DOI:10.11484/jaea-review-2022-027

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)

-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-

Quantitative Analysis of Radioactivity Distribution by Imaging of High Radiation Field Environment using Gamma-ray Imaging Spectroscopy (Contract Research)

-FY2020 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource

Development Project-

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター 京都大学

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

ROY ON

November 2022

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

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

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

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

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

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

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2022

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)

- 令和2年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業-

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

京都大学

(2022年8月31日受理)

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

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所 (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、研究課題のうち、平成30年度に採択された「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」の平成30年度から令和3年度の研究成果について取りまとめたものである(令和3年度まで契約延長)。本課題は令和3年度が最終年度となるため4年度分の成果を取りまとめた。

本研究では、ガンマ線イメージング装置である ETCC を 1F 廃炉事業での使用可能な可搬型装置でかつ高線量環境下で動作可能なように改良し、廃炉の現場に導入できるようにした。ETCC は世界初の光学カメラと同じ全単射撮像が可能なガンマ線カメラである。そのため ETCC は一般的な定量的画像解析法を放射線にも適用可能とすることが可能で、1F の廃炉に係る解決すべき 6 つの重点課題に革新的進展をもたらす。例えば廃炉工事で発生する汚染の飛散を 3 次元ガンマ線イメージングによりオンラインで検知、さらに拡散の動的な検知から精度の高い拡散予想を可能にする。それを実証するため令和元年に、1F 敷地内 1 km四方を一度に画像モニタリングし、同時に 100 か所以上のスペクトル観測を実現し、今まで不明だったスカイシャインガンマ線スペクトル及び分布の計測に成功した。さらに京都大学複合原子力科学研究所原子炉建屋内の 3 次元線量計測を実施、微量な Ar41 の大気拡散を 3 次元の動画撮像に成功。廃炉を超え一般の原子炉での高精度な放射線 3 次元画像モニタリング及び放射能拡散予想システムが実現できることを示す画期的な成果が得られた。

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

Quantitative Analysis of Radioactivity Distribution by Imaging of High Radiation Field Environment using Gamma-ray Imaging Spectroscopy

(Contract Research)

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

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

Kyoto University

(Received August 31, 2022)

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

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (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 FY2018, this report summarizes the research results of the "Quantitative analysis of radioactivity distribution by imaging of high radiation field environment using gamma-ray imaging spectroscopy" conducted from FY2018 to FY2021 (this contract was extended to FY2021). Since the final year of this proposal was FY2021, the results for four fiscal years were summarized.

In this study, ETCC, a gamma-ray imaging system, was modified to be a portable device that can be used in 1F decommissioning project and can operate in high-dose environments. ETCC is the world's first gamma-ray camera capable of complete bijective imaging, the same as an optical camera. Therefore, ETCC can make general quantitative image analysis methods applicable to radiation, and will bring innovative progress to the six key issues to be resolved for the decommissioning of 1F. For example, 3D gamma imaging will enable on-line detection of contamination dispersal during decommissioning, where the measurement of the dynamical movement of the dose dispersion will enable us to realize an accurate prediction of dose dispersion. To demonstrate this, in 2019, we will monitor 1 km square of the 1F site at a time and simultaneously observe more than 100 spectra, successfully measuring skyshine gamma-ray spectra and distributions that were previously unknown. Furthermore, 3D dosimetry in the reactor building of the Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University was conducted, and 3D atmospheric diffusion of trace amounts of Ar41 were successfully taken. This is an epoch-making achievement that shows that a high-precision 3D radiation image monitoring and radioactivity dispersion forecasting system can be realized in general nuclear reactors beyond the decommissioning of nuclear reactors.

Keywords: Spectroscopy, Gamma-ray Imaging, Compton Camera, Large Eddy Simulation, PHITS, LOHDIM

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

目次

| 1. | 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要1 |
|----|---|
| 2. | 平成 30 年度 採択課題 2 |
| 3. | 令和元年度 採択課題5 |
| 4. | 令和 2 年度 採択課題8 |
| 付 | 録 成果報告書11 |
| | |
| | |
| | |
| | Contents |
| | |
| | |
| 1. | Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project |
| | |
| 2. | Accepted Proposal in FY2018 |
| 3. | Accepted Proposal in FY2019 |
| 4. | Accepted Proposal in FY2020 |
| Ap | pendix Result Report11 |

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 | 山﨑 信哉 | 筑波大学 |
| ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部 被ばくの横断的生体影響評価 | 片岡 隆浩 | 岡山大学 |
| 炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発 | 大石 佑治 | 大阪大学 |
| iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変 異計測系の確立 | 島田 幹男 | 東京工業大学 |
| レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低い ストロンチウム 90 の迅速分析技術開発 | 岩田 圭弘 | 東京大学 |

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム (日英共同研究)

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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度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 ^(令和元年度まで) 大曲 新矢 | 産業技術総合 研究所 |

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

| 課題名 | 研究代表者 | 所属機関 |
|--|-------|-------------------------------|
| 高い流動性および陰イオン核種保持性を有するア ルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安 全で効果的な固化 | 佐藤 努 | 北海道大学 |
| 再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発 | 渡邊 実 | 静岡大学 (令和2年度 まで) 岡山大学 |

国際協力型廃炉研究プログラム (日露共同研究)

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

研究人材育成型廃炉研究プログラム

| 課題名 | 研究代表者 | 所属機関 |
|---|------------------------------|--------|
| 燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のた めの遠隔技術に関する研究人材育成 | 淺間 一 | 東京大学 |
| 化学計測技術とインフォマティックスを融合した デブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育 成 | 高貝 慶隆 | 福島大学 |
| 放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デ ブリ劣化機構の解明 | 大貫 敏彦 (平成30年度まで) 竹下 健二 | 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. 今和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 | 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 | 渡邉 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 |

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

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 |
|--|-------|------|
| 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 |

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録

成果報告書

This is a blank page.

令和2年度

日本原子力研究開発機構 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

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 (契約番号 R02I025-2)

成果報告書

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

目次

| 概略. | | . vii |
|---|--|---|
| 1. は | こじめに | 1 |
| 2. 業 2.1 2.2 2.3 2.3. 2.3. 2.3. 2.3. | 2 耐放射線性・利便性に優れた軽量 ETCC の開発 3 ETCC の性能を生かした調査法の開発 4 γ線画像から大気中 3 次元核種分布及び放出量を逆解析する手法の開発 (連携先: JAEA) | 3 5 5 6 6 |
| 3. 1 3. 3. 3. 2 3. | 1.1 調査用 ETCC の制作 | 8 8 . 10 . 23 . 23 . 31 |
| 3. 3. 3. | JAEA) 4.1 大気中核種濃度分布の作成 4.2 仮想γ線画像データの作成 4.3 逆解析手法の開発 4.4 まとめ 研究推進 | . 35. 43. 46. 56 |
| 4. 結 4.1 4.2 4.3 4.4 | 調査用 ETCC の制作と放射能定量画像評価の実施 耐放射線性・利便性に優れた軽量 ETCC の開発 ETCC の性能を生かした調査法の開発 γ線画像から大気中 3 次元核種分布及び放出量を逆解析する手法の開発(連携先: JAEA) 研究推進 | . 58 . 59 . 60 |
| 会老 立 | | 62 |

執筆者リスト

事業代表者

国立大学法人京都大学 教授 谷森達(2022年4月より名誉教授)

助教高田淳史特定研究員園田真也

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 ディビジョン長 永井晴康

 研究副主幹
 中山浩成

 研究主幹
 佐藤大樹

表一覧

| 表 3.4.3-1 | 逆解析のパラメータの繰り返し回数 I と α (不確実性の共分散行列の設定における |
|-----------|--|
| | 比率)を変化させた場合の放出率と濃度最大値の推定値4 |
| 表 3.4.3-2 | 1分後から2分後までの放出率を1分後までの0.1、0.5、1.0、2.0、及び10.0倍に |
| | 変化させたケースに対する逆解析による放出率と濃度最大値の推定値5 |

図一覧

| 図 1-1 | 電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) | 2 |
|------------|---|------|
| 図 2.1-1 | γ線画像からの逆解析による大気中3次元核種分布及び放出量の特定 | 3 |
| 図 2.1-2 | KSG の BNCT 用試作 ETCC の性能と写真 | 4 |
| 図 2.1-3 | 本業務の全体計画及び年次計画 | 4 |
| 図 2.2-1 | 実施体制図 | 5 |
| 図 3.1.1-1 | 調査用 ETCC の組み立て後の写真 | 8 |
| 図 3.1.1-2 | MPPC 信号処理回路 | 9 |
| 図 3.1.1-3 | シンチレータパルス幅 | 9 |
| 図 3.1.1-4 | 構造体の軽量化 | . 10 |
| 図 3.1.2-1 | 10月測定分・視野中心 A (1、2、3号炉を見渡せる視野) の等立体角イメー | ジと |
| | イメージ領域ごとのスペクトル | . 11 |
| 図 3.1.2-2 | キャットウォーク上の測定地点 | . 12 |
| 図 3.1.2-3 | ETCC 測定中の写真 | . 12 |
| 図 3.1.2-4 | 各測定点における 5 MW 運転時の y 線線量と中性子線量 | . 13 |
| 図 3.1.2-5 | CsI(T1)スペクトロメータで取得した測定地点毎のγ線スペクトル | . 14 |
| 図 3.1.2-6 | 令和3年12月9日(午前中)測定時のトリガー率の時間変化 | . 15 |
| 図 3.1.2-7 | 視野ごとの 511 keV、41Ar、3 MeV 以上の 2 次元放射線強度分布 | . 16 |
| 図 3.1.2-8 | ⁴¹ Ar ライン γ 線の時間変化 | . 17 |
| 図 3.1.2-9 | ⁴¹ Ar のスカイシャイン | . 18 |
| 図 3.1.2-10 | 京大炉計測データの逆解析における解析領域 | . 19 |
| 図 3.1.2-11 | 京大炉計測データ(⁴¹ Ar)の逆解析 | . 20 |
| 図 3.1.2-12 | 京大炉計測データの逆解析における 41Ar 線源初期一様分布 | . 20 |
| 図 3.1.2-13 | 京大炉計測データの逆解析における 41Ar 線源の 3 次元分布 | . 21 |
| 図 3.1.2-14 | 京大炉計測データの逆解析における 511 keV 線源初期一様分布 | . 21 |
| 図 3.1.2-15 | 京大炉計測データの逆解析における 511 keV 線源分布(炉全体) | . 22 |
| 図 3.2.1-1 | シンチレータのパルス波形のタイミング誤差分布 | . 24 |
| 図 3.2.1-2 | 9 アレイを用いた GSO システム全体で測定した ¹³⁷ Cs スペクトル | . 25 |
| 図 3.2.1-3 | 662 keV γ 線スペクトルの温度変化 | . 25 |
| 図 3.2.1-4 | 温度補正曲線 | . 26 |
| 図 3.2.1-5 | TPC 容器背面に置かれた MPPC と冷却用ファン | . 26 |
| 図 3.2.1-6 | ETCC で測定した ¹³⁷ Cs スペクトル | . 27 |
| 図 3.2.1-7 | ETCC で測定した複合研原子炉スペクトル | . 28 |
| 図 3.2.1-8 | ETCC トリガーシステムのタイミングチャート | . 29 |
| 図 3.2.1-9 | システム不感時間の低減 | . 30 |
| 図 3.2.2-1 | ETCC で得られた ¹³⁴ Cs γ 線 2 次元分布による 1 号炉建屋付近の Cs の 3 次元分 | 布の |
| | 結果 | . 31 |
| 図 3.4.1-1 | 気象観測・簡易拡散実験を実施したサイト | . 36 |
| 図 3.4.1-2 | 各仰角における視線方向風速分布 | . 37 |

| 図 3.4.1-3 | 建物屋上面での噴霧器周辺の風速ベクトル分布3 | 37 |
|------------|---|----|
| 図 3.4.1-4 | 噴霧器によるミスト状のプルーム放出による簡易拡散実験の様子 | 38 |
| 図 3.4.1-5 | プルーム拡散挙動 (Case A: 令和2年11月26日11:23-11:31)3 | 38 |
| 図 3.4.1-6 | プルーム拡散挙動 (Case B: 令和2年12月1日11:13-11:21) 3 | 39 |
| 図 3.4.1-7 | (a)決定係数と(b)平均風速に対する乱流強度の分布曲線4 | 10 |
| 図 3.4.1-8 | ミストプルーム拡散実験と簡易拡散計算における拡散挙動 | 12 |
| 図 3.4.1-9 | 詳細拡散シミュレーションの計算モデル4 | 12 |
| 図 3.4.1-10 | 詳細拡散計算による1分間平均の大気中核種濃度分布4 | 13 |
| 図 3.4.2-1 | 放射性核種濃度分布の逆解析計算体系4 | 14 |
| 図 3.4.2-2 | ある大気中核種濃度分布に対する仮想γ線画像の例 | 15 |
| 図 3.4.3-1 | 1分後までの逆解析結果の濃度と正解分布の濃度の散布図 | 51 |
| 図 3.4.3−2 | 1分後までの正解分布(左)と逆解析結果(右)の放出高度水平分布の比較5 | 52 |
| 図 3.4.3-3 | 1分後から2分後までの逆解析結果の濃度と正解分布の濃度の散布図5 | 54 |
| 図 3.4.3-4 | 1分後から2分後までの正解分布(左)と逆解析結果(右)の放出高度水平 | |
| | 分布の比較 | 55 |
| | | |

略語一覧

ETCC :Electron-Tracking Compton Camera (電子飛跡検出型コンプトンカメラ)

TPC : Time Projection Chamber (タイムプロジェクションチェンバー)
PSA : Pixel Scintillator Array (ピクセルシンチレーターアレイ)

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)

KSG : Kyoto Space Gamma (株式会社京都 Space Gamma)

Cps :counts per second (1 秒あたりの計数値)

BNCT :Boron Neutron Capture Therapy (ホウ素中性子捕捉療法)

1F : Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

(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)

μ-PIC :Micro Pixel Chamber (マイクロピクセルチェンバー)

GEM :Gaseous Electron Multiplier (ガス電子増幅器)

PMT :Photomultiplier Tube (光電子増倍管)

LES :Large Eddy Simulation (ラージエディシミュレーション)

PHITS :Particle and Heavy Ion Transport code System

(粒子・重イオン輸送計算コード)

LOHDIM :Local-scale High-resolution atmospheric dispersion model

(局所域高分解能大気拡散モデル)

MPPC :Multi Pixel Photon Counter (多重ピクセル光子計数器)

TCU :Trigger Control Unit (トリガー制御ユニット)

FPGA :Field-Programmable Gate Array (フィールドプログラマブルゲートアレイ)
LTapies :Linear Technology Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

LTspice :Linear Technology Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

(Linear Technology 社の回路シミュレーター)

GAGG $: Gd_3(Ga, A1)_5O_{12}$ (<math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math><math> <math><math><math><math> <math> <math> <math><math> <math> <math>

GSO $: Gd_2SiO_5 (J F J = D A \cdot D A \cdot D J = D A \cdot D A$

ADC :Analog to Digital Converter (アナログ/デジタル変換器)

ch :channel (チャンネル)

FWHM :Full width at half maximum (半値全幅)

SPEEDI :緊急時環境線量情報予測システム (System for Prediction of

Environmental Emergency Dose Information)

東電 : 東京電力ホールディングス株式会社 複合研 : 京都大学複合原子力科学研究所

概略

研究の背景:

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所(IF)の廃炉措置等に係わる解決すべき 6 つの重点課題(①燃料デブリの経年変化プロセス等の解明、②特殊環境下の腐食現象の解明、③画期的なアプローチによる放射線計測技術、④廃炉工程で発生する放射性飛散微粒子挙動の解明、⑤放射性物質による汚染機構の原理的解明、⑥廃炉工程で発生する放射性物質の環境中動態評価)のすべてにおいて、放射線量とその分布、種類同定(スペクトル分析)、放射性物質の動態把握と近隣への拡散影響など、放射性物質の正確な情報収集が課題解決の重要な要素である。そのため、放射性物質の情報収集の最有力手段であるγ線の完全可視化技術の研究開発・応用技術は、すべての重点課題で重要な進展をもたらす。特に、放射性物質から放射される核γ線やその散乱γ線に対して、可視光と同様に集光(幾何光学)に基づく画像処理が可能となれば、光学カメラによる計測と同様な定量性が担保された画像分析が実現できる。さらには、放射性物質の環境中動態評価に大きな進展をもたらすばかりでなく、今後の原子炉事故での正確な放射能拡散予測の実現につながる。

解決すべき課題:

従来の γ 線画像化法では、光学画像のような定量的画像解析は不可能であった。代表的な γ 線 撮像装置である従来型コンプトンカメラでは、 γ 線の入射方向を一意に特定することはできず、入射方向を円環状の領域に制限することで疑似的な γ 線画像の作成しかできない。この手法では 広範囲の γ 線情報が混合した状態から区別できないため、広範囲に放射能が拡散している 1F のような環境では、カメラ設置場所近くの高強度のスポットがぼんやりと見える程度で、放射線の絶 対量や正確な分布範囲など定量的分析はできない。これを原理的に解決するため、コンプトン散乱の全物理量が計測できる電子飛跡検出型コンプトンカメラ(Electron-Tracking Compton Camera: ETCC)を、高線量環境下で動作可能に改良し、同時に可搬型システムを構築して、1F の 現場に導入することが必要である。また、複数台のカメラによるステレオ計測 γ 線画像から大気中 3 次元核種分布及び放出量を逆解析する手法を開発することが必要である。

本研究の目的:

本研究では、ETCC を高線量環境下で動作可能に改良するとともに、可搬型システムを構築して、1F の現場に導入できるようにする。また、ETCC を応用した定量的放射能分布解析法を開発し組み合わせることで、1F の廃炉に係る解決すべき 6 つの重点課題の③画期的な放射線計測技術はもちろん、④放射性飛散微粒子挙動の解明、⑤汚染機構の原理的解明、⑥放射性物質の環境中動態評価にも革新的な進歩をもたらす。これにより、3 次元放射線分布、その由来の放射能分布を定量的に可視化できるシステムを実現させる。

本研究の実施内容:

本事業では、これまで天文学・医療用途に開発してきた ETCC とその γ 線完全可視化技術を、IF の現場に投入できるように応用する。 γ 線に対して光学画像解析の手法が利用可能となれば、対象物表面の放射能計測、場所毎のスペクトル分光(カラー化)から放射性物質の同定と散乱 γ 線の影響も定量的に測定できる。ETCC による 1F の γ 線完全可視化技術で得た画像情報と、定量的放射能分布解析法を組み合わせることで、廃炉措置等に係わる重点課題・廃炉プロジェクトを着

実に進展させることを目指す。医療用に開発した ETCC をもとに、現場での操作性を重視した軽量 ETCC を試作し、フィールド試験により実用性を評価する。

これに加えて、 γ 線画像データを最大限に活用するため、連携先である国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」と略す。)が中心となって開発した、世界に誇る Particle and Heavy Ion Transport code System(以下、「PHITS」と略す。)を活用して、3次元放射線場の定量的構築を行い放射性物質の拡散モデリング予測の実用化を行う。 γ 線の完全な撮像分光測定を通して、放射性物質の状態を明らかにするハードウェア・ソフトウェアの開発が有機的に結合され、21世紀の廃炉も踏まえた原子力放射能監視システムの原型を構築する計画である。本事業は、今後の原子炉の安全管理体制の大きな躍進となり社会へ大きな安心・安全の担保につながる。

本研究の成果:

