

JAEA-Review 2020-023 DOI:10.11484/jaea-review-2020-023

# 10th

### 東京電力福島第一原子力発電所事故の対処に係る研究開発 -ふくしま復興に向けた10年の取り組み-

Research and Development(R&D) for the Fukushima Daiichi Accident - 10 years' Activities on Fukushima Revitalization -

#### 福島研究開発部門

Sector of Fukushima Research and Development



December 2020 Japan Atomic Energy Agency

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, 2020

JAEA-Review 2020-023

#### 東京電力福島第一原子力発電所事故の対処に係る研究開発 ーふくしま復興に向けた 10 年の取り組み-

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門

(2020年10月5日受理)

2011 年 3 月 11 日、東日本大震災により、東京電力福島第一原子力発電所(以下「1F」 という)事故が発生した。日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」という)は災害対 策基本法指定の公共機関として、緊急時対応などを含めた対応を行うとともに、我が国唯 一の原子力に関する総合的研究開発機関として、1F 事故の対処に関する研究開発を行って きた。

本報告書は、事故直後から10年後の現在に至るまでの、原子力機構の福島復興対応に関 する活動を取りまとめたものである。具体的には、事故直後の緊急時対応、福島部門の設 置を含む体制や基盤の整備、廃炉や環境回復に対する研究開発成果、今後の展望について 記載している。

いわき事務所:〒970-8026 福島県いわき市平字大町 7-1 平セントラルビル8階

#### Research and Development(R&D) for the Fukushima Daiichi Accident

- 10 years' Activities on Fukushima Revitalization -

Sector of Fukushima Research and Development Japan Atomic Energy Agency Iwaki-shi, Fukushima-ken

(Received October 5, 2020)

The Great East Japan Earthquake on March 11, 2011, caused the accident of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F), operated by Tokyo Electric Power Company Holdings, Ltd. Japan Atomic Energy Agency (JAEA), as a designated institution of the Basic Act on Disaster Control Measures, supported lots of activities on emergency response, environmental remediation and so on. As a unique nuclear R&D institution, JAEA conducted the Research and Development on Fukushima Daiichi Decommissioning and Environmental Restoration.

This report summarizes the 10 years' JAEA activities on Fukushima Revitalization, including emergency responses just after the accident, construction on the R&D organization and infrastructures, results of R&D towards 1F decommissioning and environmental restoration and so on.

Keywords: The Accident of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Activities on Emergency Response, Fukushima Revitalization, 1F Decommissioning, Environmental Restoration

#### 目 次

1.	東京電	力福島第一原子力発電所事故後の緊急時対応から
	~福	島研究開発部門の沿革~・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
	1.1	1F 事故と環境への影響の概要 · · · · · · · · · · · · · · · · · · 1
	1.2	事故後の緊急時対応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3
	1.3	福島研究開発部門の組織・沿革
2.	国の方舗	計と研究開発体制・・・・・・ 14
	2.1	国の方針
	2.2	1Fの廃止措置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・14
	2.3	オフサイトの環境回復・・・・・ 17
3.	研究開發	発基盤の整備・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	3.1	国の方針
	3.2	楢葉遠隔技術開発センター・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
	3.3	大熊分析・研究センター・・・・ 30
	3.4	廃炉国際共同研究センター(現廃炉環境国際共同研究センター) · 35
	3.5	福島環境安全センター(現廃炉環境国際共同研究センター) 38
4.	廃止措置	置等に向けた研究開発 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	4.1	研究開発の進め方・・・・・ 40
	4.2	廃止措置等に向けた研究開発の進捗・・・・・・・・・・・・・・54
5.	環境回行	复に係る研究開発・・・・・ 82
	5.1	研究開発の進め方・・・・・ 82
	5.2	政府プロジェクトとしての研究開発(緊急時からの対応) 86
	5.3	除染・モニタリング・被ばく評価に係る研究開発の進捗 97
	5.4	環境動態研究の進捗・・・・・ 106
	5.5	環境創造センターにおける活動・・・・・ 120
6.	研究開發	発成果の現場への実装・・・・・ 125
	6.1	地元企業への技術移転・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 125
	6.2	地元等への技術情報の還元・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 131
7.	今後に	向けて136
付約	禄 本文	で紹介した成果に係わるプレス発表・・・・・・・・・・・・・・・・138

#### Contents

1. Eme	ergency response just after the 1F accident
- H	listory of Sector of Fukushima Research and Development - ······ 1
1.1	Outline of the 1F accident and the effect to the environment 1
1.2	Emergency response just after the accident
1.3	Organization and history of Sector of Fukushima Research and
	Development ····· 11
2. Nat	ional policy and R&D system ······ 14
2.1	National policy 14
2.2	1F decommissioning 14
2.3	Environmental restoration 17
3. Dev	velopment of the R&D infrastructures ······ 20
3.1	National policy 20
3.2	Naraha Center for Remote Control Technology Development 23
3.3	Okuma Analysis and Research Center
3.4	Collaboration Laboratories for Advanced Decommissioning Science
	(CLADS)
3.5	Fukushima Environmental Safety Center (current CLADS) ······· 38
4. R&I	) towards 1F decommissioning ······ 40
4.1	How to proceed with R&D $\cdots \qquad 40$
4.2	Progress of R&D towards 1F decommissioning
5. R&D	) towards environmental restoration ····· 82
5.1	How to proceed with R&D $\cdots$ 82
5.2	R&D as governmental project since emergency response
5.3	Progress of R&D on decontamination, environmental monitoring and
	individual dose evaluation 97
5.4	Progress of research on assessing natural mobilization of Cs in
	the environment 106
5.5	Collaboration with Fukushima prefecture and National Institute
	Environmental Studies in Fukushima Prefectural Center for
	Environmental Creation 120

6. Implementation of R&D results in the field	125
6.1 Technology transfer to the companies in Fukushima	125
6.2 Restoration of technology information to Fukushima	131
7. For the future ·····	136
Appendix ·····	138

#### 図表リスト

1章		
図 1-1	80 km 圏内における空間線量率分布の変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
図 1-2	事故直後の NEAT·····	3
図 1-3	原子力機構 専門家活動	3
図 1-4	身体汚染サーベイの様子・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
図 1-5	福島市杉妻会館の2部屋に寝泊まりし、事故発生直後の環境モニタリングを	
	実施 ·····	4
図 1-6	NEAT に文部科学省「健康相談ホットライン」を開設し、住民の方々からの	
	放射線に関する電話相談を実施・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
図 1-7	有人ヘリによるモニタリング(2011年7月)	5
図 1-8	無人ヘリによる空からのモニタリング試験(2011 年 12 月) ・・・・・	5
図 1-9	地上基地局(専用車内)へ送られるデータ(2011 年 12 月) ・・・・・	5
図 1-10	各地のモニタリング結果を基にした放射性セシウムの沈着量の3次元分布図	
	例(2012 年 1 月)	5
図 1-11	原子力機構が策定した学校プール水の除染の手引・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
図 1-12	南相馬市ハートランドはらまちでの除染試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
図 1-13	伊達市下小国集会所周辺での除染試験、線量測定結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
図 1-14	表土剥ぎ取りによる農地除染作業(除染モデル実証事業) ・・・・・・・・・	8
図 1-15	民家の除染作業(除染モデル実証事業) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
図 1-16	大熊町内での路面除染作業の様子・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
図 1-17	いわき市内の保育所でのプール除染作業の様子 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
図 1-18	川俣町での環境動態研究(放射線量率・分布の測定・評価作業)	
	ガンマープロッター(可搬型平面ガンマ線分布計測装置)所持・・・・・ 1	0
図 1-19	川内村の荻ダムとその周辺で、放射性物質の挙動を調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	0
図 1-20	PTA の皆さんとの遊具除染の様子(文部科学省「チルドレンファースト」)・1	0
図 1-21	組織・沿革・・・・・・・1	3
図 1-22	福島県内に所在する福島研究開発拠点の組織 (2020.4.1 現在) ・・・・・ 1	3
2章		
図 2-1	1Fの廃止措置の全体工程······1	5
図 2-2	1F の廃止措置に係る関係機関の役割分担・・・・・・ 1	6
図 2-3	1Fの廃止措置に向けた研究開発体制・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1	6

2	辛	
J	早	

図 3-1	福島イノベーション・コースト構想の一翼を担う廃炉関連施設	22
図 3-2	楢葉遠隔技術開発センター開所式の様子 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
図 3-3	楢葉遠隔技術開発センターの全景(2019 年 7 月撮影)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
図 3-4	要素試験エリアの試験設備;(a)ロボット試験用水槽、(b)モックアップ階段	L Z
	(c)モーションキャプチャ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
図 3-5	実規模試験;(a)試験体、(b)試験体模式図 ·····	25
図 3-6	VR システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	26
図 3-7	遠隔操作機器の操作訓練システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	27
図 3-8	標準試験場;(a)グレーチング面による狭隘走行環境、(b)貫通孔等の配管	
	模擬環境 ••••••	27
図 3-9	ロボットシミュレータの操作画面 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
図 3-10	NARREC の累積利用件数・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
図 3-11	NARREC の利用事例;(a)アクセス調査装置のモックアップ試験(IRID/	
	三菱重工業)、(b)レスキューロボットの性能検証試験(東京工芸大学)、	
	(c)災害救援物資輸送ダクテッド・ファン UAV の実用化開発(IHI、	
	協栄精機)	29
図 3-12	放射性物質分析・研究施設位置図	30
図 3-13	施設管理棟開所式の様子・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	31
図 3-14	施設管理棟・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	31
図 3-15	施設管理棟断面 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	31
図 3-16	ワークショップ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	31
図 3-17	第1棟の外観(2020年6月撮影)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
図 3-18	新たな ICP-MS を導入した分析プロセスの概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・	33
図 3-19	自動化技術を取り入れた分離装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	34
図 3-20	国際共同研究棟・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	35
図 3-21	多目的試験棟・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36
図 3-22	制御棒ブレード破損試験装置及びレーザー加熱装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	37
図 3-23	福島県環境創造センター交流棟・本館・研究棟(三春町) ・・・・・・・・・	38
図 3-24	福島県環境創造センター環境放射線センター(南相馬市) ・・・・・	38
⊠ 3-25	Ge 半導体検出器·····	39
表 3-1	施設・設備概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36
表 3-2	研究棟での設備概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	39

