

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  
(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—

Measurement Methods for the Radioactive Source Distribution Inside Reactor  
Buildings using a One-dimensional Optical Fiber Radiation Sensor  
(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  
名古屋大学

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

December 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

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  
(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

名古屋大学

(2021年9月14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、令和元年度に採択された「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」の令和2年度の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、福島第一原子力発電所の廃炉を進めるにあたり把握する必要がある建屋内作業環境の放射線源の位置分布を測定するセンサとして、最も確実に汚染源の位置分布の把握を行うことができる密着型で、かつ「点」ではなく「線」に沿った放射線源分布が把握できる一次元光ファイバ放射線センサの開発を行う。従来方式の飛行時間型光ファイバ放射線センサの高線量率対応を図るため、様々な径と材質の光ファイバについて一次元センサとしての基礎評価を行い、小口径の石英光ファイバの一次元センサとしての有用性を見出した。また、光の波長成分に着目した全く新しい方式の波長分解型光ファイバ放射線センサの実証試験を通じて、Sv/hを超える線量率で放射線分布が測定可能であることを実証した。

---

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、名古屋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

Measurement Methods for the Radioactive Source Distribution Inside Reactor Buildings  
using a One-dimensional Optical Fiber Radiation Sensor

(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

Nagoya University

(Received September 14, 2021)

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, 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 FY2019, this report summarizes the research results of the “Measurement methods for the radioactive source distribution inside reactor buildings using a one-dimensional optical fiber radiation sensor” conducted in FY2020.

We are developing a one-dimensional optical fiber radiation sensor that can estimate the radioactive source distribution “along lines” instead of “at points”. To improve the conventional time-of-flight optical fiber radiation sensor for the application under high dose rate environment, basic evaluation tests were conducted using various optical fibers with different diameters and materials. We found the usefulness of quartz optical fiber as a one-dimensional radiation sensor with high position resolution. We also conducted the study of a newly-developed wavelength-resolving type optical fiber radiation sensor that used the wavelength dependency of light attenuation inside the fiber and demonstrated that the radiation distribution could be measured at a dose rate exceeding Sv/h.

Keywords: Optical Fiber, Position-sensitive Detector, Time-of-flight, Wavelength Spectrum, Unfolding

This work was performed by Nagoya 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 .....	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
4. Accepted Proposal in FY2020.....	8
Appendix Result Report .....	11

This is a blank page.

## 1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

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

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

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

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

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

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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



共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (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DESTAL燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立 GE ニュークリ ア・エナジー
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	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発と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. 令和2年度 採択課題

令和2年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。  
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和2年3月17日～令和2年5月14日（課題解決型）  
令和2年5月13日～令和2年7月15日（国際協力型）

課題数：10 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題（若手研究2 課題、一般研究6 課題）  
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英共同研究）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議での審議を経て、採択課題を決定した。

## 令和2年度 採択課題一覧

## 課題解決型廃炉研究プログラム

## 【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍	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
$\alpha$ / $\beta$ / $\gamma$ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現：ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邊 豊	東北大学
$\beta$ 、 $\gamma$ 、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、以下の課題の令和2年度の研究成果を取りまとめたものである。

共通基盤型原子力研究プログラム

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

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

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

(契約番号 R02I037)

成果報告書

令和 3 年 3 月

国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」による委託業務として、国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学が実施した「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」の令和2年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略	vi
1. はじめに	1
2. 業務計画	4
2.1 全体計画及び実施体制	4
2.1.1 全体計画	4
2.1.2 実施体制図	5
2.2 令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法	6
3. 令和2年度の実施内容及び成果	7
3.1 飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサ（TOFセンサ）の高線量率場への対応	7
3.1.1 飛行時間法の原理	7
3.1.2 光ファイバの選定	7
3.1.3 要素センサを用いた線源強度分布測定試験	8
3.1.4 検出効率	12
3.1.5 名古屋大学コバルト 60 $\gamma$ 線照射室における位置分布測定試験及び耐放射線性試験	13
3.2 広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの設計	16
3.3 広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの性能評価	17
3.4 波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの開発	18
3.4.1 波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの概要	18
3.4.2 プロトタイプ機の試作	19
3.4.3 応答関数の取得	20
3.4.4 線源強度分布推定法	21
3.4.5 波長チャンネルの選定	22
3.4.6 UV照射による波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの原理検証	23
3.4.7 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源を用いた波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの原理検証	25
3.4.8 高線量率環境での波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの原理検証	26
3.4.9 位置分布再構成簡易ソフトウェアの整備	28
3.5 研究推進	30
4. 結言	32
参考文献	33

執筆者リスト

事業代表者 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学  
分担者 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

教授 瓜谷 章  
准教授 渡辺 賢一  
寺阪 祐太

表一覧

表 1	本業務の全体計画.....	4
表 2	本研究で使用了たモジュール類.....	7

図一覧

図 1	(1) TOF センサの高線量率環境での偶発同時計数 (2) 光ファイバの小口径化による偶発同時計数の抑制 (3) 小口径ファイバのバンドル化・多チャンネル化による高ダイナミックレンジ TOF センサ	2
図 2	波長分解型光ファイバ放射線センサの概念図	3
図 3	本事業の実施体制図	5
図 4	TOF センサの測定ブロック図	7
図 5	本研究で使用した光ファイバ及び光センサ	8
図 6	PSF を用いた TOF センサによる線源強度分布測定試験結果	9
図 7	石英光ファイバを用いた TOF センサによる線源強度分布測定試験結果	10
図 8	発光減衰時定数が光子のファイバ端への到達時間に与える影響のイメージ	11
図 9	ファイバ径毎の検出効率	12
図 10	名古屋大学コバルト 60 $\gamma$ 線照射室における放射線分布測定試験セットアップ	13
図 11	名古屋大学コバルト 60 $\gamma$ 線照射室における放射線分布測定試験結果	14
図 12	石英光ファイバの耐放射線性試験セットアップ	15
図 13	石英光ファイバの積算線量と光透過率変化の関係	15
図 14	製作した多チャンネル読み出し回路	16
図 15	多チャンネル読み出し回路を用いた広ダイナミックレンジ TOF センサ	16
図 16	中口径 ( $\Phi 0.6$ mm、ファイバ長 10 m) の石英光ファイバと多チャンネル飛行時間分析回路を用いた線源測定試験結果	17
図 17	波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの概要	18
図 18	波長分解型一次元光ファイバ放射線センサのプロトタイプ機	19
図 19	発光位置毎に分光器で観測される波長スペクトル (応答関数) と波長毎の減衰長	20
図 20	応答関数と対象波長範囲	22
図 21	UV 光をファイバの 1 点に照射した場合の波長スペクトル測定値及びアンフォールディング結果	24
図 22	UV 光をファイバの多点に同時照射した際の波長スペクトルアンフォールディング結果	24
図 23	1 MBq $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ からのベータ線照射による波長スペクトル測定値とアンフォールディング結果	25
図 24	名古屋大学コバルト 60 $\gamma$ 線照射室での実証試験セットアップ	26
図 25	名古屋大学コバルト 60 $\gamma$ 線照射室での波長スペクトル測定値とアンフォールディング結果	27
図 26	位置分布再構成簡易アプリ	28
図 27	位置分布再構成簡易アプリの動作フロー	29



略語一覧

名古屋大学	: 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学
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)
1F	: 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所
CFD	: Constant Fraction Discriminator (コンスタントフラクションディスクリミネータ)
GRG	: Generalized Reduced Gradient (一般縮小勾配)
MCA	: Multi-Channel Analyzer (マルチチャンネル波高分析器)
PMT	: Photomultiplier tube (光電子増倍管)
PSF	: Plastic Scintillation Fiber (プラスチックシンチレーションファイバ)
TAC	: Time-to-Amplitude Converter (時間波高変換器)
TOF	: Time-of-Flight (飛行時間)
UV	: Ultraviolet (紫外線)
VBA	: Visual Basic for Applications (ビジュアルベーシック・フォー・アプリケーションズ)
浜松ホトニクス	: 浜松ホトニクス株式会社
豊伸電子	: 株式会社豊伸電子
Kuraray	: 株式会社クラレ
Thorlabs	: ソーラボジャパン株式会社
Ocean Optics	: Ocean Optics Inc. (現: Ocean Insight Inc.)
ORTEC	: ORTEC/AMETEK Inc.
CAEN	: CAEN SpA

## 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（以下、「1F」と略す。）の建屋内作業環境では、ガレキや滞留水等により物理的にアクセスしがたい場所、空間線量率が 100 mSv/h を超える高線量率箇所も多数あり、廃炉を進めるうえで手つかずの環境が少なからずある。高線量率エリアでは散乱線成分も多く、散乱線の影響で除染の効果が表れないことも多々ある。このため、廃炉を円滑に進めるためには、作業環境の線量率分布あるいは放射線源の位置分布を把握することが必要不可欠となっている。放射線源の位置把握には、コンプトンカメラ等のガンマカメラなども用いられているが、これらはあくまでガンマ線の飛来方向分布がわかるだけで奥行方向の情報は得られない。汚染源の位置分布の把握には、できるだけ線源の近くまで放射線センサを持って行き、スキャンして空間分布を測定することが確実である。これまで、建屋内の線量率分布測定はサーベイメータを用いて行われてきたが[1]、この手法で汚染源の位置分布を把握することは手間と時間が掛かり、更には局所的に存在するホットスポットを見逃す危険性もある。本提案課題では、密着型の二次元放射線センサとして光ファイバに着目し、それを建屋内放射線源空間分布計測に適用することを目指す。提案課題の特徴は、まずセンサを可能な限り線源に近づけることで、信頼度の高い放射線源の空間分布情報を取得する点にある。加えて、「点」での測定から「線」での測定に拡張することで効率的な測定を可能とする点である。一次元の「線」型検出器は、二次元の「面」型検出器と比較して次元自由度が高く、1F 原子炉建屋内のような狭隘な作業環境が多く存在する場において設置の自由度が高いという利点がある。

### 解決すべき課題：

光ファイバを用いた放射線源分布測定法としては、光ファイバの両端に到達する光の到達時間差から放射線入射位置を測定する「飛行時間法」が広く研究・応用されてきた[2][3]。しかし、飛行時間型光ファイバ放射線センサはこれまで比較的線量率の場での応用に留まっており、1F 原子炉建屋内のような mSv/h オーダーを超える環境では信号のパイルアップ及びセンサの偶発同時計数が問題となり、放射線源分布を正しく測定することができない。この問題を解決するためには、飛行時間型光ファイバ放射線センサについて小口径の光ファイバを用いることでセンサの偶発同時計数の影響を軽減し、同時にバンドル化・多チャンネル化することで感度を維持したシステムの構築が必要である。一方で、小口径の光ファイバを適用した場合、発光量の低下が予想されるため、位置分解能の劣化あるいは材質によってはセンサとして適用できない可能性がある。従って、様々な径・材質のセンサについて、飛行時間型光ファイバ放射線センサとしての基礎特性を評価する必要がある。

飛行時間法のもう一つの課題として、原理上ファイバ両端での受光が必要であり、この点が測定自由度を落としている。従って、飛行時間法に代わる新しい手法として、片側読み出しかつ Sv/h オーダーを超える環境へ適用可能な放射線源分布測定手法の開発が必要である。

### 本研究の目的：

本研究では 1F の廃炉を進めるにあたり把握する必要がある建屋内作業環境の放射線源の位置分布を測定するセンサとして、最も確実に汚染源の位置分布の把握を行うことができる密着型で、かつ「点」ではなく「線」に沿った放射線源分布が把握できる次元光ファイバ放射線センサの開発を進める。当該プロジェクトでは、1F 建屋内作業環境の放射線源分布の把握に利用可能な放射線センサの実用化を目指し、これらのセンサのプロトタイプ機の製作及び実環境での利用を想定した性能評価試験を実施する。

本研究の実施内容：

本研究では 1F 原子炉建屋内の高線量率環境へ適用可能な一次元光ファイバ放射線センサの開発を行う。従来型の飛行時間型光ファイバ放射線センサについてファイバの材質の検討及びファイバ径の小口径化を行うことで高線量率への対応を目指すとともに、ファイバのバンドル化・多チャンネル化を行うことで低線量率に対しても感度を維持できるシステムの構築を行う。加えて、1F 原子炉建屋内に局所的に存在する Sv/h オーダーを超える環境へ適用可能であり、更には飛行時間法のファイバ両端での受光の必要性という課題を解決する全く新しい方式のセンサとして、光ファイバの片側から光の波長スペクトルを読み出し、ファイバ内での光の減衰量に波長依存性があることを利用して放射線入射位置を逆推定する波長分解型光ファイバ放射線センサを開発する。

令和 2 年度の成果：

飛行時間型光ファイバ放射線センサについて、異なる素材・異なる径の光ファイバを複数用意し、検出効率と位置分解能を評価した。令和元年度までの成果と同様に、これまで広く応用されてきたプラスチックシンチレーションファイバ (PSF) と比較して、チェレンコフ光の検出に基づく石英光ファイバの位置分解能が格段に優れることを改めて確認した。令和 2 年度は異なる発光波長及び口径の PSF の結果と照らし合わせることで、発光の減衰時定数が位置分解能に大きく寄与していることを明らかにした。更に、小口径の PSF では位置分解能が劣化したのに対し、小口径の石英光ファイバでは位置分解能を維持することも明らかとなった。以上の結果から最終形として小口径石英光ファイバを選定することを決定し、ガンマ線照射施設で耐放射線性試験と位置分布測定試験を行った。その結果、積算 1 kGy までの耐放射線性と 200 mSv/h 超の線量率での優れた位置分解能 (約 20 cm) を確認した。

広ダイナミックレンジ飛行時間型光ファイバ放射線センサについて、大口径・中口径・小口径の光ファイバを各々平行に読み出せる多チャンネル飛行時間分析回路を作製し、線源測定試験を実施した。この結果を基に、最終的なシステム設計方針として、大・中・小口径の石英ファイバに加え、ユーザビリティ及び現場応用を見据え防水性も備えた広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサとすることを固めた。

波長分解型光ファイバ放射線センサについて、PSF、光伝送用ファイバ及びポータブル分光器から構成される原理実証用プロトタイプ機を構築し、基本的な位置分布測定性能を確認した。加えて、ガンマ線照射施設において放射線位置分布測定試験を実施し、3 Sv/h の高線量率で放射線分布測定が可能であることを実証した。更に、VBA を用いて簡易な位置分布導出ソフトウェアを作成した。

令和 3 年度の見通し：

(飛行時間型光ファイバ放射線センサ)

令和 2 年度に実施した部分要素センサを用いた基本性能評価試験の結果を基に、総合性能評価用の試験機を設計・製作する。この際、実際の作業環境での利用を念頭に、ユーザビリティなどにも配慮を払う。製作した試験機を用い、現場を想定した性能評価試験を実施し、目標として掲げている 1 桁以上のダイナミックレンジ拡大が達成できていることを確認する。

