 放射線長を改定しているので計数率は 3 分の 1 程度下がる。また、図 3.5.2-2 で PSA（シンチレータ）部のスペクトルから 662 keV は 2 桁以上減衰するが、¹³⁴Cs の 1.36 MeV は 1 桁以内の減衰である。PSA の利得を下げ PSA の閾値を 1 MeV 近くまで上げることで、PSA の計数率をさらに 2 桁下げることで明瞭な Cs 分布測定が 10 mSv/h でも測定可能になる可能性が見えてきた。

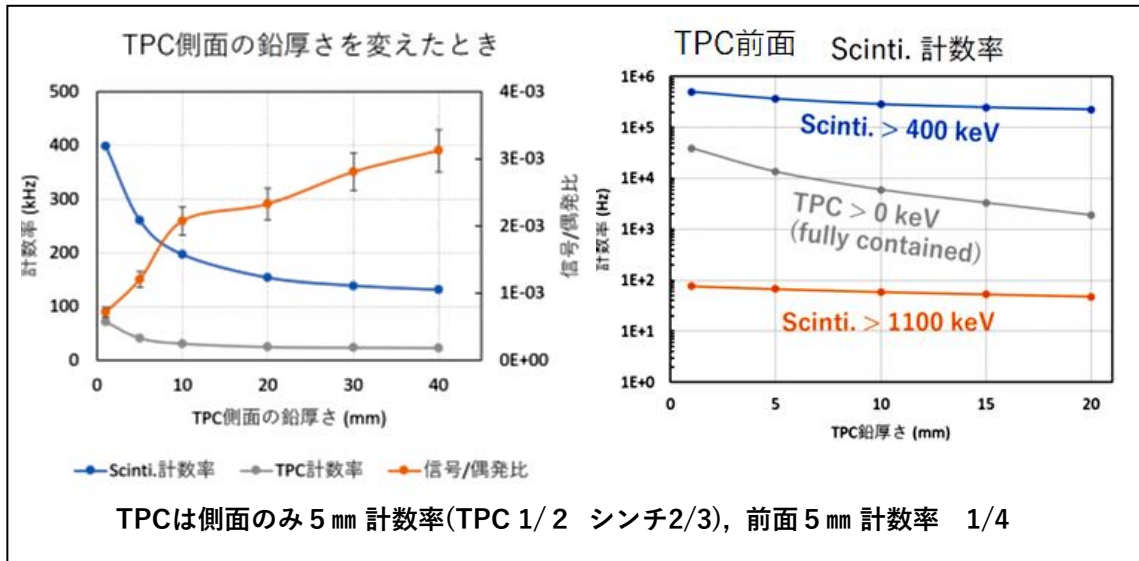


図 3.5.2-1 実用化 ETCC の鉛遮蔽厚無、5 mm、30 mm での TPC と PSA の計数率の変化

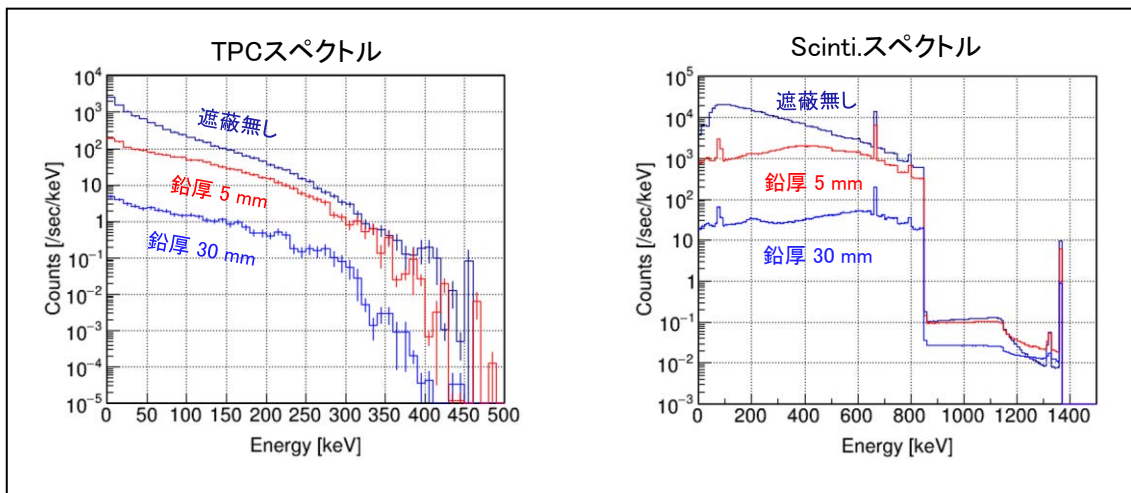


図 3.5.2-2 実用化 ETCC の鉛遮蔽厚無、5 mm、30 mm での TPC と PSA のスペクトルの変化

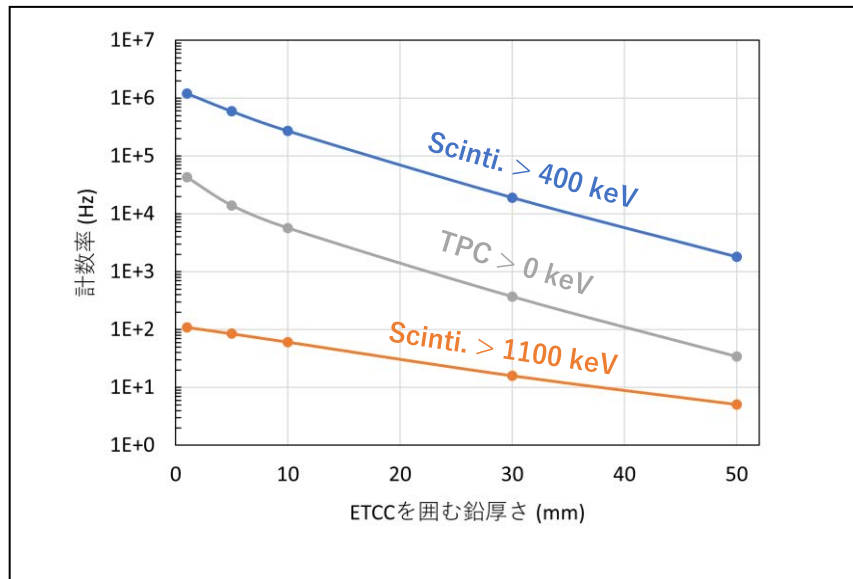
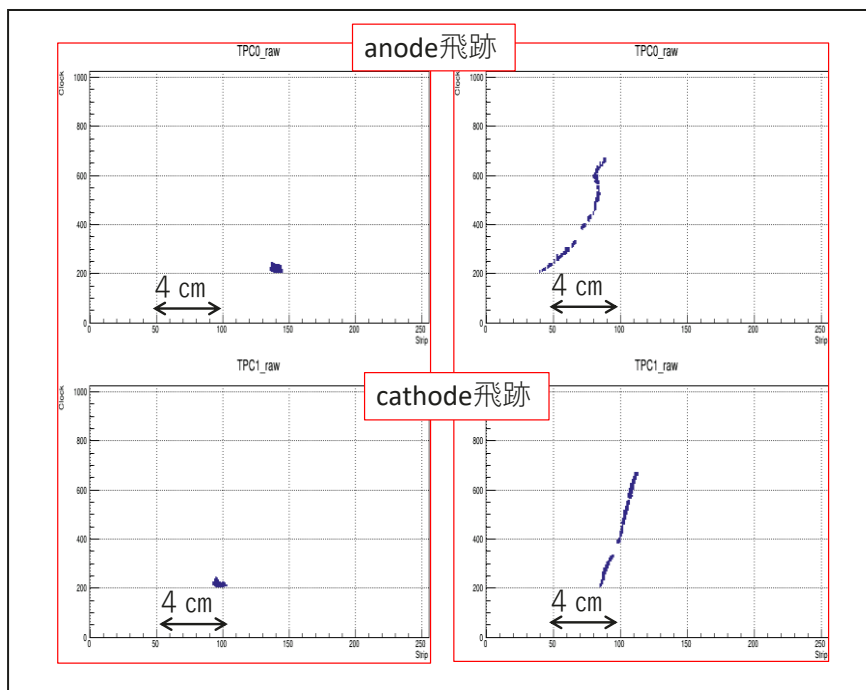


図 3.5.2-3 実用化 ETCC の TPC 及び PSA の鉛遮蔽厚と減衰率の関係

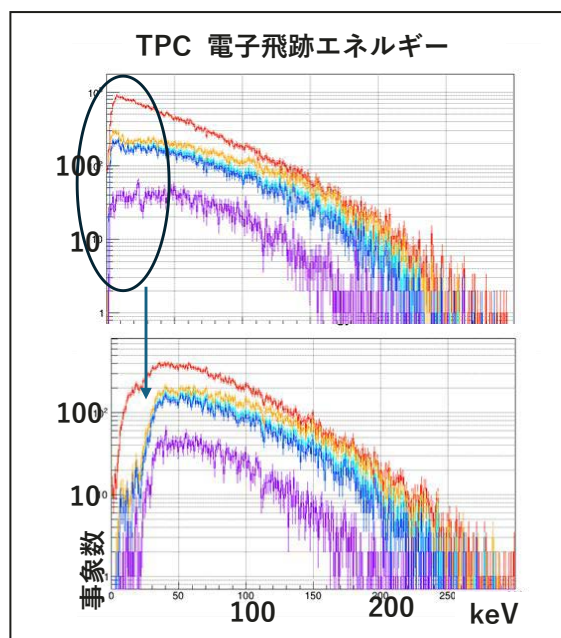
③ TPC の飛跡長の制限によるトリガー計数率の削減に関する開発