	-
4	曱
- <b>L</b>	_

図 4-1	福島第一原子力発電所の廃炉に係る(a)研究開発実施体制の概略(NDF 戦略	
	プランより抜粋)、(b)福島研究開発部門の研究開発体制・・・・・・・・・・	41
図 4-2	廃炉基盤研究プラットフォームの位置付け ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	43
図 4-3	若手研究者による成果発表・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	44
図 4-4	FRC の様子 ・・・・・	44
図 4-5	英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業	47
図 4-6	福島第一原子力発電所廃炉のための『基礎・基盤研究の全体マップ』	49
図 4-7	基礎・基盤研究の全体マップと CLADS 研究との関連・位置付け	51
図 4-8	連携ラボの概要(研究人材育成型廃炉研究プログラム) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	52
図 4-9	福島原子力事故関連情報アーカイブ (FNAA) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
図 4-10	TMI-2 で利用された取り出し工具の分類・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	54
図 4-11	(U,Zr)02ビッカース硬さの組成依存性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	55
図 4-12	燃料デブリとして生成すると考えられる各相の微小硬さ ・・・・・・・・・	55
図 4-13	試験に利用した TMI−2 燃料デブリ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	56
図 4-14	大型 MCCI 試験生成物の外観・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	56
図 4-15	燃料デブリの処置シナリオの例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	57
図 4-16	汚染水試料に検出された核種の濃度の変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	60
図 4-17	原子炉建屋内で採取された瓦礫試料に検出された核種の濃度 ・・・・・	61
図 4-18	実物の吸着塔における Cs の吸着分布 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	62
図 4-19	汚染水処理による二次廃棄物の試験固化体の例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	63
図 4-20	適用可能な固化処理技術を抽出する方法論のイメージ図 ・・・・・・・・・・	64
図 4-21	化学物質による放射性核種の吸着分配係数への影響に関する実験例	65
図 4-22	2 号機炉内状況推定図(全体)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	66
図 4-23	2 号機炉内状況推定図(局所)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	67
図 4-24	炉心露出、減圧、燃料崩落の予測結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	67
図 4-25	炉心エネルギーの評価結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	68
図 4-26	制御棒ブレード破損試験装置と模擬制御棒ブレード試験体の外観	68
図 4-27	1~3 号機における燃料デブリの主要なペデスタル移行時間帯の推定結果・・	69
図 4-28	小型軽量コンプトンカメラ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	71
図 4-29	1F タービン建屋内での汚染箇所の特定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	72
図 4-30	ドローンに搭載したコンプトンカメラと3次元位置測定センサー	
	(3D-LiDAR) ·····	72
図 4-31	帰還困難区域での測定結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	72
図 4-32	iRIS-V に用いられている検出器と車輌・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	73
図 4-33	iRIS-V を用いた放射線源の可視化(パノラマ画像)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	73

図 4-34	α ダストモニタの検出部・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	74
図 4-35	α 核種可視化検出器・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	74
図 4-36	1F でのスミヤ試料と Pu 試料の α 線エネルギースペクトルの比較・・・・・・	75
図 4-37	α 線を放出する粒子の α 線分布可視化結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	75
図 4-38	開発手法を用いた立体復元結果の例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	76
図 4-39	レーザー遠隔分析技術の基本概念	76
図 4-40	LIBS による U、Pu 発光スペクトル例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	76
図 4-41	共鳴吸収分光による Pu 同位体測定例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	76
図 4-42	光ファイバー利用レーザー遠隔分析技術の概念(上)と小型化した可搬型	
	装置の外観(下)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	77
図 4-43	光ファイバーLIBS による水中での Zr/U 混合酸化物のスペクトル取得例 …	77
図 4-44	マイクロチップレーザー利用 LIBS 計測系の概念 ・・・・・・・・・・・・・・・	78
図 4-45	採取デブリの受払セルにおけるスクリーニング技術提案例 ・・・・・・・・・	78
表 4-1	FRC 開催状況······	45
表 4-2	主な国際協力・・・・・・	48
表 4-3	除染処理がなされた汚染水と除去された <sup>137</sup> Cs 放射能の量	60
5章		
図 5-1	放射線モニタリングに関する原子力機構の対応経緯	86
図 5-2	福島市における代表的な空間線量率モニタリング例 ・・・・・・・・・・・	87
図 5-3	2011 年と 2017 年に実施された政府プロジェクトによるモニタリング結果	88
図 5-4	森林除染試験結果(除染ガイドライン作成調査業務の例)	92
図 5-5	適用した除染方法の例(宅地)	93
図 5-6	壁の除染効果(除染方法と材質の違いによる低減率の比較)	93
図 5-7	適用した除染方法の例(グラウンド) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	94
図 5-8	適用した除染方法の例(道路) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	95
図 5-9	RESET による除染シミュレーションの流れ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	97
図 5-10	RESET による居住制限区域と帰還困難区域との境界での除染効果の予測例・	97
図 5-11	帰還困難区域における解析対象とした宅地・農地 ・・・・・・・・・・・・	98
図 5-12	除染前の空間線量率予測マップ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ]	100
図 5-13	除染後の空間線量率予測マップ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ]	100
図 5-14	空間線量率の区分毎の除染後の宅地・農地の面積比率の推移予測	
	(参考として未除染の場合も提示)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	101
図 5-15	2013 年と 2017 年に実施された無人機によるモニタリング結果・・・・・	102
図 5-16	プラスチックシンチレーションファイバの概組・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	103

図 5-17	除染効果確認のためのシステムと除染前後での測定例 ・・・・・・・・・	103
図 5-18	農業用ため池底の放射線分布測定例	104
図 5-19	スペクトル情報を利用した水底の深度方向の放射性セシウム分布推定	
	手法	104
図 5-20	福島沖の河口域で放射線モニタリングに活用されている無人観測船	
	(ASV)	104
図 5-21	復興拠点のモニタリング例・・・・・	105
図 5-22	復興拠点の被ばく評価例・・・・・	105
図 5-23	環境中におけるセシウムの化学形態と特徴の違い ・・・・・・・・・・・	106
図 5-24	環境中におけるセシウムの動態研究のモチベーション ・・・・・	106
図 5-25	調査対象河川水系と空間線量率分布(2014 年 11 月 7 日時点)・・・・・・・・	107
図 5-26	森林内におけるセシウム移動量調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	107
図 5-27	小高川河川敷の空間線量率分布の経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	108
図 5-28	太田川(左)及び請戸川(右)における河川水中の溶存態セシウム濃度	
	(上)及び懸濁態中のセシウム濃度(下)の経時変化・・・・・・・・・・・	109
図 5-29	大柿ダム湖に流入する2河川(請戸川・小出谷川)および大柿ダム放流	
	水中の溶存態セシウム濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	110
図 5-30	大柿ダム湖水中の溶存態セシウム濃度の深さ方向の分布 ・・・・・・・・・	110
図 5-31	請戸川河口域の堆積物の分布と堆積物中放射性セシウム濃度の経時変化・	111
図 5-32	主要な市街地表面要素ごとの相対的なセシウム沈着量の経時変化	111
図 5-33	高太石山の空間線量率の分布(1m高さ、2017年11月測定) ・・・・・・・	112
図 5-34	環境中におけるセシウムの動態解析ツールの概要 ・・・・・・・・・・・・	113
図 5-35	水環境シミュレーションを用いた河川水系からのセシウム流出比 ・・・・・・	114
図 5-36	①河川への落葉、②落葉層からの流出、③有機土壌層からの流出を考慮	
	した渓流魚中のセシウム濃度予測・・・・・	116
図 5-37	「福島総合環境情報サイト(https://fukushima.jaea.go.jp/ceis/)」	
	の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	117
図 5-38	林野火災時の大気浮遊じん中セシウム濃度(福島県測定)及びレボグル	
	コサン濃度(国環研測定)の経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	121
図 5-39	林野火災前後の空間線量率分布(原子力機構測定)の比較・・・・・・・・・・	121
表 5-1	土地利用区分毎の除染方法の評価結果のまとめ・・・・・・・・・・・・・	· 90
表 5-2	森林からのセシウム流出率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	108

C	
6	早

図 6-1	プラスチックシンチレーションファイバ検出器	125
図 6-2	放射能分布マップによる浚渫範囲の変化の確認	126
図 6-3	PSF 検出器 ·····	127
図 6-4	東京電力の設置した PSF モニター・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	127
図 6-5	事業の成果概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	128
図 6-6	事業体制・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	129
図 6-7	異なる手法による比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	130
図 6-8	第4回廃炉創造ロボコン;(a)競技の様子、(b)原子力機構理事長賞	
	(技術賞)を受賞したチーム(福島工業高等専門学校)・・・・・・・・・・・	131
図 6-9	ロボット操作実習プログラムの整備・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	132
図 6-10	福島県内企業・大学廃炉・災害対応ロボット関連技術展示実演会	
	(2018年12月)	132
図 6-11	大熊分析・研究センターにおける施設公開	132
図 6-12	地元とのふれあい・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	132
図 6-13	各自治体等に対する除染活動への支援例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	133
図 6-14	答える会の様子・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	134
図 6-15	答える会 地域別実施状況(2020年3月末時点)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	134
図 6-16	人材育成事業支援 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	135
図 6-17	WBC 車 ·····	135
図 6-18	WBC 検査結果の説明・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	135

# はじめに

日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」 という)の福島研究開発部門における研究開発業 務に関し、平素より多大なご理解とご支援を賜り 誠にありがとうございます。

私ども原子力機構は、2011年3月に発生した 東京電力ホールディングス福島第一原子力発電 所(以下「1F」という)の事故直後から福島県に 職員を派遣し、環境モニタリングや除染の実証事 業等の活動を開始しました。それ以降、福島の環 境回復及び1Fの廃止措置に技術的側面から積極 的に関与し、基礎基盤研究から研究成果の現場適 用に至る幅広い研究開発に取り組んでおります。 また、事故直後の緊急時体制から段階的に組織、 体制を整備し、2014年に福島研究開発部門を設 置して福島県内での研究開発基盤を整備しつつ 現在に至っております。

1Fの廃止措置については、国が定めた「東京 電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電 所の廃止措置に向けた中長期ロードマップ」に基 づき、富岡町にある「廃炉環境国際共同研究セン ター」を中核として、燃料デブリの状況把握、炉 内状況の解明、放射性廃棄物の処理・処分、遠隔 操作・計測技術等に係る研究開発を、国内外の大 学、研究機関とも連携して実施しております。ま た楢葉町には「楢葉遠隔技術開発センター」を整 備し、1Fの近傍では「大熊分析・研究センター」 の建設を進めてきており、遠隔技術の研究開発・ 実証や燃料デブリ、放射性廃棄物の分析等、1Fの 廃止措置に必要な研究施設の整備を進めており ます。

福島の環境回復については、国が定めた「福島 復興再生基本方針」を的確に遂行するため、福島 県、原子力機構及び国立環境研究所の三機関が連 携して福島県環境創造センター中長期取組方針 を定めております。この方針等に基づき、三機関 連携のもと、放射線監視・計測に係る技術開発、 河川や森林での放射性セシウム等に関する環境 動態研究等を実施してきております。また、原子 力機構が有する放射線モニタリング技術、被ばく 評価技術を活用し、避難区域の解除、復興拠点の 整備に必要なデータの提供、住民の方々への説明 等も継続しております。

2021年3月には1F事故から10年となります。 この節目に、事故直後の緊急時対応から規模を拡 大しつつ取り組んできた活動をはじめとし、現在 に至るまでの研究開発に関する体制や基盤の整 備状況、研究開発成果等を取りまとめ、報告書と して公表することといたしました。

福島県では、避難区域が解除され、帰還困難区 域内の復興拠点が整備されつつあるなど、環境の 回復・整備が進展しておりますが、福島の本格的 な復興は道半ばであると思います。1Fの状況も、 野戦病院と称された状態からはかなり改善しま したが、今後は、燃料デブリ取り出し等、より難 易度の高い作業が予定されており、原子力機構の 役割はますます重要になってくるものと考えて おります。

今後も、引き続き、1Fの廃止措置、福島の環境 回復の研究開発が福島の復興につながるよう原 子力機構福島研究開発部門が一丸となって努め て参りたいと思います。引き続き、よろしくお願 いいたします。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門長 野田 耕一