(波長分解型光ファイバ放射線センサ)

原理検証試験の結果を踏まえ、実際の環境でも利用可能なプロトタイプ機の製作を行う。プロトタイプ機を用いて、最大許容線量率、耐放射線性、位置分解能等の基本的な性能評価試験を行う。特に位置分解能に関しては、相対位置分解能として 5 %を達成できていることを確認する。

## 1. はじめに

1F 建屋内作業環境では、ガレキや滞留水等により物理的にアクセスしがたい場所、空間線量率が 100 mSv/h を超える高い場所も多数あり、廃炉を進めるうえで手つかずの環境が少なからずある。高線量率エリアでは散乱線成分も多く、散乱線の影響で除染の効果が表れないことも多々ある。このため、廃炉を円滑に進めるためには、作業環境の線量率分布あるいは放射線源の位置分布を把握することが必要不可欠となっている。

放射線の空間分布計測では、従来のサーベイメータのような「点」の計測から「線」（一次元）、「面」（二次元）の計測への移行により、計測の効率化、加えて抜けの無い計測を行うことを目指し、数々のプロジェクトが進行している。特に「面」での計測が可能なものとして、数多のガンマカメラの開発が進められている。しかし、ガンマカメラはあくまでガンマ線の飛来方向を観測しているに過ぎず、複雑な形状の場所では正確な線源位置分布情報を得られないこともある。さらに、ガンマカメラが測定できるのはガンマ線放出核種のみであり、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  等の純ベータ核種を検知できない。そこで、本研究では、放射線センサを極力線源に近づけて測定を行う密着型放射線センサとして、光ファイバに沿って一次的に「線」の線源分布を測定可能な一次元光ファイバ放射線センサを採用する。これまでの 1F における放射線計測でも、「点」の計測を行うサーベイメータを用いた線量率分布測定が行われてきているが[1]、「点」を「線」、「面」にすることで、測定作業の効率化が図られると共に、点と点の間の情報を見逃すリスクを減らせられるというメリットがある。「線」より「面」状のセンサを用いるほうが測定の効率は上がる一方で、1F 原子炉建屋内のような構造物の多く複雑な形状の場所では移動・設置の自由度も求められるため、センサ形状に非常に柔軟性のある光ファイバ放射線センサによる「線」の測定が有利に働く可能性がある。

一次元光ファイバ放射線センサとしては、光ファイバの両端に到達する光の到達時間差から放射線入射位置を測定する飛行時間法（Time-of-Flight 法、TOF 法）を適用した飛行時間型光ファイバ放射線センサ（以下、「TOF センサ」と略す。）が 1F 事故前より広く研究され[2]、1F 事故後は汚染水タンクからの汚染水漏洩箇所検知等の現場で応用されてきた[3]。しかし、TOF センサはこれまで比較的 low 線量率の場での応用に留まっており、1F 原子炉建屋内のような mSv/h オーダーを超える環境では信号のパイルアップ及びセンサの偶発同時計数が問題となり、放射線源分布を正しく測定することができない（図 1(1)）。この問題を解決する最も単純な方法は、使用する光ファイバの小口径化を図ることである（図 1(2)）。小口径の光ファイバを用いることにより偶発同時計数を抑えることができ、測定可能な線量率上限を上げることができると考えられる。しかし、光ファイバの小口径化は発光量の低下が予想されるため、位置分解能が劣化する恐れがあり、光ファイバの材質次第では TOF センサとして適用できない可能性がある。従って、様々な径・材質の光ファイバについてセンサとしての基本性能を評価し、1F 高線量率環境での使用に最も適したファイバを選定する必要がある。さらに、光ファイバの小口径化は感度を抑制できる一方で、逆に低線量率の測定が行えなくなるという問題が新たに浮上する。そこで、複数の光ファイバをバンドル化し、それぞれ独立に信号処理を行うことで、感度を維持したまま高線量率での測定が行えることが期待される（図 1(3)）。

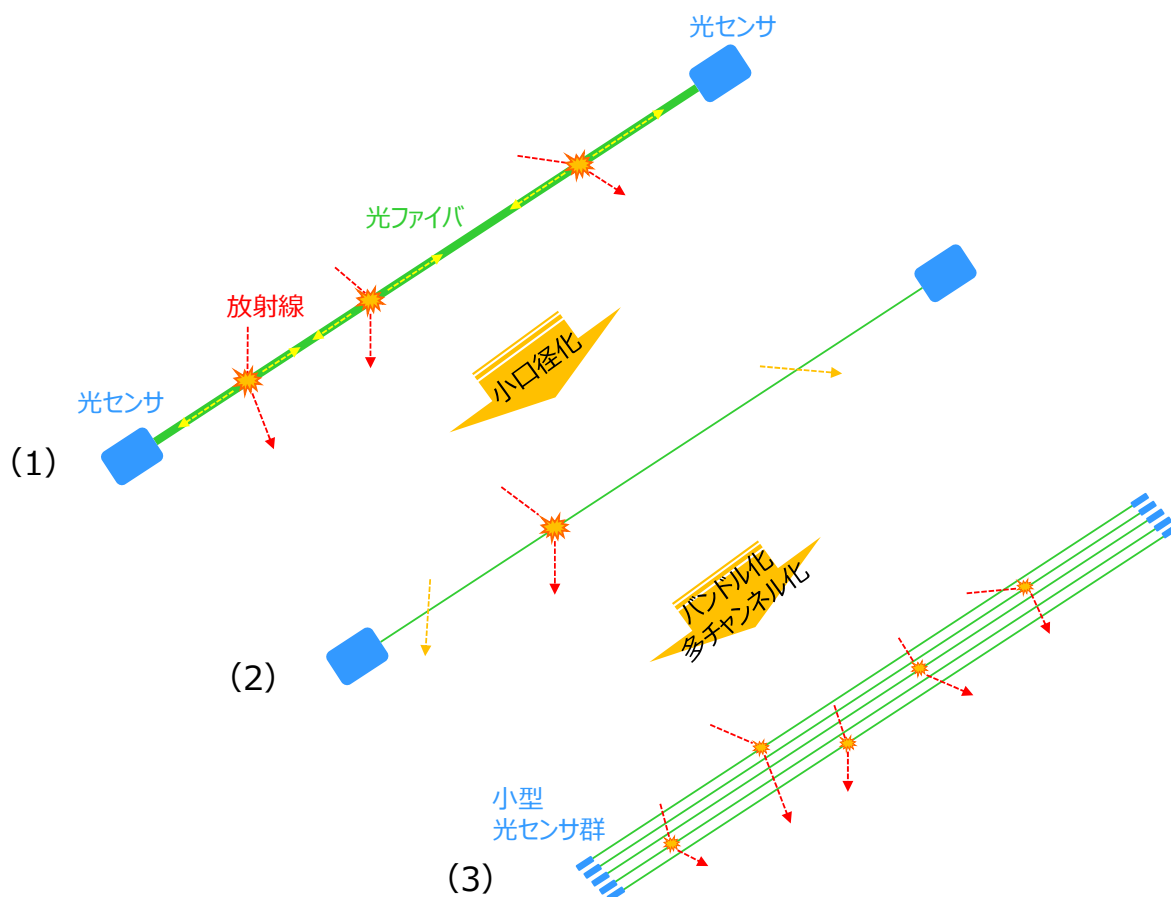


図1 (1) TOF センサの高線量率環境での偶発同時計数  
 (2) 光ファイバの小口径化による偶発同時計数の抑制  
 (3) 小口径ファイバのバンドル化・多チャンネル化による高ダイナミックレンジ TOF センサ

1F 建屋内には局所的とはいえ、 $Sv/h$  を超える環境が存在する。そのような環境への対応のためには、TOF センサが対応困難な高線量率環境に適用可能であるだけでなく、飛行時間法の弱点であるファイバ両端からの信号読み出しを改め、片側からの信号読み出しのみで一次的に放射線源分布を測定可能であることが、狭隘部へのアクセス性の観点からも重要である。そこで、本研究では飛行時間法に替わる全く新しい方式として、波長分解型光ファイバ放射線センサを考案した。この方式の光ファイバセンサは光ファイバの片側に分光器を設置し、放射線と光ファイバの相互作用由来の光の波長スペクトルを測定する。ここで、光のファイバ内での減衰量には波長依存性があるため、放射線入射位置によって光ファイバ端で観測される波長スペクトルの形状は異なる。そのため、予め放射線入射位置毎に光ファイバ端で観測される波長スペクトルを応答関数として整備し、任意の線源分布を測定した際にファイバ端で得られる波長スペクトルをアンフォールディング処理することで元の線源分布を逆推定できる可能性がある(図2)。本方式はパルス計測型の飛行時間法とは異なり光の積分量を測定するものであり、原理的に信号のパイルアップやセンサの偶発同時計数の影響がなく、測定可能な線量率上限は光ファイバの耐放射線性のみで決定される。本方式は本研究により世界で初めて考案・実証するものであり、1F 廃炉に向けた基盤技術の1つとなり得る。

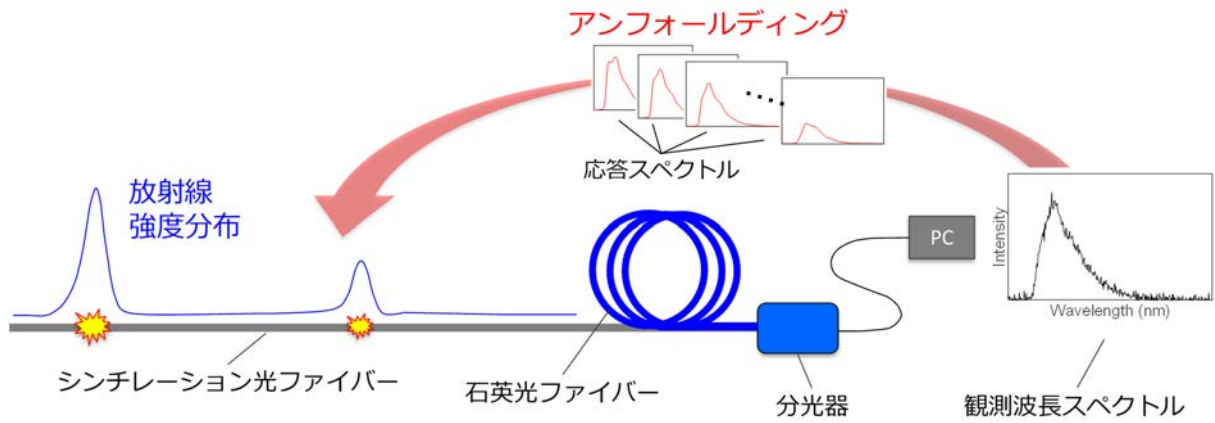


図2 波長分解型光ファイバ放射線センサの概念図

2. 業務計画

2.1 全体計画及び実施体制

2.1.1 全体計画

本業務の全体計画図を表1に示す。

表1 本業務の全体計画

実施項目	令和元年度	令和2年度	令和3年度
1. 飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの高線量率場への対応 (JAEA)	ファイバ径等の最適化	最適センサ構成の決定	
2. 広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの設計 (名古屋大学)	プロトタイプ機	設計・製作	最終的なシステム
3. 広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの性能評価 (JAEA)		部分要素センサの製作・評価	総合性能評価用試験機の製作・性能評価試験
4. 波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの開発 (名古屋大学)	原理実証用プロトタイプ機製作	原理実証試験・再構成アルゴリズム検討	プロトタイプ機製作・性能評価試験
5. 研究推進	進捗報告会の開催	進捗報告会の開催	進捗報告会の開催



2.1.2 実施体制図

本業務の実施体制図を図3に示す。

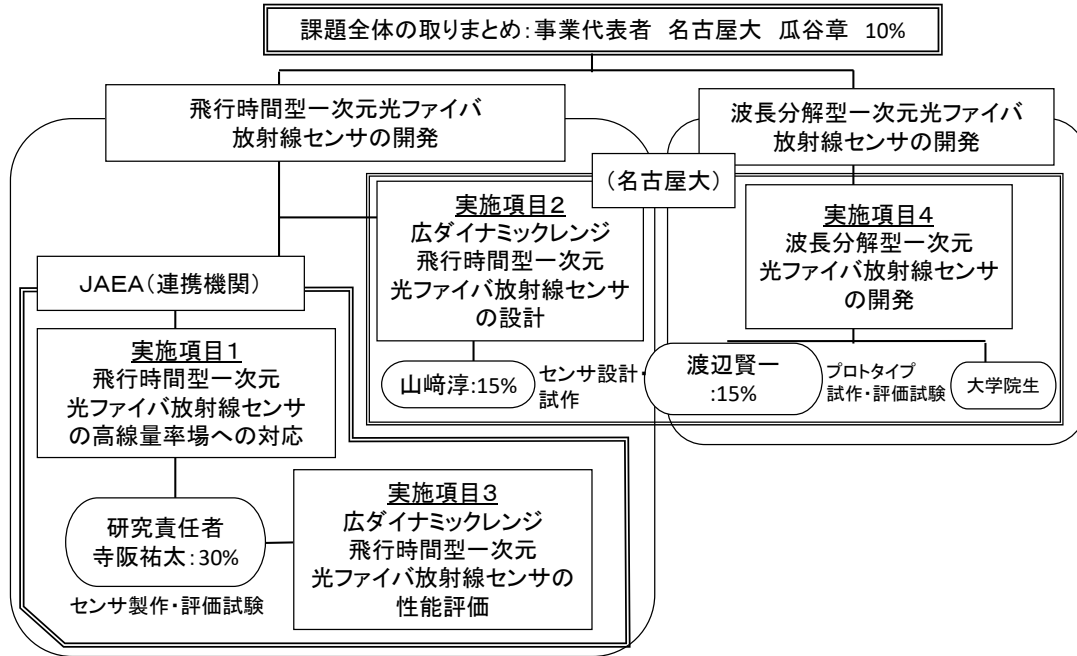


図3 本事業の実施体制図

## 2.2 令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法

令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法の概要を以下に示す。

### (1) 飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサ (TOF センサ) の高線量率場への対応

(連携先：JAEA)

令和元年度に実施したファイバ径等の各種パラメータの最適化の結果を踏まえ、空間分解能、放射線耐性等、計数率以外の項目についても総合的に評価し、加えて広ダイナミックレンジ化を視野に入れつつ、最終的なセンサ構成を決定する。また、決定したセンサ構成における最大許容線量率、位置分解能などの基本性能に関する評価試験を実施し、100 mSv/h の条件で、50 cm 以下の位置分解能が達成できていることを確認する。

