JAEA-Review 2020-044 DOI:10.11484/jaea-review-2020-044

# 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-

Quantitative Analysis of Radioactivity Distribution by Imaging of High Radiation Field Environment using Gamma-ray Imaging Spectroscopy (Contract Research) -FY2019 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project-

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

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



**KRVIRN** 

January 2021

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2021

# 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-

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

#### 京都大学

#### (2020年10月28日受理)

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

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

本研究では、ガンマ線イメージング装置である 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、福島第一原子力発電所(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つの重点課題に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

i

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

#### (Contract Research)

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

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

Kyoto University

(Received October 28, 2020)

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

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

Among the adopted proposals in FY2018, this report summarizes the research results of the "Quantitative analysis of radioactivity distribution by imaging of high radiation field environment using gamma-ray imaging spectroscopy" conducted in FY2019.

In this study, a gamma-ray imaging detector, ETCC, will be improved to operate under high dose conditions, and a portable system will be constructed to be installed in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F). In addition, the development and combination of ETCC-based quantitative radioactivity distribution analysis methods will lead to innovative advances in the six key issues to be solved for the decommissioning of the 1F. This system will enable us to quantitatively visualize the three-dimensional radiation distribution and its origin.

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(継続分)	2
3.	令和元年度 採択課題	5
付给	録 成果報告書	9

### Contents

1.	Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project 1
2.	Accepted Proposal in FY2018 ~Continued~2
3.	Accepted Proposal in FY2019
Ap	pendix Result Report9

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 カホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等 を踏まえ、東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所廃炉(以下、「1F廃炉」とい う。)に係る研究開発を進めている。

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

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

- 1 -

# 2. 平成 30 年度 採択課題(継続分)

平成30年度採択課題(継続分)については以下のとおりである。

課題数:19課題

共通基盤型原子力研究プログラム 11 課題

(若手研究6課題、一般研究5課題)

課題解決型廃炉研究プログラム 6課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2課題

(日英共同研究)

#### 平成 30 年度 採択課題一覧

#### 共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

# 共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

# 課題解決型廃炉研究プログラム

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

# 国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

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

JAEA-Review 2020-044

### 3. 令和元年度 採択課題

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

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

· 課題数:19課題

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

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

### 令和元年度 採択課題一覧

#### 共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

# 共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

# 課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム(日英共同研究)

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

### 国際協力型廃炉研究プログラム(日露共同研究)

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

# 研究人材育成型廃炉研究プログラム

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

本報告書は、採択課題のうち、課題解決型廃炉研究プログラム「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」の令和元年度の研 究成果について記したものである。

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

# 付録

# 成果報告書

This is a blank page.

# 令和元年度

# 日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

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 311048)

# 成果報告書

# 令和2年3月

国立大学法人京都大学

JAEA-Review 2020-044

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」の令和元年度の研 究成果を取りまとめたものです。

# 目次

概略 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1. はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2. 業務計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.1 全体計画 ·······2.1-1
2.2 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2.2-1
2.2.1 調査用 ETCC の制作と放射能定量画像評価の実施 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2.2-1
2.2.2 耐放射線性・利便性に優れた軽量 ETCC の開発(再委託先:KSG) ・・・・・・・2.2-1
2. 2. 3 ETCC の性能を生かした調査法の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2. 2-2
2.2.4 ア線画像から大気中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)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.2.5 研究推進 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
3. 令和元年度の実施内容及び成果
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 ······3.1-1
3.1.2 調査用 ETCC の放射能定量画像評価の実施 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
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 要素開発 ······3. 2-1
3.2.2 軽量 ETCC の制作・調整 ······3.2-5
3.2.3 軽量 ETCC の 1F 調査 ······3.2-5
3.3 ETCC の性能を生かした調査法の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.3-1
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
3. 4. 2 仮想γ線画像データの作成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3.4.3 逆解析手法の開発
3.5 研究推進・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
4. 結言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

# 図一覧

図 1-1	電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC) ························1-2
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・2.1-1
図 2.1-2	KSG 社の BNCT 用試作 ETCC の性能と写真 ···································2. 1-1
図 2.1-3	実施体制図 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 2.1-4	本業務の全体計画及び年次計画 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 3.1.1-1	TPC で用いる電場整形用のドリフトケージの写真 ····································
図 3.1.1-2	TPC ガス容器の外観······3.1-1
図 3.1.1-3	PMT (左)とGSO ピクセルシンチレータアレイ (右)の写真 ······3.1-2
図 3.1.1-4	読み出し回路(左)とPSA(右)の写真3.1-2
図 3.1.1-5	GSO シンチレータ配置図······3.1-2
図 3.1.1-6	ETCC システム部の写真 ······3.1-3
図 3.1.1-7	ETCC を設置するための三脚・雲台····································
図 3.1.1-8	ETCC 駆動用の 24 V 出カポータブル充電池 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 3.1.1-9	ETCC の制御、及び解析用ノートパソコン····································
図 3.1.1-10	調査用 ETCC の組み立て後の写真 ····································
図 3.1.1-11	Cs-137 点線源(662 keV)の等立体角イメージ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 3.1.1-12	662 keV ガンマ線に対する検出効率の角度依存性評価・・・・・・・・・・3.1-7
図 3.1.1-13	点線源イメージのエネルギー依存性評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・.3.1-8
図 3.1.1-14	Cs-137 のエネルギースペクトル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.1-9
図 3.1.1-15	Eu-152 のエネルギースペクトル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.1-9
図 3.1.1-16	検出効率のエネルギー依存性
図 3.1.2-1	免震棟裏から測定した範囲と CCD カメラで撮影した原子炉建屋写真・・・3.1-11
図 3.1.2-2	10月測定の結果・・・・・・
図 3.1.2-3	Cs-137 透過γ線スペクトルシミュレーションのジオメトリ・・・・・・3.1-13
図 3.1.2-4	Cs137 透過γ線スペクトル(シミュレーション結果) · · · · · · · · · · · · 3.1-14
図 3.1.2-5	視野中心Aで測定したエネルギー毎の等立体角画像(左図)と
	γ線の広がり分布(右図) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 3.1.2-6	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3.1-16
図 3.1.2-7	10 月測定分・視野中心 A で 1 号炉と 2 号炉の中間地点の
	イメージカット結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 3.1.2-8	Cs-137 からのγ線強度が高い場所を強調した画像・・・・・・・・・・・・・・・・.3.1-18
図 3.1.2-9	Cs ガンマ線放射量推定の模式図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・.3.1-19
図 3.1.2-10	10 月、11 月測定・視野中心 A の測定における Cs-137、Cs-134 分布の
	再現性評価 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 3.2.1.1-1	従来型読み出し回路(左)、平成 30 年度開発した MPPC 用読み出し回路(右)
図 3.2.1.2-1	モデル学習の流れ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

図 3.2.1.2-2	機械学習による反跳電子の飛跡予測結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.2-3
図 3.2.1.3-1	従来型μ-PICと3軸μ-PICの比較 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 3.2.1.3-2	3 軸μ−PICの模式図 ······3.2−4
図 3. 2. 2-1	MPPC 用読み出し回路を ETCC に取り付けた写真 · · · · · · · · · · · · · · · · 3.2-5
図 3.3-1	従来型コンプトンカメラ画像と ETCC 画像の比較 · · · · · · · · · · · · · · · · 3. 3-2
図 3.3-2	ETCC 独自手法によるイメージ(左)と等立体角の scatter plot(右)
	との比較
図 3.4.1-1	1F 周辺の各風向における 10 分平均の風速ベクトルの水平分布 ······3.4-2
図 3.4.1-2	1F 周辺の各風向における 10 分平均の 0.01%相対濃度の等値面 ・・・・・・3.4-2
図 3.4.1-3	1F 周辺の各風向における 10 分平均の濃度の水平分布 · · · · · · · · · · · · 3.4-3
図 3.4.2-1	放射性核種濃度分布の逆解析計算体系
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3.4-5
図 3.4.2-3	放出点から西側に広がったプルームと、その周囲 17 箇所に設置した
	ETCC の位置及び向き・・・・・・3.4-6
図 3.4.2-4	仮想γ線画像の例 ······3.4-7
図 3.4.2-5	PHITS 画像の積分値に対する仮想画像の積分値の比・・・・・・・・・.3.4-8
図 3.4.2-6	ETCC 設置位置 2 における仮想画像と PHITS 画像の定量比較 · · · · · · · · 3.4-9
図 3.4.2-7	ETCC 設置位置 15 における仮想画像と PHITS 画像の定量比較 · · · · · · · 3. 4-10
図 3.4.3-1	100 回逐次計算し最初の1回だけL(x₀) <sup>-1</sup> を計算した逆解析試験の結果…3.4-15
図 3.4.3-2	L(x₀) <sup>-1</sup> の再計算頻度を上げた逆解析試験の結果 ···········3.4-16
図 3.4.3-3	仮想γ線画像のピクセル数を 25×25=625 に増やした逆解析試験の結果·3.4-17
図 3.4.3-4	1F 周辺の各風向における1分平均の0.01%相対濃度の等値面 ・・・・・・3.4-19
図 3.4.3-5	気象観測データを活用した簡易拡散モデルの性能検証に関する
	実験方法の概念
図 3.4.3-6	ミスト散布(左)とその3次元モデリング(右) ・・・・・・・・・・3.4-20

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アレイ)
JAEA	:	Japan Atomic Energy Agency(日本原子力研究開発機構)
CLADS	:	Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science
		(廃炉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(福島第一原子力発電所)
$\mu$ -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(ラージエディーシミュレーション)
PHITS	:	Particle and Heavy Ion Transport Code System
		(粒子及び重粒子輸送コードシステム)
LOHDIM	:	Local-scale High-resolution atmospheric dispersion model
		(局所域高分散拡散モデル)
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)
LTspice	:	Linear Technology Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
		(リニアテクノロジー社の回路シミュレーター)
GAGG	:	Gd₃Al₂Ga₃Oı₂(ガドリウム・アルミニウム・ガリウム・オキサイド)
GSO	:	Gd₂SiO₅(ガドリウム・シリコン・オキサイド)
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)

#### 概略

#### 研究の背景:

福島第一原子力発電所(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ガンマ(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y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y 線撮像装置である従来型コンプトンカメラでは、y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y線画像の作成しかできない。この手法では 広範囲のy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y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 y 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。 y 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 y 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 JAEA が世界に誇る放射 線輸送計算コード 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ッ線方向を検出し画像による線量定量解析可能なッ線カメラを 1F 内の多 くの箇所で迅速に計測可能な軽量かつ高線量場で計測可能に改善することであるが、今年度は容 器の軽量化を中心に開発を実施し、目標とする 25 kg を切る 23 kg 以下を実現できる可能性が高 くなった。最終年度に予定している容器に他の材質利用を考えると 20 kg 以下の可能性も出てき た。また製造コストも当初の半分程度の 2000 万円以下に削減でき、量産により従来型のッ線カ メラと同程度にすることが可能になってきた。また ETCC は他のッ線カメラと異なり価格の安価 な GSO シンチレータを用いるため、エネルギー分解能は 11%(662 keV、FWHM)と低かったが MPPC 読出し回路の導入で 8%を切るまでに改善、GSO の高い阻止能を考慮すると 4~5 倍高価な GAGG 結 晶とそん色ないスペクトロスコピーの能力が実現できた。ETCC の高い雑音除去及び画像能力と融 合させ世界初の完全な核ッ線イメージングスペクトロスコピーを実現し Ge をもはるかに上回る スペクトロスコピーを 1F で実現する。また JAEA の開発した逆解析手法と ETCC の定量的画像計 測を融合させることでオンライン的に 3 次元空間の放射線量分布が測定できることを今年度シミ ュレーションにより実証でき、世界で初めて廃炉さらには原子炉、再処理工場など放射物質拡散 事故が起こりうる環境での放射能物質拡散をオンラインで 3 次元に定量測定できる手法が確立す ることになる。