本事業の中心である γ 線方向を検出し、画像による線量定量解析可能な γ 線カメラ(ETCC)を、1F 内の多くの箇所で迅速に計測可能であり、かつ高線量場にある程度対応可能なように改善することである。まず、本研究の目的の 1 つである軽量化については、当初 50 kg 以上あったシステムを令和元年度には 35 kg の調査用 ETCC を完成させることができ、1F 内で線量画像測定を実施した。1 km 四方の広い領域を同時に撮像し、その視野内の約 100 点で独立にスペクトル測定を実現した。空からは 137 Cs の 662 keV のライン γ 線が大気で散乱された低エネルギー γ 線、つまりスカイシャイン γ 線の直接測定に、世界で初めて成功した。同じ視野内の 1F 原子炉建屋付近では、明確な 137 Cs の強いライン γ 線を計測、建屋から遠方に行くにつれ、662 keV のピークが減少する様子も測定された。また、ETCC の画像計測は、光学原理を満たすため画像内の照度に対応する線量が定量的に算出できることも実証され、その有効性を示した。令和 2~3 年度には、ETCC のエネルギー分解能及び数百 μ Sv/h 程度の高計数率に対応するため、シンチレータ部を、MPPC を用いた小型軽量かつデジタル処理回路に改善した。この改善により、ETCC のエネルギー分解能が 13% (662 keV にて) から 9%に改善し、不感時間も 1 桁削減しこの要求を満たした。この新型回路と令和元年度に開発した TPC を組みあわせ、本研究で予定した軽量 ETCC を実現した。重量は 30 kg まで低減できた。

当初予定していた令和 2 年度の軽量 ETCC 2 台相当を用いた 1F 内での 3 次元線量計測は、コロナ渦のため実施できなかったが、その対応を CLADS と協議し、京都大学複合原子力科学研究所(以下、「複合研」と略す。)の原子炉建屋内で 3 次元線量計測を行うこととなり、令和 3 年 12 月に実施した。200 keV~5 MeV の広エネルギー域で原子炉を 4 方向から画像測定を行い、3 次元線量分布画像を得ることに成功した。特に、出力を 1 MW から 5 MW に増強後、炉内空気が温まることで炉内から放出される微量の 41 Ar(1290 keV、半減期 110 分)の動画撮像に成功した。線量は法令基準の 5 分の 1 以下の微量で、原子炉内線量の 100 分の 1 程度の微量な変化だが、ETCC はその放出箇所、大気中への拡散の様子を 7 分間隔の動画でダイナミックに撮像することに成功した。このように、1F 内の解体工事の場合でも、強い環境線量の中からでも、わずかな汚染物質の飛散もオンラインで画像モニタリングが可能なことを実証した。また、JAEA では実際にミストを飛ばしビデオカメラで追跡した。その結果と予想シミュレーションを比較することで、精度検証を実施した。この 2 つの結果から、本研究の当初目的である 1F 解体時での汚染物質拡散の迅速な 3 次元画像モニタリング、そのデータを基にした迅速な拡散予想システムが構築できたことを確認できた。

前年度までの成果報告書:

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) - 平成 30 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 - JAEA-Review 2019-036, https://doi.org/10.11484/jaea-review-2019-036

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) -令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 -JAEA-Review 2020-044, https://doi.org/10.11484/jaea-review-2020-044

1. はじめに

本研究(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)は、JAEA の廃炉環境国際共同研究センター(Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science: CLADS)による公募事業「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」における、課題解決型廃炉研究プログラムとして実施するものである。課題解決型廃炉研究プログラムは、廃炉基盤研究開発課題、潜在的な廃炉課題など、廃炉プロジェクトを着実に進展させるためのニーズに基づいた研究開発の推進により、課題解決を目指している。

1F の廃炉措置等に係わる解決すべき 6 つの重点課題(①燃料デブリの経年変化プロセス等の解明、②特殊環境下の腐食現象の解明、③画期的なアプローチによる放射線計測技術、④廃炉工程で発生する放射性飛散微粒子挙動の解明、⑤放射性物質による汚染機構の原理的解明、⑥廃炉工程で発生する放射性物質の環境中動態評価)のすべてにおいて、放射線量とその分布、種類同定(スペクトル分析)、放射性物質の動態把握と近隣への拡散影響など、放射性物質の正確な情報収集が課題解決の重要な要素である。そのため、放射性物質の情報収集の最有力手段であるγ線の完全可視化技術の研究開発・応用技術は、すべての重点課題で重要な進展をもたらす。特に、放射性物質から放射される核γ線やその散乱γ線に対して、可視光と同様に集光(幾何光学)に基づく画像処理が可能となれば、光学カメラによる計測と同様な定量性が担保された画像分析が実現できる。

しかしながら、従来の γ 線画像化法では、光学画像のような定量的画像解析は不可能であった。 代表的な γ 線撮像装置である従来型コンプトンカメラでは、 γ 線の入射方向を一意に特定することはできず、入射方向を円環状の領域に制限することで疑似的な γ 線画像の作成しかできない。 この手法では、広範囲の γ 線情報が混合した状態から区別できないため、広範囲に放射能が拡散 している 1F のような環境では、カメラ設置場所近くの高強度のスポットがぼんやりと見える程度 で、放射線の絶対量や正確な分布範囲など定量的分析はできない。これを原理的に解決するため、 コンプトン散乱の全物理量が計測できる ETCC を導入する。図 1-1 に ETCC の模式図・宇宙観測用 の大型 ETCC の写真・従来型カメラと、ETCC の γ 線画像の見え方の違いを載せる。

ETCC では、ガスを用いた Time Projection Chamber (TPC) で γ 線のコンプトン散乱における反跳電子の3次元飛跡を測定し、TPC 周囲に設置した Pixel Scintillator Array (PSA) で散乱 γ 線を計測し、これらの組み合わせで、 γ 線のコンプトン散乱における全物理量の計測を実現している。これにて、 γ 線到来方向を一意に決定でき、 γ 線の幾何光学に基づく完全可視化を世界で初めて実現した $^{[1]}$ 。 γ 線の完全可視化は、カメラ設置環境より2 桁低い線量の画像測定を可能とし、遠方の弱線量分布測定においてもその分布形状・放射線量・スペクトルを定量的に判定できる $^{[2]}$ 。すでに、福島県の除染区域・未除染区域ともにスカイシャインの分析に成功し、衆目を集めている $^{[3]}$ 。また、事象の全物理量計測から高効率での雑音除去を実現し、数 $^{[3]}$ のまた、事象の全物理量計測から高効率での雑音除去を実現し、数 $^{[3]}$ のまた、事象の全物理量計測から高効率での雑音除去を実現し、数 $^{[3]}$ のまた、事象の全物理量計測から高効率での雑音除去を実現し、数 $^{[3]}$ のまた、事象の全物理量計測から高効率での雑音除去を実現し、数 $^{[3]}$ のまた、事象の全物理量計測から高効率での雑音除去を実現し、数 $^{[3]}$ のまた、事象の全物理量計測から高効率での発音除去を実現し、数 $^{[3]}$ の表に限界性能を算出でき、原理的な計測可能限界まで合理的にアプローチできるこの手法を $^{[3]}$ の精密な放射線画像解析技術を確立する。

本研究では、これまで天文学・医療用途に開発してきた ETCC とその γ 線完全可視化技術を、1Fの現場に投入できるように応用する α α 線に対して光学画像解析の手法が利用可能となれば、対象物表面の放射能計測、場所毎のスペクトル分光(カラー化)から、放射性物質の同定と散乱 α 線の影響も定量的に測定できる。ETCC による 1F α α 線完全可視化技術で得た画像情報と、定

量的放射能分布解析法を組み合わせることで、廃炉措置等に係わる重点課題・廃炉プロジェクトを着実に進展させることを目指す。医療用に開発した ETCC をもとに、現場での操作性を重視した軽量 ETCC を試作し、フィールド試験により実用性を評価する。

これに加えて、 γ 線画像データを最大限に活用するため、PHITS を活用して、3次元放射線場の定量的構築を行い放射性物質の拡散モデリング予測の実用化を行う。 γ 線の完全な撮像分光測定を通して、放射性物質の状態を明らかにするハードウェア・ソフトウェアの開発が有機的に結合され、21世紀の廃炉も踏まえた原子力放射能監視システムの原型を構築する計画である。本研究は、今後の原子炉の安全管理体制の大きな躍進となり、社会へ大きな安心・安全の担保につながる。

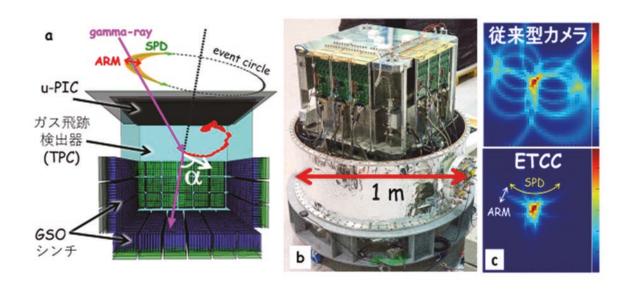


図 1-1 電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC)

- (a) ETCC の構造及び原理の模式図
- (b)宇宙観測用に京都大学グループで開発した大型の ETCC
- (c) 実測による従来型のコンプトンカメラと ETCC による γ 線画像の見え方の例 点状の γ 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。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本研究では、γ線の幾何光学に基づく完全可視化技術による、定量的放射能分布解析法を開発し、1F の廃炉に係る解決すべき6つの重点課題のうち、③画期的な放射線計測技術はもちろん、④放射性飛散微粒子挙動の解明、⑤汚染機構の原理的解明、⑥放射性物質の環境中動態評価にも革新的な進歩をもたらすことを目指す。そのために、γ線の完全可視化(画像化)が可能な観測装置 ETCC を1F の状態把握に応用する。これに加え、γ線画像から、大気中3次元核種分布と放出量を逆解析する手法を開発し、両者を組み合わせる。図2.1-1 にγ線画像からの逆解析による、大気中3次元核種分布及び放出量の特定の概念図を示す。

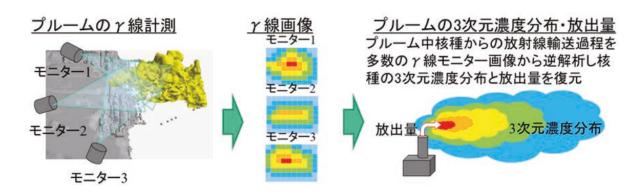


図 2.1-1 γ 線画像からの逆解析による大気中 3 次元核種分布及び放出量の特定

ETCC は、コンプトン散乱の全物理量を計測することで、 γ 線の到来方向を完全決定可能である。また、高い雑音除去能力を持ち、宇宙観測・医療応用・環境計測での実績を持つ。遮蔽を用いない状態でも大半の雑音除去を実現して、回路の工夫次第で数 mSv/h の環境でも使用できる可能性を持っている。令和 3 年度時点では、中性子治療施設である Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) での、 γ 線画像モニター用に試作した ETCC は、約 300 μ Sv/h 環境において遮蔽無しで動作可能であり、サイズ 35×35×50 cm³、重量 45 kg、電池駆動かつネットワーク接続による遠隔制御可能な可搬型装置である。この BNCT 用試作 ETCC は、京都大学発のベンチャー企業「株式会社京都 Space Gamma」(Kyoto Space Gamma: KSG)で開発しているもので、すでに1F 関連調査に必要な γ 線画像化性能を基本的には有している。図 2.1-2 に KSG の BNCT 用試作 ETCC を示す。

本事業では、ETCC による γ 線完全可視化能力を確実に活用できるよう、研究開発・研究応用を行う。BNCT 用試作 ETCC を設計の出発点として改良を進め、1F の原子炉建屋外及び建屋内外壁部付近での調査を目指す。そのため、①遮蔽無し使用環境を数 mSv/h に改善し、②25~30 kg への軽量化、及び湿度・温度の影響を低減し屋外での年間安定使用実現など実用性を高め、量産性のある ETCC の開発を目指す。これにより、本事業の終了時に ETCC を現場に投入可能な状態にすることを目指す。また、簡易遮蔽の状態で 10 mSv/h の動作実現性を実証し、数十 m 離れた 100 mSv/h 環境の画像解析の実現可能性を示す。同時に、 γ 線画像から、大気中 3 次元核種分布及び放出量を逆解析する手法を開発し、ETCC と組み合わせることで、3 次元放射線分布と放射性核種の分布を定量的に可視化できるシステムを実現させる。

| 性能項目 | KSG 社 BNCT 用 ETCC の性能 |
|---------|---|
| 撮像の定義 | 視野 100 度角を 10 度角毎に 100 領域同時スペクトル計測解 |
| 角度分解能 | 5~10 度(2 次元 PSF) |
| 解析後の計数力 | 雑音分離後に 1 μ Sv/h 環境で 5 cps |
| 動作環境 | $10^{-4} \mu \text{Sv/h} \sim \text{mSv/h}$ |
| 強度計測感度 | 約 300 μ Sv/h 環境で、 その 1/100 強度まで計測可 |
| サイズ・重量 | 約 50×35×35 cm³、45 kg、電池駆動 |

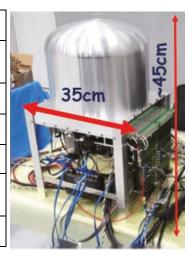


図 2.1-2 KSG の BNCT 用試作 ETCC の性能と写真

年次計画を図 2.1-3 に示す。

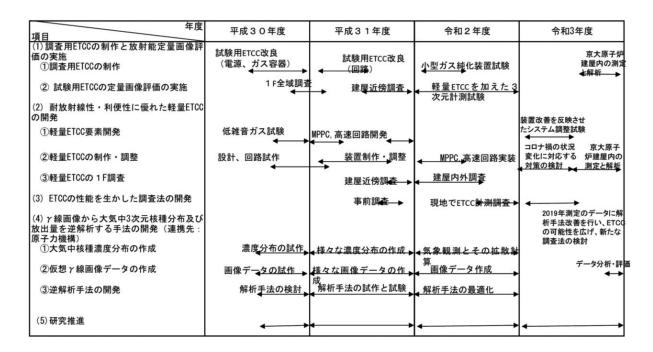


図 2.1-3 本業務の全体計画及び年次計画

2.2 実施体制

この目標を達成するため、本事業は、京都大学(以下、「京大」と略す。)、JAEA の 2 機関の協力により実施する。また、実施計画を大きく以下の 5 つ(実施項目 $1\sim5$)に分けた。実施項目 $1\sim2$ 、4 はさらに下位項目に細分化している。実施体制を図 2.2-1 に示す。

- 実施項目1:調査用 ETCC の制作と放射能定量画像評価の実施
- 実施項目 2:耐放射線性・利便性に優れた軽量 ETCC の開発
- 実施項目3:ETCCの性能を生かした調査法の開発
- 実施項目4:γ線画像から大気中3次元核種分布及び放出量を逆解析する手法の開発
- 実施項目5:研究推進

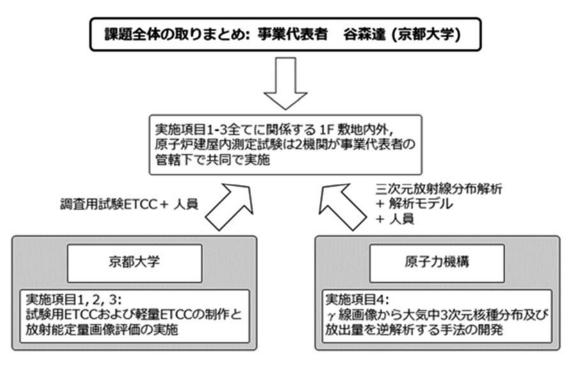


図 2.2-1 実施体制図

2.3 令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法

- 2.3.1 調査用ETCCの制作と放射能定量画像評価の実施
 - (1)調査用ETCCの制作

令和元年度に完成させた軽量ETCCと調査用ETCCを同等の性能に改良し、令和2年度以降予定の、ステレオ3次元計測に使用できるようにした。また、小型ガス循環装置を取り付け、ガスの長時間の試験を実施した。

調査用ETCCのシンチレータ読出回路を新型のMPPC用に交換、TPC部はすでに軽量ETCCと同等に制作した。MPPC採用により、GSOでエネルギー分解能を11%から8%に改善し、また、計数率上限も4倍以上に改善され、 $100~\mu$ Sv/hに近い線量での測定も可能となる。また、4~kg軽くし、約30~kgの重量に軽量化され、2.3.2(2)のステレオ3次元計測に使用できるようにな

った。令和元年の1F調査から、作業は1日程度の短時間で終了する必要があることが判明した。京都からの輸送を考慮してもガス循環装置をつける必要がないとわかり、軽量化のため取り付けを中止し、他の京大保有の同等のETCCで長時間使用試験を実施した。

(2)試験用ETCCの放射能定量画像評価の実施

上記のように改良した調査用ETCCと軽量ETCCの2台を用い、複合研原子炉建屋で3次元線量分布作成の試験を実施、炉心付近で2台相当のETCCでステレオ観測を行った。その3次元線量分布結果に、平成30年度の1F計測の結果、令和元年度、令和2年度のETCC改善の結果を取入れ、今後の解体工事等での汚染拡散のオンライン3次元モニタリング実施の可能性を探った。

2.3.2 耐放射線性・利便性に優れた軽量ETCCの開発

(1)軽量ETCCの制作・調整

令和元年度に制作した、軽量ETCC内の回路特性を定義するFPGA内のロジックを開発し、検 出効率等の基本性能を測定した。

MPPC仕様の新型シンチレータ読出し回路は、パルス形状を逐次近似で記録するため、依然のpeak-hold型に比べデータ処理時間が $20~\mu$ 秒から $1~\mu$ 秒に短縮、またトリガーの発生主体高計数率のシンチレータから10分の1以下の計数率のTPCに変更することで、数倍の高計数率、計算上は数百 μ Sv/hまで測定可能と判定した。このように、軽量ETCCの調整、基本性能測定を実施した。

(2)軽量ETCCの1F調査

2.3.1に述べたように、調査用ETCCと軽量ETCCの2台を用い、複合研原子炉建屋で3次元線量分布作成の試験を実施し、炉心付近で2台相当のETCCでステレオ観測を行う。さらに、JAEAが開発した3.4.3に述べている逆解析手法を用いて、3次元線量地図作成を実現した。

2.3.3 ETCCの性能を生かした調査法の開発

東電との協議により、許可された建屋付近の調査を行い、電源の確保、装置の設置、装置の 汚染対策等を検討する。さらに必要に応じて、遮蔽材の検討を行った。

ETCCが広視野でkmスケールの遠方、ならびに広域の微弱放射能を測定できる特徴を活かし、複合研の原子炉から透過する $0.1\sim3~MeV$ の広帯域 γ 線を利用した、原子炉からの連続 γ 線による3次元線量計測を行った。

2.3.4 γ線画像から大気中3次元核種分布及び放出量を逆解析する手法の開発 (連携先: JAEA)

し気中は呑沸広ハナの佐

(1) 大気中核種濃度分布の作成

令和元年度に、逆解析手法に導入した気象観測データを用いた簡易大気拡散計算の有効性を評価するために、JAEA原子力科学研究所構内においてドップラーライダーを用いた気象観測及び簡易的な拡散実験を実施し、簡易拡散計算によるプルームの再現性を評価する。また、ラージエディシミュレーション(Large Eddy Simulation: LES)に基づき、詳細計算が可能なJAEAの局所域高分解能大気拡散モデルLOHDIM-LES(Local-scale High-resolution

Atmospheric Dispersion Model using LES) [5][6][7][8][9]を用いた詳細拡散計算により、観測された気象場を再現し、実気象場での大気中核種濃度分布を作成した。