シミュレーション結果から PSA 部の計数率の低下と同様、TPC の計数率低減も重要であることが判明した。前に述べたように、TPC 部はシンチレータ部より 5 倍以上表面積が大きいので、厚い遮蔽は重量の多大な増大を招く。そのため、遮蔽以外の手法も組み合わせた計数率の削減が必要となる。偶発事象をトリガー判定以前に削減するためには、TPC の信号がトリガーロジックに入る前、つまり TPC 信号処理回路内のマイクロピクセルチェンバー (μPIC) のヒットデータを処理する FPGA 内での飛跡の選別が必要となる。具体的には、図 3.5.2-4 にあるように電子飛跡の長さに対応する μPIC のヒット数を FPGA で計算し、短い飛跡 (少ないヒット数) のみを削除する。この判断は FPGA の数クロックで可能であり、ETCC 全体のトリガーのタイミング変更が不要となる。図 3.5.2-5 は、FPGA 内でトリガー信号を発生する最低の μPIC 信号のヒット数を変えたときの TPC のスペクトル変化を示す。最低ヒット数を増やすと低エネルギーの電子飛跡が取得されていない。このようにトリガー段階で事象の大多数を占める低エネルギー電子飛跡を削除できることがわかった。これにより、低エネルギーガンマ線は主な雑音源である偶発事象の一部の除去がトリガー段階で可能となり、高線量場でこの手法が有効であり、且つ実行可能なことがわかった。