# 1. 東京電力福島第一原子力発電所事故後の 緊急時対応から

# ~福島研究開発部門の沿革~

#### 1.1 IF 事故と環境への影響の概要

#### 1.1.1 1F事故の概要

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災に伴う東京 電力株式会社(現東京電力ホールディングス株 式会社、以下「東京電力」という)福島第一原 子力発電所(以下「1F」という)の事故から 10 年が経過しようとしている。1F 事故に伴い 1~ 3 号機が炉心損傷、溶融に至り、放射性物質が 環境中へ放出された。

運転中であった 1~3 号機は地震により直ち に自動停止したものの、外部電源を喪失し、そ の後の津波による非常用発電機の停止により、 全交流電源喪失の事態となった。炉心への冷却 用の注水の失敗による炉心損傷・溶融、それに 伴う圧力容器内と格納容器内の圧力上昇、格納 容器内圧力減少のためのベントの実施、炉心溶 融に伴う水素の発生、原子炉建屋における水素 爆発(1、3号機と3号機に隣接する運転停止中 だった4号機)、2号機圧力抑制室の圧力急低下 等の事故シーケンスをたどり、大量の放射性物 質が環境中へ放出された。1F 事故の経緯等、詳 しくは資料<sup>1-1)、1-2)</sup>を参照頂きたい。

#### 1.1.2 1F事故による環境影響の概要

1F 事故により大気中に放出された放射性物 質の地表への沈着は、放出時の気象条件(風向 きや降雨、降雪の有無等)、地形や土地利用状況 に依存する。1F 事故後の初期は、揮発性が高い (蒸発しやすく拡散しやすい)放射性ヨウ素 (<sup>131</sup>I:半減期約8日)等の短半減期核種の沈着 による空間線量率等への寄与が支配的であった が、半減期が短いことから、初期のころの高い 空間線量率は速やかに低下した。現在では放射 性セシウム(<sup>137</sup>Cs:半減期30年と<sup>134</sup>Cs:半減期 2年)が支配的となっている。揮発性の小さい (蒸発しにくく拡散しにくい)放射性物質であ るストロンチウム(<sup>90</sup>Sr)の沈着量は<sup>137</sup>Csと比 ベ2~4桁低くなっており、さらに非揮発性のプ ルトニウム(Pu)は1Fの事故前の環境中での測 定値(大気中核実験によるもの)のほぼ変動範 囲内であった。

1F 事故では、炉心の火災を招いたチェルノブ イリの事故とは異なり、格納容器が揮発性の放 射性物質の放出を抑制し、非揮発性の放射性物 質を格納容器から外にほとんど出さなかったこ とから、希ガスを除く揮発性の放射性物質の環 境への放出はチェルノブイリ事故の 10%に留 まり、非揮発性の放射性物質の放出は極めて少 なかった。

事故直後は、地震に伴う津波や電源喪失の影 響で 1F 構内の排気塔や周辺のほとんどのモニ タリング機器が機能せず、主にモニタリングカ ーによる線量率分布の実測が行われたが、その 後、米国エネルギー省 (DOE)の協力を得て、航 空機モニタリングにより空間線量率を測定し、 それらのデータを用いて放射性物質沈着分布の マップを作成した。これらのマップは、1F から 北西方向の計画的避難区域の設定・見直しに重 要な役割を果たした。また、人による定点測定、 歩行サーベイ、走行サーベイ等の詳細なモニタ リング情報によるマップも作成された (図 1-1)。 空間線量率の経時変化は、土地の利用状況と 測定手法により異なる傾向を示している。撹乱 のない平坦地上の空間線量率は事故直後の 2011年6月に比べて4年間でほぼ4分の1に、 走行サーベイにより測定した道路上の空間線量 率はほぼ5分の1に減少した(純粋な物理的壊 変では当初の5分の2までは減らない)。森林 から河川水系への放射性セシウムの年間流出量 は、懸濁態(土壌粒子等に吸着された状態)で、 樹種や傾斜によらず初期沈着量の 0.1%程度と 極めて少ないこと〔溶存態(イオンのように水 に溶けた状態)では地下水が湧水点から森林表 土に流出する過程で水に僅かに溶出する〕や、 ダムのある河川での懸濁態の移動は大幅に抑制 されていることなど、河川水系全体での放射性 セシウムの量と動きは極めて限定的であること が定量的に明らかになった。



#### 図 1-1 80 km 圏内における空間線量率分布の変化

80 km 圏内を1 km メッシュに分割し、各メッシュで1か所、撹乱のない平坦地を選んでサーベイメータを使用して行った 空間線量率の測定結果。データのないメッシュについては航空機モニタリングの結果を地上値に規格化した。 ※事故1か月後のマップは異なる手法により作成

#### 1.2 事故後の緊急時対応

#### 1.2.1 緊急時モニタリング

日本原子力研究開発機構(以下「原子力機 構」という)は災害対策基本法等に定める指定 公共機関の一つであり、2011年3月11日午後 2時46分の地震発生直後から緊急時支援体制に 移行し、活動を開始した。午後10時46分、文 部科学省による現地への派遣要請を受け、12日 午前1時54分には、第1陣として茨城県にあ る原子力機構の放射線管理部門等の職員7名を 福島県大熊町の福島県原子力災害対策センター

(以下「オフサイトセンター」という)に出動 させた。これは、現場での緊急時モニタリング 活動等の支援を目的に、原子力機構原子力緊急 時支援・研修センター(以下「NEAT」という) から出動させたものである(図1-2、1-3)。その 7名が茨城県の航空自衛隊百里基地から自衛隊 のヘリコプター等で移動し、オフサイトセンタ ーに到着したのが午前6時頃である。すぐさま 隣接する福島県原子力センターを拠点として緊 急時モニタリング計画の立案を行うとともに、 午前8時頃には大熊町のオフサイトセンターの 北10 km 方面で環境の放射線モニタリング活動 を開始した。(その作業の途中、午後3時36分 に1号機で水素爆発が発生する。)

翌 13 日午前 11 時 10 分には、陸路から福島 県入りした第2 陣がモニタリング車を伴って大



図 1-2 事故直後の NEAT



図 1-3 原子力機構 専門家活動

熊町のオフサイトセンターに到着、第1陣と合 流した。地震、津波により家屋倒壊、道路損壊 が発生し、車での移動が困難な中、また、発電 所の事故の情報も十分に得られない状況の中、 周辺環境の放射線測定に加えて、オフサイトセ ンターでの放射線管理や避難所に避難した住民 の方々等の汚染検査等、夜を徹しての対応がな された。

14 日午前11時01分には、3号機で水素爆 発が発生し、オフサイトセンター周辺の空間線 量率が上昇した。このことから、その後の活動 は、政府の現地対策本部が移転した福島県庁を 拠点として行われることとなった。

その後も原子力機構では緊急事態への対応・ 支援として、順次、国や自治体に職員を派遣し、 緊急時モニタリング、移動式全身カウンタ車の 派遣、文部科学省や福島県(旧原子力安全・保 安院)の健康相談窓口の設置等の支援・対応を 矢継ぎ早に実施していった(図1-4、1-5、1-6)。 これら現地派遣の采配については、1999年9月 30日に茨城県東海村で発生したJCO事故後に発 足した NEAT が中心的な役割を担った。

これらの活動を行うために、原子力機構の全 国の各拠点から職員が動員されたが、その数は 2011 年度末までに、延べ約 4.5 万人となった (2011 年 3 月 11 日から 2012 年 3 月 31 日まで の延人数、45,318 人)。



図1-4 身体汚染サーベイの様子



図 1-5 福島市杉妻会館の2部屋に寝泊まりし、事 故発生直後の環境モニタリングを実施



図 1-6 NEAT に文部科学省「健康相談ホットライン」 を開設し、住民の方々からの放射線に関する電話相 談を実施

#### 1.2.2 モニタリング・マッピング

原子力機構は、事故発生直後から、住民の放 射線防護の観点で、各地域、測定地点において、 日々の空間線量率を測定し、数値を更新してき た。このモニタリングは原子力機構だけでなく、 当時の原子力安全・保安院や福島県、原子力事 業者等でも実施されており、政府の現地対策本 部等での調整の元、協力して行われてきた。デ ータは原子力機構のアーカイブからアクセス可 能であり、詳しく見ることができる(https://farchive. jaea. go. jp/、4.1.4参照)。

その後、文部科学省から委託を受けた放射線 量を地図上に図示する事業(以下「マップ事業」 という)では、土壌試料の採取地点の空間線量 率の取得(点のデータを取得)や、自動車等に 搭載して空間線量率を測定できる装置:KURAMA

(Kyoto University RAdiation MApping system) を用いた走行サーベイ(線のデータを取得)な どを実施した。この走行サーベイのデータは、 土地利用区分に応じた空間線量率の変化傾向を 統計解析するための基本的なデータとなってい る。

また、サーベイメータや走行サーベイと併せ



図 1-7 有人ヘリによるモニタリング (2011 年 7 月)



図 1-8 無人へリによる空からのモニタリング試験 (2011 年 12 月)

て、より広域のモニタリングの必要性から、文 部科学省は米国エネルギー省の協力を得て、日 米共同で航空機によるモニタリング(測定実施 日:2011年4月6日~29日)を開始した。2011 年5月初旬まで行われた共同調査の後は、日本 側だけでモニタリングを継続する必要があり、 原子力機構と(財)原子力安全技術センターと が合同で、自衛隊のヘリコプターにより、1Fか ら半径10km~40kmの範囲での調査(測定実施 日:2011年5月31日~7月2日)を行った。

それ以降は、原子力機構が文部科学省の委託 を受け、航空機モニタリングを実施することと なった。雪が降る前までに東日本全域(青森県 から福井県・岐阜県・愛知県まで)の放射線量 分布を調査するため、民間企業の協力を得て、 ヘリコプター4 機体制で東日本各県の上空を飛 び、モニタリング(測定実施日:2011年6月22



図 1-9 地上基地局(専用車内)へ送られるデータ (2011 年 12 月)



図 1-10 各地のモニタリング結果を基にした放射性 セシウムの沈着量の3次元分布図例(2012年1月)<sup>1-3</sup>

日~10月20日)を実施した(図1-7)。この中 では必要となる様々なマニュアル類が整備され、 無人へリの使用も含め(図1-8、1-9)、我が国の 航空機モニタリング技術の標準化に向けた取り 組みがなされた(図1-10)。

また、地上高300 mの上空から広い範囲で行 う有人へリコプターを使ったモニタリングと、 低空(50 m~100 m)から1F周辺や河川周辺等 の狭い範囲で詳細に調べる遠隔操作での無人へ リを使ったモニタリングを組み合わせて、計画・ 評価を行うようになった。各々の実績・経験を 基にして、測定手法が開発、基準化されていっ た。モニタリング結果も統合して、さらに経験・ 実績を重ねる中、1F周辺から全国規模での広範 囲なマッピングへの取り組みがなされていった (5.2.1参照)。

空からのモニタリングは、民間飛行機の飛行 禁止の解除にも貢献した。事故後、IFの上空で は、民間飛行機の飛行が規制されていたが、国 土交通省の依頼を受けて 1F の空間線量率を詳 細に調べ(2012年12月)、高度200 mの位置 で飛行禁止基準を十分にクリアすることを確認 した。結果、IFの高度1500 mより上空の飛行 が解禁され、年間で延べ約1万機の航空機がこ のルートを利用し、北米路線の定期航空便の増 便と、IF上空を避けて飛行することで要してい た各航空会社の飛行機の燃料費、飛行時間の大 幅な節約に繋がることとなった。