JAEA原子力科学研究所構内において、11月から12月にかけて、ドップラーライダーを用いた気象観測及びミストを放出する簡易的な拡散実験を実施した。この測定データを用いて簡易大気拡散計算を実行し、ミストの拡散分布を再現できることを確認した。また、LOHDIM-LESを用いた詳細拡散計算により、観測された気象場での大気中核種濃度分布を作成した。

(2) 仮想 γ 線画像データの作成

これまでに開発した大気中核種濃度分布を γ 線画像データに変換する計算手法を、2.3.4(1)により作成した実気象場での大気中核種濃度分布に適用して、 γ 線測定装置ETCCで計測される放射線場を模擬した仮想 γ 線画像データを作成した。

(3) 逆解析手法の開発

令和元年度に開発した逆解析手法の解析プログラムについて、令和元年度及び2.3.4(2) により作成した仮想 γ 線画像データから大気中核種濃度分布データ等を再現する試験により、解析手法のパラメータの最適化を行った。

2.3.5 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびにCLADS、東電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の打合せや会議等を開催した。

3. 実施内容及び成果

3.1 調査用 ETCC の制作と放射能定量画像評価の実施

3.1.1 調査用 ETCC の制作

京大の現有部品 (TPC 読出し回路、GSO 結晶等) と平成 30 年度に制作した部品を組み合わせて調査用 ETCC を完成させ、京大での基本性能試験を行った (図 3.1.1-1)。重量 35 kg、24 V 電池で動作する可搬型調査用 ETCC を組上げ、基本性能試験を実施し、令和元年 10、11 月の 1F 内の調査計測に用いた。



図 3.1.1-1 調査用 ETCC の組み立て後の写真

また、小型ガス循環システムは、令和元年 IF 調査において、作業を 1 日程度の短時間で終了する必要があることが判明した。現在、TPC 内ガスは約 3 週間無交換で動作可能であり、京都からの輸送を考慮してもガス循環装置をつける必要がないと判明した。軽量化のため取り付けを中止し、他の京大保有の同等の ETCC に小型ガス循環装置を取り付け、長時間使用試験を実施し、2 週間に一度程度ガス純化を行うことで、交換周期が長くなることが判明し、数か月無交換が可能なことが判明した。今後、現場の長期使用の場合、当初 1 か月程度で純化を数回行えば、それ以後は 2、3 か月から半年に一度の純化作業で継続的に使用できることがわかった。

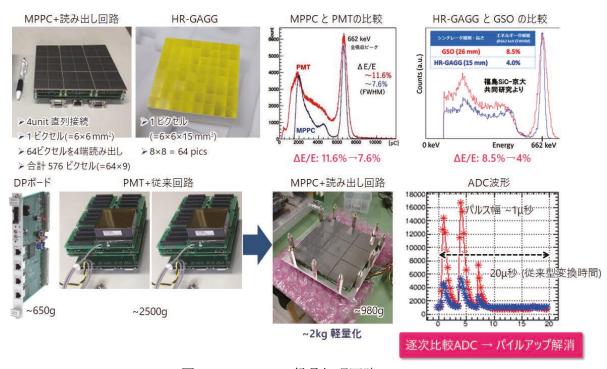


図 3.1.1-2 MPPC 信号処理回路

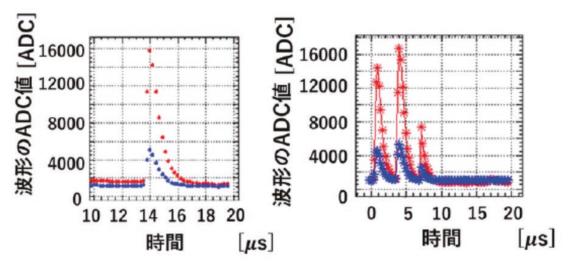
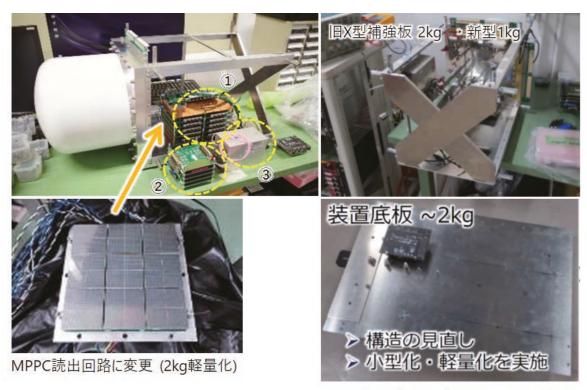


図 3.1.1-3 シンチレータパルス幅



→ ハニカムに変更予定: 1kg以下の見込み

図 3.1.1-4 構造体の軽量化

3.1.2 試験用 ETCC の放射能定量画像評価の実施

ETCC は γ 線の到来方向が完全に決定できるため、光学カメラと同様な全単射画像が測定できる。全単射は逆写像が可能であり、得られた像から逆写像を解析的に行い、定量的な画像解析、つまり画像内の強度分布が線形な線形画像が得られる。そのため定量性が担保される。これは光学などの画像解析の基本であり、原子力等の法令に基づく厳密な定量性が必要な場合は、不可欠な画像法となる。核 γ 線ではピンホールカメラと ETCC の 2 つだけである。ただ、ピンホールカメラでは、300 keV 以上の高エネルギー γ 線は遮蔽を透過するため雑音が多くなり線形性が失われていく。このように現在、核 γ 線対象エネルギー領域(100 keV~数MeV)の範囲で全単射による線形画像が得られるのは、ETCC のみである。このように ETCC は逆写像法が使えるため光学カメラ同様、最低2方向からの撮像で定量解析可能な3次元画像、つまり3次元線量分布の測定が可能となる。今まで放射線計測では、定量評価可能な撮像法が無いため、長らく空間の線量分布は多数の点を測定し、推定するしかなく、そのため精度が低く、多くの時間が必要であった。少数の装置で面、さらに空間の線量分布測定が一度に実現できれば放射能管理の能力は飛躍的に向上する。本研究は ETCC により、それが実現できることを実証することが目的である。

まず、令和元年度に 3.1.1 の調査用 ETCC を 1F 内に持ち込み、原子炉建屋周辺の調査、特に 137 Cs、 134 Cs からの γ 線と、連続スペクトル散乱 γ 線の画像分布とスペクトル観測を実施し、特に、建屋周辺のスカイシャイン成分の分析を行った。調査用 ETCC を迅速に組上げ測定を実施するための PC、移動電源などを一体にしたシステムを構築し、現地測定のシミュレーショ

ンを実施、手順書を策定した。その後、1F 敷地周辺、敷地内の線量を評価し建屋全景、特に上部からのスカイシャイン γ 線計測測定の可能な場所を選定した(図 3.1.2-1)。全原子炉建屋が見渡せ、装置が動作可能な線量である免震棟横、及び免震棟の南で、免震棟と異なる方向から 1 号炉建屋が見渡せ、50 μ Sv/h と線量が高めな見晴台の 2 か所を選定した。免震棟から 1、2、3 号炉を見る視野で画像試験を実施し、また、免震棟横及び高台から 1 号炉を望む視野で 3 次元画像試験を実施した。

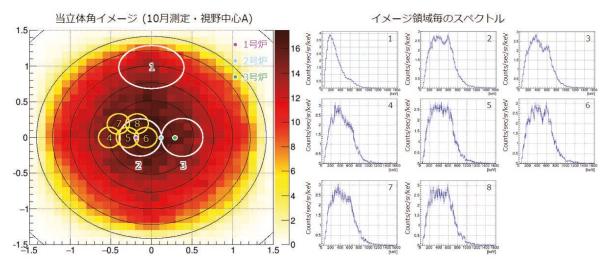


図 3.1.2-1 10 月測定分・視野中心 A (1、2、3 号炉を見渡せる視野) の等立体角イメージと イメージ領域ごとのスペクトル。視野は±60 であり±400m に対応する。

この成果を踏まえ、令和2年度及び令和3年度は、軽量ETCC2台相当を用い、複合研原子炉建屋で3次元線量分布試験を実施し、炉心付近で2台相当以上のETCCでステレオ観測を令和3年12月に行った。当初計画では1Fでこの実験を行う予定であった。しかし令和2年のコロナ禍のため、京大では緊急事態宣言中の県外への出張は禁止となり、東電も1F内での緊急性のない調査は受け入れていなかった。そこで、代案として、稼働中の原子炉の中で研究・調査用であり、調査要請を受け入れられる可能性の高い、複合研の原子炉施設内の放射線強度分布計測でETCCによる3次元線量計測の能力判定を行う方針とし、11月、12月の間に3回に分け測定を実施することとなった。また、東電には、10月に令和2年12月までへの測定の可能性を打診したが、現状では受け入れは困難と最終回答を受けた。

複合研原子炉は、最大出力の 5 MW 時運転で炉建屋内全体に 2 μ Sv/h と 1F に比べて弱く、1 方向の計測に 4 時間程度必要となる。1 日の運転時間は 6 時間のため、3 回の 5 MW 時の測定を申請した。3 次元線量分布は、最低限 3 方向からの計測で解析と評価が可能となる。9 月の代案提示後、すぐに複合研と協議し、9 月末に即時申請を行い、10 月下旬に採択された。11 月 30 日に複合研測定を開始し、12 月 2 日、9 日、16 日の出力 5 MW(10 時~16 時)の時に、4 方向からの測定を実施した。それからデータ解析を行い JAEA において 3 次元化を実施した。

(1) 測定用 ETCC の構成と測定箇所の選定

測定は令和 3 年 11 月から 12 月にかけて実施した。令和 3 年には、すでに調査用 ETCC も軽量 ETCC と同等の仕様に改善し、2 台同等の ETCC が使用可能であった。しかし、複合研原子炉内で原子炉全体を測定できる箇所は、図 3.1.2–2 に示すように炉内周囲を取り囲むキャットウォーク上しか無く、ETCC を 2 台設置すると通行できない区間ができるため 1 台の設置となった(図 3.1.2–3)。1 台を図 3.1.2–2 のように 4 か所移動し、原子炉の半分が 2 つ以上の方向から測定できるように設置した。測定は 12 月 2 日、9 日、16 日、原子炉の出力が 5 MW になる 9 時台から終了する 4 時まで行った。測定は 1 MW から 5 MW への出力変化、及び運転終了後の環境放射線も検出器校正用として測定を行った。

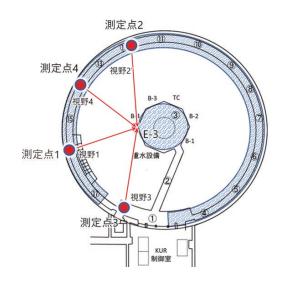


図 3.1.2-2 キャットウォーク上の測定地点



図 3.1.2-3 ETCC 測定中の写真

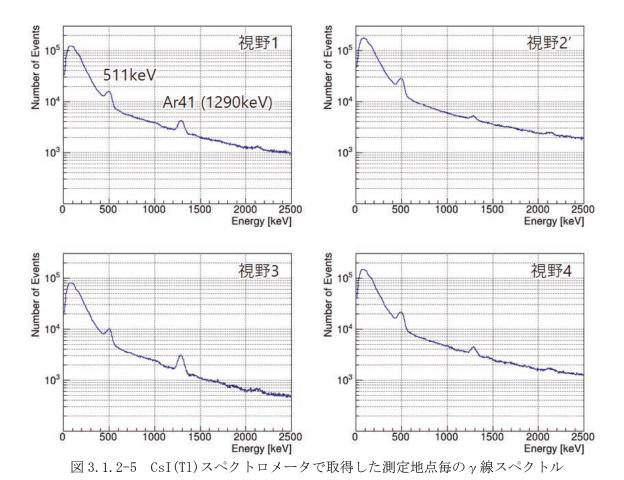
原子炉建屋キャットウォーク上の測定した 4 か所の 5 MW 運転時の γ 線線量と中性子線量を、図 3.1.2-4 に示す。 $1\sim4~\mu$ Sv/h と 1F の原子炉建屋付近の 10 分の 1 以下だが、環境放射線より 50 倍程度高く 1F の建屋外での測定を予測することは十分可能な線量である。 CsI (T1) スペクトロメータで得た γ 線スペクトルを図 3.1.2-5 に示す。どの場所もスペクトルの形状はほぼ同じである。 IF と大きく異なるのは当然だが、 137 Cs、 134 Cs のラインは全く無い。ライン γ 線は、511~keV 及び 41 Ar(半減期 110 分)の 1290~keV がわずかに見える。また、 4 MeV 以上の高エネルギー γ 線まで連続的にあることがわかる。このように、一般の原子炉の線量分布をモニタリングするときは、連続 γ 線の正確な方向検出が不可欠であることは一目瞭然である。今までの γ 線画像装置は、雑音や装置内でのコンプトン散乱を正しく捉えた γ 線事象と分けるため、ライン γ 線によるエネルギー制限が唯一の手段であり、ライン γ 線の画像化のみを行っているが、ETCC は、 γ 線毎のコンプトン散乱を再構成、評価するためライン γ 線、連続 γ 線の別なく同等の精度で検出効率、2~次元角度分解能(PSF)が定義できる。そのため、一般の原子炉に対しても正確な線量分布のイメージングが 100~keV の全エネルギー領域で可能となる。今回の測定は 1F での利用のみならず、一般の原子炉の新しい画像モニタリングの可能性を示す実験でもある。

原子炉の出力は非常に安定であり、この複合研の原子炉でも出力は数%以内で安定している。ただ 41 Ar は時間変化がみられる。この時間変化は複合研の炉室ガスモニターも検出し、法令基準の 5 分の 1 以下である。 41 Ar は空気中の Ar を基に原子炉内で 41 Ar が生成され外部に少量出てくる。特にこの原子炉では、中性子実験炉のため多くの中性子取り出し口があり、その開閉状態の違いで外部に出る 41 Ar が数倍変化することが知られている。

今回は、16 日の午前 10 時ごろに 41 Ar のライン γ 線が $2\sim3$ 倍増加し、110 分の半減期で減衰が見られた。増加は原子炉の常設モニターにも記録され、法令基準の 5 分の 1 以下の変化である。ETCC は、この 41 Ar の炉からの放出と建屋内への拡散を画像として記録することに成功した。詳細は後で述べる。

| 測定点 | 日付と時刻 | ガンマ線量 [μSv/h] | 中性子線量 [μSv/h] |
|-----|-----------------|------------------|------------------|
| 1 | 21.12.02 12:40頃 | 1.5 | 4 |
| 2′ | 21.12.16 13:21頃 | 5.0 | 7 |
| 3 | 21.12.16 10:02頃 | 2 | 4 |
| 4 | 21.12.09 10:03頃 | 3.7 | 4.0 |

図 3.1.2-4 各測定点における 5 MW 運転時の γ 線線量と中性子線量



(2) ETCC による 2 次元線量分布画像の結果

ETCC は、数 μ Sv/h の環境下で、予想通り約 200 cps 前後でデータ収集を行った。不感時間は、次に示すように 1%以下である(図 3.1.2-6)。平成 30 年の調査用 ETCC ではこの計数率では 10%の不感時間となるが、3.3 に述べるトリガー手法の改善により、不感時間を 10 分の 1 以下に低減することができた。 γ 線の到来方向決定が担保できる事象はその約 10 分の 1 であり、20 cps 1 時間に $7\times10^4\gamma$ 線、一方向、5 時間の観測で $3\times10^5\gamma$ 線、100 keV~4 MeV を 5 分割ぐらいに分け、数の少ない 3 MeV 以上でも $10^4\gamma$ 線は確保できた。ETCC は視野が約 120 度直径あり、その中を 100 分割すると角領域に 100γ 線以上が入ることになり、3 次元化を行うときに $10\times10\times10$ 度単位で空間線量を出すことができる。

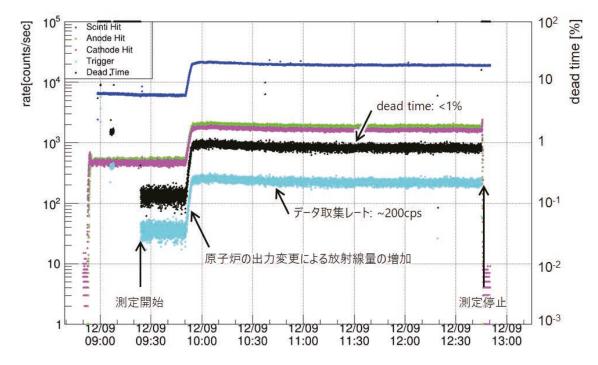


図 3.1.2-6 令和 3 年 12 月 9 日 (午前中) 測定時のトリガー率の時間変化

図 3.1.2-7 に、 511 ± 100 keV、 1290 ± 100 keV、3 MeV 以上、それぞれの 4 方向からの 2 次元の放射線強度分布を示す。図は等角写像であり、放射線強度は count/sec/sr で表示されている。このデータを基に、3 次元分布を一般的な逆投影法を用いて求めることができる。これは核 γ 線では世界初であり、放射線の完全可視化が、放射線発見から 120 年を経て初めて実現したことを意味する。

各方向で最も強度のあるところは当然だが変化している。また、炉壁から直接放射される、成分が強いが空気や周囲で散乱された成分も確認できる。また 41 Ar は炉から拡散するため炉より離れた地点でも強い。詳細は次に述べる。例えば、 $511~\text{keV}\gamma$ 線は γ 線発生源である炉心から直接厚い遮蔽材を透過したわけではない。炉心から放射される透過性の高い数 MeV 以上の高エネルギー γ 線が、炉壁付近で対消滅し発生した陽電子によるものだと考えられ、炉壁から出たものである。

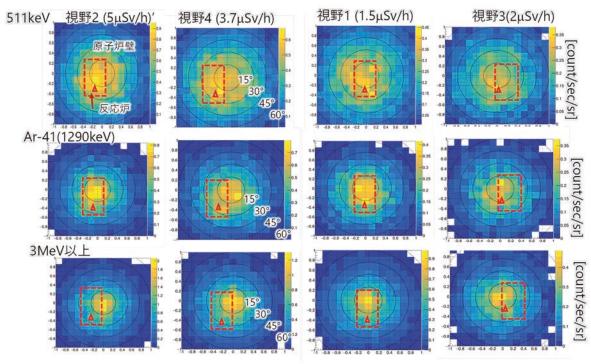


図 3.1.2-7 視野ごとの 511 keV、41Ar、3 MeV 以上の 2 次元放射線強度分布

(3)⁴¹Ar を用いた線量の動的画像解析

上述したように、12月16日は午前9時45分から5 MW 運転が開始され、10時15分ぐらいに、 41 Ar ライン $_{\gamma}$ 線が数分で約2倍に線量が増加し、図3.1.2-8に示すようにE3、B4面(図3.1.2-10参照)に挟まれた角の上部から放出され広がっていく様子が、9分間隔の画像でよくわかる。また、 41 Ar のライン $_{\gamma}$ 線より低エネルギー側の1 MeV あたりも、その散乱成分として増加している。図3.1.2-9にその領域の連続 $_{\gamma}$ 線画像を示すが、これは 41 Ar からの $_{\gamma}$ 線のスカイシャインであり、 41 Ar の分布より少し上方に同様な広がりが観測される。同時に2方向からは測定していないため、この2時間の3次元動画は取れなかったが、9分間隔での2次元動画が測定できた。 41 Ar 放出から空気拡散、半減期による減少が明瞭に観測される。放射量は、上にも述べたが法令基準の5分の1以下であり、環境放射線よりも微弱である。今まで 41 Ar が炉から出るのは広く認知されていたが、どの場所から出るなどは不明であった。イメージング測定は明確にこれらを明らかにした。