### (2) 広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの設計

令和元年度に実施したプロトタイプ機の基本設計を元に、広ダイナミックレンジ TOF センサのプロトタイプ機を製作する。プロトタイプ機を用いた、各種性能評価試験を通して得られる知見を元に、最終的なシステムの概念設計を行う。

### (3) 広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの性能評価

(連携先：JAEA)

項目(2)において進められる広ダイナミックレンジ TOF センサの設計結果を元に、部分要素センサの製作を行う。この部分要素センサを用いて、位置分解能やセンサのダイナミックレンジ等の基本性能を評価する。

### (4) 波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの開発

令和元年度に製作した原理実証用プロトタイプ機を用いて原理実証試験を行う。並行して、放射線源位置分布の再構成アルゴリズムについての検討を進め、位置分布再構成用ソフトウェアを整備する。

3. 令和2年度の実施内容及び成果

3.1 飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサ (TOF センサ) の高線量率場への対応

3.1.1 飛行時間法の原理

TOF センサの測定ブロック図及び使用したモジュール類を図4、表2に示す。光ファイバに入射した放射線は光ファイバと相互作用し、発光する。光はファイバ内を伝搬してファイバ端に到達し、光電子増倍管 (PMT) 等の光センサで受光され、電気パルスに変換される。パルスはプリアンプを介して増幅、コンスタントフラクショナルディスクリミネータ (CFD) でタイミング抽出、時間波高変換器 (TAC) で2つの信号の時間差に相当する波高値を持つパルスに変換され、最終的にマルチチャンネル波高分析器 (MCA) により時間差 (=放射線入射位置) ヒストグラムとして表示される。

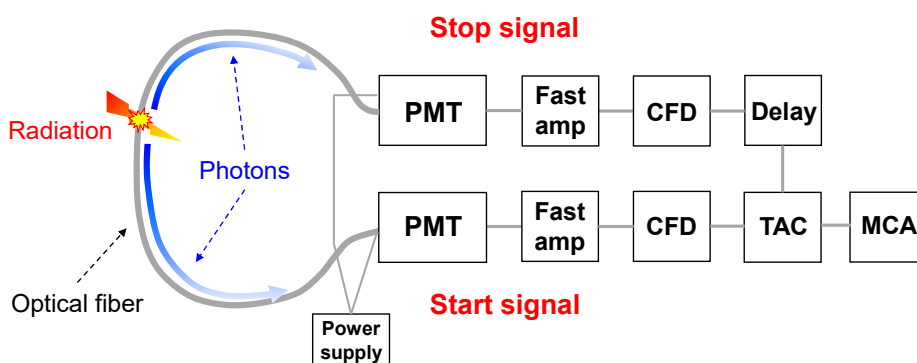


図4 TOF センサの測定ブロック図

表2 本研究で使用したモジュール類

PMT	浜松ホトニクス製	H10721
プリアンプ	豊伸電子製	N018
CFD	豊伸電子製	N030
TAC	ORTEC 製	567
MCA	CAEN 製	N957

3.1.2 光ファイバの選定

高線量率対応させる要素センサとして、本研究では令和元年度に引き続き Kuraray 社製の PSF と Thorlabs 社製の石英光ファイバを用いた。要素センサの写真を図5に示す。PSF は光ファイバ状のプラスチックシンチレータであり、放射線との相互作用によりシンチレーション光を発する。PSF を用いた TOF センサはこれまでも多くの研究・応用例があり、本研究では新たに数百マイクロンの小口径 PSF を用いた TOF センサを製作した。令和2年度は令和元年度に使用した青色発光の PSF (SCSF-81) に加え、緑色発光の PSF (SCSF-3HF) を適用した。石英光ファイバは本来センサとしてではなく光伝送用途として用いられるものであるが、荷電粒子との相互作用により微弱なチェレンコフ光を発するため、このチェレンコフ光を検知することによりセンサとしても使用可能であることを令和元年度までの成果で明らかにした。チェレンコフ光の発光量はシンチレーション光と比較して少ないと考えられるが、石英光ファイバはプラスチック光ファイバと比較して透明性・耐放射線性に優れるため、TOF センサとして使用することで 1F 原子炉建屋内のような高線量率環境において広範囲・長期間のモニタ

リングに応用可能と考えられる。さらに、石英光ファイバを使用した TOF センサの位置分解能は PSF と比較して格段に優れることを令和元年度に明らかにした。これはチェレンコフ光の発光寿命は数 ps とシンチレーション光と比較して桁違いに速く、時間応答性が改善されたためと考えられた。令和 2 年度はこの点について更なる考察を加え、最終的なセンサ構成を検討する。

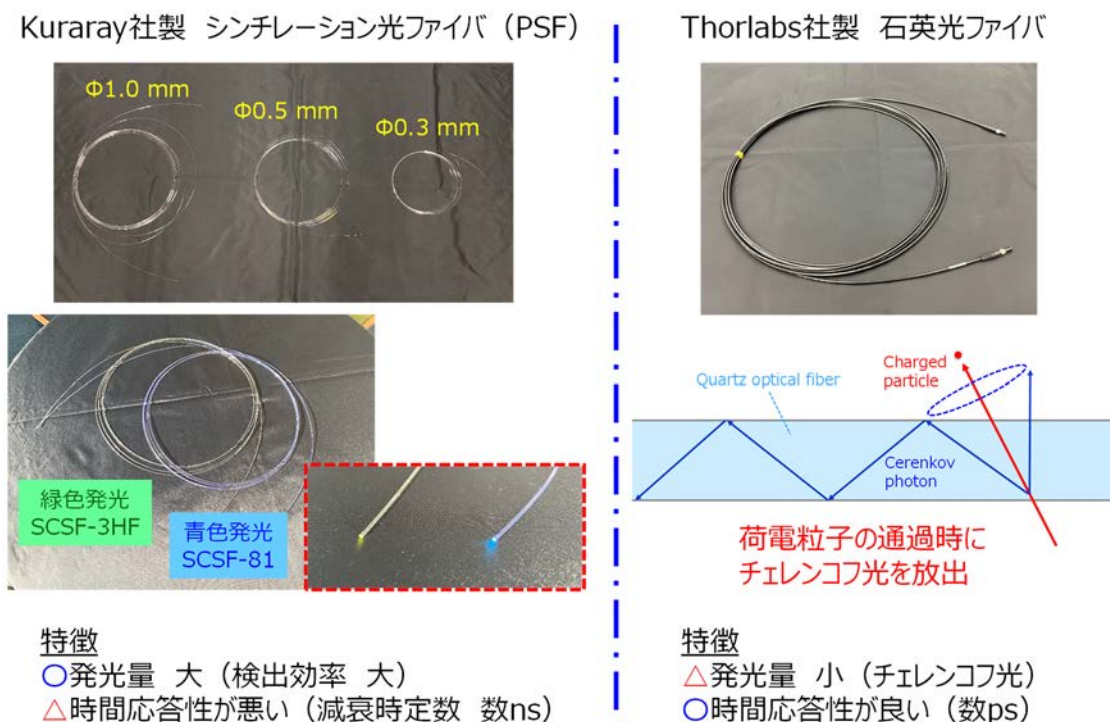


図5 本研究で使用した光ファイバ及び光センサ  
 (寺阪祐太, p. 15, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)  
 (左) シンチレーション光ファイバは Kuraray 社製 SCSF-81  
 (ファイバ径:  $\Phi 0.3$  mm、 $\Phi 0.5$  mm、 $\Phi 1.0$  mm)  
 (右) 石英光ファイバは Thorlabs 社製 FP200~1000URT  
 (NA: 0.5、ファイバ径:  $\Phi 0.2$  mm、 $\Phi 0.4$  mm、 $\Phi 0.6$  mm、 $\Phi 1.0$  mm)

### 3.1.3 要素センサを用いた線源強度分布測定試験

PSF を用いた TOF 要素センサによる線源強度分布測定結果を図 6 に示す。線源は  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  を用いた。図 6 より、小口径光ファイバで線源位置検出が可能であることが確認できた。位置分解能は半値幅 (FWHM) で 49 cm から 108 cm とばらつきがあった。ここで、使用した PSF は青色発光の SCSF-81 と SCSF-3HF があり、それぞれのセンサは発光波長だけではなく発光の減衰時定数も異なる (SCSF-81: 2.4 ns、SCSF-3HF: 7 ns)。つまり、図 6 の結果は、光ファイバの口径が小さく、発光の減衰時定数が長いファイバほど位置分解能が劣ることを示している。

石英光ファイバを用いた TOF 要素センサによる線源強度分布測定結果を図 7 に示す。図 7 より、微弱チェレンコフ光の検出に基づく石英光ファイバを TOF センサとして用いた場合でも線源強度分布測定が可能であることが確認できた。位置分解能は口径に依らず約 18 cm と、PSF と比較して非常に優れることが確認できた。一方で、線源位置に依らず、ファイバ両端に

ピークが常に観測された。これは光がファイバ端面に到達した際に何割かの光が端面反射し、ファイバ反対側の光センサで受光されたことによりファイバ端に相当する位置に線源があると誤認された結果である（端面反射ピーク）。等方的に放出されるシンチレーション光とは異なり、チェレンコフ光は方向性を持って放出されるため、光ファイバの両端に光が伝送されずにある片側のみに伝送されるイベントが多数発生することが原因である。

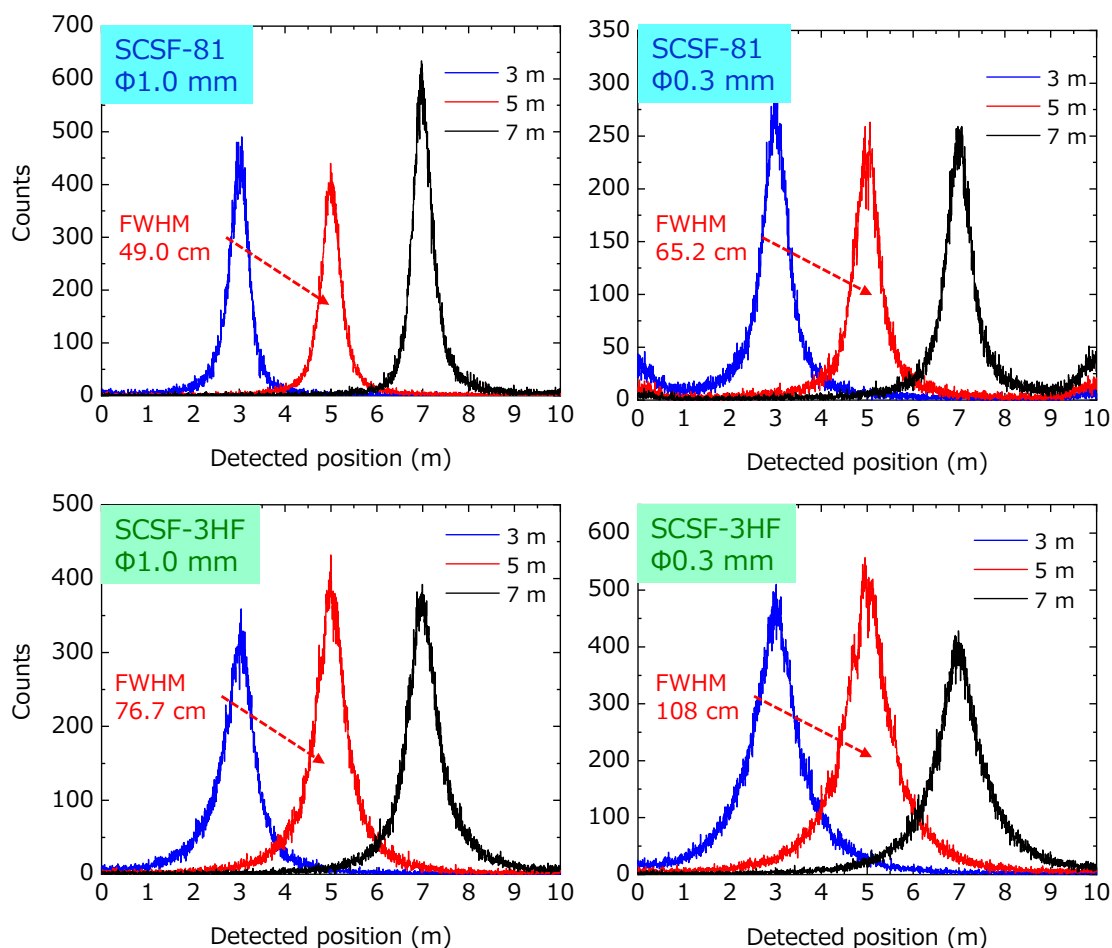


図6 PSFを用いたTOFセンサによる線源強度分布測定試験結果  
 (寺阪祐太, p. 18, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

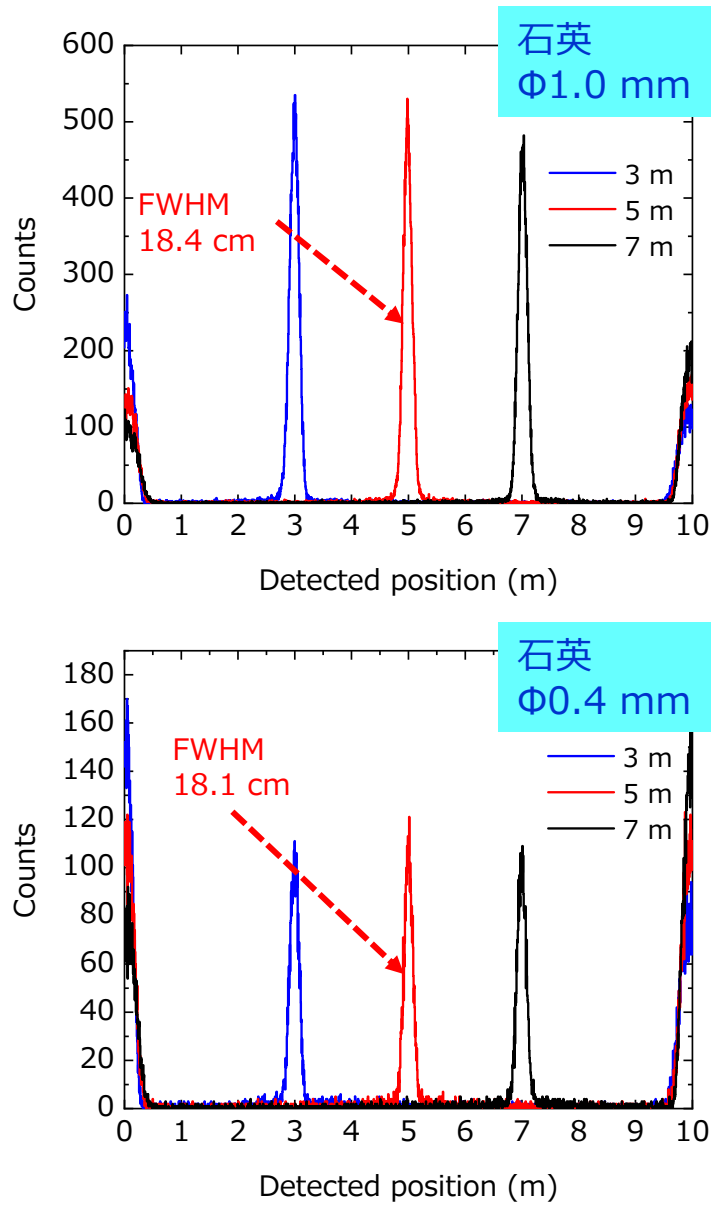


図7 石英光ファイバを用いた TOF センサによる線源強度分布測定試験結果  
 (寺阪祐太, p. 19, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