#### 次年度の見通し:

令和2年度では、まず試験用 ETCC に MPPC 高速読み出し回路を実装、基礎性能試験を行う。1F 内で測定したデータの電子飛跡解析を機械学習で行い、y線イメージの改良を行う。また、小型 ガス純化装置を組み込み、ガス交換無しで長期間運用を見込んだシステムの構築を行う。令和元 年度に組み上げた調査用 ETCC と令和2年度に予定している試験用 ETCC を組み合わせて三次元計 測試験を行う。可能であれば、角度分解能向上のため新たな電極を加えた3軸µ-PIC の導入を行 う。1F 内で少人数かつ安全・迅速に計測が実施できるように装置を設計する。令和元年度の計測 ではネットワークケーブルでデータを読み出していたため測定器付近に人が常駐する必要があり 不便であった。少なくともデータのモニタリングについてはワイヤレス化を実施し作業性を向上 させる。令和元年度の経験から、1F 内で同時に2か所から ETCC による測定は不可能なため、異 なる複数の方向から ETCC を用いてy線分布の三次元計測を行い、建屋周辺の核種の三次元分布 を測定する。必要な場合、1F 周辺の未除染の山野を対象に2台の ETCC を用いた同時計測による 広範囲な3次元放射線分布測定の可能性も検討していく。直接y線量の割合とその原因放射源を 同定する。また、原子炉建屋入口付近から内部の計測を実施したい。建屋内部での計測に備え、 必要な遮蔽材などの検討と準備を行う。さらに mSv/h を超える環境での無遮蔽計測を実現するた め雑音に感度の低い低分子ガス CF4 の導入試験を行う。 1. はじめに

本事業(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)は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の廃炉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ガン マ(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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 線撮像装置である従来型コンプトンカメラでは、 $\gamma$ 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 $\gamma$ 線画像の作成しかできない。 この手法では広範囲の $\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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  $\gamma$ 線を計測し、これらの組み合わせで $\gamma$ 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、 $\gamma$ 線到来方向を一意に決定でき、 $\gamma$ 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)。 $\gamma$ 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 mSv/h 環境でも 遮蔽無しで運用できる可能性がある。コンプトン散乱の全物理量計測から定量的に限界性能を算 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 1F 環境で試行し、厳 しい 1F 環境での精密な放射線画像解析技術を確立する。



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) 宇宙観測用に京大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 事しかできないが、ETCC であれば広範囲の情報を混合してしまうことはない。

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、JAEA が世界に誇る放射線輸送計算コード 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。

#### 参考文献

- 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.
- (3) Tomono, D., et al., "First On-Site True Gamma-Ray Imaging-Spectroscopy of Contamination near Fukushima Plant", Scientific Reports 7 (2017) 41972.

#### 2. 業務計画

#### 2.1 全体計画

本事業では、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事を目指す。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 y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 $\gamma$ 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。現状で中性子治療施設である Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)での $\gamma$ 線画像モニター用に試作した ETCC は、約 300  $\mu$  Sv/h 環境において遮蔽無しで 動作可能で、35×35×50 cm<sup>3</sup>のサイズ、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 $\gamma$ 線画像化性能を基本的には有している。図 2.1-2 に KSG 社の BNCT 用試作 ETCC を示す。

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領域同時スペクトトル計測	450
角度分解能	5~10度 (2次元 PSF)	35cm
解析後の計数力	雑音分離後に 1μSv/h環境で 5 cps	P. Service of C.
動作環境	$10^{-4}\mu{\rm Sv/h}\sim{\rm mSv/h}$	
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 cm <sup>3</sup> 、45 kg、電池駆動	LAN

図 2.1-2 KSG 社の BNCT 用試作 ETCC の性能と写真

**2.1-1** - 22 - 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。

この目標を達成するため、本事業は、京都大学、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5つ(実施項目1~5)に分けた。実施項目1・2・4 はさらに下位項目に細分 化している。実施体制を図2.1-3、全体計画と年次計画を図2.1-4 に示す。



図 2.1-3 実施体制図

- 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

年度	平成30年度	令和元年度	令和2年度
<ul> <li>(1) 調査用ETCCの制作と放射能定量画像</li> <li>評価の実施</li> <li>① 調査用ETCCの制作</li> </ul>	試験用ETCC改良 (電源,ガス容器) く	試験用ETCC改良 (回路)	小型ガス純化装置試験 <>
② 試験用ETCCの放射能定量画像 評価の実施	1F全域調査	建屋近傍調査	軽量ETCCを加えた3次元計測試験 > <>
(2) 耐放射線性・利便性にすぐれた軽量ETCCの 開発(再委託先: KSG)令和元年5月まで			
① 軽量ETCC要素開発	低雑音ガス試験	MPPC,高速回路開発 建屋内	り遮蔽制作
② 軽量ETCCの1F調査	設計,回路試作 <	装置制作・調整 全部での 建屋近傍調査 全部での 建屋近傍調査	↑ MPPC,高速回路実装 ← → → → → → → → → → → → → → → → → → → →
<ul> <li>③ 軽量ETCCの1F調査</li> <li>(3) ETCCの性能を生かした調査法の開発</li> </ul>		→ 二之	建産バリア両面 現地でETOC計測調
<ul> <li>(4) γ線画像から大気中3次元核種分布</li> <li>及び放出量を逆解析する手法の開発</li> <li>(連携先:原子力機構)</li> <li>① 大気中核種濃度分布の作成</li> </ul>	濃度分布の試作	様々な濃度分布の作成	気象観測とその拡散計算
② 仮想γ線画像データの作成	画像データの試作	、 様々な画像データの作成	●●像データ作成
③ 逆解析手法の開発	解析手法の検討 < >>	、 解析手法の試作と試験 ←	↑ 、
(5) 研究推進		<	><>

図 2.1-4 本業務の全体計画及び年次計画

#### 2.2 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法

令和元年度の概要は、以下のとおりである。

#### 2.2.1 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

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)を完成させ、京都大学での基本性能試験を行った。

平成 30 年度に制作した TPC 部に京大現有部品(TPC 読出し回路、GSO 結晶等)を組み合わせ、重量 35 kg、24 V 電池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た。

#### (2) 試験用 ETCC の放射能定量画像評価の実施

2.2.2(2)で製作した軽量 ETCC(試験用 ETCC)を 1F内に持ち込み、原子炉建屋周辺の調査、特に Cs  $\gamma$ 線、と連続スペクトル散乱  $\gamma$ 線の画像分布とスペクトル観測を実施、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、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ガンマ線計測測定の可 能な場所を選定した。

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、および1号炉建屋が見 渡せ、50 μSv/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、また、免震棟横および高台から1号炉を望む視野で画像試験 を実施した。

#### 2.2.2 耐放射線性・利便性に優れた軽量 ETCC の開発(再委託先: KSG)

#### (1) 軽量 ETCC 要素開発

平成 30 年度の設計段階で 30 kg を上回る 23 kg を達成したが、現場使用を考え 20 kg 以下を目標とした。そのためにはガス容器の素材、アルミをより軽量な CFRP などに変える必要があり、検討を行った。また平成 30 年度に開発した MPPC とその読出し回路のさらなる高計数化対応するために現在のパルス幅 1  $\mu$  秒を 500 n 秒以下に短縮できるか調査、Ne-CF4—Ar ガスの感度と雑音除去の最適化を実現できる混合比の調査、及び軽量 ETCC の保守の簡素化のための小型ガス循環装置の開発を行った。

#### (2) 軽量 ETCC の制作・調整

2.2.1(1)と同じ方法で2台目の軽量ETCC(試験用ETCC)を制作し、組立調整を行った。 制作した軽量20 cm径TPC、GSO-MPPC 読出しシステム、電源回路、HV 回路を組み合わせて 軽量ETCCの組上げを実施した。

#### (3) 軽量 ETCC の 1F 調査

試験用 ETCC 及び調査用 ETCC の2台を用い、3次元線量分布作成の試験を実施した。1F

**2.2-1** 

建屋などを2台のETCCでステレオ観測を行った。JAEA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。

400 m離れた免震棟から視野120°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JAEA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。

#### 2.2.3 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 が搬入可能な個所を調査し、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。 必要な場合、遮蔽材の検討も行った。

# 2.2.4 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

1F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。

大気拡散計算には、ラージエディーシミュレーション(LES)に基づき詳細計算が可能 な JAEA の高分解能大気拡散予測コード LOHDIM-LES を用い、平成 30 年度に調査した 1F 周 辺の詳細な地形データを入力し、様々な気象条件での拡散計算を実施し、大気中核種濃度 分布データを蓄積した。

様々な気象条件での拡散計算として10°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。

#### (2) 仮想γ線画像データの作成

平成 30 年度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)により作成した様々なパターン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。

仮想γ線画像作成手法は、ETCCで計測されるγ線画像の形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(1)で作成した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。

#### (3) 逆解析手法の開発

平成 30 年度に行った逆解析手法の概念設計に基づき解析プログラムを試作し、平成 30 年度に試作した仮想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設定及び改良を行った。

#### 2.2-2

#### - 26 -

逆解析手法の概念設計に基づき、解析の先験情報として用いる濃度相対分布を作成する ための簡易拡散モデルを導入した解析プログラムの試作を行うとともに、逆解析手法の計 算アルゴリズムを改良し計算速度を大幅に向上した。また、簡易拡散モデルの性能を評価 するための試験を次年度に予定している気象観測を活用して実施する方法を検討した。

#### 2.2.5 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに 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の打合せや会議等を開催した。

#### 3. 令和元年度の実施内容及び成果

- 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
  - ガス TPC 部の製作

TPC は ETCC においてコンプトン散乱体となっている。TPC の容器内部は、容器底板にμ -PIC を取り付け、GEM、リング状電極、円板状電極が取り付けられている。リング状電極 と円盤状電極には最大で -5 kV の電圧を印加する。圧力容器との距離が近い電極を樹脂リ ングで覆い放電対策を実施した(図 3.1.1-1)。所定の電圧を印加しても安定して動作す ることを確認した。