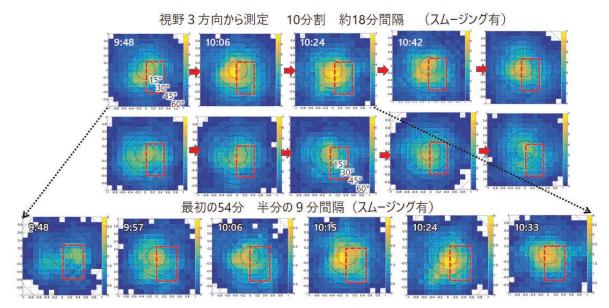


図 3.1.2-8 ⁴¹Ar ライン γ 線の時間変化

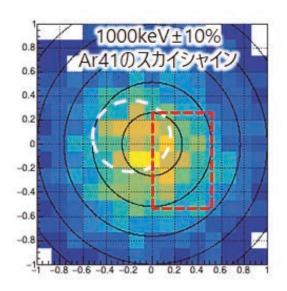


図 3.1.2-9 ⁴¹Ar のスカイシャイン

(4)3次元線量分布解析

上にも述べたが、原子炉の出力は非常に安定であり、線量も炉壁、建屋、空気で安定であると十分仮定できる。そのため、今回は 1 台の ETCC の場所を移動して 4 か所測定し、それらの 2 次元分布から平均的な 3 次元線量分布を求めた。ETCC は、図 3.1.2–10 のように原子炉建屋及び原子炉を広視野で 4 方向から測定し、図 3.1.2–11 の 4 つの 2 次元強度分布を得た。次に、3.4.3 で述べている逆解析手法を用いて、図 3.1.2–12 に示すように、炉建屋内を $10\times10\times10$ の 1000 のボクセルに分割し、各ボクセルに逆写像から求めた線量を割りふり 3 次元分布を求める。 41 Ar の 3 次元分布を図 3.1.2–13 に示す。12 月 16 日午前 10 時に、観測された原子炉壁放出箇所から帯状に空間に広がっているのが見える。511 keV のデータも同様な解析で求めた。ただ、511 keV ライン γ 線は空気散乱では無く炉壁内で発生し、空気散乱せずに ETCC に到達したものであるため、初期値のボクセル配置を図 3.1.2–14 のように原子炉付近に限定して、3 次元分布を求めた(図 3.1.2–15)。 41 Ar は炉外の空気への拡散が見え、511 keV は原子炉壁に集まり、明瞭な差異が測定できた。

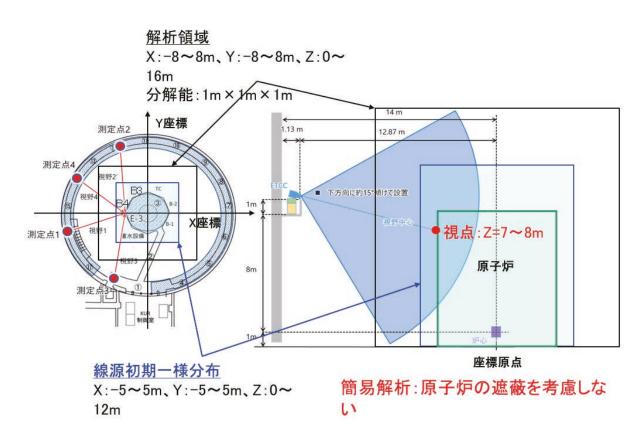


図 3.1.2-10 京大炉計測データの逆解析における解析領域

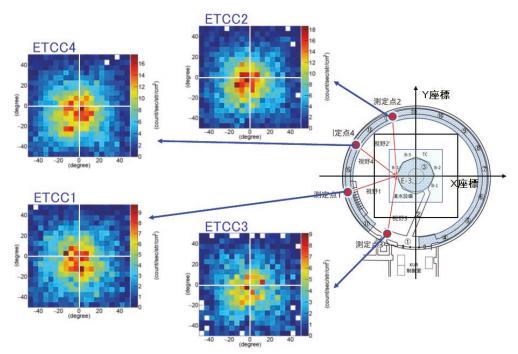


図 3.1.2-11 京大炉計測データ (41Ar) の逆解析

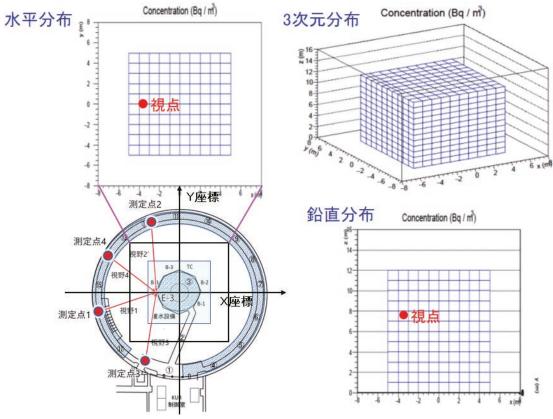


図 3.1.2-12 京大炉計測データの逆解析における 41Ar 線源初期一様分布

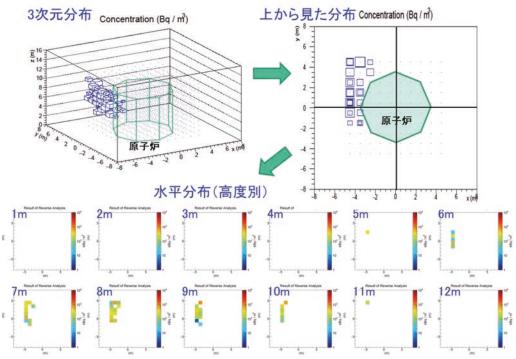


図 3.1.2-13 京大炉計測データの逆解析における 41Ar 線源の 3 次元分布

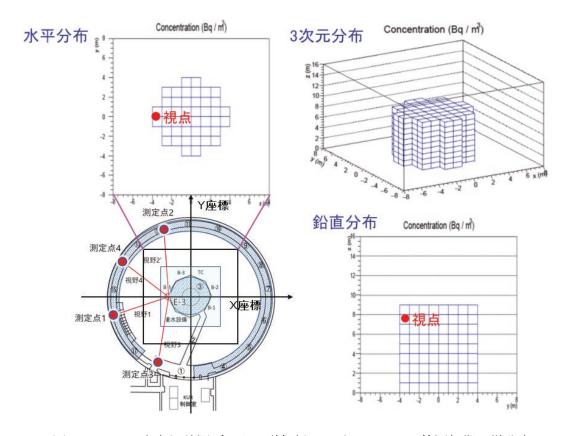


図 3.1.2-14 京大炉計測データの逆解析における 511 keV 線源初期一様分布

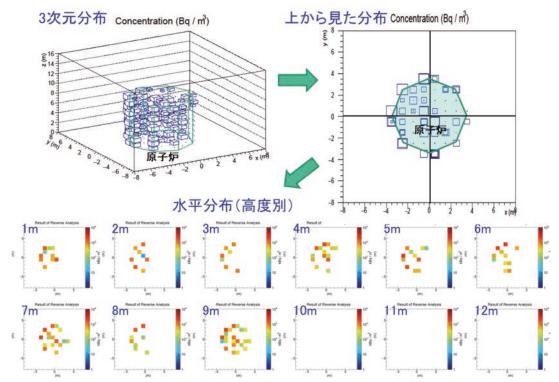


図 3.1.2-15 京大炉計測データの逆解析における 511 keV 線源分布 (炉全体)

この3次元線量分布結果に、令和元年度に実施した1F全域の画像線量計測の成功、また令 和2年度のETCCのシンチレータ部とトリガーの改善による高線量場に対する改善を考えると、 今後の解体工事等で汚染拡散のオンライン 3 次元モニタリングを、次の 2 段階で実施するの が良いと考えられる。まず、各炉の建屋の近接した外部または解体工事区域から 10 m程度離 れた地点からの3台程度で監視を行う。ETCCは、今回の4Arの放出検知でわかるように、周 囲の線量より 1 桁以上低い線量の変化を画像として捉え、その分布変化もオンラインで示す ことができる。一般の線量計では、環境線量程度の増加がないと汚染拡散を検知できない。ま た当然、その動的な広がりの変化も捉えられない。ETCC 画像モニタリングが、飛散の原因箇 所を瞬時に同定することができ迅速に対応、事故を予防できる。軽量 ETCC の場合、環境放射 線下ではモニタリング地点で、0.2 μSv/hの増加で、エネルギー帯域別の計数変化と分布の 空間変化を総合的に判断し、1分以内に10σ以上で検知が可能で、さらにその広がりと方向も 判定できる。強力な大容量データ転送可能なネットワークと連動できれば、早期の実現は可能 である。このようなシステムが実現できれば、スペクトル、計数率、画像を統合的に AI で判 断することも可能であり、さらに高い確度が得られる。複数場所での検知情報から3次元分布 も得られる。ETCCは、同型でも2倍、固定型なら約4倍の感度改善が今後可能であり、より 確度の高い検知が可能である。

このように汚染飛散にして安全性を飛躍的に改善できる。さらに、敷地全体を 5 台程度の ETCC で監視することで、汚染拡散が建屋外に出た瞬間に検知し、その初期拡散を捉え SPEEDI に初期情報を逐次与え、高精度な拡散予想をオンラインで提供する。そのため、汚染が敷地境界を超える前に十分な対応を可能にする。

今までの放射線管理法は、境界での線量が設定量を超えた時点で急に異常となり、重大な対応が必要となっている。事前にその兆候を把握し、問題を最小に抑え込むことは考慮されていない。しかし、ETCC による 3 次元モニタリングは、一般の事故対応のように異常を最小限で検知し、事故になる前に予防、対処をすることを可能にし、廃炉ばかりでなく原子力施設、加速器施設等の放射線施設の安全の考え方を根本から変えられる。これには厳密な計測の定量性担保が必要である。従来のγ線画像法は全単射法ではなく非線形画像であり、定量性は低いものだったが、ETCC は完全な全単射法であり光学で確立した画像法が使用でき、十分な定量性を担保することで初めてこれが可能となることを強調しておく。

3.2 耐放射線性・利便性に優れた軽量 ETCC の開発

3.2.1 軽量 ETCC の制作・調整

令和元年度に軽量 ETCC を制作した。制作した軽量 20 cm 径 TPC、GSO-MPPC 読出しシステム、電源回路、ガス TPC 用の高電圧回路を組み合わせて、軽量 ETCC の組上げを実施した。本課題の中心的開発要素である軽量 ETCC には 2 つの重要な開発要素がある。コンプトン散乱 γ 線を測定する GSO シンチレータ部とトリガー部である。以下にこの 2 つの開発の詳細を述べる。

(1)シンチレータ部の改善

シンチレータ部の GSO の光検出器として、多チャンネル PMT を用い信号を積分し計測するシステムを用いていた。令和元年度の 1F 調査でも、京大が所有する従来システムを調査用 ETCC に用いた。そのため ETCC のエネルギー分解能が 13%(662 keV にて)と低く、信号の積分と AD 変換に 20 μ 秒かかり、高線量場では不感時間の増加、パイルアップなどの問題があった。

これを解消するため、シンチレータと光検出器として半導体を用いた MPPC 仕様の新型シンチレータ読出システムを開発した。パルス形状を逐次近似で記録するため、信号処理時間を 1 μ 秒に短縮し、この波形記録による数百ナノ秒の信号のパイルアップも分離可能となった (図 3.1.1-3)。この 2 つの改善に加え、次に述べる ETCC のシステムトリガーを、シンチレータ主体から TPC 主体に変更することで、従来の調査用 ETCC より約 1 桁高い高計数率に対応可能にした。計算上は数百 μ Sv/h まで測定可能となる。

MPPCシステムの設計と試作を令和元年度に完成したが、令和2年度にそのハードウェアの確認と修正、それを反映させた完成版を制作した。また、波形記録型処理のためシステム内の FPGA 用の信号処理プログラムを開発、搭載し試験を行った。

次に、トリガーの変更に対応したデータ転送などの FPGA プログラムを開発した。特に、GSO シンチレータ信号が TPC のスタートタイミングとなるため、タイミング誤差を 20 ナノ秒 (TPC の電場方向の位置誤差で 500 μ m) 以下にする必要があり、それを実現するため記録されたパルス波形からタイミング情報を得る手法を開発。図 3.2.1-1 にタイミング誤差分布を示す。約 18 ナノ秒と目標を達成した。さらに、記録されたパルス波形に、シミュレーションで生成されたパルス波形を雛形としてタイミング補正を行い、16 ナノ秒まで改善し十分な性能を得た。

また、MPPC は、光電変換効率が PMT より約 2 倍よく、それによりエネルギー分解能も改善される。図 3. 2. 1-2 に示すとおり、ETCC を搭載した 9 アレイを用いた GSO システム全体で、7. 5%(662 keV にて)(PMT 使用の場合は 11%)と、大きな改善が得られた。一方、MPPC は利得に強い温度依存性があり、その補正を行わないと使用可能な温度が数度以内という強い制限を受ける。図 3. 2. 1-3 に 662 keV γ 線スペクトルの温度変化を示す。これを図 3. 2. 1-4 に示すように、関数フィットすることで補正を行った。ただ、補正を行っても 30 $^{\circ}$ C以上の高温では利得が下がり、エネルギー分解能そのものが下がり 9%のエネルギー分解能となる。一般の使用環境(10 $^{\circ}$ C $^{\circ}$ つでは、回路の発熱により 30 $^{\circ}$ C以上に温度が上がることが判明した。図 3. 2. 1-5 のように、ファンを取り付けることで解決することができた。

令和3年12月の複合研での測定は、MPPCを搭載した新型の軽量ETCCを使用し、ETCCとして10%(662 keVにて)のエネルギー分解能を達成し、令和元年に使用した試験用ETCCより3%近い改善を得た(図3.2.1-6)。試験全体を通じて、安定したエネルギー分解能を達成し、温度補正も正確に実行できた。このように、MPPCの正確な温度特性測定が必要となる。しかし、一度温度補正を決めれば、PMTのような原因不明の利得変化が無く安定した利得を常に得られる利点がある。PMT はこのため、使用前に常に利得校正が不可欠であったが、MPPCシステムでは不要となり、始動時の操作が容易になった。

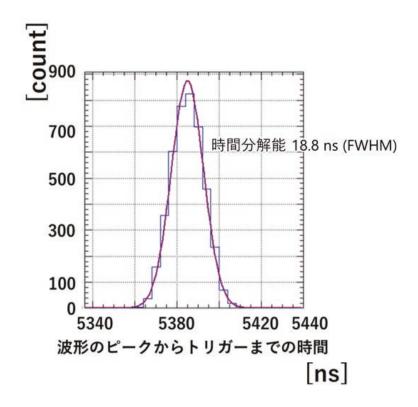


図 3.2.1-1 シンチレータのパルス波形のタイミング誤差分布

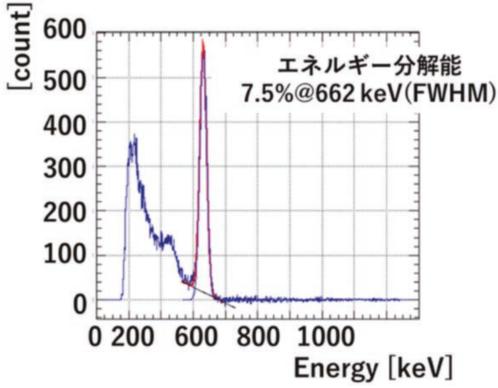
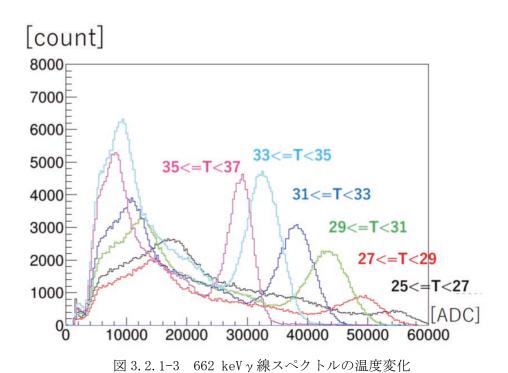
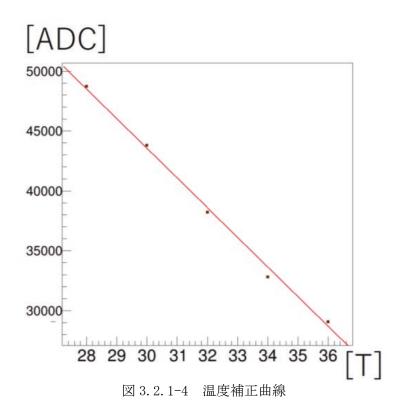


図 3. 2. 1-2 9 アレイを用いた GSO システム全体で測定した ¹³⁷Cs スペクトル





MPPC冷却用ファン P_JUDE VOd SOCIETI

図 3.2.1-5 TPC 容器背面に置かれた MPPC と冷却用ファン

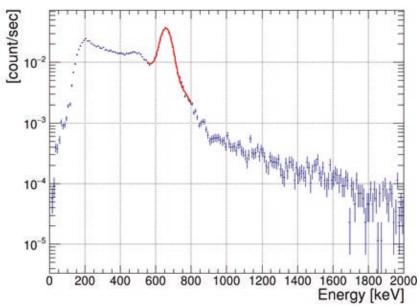


図 3.2.1-6 ETCC で測定した ¹³⁷Cs スペクトル

また、この新システムには低利得用と高利得用の 2 つの読出し系があるため、広いダイナミックレンジが取れる。試験用 ETCC では 1 系統のみだったため 100 keV~2.0 MeV であったが、この軽量 ETCC では、40 keV~4 MeV と 2 倍以上広いダイナミックレンジを確保した。複合研では動作中の原子炉を測定したため、4 MeV 以上までスペクトルが伸びているが(図 3.2.1-7)、その高エネルギー γ 線の画像化にも成功した。

また MPPC システムは従来システムから3 kg の軽減を実現している。

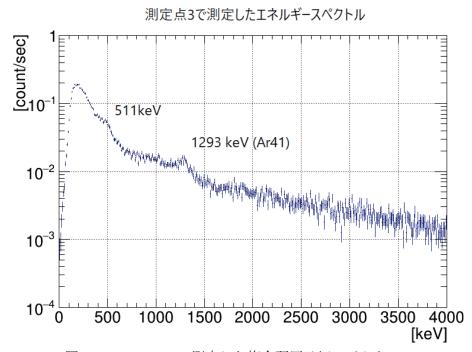


図 3.2.1-7 ETCC で測定した複合研原子炉スペクトル

(2)トリガー方式の改善

ETCC は、 γ 線がガス TPC 内でコンプトン散乱を起こし、反跳電子が TPC 内で静止し、さらに散乱 γ 線がシンチレータ部でとらえられた事象を測定する。散乱 γ 線は、コンプトン散乱以後 1 ナノ秒以下の時間差でシンチレータをヒットするため、トリガータイミングとして TPCをスタートさせ、TPC 内の反跳電子がガスを電離することで発生した 2 次電子がガス中を電場に沿ってドリフトし、底面にある 2 次元ガス増幅検出器 μ PIC に到着し、増幅され、 μ PIC から信号となる。ドリフト電子はガス中を約 5 cm/ μ 秒で移動するため、図 3.2.1-8 に示すように、シンチレータのヒットをスタートとしてドリフト時間を計測し、ドリフト時間とドリフト速度からドリフト方向の電子の座標を得た(Common-Start 型)。多くの γ 線は、希薄なガス TPC を透過しシンチレータをヒットするため、この手法では、シンチレータのヒットから TPC 信号が得られるまで最大時間 5 μ 秒以上待ち、TPC に信号がない場合、5 μ 秒以上待ってシステムをクリアし、次の信号を待っていた。しかし、大半のシンチレータヒットに対して、TPC はヒットせず情報がない、つまりトリガーが発生しないにも関わらず 5 μ 秒の待ち時間が発生し、結果として高計数率の場合、大きな不感時間を作っていた。