石英光ファイバが PSF と比較して位置分解能が優れる理由として、発光減衰時定数の違いが影響している可能性が示唆された。発光減衰時定数が位置分解能に及ぼす影響のイメージ図を図 8 に示す。小口径の光ファイバを TOF センサとして適用した場合、ファイバ端に到達する光子数は非常に少なく、口径によっては数 photons と見積もられている[4]。発光減衰時定数が長いファイバの場合、ファイバ端に届く僅かな光子がどの時点で発せられたかによって PMT への到達時間が大きく異なる。そのため、発光寿命が数 ps と短いチェレンコフ光検出に基づく石英光ファイバは位置分解能が優れ、口径の小さなファイバでも位置分解能を維持できたと考えられる。一方で、PSF は発光寿命が数 ns と長いいため分解能が悪く、小口径化は発光量の減少に繋がり、ファイバ端への光子到達時間差のばらつきの増加に伴い位置分解能が劣化したと考えられる。

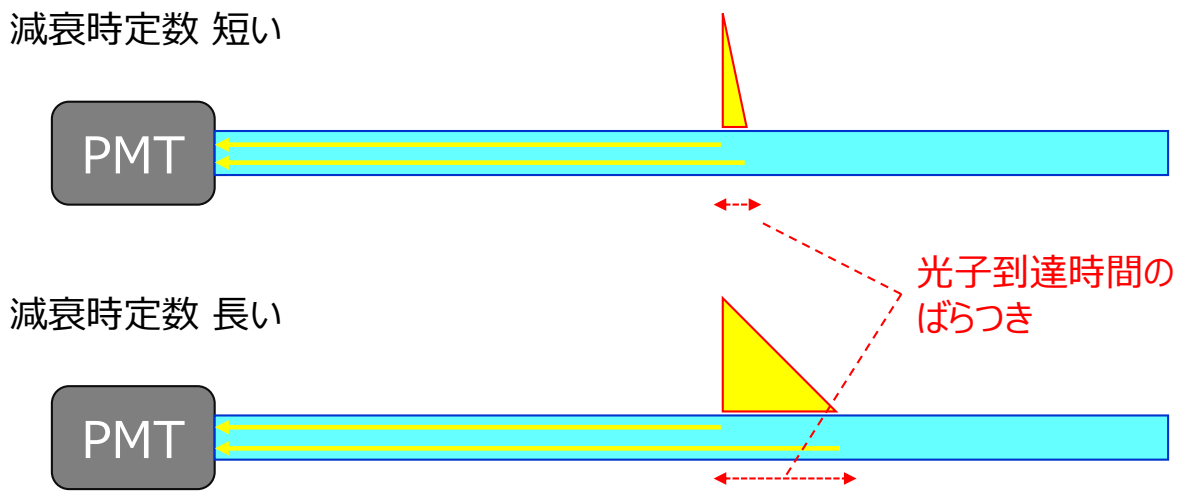


図 8 発光減衰時定数が光子のファイバ端への到達時間に与える影響のイメージ  
(寺阪祐太, p. 24, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

### 3.1.4 検出効率

TOF センサの  $^{137}\text{Cs}$  からのガンマ線、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  からのベータ線に対する検出効率評価結果を図9に示す。検出効率は10 mのファイバ中心位置(5 m)におけるピーク計数率とした。図9より、検出効率は $^{137}\text{Cs}$ 及び $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ともにPSFが石英光ファイバよりも大きく、 $\Phi 1.0$  mmのファイバで比較した場合、その比は $^{137}\text{Cs}$ で8118、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ で546となった。これは、石英でのチェレンコフ発光量が少ないことに加え、チェレンコフ発光に方向性が存在することも影響している。単純にファイバの片側に到達している光子数だけで比較すると、PSFと石英光ファイバのファイバ端到達光子数比(ファイバ径: $\Phi 1.0$  mm)は $^{137}\text{Cs}$ で40.5、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ で17.1と、検出効率の比と比較して非常に小さい[4]。このことから、石英光ファイバではチェレンコフ発光の方向性が検出効率の低下に繋がっていることが明らかとなった。

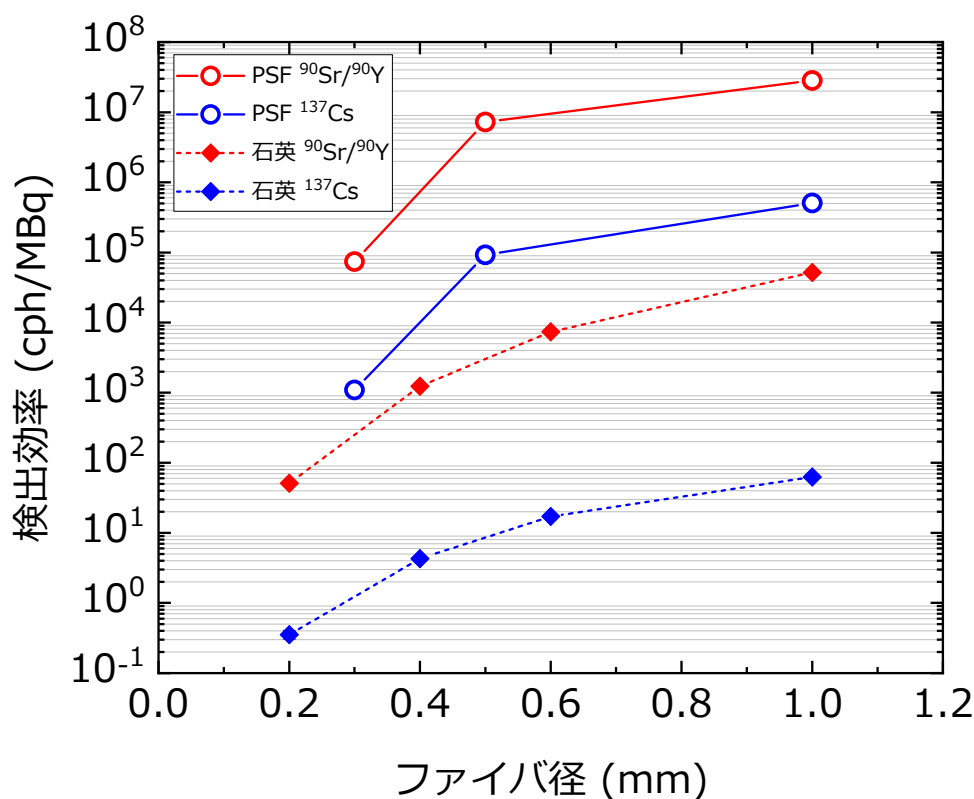


図9 ファイバ径毎の検出効率 (寺阪祐太, p. 22, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)



### 3.1.5 名古屋大学コバルト 60 $\gamma$ 線照射室における位置分布測定試験及び耐放射線性試験

本研究で開発した TOF 要素センサの高線量率場での放射線分布測定試験を名古屋大学コバルト 60 照射室で実施した。測定セットアップを図 10 に示す。10 m のファイバ中心部を、鉛ブロックを用いて 10 cm コリメート照射を行った。要素センサは $\Phi 0.4$  mm の石英光ファイバと $\Phi 0.5$  mm の PSF (SCSF-81) を使用した。放射線分布測定結果の妥当性確認のため、1、3、5、7、9 m 位置の線量率を電離箱で測定した。測定セットアップ中で最も高線量率の箇所は、5 m 位置の 246 mGy/h である。

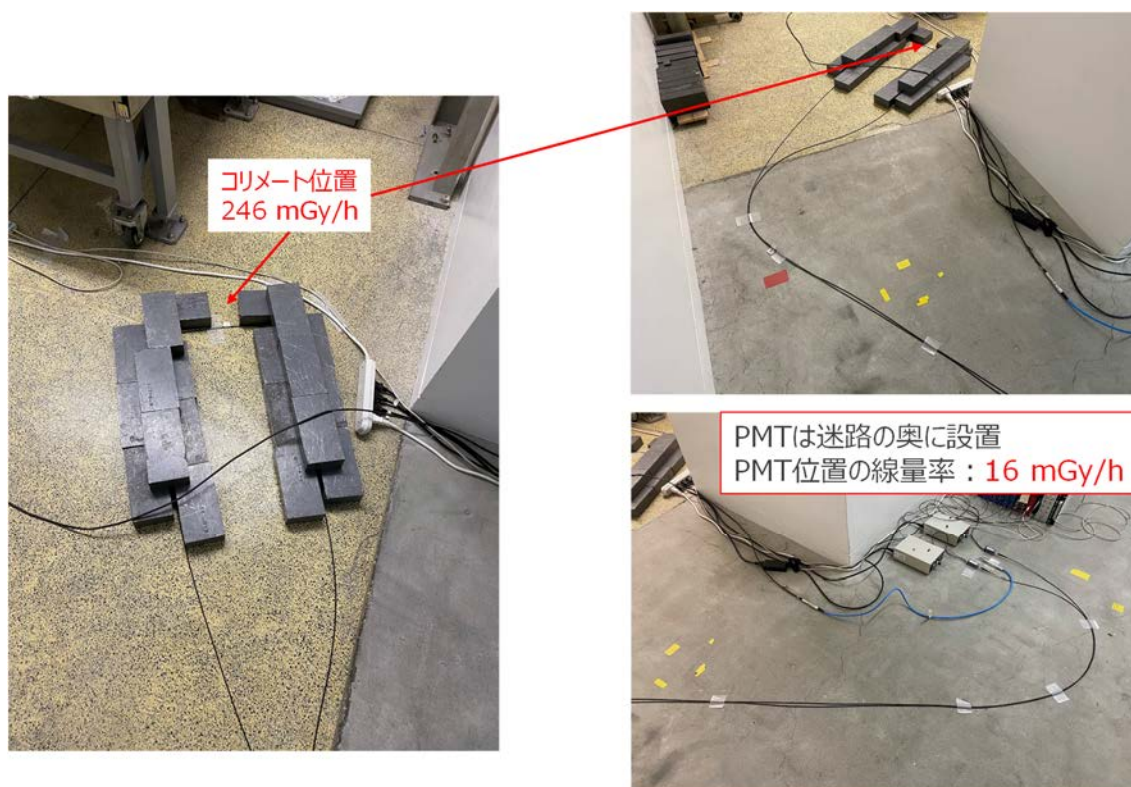


図 10 名古屋大学コバルト 60 $\gamma$ 線照射室における放射線分布測定試験セットアップ  
(寺阪祐太, p. 40, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

放射線分布測定結果を図 11 に示す。石英光ファイバはファイバ中心部の照射部とコリメート部のコントラストが明瞭であるのに対し、PSF はコントラストが粗く、遮蔽している部分にもかなりの計数が確認された。これは、分解能が 50 cm 以上あるため、遮蔽部前後の計数が遮蔽部に混入してしまったためである。分解能の優れる石英光ファイバを用いることでこの問題は回避でき、線量率が 246 mGy/h のファイバ中心においても図 7 で示した優れた位置分解能を維持していることがわかる。電離箱で測定した線量率との整合性も石英光ファイバを用いた結果が優れており、複雑な放射線分布を測定する場合の石英光ファイバの有効性を確認できた。

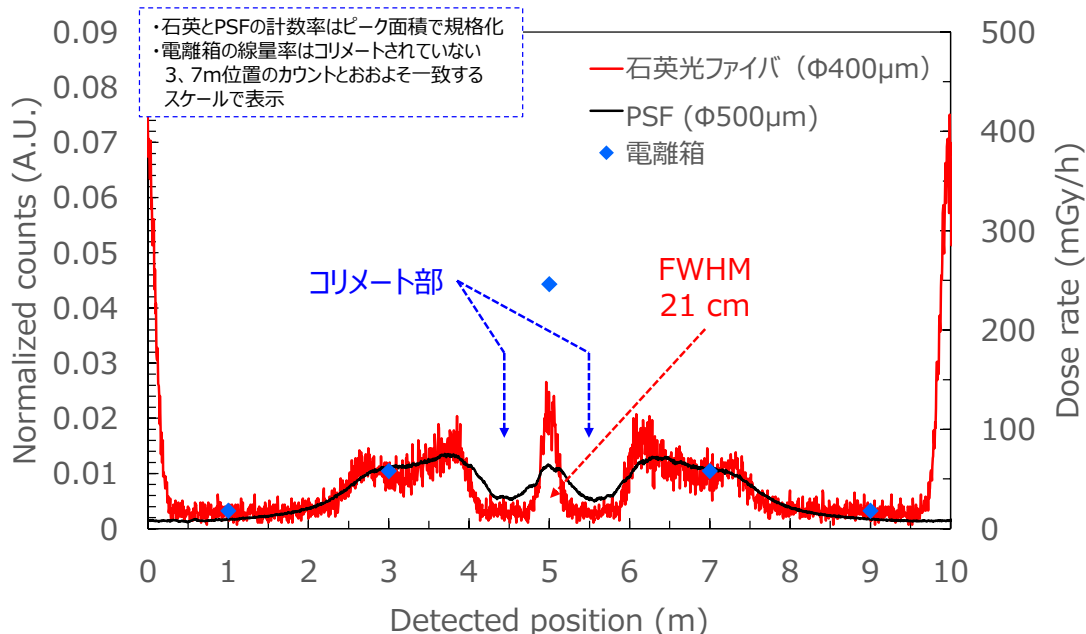


図 11 名古屋大学コバルト 60 $\gamma$ 線照射室における放射線分布測定試験結果  
(寺阪祐太, p. 41, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

次に、石英光ファイバの耐放射線性を名古屋大学コバルト 60 照射室で実施した。測定セットアップを図 12 に示す。10 m のファイバを  $^{60}\text{Co}$  線源の周りに巻き付けるように配置し、10 m ファイバの両端に 20 m 石英光ファイバを接続した。照射室外に設置したキセノン光源からの光を 20 m ファイバに入射し、もう片側の 20 m ファイバを介して分光器で受光した。この際、放射線照射部の積算線量と波長毎の光透過率変化から、放射線損傷により光が通りにくくなる様子を評価した。