その後も、空からのモニタリングは測定時の エネルギー分解能や位置分解能等の測定性能の 向上や解析技術の高度化に向けた研究開発が行 われ、ドローンのような狭い範囲を詳細に調べ ることができるタイプ等も開発して、原発の上 空や森林、河川、海上等、様々な局面で今も活 用されている(5.3.2参照)。

#### 1.2.3 除染等

1F 事故後の除染については 2011 年 8 月 26 日、原子力災害対策本部の「除染に関する緊急 実施基本方針」が出され、避難指示を受けてい る地域については、県及び市町村と連携の上、 国が主体的に除染を実施すること、また、その 他の地域においては、市町村において除染計画 を策定し、国の支援のもと、除染を実施するこ となどが示された。

これに先立ち、原子力機構も除染計画の策定 時において作業時の安全性を評価するため、原 子力安全委員会等を通し、「生活圏の清掃に関す る被ばく評価について」、「除染及び清掃活動に より発生した廃棄物の一時保管場所の線量評価」

(2011年7月19日第54回原子力安全委員会資料)等の提示を行い、福島県・各市町村、各現場での様々な除染活動・試験的事業に対しても協力・支援を実施した。2011年5月7、8日には、文部科学省から要請を受け、福島大学の協力のもと、福島大学附属中学校・幼稚園で校庭や園庭の線量低減対策試験を実施した。この試験が、5月11日に文部科学省が発信した「実地調査を踏まえた学校等の校庭・園庭における空間線量率対策について」(福島県教育委員会、福島県知事等宛て「事務連絡」)の根拠となった。

6月25日~7月2日にかけては、福島県によ る学校等における放射線量低減対策モデル事業 の支援を実施した。この活動結果は、福島県災 害対策本部が7月15日に発表した「生活空間 における放射線量低減化対策に係る手引き」に 反映された。

また、7月初旬から8月下旬にかけては、 福島大学附属中学校・幼稚園及び伊達市の5つの 小中学校のプール水の除染に取り組んだ。プー ル水の除染では、プールの水の中に含まれる放 射性セシウムを収着したり沈殿させたりする方



図 1-11 原子力機構が策定した学校プール水の除染の手引 1-4)

法を開発して実用化した。この方法のマニュア ルは「学校プール水の除染の手引き」(2011年 9月7日記者会見)として一般向けに公開された。 これらの活動の中で取りまとめた学校プール水 の除染の手引<sup>1-4)</sup>を図1-11に示す。

その他、地元の自治体や学校から寄せられる 様々な課題、例えば植栽の除染はどうすればい いのか、枝葉は埋めてよいのか、プール水はど うすべきか、側溝はどうするか、遊具はどうす るか、仮置きにはどんな方法があるかなどにつ いても可能な範囲で技術指導・支援等の対応を 実施した。

2011 年 8 月 30 日には、放射性物質汚染対処特措法が、公布・施行され(但し、廃棄物の

処理や除染等の措置、罰則規定等は2012年1月 1日施行)、国主体の除染計画が本格化した。原 子力機構は内閣府から「除染ガイドライン作成 調査業務」(2011年8月~2012年3月)を受託 し、南相馬市の森林に囲まれたレクリエーショ ン施設と、伊達市の特定避難勧奨地点を含む居 住地区内の除染活動を行った。先の教育現場で の除染の経験を基に、除染対象の範囲を広げた 事業であった。

南相馬市では、バンガローでの宿泊者の被ば くを想定した除染試験(図1-12)や、周辺森林 の除染効果を確認するために除草、落ち葉かき、 枝打ち、腐葉土層(以下「リター層」という)等、 段階的な除去、また、特に、森の10 m~30 m奥



図 1-12 南相馬市ハートランドはらまちでの除染試験





に向かい除去効果の実験的データ等を取得した。 10 m 奥部までの除去で空間線量率が40%程度 低下したが、それ以上除去を進めても森林外縁 部において測定される空間線量率はほとんど低 下しなかった。地形や木々の高さによるが、森 林近隣の生活圏の線量率を下げる観点では、除 草と落葉除去とリター層の除去の効果が確認で きた。伊達市では家屋の屋根、雨樋、庭、畑、 果樹園、道路、そして堆積場等、多様な対象、 項目について様々な除染方法等を検証した (図 1-13)。 2011 年 9 月~2012 年 6 月にかけては、先の 除染ガイドライン作成調査業務と並行して、内 閣府からの委託を受け、比較的広い範囲で、様々 な対象物や汚染状況に応じた、効率的な除染方 法を見出すための「除染モデル実証事業」を実 施した(図1-14、1-15)(5.2.2参照)。

これらにより、環境の除染に関しては、実際 に汚染した現地において、既往の技術を用いて 環境除染のノウハウを会得し、その除染効果や コスト等、様々なデータを得た。それと並行し て、新しい技術を発掘、公募する事業である「除



図 1-14 表土剥ぎ取りによる農地除染作業(除染モデル実証事業)



図 1-15 民家の除染作業(除染モデル実証事業)

染技術実証事業」も行った(図1-16、1-17)。

除染モデル実証事業の成果については、報告 会を2012年3月26日に開催し、データ等の公 表を行っている。除染モデル実証事業が終了す ると、環境省・自治体の本格的な除染活動の推 進に関連した協力、技術支援を行うことになっ た。その最初に取り組んだのが、「除染効果の持 続性確認」であった。

これは「除染を行っても、未除染の区域から 放射性物質が流入(再汚染)し、放射線量率が 上昇するのではないか」との地域の方々の不安 に応えたもので、環境省から委託を受け、除染 モデル実証事業で除染を行った区域で定期的に 放射線量率を測定し、放射性物質の流入の有無、 再汚染等の影響がないことを示すこととなった。 この調査は長期的な測定になることから、測定 データの品質を確保するため、測定点の設定、 測定方法の統一等、様々な検討をして計画立案 し、放射性物質の環境中での動き方等の調査(本 格的な環境動態研究の先駆けとなった検討・作 業)を行った。この調査は、2012 年 10 月から 2017 年 11 月まで継続して実施され、除染の効 果が持続していることを示す貴重なデータとな った。

また、環境試料の分析については、当初、茨 城県にある原子力機構の本部施設まで持ち帰っ て分析していたが、試料をタイムリーに分析す るために、福島県が福島市笹木野地区に設けた



図 1-16 大熊町内での路面除染作業の様子



図 1-17 いわき市内の保育所でのプール除染作業の様子



分析所に原子力機構も入ることで、2013 年1月 から環境試料の測定を開始した。

除染モデル実証事業が 2012 年春に終了する と、大規模な環境動態研究の必要性が持ち上が った。動態研究については、既に文部科学省の マップ事業の下で、放射線量等分布マップの作 成に向けた核種分析の協力を受けた大学(大学 連合)が行った実績があったことから、まずは その大学連合の成果のレビューから始め、その



図1-18 川俣町での環境動態研究(放射線量率・分布 の測定・評価作業) ガンマープロッター(可搬型平面 ガンマ線分布計測装置)所持



図 1-19 川内村の荻ダムとその周辺で、 放射性物質の挙動を調査

後、福島長期環境動態研究(F-TRACE プロジェ クト)へと展開されることとなった(図 1-18、 1-19、5.4.1 参照)。

上記のような事故後の緊急時対応の活動を実施しつつ、更に中長期的な視点から原子力機構の専門的人材と研究施設を最大限活用し、総力を挙げて1F事故の対処に取り組むため、組織体制の整備・強化にも着手した。

これらの活動の間、地元等への直接の技術支 援、コミュニケーション活動等として、国・自 治体の除染活動への協力・支援を開始(2011年 9月~) (図1-20) するとともに、福島県内の保 育園、幼稚園、小中学校の保護者並びに先生<br />
方 を主な対象として「放射線に関するご質問に答 える会」(答える会)と称した直接対話方式の活 動を2011年7月より開始した。また、「福島県 民健康管理調査支援事業」についても住民の 方々を対象とした全身カウンタ(ホールボディ カウンタ:以下「WBC」という)を用いた体内放 射能の測定を実施し、県民健康管理調査(内部 被ばく検査)の立案、検査と結果の評価等を行 った(2011 年 7 月~)。茨城県の原子力機構の 原子力科学研究所や核燃料サイクル工学研究所 においても、福島県から多く(約22,000人)の 県民の方々を受け入れ、WBC 検査を実施してい る。



図 1-20 PTA の皆さんとの遊具除染の様子 (文部科学省「チルドレンファースト」)

#### 1.3 福島研究開発部門の組織・沿革

#### 1.3.1 組織体制の整備・強化

原子力機構は 2011 年 5 月 6 日に福島支援本 部を設置した。本部の活動の目的は以下のとお りであった。

- (1) 発電所事故の収束に向けた支援
- (2) 周辺環境の放射能影響の把握・低減
- (3) 周辺住民等に対する支援

当初は、NEAT を中心に、全事業所・全部門の 職員が、福島県の現場や国の事故対策本部等へ 派遣されていたが、指定公共機関として国及び 福島県への支援をより強固なものとするため、 福島市内に事務所を開設した(2011年6月30 日)。さらに同年11月21日には、「福島技術本 部| へと組織を再編し、原子力機構自ら実施す る福島対応関連事業の推進を図るとともに、内 閣府、文部科学省、福島県等からの要請に基づ く、10数件に上る福島対応関連の受託事業を着 実に実施するための体制の整備・強化を図った。 福島技術本部は、原子力機構における福島対応 の司令塔の役割を果たし、同本部の下には福島 環境安全センターと復旧技術部、企画調整部が 設置された。このうち福島環境安全センターは、 NEAT やシステム計算科学センターの協力を得 て福島県内放射線モニタリング・マップ作成や 除染方法等の検討を行った。復旧技術部は、1F サイト内での将来的な適用技術の開発を目的に、 燃料の処理技術や滞留水の処理技術等の研究開 発を行っていた。そして企画調整部は、これら の総括や関係機関との調整を行った。

2011 年 12 月には、政府・東京電力中長期対 策会議(第1回会合)において「東京電力(株) 福島第一原子力発電所 1~4 号機の廃止措置等 に向けた 中長期ロードマップ」(以下「中長期 ロードマップ」という)の初版が決定された(2.1、 2.2 参照)。

#### 1.3.2 中長期ロードマップに沿った 1Fの廃止 措置に向けた研究開発始動(2012年4月)

原子力機構は、事故後に中期計画を改定して 経営上の最優先課題として 1F の廃止措置等に 関する業務を位置付け、その具体化として 2012 年4月1日、福島技術本部に加えて、東海研究 開発センター(原子力科学研究所、核燃料サイ クル工学研究所)及び大洗研究開発センターに それぞれ福島技術開発特別チームを設置した。 これらチームを中心に、燃料デブリ取り出し準 備に係る研究開発や放射性廃棄物処理・処分に 係る研究開発等、中長期ロードマップに沿った 研究開発・技術開発を開始した。

この1年後となる、2013年3月、国は中長期 ロードマップの見直しを見据え、研究開発の推 進の一環として、放射性廃棄物の分析・研究や 遠隔操作機器・装置等の開発・実証に必要な研 究拠点施設整備を行うことを決定した。我が国 唯一の総合的原子力研究開発機関である原子力 機構がその実施主体とされた(3.参照)。