左) 1 cm 以下の短い飛跡図、このような飛跡をトリガー判断前に FPGA で雑音を削除する。
 右) 取得したい長い飛跡の例

図 3.5.2-4 TPC 内の電子飛跡



上) FPGA での事象選別を行う前の TPC エネルギー分布
 下) FPGA で μ PIC 信号が 10 ヒット以下を削除した TPC エネルギースペクトル、短い低エネルギー飛跡が大きく削減している。

図 3.5.2-5 FPGA での事象選別の効果

3.5.3 まとめ

本研究は、前回の英知事業で ETCC が福島 1F の広い領域の全域を 1 度の撮像でスカイシャインも含めて線量分布測定が可能なことを示した。これは今後、福島 1F 内の廃炉事業での 3 次元線量分布計測を行い WSPEEDI と組み合わせることで、放射性物質の拡散予想が可能なことを原理的に示した成果である。しかし、それだけでは福島 1F 内廃炉事業への ETCC の実装は実現しない。福島 1F 全域を監視する場合でも、数十 $\mu\text{Sv/h}$ 線量下での動作保証、さらには炉建屋付近での監視に必要となる数百 $\mu\text{Sv/h}$ 環境での動作保証が必要となる。それを実現するには、ETCC の遮蔽が重要な要素となる。今まで福島 1F 内で高線量環境でのピンホール等のガンマ線カメラの使用は、測定点の数十 m の限定された範囲のホットスポット探査が中心で、カメラも小型のため 5 cm 厚という十分な厚みの遮蔽が用いられてきた。今回は初めて FRS での校正実験の結果とシミュレーションを比較、さらには福島 1F 環境をもシミュレーションし、FRS 校正場との対応も明らかにすることで確実性の高い遮蔽の設計法の開発が行えた。この 3 月に行った福島 1F 内で ETCC 測定での計数率も予想に近い数値が得られている。この成果は今後、炉建屋近傍や内部で精密な線量測定を実施するときに有効な知見となると考えている。

3.6 ガンマ線によるデブリ探査の調査（京都大学、再委託先：J-BEAM、連携先：原子力機構） 【令和4年度～令和5年度】

3.6.1 実施内容

東電との協議に基づき、福島 1F 内での調査を行った。炉建屋周辺部から複数方向からの測定を行い、建屋内の 3 次元 Cs 分布測定法の試験を行う検討を行ったが、東電との協議の結果実施が困難であると判断し、炉建屋から 200 m 程度の距離を置き、複数方向からの測定を行い、建屋全域＋スカイシャインの 3 次元分布計測を実施した。

3.6.2 成果

【令和4年度までの概要】

令和5年2月21日に、東電へ前回の英知事業で行った令和元年度の福島 1F 内測定のまとめの報告と、今回の英知事業で計画している福島 1F 内の ETCC 測定の説明を行うことを目的として ZOOM による TV 打ち合わせ会議を実施した。まず、前回の英知事業で得られた 1～3 号炉を含む 1 km 四方の福島 1F 全域の広帯域（100-1600 keV）の線量分布及び ^{137}Cs （662 keV）ガンマ線に特化した福島 1F 全域の分布測定を報告した。今回提案の測定では、この特徴（広域且つ高エネルギー帯域の測定及びある特定のエネルギーの詳細な画像が一度に取得できること）を生かした福島 1F 内の 3 次元線量分布の計測を令和5年度に実施したい意向を伝えた。

【令和5年度実施内容及び結果】

上記の令和5年2月の打ち合わせ後、7月18日に令和5年度に実施したい福島 1F 内での ETCC 測定実験の具体的な内容と希望する測定箇所等について ZOOM で打ち合わせを実施した。測定目的は、福島 1F 内の原子炉建屋群を中心とした全域の線量 3 次元分布測定である。そのために、図 3.6.2-1 左にあるように免振棟横（A 地点）、免振棟から南方向で免振棟と原子炉建屋群を結ぶ方向から約 90 度ずれた方向に原子炉建屋群が測定可能な B 地点、さらに補助測定地点として、海岸方向からの測定（C 地点）の 3 か所からの測定を提案し了承された。また、東電からは福島 1F 内での測定は福島 1F 内で作業を実施している会社を協力企業として、その協力企業の管理下で実験を実施するよう要請された。

協力企業の選定には、福島 1F 内に作業拠点をもち常時福島 1F 廃炉事業に関わる企業であることが必要となる。実験を支援していただける企業探しは難航したが、10月31日に日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社（以下、日立 GE と表記。）が協力企業になることを快諾いただいた。測定実施日時は 11、12 月に予定した FRS 実験の結果が反映できること、また、福島 1F 内に我々が入るために必要な諸手続きが多く時間が必要な点を考慮し 3 月初旬とした。