石英光ファイバの積算線量と分光器で観測された波長毎の光強度の関係を図 13 に示す。積算線量の増加とともに分光器で観測される光強度が減少していく様子が確認できる。また、その減少の割合は短波長ほど大きい。このことは、光ファイバの放射線損傷によりファイバ内での光透過率が減少し、かつその影響は短波長の光ほど顕著であることを示している。本研究で使用した PMT の最大感度波長は 400 nm であり、図 13 より 380~420 nm の紫外線領域近傍の波長のファイバ内での透過率は積算線量 1 kGy で約 20 %減少することから、400 nm の光に対する検出効率は積算線量 1 kGy で 80 %程度まで減少する可能性があるが、この程度であれば大きな支障はなく、1 kGy までの耐放射線性があると言える。一方で、本研究で想定している TOF センサの適用環境は最大でも数百 mSv/h であることから、目的に対して十分な耐放射線性を有することが確認できた。

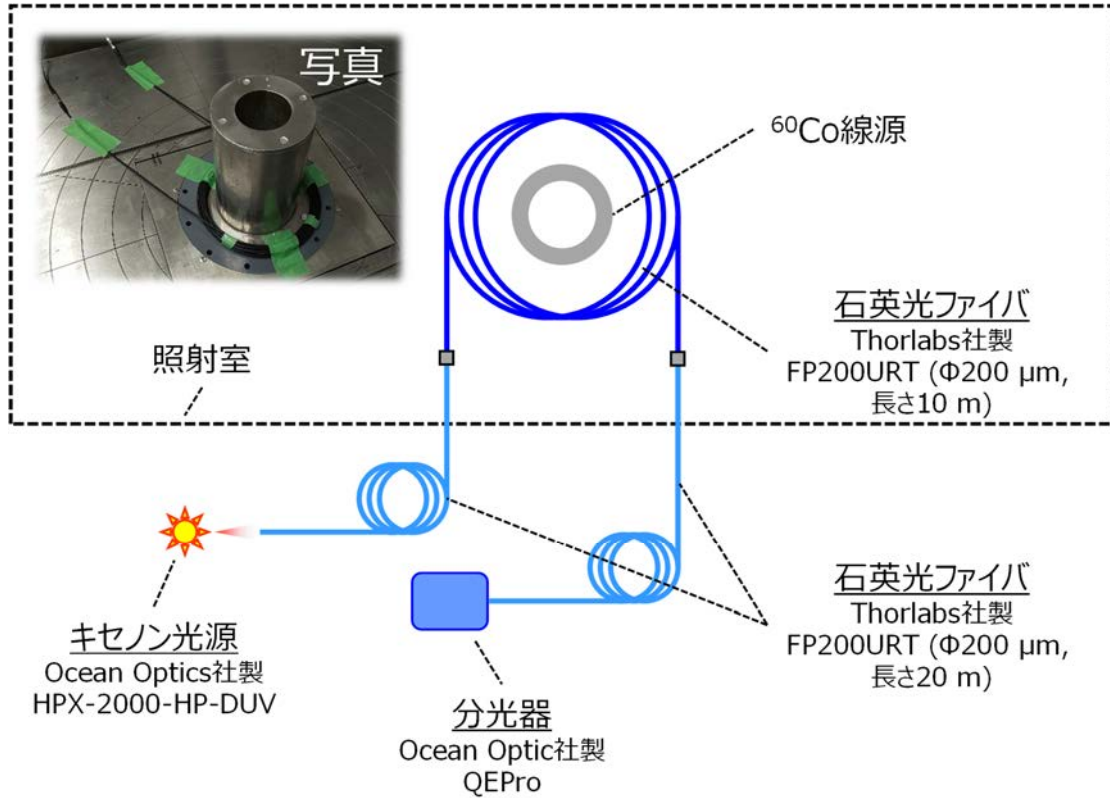


図 12 石英光ファイバの耐放射線性試験セットアップ  
(寺阪祐太, p. 42, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

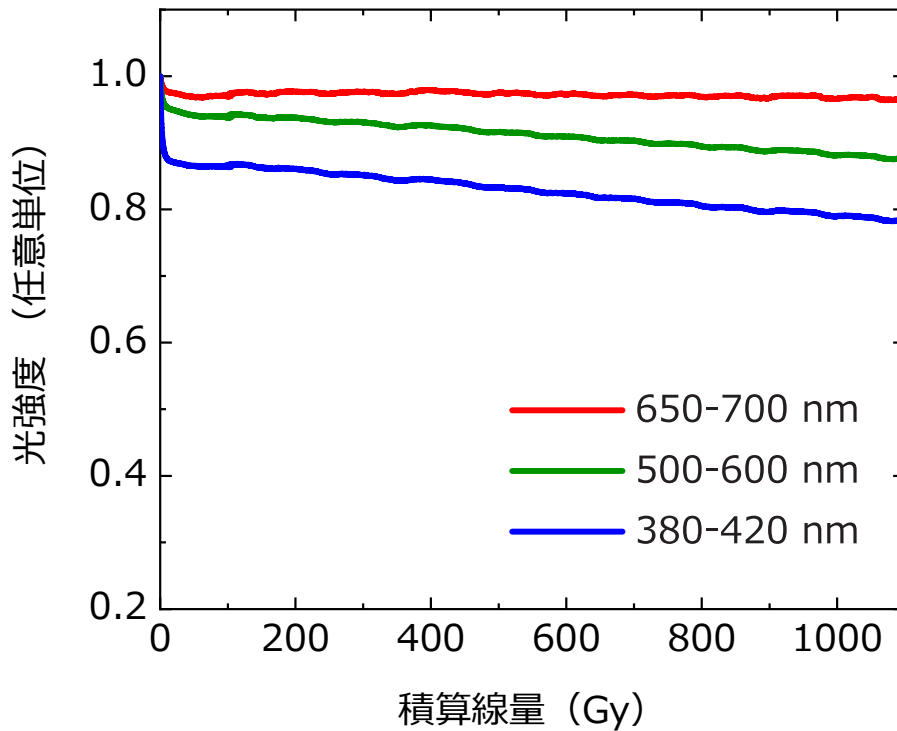


図 13 石英光ファイバの積算線量と光透過率変化の関係  
(寺阪祐太, p. 45, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

### 3.2 広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの設計

ここまで小口径の石英光ファイバを用いることで数百 mSv/h の高線量率で線源分布測定が可能であること、石英光ファイバが優れた耐放射線性を有することを確認した。一方で、高線量率対応のために光ファイバセンサの感度を抑制した場合、低線量率に対する感度が犠牲になってしまう問題が新たに浮上する。そこで、1 mSv/h 未満の低線量率から数百 mSv/h の高線量率まで広い測定ダイナミックレンジを有するセンサの実現のため、大口径（低線量率用）・中口径（中線量率用）・小口径（高線量率用）の光ファイバからの発光を各々平行に読み出せる多チャンネル飛行時間分析回路を作製した。装置の外観を図 14、15 に示す。多チャンネル飛行時間分析回路は、図 14 に示す通り 6 個の光センサモジュールと 3 個の飛行時間分析回路から構成され、図 15 の通り 1 本の石英光ファイバにつき 2 個の光センサモジュール、1 個の飛行時間分析回路を接続し、線源分布を測定する。この時、各々平行に信号処理を行うため、大口径・中口径・小口径の 3 種類の石英光ファイバを用いることで、低線量率に対する感度を維持しつつ、高線量率の測定対象にも対応できるという広いダイナミックレンジを有し、かつユーザビリティ及び現場応用を見据え防水性も備えたセンサを設計した。



図 14 製作した多チャンネル読み出し回路



図 15 多チャンネル読み出し回路を用いた広ダイナミックレンジ TOF センサ

3.3 広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの性能評価

3.1.3、3.1.4で位置分解能・検出効率を評価したPSFと石英光ファイバの両要素センサの評価結果より、検出効率はPSFが石英光ファイバと比較して3桁程度上回る一方で、位置分解能は石英光ファイバが約18 cm、PSFが49~108 cmと、石英光ファイバが優れるという結果を得た。ここで、PSFは小口径では位置分解能が劣化するのに対し、石英光ファイバの位置分解能は口径に依らずほぼ一定であった。そこで、高線量率で相対位置分解能5%（10 mファイバで50 cm）という当初の目標を達成するため、大口径・中口径・小口径石英光ファイバを広ダイナミックレンジセンサとして選定し、主としてこれらについて性能評価を行った。

中口径（Φ0.6 mm、ファイバ長10 m）の石英光ファイバと図15の多チャンネル飛行時間分析回路を用いた線源測定試験結果を図16に示す。線源位置に応じたピークが明確に確認でき、本研究で製作した多チャンネル飛行時間分析回路がTOFセンサとして適用可能であることがわかった。

以上の通り、小口径でも優れた位置分解能を発揮できる石英光ファイバと、信号の平行読み出しが可能な多チャンネル飛行時間分析回路を組み合わせることで、高線量率でも高い位置分解能が発揮でき、かつ低線量率にも感度を有するTOFセンサの最終的な構成を検討した。一方で、現時点では一部NIMモジュールを使用しており、ポータブル性等の観点から屋外環境での使用は難しい。そこで、現場応用を見据えた最終的な設計として、屋外環境で使用できるよう防水性・ポータブル性・低消費電力（ポータブルバッテリーでの駆動）という仕様を固めた。

具体的には、部分要素センサとしてシンチレーション光ファイバと石英光ファイバを選定し、位置分解能及び検出効率を評価した。その結果、感度はシンチレーション光ファイバが石英光ファイバと比較して3桁程度上回る一方で、位置分解能は石英光ファイバが約18 cm、シンチレーション光ファイバが49~108 cmと、石英光ファイバが優れるという結果を得た。

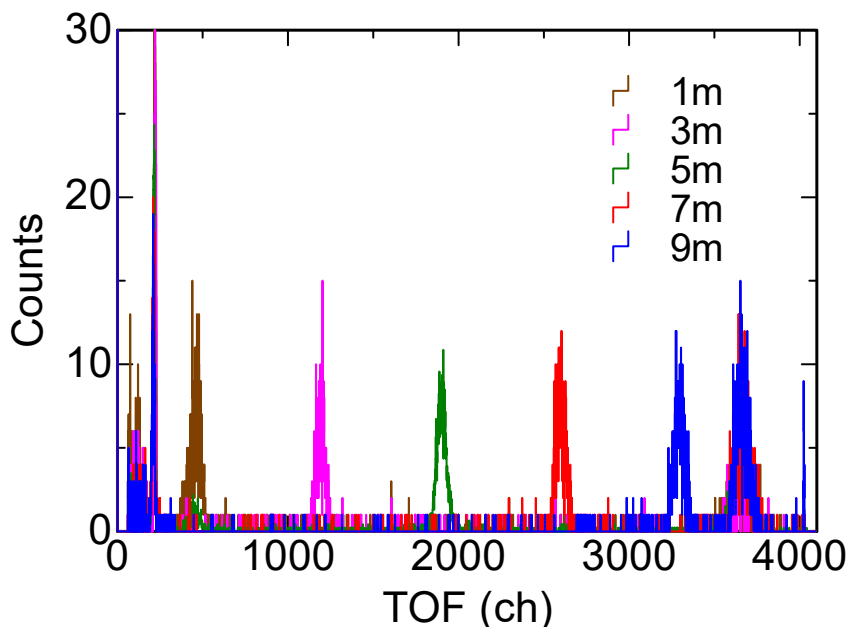


図16 中口径（Φ0.6 mm、ファイバ長10 m）の石英光ファイバと多チャンネル飛行時間分析回路を用いた線源測定試験結果（線源：3 MBq <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y）

### 3.4 波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの開発

3.4 では令和元年度に引き続き、飛行時間法に代わる新しい線源分布測定法として、信号のパイルアップや偶発同時計数を回避可能な積分型のセンサであり、ファイバの片側からの信号読み出しでファイバに沿って一次的に線源分布が測定可能な「波長分解型一次元光ファイバ放射線センサ」の原理検証試験を行う。

#### 3.4.1 波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの概要

波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの概要を図 17 に示す[4]。本センサは光ファイバと放射線の相互作用由来の発光をファイバの片側で分光し、波長スペクトルを得る（観測波長スペクトル）。このとき、ファイバ内での光減衰量は波長依存であるため、測定する線源分布によってファイバ端で観測される波長スペクトルの形状が異なる。そこで、ファイバ発光位置毎にファイバ端で観測される波長スペクトルを応答スペクトルとして予め整備することで、任意の線源分布を測定した際に得られる波長スペクトルをアンフォールディング処理することによって線源強度分布を逆推定できる。本センサは TOF センサとは異なり、光量の積分値から線源強度分布を得るため、パルス計数計測を行う放射線検出器が高線量率で問題となる信号のパイルアップやセンサ部での偶発同時計数を回避できる。さらに、ファイバの片側からの信号読み出しでファイバに沿って一次的に線源分布を測定するため、測定自由度も格段に向上する。本センサは本研究で新たに提案する世界初的方式であり、実現すれば 1F 廃炉作業環境のみならず、光ファイバを用いた一次元放射線センサのブレークスルーとなり得る。

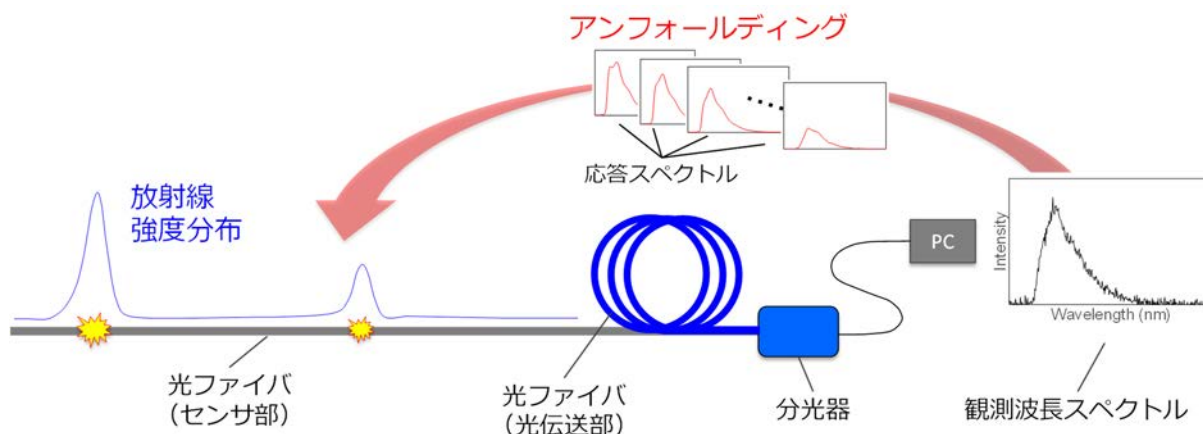


図 17 波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの概要  
 (寺阪祐太, p. 49, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