図 3.1.1-1 TPC で用いる電場整形用のドリフトケージの写真

図 3.1.1-2 は TPC ガス容器の外観写真である。屋外での使用を想定しているため太陽光 によるガス容器の温度変化を低減するための白色塗装を施している。



図 3.1.1-2 TPC ガス容器の外観

**3.1-1** - 28 - (2) シンチレーションカメラ部の製作

シンチレーションカメラの製作について説明する。調査用 ETCC は京都大学が所有する GSO ピクセルシンチレータアレイ (Pixel Scintillator Array: PSA) を活用して製作した。 図 3.1.1-3 に PMT と GSO の写真、図 3.1.1-4 に PSA と読み出し回路の写真を掲載する。シ ンチレーション光の検出器は浜松ホトニクス製の PMT (H12700) を使用した。シンチレー ションカメラは、GSO ピクセルシンチレータ (6 mm×6 mm×26 mm) を 8×8 個アレイ化し たもの (Pixel Scintillator Array: PSA) を 3×3 アレイ、合計 3.4 kg の GSO を並べた もので構成される (図 3.1.1-5)。GSO の減衰時間はおよそ 60 ns、比重は 6.7 g/cm<sup>3</sup>であ り、GSO の重量は合計 3.4 kg である。信号の読み出しは抵抗マトリックスによる 4 端読 出し重心法を用いた。



図 3.1.1-3 PMT(左)とGSOピクセルシンチレータアレイ(右)の写真



図 3.1.1-4 読み出し回路(左)と PSA(右)の写真



図 3.1.1-5 GSO シンチレータ配置図

**3.1-2** - 29 -

#### (3) システム部の製作

JAEA 及び東京電力との協議から、1F 敷地内に持ち込み可能な装置は、1 時間以内で装置 を組み上げ、測定を終了できるほどコンパクト・簡便で、電池駆動できるシステムが要求 される。平成 30 年度に制作した、耐圧性能を 2.5 気圧に改善した TPC 容器に、京都大学 の現有部品(TPC 読み出し回路、GSO 結晶など)を組み合わせて、重量 35 kg、24 V 電池 でおよそ 10 時間動作する可搬型調査用 ETCC を組み上げた。TPC ガス容器の下部に TPC 用 高圧電源、DP ボード、Trigger Control Unit、電源基板などを固定した(図 3.1.1-6)。 システム部も含めた全体重量は約 35 kg である。ETCC は azimuth 方向、zenith 方向とも に可動できる耐荷重 40 kg の三脚・雲台に固定した(図 3.1.1-7)。



図 3.1.1-6 ETCC システム部の写真 TCU、DP ボード、電源基板などが含まれる。



図 3.1.1-7 ETCC を設置するための三脚・雲台
電源は24 V出力のポータブルリチウム充電池を2台使用した(図3.1.1-8)。充電池1 台で5時間駆動可能であり、2台をカスケード接続することで合計10時間使用可能であ る。



図 3.1.1-8 ETCC 駆動用の 24 V 出力ポータブル充電池

図 3.1.1-9 は装置の制御、及び測定データ解析用ノートパソコンである。測定の制御、 システムの電圧・電流やスケーラーデータのモニタリング、装置の調整を行う。また、測 定した y 線データを解析して再構成イメージをその場で確認可能である。



図 3.1.1-9 ETCC の制御、及び解析用ノートパソコン

図 3.1.1-10 は調査用 ETCC を組み立てた完成写真である。ETCC の周辺環境を撮影できる ように、CCD カメラを搭載している。CCD で撮影した光学画像とγ線画像を重ね描きする ことで放射性物質の空間分布を可視化できる。



図 3.1.1-10 調査用 ETCC の組み立て後の写真

## (4) 調査用 ETCC の基本性能評価

# ① 角度依存性

Cs-137 (強度 2.7 MBq) を ETCC から距離約 1 m 程度離して測定した。Azimuth 方向に -60°から+60°まで 15°刻みで線源の配置を変更してイメージングを行った。図 3.1.1-11 は等立体角画像結果である。PSF は 50%が入る半径が 15°と予定通りの性能である。従来 型コンプトンカメラと異なり PSF の二倍の広がりで 80%以上の γ 線が集中する。これによ り Cs-137 の拡散が迅速に検知できる。



図 3.1.1-11 Cs-137 点線源(662 keV)の等立体角イメージ +60°から-60°まで15°刻みで位置を変更した。

図 3.1.1-12 は検出効率の角度依存性を評価した図である。視野中心付近の検出効率は約1.5×10<sup>-4</sup>、中心から30° ずれると8×10<sup>-5</sup>であり効率は約1/2、60°で約1/3に低下する。±60°の範囲で使用可能である。



図 3.1.1-12 662 keV ガンマ線に対する検出効率の角度依存性評価

## ② エネルギー依存性

Ba-133、Cs-137、Co-60、Eu-152 の点線源を用いて、356 keV、662 keV、1173 keV、1332.5 keV、1408 keV のγ線に対する位置分解能と検出効率のエネルギー依存性を調査した。線源は視野中心、ETCC との距離が1 m の地点に設置して測定した。

図 3.1.1-13 はエネルギー毎の等立体角画像である。図 3.1.1-14 は Cs-137 のエネルギースペクトルで、エネルギー分解能は約 13%である。図 3.1.1-15 は Eu-152 のエネルギー スペクトルである。



図 3.1.1-13 点線源イメージのエネルギー依存性評価

1 MeV 以上のγ線に対しても感度を有する。図 3.1.1-16 は検出効率のエネルギー依存性 を示したグラフである。



図 3.1.1-14 Cs-137 のエネルギースペクトル



図 3.1.1-15 Eu-152 のエネルギースペクトル



図 3.1.1-16 検出効率のエネルギー依存性

3.1.2 調査用 ETCC の放射能定量画像評価の実施

株式会社千代田テクノルに IF 調査実施の管理運営を委託することで IF 内調査の実施許 可を東京電力から得た。令和元年 10 月 30 日と 11 月 27 日の計 2 日間、調査用 ETCC を 1F 内に持ち込み、原子炉建屋周辺の調査、特に Cs  $\gamma$  線と連続スペクトル散乱  $\gamma$  線の画像分布 とスペクトル観測を実施、特に建屋周辺のスカイシャイン成分の分析を行った。全原子炉 建屋が見渡せ、10~20  $\mu$  Sv/h と装置が動作可能な線量である免震棟横、および 1 号炉建 屋が見渡せ、50  $\mu$  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 1、2、 3 号炉を見る視野で画像試験を実施した。また、見晴台から 1 号炉を望む視野で画像試験 を実施した。図 3.1.2-1 は免震棟から測定した範囲を示した図である。高計数率のため、 不感時間は 90%程度、測定時間は 30 秒程度だった。この不感時間は ETCC が大量のデータ、 特に電子飛跡の 3 次元情報が膨大なデータとなり、そのデータを CPU に送るための転送時 間によるものであり、シンチレータや TPC の不感時間ではない。シンチレータのパイルア ップは利得の高い 10 月計測で 5%程度、11 月は利得を半分にさげているためそれより十分 小さい。



図 3.1.2-1 免震棟裏から測定した範囲と CCD カメラで撮影した原子炉建屋写真

図 3.1.2-2 は視野中心 2 の場合の y 線画像である。 y 線画像はバックプロジェクション 法でプロットしており、400 m 先の二号炉後面に面した平面への射影図に対応する。500 keV 以下の散乱 y 線が優位な領域、Cs-137 (662 keV) のエネルギー領域、Cs-134 のエネ ルギー領域の3つにエネルギーを区切ってプロットした。エネルギーが高いほど散乱γ線 の影響が少なく炉建屋の方向に集中している。



(a) Etotal <500 keV (散乱ガンマ線源) (b) Cs-137 エネルギー領域



3.1-12 - 39 -

(c) Cs-134 エネルギー領域



図 3.1.2-2 10 月測定の結果

また、1F 敷地内ではアスファルト、鉄板等で Cs を囲っている。その効果によるスペクトルの変化をシミュレーションで調べた。図 3.1.2-3 はシミュレーションのジオメトリと コンクリートと鉄板の厚さの条件を示した図である。図 3.1.2-4 は透過γ線スペクトルの シミュレーション結果を表す。



図 3.1.2-3 Cs-137 透過 y 線スペクトルシミュレーションのジオメトリ





**3.1-14** - 41 - 前図は平面への投影図だったが、これ以後のセクションでは測定した画像の中の任意の 場所毎のγ線強度が求められる等立体角写像図で表示する。光学カメラの遠方の対象物の 画像、つまり平行光の画像は光線の方向が2次元画像の位置に1対1対応で写像されたも のである。そのため画像上で光線の方向が正しく保存されているため光学の基本物理量の 照度(erg/(cm<sup>2</sup>・s・sr))の分布が測定できる。ETCC もγ線毎に方向を測定しているた め同様にγ線の照度が測定器出来、その照度から画像内の対応する箇所の単位面積当たり の放射能が距離の情報が無くても算出可能となる。それを見やすくするために画像のどの 箇所でも立体角当たりの面積が等しくなる図法、等立体角投影図法で表示する。画像のど の場所でも単位立体角の面積が等しいので画像中のγ線面密度がそのまま照度に対応し、 対応する場所の放射能を正確に表している。そのため等角写像では図の縦軸、横軸は意味 が無く、画像中の対象点の中心からの角度と方向が実際の対応箇所を求める座標となる。 免震棟横からの測定では1炉建屋まで距離が400 mであり、30°が約230 m、50°が470 m に対応する。

図3.1.2-5は10月測定・視野中心Aで測定したエネルギーごとの等立体角画像(左図) と視野中心からのy線の広がり分布(右図)である。右図の赤色点線部分で囲った箇所を 見ると、500 keV以下のイベント(散乱y線が優位なエネルギー領域)では90°以上の後 方散乱が多い。これは偶発事象とパイルアップによると思われる。500 keV 以上ではその ような効果は少なく、偶発事象・パイルアップの効果は小さい。建屋方向へ集中した Cs-137 分布が測定されている。11 月の測定では PMT の利得を半分にすることでパイルアップ を 1/4 程度に低減した。



図 3.1.2-5 視野中心 A で測定したエネルギー毎の等立体角画像(左図)と γ線の広がり分布(右図)

文中に説明したように等立体角画像では縦軸、横軸は単なる目安であり、 対象点の中心からの方向と角度が座標となる。

> 3.1-15 - 42 -

また、視野中心A(400 m 離れた地点から1、2、3 号炉の全景が見渡せる地点)からの 画像に対して、視野内の3箇所(30°直径領域) (図 3.1.2-6: 白円 1、2、3)のスペク トルをプロットした。この領域のスペクトルを定量的に測定可能である。特に同図の1は 空からの散乱 y 線、つまりスカイシャイン y 線のスペクトルに対応する。当然 Cs のピー クは無く散乱ガンマ線のため 400 keV 以下に集中している。2、3 は炉建屋が領域にあるた め Cs137 の 662 keV y 線があるスペクトルが得られた。さらに、直径 7°視野(図 3.1.2-6: 黄色円 4、5、6、7、8) で各建屋のスペクトルを計測した。この等立体角図法では光 学カメラや望遠鏡の解像度にあたる Point Spread Function (PSF: この ETCC では 15 度) より大きい範囲ではその内側のγ線照度はその範囲内のもので外部からの侵入は非常に小 さく精度が高い。図 3.1.2-6 の白円がそれに対応する。しかしこの図のような高統計の場 合、PSF の半分程度の範囲(同図の黄色丸領域)でも近隣の領域からのスペクトル混入が 数割程度あるが、その領域のスペクトルの特徴を示すことはできると考えられる。実際、 4-6 の領域で Cs-137 の変化がきれいに見えている。統計が高い場合はこのような PSF の 半分程度まで解像度を上げることも可能となる。ただし統計が少ない場合は PSF 程度の大 きさ以上の領域のスペクトルでないと正確性が担保されない。今回は視野全体が 120°直 径であり、7°直径の範囲でスペクトルを取った場合、17×17分割でスペクトル観測が可 能である。等立体角分布画像であり一定角度内のv線数は発生点から空気吸収はあるがカ メラまで保存されている。そのため画像内の対応する地点ごとの正確なスペクトル及びッ 線強度の測定が可能となる。