12 月末から手続き作業を開始し、大学等では使用しない放射線手帳の発行手続きに多くの時間がかかった。その後に東電が福島 1F 内作業者に課す事前教育（ab 教育、福島まで出向き丸 1 日の受講が必要）、日立 GE の社内教育を受けたのが 2 月 17 日である。同時に東電、日立 GE、我々で福島 1F での打ち合わせを実施した。そのとき福島 1F 内に持ち込む PC 等の情報機器を実験予定日の一週間前に東電に提出するなど、令和元年度の福島 1F 測定時と変わった規則があり、当時より厳しい条件が何点か加わっていた。

また、2 月末に実験の中心となる研究員が新型コロナウイルス感染症に罹患し後遺症がひどく、当初予定の 3 月 7、8 日の実施が不可能と判断、東電、日立 GE と協議し 3 月 26、27 日とした。25 日に日立 GE の富岡倉庫で ETCC の組み立てと校正線源による調整を実施後、福島 1F 内に事前に運搬。26 日は午前 9 時から福島 1F 内での測定に入ったが、雨と風が強く ETCC の設置も困難と判断し、晴天が確実な 27 日に ETCC 測定実験を集中的に行うこととした。予定し

ていた3か所の測定点のうち重要な免振棟横と見晴台南のA、Bの2点に絞り測定を実施することとした。26日は福島1F内の数か所で、持参した高計数率対応の小型CsI（浜松ホトニクスC12137）[10]及びCeBr₃シンチレータ（図3.6.2-2）による4 MeVまでの広帯域のスペクトル測定を図3.6.2-1左に示すA～Fの6地点で実施した。27日は晴天となりA、Bの2地点でETCCによる測定を行うことができた（図3.6.2-3）。A地点は1、2、3号炉建屋から約220 m、300 m、400 mの距離にあり、B地点は1、2、3号炉建屋から約350 m、270 m、220 mの距離がある。

速報結果としてA、B及びD地点、2、3号炉建屋間の道路上のC、E、F地点及び環境放射線として富岡の日立GE倉庫と7か所のエネルギースペクトルが得られた。明らかに日立GE倉庫と異なり、福島1F内では¹³⁷Cs、¹³⁴Cs由来以外の高エネルギー連続ガンマ線が662 keV以上に現れ、炉建屋に近くなるほど顕著になっていくのがわかった。前回の令和元年度の測定時、エネルギー別の画像データ及び他の公開されている福島1F内のスペクトル資料からCs由来以外の高エネルギーガンマ線の存在の可能性を示したが、今回のスペクトル測定はそれを一層強く指示している。今後の画像データ解析と合わせることで明確にしていきたい。