これを改善するため TPC 内の信号をシステム始動タイミングに変更した(図 3.2.1-8 の Common-Stop 型)。しかし、上述したように、シンチレータ部のほうが先に信号を生成するため、シンチレータの信号を、逐次近似型 ADC を用いて、そのパルス波形を連続的にリングバッファ・メモリに記憶し、TPC 信号発生時から $5~\mu$ 秒バッファをさかのぼり、TPC 信号があった場合のみ、データを記録する方法に変更した。この方法では、TPC 発生時にすぐにトリガー判定が実現し、TPC 信号発生はシンチレータより 2~ 桁少ないため、システムの不感時間は原理的に無くなり、現在はシンチレータ、TPC からネットワークを通じてデータが転送されることが、その転送能力の一時的な飽和によるものとなっている。図 3.2.1-9 に示すように、システムの不感時間は 1~ 桁以上低減した。

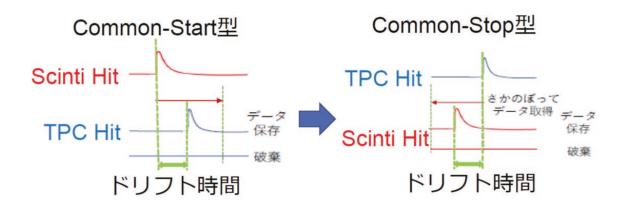


図 3.2.1-8 ETCC トリガーシステムのタイミングチャート

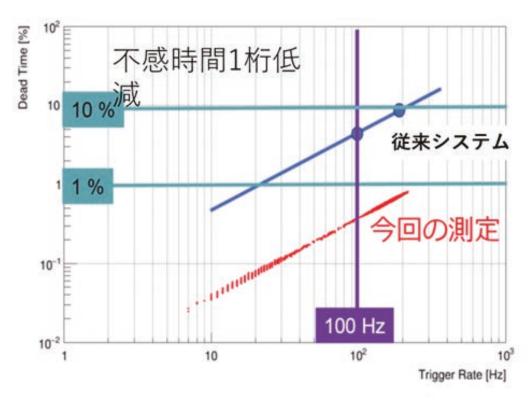


図 3.2.1-9 システム不感時間の低減

3.2.2 軽量 ETCC の 1F 調査

令和元年度では、1F で 11 月に行った 2 回目の敷地内計測で、3 次元線量分布作成の試験を実施した。1F 原子炉建屋を 2 台相当の ETCC でステレオ観測を行った。1AEA が開発した 3 次元放射線地図作成ツールと組合せ、オンラインでの 3 次元線量地図作成試験を実施した。まず、原子炉建屋群から約 400 m離れた免震棟横から、視野 120 度で 1、2、3 号炉を含む広視野測定で、視野内を 7 度直径、約 100 点以上に分割、一度に 100 か所以上のエネルギースペクトルを取得できた。これにより、1AEA の開発した手法を用いて 3 次元強度地図作成が可能なことを実証した。また、3 次元計測を行うために別の方向から測定し、免震棟から南にある見晴台から 1 号建屋を測定した。この免震棟横及び見晴台からの 2 方向のデータを基に、3 次元画像取得を試みた。しかし、見晴台の線量が 50 μ Sv/h と高いため、エネルギー閾値を上げ 700 keV 以上の 134Cs のライン γ 線を用いて 3 次元化を行ったが、データが不足し精度に信頼が持てる結果を得ることができなかった(図 3 2 2 2 2 3 3 3 次元

令和3年度には、3.1.2で述べたように、複合研原子炉建屋で3次元線量分布作成の試験を実施、炉心付近で2台相当のETCCでステレオ観測を行った。さらに、JAEAが開発した3.4.3に述べている逆解析手法を用いて3次元線量地図作成を実現した。詳細は3.1.2で述べてある。

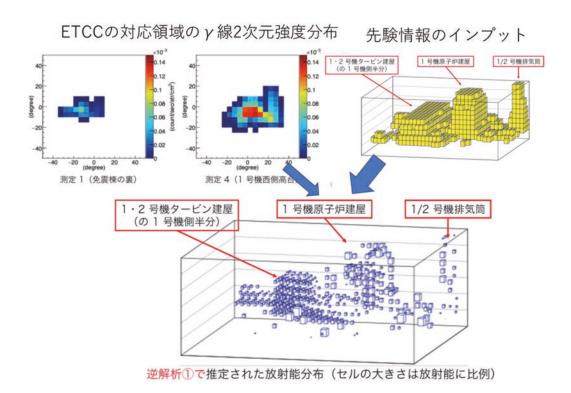


図 3. 2. 2-1 ETCC で得られた 134 Cs γ 線 2 次元分布による 1 号炉建屋付近の Cs の 3 次元分布の 結果。データの統計不足により全体の線量を再構成できなかった。

3.3 ETCC の性能を生かした調査法の開発

原子力建屋内など、数 mSv/h を超える高線量環境で ETCC が搬入可能な箇所を調査し、令和 2 年度に実施する建屋内での測定の手法を策定した。東電の建屋内の線量測定データを基に候補地を絞り、東電と協議して可能な場所を選定した。その場所の付近の調査を行い、電源の確保、装置の設置、装置の汚染対策を検討した。必要な場合、遮蔽材の検討も行った。

ただ、上述したようにコロナ禍のため、1Fでの調査は複合研の原子炉に変更となった。 軽量 ETCC のために実施した改善、さらにそれ以後の令和元年の 1F 調査で判明した幾つかの 課題を克服し、1F 使用時の ETCC の可能性を以下のように広げた。

- A. 高線量場への対応: 1F での調査では線量が 50 μ Sv/h の見晴台での測定に成功したが、不感時間が 50%を超え、装置としての測定限界であった。これは旧トリガー方式による不感時間が、1 事象当たり 20 μ 秒と大きいのが主な原因である。さらに、シンチレータが積分回路のため 10 μ 秒程度かかり、信号のパイルアップが起きやすい。Ar ガスを使用するため周囲の 137 Cs からの 30 keV X 線、GSO シンチレータ内から発生する 40 keV の蛍光 X 線等が TPC をヒットし偶発事象の原因となった。これらに対して以下の改善を実施した。
 - 1. 新トリガー方式 (3.2.1) により、トリガーの不感時間が 10 分の 1 以下に減少
 - 2. シンチレータ読出しを MPPC に変更し、信号処理も積分型から逐次近似の波形記録に変更し、パルス幅が 500 ナノ秒程度となり、波形から 200 ナノ秒程度までパルス分離が可能となった。
 - 3. Ne-Ar-CF4 (49%、1%、50%) ガスの導入、Ar より原子番号が半分以下の物質で構成され、30 keV X 線に対する感度は Ar の 10 分の 1 以下であるが、コンプトン散乱では Ar より 1、2 割散乱確率が高い。最近 2 気圧以上で、利得 1 万以上での動作が実現し、実用化のメドが立った。

この3点の改善で、軽量 ETCC は調査用 ETCC より1 桁程度強い線量場、つまり約500 μ Sv/h まで無遮蔽で使用可能となる。シンチレータ部や、ガス TPC を1 mm 程度の鉛板で覆えば、数ミリ Sv/h の環境まで測定可能となる。

- B. 高エネルギー分解能、広ダイナミックレンジの対応:令和元年の1F測定時は、調査用ETCC のエネルギー分解能は13%(662 keV の半値幅)と低く、 137 Cs と散乱 γ 線の分離が不完全となり強度測定精度の低下があった。また、すでに大半が崩壊した 134 Cs の 0.7 MeV~1.4 MeV に至る複数のピークに対して、検出精度が低かった。 134 Cs の高エネルギー γ 線と 137 Cs の 662 keV の計測分布を比較して散乱 γ 線の影響を下げ、精密な Cs 量の判定が可能となる。さらに透過率の違いから壁等の減衰係数計測が可能となる。さらに 1.5 MeV 以上の γ 線はデブリからの γ 線であり、今後デブリ取り出し時のモニタリング等で必要となる。これらに対応するために以下の改善を行った。
 - 1. MPPC の導入により光検出効率が PMT より約 1.5 倍改善、GSO で 7.5% (662 keV にて) (PMT 使用時では 11%) と大きく改善した。ETCC としては、TPC のエネルギー分解能も加わるため 10%となる。

- 2. GAGG シンチレータの導入、GSO に近い約 100 ナノ秒の高速パルスを持ち、かつエネルギー分解能が 4%(662 keV にて)と GSO の半分と良い GAGG が近年、実用的な価格(GSO の 2~3 倍)で購入可能になってきた。 GAGG の光の波長は長く、PMT では感度が下がるが MPPC では上がる。そのため、今回製作した MPPC 回路にフィットする。 GSO と同サイズの GAGG アレイを製作、MPPC 回路でエネルギー分解能を評、4~5%がシステムとして得られた(図 3.1.1~2 の右上)。 ETCC としても 5~6%(662 keV にて)が得られた。シンチレータで最もエネルギー分解能が良い LaBr(3%(662 keV にて)が得られた。シンチレータで最もエネルギー分解能が良い LaBr(3%(662 keV にて))は潮解性があるため、ピクセル構造にするとガラス容器に封印が必要なため、エネルギー分解能が 5%となり、GAGG と同程度になる。しかも、容器窓の反射によりピクセル間のばらつきもある。価格も GAGG の倍以上であり、さらに、内在 RI による放射線のため 1.5 MeV 以上では計測に使用できない点を考慮すると、GAGG の導入により ETCC は最もエネルギー分解能のよい γ 線イメージング装置となる。また、MPPC 読出し回路は低利得と高利得アンプが独立にあるため、3.2.1 に記載したように 4 MeV 以上の高エネルギー γ 線にも対応可能であり、4 MeV 以上の高エネルギー γ 線が放射される再臨界の調査用としての使用も可能となる。
- C. 高空間分解能:まず、画像から線量や面の放射能を計測するためには、光学カメラ同様に全 単射による線形画像が不可欠であり、画像内の2点が独立に照度の測定が可能な最小角度が Point Spread Function (PSF) をして定義される。写真のピントに対応する、多項式ピンホ ールカメラや従来型コンプトンカメラは非線形画像であり、PSF が定義できない。ETCC は全 エネルギー領域で全単射画像が完全に測定できる唯一のγ線カメラである。現在、PSF (50% の γ 線が収束する角度) が 15~20 度 (662 keV にて) であった。コンプトン散乱の場合、PSF はy線を決める仰角と方位角の誤差、それぞれを ARM (Angular Resolution Measure) と SPD (Scatter Plane Deviation) で決まる。ARM は、従来型コンプトンカメラで使用される角度 分解能であるが、ETCC は、GSO、GAGG 仕様の場合、6 度、5 度(662 keV にて)と最高の分解 能を達成している。しかし ARM のみでは到来方向が円環に広がり PSF が定義できない。その ため、PSF はコンプトン散乱の反跳電子の方向決定精度 SPD が必要だが、ARM に比べ ETCC で すら SPD は 70 度程度と悪く PSF は SPD で決まる。662 keV γ 線の場合、ETCC で捉える反跳電 子は 200 keV 以下が中心であり、飛跡は空気中の多重散乱によりジグザグであり、散乱点、 散乱方向の決定が困難となる。それを解決するために、令和元年度後半から Deep Learning (DL)を取り入れ、機械学習により改善を図った。結果は20 keV 以上の電子飛跡ではSPDが 30 度まで改善、PSF で 10~15 度 (662 keV にて) と 5 度以上改善した。
- D. 安全性・耐性: ETCC を廃炉等で実際に利用する場合、装置の安定性、特にガス TPC 内の μ PIC の安定性、特に放電耐性が重要となる。従来の μ PIC は電極間にポリイミドを絶縁体として使用したため、放電でポリイミドが炭化し導通が起こり、電圧降下が発生した。これを解消し、かつ高利得 (10^4 以上)を実現するため、ガラス基板上にポリイミドを使用しないで μ PIC を令和元年に試作した (TGV_{μ} PIC)。利得が 2 倍向上し、 10^4 以上で安定動作を実現した。また、放電してもガラスは炭化しないため導通が行えず、放電破壊が発生しない。令和 2 年度では、ETCC に搭載できる 18 cm 直径 TGV_{μ} PIC を試作し、実際に 20 cm 径 ETCC に搭載し動作確認を行った。このように製作技術を確立した。

ETCC が広視野で km スケールの遠方ならびに広域の微弱放射能を測定できる特徴を活かし、複合研の原子炉から透過する $0.1~{\rm MeV}\sim3~{\rm MeV}$ の広帯域 γ 線を利用した、原子炉からの連続 γ 線による 3 次元線量計を行った。

3.4 γ線画像から大気中3次元核種分布及び放出量を逆解析する手法の開発 (連携先: JAEA)

3.4.1 大気中核種濃度分布の作成

シミュレーションベースの解析手法開発に用いるために、1F 及び JAEA 原子力科学研究所の建物の影響を受けた気流場及び拡散場を詳細に再現し、様々な大気中核種濃度分布を作成可能な計算体系を構築した。大気拡散シミュレーションには、非定常乱流現象の再現に優れたLOHDIM-LES^{[5][6][7][8][9]}を用いている。この予測コードは、建屋施設の配置形態や局所的地形起伏を精緻に解像することにより、気流・乱流場及び物質拡散場において建物・地形影響を陽的に表現することが可能であり、施設近傍における核種濃度を詳細に解析できる。

平成30年度は、LOHDIM-LESの計算体系における地表面境界条件として、航空機測量(平成18年に実施)に基づく2m空間分解能の地形データ及び建物・森林データを購入し、入力データを整備した。試験計算の結果、地形の起伏や建物形状に起因する気流や森林内への取込み効果などによる複雑な拡散状況を再現できることから、この計算体系の妥当性を確認した。

令和元年度は、IF の建物の影響を受けた気流場及び拡散過程を詳細に再現した拡散シミュレーションにより、様々な気象条件に対する大気中核種濃度分布を作成した。平成 30 年度に妥当性を確認した、IF 周辺の詳細な地形データを入力した大気拡散シミュレーションにより、様々な気象条件での拡散計算として、10 度間隔の風向毎に気流場及び拡散過程を詳細に再現した 36 ケースの計算を実行し、大気中核種濃度分布・平均風速・乱流統計量に関するデータを蓄積した。

令和2年度は、逆解析手法に導入した気象観測データを用いた簡易大気拡散計算の有効性を評価するために、JAEA原子力科学研究所構内において、ドップラーライダーを用いた気象観測及び簡易的な拡散実験を実施し、簡易拡散計算によるプルームの再現性を評価した。また、LOHDIM-LESを用いた詳細拡散計算により、観測された気象場を再現し、実気象場での大気中核種濃度分布を作成した。以下に、(1)気象観測、(2)簡易拡散実験、(3)簡易拡散計算の再現性評価、(4)詳細拡散計算について記載する。

(1) 気象観測

令和2年11月16日から12月23日の期間、気象観測を実施した。図3.4.1-1に、観測の実施状況と各実験装置を示す。

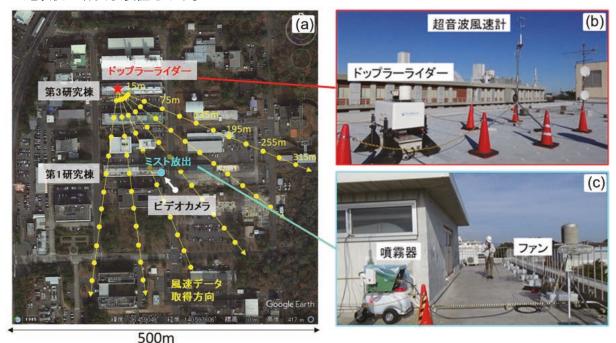


図 3.4.1-1 気象観測・簡易拡散実験を実施したサイト
(a)対象サイト (下絵は Google™ Earth により作成)
(b)ドップラーライダー (c)噴霧器

JAEA 原子力科学研究所構内の第 3 研究棟屋上の西側に、気象観測装置ドップラーライダー(StreamLine Pro、HALO Photonics Ltd.)と超音波風速計(WindMaster II、Gill Instruments Ltd.)を設置した。ドップラーライダーは、大気中に浮遊する微粒子(エアロゾル)にレーザ光を発射し、その後方散乱光を受信することで風向・風速の情報を得ることができる。超音波風速計は、超音波パルスを発生して、受発信器間の到達時間を計測し、風速と音速の関係を利用して、これを演算処理して風速に変換するものである。高速サンプリングが可能で、10 Hz~40 Hz 程度の高周波の風の乱れの計測が可能である。第1研究棟屋上の東側には、ミストプルームを放出させるための噴霧器(TIC Corporation Ltd.)を設置した。ドップラーライダーを噴霧器が置かれた所に向かって集中気流観測を行った。本実験では、仰角 1.0、7.6、14.9、21.8 度、方位角 112.5、127.5、142.5、157.5、172.5、187.5 度、ゲート長 30 m の間隔で、視線方向の風速分布を取得した。

図 3.4.1-2 は、それぞれの仰角における視線方向の風速分布を内挿補間したものである。図 3.4.1-3 は、令和 2 年 11 月 26 日 11:25-11:31 (Case A) 及び 12 月 1 日 11:16-11:22 (Case B) において、建物屋上面での噴霧器を中心にした 150 m 四方領域の風速ベクトルの水平分布を表している。Case A では、プルーム放出位置周辺ではまず西風が見られ、時間が経つにつれ西北西の風が見られるようになる。Case B では、まず、放出位置のすぐ東側で北東風と南東風が衝突し、南西側では旋回流が見られ、非一様性の強い気流場が形成されているのがわかる。時間が経つにつれ、全体的に東風が支配的になっているのがわかる。

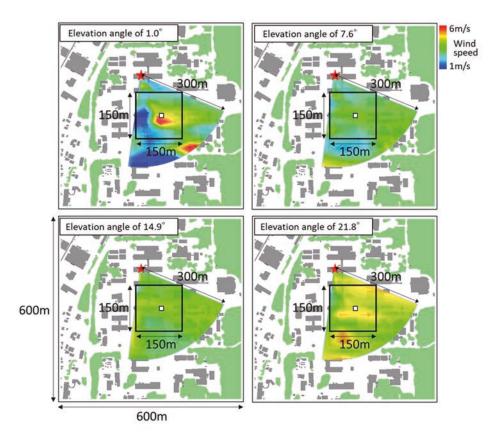


図 3. 4. 1-2 各仰角における視線方向風速分布 (四角で囲まれた 150 m 四方の領域は、 図 3. 4. 1-3 の風速ベクトル分布領域を表している。)

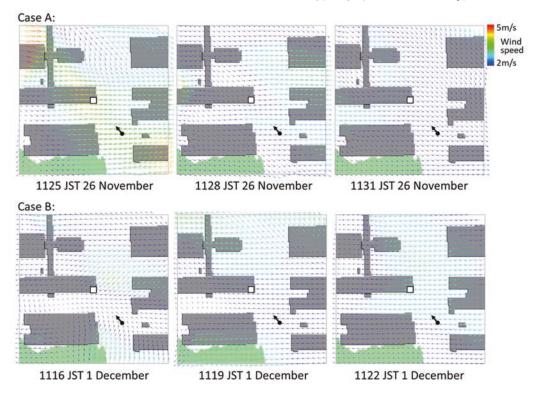


図 3.4.1-3 建物屋上面での噴霧器周辺の風速ベクトル分布(四角は、噴霧器によるプルームの放出位置、矢印はビデオカメラ撮影を行った場所を表している。)