#### 1.3.3 研究拠点施設整備の開始(2013年4月)

原子力機構は、2013年4月1日、研究拠点施 設を整備する組織として、福島技術本部内に「福 島廃炉技術安全研究所」を設置した。同年5月、 遠隔操作ロボット開発・実証試験施設が福島県 楢葉町に整備することが決定され、放射性物質 の分析・研究施設についても同年11月、1Fサイ ト内、あるいはその近傍に整備する方向で検討 を開始した。 1.3.4 部門としての活動の開始(2014年4月)

原子力機構内部では、組織改革の一環として、 トップマネジメントによるガバナンスが有効に 機能する体制整備を検討していた。より機動的 な事業運営を図るために、事業ごとに大括り化 した「部門制」組織の再編を行うという考えの もと、当時8研究開発部門・17事業所等の事業 を、6部門に集約し、その一つとして「福島研究 開発部門」が設置された。

2014年4月からは、福島研究開発部門として、 1F(1~4号機)の廃止措置等及び環境回復に係 る研究開発を担うこととなった。以下に示す既 存事業所の福島関連施設も含め関連部署を集結 して組織を再編・拡充した。

- 企画調整室
- ・福島事業管理部
- ·福島廃炉技術安全研究所
- ・福島廃止措置技術開発センター
- ·原子力科学研究所(福島技術開発試験部)
- ・核燃料サイクル工学研究所(福島技術開発試験部)
- ・大洗研究開発センター(福島燃料材料試験部)
- ・福島環境安全センター

この中で、事務対応メンバーと福島環境安全 センターのメンバーは、福島市の事務所に駐在 して活動をしていたが、2015年4月に、事務機 能をもつ福島事業管理部等がいわき市内の事務 所に移転した。同じく2015年4月には原子力 科学研究所内に、福島廃止措置技術開発センタ ーと原子力基礎工学研究センターの一部を再 編・拡充した廃炉国際共同研究センター

〔Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science:以下「CLADS (クラ ッズ)」という〕を組織した。一方、福島環境安 全センターは、2015 年 10 月、福島県が南相馬 市に設置した福島県環境創造センター(以下「環 境創造センター」という)の一機関である「環 境放射線センター」に、また、2016年4月には、 三春町に設置した環境創造センター研究棟にそ れぞれ入居して活動を継続した。

なお、環境創造センターは、福島県の環境の 回復・創造に向け、モニタリング、調査研究、 情報収集・発信、教育・研修・交流を行う総合 的な拠点となる福島県の施設であり、環境放射 線センターは、原子力発電所周辺の環境放射能 モニタリングを行う役目を担っている。

福島環境安全センター以外の研究部署は、組 織改編を経て、廃炉国際共同研究センター、楢 葉遠隔技術開発センター、大熊分析・研究セン ターの3つのセンターとなったが、2020年4月 に、廃炉国際共同研究センターは福島環境安全 センターと統合し、廃炉環境国際共同研究セン ターとなり、現在に至っている。また、2020年 7月時点では、福島県内で勤務する従業員数は、 約330名となっている(図1-21、1-22)。

- 1-1) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員 会,国会事故調報告書,2012,641p.
- 1-2) 東京電力ホールディングス,福島第一原子力発電所1~3号機の経過の概要, https://www4.tepco.co.jp/nu/fukushima -np/outline/2\_1-j.html(2020年2月25日 閲覧).
- 1-3) 鳥居建男ほか, 航空機モニタリングによる東日本全域の空間線量率と放射性物質の沈着量調査, 日本原子力学会和文論文誌, vol. 54, no. 3, 2012, p. 12-17.
- 1-4) 松橋信平ほか、学校プール水の除染の手引, JAEA-Testing 2011-007, 2012, 189p.



図 1-21 組織·沿革

福島市内の事務所設置から始まり、いわき市への事務機能の移転、楢葉町、富岡町及び大熊町での研究拠点化へと 続いた。部門としては、福島県外に駐在する組織(核燃料・バックエンド研究開発部門、原子カ科学研究部門、高速炉・ 新型炉研究開発部門、安全研究・防災支援部門及び研究連携成果展開部)とも連携を取り、研究開発を進めている。



図 1-22 福島県内に所在する福島研究開発拠点の組織(2020.4.1 現在)

福島研究開発拠点としては、3 つのセンターと 2 つの現地事務所(いわき市と福島市)がある。CLADS の中でも環境回 復に係る研究を主に実施している組織は、福島県環境創造センター(三春町と南相馬市)に駐在している。

# 2. 国の方針と研究開発体制

#### 2.1 国の方針

IF の廃止措置については「中長期ロードマッ プ」(初版) が 2011 年 12 月 21 日、原子力災害 対策本部、政府・東京電力中長期対策会議(第 1回会合)において決定され、これに基づき廃 炉・汚染水対策関係閣僚等会議で継続的な見直 しがなされつつ、IF の廃止措置が進められてい る。

1F 構外のオフサイトにおける環境回復につ いては、「福島復興再生特別措置法」(2012 年 3 月 31 日公布・施行)に基づき、原子力災害から の福島の復興及び再生に関する施策の総合的な 推進を図るための基本的な方針として「福島復 興再生基本方針」(以下「基本方針」という)が 2012 年 7 月 13 日に閣議決定された。2017 年 5 月 19 日には、同特措法の一部を改正する法律が 公布・施行し、基本方針が改定(2017 年 6 月 30 日閣議決定)され、特定復興再生拠点区域復興 再生計画に関することが盛り込まれた。

福島における原子力機構の研究開発活動は、 これらの国の方針等に基づいて進められている。

#### 2.2 1Fの廃止措置

#### 2.2.1 中長期ロードマップ

1Fの事故では、原子炉停止後の冷却の失敗に より、核燃料の温度が上昇し、原子炉圧力容器 内の核燃料が溶け落ちるとともに、燃料を包ん でいる金属と圧力容器内の水蒸気との反応によ って大量の水素が発生し、水素爆発を引き起こ した。現在、1号機~3号機の原子炉格納容器内 には、融解して周りの構造物とともに固化した 燃料(以下「燃料デブリ」という)が残されて いる。1Fの廃止措置等の主な作業は、汚染水対 策、使用済燃料プールからの燃料の取り出し、 燃料デブリの取り出し、原子炉施設の解体、放 射性廃棄物の処理・処分である。中長期ロード マップとは、こうした廃止措置等の作業が終了 するまでのマイルストーンを明示し、目標とな る工程を立てたものであり、3 つの期に分かれ ている。第1期は使用済燃料プール内の燃料取 り出し開始までの期間で、2013年11月に4号 機の使用済み燃料プールからの取り出しが開始 され、第2期へと移行した。

現在は第2期、燃料デブリ取り出しが開始さ れるまでの期間であり、中長期ロードマップに おいて、最初の燃料デブリ取り出しを2号機と 決定したところである。2号機からの燃料デブ リの試験的取り出しの開始は 2021 年内の予定 である。

1Fの建屋の中は、高放射線量のため、人が立 ち入れない状態にあり、内部の状況を正確かつ 詳細に把握することは容易ではない。状況が把 握できる通常の工事と比べて、不確実性を持っ た作業となる。しかし、そうした不確実性があ ったとしても、安全かつ確実に、対処できるよ うに、また現場の作業員に負荷がかからないよ うに、慎重に作業を進める必要がある。この中 長期ロードマップ(図2-1)は、策定時点で新し く判明した現場の状況や最新の知見、研究開発 成果を反映するなど、その時の状況に最適化さ れたものにすべく、適宜見直しが行われている。 2019年12月27日には5回目となる中長期ロー ドマップの改定がなされた。

【参考】1回目の改定は2012年7月、2回目は2013年6月、3回目は2015年6月、4回目は2017年9月であった。

#### JAEA-Review 2020-023



図2-1 1Fの廃止措置の全体工程 1Fの廃止措置に向けた中長期にわたる工程・作業内容である。 「廃炉の大切な話 2020」(経済産業省)をもとに作成

#### 2.2.2 1F の廃止措置と研究開発の体制

1Fの廃止措置は予測の難しい困難な作業も 起こり得る、前例のない取り組みであることか ら、政府や東京電力だけでなく、メーカや研究 機関等の協力が必要とされている。1Fの廃止措 置に係る関係機関の役割分担を図2-2に示す。 また、1Fの廃止措置は困難な研究開発要素を含 む様々な課題が存在している。そのため、国内 の研究開発体制として、産学官による基礎・基 盤研究から応用研究、開発、実用化に至る多様 な連携体制が必要であり、図2-3のような体制 が構築されている。

政府は、1Fの廃炉・汚染水問題の着実な解決 に向けて、廃炉全体の大方針の策定と廃炉の進 捗管理を指揮している。また、廃止措置には燃 料デブリ取り出しのような長期にわたる取り組 みが要求され、中長期的な視点から廃止措置を 適正かつ着実に進めるための技術的な検討を行 う組織として、原子力損害賠償・廃炉等支援機 構(以下「NDF」という)が設立されている。さ らに、1Fの廃炉に必要な技術開発を直接的に担 うメーカや研究機関から成る技術研究組合とし て、技術共同組合国際廃炉研究開発機構(以下 「IRID」という)が設立された。IRIDにはプラ ントメーカー(日立GEニュークリア・エナジー、 東芝エネルギーシステムズ、三菱重工業、アト ックス)、電力会社(東京電力、中部電力、他)、 国立研究開発法人(原子力機構、産業技術総合 研究所)が組合員として参画し、国内外の関係 機関と連携しながら、1Fの廃止措置作業に直結 する技術開発に取り組んでいる。東京電力は1F の廃炉の実施責任者として廃炉作業を着実に進 める責務を有しており、政府、NDF、IRID等と連 携して廃止措置の作業を遂行している。

原子力機構では、IRID 組合員としての技術開 発のみならず、大学や国内外の機関と連携しつ つ廃炉に必要な基礎基盤研究として、燃料デブ リの性状把握研究、炉内状況の推定技術研究、 放射性廃棄物の処理・処分の研究、遠隔技術の 現場適用性の評価研究等を進めている。



福島第一原子力発電所の廃炉に関連する主な研究開発機関の役割分担イメージ

#### 図 2-3 1F の廃止措置に向けた研究開発体制

原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF)「技術戦略プラン 2019」

1Fの廃炉の研究開発には産学官の多様な連携が必要であり、現場の課題を効率的に解決するためには、関係機関に おける理解と共有、廃炉現場と研究現場との協力及び連携が重要である。

#### 2.3 オフサイトの環境回復

#### 2.3.1 環境回復と研究開発の体制

国は、原子力災害により深刻かつ多大な被害 を受けた福島の復興・再生について、その特殊 な諸事情と国の社会的な責任を踏まえ、「福島復 興再生特別措置法(平成24年法律第25号・最 終改正平成30年法律第33号)」を制定した。

基本理念については、安心して暮らし、子ど もを生み育てる環境の実現、多様な住民の意見 の尊重、地域経済の活性化、福島の地域社会の 絆の維持及び再生、住民一人一人が災害を乗り 越え豊かな人生を送ること、福島の地方公共団 体の自主性・自立性の尊重、地域コミュニティ の維持、正確な情報の提供等とし、国の責務と して、その施策を総合的に策定し、継続的かつ 迅速に実施することとされた。この福島復興再 生特別措置法の基本理念に則り、原子力災害か らの福島の復興及び再生に関する施策の総合的 な推進を図るための基本方針が策定された。こ の基本方針に基づき、放射性物質によって汚染 された環境の回復・創造に取り組むための調査 研究、情報発信、教育等を行う拠点施設として 環境創造センターが、国のサポートのもと、福 島県によって整備された(2016年7月グランド オープン)。