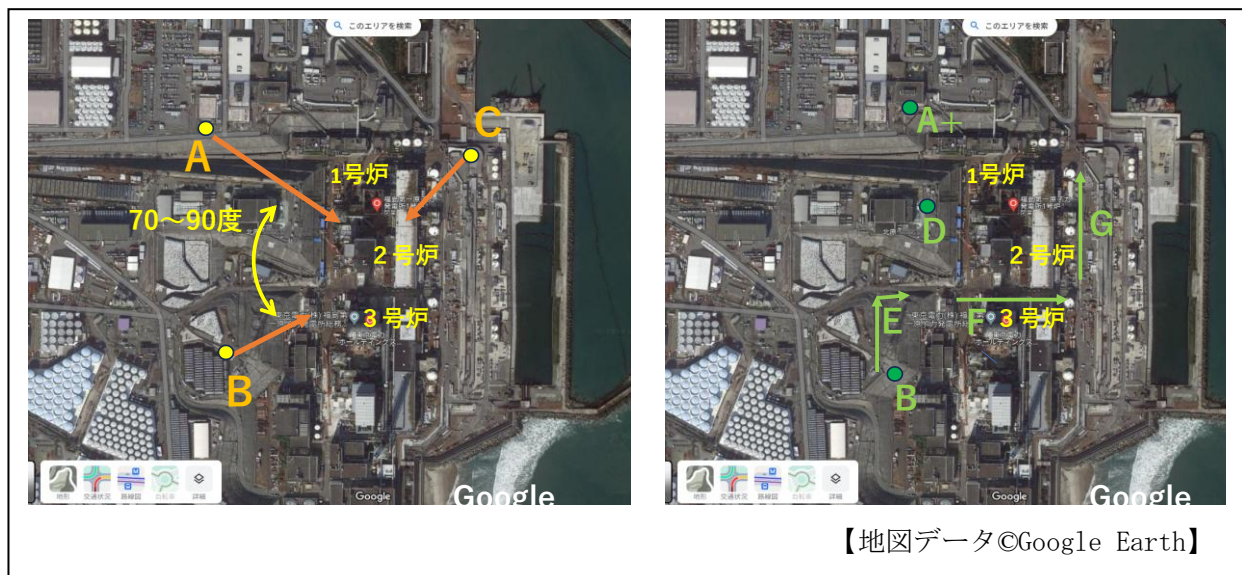


図 3.6.2-1 福島1F内でETCC撮像を提案した地点（左）とスペクトル測定地点（右）

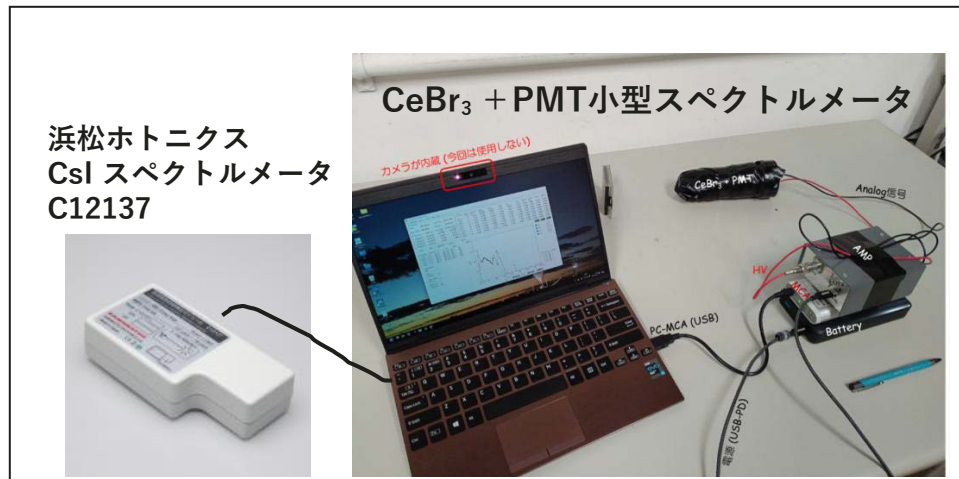


図 3.6.2-2 スペクトル測定に使用した浜松ホトニクス C12137[10] (左)
京大理で制作した CeBr₃ スペクトルメータ (右)

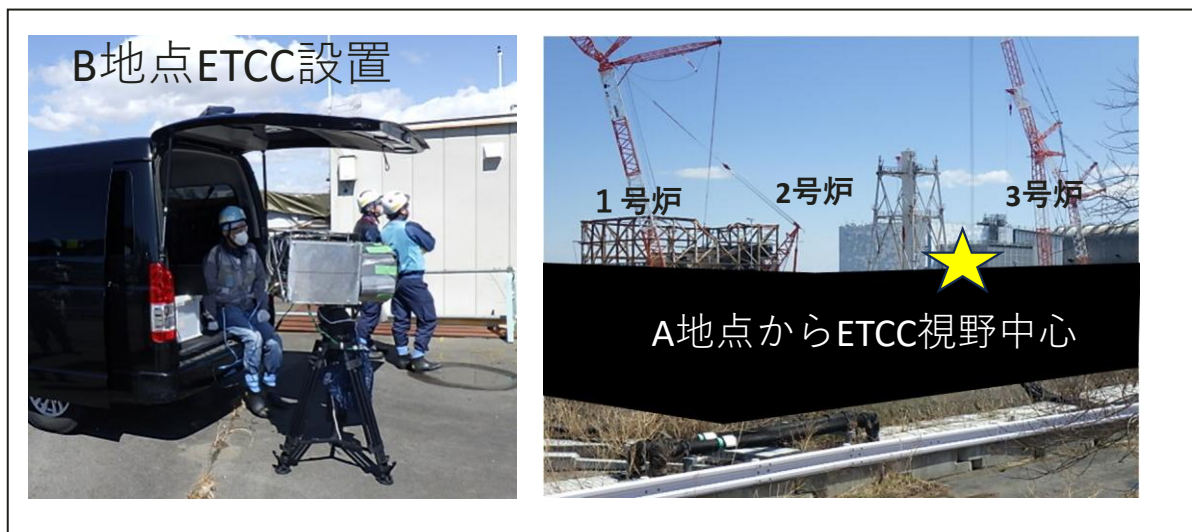


図 3.6.2-3 B 地点での ETCC 測定 (左)、A 地点から ETCC で測定した視野領域 (右)

3.6.3 まとめ

まず、福島 1F 内の測定が年度内によく実現できたことは、東電及び本測定の協力企業を引き受けていただいた日立 GE の多大な支援によっている。この英知事業は、福島 1F の廃炉を推進するための研究が目的であるが、この英知事業の推進母体である CLADS には福島 1F 内で測定や実験を行うフォーマットが全くなく、各研究者に任されている。我々は前回の英知事業で、令和元年度に福島 1F 内測定を実施した経験があったため、今回も福島 1F 内実験を行うのに必要な大体のプロセスは理解していたが、福島 1F 内での作業の仕様で令和元年度と変わった点も多く、実験を実現するために予想以上の時間、労力、経費が必要となり、大きな負担となった。

前回は協力企業として同時 ETCC の医学利用に興味を持っていただいた、株式会社千代田テクノル（以下、千代田テクノルと表記。）に個人的に依頼し引き受けていただいた。千代田テクノルは福島 1F 内の放射線管理を業務としていて、また、広く大学等の放射線管理も行っているため両者の違いに精通していたため、我々はその大きな違いを気にせず、千代田テクノルのほうですべて処理していただき福島 1F 内実験を行えた。しかし、今回はすでに千代田テクノルとの共同研究も解消したため、新たな協力企業探しから始まり、なんとか谷森の個人的な伝手をたよりに日立 GE 社に引き受けていただくことができた。日立 GE 社は福島 1F1 号炉を担当する会社であり、本研究が目指す炉建屋外部からのガンマ線による 3 次元スキャンを実現するためには最も適した会社である。但し、日立 GE 社は放射線管理業務を行っていないため、我々は放射線などの諸手続きに関して、今回は一般の原子力事業者と同じ手続きを大学側も取る必要が出てきた。しかし、大学等のシステムとの隔たりは大きく、日立 GE との間で 2 か月以上の調整時間がかかってしまった。例えば大学では放射線手帳を使用しないため、その取得から大変な労力が必要であった。そのため前回、千代田テクノルのほうが放射線管理の専門家であるため我々が不案内な点をすべて事前に理解していただき、千代田テクノルのほうで処理されていたことに気づいた次第である。福島 1F 内の測定は小規模なものでも、東電からは福島 1F 内での作業であり、福島 1F 内作業者に課せられる諸手続きをすべて満たさないと許可できないものであることも今回よく理解できた。日立 GE から多くの諸手続きを丁寧に説明いただき、なんとか年度末ぎりぎりであるが測定を実行できた。当然、測定を実施するためには大学、東電、協力企業間での覚書等の締結も必要となり、数か月に及ぶ時間を要した。