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±400 mに対応する。

測定場所の計数率は非常に高いためシンチレータの PMT には多くの電流が流れ、電圧降 下を生じ利得校正を実施した敷地外よりも利得が下がるが現地での校正作業はできない。 そのためエネルギー表示は敷地外校正に基づくため Cs-137 の 662 keV ピークは約 60 keV ぐらい低い値の約 600 keV となっている。

> 3.1-16 - 43 -

空からは Cs-137 ピークは全く無く散乱 γ 線のみ測定され(図 3.1.2-6:スペクトル 1)、 各炉からは Cs-137 ピークが明確に測定された(図 3.1.2-6:スペクトル 2、3)。さらに 1 号路近傍を 7 度直径毎にスペクトルを画像から切り出した。炉から離れるに従い Cs-137 ピ ークが小さくなる(図 3.1.2-6:スペクトル4、5、6)。このように±400メートル(±60° に対応)の範囲を 200 分割(7°直径)に分けて、各場所のスペクトル測定を一度に行う ことが出来た。測定時間は数分である。ただこの装置は本事業での PSA 部の高速化以前の 装置であるため不感時間が前に述べたように大きい。この事業で制作した試験用 ETCC で は 1 分以内の測定で同様な解析が可能となる。スペクトル 4、5、6、7 には大きなスペク トル変化が観測されている。より精密なフィットによる解析を行えば 5°以下の精度で Cs-137 の分布が求められることがわかる。

また Cs-134 はすでに事故から 9 年近くが経過し、線量が 16 分の 1 以下に減衰している ため GSO の低いエネルギー分解能では測定不能と考えていた。しかしこの画像分析を使い Cs-137 に由来する 662 keV のピークが顕著な 1 号炉と 2 号炉の重なった領域のスペクトル のみを切り出すことが可能なため、調査用 ETCC のエネルギー分解能 (~13% @ 662 keV) にもかかわらず周囲からの雑音を排除したスペクトルが以下の図のように得られ、796 keV、1168 keV、1365 keV といった Cs-134 に由来するピークも微かであるが見られる (図 3.1.2-7 右図)。測定時間が正味 1 分程度なので 10 倍程度測定すれば Cs-134 のイメージ ングも可能である。





図 3.1.2-8 は図 3.1.2-6 から 662 keV 近傍のエネルギーを持つγ線(本測定では利得低 下のため 570~630 keV の範囲に対応する)を選択してプロットした当立体角イメージで ある。コントラストを調整し Cs-137 ピークの強い場所を強調した。Cs-137 が分布する箇 所が明確になる。1 号炉と2 号炉の間の上方に Cs-137 の強い箇所が集中している。点線領 域の放射線量は数~10 mSv/h と概算できる。東京電力の測定と概ね同じ傾向が見られた。 絶対線量を求めるには今後精密な解析が必要である。



図 3.1.2-8 Cs-137 からの y 線強度が高い場所を強調した画像

ETCC は PSF を正確に定義できるため、他の $\gamma$ 線カメラと異なり対象物との距離に無関係 に視野内の各場所での $\gamma$ 線照度(brightness、または強度)が求まる(図 3.1.2-9)。

原子炉周辺の Cs ガンマ線放射量の概算値は以下の通りである。Cs-137 のエネルギーを 662 keV として 1、2 号炉の間の放射線強度が最も強いところは 2.5 y count/sr/keV/sec で ある。ETCC の検出効率は 662 keV の y 線に対して約 5×10<sup>-4</sup> であり、断面積は約 300 cm<sup>2</sup> (半径 10 cm 円) である。原子炉建屋からの Cs-137 由来の 662 keV の y 線フラックスは 視野立体角を 2  $\pi$  (1-cos3°) ~0.01 sr とすると、2.5×10<sup>2</sup> (100 keV 幅 : energy 分解能) ×1/(5×10<sup>-4</sup>)×0.01/300~16 y / cm<sup>2</sup>/sec。空気吸収長を 300 m、免震棟と原子炉の距離 400 m とすると、16×4 $\pi$  (4×10<sup>4</sup> cm)<sup>2</sup> × exp(400/300) = 12200×10<sup>8</sup> = 1.22×10<sup>12</sup>~ 1.2x10<sup>12</sup> y / sec。対象物の大きさを 400 m×sin3° ~20 m とすると、表面付近の放射線量 は、4×10<sup>5</sup> y / cm<sup>2</sup>/sec ~4 mSv/h と推定される。この計算は装置の性能、距離などすべ て大まかな値を用いた計算であり桁程度の精度しかない。精密な距離等の測定を実施すれ ば精度を改善することが期待できる。



図 3.1.2-9 Cs ガンマ線放射量推定の模式図

図 3.1.2-10 は 10 月と 11 月に視野中心 A で行ったイメージングにおいて、Cs-134 分布 の再現性を評価した図である。750 keV~1 MeV と 1 MeV~1.5 MeV にはそれぞれ Cs-134 由 来の y 線が主な放射源と考えられる。その場合、Cs-137 662 keV と同様な分布が見られ る。10 月、11 月ともに Cs-137 分布と同様に 1 号炉と 2 号炉間の上方に集中が見られる。



図 3.1.2-10 10月、11月測定・視野中心Aの測定における Cs-137、Cs-134分布の再現性評価

## 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 要素開発

## 3.2.1.1 MPPC 回路開発

平成 30 年度の設計段階で 30 kg を上回る 23 kg を達成したが、現場使用を考え 20 kg 以 下を目標とした。そのためにはガス容器の素材、アルミをより軽量な CFRP などに変える 必要があり、製造会社と検討を行った。現在ガス容器は約 9 kg であるが、CFRP を一部用 いても 1 kg 程度の軽量化に留まるが費用が 2 倍以上かかるため今回は採用しなかった。 また平成 30 年度に開発した MPPC とその読出し回路のさらなる高計数化対応するために現 在のパルス幅 1 µ 秒を 500 n 秒以下に短縮できるか調査現在の回路は 700 ns 幅でありアン プの CR の変更のみでエネルギー分解能を劣化させず 500 ns 以下に変更が可能であると判 断した。Ne-CF4—Ar ガスの感度と雑音除去の最適化を実現できる混合比の調査は、以前当 研究室で行った同ガスでの試験結果を基に検討したが Ar ガスより高電圧が必要でµPIC が 不安定になるため現時点での利用は見送った。今開発中のガラスµPIC では対応可能と考 える。及び軽量 ETCC の保守の簡素化のための小型ガス循環装置の開発を行ったが、軽量 ETCC は 1 階のガス充填で 1 週間以上の動作が可能であり 1F の調査(4 日間程度)ではガ ス交換が不要なため導入は行わなかった。

図 3.2.1.1-1 は従来型読み出し回路(1 台分)と MPPC 用読み出し回路の写真である。従 来型読み出し回路は ETCC 1 台あたりで 2 台使用する必要があったが、MPPC 用の読み出し 回路は1 台でよく、システムが簡略化された。回路のサイズは、従来型は 21.1 cm×15.8 cm ×9 cm に対して MPPC 用は 16.1 cm×16.1 cm×4 cm と小型化を実現できた。



図 3.2.1.1-1 従来型読み出し回路(左)、 平成 30 年度に開発した MPPC 用読み出し回路(右) 3.2.1.2 機械学習によるコンプトン散乱点の位置と反跳方向の推定

ETCC は反跳電子の飛跡を検出器の底部に設置された µ-PIC で測定する。µ-PIC は anode strip (x 軸方向に並行) と cathode strip (y 軸方向に平行) が 800 µm ピッチで並んだ 構造を持つ。取得できる飛跡情報は XZ 方向と YZ 方向に射影した二次元飛跡画像であり、 これらの 2 種類の画像からコンプトン散乱点と反跳方向を決定する。しかし、これまでの 方法では、反跳電子のエネルギーが低い場合、飛跡が短くなり方向決定精度が低下すると いう問題があった。そこで、今年度、人工知能・データサイエンス・コンピュータビジョ ンの領域で研究開発を行っている株式会社ギャラクシーズに、機械学習を用いた二次元飛 跡画像からの 3 次元散乱点・散乱ベクトルの予測モデルの作成、及び、評価を依頼した。 図 3.2.1.2-1 はモデル学習の流れである。



図 3.2.1.2-1 モデル学習の流れ (株式会社ギャラクシーズの資料より)

エネルギー帯域毎に区切った電子飛跡のシミュレーションデータを畳み込みニューラル ネットワークに入力し、推定値とシミュレーションの真の値との誤差関数(損失関数)を 最小にするようなモデルを推定した。

図 3.2.1.2-2 に飛跡の予測結果を示す。散乱点座標については、すべてのエネルギー帯 域である程度は予測可能であるが、散乱ベクトルは電子のエネルギーが 20 keV を超える ものでないと予測不可である。E=40-50 keV 用のモデルでは、約 75%のイベントが散乱点 座標の誤差が 3 mm 以内、散乱ベクトルの角度誤差が 90°以内である。

## 40-50 keVの反跳電子における予測結果 (例)

予測結果まとめ



図 3.2.1.2-2 機械学習による反跳電子の飛跡予測結果 (株式会社ギャラクシーズ提出資料)

## 3.2.1.3 3 軸 *µ*-PIC の開発

従来型の $\mu$ -PICはAnode stripとCathode stripが直行する構造をしているため、飛跡が短い場合、飛跡形状が矩形になりコンプトン散乱点の位置と反跳方向の決定精度が低下する問題があった(図 3.2.1.3-1)。そこで、これまでのストリップに加えて三軸目のストリップを追加した $\mu$ -PICを開発し、飛跡の不確定性を低減し位置決定精度を向上させることで高角度分解能化を目指す。



図 3.2.1.3-2 は構造の模式図である。Cathode を 2 つに分割した電極構造をしており、 各ストリップのなす角度は 120°、ピクセルの配列は最密充填である。3 軸μ-PIC の試作 品 (DNP 提供)が届いた。現在、動作確認中である。京大・DNP 共同特許申請等があるた め写真、及び動作の詳細はここでは報告できないが、三軸ともに充分な信号は得られた。