環境創造センターでは、福島県及び環境研究 に関する国の中核的機関である国立環境研究所、 そして原子力に関する総合的な研究機関である 原子力機構の三者が結集し、「福島県環境基本計 画(第4次改定)」で掲げる"環境回復の推進" と"美しい自然環境に包まれた持続可能な社会 の実現"の二本の柱の連携を具体化するための 活動を行っている。原子力機構は、我が国唯一 の原子力に関する総合的な研究開発機関として、 基本方針に基づき、放射性物質により汚染され た環境の回復のための調査及び研究開発を行う こととされており、特に森林、河川域等の広い フィールドを対象とした放射性物質の環境動態 に関する研究を行うとともに、その成果を基に 放射線量の可視化と将来予測が可能なシステム



#### 図 2-4 環境回復に係る研究開発の政府方針と取組体制

環境創造センターにおいて、放射性物質により汚染された福島県の環境を早期に回復し、将来に渡って安心して暮らせ る環境を創造するための調査及び研究開発を行う体制が整備され、原子力機構は、福島県、国立環境研究所と連携・ 協力を図りながら、環境回復を推進する。 を提供するなど、調査・研究開発の実施とその 成果の普及を図る活動を進めている(図 2-4)。

#### 2.3.2 環境回復と創造に向けた取組方針

環境創造センターでは、2015年2月に「環境 創造センター中長期取組方針(2019年2月改 定)」(以下「中長期取組方針」という)を策定 し、環境回復・創造に向けた調査研究の推進、 調査研究成果の収集・情報発信、放射線教育・ 環境教育等を実施している。この中長期取組方 針は、2015年度から2024年度までの10年間の 基本的な事業方針が定められており、環境創造 センターの事業が前例のないものであることや 社会情勢の変化を考慮して、フェーズ1からフ ェーズ3までの3つのフェーズにより段階的な 方針を策定することとされた(図2-5)。この中 長期取組方針に基づく取り組みを的確に推進し、 効果的・効率的に行うことができるよう、福島 県、原子力機構及び国立環境研究所の三者は「環 境創造センターにおける連携協力に関する基本 協定」(以下「基本協定」という)を 2015 年 4 月に締結した(図2-6)。この基本協定では、モ ニタリング、調査研究、情報収集・発信及び教 育・研修・交流の4つの事業で連携し、中長期 にわたって取り組むこととされた。中長期取組 期間のフェーズ1(2015年度~2018年度)での 調査研究事業においては、除染の徹底、除去土 壌及び放射性物質に汚染された廃棄物等の適正 処理、放射性物質の環境動態解明等について、 放射線計測、除染・廃棄物、環境動態及び環境 創造の4つの部門が設置され、緊密に連携して、 調査研究が進められた。また、フェーズ2 (2019 年度~2021年度)においては、分析・測定技術 の最適化・高度化、環境中や野生生物への放射 性物質の移行挙動の詳細把握、除染効果の持続 性把握や除去土壌等の減容・再生利用・処分等 の調査研究に取り組むこととされている。なお、 フェーズ3(2022年度~2024年度)については、



参考:「環境創造センター中長期取組方針【フェーズ2】平成31(2019年)度〜平成33年(2021年)度」(環境創造センター 平成31年(2019年)2月改訂)

#### 図 2-5 環境創造センター中長期取組方針

前例のない原子力災害からの環境回復と創造に向けた取り組みについて、環境創造センター中長期取組方針を策定し、調査研究、研究成果の情報発信、放射線や環境に関する教育等を実施している。

フェーズ2における取り組みの進捗状況や社会 情勢の変化等を踏まえて検討することとされて いる。



図2-6 協定締結式 原子力機構、福島県及び国立環境研究所の三者で 「環境創造センターにおける連携協力に関する基本協 定」締結(2015年4月)

## 3. 研究開発基盤の整備

#### 3.1 国の方針

1Fの廃止措置に関しては、2011 年 12 月 21 日 に策定された中長期ロードマップの【別冊 1】 において、廃止措置等の技術課題に取り組むに あたり、国際的な研究開発拠点の設置が必要で あることが示された。研究開発拠点の検討は、 経済産業大臣政務官を本部長とする政府・東京 電力中長期対策会議研究開発推進本部を中心と して進められ、2012 年 3 月 28 日の第 4 回会合 において、既存施設の活用及び新規研究施設の 整備からなる研究拠点構想が取りまとめられた。

構想の具体化を図るため、必要な設備や施設 について概念設計・基本設計に向けた検討が進 められ、2012年5月28日の第6回会合におい て、検討状況が示された。これを踏まえ、2013 年3月7日、経済産業大臣が議長を務める東京 電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議

(以下「廃炉対策推進会議」という)(第1回) において、遠隔操作機器・装置等の開発実証施 設(モックアップ施設)及び放射性物質の分析・ 研究施設の整備(2012年度補正予算850億円) を行うこととなった。これらの研究拠点施設に ついては、原子力機構の知見の蓄積や人材を生 かす観点から、原子力機構を中心として、政府 機関、産業界の協力の下、早急に具体化を図っ ていくこととなった<sup>3-1</sup>。

遠隔操作機器・装置の開発実証施設について は、立地場所に関する以下の技術的要件が、同 第1回廃炉対策推進会議で示され、原子力機構 に対して候補地を評価するよう指示があった。

- A)開発した機器・装置の迅速・安全輸送の観 点から、東京電力福島第一原子力発電所からの距離が近い場所であること
- B) 試験・トレーニング・現場確認を繰り返し

行う観点から、放射線量レベルが低い場所、 かつ、東京電力福島第一原子力発電所から の距離が近い場所であること

- C)機器・装置を使用する作業員の人材育成を 行う施設であることに鑑み、東京電力福島 第一原子力発電所の廃止措置に関わる人 員の活動拠点から、近接した場所にあるこ と
- D)施設の建設工事や、施設で予定される研究 装置輸送の観点から、港湾施設からの距離 が近い場所であること
- E) 円滑な建設工事の実施を担保する観点から、高速道路等のインフラが十分整備されており、進入路の拡幅等の措置が必要最低限となる場所であること
- F)遠隔操作機器・装置の開発実証施設については、2014年度末頃の運転開始を目指し、 建設工程の実現性が担保されていること

原子力機構は、これらに対応し、いくつかの 候補地を選定するとともに、この結果を基に候 補地の地盤調査等を実施し、最終調査結果とし て現在の楢葉遠隔技術開発センターの場所を選 定した。これは2013年5月22日、廃炉対策推 進会議(第4回)で決定された。その後、本セ ンターは、楢葉町の避難指示区域解除(2015年 9月)に間に合わせるように、との強い国の指 導もあり、急ピッチで工事が進められ、2015年 9月に一部運用、2016年4月、本格運用を開始 した。

放射性物質の分析・研究施設については、最 先端の放射性物質の研究を行うことを目指し、 1Fから発生した通常より高い放射線量を持つ 測定難易度の高い物質を扱うことができる研究 拠点とすることを想定しており、他の放射性物 質研究施設よりも分析機能を強化するとともに、 環境放射線の影響も低減させるため、遮へい効 果等をより高く設計することが必要とされた。 このような放射性物質の分析・研究施設整備の 実施主体については、燃料・材料の照射後試験 技術開発、バックエンド技術開発等の、原子力 に関する総合的な研究開発活動を実施し、国の 行政機関の一部であり、独立行政法人として国 内でも高い知見を有している原子力機構が適切 であるとされた<sup>3-2)</sup>。2013 年 11 月 14 日の廃炉 対策推進会議(第6回)において、本施設の基 本的な考え方及び立地場所に関する以下の技術 的要件が示された。

- A) 福島第一原子力発電所からの試料(ガレキ、 汚染水処理後の二次廃棄物、燃料デブリ等) の搬入及び搬入した試料の返送等を容易 かつ安全に行うため、当該原発の構内又は 隣接地であること
- B) 建設工事の従事者及び本施設で分析や試 験等に従事する技術者の被ばく低減のた め、また本施設での精緻な分析を可能とす るため、立地場所の環境放射線が支障のない程度に低いものであること
- C) 円滑な建設工事の実施を担保する観点から、電気、水等のインフラが整備されているか、あるいは容易に整備可能であることまた、立地場所への進入路の拡幅等の措置がほとんど必要ない場所であること
- D)建設に必要な敷地面積を有するとともに、 中長期ロードマップに明示されている工 程の実現性を担保するため、比較的平坦で 新たに大規模な造成工事等を必要としな いこと

原子力機構は、これらの要件に基づいて候補 地を評価し、その結果を2014年6月27日、廃 炉対策推進会議後に設定された廃炉・汚染水対 策チーム会合(第7回)で報告して了承された。 現在、本施設は、大熊町の1F構内に大熊分析・ 研究センターとして整備を進めているところで ある。

さらに 1F の廃炉及び福島の復興は、前例のな い、極めて技術的難易度の高い試みであり、国 内外の英知を結集し、産学官一体となって、先 端技術開発を推進する必要があった。このため、 2014 年 6 月 20 日、科学技術を所管する文部科 学省は、原子力機構において、①国際共同研究 拠点機能、②研究支援機能、③人材育成機能、 及び④情報発信機能を有する研究開発・人材育 成の国際的な拠点を構築することなどを定めた

「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」を策定した。これ を踏まえ、「廃炉国際共同研究センター」が、2015 年4月に原子力科学研究所内に組織された。ま た、本センターの中核となる国際的な拠点とし て「国際共同研究棟」を1F近傍である富岡町に 整備することとなり、当時、避難指示区域内に おいて、急ピッチで工事が進められ、2017年4 月に運用を開始した<sup>3-3)</sup>。

これら三つのセンターは、福島イノベーショ ン・コースト構想の一翼を担う廃炉関連施設と し、研究開発等を通じて 1F の廃止措置に貢献し ていくことになった(図 3-1)。



図 3-1 福島イノベーション・コースト構想の一翼を担う廃炉関連施設

研究開発拠点では、長期にわたる廃炉を支えるため、英知を結集した研究開発活動と人材育成を推進しており、これらのアウトプットは地域の産業復興へと波及していくことが期待されている。
#### 3.2 楢葉遠隔技術開発センター

1F 事故後、作業員の被ばく線量低減のために ロボットを含む遠隔操作機器が現場作業に投入 され、調査や瓦礫の撤去・除染等が行われてい る。しかし、作業を通じて収集されたデータか ら確認された作業環境は放射線量が高く、瓦礫 等の障害物が残っている過酷な状態であり、遠 隔操作機器を用いた作業で幾つかトラブルも報 告されている。このため、1Fの廃止措置を効果 的に進めていくためには、要求される作業内容 に対応可能な機器の開発や工法の検討、オペレ ータの操作習熟度向上等が必要となっている。 このような観点から、廃止措置のための「遠 隔操作機器・装置の開発及び実証試験」を行う 拠点を原子力機構が整備することとなった。そ の拠点として「楢葉遠隔技術開発センター」 (NARREC: NARaha center for REmote Control

technology development) は、1Fから南に約20 kmの福島県楢葉町に整備され、2015年9月、楢 葉町の避難区域解除にあわせて、部分的に開所 し、2016年4月より本格運用を開始した。