福島 1F 内での実験は、福島 1F のアクセスから実験機材の福島 1F 内導入、特に PC 等の情報機器などでは諸手続きが必要となり、実験の詳細を東電、協力企業とのすり合わせにかなりの時間が必要となる。これらを事前に理解しておかないとスケジュールが大きく乱れてしまう。今回も令和元年度と同じタイムスケールで考えていたが、新たな手続きや手続きに必要なステップ、時間が変化していたことなど、多くの問題が発生し対応に冷や汗をかいた。

このように福島 1F 内測定を実際に行うには、まず東電と協議を成立させ、その次に独自に協力企業を探し出すことができたとしても、1 年近くの準備期間と数百万円の経費を準備する必要がある。大学の研究者が公的な研究機関の諸施設を利用するのは全く別次元である。

このように福島 1F 測定実現には多大な労力が必要となるが、その成果は非常に大きく、研究が実際に福島 1F 廃炉に利用される可能性を引き出すには、福島 1F 内での実験は大きな要素となるのは間違いない。その点に関しては、結言でさらに述べていく。

3.7 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間並びに CLADS 等との連携を密にして研究を進めた。また、研究実施計画を推進するため、表 3.7-1 に記載した日程と内容で打ち合わせや会議等を TV 会議で行った。特に、7 月 18 日は令和 5 年度に予定する福島 1F 内での測定実験実施のための東電との協議を TV 会議で開催、また、11 月、12 月には原子力機構の FRS 実験を行い、原子力機構で京都大学、原子力機構、J-BEAM の本事業参加者が議論を交わすことができた。

令和 6 年 2 月 9 日は、京大理において令和 5 年度の本研究のミーティングを実施、ほぼ全員が参加した。各分担者の状況報告以外に、今後のこの研究の成果を如何に社会実装するか、特に一般原子炉施設のモニタリングや一般原子炉の廃炉への応用について議論し、本事業終了後 ETCC 及び WSPEEDI を用いた画像による 3 次元線量分布計測及び予想システムの社会実装の実現を全員で継続的に努力していくことを確認できた。

本研究では、J-BEAM から参加した水本氏、古村氏がともに若手研究者に該当する。また、原子力機構の佐藤氏、京都大学の高田氏、園田氏も 45 歳以下である。令和 5 年度 J-BEAM では、遮蔽計算、Ne-Ar-CF₄ の性能評価と独立した研究を実施、さらにそのデータを基に、京都大学とは独自に J-BEAM 社 ETCC を用いた FRS 実験を行った。このデータと実用化 ETCC の結果の比較から、ガスやシンチレータの種類の影響をも求めることができた。また、令和 5 年度を中心課題である福島 1F 内の画像試験は、京都大学の園田氏、高田氏が中心に行った（両者とも 45 歳以下）。このように本研究では若手の自主性を生かし、実質若手が主導するように勧めている。

表 3.7-1 打ち合わせ・会議の日程とその概要

会議開催日時	主な打ち合わせ会議の概要
2023/5/10	R5 年度の予算執行と開発予定の確認
2023/7/18	東電と R6 年度の福島 1F 内測定の説明と実施可能性の協議
2023/8/9	東電との福島 1F 測定協議の報告、予算執行状況の確認、福島 1F 実験に行く FRS 実験についての議論
2023/10/20	各機関の進捗状況確認、3 月 FRS 実験のまとめと 11 月 FRS 実験の打ち合わせ
2023/10/31	日立 GE と東京支社で福島 1F 実験の支援企業の依頼と説明
2023/11/20	JAEA において FRS 実験及び京大、JAEA の進捗状況の確認
2023/12/01	京大理学研究科において中間フォロー、TV 会議で英知のメンバーも参加
2024/2/09	京大理学研究科に集合、各機関の進捗状況の確認、3 月の 1F 試験の内容確認。英知後の本研究の社会実装についての議論
2024/2/17	福島 1F にて東電、日立 GE と 3 月の 1F 測定の詳細打ち合わせ

4. 結言

本研究は、前回の英知事業で開発した可搬型 20 cm 径 ETCC を福島 1F の環境下で実際に使用可能な実用化 ETCC の開発、同時に ETCC の完全可視化技術で得られた広域の 2 次元線量分布を発展させ福島 1F 内の 3 次元線量分布測定を実現させることである。但し、福島 1F 内の放射線環境は、炉建屋周辺のサブ mSv/h 以下の環境と炉建屋近傍及び内部の mSv/h 以上の高線量場に分けられる。第一段階として、約 200 μ Sv/h まで使用可能な実用化 ETCC の開発を目指した。前回開発の ETCC をベースに、実験室とは異なる福島 1F のような外気環境での長期使用に耐えられるよう気温変化等への対応策を令和 4 年度に行い、令和 5 年度は操作性と高めるための開発も実施した。