図 3.2.1.3-2 3 軸 µ-PIC の模式図

**3.2-4** - 51 -

## 3.2.2 軽量 ETCC の制作・調整

調査用 ETCC と同様の方法で2台目の軽量 ETCC(試験用 ETCC)を制作し、組立調整を行った。制作した軽量 20 cm径 TPC、GSO-MPPC 読出しシステム、電源回路、HV 回路を組み合わせて軽量 ETCC の組上げを実施した。図 3.2.2-1 は MPPC 読み出し回路を ETCC に取り付けた状態の写真である。



図 3.2.2-1 MPPC 用読み出し回路を ETCC に取り付けた写真

## 3.2.3 軽量 ETCC の 1F 調査

試験用 ETCC 及び調査用 ETCC の2台を用い、3次元線量分布作成の試験を実施した。 まず、1F 建屋などを2台の ETCC でステレオ観測するため、1F 内の調査計画を千代田テク ノルと協議した結果、1F 内の作業規定の制限、千代田テクノルの人員、機材の制限によ り同時に1F の2か所からの測定は困難であることが判明した。そのため第1回目の10月 の測定では線量が20 μSv/hと比較的低い免震棟横での測定を実施し、11月には免震棟 横の再調査とステレオ観測が可能な免震棟から90° 西に移動し、線量が40 μSv/h以上 と強い高台で実施した。これにより90°方向の異なるデータを取得した。このデータを 用いて JAEA の開発した手法により空間線量の3次元再構成を試みたが、高台のほうが視 野両側に遮蔽構造物があり視野が大きく前方に限定されたこと。データ取得時間も短く、 十分な統計が得られなかった等の問題で定量的評価までは行えなかった。しかし今後3次 元計測を行うときの条件を得ることはできた。

10 月、11 月の2回の調査では、3.1.2 で述べたように1号炉建屋から約400 m離れた 免震棟から視野120°で1.2.3 号炉を含む領域の広視野測定を実施。この120°視野内の すべての方向のγ線スペクトルを記録した。例えば図3.1.2-6で示したようにこの広い視 野を視野系7°直径で15×15の225領域に分割し、それぞれの方向のγ線スペクトルを 同時に測定した(図3.1.2-6~10)。11月には免震棟横から西へ90°近く移動した高台

3.2-5

で1号炉を含む広視野測定を実施し、同じく225領域のスペクトルを取得した。3.1.2に述 べたように ETCC のデータは視点から見た時の視野コーン内の角度強度分布を表すものであ り、異なる視点からの2つのコーンの重なり合うセグメントの解析により3次元の強度分 布が可能となる。このように1号炉を2つの異なる方向からの大量のスペクトルデータを 用い JAEA の開発した手法を用いて、今回はオフライン解析で1号炉付近の3次元放射能分 布の導出が可能なことが分かった。ETCC の画像分割のサイズが3.4.2 で述べられているピ クセルの可能な最小単位となる。

## 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 が搬入可能な個所を調査し、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。10月、11月に 1F 内測定を実施するにあ たり東電の放射線管理担当者、千代田テクノル担当者と 1F 内のどの範囲内での測定が可能 かを検討した。1F内は軽装備で作業が実施できるグリーン地区以外での測定を実施すること は困難であることがわかった。炉建屋内は最も制限が厳しいレッド地区に属する。炉建屋周 辺も中程度の装備が必要なイエロー地区であるがこの領域でもかなり困難であり、今回のよ うな装置の調査目的ではグリーン地区での測定が限界であることがわかった。そのため令和 2 年度では建屋内および近隣での測定は実施せず、東電の許可が出た場合、グリーン地区と イエロー地区の境界において3次元解析が可能な2か所程度の異なる方向から建屋の測定を 行う。予想線量は 50~70 μSv/h で、高台(50 μSv/h)の経験から 1~2 mm の厚さの鉛で シンチレータ部を遮蔽し、シンチレータの利得を下げ 500 keV に閾値を上げることで測定可 能と考えている。今回の 10 月の計測で建屋から Cs-137, 662 keV のピークが明瞭に得られ た。近くから建屋を測定することで 662 keV のピークは建屋内から散乱されずに出てきた Cs137 ガンマ線であり、これをステレオ観測することで建屋内の Cs 分布の 3 次元分布測定の 可能性を調査する。1F内計測は1日約5時間が限界であり可搬型リチウム電池で ETCC を充 分駆動できた。そのため今後の試験でも100 V 電源は不要であると判断した。また汚染対策 として接地面の小さい三脚 ETCC を搭載、全体をビニールで覆うことで東電が了解できる汚 染対策が出来た。

また今回の 1F 調査で広視野の場合、視野角による感度の変化をどのように補正するが重 要であり、それに対して以下の新しい手法を開発した。ETCC を始め、どのγ線画像装置も視 野中心軸からの角度に依存した検出効率の劣化があり、中心が強く映る。従来型コンプトン カメラではコンプトン散乱による反跳電子の方向が決定できないため入射γ線は円錐形に再 構成される。このため、投影面に射影すると円環状に広がるためγ線毎に入射角度が決まら ず補正が困難である(図 3.3-1)。ピンホール、多項式ピンホール、装置全体の遮蔽、ピン ホールの構造で雑音の混入が変わり、雑音のカメラの2次元検出器への雑音混入を評価する のが困難である。一方、ETCC はγ線毎に入射角θが決まるので補正関数 f(θ)を測定してお けば補正は確実に行える。



図 3.3-1 従来型コンプトンカメラ画像と ETCC 画像の比較

ETCC では画像の各点でスペクトルの取得が可能であり、これを活用することで視野中心からの角度による検出効率の変化(f( $\theta$ ))を低減でき、ETCC の角度依存性の少ない Cs と散乱  $\gamma$ 線の比、つまり Cs ラインが強いところの画像が取得可能である。視野角度に依存しない 図法においても Cs ピークは1号炉と2号炉の間が高いことが確認できた(図 3.3-2)。

この手法は対象場所の立体角から来ているγ線はその方向に限定される必要があり、他の 方向とγ線が混じるコンプトンカメラや全方向の雑音が入ってしまうピンホールカメラでは 不可能なので ETCC 独自の手法となる。



図 3.3-2 ETCC 独自手法によるイメージ(左)と等立体角の scatter plot(右)との比較

## 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

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。大気拡散計算には、ラー ジェディーシミュレーション(LES)に基づき詳細計算が可能な JAEA の高分解能大気拡散 予測コード LOHDIM-LES<sup>(1)~(5)</sup>を用い、平成 30 年度に妥当性を確認した 1F 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。

## (1) 計算条件

計算領域を 5 km×5 km×1 km(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 5 m、鉛直方向は 2.5 m から 23 m の不等間隔格子とした。入力条件として、 高さ 10 m で風速 2 m/s、べき指数 1/7 の風速分布を与えた。計算時間は 40 分とし、最 初の 30 分を十分に発達した乱流状態を作り出すためのスピンアップ時間とした。計算 タイムステップは 0.05 秒とした。計算開始から 30 分後にトレーサガスを 1F の原子炉 建屋の屋根面より単位放出量で 10 分間連続的に放出し、この期間の大気中核種濃度分 布・平均風速・乱流統計量に関するデータを蓄積した。以下に、風速場と濃度場の計算 結果について述べる。

#### (2) 計算結果

図 3.4.1-1 に 1F 周辺の各風向における地表近傍での 10 分平均風速ベクトルの水平分 布を示す。ここで、 $\theta$ は平均風向角であり、 $\theta$ =0°、90°、180°、270°はそれぞれ北 風、東風、南風、西風を表す。 $\theta$ =0°では、海上では建物や地形の影響がないため全体 的に平均風速は一様に強く、陸上においては局所地形起伏の影響により強い風速域が一 部見られる。 $\theta$ =90°では、海上から一様に強い平均風速が吹き込み、陸上においても 強い風速域が広範囲に渡り見られる。 $\theta$ =180°では、海上では一様に平均風速は強いが、 陸上では全体的に小さいことが分かる。ただし、1F 建屋群上では平均風速は強い。 $\theta$ =270°では、陸上での建物や局所地形の影響により全体的に風は弱く、海上においても 平均風速は小さいことが分かる。

図 3.4.1-2 に 1F 周辺の各風向における地表近傍での 10 分平均の 0.01%相対濃度の等 値面を示す。特に、 θ =90°及び 180°では放出点周辺に形成される強い風速の影響に より、 θ =0°及び 270°の場合に比べ風下方向に長く伸びた構造を示すのが分かる。

図 3.4.1-3 に 1F 周辺の各風向における地表近傍での 10 分平均濃度の水平分布を示す。 いずれのケースでも 1F 建屋群や地形起伏の影響を受け、プルーム中心軸は風下方向か らずれた濃度分布を示しているのが分かる。さらに、θ=90°においては、1F 建屋群か ら生じる活発な剥離乱流の影響により、水平方向の濃度の拡がりは大きいのが分かる。

## JAEA-Review 2020-044



図 3.4.1-1 1F 周辺の各風向における 10 分平均の風速ベクトルの水平分布



図 3.4.1-2 1F 周辺の各風向における 10 分平均の 0.01%相対濃度の等値面



図 3.4.1-3 1F 周辺の各風向における 10 分平均の濃度の水平分布

#### 3.4.2 仮想γ線画像データの作成

平成 30 年度に引き続き、ETCC で得た γ 線画像データから逆解析手法によって大気中の 放射性核種濃度分布を推定するために必要な応答関数行列の整備・改良や、3.4.1 で作成 した様々なパターンの大気中核種濃度分布をもとにした 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 線画像データの作成を行った。

応答関数行列とは、放射性核種濃度分布の逆解析を行う計算体系内の、ある濃度計算格 子に単位放射能があったときに ETCC で検出・測定されるγ線画像を、あらゆる計算格子 位置及び ETCC 位置に対して用意し、行列としてまとめたものである。平成 30 年度は逆解 析手法の概念設計のために、計算コストを下げた必要最低限の応答関数行列を構築してい たが、本年度はより多様な測定条件に対応し逆解析手法を高度化するために、応答関数行 列にもいくつかの改良を行った。

#### (1) 応答関数行列の次元

平成 30 年度に構築した応答関数行列は、逆解析手法の概念設計に必要な最低限の次 元数(濃度計算格子の位置 3 次元、ETCC の水平位置 2 次元、ETCC で得られる y 線画像 上のピクセル位置 2 次元の計 7 次元)のものとなっており、ETCC の設置高さは地表面 に、その向き(方位角)は計算体系の原点方向に、仰角は 50°に、測定の対象となる核 種及び y 線エネルギーは<sup>137</sup>Cs/<sup>137</sup> Ba の y 線(0.662 MeV)の直達線成分にそれぞれ限定 されていた。開発 2 年目である本年度は、解析の自由度をより高めるために、ETCC の設 置高さと向き(方位角)をそれぞれ任意に設定できるようにし、応答関数行列の次元数 を計 9 次元に増やした。ただし ETCC の仰角は 50°に、測定対象核種及び y 線エネルギ ーは<sup>137</sup>Cs/<sup>137</sup> Ba の y 線(0.662 MeV)の直達線成分に限定されており、この点は平成 30 年度と変わらない。