### 3.4.2 プロトタイプ機の試作

波長分解型一次元光ファイバ放射線センサとして、図 18 に示すプロトタイプ機を構築した。本センサの成立要件として、①ファイバ内での光減衰を利用するため数 m の範囲でそれなりの光減衰が望め、かつ発光量が大きいセンサを使用すること、②高ガンマ線バックグラウンド下でも使用可能であること、③現場応用を見据え、ポータブル性に優れることが挙げられる。そこで、プロトタイプ機は①放射線検出部に発光量大・ファイバ内での光減衰大の PSF (SCSF-81)、②分光系を放射線環境から遠ざける必要があるため、光伝送部に石英光ファイバ、③分光系は低ノイズでポータブル性が良いペルチェ冷却 CCD 搭載の分光器 (Ocean Optics 社製 QEPro) から構成される仕様とした。

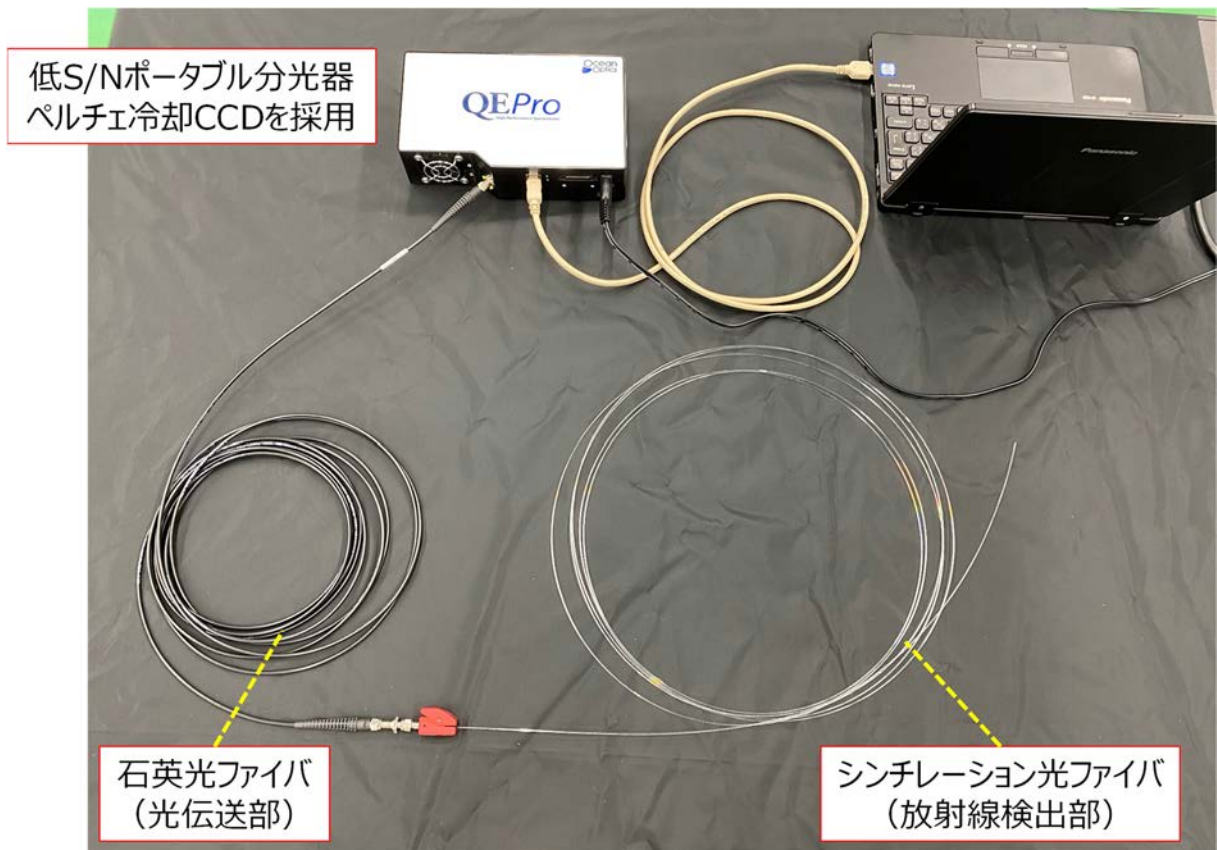


図 18 波長分解型一次元光ファイバ放射線センサのプロトタイプ機  
(寺阪祐太, p. 52, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

3.4.3 応答関数の取得

本プロトタイプを用いて、令和元年度に引き続き UV 光源のコリメート照射による波長スペクトルの測定を行った。発光位置毎の応答スペクトルと波長毎の光減衰長を図 19 に示す。光減衰長の波長依存性が明確に確認された。本センサは 450～550 nm の波長範囲で発光量が大きく、かつ光減衰長の波長依存性も大きいことがわかる。そこで、本研究ではこの範囲の波長を利用して線源分布の逆推定を行う。

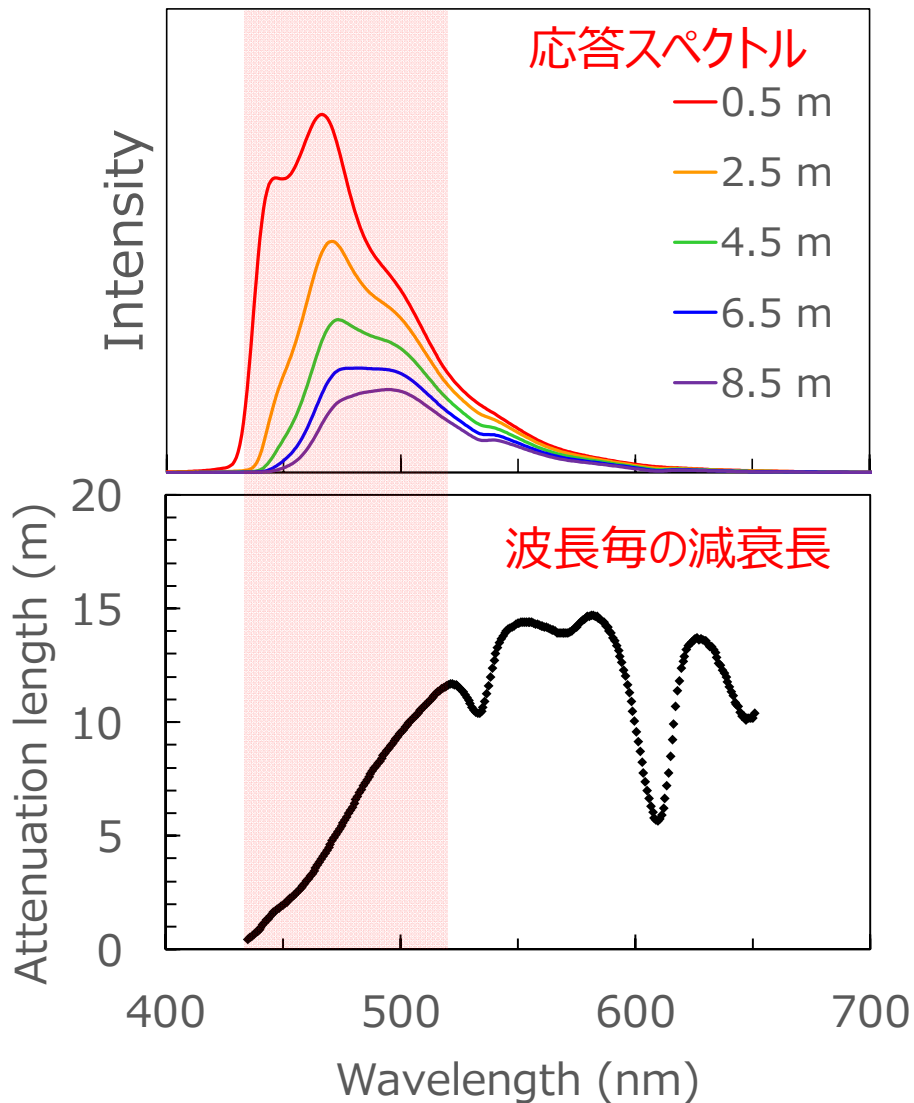


図 19 発光位置毎に分光器で観測される波長スペクトル（応答関数）と波長毎の減衰長  
 (寺阪祐太, p. 55, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)



### 3.4.4 線源強度分布推定法

3.4.3 で示した通り、光ファイバ内を伝搬する光の減衰長には波長依存性がある。このことは、ファイバ端で観測される波長スペクトルの形状が光のファイバ内での伝搬距離の情報を有することを示している。従って、ある任意の線源強度分布を光ファイバで測定した場合、ファイバ端で測定される波長スペクトルは以下の式(1)で表すことができる。

$$S(\lambda) = \int I(\lambda)e^{-(x/\mu(\lambda))}f(x)dx \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $\lambda$  は光の波長、 $x$  はファイバ端からの距離、 $S(\lambda)$  はファイバ端で観測される波長スペクトル、 $I(\lambda)$  は発光初期の波長スペクトル、 $\mu(\lambda)$  は波長  $\lambda$  の光の減衰長、 $f(x)$  は位置  $x$  での線源強度である。初期スペクトルと減衰を掛け合わせた  $I(\lambda)e^{-(x/\mu(\lambda))}$  は事前に整備することができるため、 $S(\lambda)$  を測定することにより線源強度分布  $f(x)$  を逆推定することができる。

線源強度分布の逆推定について、本研究ではアンフォールディング法を適用した。式(1)は波長とファイバ位置を区切ることにより、以下の行列式(2)に置き換えて記述することができる。

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{1,1} & \cdots & R_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{i,1} & \cdots & R_{i,j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_j \end{pmatrix} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 $i$  は波長範囲、 $j$  はファイバ位置範囲、 $S_i$  は任意の線源強度分布を測定した際にファイバ端で観測される波長スペクトルの波長範囲  $i$  の光強度、 $R_{i,j}$  はファイバ位置範囲  $j$  が発光したときにファイバ端で観測される  $i$  の波長範囲の光強度を示す応答関数行列、 $X_j$  はファイバ位置範囲  $j$  の線源強度である。本研究で用いたアンフォールディング処理は、以下の式(3)で表される  $\Delta$  を最小化する  $X_1 \sim X_j$  の組み合わせを最適化計算により探索する処理に相当する。

$$\Delta = \sum_i (S_i - \sum_j R_{i,j} X_j)^2 \quad \text{式(3)}$$

$X_1 \sim X_j$  の最適化計算には Microsoft® Excel®ソルバーに標準装備されているアルゴリズムである一般縮小勾配法 (Generalized Reduced Gradient 法、GRG 法) を用いた。このアルゴリズムは縮小勾配法に基づき目的関数が最小となる変数の組み合わせをある限定した範囲から探索する。本手法は対象とする目的関数及び初期値次第では最適値に収束しないことがあるため、マルチスタート機能を用いてランダム生成した複数の初期値から最適解を探索した。

3.4.5 波長チャンネルの選定

3.4.4 で示した線源強度分布推定法で使用する波長範囲を図 20 に示す。波長範囲は以下に示す 3 通りを適用し、使用する波長チャンネルが線源強度分布測定に及ぼす影響を評価する。

- (パターン①) 減衰長が短い波長チャンネルを使用
- (パターン②) 減衰長が長い波長チャンネルを使用
- (パターン③) 減衰長が短い波長チャンネルと長い波長チャンネルを両方使用

応答行列サイズは (ファイバ分割数×波長範囲数) = (20×10) とした。

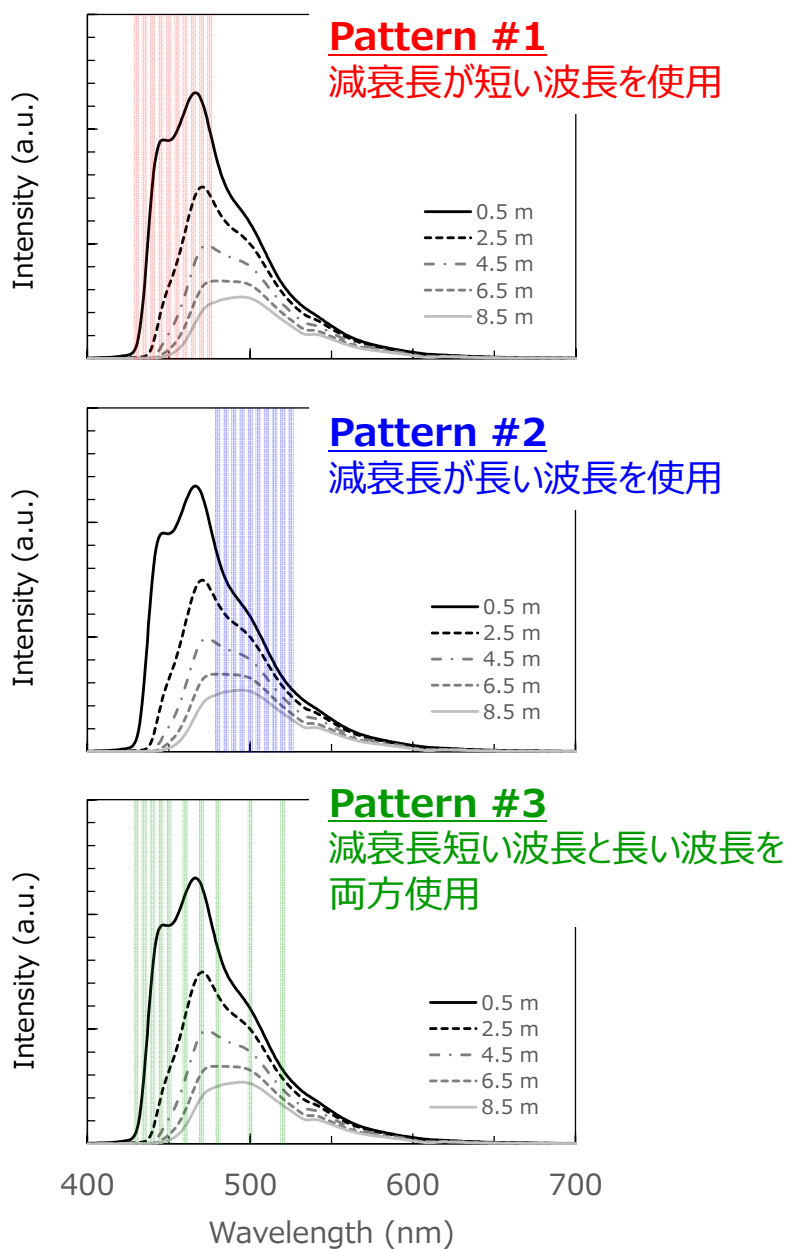


図 20 応答関数と対象波長範囲  
(寺阪祐太, p. 61, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