特に、コンプトン散乱を物理的に再構成してガンマ線方向を得るコンプトン型カメラ（従来のコンプトンカメラは不完全な再構成しかできない）は、散乱体とガンマ線吸収体の 2 つの検出器の同時計数が基本であり、偶発事象の影響を大変強く受ける。そのため、福島 1F 内で使用されたガンマ線カメラは数 cm 以上の厚い鉛遮蔽で覆う必要であった。ETCC は散乱体に希薄で光電吸収確率が小さいガスを用いること、電子飛跡を測定し他のコンプトンカメラより多くの物理量を用いる利点を活かして偶発事象等の雑音分離が可能な点があるため、10 μ Sv/h 程度まで無遮蔽での使用が可能であった。しかし、本事業で目指す 100 μ Sv/h 環境では遮蔽は不可欠となる。但し、ETCC は飛跡測定と感度を得るため、ある程度のガスのボリュームが必要となるため 30 cm 立方程度の体積が必要となる。そのため、必要な放射線場に応じて最低限必要な遮蔽厚を割り出し、できる限り軽量化を実現する必要がある。今回 ETCC は遮蔽無しで 30 kg の重量であり、遮蔽を入れても 60 kg 以下に抑えたい。

我々はそれを実現するため、シミュレーションによる遮蔽設計と原子力機構にある日本で唯一の 10～1000 μ Sv/h の ^{137}Cs 環境が精密に作れる FRS による校正実験を組み合わせることで効率のよい開発を今年実現した。大学等では福島 1F の高線量に対応する計数率を実現できない。しかし、信号処理回路は一般に高計数率になると予想外の多くの問題が生じる。この FRS 試験でそのような問題点もほとんどあぶり出すことができ、福島 1F 測定の前の対処が可能になった。但し、FRS 試験場と福島 1F 試験場は同じ線量でも角度分布が非常に異なり、その補正が不可欠だが精密なシミュレーションを行うことで補正を行うことができ、令和 6 年 3 月の福島 1F 測定では予想以内の計数率となった。このように福島 1F で初めての系統的な遮蔽設計手法が確立でき、今後の福島 1F 内測定の効率化が可能となった。

この手法の確立で、福島 1F 測定や FRS 実験の結果をシミュレーションに反映させ信頼度を上げることができた。実際、現在の 30 cm 立方の ETCC の体積は、数 μ Sv/h の環境で 20 分以内の測定を行う体積である。mSv/h 環境では、20 cm 立方以下の体積の ETCC でも十分であり、3 cm 厚の遮蔽でも可能になると考えられる。本事業では、高線量 ETCC はそのような考え方でシミュレーションによる最適な ETCC と遮蔽の設計を行う方針で行い遮蔽効果を求めた。シミュレーションをはじめた 1 年前は、mSv/h 環境での ETCC 使用は無理かとも思ったが、現在は上に述べたように可能性は充分あると考えている。この考察に基づき、高線量 ETCC は実用化 ETCC では難しい 300～1000 μ Sv/h で使用可能なようにシミュレーションで計算し、ガス容器と遮蔽治具を設計した。令和 6 年度に予定通り高線量 ETCC を完成し、令和 6 年度の福島 1F 測定に導入予定である。

【福島 1F 内での測定についての意義】

本研究の特徴は、前回の英知事業から福島 1F 内での測定を実際に行い、廃炉事業に具体的な新しい提言を行うことにある。前回は令和元年 10 月、11 月の 2 回、福島 1F 内で実験を行った。令和 2 年度は、新型コロナウイルス感染症により福島 1F 内での実験が不可能なため、複合研原

子炉の運転が再開したのを利用して、原子炉運転時の撮像を行う 3 次元線量分布計測に成功した。本研究では令和 5 年度、令和 6 年度に 2 回以上の福島 1F 内で測定を予定している。特に、3.3 節でシミュレーションを行っている炉建屋内の線量分布を建屋外周囲の複数方向から測定し、コンピュータトモグラフィー (CT) により 3 次元で求める測定を実際に行うことである。令和 5 年度は、その準備として福島 1F 全域の 3 次元線量分布を求める測定、具体的には、炉建屋群を見込む 2 つの方向からの撮像を実施した。今回の福島 1F 測定の道筋をつけるのは、3.6 節に述べたように前回よりもかなり大変になっていた。幸運に助けられ実現できたが、1 年ぐらいの準備期間と当初から 1 回あたり数百万円の経費を考える必要がある。原子力機構の福島部門以外で、東電からの要請以外に自分から福島 1F 内実験を企画し、実行したグループは多分ないと思う。しかし、英知事業の目的が福島廃炉を実現するための革新的な技術開発であり、それが成功するためには福島 1F 内で実際に開発グループが測定、実験を行うことは非常に重要であることは、前回及び今回の福島 1F 測定を通じて痛感した。

例えば、我々が行っている放射線測定関係の開発において、大学や研究機関の施設では線源は点線源が大半で、非常に弱い。医療用ファントムを使用すれば、人体程度の広がった線源が得られるが非密封線源であり、また、医療施設での物理実験は各種規制があり大変な作業である。ましてメートル以上に広がった線源は福島の除染地区しかないが、現在、除染地区で測定を行うためには立ち入り制限地区の立ち入り、地元の理解が必要なため実現は難しい。我々は除染地区の成果を基に英知事業を行っているが、線量が数 $\mu\text{Sv/h}$ の除染地区と福島 1F 内の放射線環境は全く別物である。大半のガンマ線カメラが、実験室と除染地区の違いから実際に使用されず撤退した。さらに、福島 1F 内の作業は毎年確実に進み、常に状況が変化している。前回の測定から 4 年が経過し、福島 1F 内部での作業のルールもかなり変わり苦労したが、各炉建屋は周囲を構造体で覆われつつあり、線量分布なども大きく変化している。これは CLADS から毎月文章で報告があるが、一度も福島 1F 内に入り実際の作業（測定など）を行っていないと、問題意識を持って内容を吟味できないため、英知事業の各グループへの反映は容易ではないと感じる。