(2)簡易拡散実験

図 3.4.1-4 は、噴霧器によりミスト状にプルーム放出された簡易拡散実験の様子を表している。噴霧器は、50 L タンクと直径 45 cm のファンにより構成されている。ファンには、10 個のスプレーノズル(KX47S-01)が 5 cm 間隔で取り付けられ、2.7 L/min の排出速度で上空に向けてミストプルームが放出される。



図3.4.1-4 噴霧器によるミスト状のプルーム放出による簡易拡散実験の様子



図 3.4.1-5 プルーム拡散挙動 (Case A: 令和2年11月26日11:23-11:31)

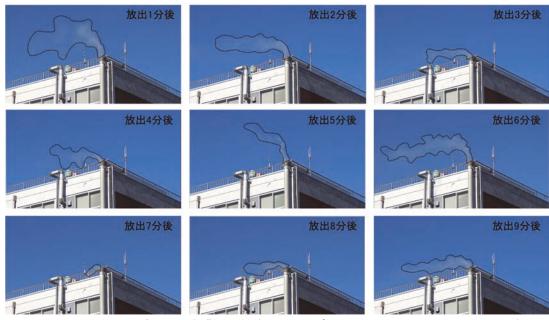


図 3.4.1-6 プルーム拡散挙動 (Case B: 令和 2 年 12 月 1 日 11:13-11:21)

図3.4.1-5及び図3.4.1-6は、デジタルビデオカメラ(ソニー株式会社製)により撮影されたプルームの1分毎の拡散挙動を示している。プルームは、第1研究棟東側より南東側に20m程度離れた地上面より、ビデオ撮影された(図3.4.1-1(a)参照)。Case Aでは、西側から建物屋根面上を通過してきた風によりプルームはそのまま流され、いずれの時刻においてもプルーム主軸方向はほぼ一定であり、比較的類似した拡散挙動を示した。一方、Case Bでは、東側から吹いてきた風は、建物隅角部で剥離して非定常挙動の激しい乱流となり、この影響によりプルームの主軸方向の振れ幅や拡がりなどの時空間的変動も激しくなるのがわかる。

(3) 簡易拡散計算の再現性評価

簡易大気拡散計算としてラグランジュ粒子拡散モデルを用い、気象観測値を計算格子に合わせて内挿補間をして得られた3次元風速分布と、LOHDIM-LES事前計算データベースの乱流風速データとを融合させて入力し、拡散シミュレーションを行った。

まず、平均風速場については、各位置(x,y)における観測最低高度 h_{OBS} より上層では気象観測値を直接的に与え、それより下層では事前計算データベースを用いた。以下に、平均風速分布の与え方を示す。

$$U_{coup}(x, y, z) = U_{OBS}(x, y, h_{OBS}(x, y)) \text{ for } z > h_{OBS}(x, y)$$

$$\tag{1}$$

$$U_{coup}(x, y, z) = U_{LES}(x, y, z) \frac{U_{OBS}(x, y, h_{OBS}(x, y))}{U_{LES}(x, y, h_{OBS}(x, y))} \text{ for } z \le h_{OBS}(x, y)$$
 (2)

ここで、 U_{coup} 、 U_{OBS} 、 U_{LES} は、気象観測と事前計算データベースの融合による平均風速の推定値、気象観測値、LOHDIM-LES 事前計算値を表す。乱流風速については、気象観測による 3 次元分布の取得は難しいため、風力発電の評価方法の国際規格 IEC61400(International

Electrotechnical Commission, 2005) において用いられている、標準乱流モデル式 (NTM: Normal Turbulence Model) により推定した。以下に、NTM 式を示す。

$$\sigma_l = I_{ref}(aU + b) \tag{3}$$

ここで、 σ_N 、 I_{ref} 、Uは、主流方向の風速変動標準偏差、平均風速 15 m/s における乱流強度の期待値、風車ハブ高さの平均風速である。a、bは、 σ_I の平均値及びその標準偏差を表すモデルのパラメータであり、それぞれ 0.75、5.6 の値がよく用いられる。この NTM 式の、剥離乱流などの建物影響の強い複雑な流れ場への適用性を調べるため、第 3 研究棟屋上で超音波風速計により取得・測定された 10 分間の風速変動標準偏差と比較検証した。

図 3.4.1-7(a) 及び(b) は、乱流強度をパラメータとした決定係数及び平均風速に対する乱流強度の分布曲線をそれぞれ示している。

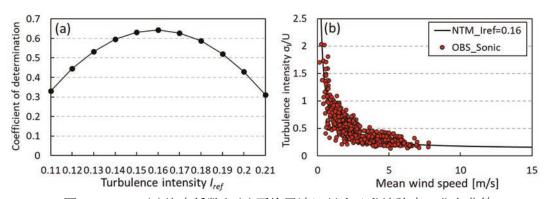


図 3.4.1-7 (a)決定係数と(b)平均風速に対する乱流強度の分布曲線

決定係数を調べると I_{ref} =0.16 の時にピークを示した。この値を(3)式に代入して NTM 分布曲線を算出した。その結果、NTM 分布曲線周辺に風速変動標準偏差の測定値が分布している傾向が得られた。これにより、NTM 式は剥離乱流などが生じる非一様性の強い複雑な流れ場に対しても適用できることを実証した。

さらに、NTM 式は風車ハブ高さの 1 地点での σ を求めるための推定式であるため、これを 3 次元分布推定式に展開した。

$$\sigma_{l_est}(x, y, z) = I_{ref_l_LES}(x, y, z) \left(aU_{coup}(x, y, z) + b \right) \tag{4}$$

$$I_{ref_L_LES}(x, y, z) = \frac{\sigma_{L_LES}(x, y, z)}{U_{LES}(x, y, z)}$$
(5)

ここで、 σ_{Lest} 、 $I_{ref_{LLES}}$ は、位置(x,y,z)での主流方向風速変動標準偏差の推定値、事前計算による乱流強度を表す。これを、まず東西方向のu成分に分解する。

$$\sigma_{u \ est}(x, y, z) = I_{ref \ LES}(x, y, z) \left(aU_{coup}(x, y, z) + b \right) \tag{6}$$

$$I_{ref_LES}(x, y, z) = \frac{\sigma_{u_LES}(x, y, z)}{U_{LES}(x, y, z)}$$
(7)

次に、事前計算による乱流強度の東西成分に対する南北成分 v と鉛直成分 w の比から、それぞれの成分の風速変動標準偏差の推定値を求めた。

$$\sigma_{v_est}(x, y, z) = \frac{\sigma_{v_LES}(x, y, z)}{\sigma_{u_LES}(x, y, z)} \sigma_{u_est}(x, y, z)$$
(8)

$$\sigma_{w_est}(x, y, z) = \frac{\sigma_{w_LES}(x, y, z)}{\sigma_{u_LES}(x, y, z)} \sigma_{u_est}(x, y, z)$$
(9)

以上の手順により平均風速と乱流風速の3次元分布を推定し、以下の方程式により簡易大気拡散計算を実施した。

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + u_{pi}\Delta t \tag{10}$$

$$u_{ni} = U_i + u_i' \tag{11}$$

$$u_i'(t + \Delta t) = au_i'(t) + b\sigma_{ui}\xi + \delta_{i3}(1 - a)t_{Lxi}\frac{\partial \sigma_{ui}^2}{\partial x_i}$$
(12)

$$a = exp\left(-\frac{\Delta t}{t_{1:ri}}\right) \tag{13}$$

$$b = (1 - a^2)^{1/2} \tag{14}$$

ここで、 x_i 、t、 Δt 、 u_{pi} 、 U_i 、 u'_i 、 ξ 、 δ 、 t_{Lxi} は、粒子の i 方向の位置、時間、計算タイムステップ、粒子位置における i 方向の風速、平均風速、乱流風速、標準偏差を 1 とした正規乱数、デルタ関数、i 方向のラグラジアン積分時間スケールをそれぞれ示している。

図 3.4.1-8 に、Case A と Case B における拡散実験と簡易拡散計算によるプルームの拡散挙動を比較した図を示す。拡散実験の方は、放出してから 1、4、7 分後の図を示している。計算結果は、放出点近傍の拡散挙動を比較するため、10 分平均での 50%相対濃度の等値面を評価している。計算結果に着目すると、Case B のミストプルームの主軸方向の振れ幅や拡がりは、建物隅角部で発生した活発な剥離乱流の影響により、Case A のものに比べて大きくなっているのがわかる。この傾向は拡散実験結果と一致しており、簡易拡散計算の妥当性を定性的には示すことができた。

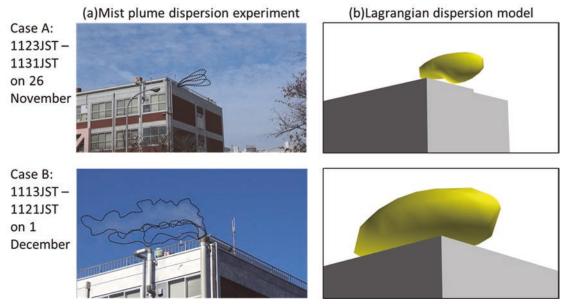


図3.4.1-8 ミストプルーム拡散実験と簡易拡散計算における拡散挙動

(4) 詳細拡散計算

図 3.4.1-9 に、詳細拡散シミュレーションを実施した計算モデルを示す。計算領域を 1200 m ×1200 m×200 m (東西方向×南北方向×鉛直方向)、計算格子サイズは、水平方向に 1 m、鉛直方向は、1 m から 10 m の不等間隔格子とした。計算タイムステップは 0.005 秒とした。 Case A の気象観測値を入力条件とし、簡易拡散実験を実施した第 1 研究棟屋上面の位置より 20 m 上空の所から(地上高約 30 m)、プルームを単位量で 1 分間連続放出した。図 3.4.1-10 は、詳細拡散計算による 1 分間平均濃度の 3 次元分布を示している。東側に運ばれながら、乱流の影響により徐々に拡がっていく様子がわかる。

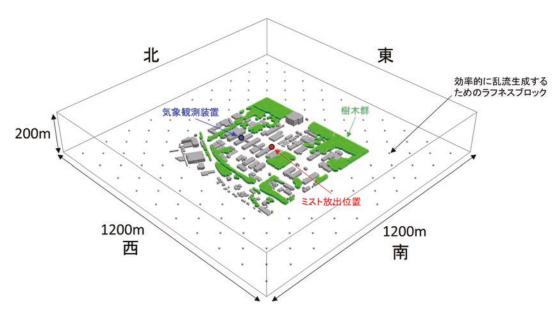


図 3.4.1-9 詳細拡散シミュレーションの計算モデル



図 3.4.1-10 詳細拡散計算による 1 分間平均の大気中核種濃度分布

3.4.2 仮想 γ 線画像データの作成

 γ 線画像測定データから逆解析手法により、大気中の放射性核種濃度分布を類推するには、様々な濃度分布パターンの大気中放射性核種から飛来する γ 線によって得られると想定される、仮想 γ 線画像データを作成する手法を用意しておくことが不可欠となる。京大が開発したETCC の γ 線画像データは、検出領域に入射する γ 線の信号を、入射角度情報に基づき最小角度分解能で定義されるピクセルに投影することで構築される。本研究では、任意の座標に存在する単位放射能濃度の放射性核種から放出される γ 線に対する ETCC の各ピクセルの応答を計算機で解析し、大気中の放射性核種濃度分布を仮想 γ 線画像データに変換する、応答関数行列を作成するプログラムを整備した。

平成 30 年度は、核種濃度分布をγ線画像データに変換する応答関数行列の計算手法を検討し、放射性セシウムに対する計算手法を試作した。この計算手法を用いて、簡易的な条件の大気拡散計算による大気中核種濃度分布に対して仮想γ線画像データを作成し、PHITS を用いた3 次元詳細計算結果と比較した結果、同等な結果を得ることができ、計算手法の妥当性を確認した。

令和元年度は、平成 30 年度に試作した計算手法について、様々な条件に適用できるように 逆解析を行う計算体系の設定を汎用化するとともに、ETCC で計測される γ 線画像の分布形状だけでなく、絶対値も定量的に模擬できるように改良した。これを大気中核種濃度分布に適用し、 生成された仮想 γ 線画像を PHITS によるモンテカルロ計算と比較することで、定量的にも妥当であることを確認した。

令和 2 年度は、開発した大気中核種濃度分布を γ 線画像データに変換する計算手法を、3.4.1(4)により作成した実気象場での大気中核種濃度分布に適用して、 γ 線測定装置 ETCC で計測される放射線場を模擬した仮想 γ 線画像データを作成した。この解析条件と作成した仮想 γ 線画像データについて、以下に記載する。

(1)計算格子のサイズ及び仮想γ線画像のピクセル数

図 3. 4. 2-1 に、放射性核種濃度分布の逆解析を行う計算体系の模式図を示す。系全体のサイズは南北 400 m、東西 400 m、高さ 60 m であり、これを南北方向・東西方向に 80 等分、鉛直方向に 12 等分し、計算格子 1 つあたりのサイズを $5\times5\times5$ m³ とした。この計算格子は、3. 4. 1(4) で実施した大気拡散シミュレーションの計算格子から、放出点が解析領域の中心(原点)となるように切り出した。仮想 γ 線画像のピクセル数は、 $20\times20=400$ ピクセルとした。これは、既存の ETCC の視野(100×100 度)と角度分解能(5 度)を考慮して決定した。ETCC の設置位置は、この解析範囲の 4 隅(北東、南東、南西、北西)とし、解析範囲全体が各 ETCC の視野内に入るようにした。ETCC の計測方向は、水平方向として原点(放出点)、鉛直方向として仰角 50 度(測定範囲 100 度から測定仰角の下限が水平方向となる)を指定した。

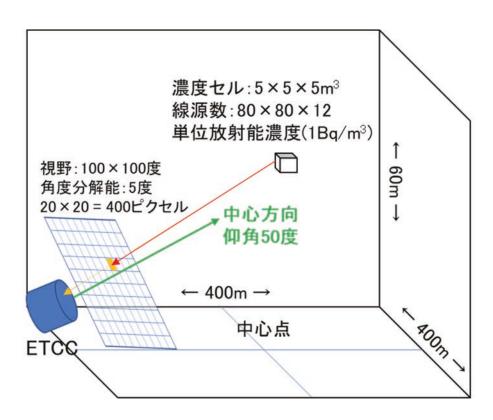


図 3.4.2-1 放射性核種濃度分布の逆解析計算体系

(2) 実気象場での大気中核種濃度分布に対する仮想 γ 線画像の作成

3.4.1(4)で作成した実気象場での大気中核種濃度分布に対して、逆解析に用いる ETCC の仮想 γ 線画像の作成を行った。ETCC の設置位置は、解析領域の北東、南東、南西、北西の 4 隅(放射性核種の放出点から約 283 m離れた位置)とし、解析範囲全体が各 ETCC の視野内に入るようにした。ETCC の計測方向は、水平方向として原点(放出点)、鉛直方向として仰角 50 度(測定範囲 100 度から測定仰角の下限が水平方向となる)を指定した。図 3.4.2-2 は、3.4.1(4)で作成した大気中核種濃度分布の 1 つに対して、解析領域の北東、南東、南西、北西の 4 隅に設置した ETCC における仮想 γ 線画像である。

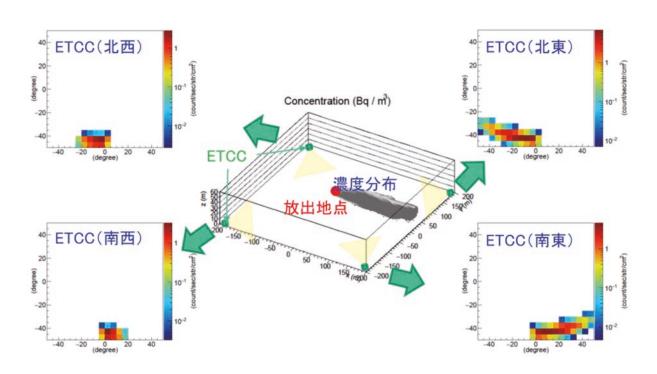


図 3.4.2-2 ある大気中核種濃度分布に対する仮想γ線画像の例

3.4.3 逆解析手法の開発

ETCC による γ 線画像測定データから 3.4.2 で整備した応答関数行列を逆解析して、大気中核種濃度分布を求める手法を開発した。逆解析の解を得るには、 γ 線画像データ数(モニター数 ×ピクセル数)を大気中核種濃度分布の 3 次元格子数に合わせる必要があるが、3 次元の濃度格子数 (例:200×200×50) に対して、2 次元の γ 線画像データ数に限界があり、通常は解析不能である。そこで、ベイズ推計やスパースモデリングなどの解析手法の利用、風速場観測に基づく簡易拡散計算結果との融合等により、問題の解決法を検討した。

平成 30 年度は、 γ 線画像データ(3 台×100 ピクセル)から応答関数行列を逆解析して 3 次元濃度分布($50\times50\times50$)を得る試験問題において、簡易拡散計算による相対的な濃度分布を 先験情報として使用したベイズ推計を行うことで、濃度分布の絶対値と放出量を再現できることを確認した。この結果に基づき、解析手法とアルゴリズムを検討し、一定の時間間隔で得られる測定データに対して、リアルタイムで解析する手順の設計を行った。

令和元年度は、平成 30 年度に概念設計を行った逆解析手法に基づき、逆解析プログラムの 改良や、逆解析の先験情報として用いる濃度相対分布を、簡易拡散モデルによって作成するプ ログラムの試作を行った。

令和 2 年度は、開発した逆解析手法の解析プログラムについて、3.4.2(2)により作成した仮想 γ 線画像データから大気中核種濃度分布データ等を再現する試験により、解析手法のパラメータの最適化を行った。以下に、逆解析プログラムの計算手法と改良、及び最適化と性能評価について記載する。

(1)逆解析プログラムの概要

①逆解析の計算手法

逆解析の計算手法は、ベイズ推計手法^[10]に基づく放出量推定手法^[11]に基づき開発したものであり、以下にその計算の流れを述べる。

ETCC で得られる γ 線画像データ \mathbf{y} と大気中核種濃度分布 \mathbf{x} は、応答関数行列 \mathbf{M} を用いて $\mathbf{y}=\mathbf{M}\mathbf{x}$ で関係付けられる。 \mathbf{y} は γ 線画像上のピクセルの計数値を1次元縦ベクトルとして表したもので、1 画像あたりのピクセル数×画像枚数だけの要素をもつ。 \mathbf{x} は大気中核種濃度分布を1次元縦ベクトルとして表したものである。先験分布において核種濃度が0であった計算格子に対応する要素を取り除き、要素数を減らしている。 \mathbf{M} は各 ETCC 設置位置における応答関数行列を縦に並べたものであり、列方向は \mathbf{x} と同じく先験分布に基づいて要素数を減らしている。

ETCC で得られた γ 線画像 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大気中核種濃度分布 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。

$$J = [(\mathbf{M}\mathbf{x} - \mathbf{y})^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{y})^{-1}(\mathbf{M}\mathbf{x} - \mathbf{y}) + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{x}_0)^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)]/2$$
(15)