### 3.4.6 UV 照射による波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの原理検証

まず初めに、UV 光をファイバの 1 点または多点に照射し、得られた波長スペクトルをアンフォールディングの入力値とすることで、元の UV 照射位置を適切に逆推定可能であるかを検証する。UV 光をファイバの 1 点に照射した際の波長スペクトルとそのアンフォールディング結果を図 21 に示す。ファイバ始端側の 3.5 m、終端側の 7.5 m とともに実際の照射位置を適切に逆推定できていることがわかる。一方で、7.5 m 位置の逆推定結果は、すべての波長チャンネルパターンで 3.5 m 位置と比較して広がっており、減衰の少ない波長チャンネルを使用したパターン 2 が最も粗いという結果となった。これは、ファイバ終端では減衰の少ない波長成分が支配的となり、1 m 程度の距離で波長毎の光減衰の違いが見えづらくなったためである。この影響は減衰の少ない波長チャンネルのみ使用した場合でより顕著であるため、波長チャンネルパターン 2 で最も粗い結果となった。

UV 光をファイバの多点に同時照射し取得した波長スペクトルのアンフォールディング結果を図 22 に示す。やはり波長チャンネルパターン 2 で粗い結果となり、照射パターンによっては照射位置を完全に誤認する結果も見られた。一方で減衰の大きい波長チャンネルを使用したパターン 1 とパターン 3 の逆推定結果は良好であり、適切な波長チャンネル選定により照射位置分布が逆推定可能であることが示された。

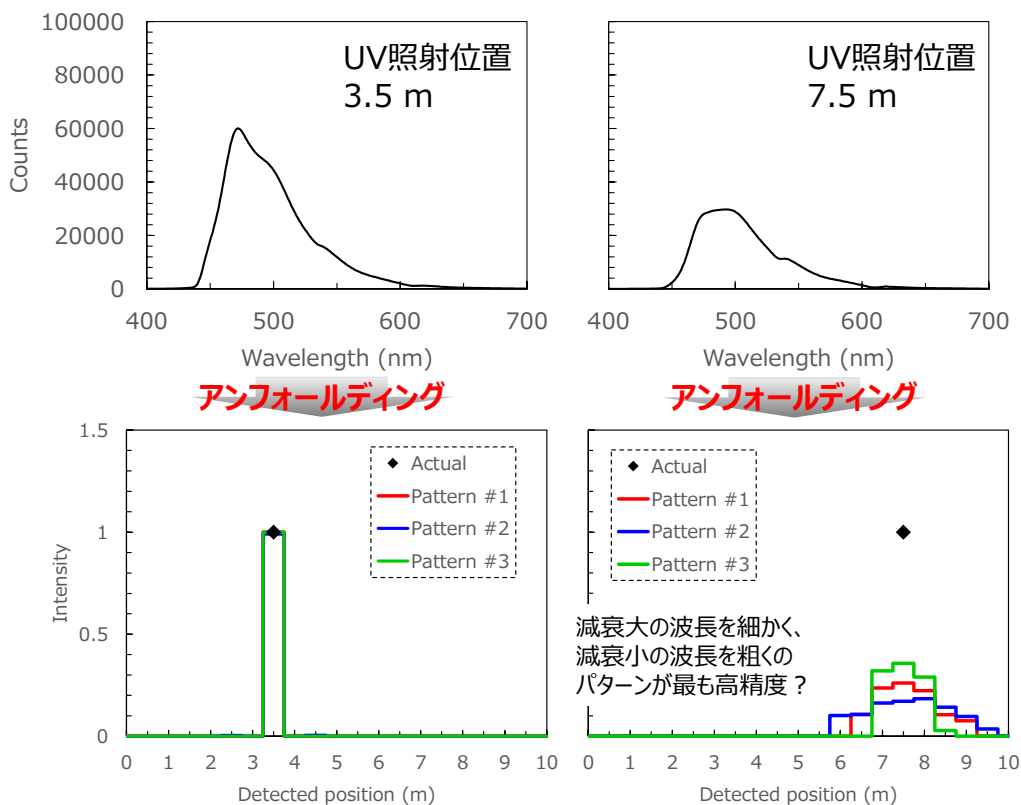


図 21 UV 光をファイバの 1 点に照射した場合の波長スペクトル測定値及びアンフォールディング結果  
(寺阪祐太, p. 63, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

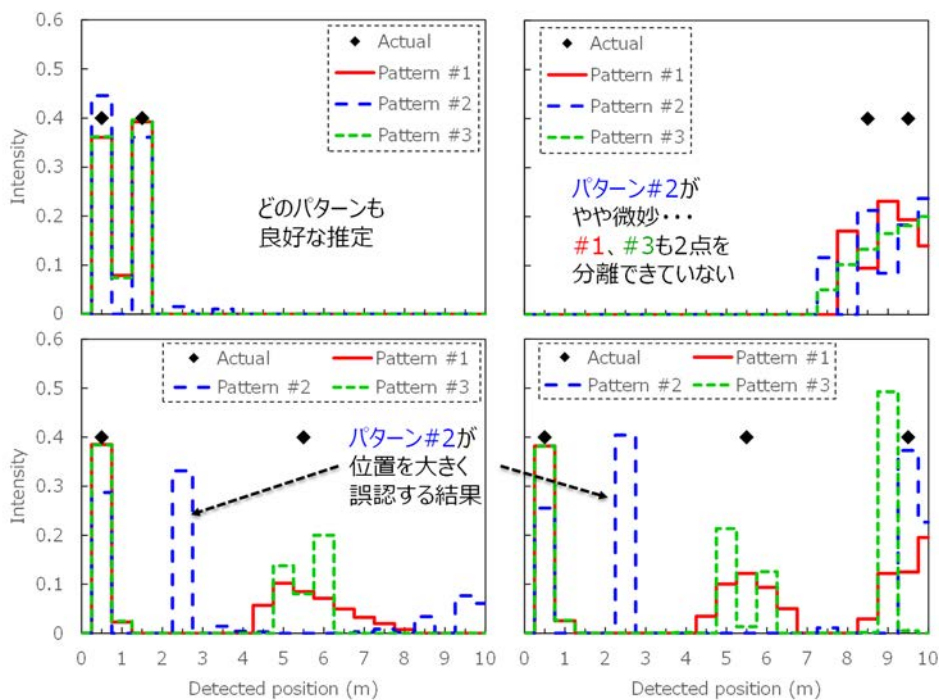


図 22 UV 光をファイバの多点に同時照射した際の波長スペクトルアンフォールディング結果  
(寺阪祐太, p. 67, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

3.4.7  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  線源を用いた波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの原理検証

S/N の良い UV 励起波長スペクトルを用いて原理検証を行い、発光位置分布を提案手法で逆推定可能であることが確認できた。次に、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  線源を用いたベータ線照射により、放射線源の位置分布を逆推定可能であるか検証する。1 MBq  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  線源からのベータ線をファイバの多点に同時照射し、測定された波長スペクトルのアンフォールディングを行った。放射線相互作用由来の発光は非常に微弱であるため、3 時間以上の露光時間で波長スペクトルを測定した。波長チャンネルは図 20 のパターン 3 を使用した。

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  からのベータ線照射による波長スペクトル測定値とアンフォールディング結果を図 23 に示す。いずれの分布においても、アンフォールディング結果は実際の線源位置分布を大まかにではあるが捉えており、本センサの原理の妥当性を確認できた。一方で、1 MBq のベータ線源に対しても数時間の露光時間が必要であることから、感度の低さが課題として残った。

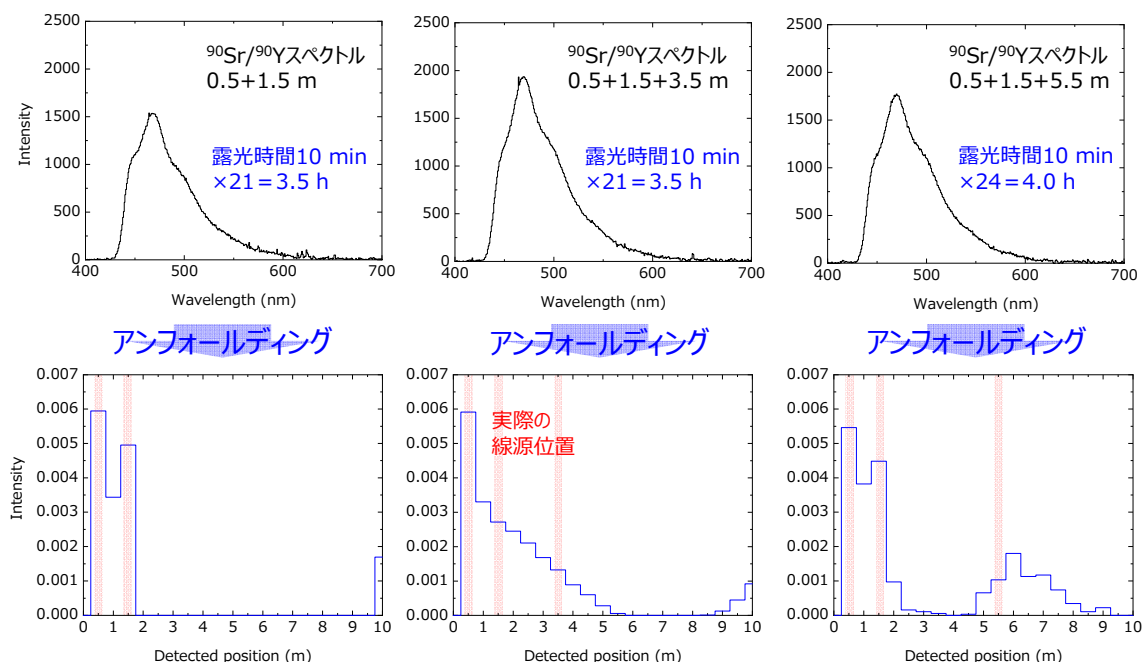


図 23 1 MBq  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  からのベータ線照射による波長スペクトル測定値とアンフォールディング結果  
(寺阪祐太, p. 77, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

### 3.4.8 高線量率環境での波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの原理検証

波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの高線量率環境での実証試験を名古屋大学コバルト 60 $\gamma$ 線照射室で実施した。測定セットアップを図 24 に示す。10 m 長の PSF (センサ部) の 1 m、9 m 位置にガンマ線が同時に照射されるよう、鉛ブロックを用いてコリメート照射を行った。照射部の線量率は 3 Gy/h とした。波長スペクトル測定値とアンフォールディング結果を図 25 に示す。実際の照射位置分布を適切に推定できており、本センサが 3 Gy/h という飛行時間型センサでは測定困難な高線量率下でも適用可能であることが実証された。

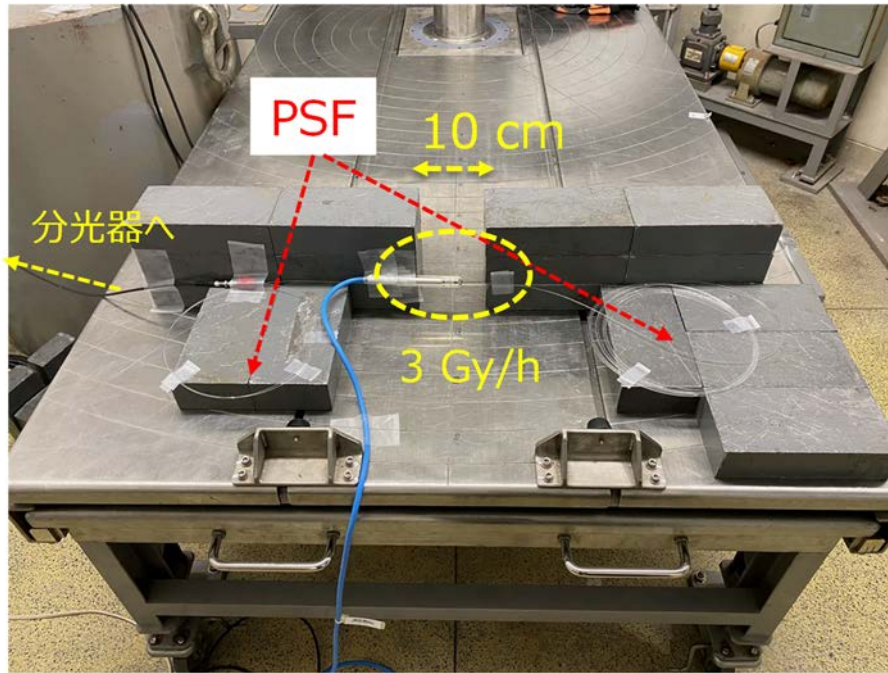


図 24 名古屋大学コバルト 60 $\gamma$ 線照射室での実証試験セットアップ  
(寺阪祐太, p. 83, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

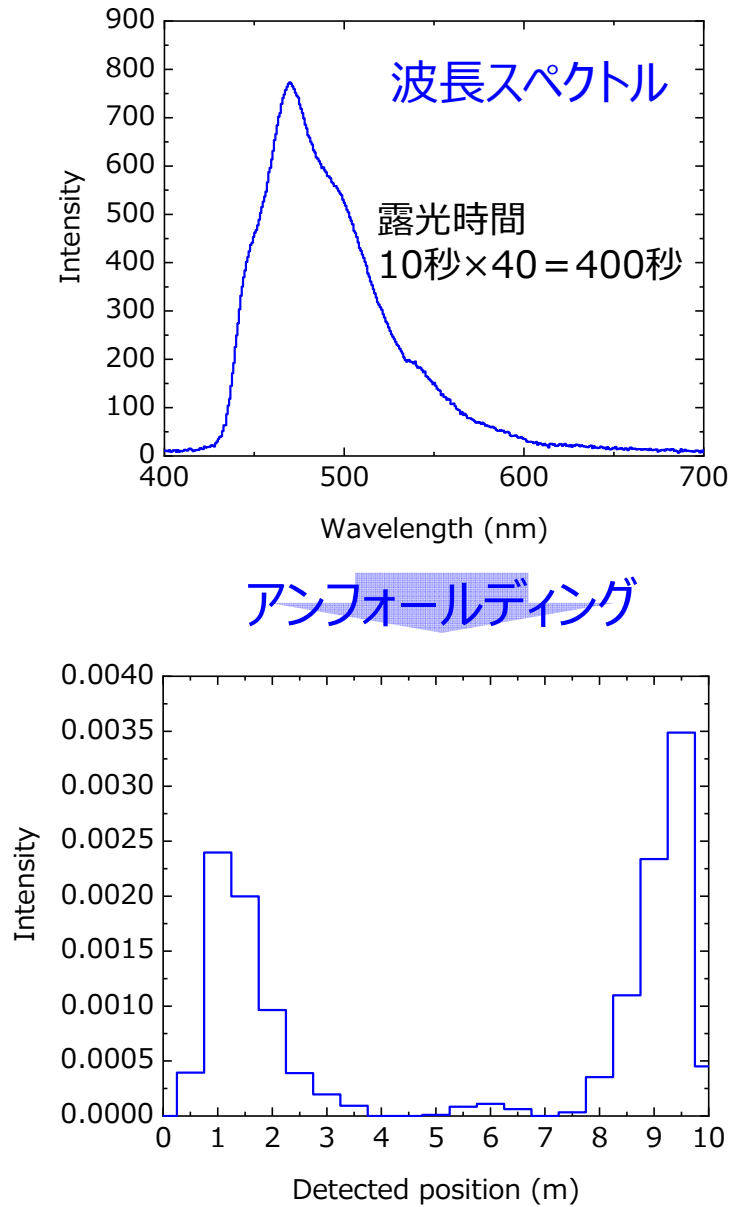


図 25 名古屋大学コバルト 60  $\gamma$  線照射室での波長スペクトル測定値とアンフォールディング結果  
(寺阪祐太, p. 84, 2021[4], 本人より許諾を得て転載)