2015年9月の部分開所の際には、安倍晋三内 閣総理大臣(当時)も出席しての開所式が執り 行われた(図 3-2)。NARRECは、上述のとおり廃



図 3-2 楢葉遠隔技術開発センター開所式の様子



図 3-3 楢葉遠隔技術開発センターの全景(2019年7月撮影)

止措置におけるロボット等の遠隔技術の開発及 びオペレータ訓練の支援を目的として、遠隔操 作機器等の開発や現場作業に関わる企業や研究 機関等の利用を想定した設備が整備されている が、一般自然災害対応ロボット等で想定される 作業環境とも共通の要素を含んでいることから、 他のロボティクス・メカトロニクス分野の企業 や教育機関等の関係者にも広く利用されている。

#### 3.2.1 施設概要

NARREC は、各種試験及び訓練が実施できる 「試験棟」(1 階建:幅60 m×奥行80 m×高さ 40 m) 及び「研究管理棟」(4 階建:幅35 m× 奥行25 m×高さ20 m)から構成されている(図 3-3)。

試験棟は広大な屋内に要素試験エリアと実規 模試験エリアがあり、要素試験エリアでは遠隔 操作機器・装置等の性能評価を行う設備が整備 されている。一方、実規模試験エリアでは廃止 措置に必要な要素技術の開発・検証のための実 証試験を実規模スケールで行うことが可能であ る。併設している試験棟付属建屋では、利用者 が使用可能な研究室が整備されている。

研究管理棟は、バーチャルリアリティ(VR) システムが整備されている他、規模の異なる複 数の会議室や長期利用時の研究管理等のために 利用者室を備えている。また、長期利用者等の ために機材保管が可能な倉庫も整備している。 以下に、主な設備の概要を述べる。

#### (1) ロボット試験用水槽

1Fの原子炉建屋内には、使用済燃料プールや 原子炉格納容器 (PCV) 下部等の水没した箇所が あり、水中ロボットによる調査が必要とされて いる。そこで、水中ロボットやロボットに搭載 するセンサの試験のために、ロボット試験用水 槽を整備している〔図 3-4(a)〕。ロボット試験 用水槽は、直径4.5m、水深5.0mの円筒状で、 付帯設備として昇温装置、水中カメラ、水中照 明等が設置されている。水温は最高60 ℃まで 昇温でき、水質も淡水、濁水、塩水が利用可能 である。水槽には観測窓が上段、中段、下段に 計12か所設置されており、試験時のロボット等 の動きを様々な角度から確認することができる。 また、水槽上部フロアにはジブクレーンが装備 されており、重量のある機材等の移動も可能と なっている。

#### (2) モックアップ階段

1F での作業において、遠隔操作機器・装置と して投入されるロボットに要求される能力の一 つとして階段の昇降がある。ロボットが遠隔操



図 3-4 要素試験エリアの試験設備; (a) ロボット試験用水槽、(b) モックアップ階段、(c) モーションキャプチャ 要素試験エリアでは、水中試験や階段昇降試験、モーションキャプチャを用いた動作検証等により、遠隔操作機器・装 置の性能を評価することができる。

作で階段等の段差を昇降することは特に難しく、 1F で実際に作業を行ったロボットでも段差の 昇降に時間を要していることが報告されている。 そこで、ロボットの階段昇降試験のためにモッ クアップ階段を整備している。1Fの階段は設置 場所や設置時期によって、傾斜角や蹴上高さ等 が異なっているため、モックアップ階段は1Fに 存在する種々の階段の形状を再現できるよう組 み替えが可能な構造となっている〔図 3-4(b)〕。 具体的には、傾斜角を 40~55 度の間で 6 段階 に変更でき、蹴上高さを 180~230 mm に調整で きる。また、手摺幅の変更や踏板の縞鋼板やグ レーチングへの変更も可能である。

#### (3) モーションキャプチャ

モーションキャプチャは、物体の位置情報 (座標)をデジタル値として記録し、記録した 座標を用いて物体の動作を定量的に評価するこ とができる設備である。1Fに散乱している瓦礫 等をロボットが踏破する際の動作や、災害時に 荷物を運ぶドローンの動作の検証等に利用する ことができる。NARRECに設置されているモーシ ョンキャプチャは、近赤外光を利用して複数の カメラにより計測対象に取り付けた反射マーカ ーの座標を記録することができる。モーション キャプチャは幅15 m、奥行15 m、高さ7 m の空 間で、16 台の高速度カメラが設置されている

[図 3-4(c)]。計測範囲は、幅 10 m×奥行 10 m ×高さ2 mとなる (カメラ高さ7 m時)。カメ ラを移動することにより、計測範囲の変更も可 能である。

また 2017 年度には、可搬型モーションキャプ チャを導入し、他のエリア(例えば、モックア ップ階段)でもモーションキャプチャによる計 測が可能となった。

#### (4) 実規模試験体

実規模試験エリアは、PCV 等の大規模な設備 を対象とした試験が可能なエリアである。この エリアには PCV 漏えい箇所の補修・止水技術確 立のため、IRID が PCV 下部の一部を模擬した実 規模試験体を設置し、試験が行われた。試験体 は、PCV 下部にあるベント管、直径約9 mのサ プレッションチェンバ(以下「S/C」という)や トーラス室壁面等を模擬したものである。実模 擬試験体及びその模式図を図 3-5(a)(b)に示す。 試験体は実寸大であり、円還状の S/C を 8 等分 した一つを切り出した形状とされた。

2017 年 6 月に、IRID の構成員である東芝エ ネルギーシステムズが S/C 内で推定されている 損傷個所を止水することを目的に S/C 内充填止 水技術の打設試験を実施した(IRID R&D Topics、 https://irid.or.jp/topics/原子炉格納容器 漏えい箇所の補修技術の実規模試-2/)。また、 2017 年 7 月には IRID の構成員である日立 GE



図 3-5 実規模試験; (a) 試験体、(b)試験体模式図 IRID による 1F の廃止措置に必要なモックアップ試験 を支援。※写真出典:IRID R&D Topics

ニュークリア・エナジーが S/C を支える脚部 の耐震補強を目的として、S/C 脚部補強技術 の打設試験を実施した(IRID R&D Topics、 https://irid.or.jp/topics/原子炉格納容器漏 えい箇所の補修技術の実規模試-3/)。これらは、 経済産業省/廃炉・汚染水対策事業費補助金のプ ロジェクトの開発課題として実施されたもので ある。

#### (5) VR システム

NARREC では、研究管理棟内に正面・右・左・ 床面の4面スクリーンに同時に空間データを投 影し、立体視できる没入型VRシステムを整備し ている(図3-6)。4面スクリーンのサイズは、 幅3.6m、奥行2.25m、高さ3.6mである。こ のVRシステムは、反射マーカーを取り付けた眼 鏡を着用したユーザーの頭の動きをモーション キャプチャによりシステム上に反映し(視線の 簡易模擬)、専用のコントローラを用いて仮想空 間内を自由に移動できるようになっている。こ の時、他のユーザーも専用の眼鏡を着用するこ とで仮想空間を同時に体験できる。なお、この VRシステムは、空間データとして一般的な3次 元 CAD データの利用が可能である。

現在、NARREC では、1Fの1~3 号機の原子炉 建屋1階及び地下階の3次元 CAD データ (以 下「1F データ」という) を整備済みである。整 備した2号機のデータは、IRID による PCV 内部 詳細調査技術の開発プロジェクトにおいて試験 計画の立案に活用された。

1F データと VR システムを用いて、施設の空 間構造、現場までの移動経路、照明環境、空間 線量率等を効率的に把握できる。可視化された 実寸大かつ立体的な作業環境の元で、廃止措置 に向けた現場作業員の事前教育・反復訓練や作 業関係者による現場状況の共有、作業計画の検



図3-6 VRシステム 1F データを投影し、専用ゴーグルを着用することで原 子炉建屋内の状況を実規模大で確認できる。作業の 事前確認や作業計画の検討・立案に有効。

討・立案等が可能となる。また、実規模大のモ ックアップでも困難な施設全体の再現や繰り返 しの試行も効率的に行える利点がある。2019 年 度からは所定の手続きにより、NARREC 外でこれ らの 1F データを使用することが可能となった。

# 3.2.2 遠隔操作機器の開発及び操作訓練を支援するための技術開発

NARREC では、前述の施設整備と運用のみなら ず、廃止措置のための遠隔操作機器の開発及び 遠隔操作習熟訓練を支援するための技術開発も 行っている。具体的な課題として、VR システム を用いた遠隔操作機器の操作訓練システムや原 子力災害対応ロボットのための試験法、ロボッ トシミュレータに関する技術開発に取り組んで いる。

以下に、これらの開発状況について述べる。

#### (1) 遠隔操作機器の操作訓練システム

廃止措置において、オペレータは遠隔操作機 器の操作習熟以外に、作業環境の空間構造を十 分に把握しておくことも求められる。そこで、 NARREC で整備している VR システムの機能の1 つとして、遠隔操作機器の操作訓練システムの 開発を行った。これは、PCV 下部の補修作業を 対象とした作業手順の確認やオペレータの操作

効である。

訓練において実寸大かつ立体的に動作を確認で きるものである。図 3-7 に操作訓練システムの 概念を示す。訓練の際、操作結果の再生により 対象の遠隔操作機器の動作を VR システム上で 直接確認することができ、直感的に注意すべき ポイントに対する理解を深めることが可能とな り、操作習熟度を効果的に高めることができる。 このシステム及び3.2.1(5) で述べた1Fデータ は、PCV 漏えい箇所の補修技術の実規模試験に 用いられた遠隔操作装置の操作訓練に活用され た。これは、経済産業省/廃炉・汚染水対策事業 費補助金のプロジェクトの開発課題として実施 されたものである。



図3-7 遠隔操作機器の操作訓練システム VRシステムに作業環境及び遠隔操作機器のモデルを 取り込み、操作卓からそのモデルの操作を行う。



図 3-8 標準試験場: (a) グレーチング面による狭隘 走行環境、(b) 貫通孔等の配管模擬環境

原子カ災害対応用ロボットのための標準的な試験場 及び試験法を開発している。1F 原子炉建屋内の作業 環境を考慮し、縞鋼板・グレーチング等による路面や 段差等を模擬した試験場を設計・開発。

# (2) 原子力災害対応ロボットのための標準試験法

原子力災害対応用ロボットのための標準的な 試験場及び試験法の開発に取り組んでいる。要 求作業に対するロボットの性能評価、オペレー タの操作習熟訓練等が必要となってくるためで ある。これに関わる技術開発の先行事例として、 米国国立標準技術研究所(NIST)が開発、提案 を行っている災害対応ロボット用標準試験法 (STM)がある。ロボット性能やオペレータ技能 について事前評価を行う環境や方法を提供する NISTのSTMの考え方は、廃止措置においても有

開発にあたり、公開されている 1F に関するロ ボットの作業記録から原子炉建屋内での作業内 容の分析やトラブルの分類を行い、課題につい て整理した。これにより、走行・作業環境での 課題や遠隔操作における状態認識の難しさの要 因等を抽出した。これらに基づいて、原子炉建 屋内を想定した走行ロボットの試験場として実 際の作業環境の素材を考慮して、縞鋼板・グレ ーチング等による路面や段差等を模擬した試験 場を設計・開発した。さらに、PCV 内部調査を参 考にして、ロボット投入口として用いられた貫 通孔等を模擬した配管型の試験場の開発も行っ た。図 3-8 に開発した試験場・各試験環境を示 す。開発した試験場を活用した試験法の立案と その妥当性について、実験を通じた検討を行っ ており、廃止措置のためのロボットの試験法と して順次提案、公開していく。