ここで $\mathbf{x_0}$ は、 $\mathbf{Mx_0}$ 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先験分布を定数倍したものである。 $\mathbf{C(x_0)}$ 、 $\mathbf{C(y)}$ は $\mathbf{x_0}$ 、 \mathbf{y} に関する不確実性の共分散行列で、 $\mathbf{x_0}$ 、 \mathbf{y} の要素の最大値 $\mathbf{x_{max}}$ 、 $\mathbf{y_{max}}$ を用いて以下のように定義される。

$$C(\mathbf{x}_0)_{ij} = \sigma x_i^2 \delta_{ij} \tag{16}$$

$$C(\mathbf{y})_{ij} = \sigma y_i^2 \delta_{ij} \tag{17}$$

$$\sigma x_{i} = \begin{cases} x_{i}, & (x_{i} > 10^{-3} x_{\text{max}}) \\ 10^{-3} x_{\text{max}}, & (0 < x_{i} \le 10^{-3} x_{\text{max}}) \\ 10^{-5} x_{\text{max}}, & (x_{i} = 0) \end{cases}$$

$$\sigma y_{i} = \begin{cases} 10^{-1} y_{i}, & (y_{i} > 10^{-5} y_{\text{max}}) \\ 10^{-6} y_{\text{max}}, & (y_{i} \le 10^{-5} y_{\text{max}}) \end{cases}$$

$$(19)$$

$$\sigma y_i = \begin{cases} 10^{-1} y_i, & (y_i > 10^{-5} y_{\text{max}}) \\ 10^{-6} y_{\text{max}}, & (y_i \le 10^{-5} y_{\text{max}}) \end{cases}$$
(19)

コスト関数 /が最小になる大気中核種濃度分布 x は、以下の式で求められる^[12]。

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{L}(\mathbf{x}_0)^{-1} \mathbf{M}^{\mathrm{T}} \mathbf{C}(\mathbf{y})^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{M} \mathbf{x}_0)$$
 (20)

$$\mathbf{L}(\mathbf{x}_0)^{-1} = [\mathbf{M}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{y})^{-1}\mathbf{M} + \mathbf{C}(\mathbf{x}_0)^{-1}]^{-1}$$
(21)

逆解析では、式(20)で求まった推定分布 x を右辺の xo に代入し、改めて 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。ただし、L(x₀)·1の逆行列は非常に計算 コストがかかるため、式(21)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、 $L(x_0)$ -1 の再計算を省き計算時間の短縮を図っている。この点について、令和元年度に $L(x_0)$ -1 の 再計算頻度を変えることで、逆解析結果に与える影響を調査した結果、濃度分布の推定精度の 向上は限定的であった。そこで、式(21)の再計算は行わないこととして、不確実性の共分散行 列の設定方法を再検討した。

②逆解析プログラムの改良

逆解析の計算手法においては、不確実性の共分散行列の設定方法に任意性があり、これによ り推定精度が決定される。令和元年度の計算法では、式(18)及び(19)のように、大気中核種濃 度分布及びγ線画像データの各要素に依存した値を不確実性の共分散行列に与えていた。これ は、式(6)で推定される大気中核種濃度分布が、先験分布から大きくずれないように、推定値の 変化量を先験分布の各要素値の大きさにより制限するためである。

この推定値の変化量の制限に関して、式(20)における xo から推定値 x への変化量を規定す る右辺第2項の大きさを、xoに対する割合で制限をかけることで代用する方法を検討した。そ の結果、式(18)の ox 及び式(19)の oy に一定値を与えた場合でも、式(20)右辺第 2 項を x₀ に 対して1%増減する範囲に制限して推定計算を繰り返すことで、従前の手法より良好な推定結 果が得られることを確認した。この手法において設定が必要なパラメータは、ox 及び oy に与 える一定値と式(20)による推定計算の繰り返し回数となる。さらに、ox 及び oy に与える一定 値については、それぞれの絶対値に関係なく、比率にのみ依存して推定結果が決定する。そこ で、 σy は y の要素の最大値、 σx は x_0 の要素の最大値の α 倍を与えることとし、設定が必要な パラメータは比率 α と推定計算の繰り返し回数 Ιの 2 つに絞り込んだ。これら 2 つのパラメー タの感度解析により、逆解析プログラムの最適化を行った。

(2) 逆解析プログラムの性能評価

①解析条件

テストケースとして、逆解析プログラムの性能評価に用いた試験の概要は以下の通りである。 3.4.1 において、JAEA 原子力科学研究所構内を対象とし、LOHDIM-LES の詳細大気拡散計算によ り再現した実気象場での大気中核種濃度分布を「正解分布」として用いる。この拡散計算では、

放出核種を 137 Cs、放出地点を計算体系の原点の上空 30 m に設定し、放出開始から 1 分後まで及び 1 分後から 2 分後まで、大気中核種濃度分布の 1 分平均値を計算した。放出率については、1.0 GBq/s を基本条件とし、1 分後から 2 分後までの放出率が変化しないケースと、0.1、0.5、2、及び 10 倍に変化するケースを設定した。この正解分布に対し、3.4.2 において、北東、南東、南西、北西に 283 m 離れた地点に設置された、計 4 台の ETCC において得られる仮想 γ 線画像を、事前に構築した応答関数行列を用いて作成した。また、気象観測データを用いた簡易大気拡散計算により、逆解析の先験情報として用いる大気中核種濃度分布(以下、「先験分布」という)を準備した。先験分布の計算条件は、放出率を単位放出率(1.0 Bq/s)とし、放出開始から 1 分後までの 1 分間放出について、(a) 1 分後まで及び(b) 1 分後から 2 分後まで、それぞれの 1 分平均濃度分布を作成した。

ここで、2 分後までの連続放出による 1 分後から 2 分後までの 1 分平均濃度分布から (b) の 濃度分布を差し引くと、(c) の濃度分布と等しくなる。この関係を用いて、1 分後から 2 分後までの放出に対する逆解析を以下のように行うことができる。まず、1 分後までの濃度分布に対する ETCC の γ 線画像からの逆解析で得られた放出率を (b) の濃度分布に適用し、その濃度分布からの γ 線画像を生成する。これを実際の連続的な放出に対する 1 分後から 2 分後までの濃度分布に対する ETCC の γ 線画像から差し引くことで、1 分後から 2 分後までの 1 分間放出に対する濃度分布に相当する部分からの γ 線画像が得られると考え、この γ 線画像から (c) の濃度分布を先験分布として逆解析を行う。

②パラメータの最適化

逆解析プログラムの改良により設定が必要なパラメータとして絞り込んだ、不確実性の共分散行列の設定における比率 α と推定計算の繰り返し回数 I の 2 つについて、感度解析により最適化を行った。感度解析は、1 分後までの濃度分布に対する ETCC の γ 線画像からの逆解析において実施し、これらのパラメータを変更して最も良好に推定値が得られる条件を決定した。良好な推定値の判定条件は、放出率と濃度最大値の一致度とし、濃度分布の比較及び散布図により分布の再現性も確認した。

繰り返し回数 F=50、100、150、200 に対して、それぞれ比率 α =1、2、5、10、20、50、100、200、500、1000 とした組合せの 40 ケースについて、逆解析を実施した結果を表 3.4.3-1 にまとめた。ここで、正解分布と先験分布の放出率及び濃度最大値も示しているが、先験分布の濃度最大値については正解分布と放出率を合わせた場合の結果を示している。この値は正解分布の 27%程度となっており、より希釈された分布であるが、逆解析の繰り返し回数 Iと比率 α が増えることにより、正解分布の濃度最大値に近づく傾向が見られる。ただし、濃度最大値が大きくなるに従い、濃度分布が分割され、まだらになる傾向が見られ、逆解析により濃度分布が過剰に修正されていると考えられる。そこで、全体の分布と存在量の一致の観点から、放出率の一致を重視することとした。放出率が正解分布に近くなる 4 ケース((F=50, α =50)、(F=100, α =50)にか定し回数 E=100、比率 α が 100 以上では分布がまだらになる傾向が見られ、逆解析により濃度分布の比較では、比率 α が 100 以上では分布がまだらになる傾向が見られ、逆解析により濃度分布が過剰に修正されていると考えられる。以上より、逆解析の最適パラメータを、繰り返し回数 E=100、比率 α =50 に決定した。

表 3.4.3-1 逆解析のパラメータの繰り返し回数 I と α (不確実性の共分散行列の設定における比率)を変化させた場合の放出率と濃度最大値の推定値(1/2) (太字は、放出率が正解分布に近くなる 4 ケース)

| 解析ケース | 放出率(GBq/s) | 濃度最大値(MBq/m³) |
|---------------------------|------------|---------------|
| 正解分布 | 1.000 | 7. 399 |
| 先験分布 (放出率を合わせた場合) | 1.000 | 1. 979 |
| $I = 50, \alpha = 1$ | 0. 994 | 2. 083 |
| $I = 50, \alpha = 2$ | 0.992 | 2. 130 |
| $I = 50, \alpha = 5$ | 0. 994 | 2. 337 |
| $I = 50, \alpha = 10$ | 0. 993 | 2. 752 |
| $I = 50, \alpha = 20$ | 0. 984 | 3. 031 |
| $I = 50, \alpha = 50$ | 0. 993 | 3. 081 |
| $I = 50, \alpha = 100$ | 1.021 | 3. 197 |
| $I = 50, \alpha = 200$ | 1.040 | 3. 248 |
| $I = 50, \alpha = 500$ | 1.053 | 3. 308 |
| $I = 50, \alpha = 1000$ | 1.061 | 3. 308 |
| $I = 100, \alpha = 1$ | 1.007 | 2. 109 |
| $I = 100, \alpha = 2$ | 1.010 | 2. 150 |
| $I = 100, \alpha = 5$ | 1. 017 | 2. 478 |
| $I = 100, \alpha = 10$ | 1.014 | 3. 290 |
| $I = 100, \alpha = 20$ | 1.003 | 4. 053 |
| $I = 100, \alpha = 50$ | 0. 995 | 4. 426 |
| $I = 100, \alpha = 100$ | 1. 005 | 4. 561 |
| $I = 100, \alpha = 200$ | 1. 013 | 4. 368 |
| $I = 100, \alpha = 500$ | 1. 026 | 4. 912 |
| $I = 100, \alpha = 1000$ | 1. 049 | 5. 066 |
| $I = 150, \alpha = 1$ | 1. 016 | 2. 119 |
| $I = 150, \alpha = 2$ | 1. 023 | 2. 192 |
| $I = 150, \alpha = 5$ | 1. 032 | 2. 634 |
| $I = 150, \alpha = 10$ | 1. 030 | 3.605 |
| $I = 150, \alpha = 20$ | 1. 021 | 4. 456 |
| $I = 150, \alpha = 50$ | 1. 010 | 4. 938 |
| $I = 150, \alpha = 100$ | 1. 007 | 5. 218 |
| $I = 150, \alpha = 200$ | 1.008 | 5. 146 |
| $I = 150, \alpha = 500$ | 1.019 | 6. 229 |
| $I = 150, \alpha = 1000$ | 1.046 | 6. 538 |
| $I = 200, \alpha = 1$ | 1.023 | 2. 122 |
| $I = 200, \alpha = 2$ | 1.031 | 2. 225 |
| $I = 200, \alpha = 5$ | 1. 039 | 2. 772 |

表 3. 4. 3-1 逆解析のパラメータの繰り返し回数 I と α (不確実性の共分散行列の設定における比率)を変化させた場合の放出率と濃度最大値の推定値(2/2)

| 解析ケース | 放出率(GBq/s) | 濃度最大値(MBq/m³) |
|---------------------------|------------|---------------|
| $I = 200, \alpha = 10$ | 1. 039 | 3. 790 |
| $I = 200, \alpha = 20$ | 1.035 | 4. 655 |
| $I = 200, \alpha = 50$ | 1.028 | 5. 280 |
| $I = 200, \alpha = 100$ | 1.022 | 5. 578 |
| $I = 200, \alpha = 200$ | 1.018 | 5. 841 |
| $I = 200, \alpha = 500$ | 1.030 | 7. 231 |
| $I = 200, \alpha = 1000$ | 1.058 | 7. 572 |

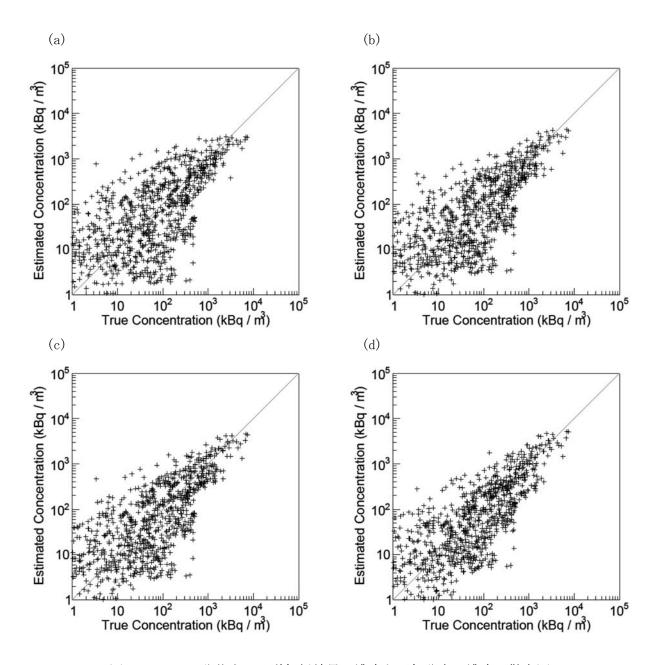


図 3. 4. 3-1 1 分後までの逆解析結果の濃度と正解分布の濃度の散布図 (a) I=50, α =50、(b) I=100, α =50、(c) I=100, α =100、(d) I=150, α =100

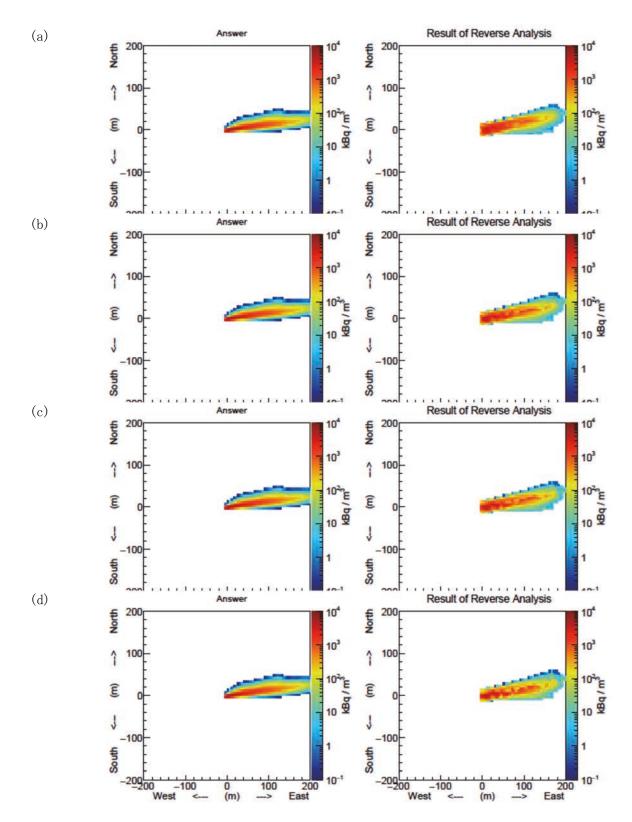


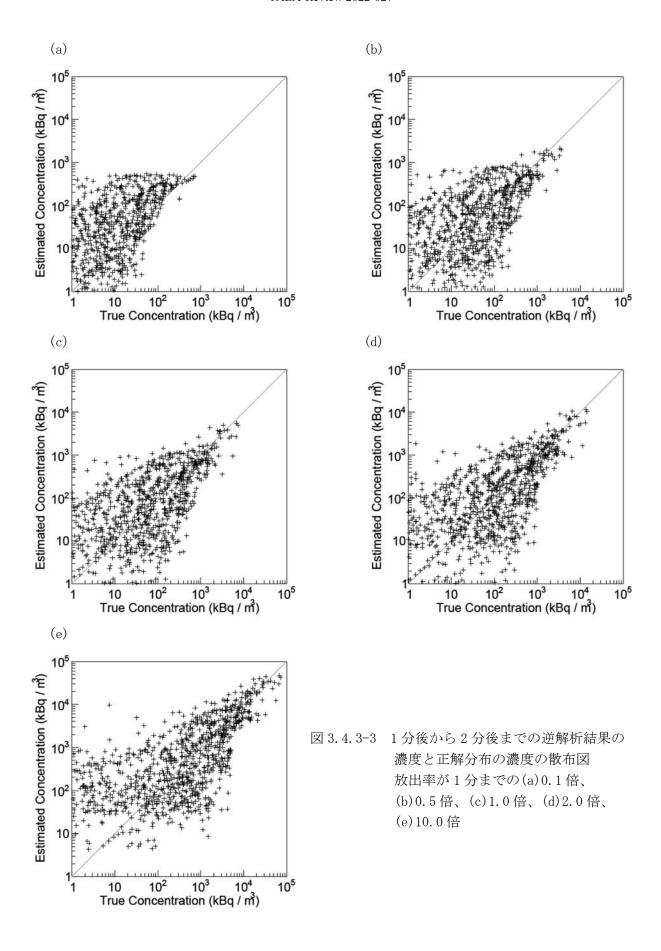
図 3. 4. 3-2 1 分後までの正解分布(左)と逆解析結果(右)の放出高度水平分布の比較 (a) I=50, α =50、(b) I=100, α =50、(c) I=100, α =100、(d) I=150, α =100

③解析結果

放出開始 1 分後までの濃度データに対する感度解析により最適化したパラメータを用いて、 1 分後から 2 分後までの放出に対する逆解析を実施した。前述のように、放出率は 1.0 $\,$ GBq/s を基本条件とし、1 分後から 2 分後までの放出率が変化しないケースと、0.1、0.5、1.0、2.0、 及び 10.0 倍に変化するケースを設定した。1 分後までの感度解析と同様に、逆解析による放出率と濃度最大値を表 3.4.3-2 にまとめた。また、散布図及び濃度分布の比較図をそれぞれ図 3.4.3-3 及び図 3.4.3-4 に示す。濃度最大値については、1 分後までの結果と同様に先験分布の影響から、正解分布に対して小さな値となっている。一方、放出率の推定について、放出率が減少する 0.1 倍及び 0.5 倍のケースでは、正解分布の値に対してそれぞれ 3 倍、1.2 倍と相違が大きいが、変化なし、2 倍、10 倍のケースでは、それぞれ約 4%増、約 1%減、約 2%減でほぼ一致している。これは、逆解析の過程で、放出開始から 1 分後までの 1 分間放出についての、1 分後から 2 分後までの平均濃度に相当する γ 線量を、連続的な放出の濃度分布に対する ETCC の γ 線画像から差し引いた際の誤差の影響が、1 分後から 2 分後までの放出による濃度に相当する γ 線に対する寄与割合から、放出率が小さいほど顕著に表れるためである。この点に関しては今後改善の余地はあるが、放出率が減少する際に放出率を過大評価する傾向は保守的な評価であり、許容できると考えられる。

表 3. 4. 3-2 1 分後から 2 分後までの放出率を 1 分後までの 0. 1、0. 5、1. 0、2. 0、及び 10. 0 倍に変化させたケースに対する逆解析による放出率と濃度最大値の推定値

| 放出率の変化 (倍) | 放出率(GBq/s) | | 濃度最大値(MBq/m³) | | |
|---------------|------------|--------|---------------|---------|--|
| | 正解分布 | 逆解析 | 正解分布 | 逆解析 | |
| 0. 1 | 0.100 | 0. 321 | 0.722 | 0. 538 | |
| 0. 5 | 0.500 | 0.602 | 3. 611 | 2. 090 | |
| 1.0 | 1.000 | 1.043 | 7. 400 | 5. 503 | |
| 2. 0 | 2. 000 | 1.976 | 14. 443 | 11. 534 | |
| 10.0 | 10.000 | 9. 843 | 72. 217 | 46. 416 | |