### 3.4.9 位置分布再構成簡易ソフトウェアの整備

これまで実証した波長分解型一次元光ファイバ放射線センサのアンフォールディング処理は、Excel®アドインに装備されているソルバー機能を使用している。本項ではこの機能をより簡便に使用できるよう、位置分布再構成簡易ソフトウェアを構築する。

作成した位置分布再構成簡易アプリを図 26 に示す。このアプリは VBA (Visual Basic for Applications) を用いて実装したものであり、クリック操作のみで誰でもアンフォールディング処理が行えるようになっている。VBA とは Microsoft® Office に含まれるアプリケーションソフトの拡張機能であり、利用者が簡易なプログラムを記述して実行することで複雑な処理の自動化が行える機能である。ここでは予め記録しておいたソルバーによる最適化計算処理の操作がマクロで自動的に呼び出され、実行される仕様とした。

本アプリの動作を図 27 のフローに示す。まず、ユーザーは「スペクトル読込」のアイコンをクリックし、続いて表示されるスペクトルファイルの中からアンフォールディングを行うファイルを選択する。選択すると入力するアンフォールディングを行う波長スペクトルが表示される。次に、表示された波長スペクトルから何 cm 間隔で線源分布を求めるか、3 種類のアイコンから選択する。「10 cm 間隔」のアイコンをクリックすると、ソルバー機能が自動的に立ち上がり、アンフォールディング結果が表示される。「50 cm 間隔」、「1 m 間隔」のクリックも同様である。

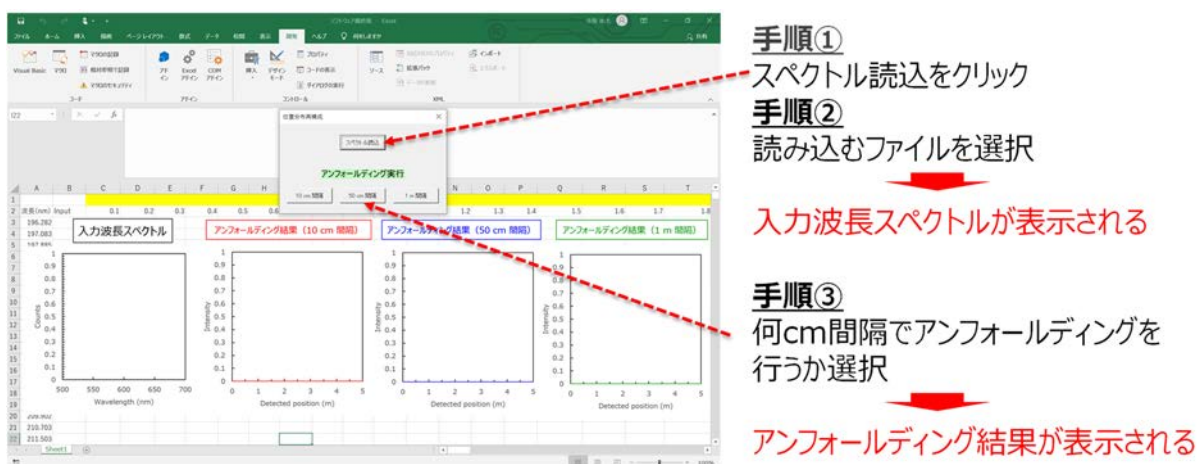


図 26 位置分布再構成簡易アプリ



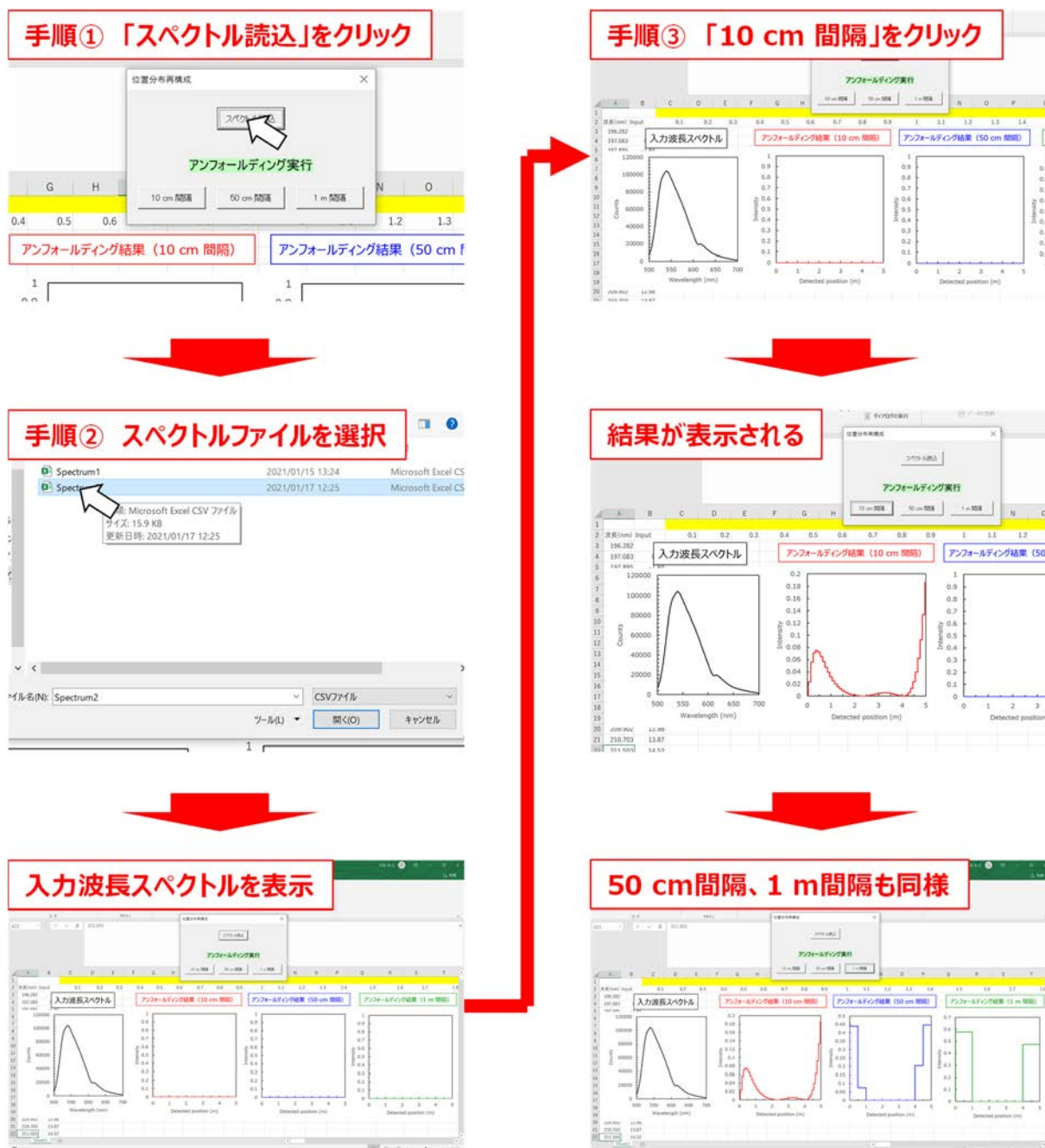


図 27 位置分布再構成簡易アプリの動作フロー

### 3.5 研究推進

本研究を推進するにあたり、これまでに連携先の JAEA 及び CLADS との連携を密にして、研究を進めた。具体的には、定期的な研究進捗状況の情報交換、照射室での共同実験、共著での国内会議発表等が挙げられる。

また、本研究を通じて下記の発表を行うことができた。

<学会発表（国内会議）>

1)

講演タイトル：Development of Radiation Distribution Sensing Method using One-Dimensional Optical Fiber for Fukushima Daiichi NPS Decommissioning

形式：口頭発表

発表者：寺阪祐太、渡辺賢一、瓜谷章、佐藤優樹、鳥居建男、若井田育夫

場所（学会名）：オンライン（Laser Solution for Space and the Earth 2020）

日程：令和2年4月

2)

講演タイトル：飛行時間法に基づく小口径一次元位置敏感型石英光ファイバ放射線センサの高放射線環境適用に向けた基礎評価

形式：口頭発表

発表者：寺阪祐太、渡辺賢一、瓜谷章

場所（学会名）：オンライン（令和2年度日本原子力学会北関東支部リモート若手研究者・技術者発表会）

日程：令和2年10月

3)

講演タイトル：光ファイバー発光波長スペクトルのアンフォールディングによる放射線源分布測定法の開発

形式：口頭発表

発表者：寺阪祐太、渡辺賢一、瓜谷章

場所（学会名）：オンライン（日本放射線安全管理学会 第19回学術大会）

日程：令和2年12月

4)

講演タイトル：波長スペクトルアンフォールディングによる放射線源分布測定手法の開発と検証

形式：口頭発表

発表者：寺阪祐太、渡辺賢一、瓜谷章

場所（学会名）：オンライン（日本原子力学会2021年春の年会）

日程：令和3年3月

<論文発表>

1)

論文タイトル : Feasibility Study of the One-Dimensional Radiation Distribution Sensing Method Using an Optical Fiber Sensor Based on Wavelength Spectrum Unfolding

著者名 : Yuta Terasaka, Kenichi Watanabe, Akira Uritani, Atsushi Yamazaki, Yuki Sato, Tatsuo Torii and Ikuo Wakaida

雑誌名 : Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science

2)

論文タイトル : Evaluation of a one-dimensional position-sensitive quartz optical fiber sensor based on the time-of-flight method for high radiation dose rate applications

著者名 : Yuta Terasaka, Kenichi Watanabe and Akira Uritani

雑誌名 : Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A

<受賞等>

1)

受賞名 (受賞学会) : 優秀プレゼンテーション賞 (日本放射線安全管理学会 第19回学術大会)

受賞発表 : 光ファイバー発光波長スペクトルのアンフォールディングによる放射線源分布測定法の開発

受賞者 : 寺阪祐太

#### 4. 結言

本研究では 1F の廃炉を進めるにあたり把握する必要がある建屋内作業環境の放射線源の位置分布を測定するセンサとして、最も確実に汚染源の位置分布の把握を行うことができる密着型で、かつ「点」ではなく「線」に沿った放射線源分布が把握できる一次元光ファイバ放射線センサの開発を進めた。

JAEA では「飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの高線量率場への対応」を、名古屋大学では「広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの設計」及び「波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの開発」を担当し、以下の成果を得た。

##### (1) 飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの高線量率場への対応（連携先：JAEA）

異なる素材・異なる径の光ファイバを複数用意し、検出効率と位置分解能を評価した。その結果、チェレンコフ光の検出に基づく石英光ファイバを用いた場合、PSF と比較して位置分解能が格段に向上することを見出した。更に、小口径の PSF では位置分解能が劣化したのに対し、小口径の石英光ファイバでは位置分解能を維持することも明らかとなった。以上の点から最終形として小口径石英光ファイバを選定することを決定し、ガンマ線照射施設で耐放射線性試験と位置分布測定試験を行った。その結果、積算 1 kGy までの耐放射線性と 200 mSv/h 超の線量率での優れた位置分解能（約 20 cm）を確認した。

##### (2) 広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの設計

大口径・中口径・小口径の光ファイバを各々平行に読み出せる多チャンネル飛行時間分析回路を作製した。この結果を基に、最終的なシステム概念として、大・中・小口径の石英ファイバに加え、ユーザビリティ及び現場応用を見据え防水性も備えた広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサを設計した。

##### (3) 広ダイナミックレンジ飛行時間型一次元光ファイバ放射線センサの性能評価

（連携先：JAEA）

部分要素センサとして PSF と石英光ファイバを選定し、位置分解能及び検出効率を評価した。その結果、感度は PSF が石英光ファイバと比較して 3 桁程度上回る一方で、位置分解能は石英光ファイバが約 18 cm、PSF が 49～108 cm と、石英光ファイバが優れるという結果を得た。中口径（ $\Phi 0.6$  mm、ファイバ長 10 m）の石英光ファイバと多チャンネル飛行時間分析回路を用いた線源測定試験を行った。線源位置に応じたピークが明確に確認でき、本研究で製作した多チャンネル飛行時間分析回路が TOF センサとして適用可能であることがわかった。

##### (4) 波長分解型一次元光ファイバ放射線センサの開発

PSF、光伝送用ファイバ及びポータブル分光器から構成される原理実証用プロトタイプ機を構築し、基本的な位置分布測定性能を確認した。加えて、ガンマ線照射施設において放射線位置分布測定試験を実施し、3 Gy/h の高線量率で放射線分布測定が可能であることを実証した。更に、VBA を用いて簡易な位置分布導出ソフトウェアを作成した。

参考文献

- [1] Tokyo Electric Power Company Holdings, Survey Map of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, <https://www4.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/f1/surveymap/index-e.html> (参照：2021年3月31日)。
- [2] 江本武彦, 鳥居建男, 野崎達夫, 安藤秀樹, シンチレーション光ファイバーによる放射線空間分布測定, 放射線, Vol.21, No.3, 1995, pp.49-58.
- [3] Japan Atomic Energy Agency, Fiber Detector for Monitoring of Contaminated Water - Demonstration Experiment at the TEPCO's Fukushima Daiichi NPS -, JAEA R&D Review 2017-18, 2018, p.22.
- [4] 寺阪祐太, 光ファイバセンサを用いた光子飛行時間および波長分解分析に基づく放射線分布測定法に関する研究, 名古屋大学博士学位論文, 2021年9月.

This is a blank page.