我々は福島 1F 内で作業を数回行ったが炉建屋内、いわゆるイエローやレッドゾーンには入ることがない。しかし、福島 1F 内で東電や日立 GE の現場で対応する方々の話を伺うことで、そのような厳しい環境もある程度体感でき、令和 6 年度に予定している炉建屋周辺（100 $\mu\text{Sv/h}$ 環境）での CT 用測定の実現を目指せると考えている。

どの実験もそうであるが「百聞は一見にしかず」である。現場を見ないで現場を知ることはできない。この英知事業は、基礎科学の廃炉実現への大きな貢献を強く期待して進めているはずである。特に、若手人材育成が英知事業の最重要な目的であるはずである。その若手が現場を知らずに研究に従事すれば、どんどん実際の状況と乖離し、研究が廃炉に適応できず失望し、廃炉事業から離れるのではないか。現場に出向き問題点を明確に認識し、自分の研究を常に修正し、早期に廃炉に貢献することが若手育成の一番の道ではないかと思う。

具体的には、CLADS に英知事業の制度として福島 1F 内実験の道筋を明確に策定し、申請書にもそれを示すべきである。福島 1F 内実験の必要性が CLADS で認められるか推奨された場合、東電との交渉だけではなく、例えば原子力機構の福島部門が協力企業の役割を担い福島 1F 内実験が可能なように協力企業を手配していただく。また、必要な経費も申請グループに負担がかからないような制度を作っていただきたい。大学にいと福島 1F 内実験も、公的な研究機関の加速器や原子炉等の装置を使う実験の延長上に考えてしまう。協力企業の多大な労力が必要な福島 1F 内測定にかかる費用を英知事業の予算に申請時に組み込むことは不可能である。

英知事業では、よく東電側や現場企業からの要請にこたえるために必要な技術開発項目が述べられる。しかし、福島 1F のような未だ炉建屋内、炉内の情報はほとんど不明な状況で正解な技術は存在しない。革新的技術は普通予期しない場面から出てくる。しかし、現在の英知事業では、関係者の予想を超える技術が福島 1F 内の現場に採用される道筋はない。福島 1F に限らないが、革新的技術は実際に適応し有効性を示す必要があるが、英知事業でそのようなことは非常に困難であると感じている。

現在、廃炉計画の予定が大きく遅れようとしている。これを打破するには、今まで予想されなかった革新的アイデアとその実証が必要であり、それが英知事業で迅速に可能となる制度を作っていただきたい。

参考文献

- [1] Tanimori, T. et al., Establishment of Imaging Spectroscopy of Nuclear Gamma-Rays based on Geometrical Optics, Scientific Reports, 7 (2017), 41511, 12p.
DOI:10.1038/srep41511
- [2] Tanimori, T. et al., An Electron-Tracking Compton Telescope for a Survey of the Deep Universe by MeV Gamma-rays, The Astrophys. J., 810 (2015), 28, 12p.
DOI:10.1088/0004-637X/810/1/28
- [3] Tomono, D. et al., First On-Site True Gamma-Ray Imaging-Spectroscopy of Contamination near Fukushima Plant, Scientific Reports, 7 (2017), 41972, 10p. DOI:10.1038/srep41972
- [4] Takada, A. et al., First Observation of the MeV Gamma-Ray Universe with Bijective Imaging Spectroscopy, Using the Electron-tracking Compton Telescope on Board SMILE-2+, The Astrophys. J., 930 (2022), 6, 13p. DOI:10.3847/1538-4357/ac6103
- [5] 廃炉環境国際共同研究センター, 京都大学, 「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」(委託研究)ー令和2年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業ー, JAEA-Review-2022-027, (2022), 85p.
DOI:10.11484/jaea-review-2022-027
- [6] Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S. et al., Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS Version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol., 55, (2018), pp.684-690.
DOI:10.1080/00223131.2017.1419890
- [7] Nagai, H., Furuta, Y., Nakayama, H., Satoh, D., Quantitative Visualization of a Radioactive Plume with Harmonizing Gamma-Ray Imaging Spectrometry and Real-Time Atmospheric Dispersion Simulation Based on 3D Wind Observation, J. Nucl. Sci. Technol., 60, (2023), pp.1345-1360. DOI:10.1080/00223131.2023.2197445
- [8] Tarantola, A., Inverse Problem Theory, 600p. Amsterdam, Elsevier, 1987.
- [9] 廃炉環境国際共同研究センター, 京都大学, 「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」(委託研究)ー令和4年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業ー, JAEA-Review 2023-028, (2024), 54p. DOI:10.11484/jaea-review-2023-028
- [10] 浜松ホトニクス, 製品情報 光センサ 放射線・X線センサ 放射線検出モジュール C12137, <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/x-ray-sensor/radiation-detection-module/C12137.html> (参照日 2024 年 4 月 12 日) .