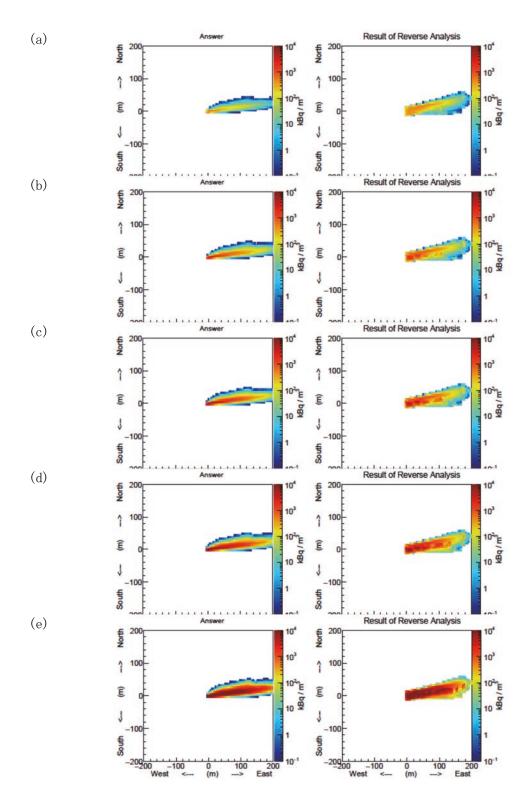


図 3.4.3-4 1 分後から 2 分後までの正解分布(左)と逆解析結果(右)の 放出高度水平分布の比較

放出率が1分までの(a)0.1倍、(b)0.5倍、(c)1.0倍、(d)2.0倍、(e)10.0倍

3.4.4 まとめ

本分担課題の最終的な目的は、ETCC により得られるγ線画像から、大気中3次元核種分布及び放出量を逆解析する手法の開発である。しかし、放射性物質を実際に大気放出して実測データを取得することは現実的には不可能であるため、シミュレーションベースの実験環境に基づく手法開発により、逆解析手法のプロトタイプを構築することを目標とした。

まず、JAEAで開発した様々な地形や気象条件に対して性能実証済みのLOHDIM-LESを用いて、原子力施設の建物の影響を受けた気流場及び拡散場を詳細に再現し、様々な大気中核種濃度分布を作成することが可能な計算体系を構築した。また、逆解析には、任意の座標に存在する単位放射能濃度の放射性核種から放出されるγ線に対する、ETCCの各ピクセルの応答を関連付ける必要があり、大気中の放射性核種濃度分布を、仮想γ線画像データに変換する応答関数行列を作成するプログラムを整備した。これにより、任意の条件におけるシミュレーションベースの解析手法の開発環境が整った。さらに、実際の原子力サイトにおける実気象条件での解析による性能実証のため、JAEA原子力科学研究所において、3次元気流場測定と簡易的な拡散実験を実施し、実測データの取得も行った。

一方、逆解析手法の開発では、3次元の濃度格子数に対して、2次元のγ線画像データ数に限界があり、通常は解析不能であるという問題点に対して、ベイズ推計やスパースモデリングなどの解析手法の利用、風速場観測に基づく簡易拡散計算結果との融合等による解決法を検討した。その結果、簡易拡散計算による相対的な濃度分布を先験情報として使用したベイズ推計を行うことで、濃度分布の絶対値と放出量を再現できることを確認した。この結果に基づき、解析手法とアルゴリズムを検討し、一定の時間間隔で得られる測定データに対してリアルタイムで解析する手順を決定した。この解析手法を、上記シミュレーションベースの実験環境に適用し、仮想γ線画像データから大気中核種濃度分布データ等を再現する試験により、解析手法のパラメータの最適化を行った。以上により、目標とした逆解析手法のプロトタイプの構築を達成した。逆解析手法の構成と解析手順を以下に整理する。

逆解析手法の構成:

逆解析手法は、以下の要素技術の組み合わせにより構成され、γ線画像から定量的な3次元線源分布を推定する。

- ① 電子飛跡検出型γ線カメラ ETCC を用いたγ線画像の全単射による完全可視化
- ② 空気中でのγ線の散乱、吸収補正、構造物の遮蔽による減衰を考慮し、任意の線源分布に 対する計測地点での入射方位別のγ線強度を、即時計算可能なγ線応答関数行列
- ③ 対象空間内の3次元気流場の遠隔計測データに、様々な気流条件に対する建物影響を考慮した高分解能気流・乱流データベースを融合した気流場を入力に用いた、実気象場での建物影響を考慮したリアルタイム大気拡散計算
- ④ ①により対象空間を複数の角度から計測したγ線画像データ、②による入射角度別γ線計算、及び③によるリアルタイム大気拡散計算結果から、ベイズ推定に基づく解析手法による3次元線源分布の再構築

3次元空間の構造物の表面での線源分布及び大気放出地点の推定では、①、②及び④を用い、 大気中に放出された放射性物質の3次元線源分布の再構築においては、③による大気拡散計算 結果を④のベイズ推定の先験情報として追加して解析を行う。

解析手順:

リアルタイムで実施する解析は、一定の時間間隔で得られる ETCC による γ 線画像データ及びドップラーライダーによる 3 次元気流場定データに対して、以下の手順で行う。

手順 0: ETCC の配置に基づく γ 線応答関数行列及び LOHDIM-LES による高分解能気流・乱流データベースを事前作成

手順1: ETCC 及びドップラーライダーの定常測定により、1分間隔で測定値を取得(過去1分間のγ線強度分布画像と平均風速3次元分布)

手順 2: ETCC のγ線画像にバックグラウンドからの有意な上昇を検出

手順3:放出位置を特定

手順4:ドップラーライダーの3次元気流場測定値に、LOHDIM-LESによる高分解能気流・乱流 データを融合し、それに基づくリアルタイム大気拡散計算により、この測定期間の1 分間放出に対する相対濃度分布を作成

手順5:相対濃度分布を先験情報として逆解析を実施し、この測定期間に対する3次元線源分布と放射性物質の放出率を確定

手順 6: ETCC 及びドップラーライダーの次の時刻の測定値を取得

手順7:この測定期間のドップラーライダーの3次元気流場測定値に基づくリアルタイム大気 拡散計算により、前の測定期間の3次元線源分布についてその後1分間の大気拡散状 況を解析

手順8:手順7と並行して、リアルタイム大気拡散計算により、この測定期間の1分間放出に 対する相対濃度分布を作成

手順9: この測定期間のETCC のγ線画像と、手順7の大気拡散計算による3次元線源分布によるγ線画像(前の測定期間の放出分)の差分のγ線画像(この測定期間の放出分)を 作成

手順 10:差分のγ線画像に対して、手順8による相対濃度分布を先験情報として逆解析を実施し、この測定期間の放出に対する3次元線源分布と放射性物質の放出率を確定

以降、手順6から手順10を繰り返す。

3.5 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびにCLADS、東電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の打合せや会議等を開催した。

実施した主な TV 会議

令和3年3月 東電・1F防災・放射線センターと、京大の協議 令和3年9月 JAEA CLADS、PO、J-PO、京大との進捗会議

4. 結言

令和4年5月、京大グループが JAXA 大気球を用いて行った銀河面観測の結果が、米国天文学 会誌に掲載された。今まで、宇宙放射γ線(核γ線)は宇宙線が作る多大な雑音γ線と、他波長 のような全単射撮像を可能にする観測手段が無いため進展が遅かった。近年30年において、欧 米の京大γ線衛星でも、宇宙天体γ線の数 10 倍以上の雑音γ線に悩まされた。我々は本研究に 使用したものと同様の ETCC を用い、世界初の全単射による宇宙放射γ線観測を実施し、雑音を 宇宙天体γ線以下まで低減し、銀河からの宇宙核γ線を明確に捉えた。巨大γ線衛星が10年か かっても得られなかった成果を1日で達成した[4]。同様に、本研究でも上述したように、全単射 による v 線撮像は、光学カメラと同様の、定量性のなる精密観測を核 v 線に初めて実現し、今ま で補助的な意味しかなかったイメージングが、今後の放射線計測の中心に置き換わることを強 く示唆する結果となった。20世紀後半から21世紀にかけて、光、電波、X線等の核y線以外の 全電磁波測定はイメージングの導入で飛躍的に発展し、今やイメージング計測が基本である。そ れを核γ線で実現するには、他波長と同じ光学原理の基本である全単射撮像の実現が、当然であ るが不可欠である。今回、それを宇宙観測とこの原子力計測で実現し、その有効性を示すことが できた。特に今後は放射能の完全可視化が実現し、安全で計画的な扱いが可能となる。当然 1F 廃炉事業は常に放射能との闘いであり、広い応用が期待できる。また、1F を超え原子力事業全 体の安全運用に今後大きく貢献できると思われる。以下、本研究の各実施項目に対してのまとめ を述べる。

4.1 調査用 ETCC の制作と放射能定量画像評価の実施

①調査用 ETCC の制作

令和元年度の最初の 1F 調査に向け、当時の京大の現有部品(TPC 読出し回路、GSO 結晶等)と、平成 30 年度に制作した部品を組み合わせ、軽量 ETCC(調査用 ETCC)、重量 35 kg、24 V電池で動作する可搬型調査用 ETCC を組上げ、令和元年に 1F 内全域線量計測に使用した。さらに、令和 2 年度には、軽量 ETCC と同等な性能にしてステレオ 3 次元計測に使用できるようにするため、シンチレータ読出回路を新型の MPPC 用に交換した。MPPC 採用により GSO でエネルギー分解能を 11%から 8%改善し、また計数率上限も 4 倍以上に改善され、100 μ Sv/hに近い線量での測定も可能とした。また、約 30 kg の重量に軽量化された。現在 TPC ガスは約 1 か月交換不要であり、すでに開発した小型ガス純化装置を付ければ、半年以上の長期使用も可能である。

②試験用 ETCC の放射能定量画像評価の実施

令和元年度、上記の調査用 ETCC を用いて 1F 内の測定を実施した。全原子炉建屋が見渡せ、装置が動作可能な線量である免震棟横から、原子炉建屋周辺を含む 1 km 四方を一度に測定した。特に、 137 Cs γ 線と連続スペクトル散乱 γ 線の画像分布を調査した。5 分程度で、3 つの原子炉建屋を含む 1 km 四方の領域で、100 か所以上の γ 線スペクトルを一度に計測できた。特に、敷地内上空からは明確なスカイシャイン γ 線のスペクトルを観測した。これは世界初のスカイシャインの画像測定である。また、炉建屋付近では Cs の 662 keV の明瞭なピークを、周辺ではそれが減少する様子がはっきり測定でき、広い範囲の Cs 分布を数分で測定できることを示した。さらに 1 号炉建屋が見渡せ、50 μ Sv/h と線量が高めな見晴台の 2 か所を選定した。免震棟横からのデータと合わせて 1 号炉付近の 3 次元線量計測を目指した。3 次元線

量分布は得られたが統計が少なく精度が十分ではなかった。

令和2年度には、高精度な3次元線量分布を目指した。性能を改善した調査用ETCCと軽量ETCCの2台を用い、複合研原子炉建屋で3次元線量分布作成の試験を実施し、炉心付近で2台相当のETCCでステレオ観測を行い、3次元計測に成功した。特に、原子炉から出ることが知られている 41 Ar(1290 keV)の炉壁からの微量な放出(法令基準の5分の1以下)及び空気中の拡散の詳細を動画として捉えることに成功した。また、3次元分布は明瞭にその空気中の拡散を示すことができた。また、炉壁から出る511 keV γ 線の分布も測定でき、 41 Ar と全く異なり、炉壁付近の集中がはっきり認識できた。 41 Ar は微量であるため今までその挙動が全く不明であったが、今回の測定で一気に視覚化できた。3次元イメージング測定の大きな可能性を示すことが世界で初めてできた。

この3次元線量分布結果に、平成30年度の1F計測の結果、令和元年度、令和2年度のETCC 改善の結果を取入れ、今後の解体工事等での汚染拡散のオンライン3次元モニタリング実施 の可能性が確認できた。

4.2 耐放射線性・利便性に優れた軽量 ETCC の開発

①軽量 ETCC の制作・調整

従来のETCCを構成するガスTPCのドリフト電極を、軽量かつ振動に強い構造に変更し、さらにガス容器を、アルミ構造で 2.5 気圧のガス圧に耐えられる最軽量な構造に改善した。また、シンチレータ部の光検出器を、従来のPMT から高効率で軽量な半導体のMPPCに置き換えた。さらに、信号処理回路は、MPPCのパルス形状を逐次近似で記録する方式に変更し、従来のパルスを積分する peak-hold 型に比べ、データ処理時間が 20 μ 秒から 1 μ 秒に短縮し、さらにパイルアップが起こった場合も、判定、分離を可能にした。この改善で、従来より 1 桁近い高線量場での使用が可能になった。これらの改善で、MPPC はエネルギー分解能を 11%から 8%と大きく改善した。また、トリガー方式の変更で、不感時間を 10 分の 1 に短縮した改善と上記のパルス処理時間の短縮により、1F 調査で用いた旧来型 ETCC より 10 倍以上の高計数率を実現した。1F の結果から推定して、数百 μ Sv/h まで無遮蔽での計測が可能と判断される。このような軽量 ETCC は、重量 30 kg 前後、電池とノート PC 1 台で駆動可能な完全可搬型になった。素材について CFRP などを考慮すれば、さらに数 kg の軽量化が可能である。

②軽量 ETCC の 1F 調査

令和2年度に改良された調査用ETCCと軽量ETCCの2台を用い、複合研原子炉建屋で3次元線量分布作成の試験を実施し、その結果はすでに3章で述べた。計数率は上記改良を反映した通りの結果になった。

4.3 ETCC の性能を生かした調査法の開発

本研究で実施した令和元年度の1F内広域線量計測、令和3年度の複合研の原子炉建屋内3次元線量計測実験の結果から、ETCCが広視野でkmスケールの遠方ならびに広域の微弱放射能を測定できる特徴と同時に、ミリSv/hに近い高線量場での簡易遮蔽での使用可能性から、同じシステムで炉解体工事による1F敷地全域の汚染物質拡散から炉建屋内の局所的な微量な汚染物質探査まで、オンライン画像モニタリングによる3次元診断と拡散予想が可能となった。

さらに、複合研の原子炉から透過する $0.1\sim5$ MeV の広帯域 γ 線を利用した、原子炉からの連続 γ 線による 3 次元線量計を実現し、透過性が圧倒的に高い 1.5 MeV 以上の γ 線による、炉壁内透視診断によるデブリ探査の可能性も出てきた。

4.4 γ線画像から大気中3次元核種分布及び放出量を逆解析する手法の開発

(連携先: JAEA)

①大気中核種濃度分布の作成

気象観測は 11 月から 12 月にかけて連続して実施し、この期間中にミストを放出する簡易的な拡散実験を 2 回実施した。風速 3 次元分布の測定データを用いて簡易大気拡散計算を実行し、ミストの拡散分布を再現できることを確認した。

②仮想 γ線画像データの作成

令和元年度までに開発した大気中核種濃度分布を γ 線画像データに変換する計算手法を、①により作成した実気象場での大気中核種濃度分布に適用して、 γ 線測定装置 ETCC で計測される放射線場を模擬した仮想 γ 線画像データを作成した。

逆解析を行う計算体系のサイズは南北 400 m、東西 400 m、高さ 60 m であり、これを南北方向・東西方向に 80 等分、鉛直方向に 12 等分し、計算格子 1 つあたりのサイズを $5\times5\times5$ m³ とした。仮想 γ 線画像のピクセル数は、既存の ETCC の視野 (100 度×100 度) と角度分解能 (5度) を考慮して $20\times20=400$ ピクセルとした。ETCC の設置位置は、この解析範囲の 4 隅 (北東、南東、南西、北西) とし、解析範囲全体が各 ETCC の視野内に入るようにした。

③逆解析手法の開発

令和元年度に開発した逆解析手法の解析プログラムについて、②により作成した仮想 γ 線画像データから大気中核種濃度分布データ等を再現する試験により、解析手法のパラメータの最適化を行った。

逆解析プログラムの改良により、不確実性の共分散行列の設定における比率 α と推定計算の繰り返し回数 I の 2 つを設定が必要なパラメータとして絞り込み、感度解析により最適化を行った。感度解析は、1 分後までの濃度分布に対する ETCC の γ 線画像からの逆解析において実施し、逆解析の最適パラメータを、繰り返し回数 I=100、比率 $\alpha=50$ に決定した。さらに、最適化したパラメータを用いて、放出開始 1 分後から 2 分後までの放出に対する逆解析を実施した。放出率の推定値は、放出率が減少する 0.1 倍及び 0.5 倍のケースでは、正解分布の値に対してそれぞれ 3 倍、1.2 倍と相違が大きくなったが、変化なし、2 倍、10 倍のケースでは、それぞれ約 4% 増、約 1%減、約 2%減でほぼ一致した。

4.5 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS、東電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の打合せや会議等を開催した。

以上、3カ年計画の3年目である令和2年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

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.
- [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.
- [3] Tomono, D., et al., First On-Site True Gamma-Ray Imaging-Spectroscopy of Contamination near Fukushima Plant, Scientific Reports, 7, 2017, 41972.
- [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., 2022, 930, 6, 15p.
- [5] Nakayama, H., Nagai, H., Development of Local-scale High-resolution Atmospheric Dispersion Model Using Large-eddy Simulation Part 1: Turbulent Flow and Plume Dispersion over a Flat Terrain, J. Nucl. Sci. Technol., 2009, 46, 12, pp.1170-1177.
- [6] Nakayama, H., Nagai, H., Development of Local-scale High-resolution Atmospheric Dispersion Model Using Large-eddy Simulation Part 2: Turbulent Flow and Plume Dispersion around a Cubical Building, J. Nucl. Sci. Technol., 2011, 48, 3, pp. 374-383.
- [7] Nakayama, H., Jurcakova, K., Nagai, H., Development of Local-scale High-resolution Atmospheric Dispersion Model Using Large-eddy Simulation Part 3: Turbulent Flow and Plume Dispersion in Building Arrays, J. Nucl. Sci. Technol., 2013, 50, 5, pp. 503-519.
- [8] Nakayama, H., Leitl, B., Harms, F., Nagai, H., Development of Local-scale High-Resolution Atmospheric Dispersion Model Using Large-eddy Simulation Part 4: Turbulent Flows and Plume Dispersion in an Actual Urban Area, J. Nucl. Sci. Technol., 2014, 51, 5, pp. 626-638.
- [9] Nakayama, H., Takemi, T., Nagai, H., Development of Local-scale High-resolution Atmospheric Dispersion Model Using Large-eddy Simulation Part 5: Detailed Simulation of Turbulent Flows and Plume Dispersion in an Actual Urban Area under Real Meteorological Conditions, J. Nucl. Sci. Technol., 2016, 53, 6, pp. 887-908.
- [10] Enting, I. G., Inverse Problems in Atmospheric Constituent Transport, Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 2002, 410p.
- [11] Gurney, K. R., Law, R. M., Denning, A. S., et al., TransCom 3 CO₂ Inversion Intercomparison: 1. Annual Mean Control Results and Sensitivity to Transport and Prior Flux Information, Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 55, 2, 2003, pp. 555-579.
- [12] Tarantola, A., Inverse Problem Theory, Elsevier Science, 1987, 644p.

This is a blank page.