## (2) 計算格子のサイズ及び仮想 γ線画像のピクセル数

3.4.2(1)で述べた9つの次元のうち、ETCCの位置3次元と方位角1次元の計4次元は 任意の実数値を設定できるようにし、残りの5次元(濃度計算格子の位置3次元及び ETCCで得られるy線画像上のピクセル位置2次元)は離散的な値をとるものとした。

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1 km、東西1 km、高さ500 m であり、平成30 年度はこれを南北方向・ 東西方向・鉛直方向にそれぞれ50 等分し、計算格子1 つあたりのサイズを20×20×10 m<sup>3</sup>としていた。計算格子のサイズは、大気中核種濃度分布から作成される仮想γ線画像 の精度や、逆解析によって濃度分布を推定する際の空間分解能に直結する。本年度はよ り高分解能な濃度分布推定を実現するため、計算体系の南北方向・東西方向をそれぞれ 200 等分、鉛直方向を100 等分し、計算格子1 つあたりのサイズを5×5×5 m<sup>3</sup>とした。 すなわち計算格子の3 次元位置は5 m 間隔の離散値で指定される。この計算格子サイズ は、3.4.1 で実施した大気拡散シミュレーションの計算格子サイズと同規模となるよう に選択した。

仮想γ線画像のピクセル数は、平成 30 年度は 10×10=100 ピクセルであった。これは

3.4-4

既存の ETCC の視野(100°×100°)と角度分解能(10°)を考慮して決定されたもの だったが、将来的に角度分解能が向上する可能性も考え、本年度は 100×100=10000 ピ クセル(角度分解能1°相当)まで対応できるよう改良を行った。図 3.4.2-2 は、3.4.1 で作成した大気中核種濃度分布の1つに対して、放射性核種の放出点から100 m 離れた 位置に設置した ETCC における仮想 $\gamma$ 線画像で、左が10×10=100 ピクセルの場合、右が 100×100=10000 ピクセルの場合である。ピクセル数に比例して画像としての情報量が増 えるため、このようにピクセル数が多く鮮明な $\gamma$ 線画像や応答関数行列を逆解析で用い ることで、推定の精度が向上すると期待される。



図 3.4.2-1 放射性核種濃度分布の逆解析計算体系



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 (左) 10×10=100 ピクセル(右) 100×100=10000 ピクセル

**3.4-5** 

## (3) 様々な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 で作成した様々な大気中核種濃度分布に対して、様々な位置に ETCC を設置した 場合の仮想 y 線画像の作成を行った。図 3.4.2-3 は、1F 原子炉建屋付近の放出点から発 生し東風によって 1F 敷地内を西側に広がったプルームと、その周囲 17 箇所に設置した ETCC の位置及び向きを示している。これらの ETCC 設置位置のうち代表的な 6 箇所にお ける仮想 y 線画像(10×10=100 ピクセル)を、図 3.4.2-4 に示す。仮想 y 線画像の左上 に示された番号は、図 3.4.2-3 における ETCC 設置位置の番号に対応している。応答関 数行列を整備することで、このように任意の大気中核種濃度分布に対して、その ETCC 設置位置における仮想 y 線画像を作成することができるようになった。



図 3.4.2-3 放出点から西側に広がったプルームと、 その周囲 17 箇所に設置した ETCC の位置及び向き



図 3.4.2-4 仮想 y 線画像の例

**3.4-7** - 61 -

#### (4) 仮想γ線画像の定量性の検証

平成 30 年度に作成した応答関数行列及び仮想γ線画像作成手法では、γ線画像の形 状は模擬することができていたが、各ピクセルにおける計数値の絶対値までは正確に模 擬できていなかった。そこで本年度はこの点を改良し、絶対値まで含めて定量的に仮想 γ線画像を模擬できる手法を開発した。

この手法で作成される仮想 γ 線画像(以下、「仮想画像」という)の定量性を検証す るため、JAEA が開発している放射線輸送計算コード PHITS<sup>(6)</sup>を用いた検証を行った。図 3.4.2-3 に示した 17 箇所に ETCC を模擬した仮想検出器を設置し、このプルームの大気 中核種濃度分布にしたがって<sup>137</sup>Cs を分布させ、発生する 0.662 MeV の γ 線の挙動をモン テカルロ計算することで仮想検出器において得られる γ 線画像(以下、「PHITS 画像」 という。)を再現した。こうして得られた PHITS 画像と仮想画像を比較することで、仮 想画像の定量性と画像作成手法の妥当性を検証した。

図 3.4.2-5 は、仮想画像と PHITS 画像それぞれについて画像全体の積分値を計算し、 その比をプロットしたものである。誤差棒は PHITS のモンテカルロ計算に伴う統計誤差 (1σ区間)である。17 箇所全ての画像の組について、積分値が±5%の範囲で一致して おり、統計誤差を考慮すると積分値の比は1と無矛盾といえる。



図 3.4.2-5 PHITS 画像の積分値に対する仮想画像の積分値の比

定量性をさらに詳細に検証するため、 $\gamma$ 線画像の1ピクセルごとの計数値の比較も行った。図 3.4.2-6 は、図 3.4.2-3 に示した 17 箇所のうち設置箇所 2 について詳細な比較を行った結果である。パネル(a)は仮想画像、パネル(b)は PHITS 画像、パネル(c)は横軸に仮想画像の各ピクセルの計数値を、縦軸に PHITS 画像の各ピクセルの計数値をとってプロットしたものである。図 3.4.2-5 と同様に PHITS のモンテカルロ計算に伴う統計誤差(1 $\sigma$ 区間)を誤差棒として反映している。仮想画像の計数値と PHITS 画像の計数値は良い一致を見せており、両者の比が 1 となる緑の直線の近傍に分布していることがわかる。

図 3.4.2-7 は、設置箇所 15 について図 3.4.2-6 と同様の比較を行った結果である。

**3.4-8** - 62 - (a)の仮想画像と(b)の PHITS 画像を見比べると、プルームの周縁部において画像の形状 や計数値に差異があるように見えるが、(c)のプロットを見ると、こうした周縁部のピ クセルにおける見た目の違いは PHITS のモンテカルロ計算における統計不足が原因であ ることがわかる。誤差範囲を考慮すれば、仮想画像の計数値と PHITS 画像の計数値はよ く一致しているといえる。

以上の検証により、応答関数行列から作成した仮想 γ 線画像は、形状だけでなく計数 値の絶対値まで含めて正確に模擬できているといえ、その定量性と画像作成手法の妥当 性が確認された。



図 3.4.2-6 ETCC 設置位置 2 における仮想画像と PHITS 画像の定量比較 (a) 仮想画像(b) PHITS 画像(c) ピクセルごとの計数値の比較



図 3.4.2-7 ETCC 設置位置 15 における仮想画像と PHITS 画像の定量比較 (a) 仮想画像(b) PHITS 画像(c) ピクセルごとの計数値の比較

#### 3.4.3 逆解析手法の開発

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 の作成を行った。また令和2年度に予定している、気象観測を活用して簡易拡散モデルの 性能を評価する試験の実施方法について、検討を行った。

### (1) 逆解析プログラムの改良

平成 30 年度に試作した逆解析プログラムについて、本年度は計算速度と濃度分布推 定精度の向上を目指した改良を行った。平成 30 年度に実施した逆解析試験を部分的に 流用し、同様の試験条件で逆解析を行うことで、プログラムの性能(計算速度・精度) の評価を行った。

### ① 逆解析試験の概要

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。なお大部分は平成 30 年度に実施した試験と同じ条件である。

まず建物のない平坦地形において、大気拡散計算によって大気中核種濃度分布の模擬データ(以下、「正解分布」という。)を作成した。この拡散計算では、放出核種を<sup>137</sup>Cs、放出地点を計算体系の原点の上空100 m、放出率を1.0 GBq/s、平均風速の 北向き成分及び東向き成分をいずれも3.0 m/s、鉛直上向き成分を0 m/s、乱流の水 平拡散幅及び鉛直拡散幅をいずれも3.0 mと設定し、放出開始から1分後の大気中核 種濃度分布を計算した。南西からの風に乗って、原点から北東方向へ伸びた濃度分布 が得られる。この正解分布に対し、北に500 m、南に100 m、西に100 m離れた地点 に原点を向いて設置された計3 台の ETCC において得られる仮想y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、大気拡散計算において乱流の水平拡 散幅及び鉛直拡散幅をいずれも上記の2倍である6.0 mと設定することで、より分布 範囲が広く、逆解析の先験情報として用いられる大気中核種濃度分布(以下、「先験 分布」という。)を準備した。

試作した逆解析プログラムに対し、入力として ETCC による仮想 γ 線画像 3 枚と先 験分布を与え、3.4.3(1)②に述べる計算手法によって逆解析を実行し、真の大気中核 種濃度分布を推定する(以下、この分布を「推定分布」という。)。推定に要する時 間と、正解分布と推定分布の一致度合いによって、解析プログラムの性能を評価する。

なお本年度に行った逆解析試験では、まだ開発の途上にあるため、大気中核種濃度 分布の計算格子サイズを平成30年度と同じ20×20×10 m<sup>3</sup>と設定した。

#### ② 逆解析の計算手法

平成 30 年度に、逆解析の計算手法としてベイズ推計手法<sup>(7)</sup>に基づく放出量推定手法<sup>(8)</sup>を選定し、逆解析プログラムを試作した。以下にその計算の流れを述べる。

ETCC で得られる $\gamma$ 線画像データyと大気中核種濃度分布xは、応答関数行列Mを用いてy=Mxで関係付けられる。yは $\gamma$ 線画像上のピクセルの計数値を1次元縦ベクトル

3.4-11

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。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。 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 $\gamma$ 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。

$$J = [(\mathbf{M}\mathbf{x} - \mathbf{y})^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{y})^{-1}(\mathbf{M}\mathbf{x} - \mathbf{y}) + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0})^{\mathrm{T}}\mathbf{C}(\mathbf{x}_{0})^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0})]/2$$
(1)

ここで  $x_0$  は、 $Mx_0$  の全要素の積分値と 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。 $C(x_0)$ 、C(y)は  $x_0$ 、y に関する不確実性の共分散行列で、 $x_0$ 、 y の要素の最大値  $x_{max}$ 、 $y_{max}$ を用いて以下のように定義される。

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

$$C(\mathbf{y})_{ij} = \sigma y_i^2 \delta_{ij} \tag{3}$$

$$\sigma x_i = \begin{cases} x_i, & (x_i > 10^{-3} x_{\max}) \\ 10^{-3} x_{\max}, & (0 < x_i \le 10^{-3} x_{\max}) \\ 10^{-5} x_{\max}, & (x_i = 0) \end{cases}$$
(4)

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

コスト関数 J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<sup>(9)</sup>。

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{L}(\mathbf{x}_0)^{-1} \mathbf{M}^{\mathrm{T}} \mathbf{C}(\mathbf{y})^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{M} \mathbf{x}_0)$$
(6)

$$\mathbf{L}(\mathbf{x}_0)^{-1} = [\mathbf{M}^{\mathrm{T}} \mathbf{C}(\mathbf{y})^{-1} \mathbf{M} + \mathbf{C}(\mathbf{x}_0)^{-1}]^{-1}$$
(7)

逆解析では、式(6)で求まった推定分布 x を右辺の x<sub>0</sub>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、 $L(x_0)^{-1}$ の 逆行列は非常に計算コストがかかるため、平成 30 年度の試作では、式(7)の x<sub>0</sub>だけ は推定分布 x で置き換えず初期値 x<sub>0</sub>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た。この点について本年度は、3.4.3(1)④で述べるように $L(x_0)^{-1}$ の 再計算頻度を変えるなど工夫を行った。

#### ③ 逆解析プログラムの計算速度の向上

平成 30 年度に試作した逆解析プログラムは、大気中核種濃度分布の計算格子サイ ズ20×20×10 m<sup>3</sup>、仮想γ線画像のピクセル数10×10=100、L(x<sub>0</sub>)<sup>-1</sup>は最初の1度だけ 計算し再計算は行わないという条件の場合、3.4.3(1)①で述べた逆解析試験の計算に 2 分程度を要していた。本年度はアルゴリズムの改良やプログラミング言語の選定を 行い、逆解析の計算速度向上を図った。その結果、平成 30 年度と同じ条件・同じ逆 解析試験に対して3 秒程度で計算を完了できるようになった。

#### ④ 逆解析プログラムの改良と性能評価

計算速度向上のための改良に加え、3.4.2で述べた応答関数行列の定量性に関する
改良などを取り入れ、大気中核種濃度分布の推定精度向上のための改良を行った。図 3.4.3-1 は、この新しい逆解析プログラムで 3.4.3(1)①の逆解析試験を行った結果で ある。パネル(a)-(c)は、それぞれ正解分布、先験分布、推定分布について放出点

(高さ100 m)の下方20 mから上方20 mまでの断面を示している。パネル(d)は横軸 に正解分布、縦軸に先験分布の核種濃度をとって各計算格子の値をプロットしたもの、 パネル(e)は横軸に正解分布、縦軸に推定分布の核種濃度をとって各計算格子の値を プロットしたものである。

3.4.3(1)①で述べたように、先験分布は大気拡散計算において乱流の拡散幅を正解 分布の2倍に設定して作成しているため、(a)に比べ(b)はより分布が広いことがわか る。この効果で、(d)において高濃度側では正解分布より先験分布の核種濃度が低く、 逆に低濃度側では高くなっていることも見て取れる。

(c)及び(e)の逆解析では、式(6)の x に対する逐次計算を 100 回行ったが、 $L(x_0)^{-1}$ は最初の 1 回だけ計算し、再計算はしなかった。分布の断面を比較すると、推定分布 の広がりは正解分布より広いままで、正解への収束が悪いことがわかる。また(e)を 見ると、100 kBq/m<sup>3</sup>より高濃度側では推定分布と正解分布の核種濃度が概ね一致し、 両者の比が 1 となる緑の直線の近傍に分布しているが、低濃度側ではほとんど一致し ていない。逆解析で算出された放出率は 1.003 GBq/s で、試験の設定条件である放出 率 1.0 GBq/s に対して誤差はわずか 0.3%であったが、最大濃度は 792 kBq/m<sup>3</sup>と算出さ れ、正解分布の 720 kBq/m<sup>3</sup>より 10%大きかった。

収束が悪い原因として、逐次計算の際に $L(x_0)^{-1}$ を再計算していないことが考えられ る。そこで $L(x_0)^{-1}$ の再計算頻度を上げた試験を行った。その結果を図 3.4.3-2 に示 す。パネル(a)及び(d)は図 3.4.3-1 の(a)及び(d)と同一である。パネル(b)は 100 回 逐次計算し毎回 $L(x_0)^{-1}$ を再計算した場合、パネル(c)は 10000 回逐次計算し 100 回ご とに $L(x_0)^{-1}$ を再計算した場合の断面であり、このときの各計算格子の核種濃度を正解 分布と比較したものがパネル(e)及び(f)である。計算時間は前者が 35 秒ほど、後者 が 50 秒ほどであった。 $L(x_0)^{-1}$ の再計算頻度や逐次計算の回数を増やしたが、図 3.4.3-1(c)の結果と比べ、推定精度はほとんど向上しなかった。

もう 1 つの原因として、逆解析プログラムに入力として与える ETCC の仮想  $\gamma$  線画 像がもつ情報量が、求めるべき大気中核種濃度分布の情報量に対して少なすぎるとい うことが考えられる。そこで使用する仮想  $\gamma$  線画像のピクセル数を 25×25=625 と、 従来の 6.25 倍に変更し、入力の情報量を増やした。合わせて、逆解析に使用する応 答関数行列もピクセル数 25×25=625 のものに変更した。

この条件で同様の逆解析試験を行った結果を図 3.4.3-3 に示す。パネル(a)及び(d) は 100 回逐次計算し最初の 1 回だけ  $L(x_0)^{-1}$ を計算した場合、パネル(b)及び(e)は 40 回逐次計算し毎回  $L(x_0)^{-1}$ を再計算した場合、パネル(c)及び(f)は10000 回逐次計算し 2000 回ごとに  $L(x_0)^{-1}$ を再計算した場合である。計算時間は順に 4 秒、60 秒、60 秒で あった。(d)-(f)を見ると、いずれも 4 kBq/m<sup>3</sup>より高濃度側で推定分布と正解分布の 核種濃度がよく一致し、緑の直線の近傍に分布している。入力の情報量が増えたこと で図 3.4.3-1 や図 3.4.3-2 の結果に比べ推定精度が向上していると考えられる。ただ し(a)の断面は図 3.4.3-1(a)及び図 3.4.3-2(a)に示した正解分布に比べ広がりが小さ いように見え、(b)や(c)に比べるとプルームの大きさをやや過小評価してしまってい る可能性がある。逆解析で算出された放出率はいずれも試験の設定条件である放出率 1.0 GBq/sに対して誤差 0.3%未満であった。また正解分布の最大濃度に対する誤差は、 (a)では 0.04%、(b)と(c)では 0.004%で、非常に精度よく算出することができた。

以上の逆解析試験によって、 $L(x_0)^{-1}$ の再計算頻度や逐次計算の回数よりも、入力と して与える ETCC の $\gamma$ 線画像データがもつ情報量の多さが、大気中核種濃度分布の推 定精度に大きな影響を及ぼすことがわかった。したがって ETCC の角度分解能を向上 させ $\gamma$ 線画像のピクセル数を増やしたり、ETCC の設置台数を増やして入力として与え る $\gamma$ 線画像の枚数を増やしたりすることが重要である。また、 $L(x_0)^{-1}$ の再計算頻度や 逐次計算の回数も推定精度に多少の影響を及ぼしている可能性があり、今後様々な条 件で試験することで最適な計算条件を探っていく必要がある。



図 3.4.3-1 100 回逐次計算し最初の1回だけ L(x<sub>0</sub>)<sup>-1</sup>を計算した逆解析試験の結果

- (a) 放出点の下方 20 m から上方 20 m までの正解分布の断面
- (b) 先験分布の断面 (c) 推定分布の断面
- (d) 正解分布と先験分布の計算格子ごとの核種濃度の比較
- (e) 正解分布と推定分布の計算格子ごとの核種濃度の比較

3.4-15 - 69 -



図 3.4.3-2 L(x<sub>0</sub>)<sup>-1</sup>の再計算頻度を上げた逆解析試験の結果 (a) (d) 図 3.4.3-1と同一 (b)-(c) 推定分布の断面 (e)-(f) 正解分布と推定分布の計算格子ごとの核種濃度の比較 (b) (e) 100 回逐次計算し毎回 L(x<sub>0</sub>)<sup>-1</sup>を再計算した場合 (c) (f) 10000 回逐次計算し100 回ごとに L(x<sub>0</sub>)<sup>-1</sup>を再計算した場合

**3.4-16** - 70 -



図 3.4.3-3 仮想γ線画像のピクセル数を 25×25=625 に増やした逆解析試験の結果

(a)-(c) 推定分布の断面(e)-(f)計算格子ごとの核種濃度の比較

- (a) (d) 100 回逐次計算し最初の1回だけL(x<sub>0</sub>)<sup>-1</sup>を計算した場合
- (b)(e) 40 回逐次計算し毎回 L(x<sub>0</sub>)<sup>-1</sup>を再計算した場合
- (c)(f) 10000回逐次計算し2000回ごとにL(x<sub>0</sub>)<sup>-1</sup>を再計算した場合

3.4-17

#### (2) 簡易拡散モデルの導入と性能評価

非定常乱流計算を行う LES 乱流モデルは、瞬間的に変化するタイムスケールで風速・ 濃度を数値的に解くため、非定常挙動を含め詳細なデータを得ることができる。しかし ながら、計算時間も非常にかかるため、短時間で計算結果を提供することはできない。 そのため、短時間での拡散シミュレーションが可能なラグランジュ粒子に基づく簡易拡 散モデルを導入した。本簡易拡散モデルは、Yamada and Bunker (1988)<sup>(10)</sup>のラグランジ ュ粒子大気拡散モデル RAPTAD に基づくものである。以下に基礎方程式を示す。

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + u_{pi}\Delta t \tag{8}$$

$$u_{pi} = U_i + u'_i \tag{9}$$

$$u_i'(t + \Delta t) = a u_i'(t) + b \sigma_{ui} \xi + \delta_{i3} (1 - a) t_{Lxi} \frac{\partial \sigma_{ui}^2}{\partial x_i}$$
(10)

$$a = \exp\left(-\frac{\Delta t}{t_{Lxi}}\right) \tag{11}$$

$$b = (1 - a^2)^{1/2} \tag{12}$$

ここで、 $x_i$ 、 $u_{pi}$ 、 $U_i$ 、 $u_i$ '、 $\sigma_{ui}$ 、 $\xi$ 、 $t_{Lxi}$ 、 $\delta_{i3}$ 、t、 $\Delta t$ は、i方向の粒子位置、粒子の 速度、平均風速、乱流風速、風速変動の標準偏差、平均 0・標準偏差 1 の正規分布をも つ乱数、ラグランジュ積分時間スケール、Dirac のデルタ関数、時間、計算タイムステ ップをそれぞれ表す。i=1は東西方向、i=2は南北方向、i=3は鉛直方向を意味する。有 限個の粒子から滑らかな濃度分布を推定するため、以下の式を用いる。

$$C(x, y, z) = \frac{Q\Delta t}{(2\pi)^{3/2}} \sum_{l=1}^{N} \frac{1}{\sigma_{xl}\sigma_{yl}\sigma_{zl}} \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(x_l - x)^2}{\sigma_{xl}^2}\right) \times \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(y_l - y)^2}{\sigma_{yl}^2}\right) \\ \times \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z_l - z)^2}{\sigma_{zl}^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z_l - z + 2z_g)^2}{\sigma_{zl}^2}\right) \right\}$$
(13)

ここで、C(x, y, z)、Q、I、N、 $\sigma_{xl}$ 、 $z_g$ は、位置(x, y, z)における濃度、放出率、I番目の粒子、粒子数、濃度の正規分布の標準偏差、標高をそれぞれ表す。

試計算として平均風向角θ=90°のときを対象とし、単位放出量で1分間連続放出、 粒子数は600個、計算タイムステップは0.1秒、*t<sub>Ls</sub>=t<sub>Ly</sub>=10000* s、*t<sub>Ls</sub>=20* sとした。な お、平均風速と風速変動の標準偏差については、LOHDIM-LES により得られたデータを用 いた。図 3.4.3-4 に、LOHDIM-LES 及び簡易拡散モデルにより得られた 1F 周辺の各風向 における1分平均の0.01%相対濃度の等値面をそれぞれ示す。LOHDIM-LES では、放出点 より離れた所では細くなっている。一方、簡易拡散モデルでは、風下に向かうにしたが い徐々に大きくなっている傾向が見られた。これは、粒子から濃度分布を推定する際の 正規分布型の仮定に基づく平滑化による結果である。放出点より離れた所ではやや差異 が見られたものの、放出点付近の3次元分布やプルームの長さなどは同様である。以上 の結果から、本簡易拡散モデルは、逆解析の先験情報として用いる濃度相対分布を作成 するという目的において十分な濃度分布の再現性を有すると判断した。



図 3.4.3-4 1F 周辺の各風向における 1 分平均の 0.01%相対濃度の等値面

## (3) 次年度の実験計画の検討

図 3.4.3-5 に、気象観測データを活用した簡易拡散モデルの性能検証に関する実験方 法の概念を示す。気象観測は JAEA 内で行う予定である。1F の廃炉工程で発生しうる放 射性物質の大気放出を想定し、JAEA 内にある建物を原子炉建屋と見なしてその周辺の気 流を集中観測する。対象建物よりやや離れた所にドップラーライダーを設置して、上空 の風速を 3 次元的に測定・取得する。また、建物屋根面では非定常性の強い複雑な乱流 が生じるため、超音波風速計を設置して高周波乱流変動風速を測定・取得する。これら の気象観測データを簡易拡散モデルの入力条件として与え、建物周辺の仮想拡散計算を 行う。



図 3.4.3-5 気象観測データを活用した簡易拡散モデルの性能検証に 関する実験方法の概念

**3.4-19** - 73 - 大気拡散の再現性については、気象観測と同時に簡易的な拡散実験を実施することで 得られる拡散状況のデータとの比較により検証する計画である。簡易的な拡散実験では、 放射性物質の放出をミスト散布により模擬し、ミストの拡散の様子を複数のビデオカメ ラで異なる角度から撮影し、得られた画像の解析により3次元拡散分布パターンを再構 成する手法を検討した。この手法の実現性を確認するための試験として、まず、室内空 間においてミスト散布を行い、その時の拡散状態を周辺3地点に設置したデジタルビデ オカメラ(ソニー株式会社製)で撮影して電子画像データを取得した。次に、これらの 画像データを基に、写真測量ツールPhotoModeler(エクセルソフト株式会社製)を用い た画像解析により、ミストの拡散状態の3次元モデルを生成した(図3.4.3-6参照)。

これにより、対象建物屋根面から散布されたミストの3次元拡散分布パターンを把握 するためのデータを取得できることを確認した。本検討に基づき、令和2年度において 気象観測に合わせてミスト散布による簡易的な拡散実験を実施する予定である。





図 3.4.3-6 ミスト散布(左)とその3次元モデリング(右)

# 参考文献

- Nakayama, H., Nagai, H. "Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part1: turbulent flow and plume dispersion over a flat terrain", J. Nucl. Sci. Technol. 2009; 46: 1170-1177.
- (2) Nakayama, H., Nagai, H. "Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part2: turbulent flow and plume dispersion around a cubical building", J. Nucl. Sci. Technol. 2011; 48: 374-383.

- (3) Nakayama, H., Jurcakova, K., Nagai, H. "Development of local-scale highresolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part3: turbulent flow and plume dispersion in building arrays", J. Nucl. Sci. Technol. 2013; 50: 503-519.
- (4) Nakayama, H., Leitl, B., Harms, F., Nagai, H. "Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation part4: turbulent flows and plume dispersion in an actual urban area", J. Nucl. Sci. Technol. 2014; 51: 626-638.
- (5) Nakayama, H., Takemi, T., Nagai, H. "Development of local-scale highresolution 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: 887-908.
- (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. 2018; 55: 684-690.
- (7) Enting, I. G. "Inverse problems in atmospheric constituent transport, Cambridge University Press, Cambridge", U. K. 2002; 392.
- (8) Gurney, K. R., Law, R. M., Denning, A. S., et al. "TransCom 3 CO<sub>2</sub> inversion intercomparison: 1. Annual mean control results and sensitivity to transport and prior flux information", Tellus 1<sup>st</sup> Edition, 2003; 55B: 555-579.
- (9) Tarantola, A. "Inverse problem theory", Elsevier, Amsterdam. 1987; 600.
- (10) Yamada, T., Bunker, S. "Development of a nested grid, second moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT Brush Creek data simulation", J. Appl. Meteorol. 1988; 27: 562-578.

## 3.5 研究推進

1F敷地内での測定を実施するにあたり、東京電力から、構内管理対象区域での作業を円 滑に行うため、すでに構内作業経験を有する会社と契約を結んだほうが良いと助言を受け た。それに基づき 1F 内での作業実績のある千代田テクノル社に調査の委託を依頼し、委 託契約を結び 1F 内調査の実施に至った。

また研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進め た。まず令和元年7月8日に JAEA の永井氏、古田氏、中山氏、佐藤氏が京大を訪問して 令和元年度の研究方針を検討した。さらに11月の1F内調査では古田氏と JAEA の協力研 究員である鳥居氏が現地調査に参加し、彼らの今までの1F内での測定経験に基づく提言 を頂いた。また令和2年1月23、24日、千代田テクノルおよび1Fにおいて東電に対して の10、11月の調査結果説明会を実施した。さらに上記鳥居氏が主宰する CLADS の「画期 的なアプローチによる放射線計測技術に係る分科会」が令和2年2月19日東京大学弥生 キャンパスで実施され、谷森が1F調査について講演を行った。京大からは谷森、高田、 園田、JAEA からは永井、古田が参加した。

## 4. 結言

## (1)調査用 ETCC の制作と放射能定量画像評価の実施

## 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、軽量 ETCC(調査用 ETCC)を完成させ、京都大学での基本性能試験を行った。

平成 30 年度に制作した TPC 部に京大現有部品(TPC 読出し回路、GSO 結晶等)を組み合わせ、重量 35 kg、24 V 電池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た。

# ② 試験用 ETCC の放射能定量画像評価の実施

(2)②で製作した軽量ETCC(試験用ETCC)を1F内に持ち込み、原子炉建屋周辺の調査、 特にCsy線、と連続スペクトル散乱y線の画像分布とスペクトル観測を実施、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、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ガンマ線計測測定の可 能な場所を選定した。

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、および1号炉建屋が見 渡せ、50 μSv/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、また、免震棟横および高台から1号炉を望む視野で画像試験 を実施した。

# (2) 耐放射線性・利便性に優れた軽量 ETCC の開発

#### ① 軽量 ETCC 要素開発

平成 30 年度の設計段階で 30 kg を上回る 23 kg を達成したが、現場使用を考え 20 kg 以下を目標とした。そのためにはガス容器の素材、アルミをより軽量な CFRP などに変える必要があり、検討を行った。また平成 30 年度開発した MPPC とその読出し回路のさらなる高計数化対応するために現在のパルス幅1 μ秒を 500 n 秒以下に短縮できるか調査、Ne-CF4—Ar ガスの感度と雑音除去の最適化を実現できる混合比の調査、及び軽量 ETCC の保守の簡素化のための小型ガス循環装置の開発を行った。

#### 2 軽量 ETCC の制作・調整

(1)①と同じ方法で2台目の軽量 ETCC(試験用 ETCC)を制作し、組立調整を行った。制作した軽量20 cm径 TPC、GSO-MPPC 読出しシステム、電源回路、HV 回路を組み合わせて軽量 ETCCの組上げを実施した。

#### ③ 軽量 ETCC の 1F 調査

試験用 ETCC 及び調査用 ETCC の 2 台を用い、3 次元線量分布作成の試験を実施した。1F 建屋などを 2 台の ETCC でステレオ観測を行った。JAEA 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。

400 m離れた免震棟から視野120°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JAEA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。

#### (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 が搬入可能な個所を調査し、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。 必要な場合、遮蔽材の検討も行った。

# (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)

#### 大気中核種濃度分布の作成

1F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。

大気拡散計算には、ラージエディーシミュレーション(LES)に基づき詳細計算が可能 な JAEA の高分解能大気拡散予測コード LOHDIM-LES を用い、平成 30 年度に調査した 1F 周 辺の詳細な地形データを入力し、様々な気象条件での拡散計算を実施し、大気中核種濃度 分布データを蓄積した。

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。

#### 仮想 γ線画像データの作成

平成 30 年度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により作成した様々なパターン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。

仮想γ線画像作成手法は、ETCCで計測されるγ線画像の形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①で作成した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。

## ③ 逆解析手法の開発

平成 30 年度に行った逆解析手法の概念設計に基づき解析プログラムを試作し、平成 30 年度に試作した仮想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設定及び改良を行った。

逆解析手法の概念設計に基づき、解析の先験情報として用いる濃度相対分布を作成するための簡易拡散モデルを導入した解析プログラムの試作を行うとともに、逆解析手法の計算 アルゴリズムを改良し計算速度を大幅に向上した。また、簡易拡散モデルの性能を評価す るための試験を次年度に予定している気象観測を活用して実施する方法を検討した。

## (5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに 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の打合せや会議等を開催した。

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

This is a blank page.

\_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
本平里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単	位の例				
AI 立 是 SI 組 立 単位	SI 組立単位				
名称	記号				
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>				
体 積 立方メートル	m <sup>3</sup>				
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s				
加 速 度メートル毎秒毎秒	$m/s^2$				
波 数 毎メートル	m <sup>-1</sup>				
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>				
比体積 立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg				
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>				
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m				
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>8</sup>				
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>				
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1				
(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度					

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体鱼	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 (b)	$m^2/m^2$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	-	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

酸素活性(1) ダール kat [s<sup>1</sup> mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2(CI-2002)を参照。

#### 表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[ 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>-3</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語							
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号		
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d		
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с		
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m		
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ		
$10^{12}$	テラ	Т	$10^{-9}$	ナノ	n		
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р		
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f		
$10^3$	+ 1	k	$10^{-18}$	アト	а		
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z		
$10^{1}$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	v		

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>		
トン	t	$1 t=10^3 kg$		

# 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの					
名称			記号	SI 単位で表される数値	
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J	
ダル	- F	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg	
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da	
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m	

#### 表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な朋友け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

#### 表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T		
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>		
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」				

は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 尾	<b>属さないその他の単位の例</b>
	-	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メー	ートル	采	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$