#### (3) ロボットシミュレータ

安全かつ着実に廃止措置を遂行するためには、 事前にオペレータがロボット操作について十分 習熟しておく必要がある。また、要求される作 業に対応可能なロボットの設計・開発は迅速に 行う必要もある。計算機を用いたシミュレーシ ョンは、物理現象をある仮定のもとに模擬する ため、実際の現象との間に一定の差異がある。 しかし、繰り返し試行が可能、試行条件や環境 の変更が容易等の大きなメリットがあり、上手 く活用することでロボットの操作訓練や開発、 性能検証を効率的に実現可能となる。このため、 NARREC ではオペレータの操作習熟度向上やロ ボットの性能検証のための技術として、ロボッ トシミュレータの開発を行っている。

図 3-9 に開発したロボットシミュレータの操 作画面を示す。ロボットシミュレータは、産業 技術総合研究所において開発されているオープ ンソースソフトウェア Choreonoid (※2019年4 月事業化により、株式会社 Choreonoid に引継 ぎ)を動力学シミュレーションの中核として採 用し、開発されている。Choreonoidは、ユーザ ーや開発者が独自に設計、開発したプラグイン (Choreonoid の機能を拡張するためのソフトウ ェア)を実装することでシミュレータの機能を 容易に拡張することができる。この特徴を利用 して、通信遅延等の通信品質の低下を想定した 通信障害模擬機能やドローン等の無人航空機に よる調査作業を想定した空中移動模擬機能を開 発している。これらの技術開発の知見をもとに 開発したプラグインが、2018年10月に開催さ



図3-9 ロボットシミュレータの操作画面 繰り返し試行や試行条件、環境の変更が容易であり、 オペレータの操作習熟度向上やロボットの性能検証 に有効。

れた World Robot Challenge 2018 インフラ・ 災害対応カテゴリーにて用いられた Choreonoid に実装された。NARREC では、引き続 きロボットシミュレータの機能高度化を進める とともに、開発したプラグインを NARREC の利用 者にも提供していく。

#### 3.2.3 利用実績

本格運用が開始された 2016 年度からの NARREC の累積利用件数は、2019 年度末時点で 230 件となった (図 3-10)。実規模試験エリアで は、3.2.1 (4)で述べた試験の他に、2019年度 から IRID による原子炉格納容器内部詳細調査 技術の開発(X-6 ペネトレーションを用いた内 部詳細調査技術の現場実証)の一環としてアク セス・調査装置のモックアップ試験〔福島第一 原発「燃料デブリ」取り出しへの挑戦③〜海外 の協力も得て挑む技術開発の最前線(2020年2 月 28 日)、 https://www.enecho.meti.go.jp/ about/special/johoteikyo/debris 3.html) が 開始され、今後ロボットアームの遠隔操作手法 の検証、オペレータのトレーニングが実施され る予定である〔図 3-11(a)〕。これは、経済産業 省/廃炉・汚染水対策事業費補助金のプロジェク



### 図 3-10 NARREC の累積利用件数

試験の実施以外に会議・研修やイベントにも利用されている。

トの開発課題として実施されているものである。 この他、試験棟では要素試験エリアでの大学

等の研究機関による試験のための利用として、 平成30年度 英知を結集した原子力科学技術・ 人材育成推進事業の成果を確認するための試験 〔図 3-11(b)〕や地域復興実用化開発等促進事 業(福島イノベーション・コースト構想)に関連 する開発〔図 3-11(c)〕も行われている。加え て、福島県廃炉・除染ロボット技術研究会主催 による福島県内企業・大学 廃炉・災害対応ロボ ット関連技術 展示実演会や文部科学省及び廃 止措置人材育成高専等連携協議会主催による廃 炉創造ロボコン等のイベントにも活用されてい る。また、研究管理棟では会議室を利用して、 資源エネルギー庁主催の第13回廃炉・汚染水対 策福島評議会(2017年)や原子力機構主催の福 島リサーチカンファレンスが行われている。こ のような NARREC の施設利用の支援を通じて、今 後も1Fの廃止措置の推進に貢献していく。



図 3-11 NARREC の利用事例; (a) アクセス調査装 置のモックアップ試験(IRID/三菱重工業)<sup>※</sup>、(b) レスキ ューロボットの性能検証試験(東京工芸大学)、(c) 災 害救援物資輸送ダクテッド・ファン UAV の実用化開発 (IHI、協栄精機)

※写真出典:経済産業省資源エネルギー庁、福島第一 原発「燃料デブリ」取り出しへの挑戦3

#### 3.3 大熊分析・研究センター

大熊分析・研究センターでは、「中長期ロード マップ」(第5版) に記載された「大熊分析・研 究センターを活用した分析実施体制の構築」を 踏まえ、1Fの西側に隣接した研究開発拠点とし て、1Fの廃炉に向け固体廃棄物の処理・処分及 び燃料デブリの性状把握等の研究開発を行う放 射性物質分析・研究施設の整備を進めている(図 3-12)。

この施設は施設管理棟、第1棟及び第2棟の 3 施設で構成されており、施設管理棟は、居室 並びに分析のモックアップ等を行うワークショ ップを有する施設である。第1棟は、固体廃棄 物等の分析等を行う施設であり、第2棟は、燃 料デブリ等の分析を行う施設である。建設地は 東京電力から無償で貸与された土地であり、放 射性分析・研究施設第1棟及び第2棟について は、運用開始時に、特定原子力施設の一部とし て1F構内の施設に位置付けられる。

2020 年度末頃には第1 棟の建設が終了し、 2021 年度以降、その施設を活用した研究開発を 通して新たな挑戦が始まる。それは第1棟での 通常の原子炉とは異なる多種多様な放射性廃棄 物の分析である。さらに第2棟での未知の燃料 デブリの分析等である。大熊分析・研究センタ ーは、1F 事故により発生する放射性廃棄物の処 理・処分方策の確立、燃料デブリの取り出し・ 移送・保管・管理等の安全かつ計画的な実施の ために必要な研究開発に、分析事業を通して貢 献していく予定である。



#### 図 3-12 放射性物質分析·研究施設位置図

(a)(右図)が敷地全体配置図で、黄色の塗りつぶし箇所が建設地で、1Fの隣接地に位置する。(b)(左上図)が各建屋の配 置図で、(c)(左下図)がイメージ図である。

#### 3.3.1 施設の概要と整備の進捗

#### (1) 施設管理棟

施設管理棟は、鉄筋コンクリート造の地上4 階建、延床面積は約4,800 m<sup>2</sup>の施設である。2016 年9月7日に建築工事を開始し、2018年2月28 日には竣工引き渡しを受け、2018年3月15日 から運用を開始した。この施設は、居室の他、 事務室、会議室、ワークショップ等から構成さ れている(図3-13、3-14、3-15)。



図 3-13 施設管理棟開所式の様子



図 3-14 施設管理棟 施設管理棟は 2018 年 3 月に運用を開始した。



図 3-15 施設管理棟断面 4 階建てでワークショップは吹き抜け構造である。

施設管理棟は、放射性物質を取り扱わない事 務棟であり、第1棟の建設及び運用、並びに第 2棟の円滑な設計、建築及び運用に資する施設 である。また、第1棟及び第2棟の運用開始か ら得られる分析データや研究データの評価、整 理等を行う施設になる。

立地地点が 1F の西側隣接地であり、空間線量 が高いエリアであったことから、土地造成の際 に除染を行って線量を下げるとともに、建屋も 周辺からの放射線の影響を受けないよう、窓の 無い遮へい構造となっている。採光は天井の窓 から行われ、吹き抜けのワークショップを通じ て各階に届くようにしている。

ワークショップには、工作機器や模擬鉄セル、 グローブボックス、ヒュームフード等を設置し、 分析作業のモックアップを行う場として既に活 用している。また、分析技術者育成を目的に、 模擬鉄セルに設置されたマニプレータを使う分 析作業やグローブボックスにおける分析作業の 手順を習熟するための訓練も実施している(図 3-16)。



図3-16 ワークショップ ワークショップに設置した模擬鉄セルを使用してマニ プレータの訓練等を行っている。

#### (2) 第1棟

第1棟は、1Fで発生する瓦礫類(瓦礫、資機 材、土壌)、伐採木、可燃物を焼却した焼却灰、 汚染水処理に伴い発生する二次廃棄物(使用済 吸着材、沈殿処理生成物)等(分析対象物)の 性状を把握することにより、今後の処理・処分 方策とその安全性に関する放射性核種のデータ を得るため、分析や研究開発を行うことを目的 とした施設である。

第1棟は、鉄筋コンクリート造、地上3階建、 延床面積約9,700 m<sup>2</sup>の施設になる。2017年3月 7日に原子力規制委員会から「福島第一原子力 発電所特定原子力施設に係る実施計画」(実施計 画)の変更の認可を得て、同年4月19日から建 築工事を開始し、竣工に向けて建設工事を進め ている(図3-17)。分析対象物の表面線量率、性 状等に応じて、分析することが可能な形態(試 料)に調製するため、パネルハウス、鉄セル(4 基)、グローブボックス(10基)、フード(56基) 等が第1棟に設置される予定である。

分析対象物のうち、表面線量率が1 mSv/h以 下のものについては、主にフード、グローブボ ックスで試料の調製を行う。表面線量率が1 mSv/h を超え1 Sv/h以下のものについては、 主に鉄セルで分析対象物から試料を採取し、そ の後、主にフードで試料の調製を行う。

放射能分析、化学分析、物性測定等の分析を 行うため、液体シンチレーションカウンタ、ガ ンマ線スペクトロメータ、アルファ線スペクト ロメータ、ガスフローカウンタ、高周波誘導結 合プラズマ発光分光分析装置(ICP-AES)、高周



図3-17 第1棟の外観(2020年6月撮影) 第1棟は 2017 年より建設工事を進めてきており、現 在、工事の終盤を迎えつつある。

波誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)、イ オンクロマトグラフ、走査型電子顕微鏡及びそ れに付加するエネルギー分散型X線分析装置等 の分析装置の導入を予定している。

#### (3) 第2棟

第2棟は、1Fで発生した燃料デブリ等の性状 を把握することにより、その安全な取り出し・ 保管管理等に必要な情報を取得するため、分析 等を行うことを目的としている。第2棟の建屋 は地上2階、地下1階の鉄筋コンクリート造で ある。主要設備として、地上1階に燃料デブリ 等を扱うためのコンクリートセル4室のほか、 大型鉄セル1基、グローブボックス4基及びヒ ュームフード4基を設置する予定で、試料保管 設備や分析ニーズの変化に対する柔軟な対応を 目指すため、設備レイアウトの拡張性を考慮し ている。

#### 3.3.2 研究開発

中長期ロードマップに沿って IRID が実施主 体となり、放射性固体廃棄物の処理・処分に関 する研究開発が進められている。事故で発生し た放射性固体廃棄物は、破損した燃料に由来し た放射性核種を含んでいること、津波や事故直 後の炉心冷却に起因する海水成分を含む可能性 があること、高線量で汚染のレベルが多岐にわ たりその物量も大きいことなど、従来の原子力 発電所で発生する放射性廃棄物と異なる特徴が あり、これらを安全に処理・処分するための研 究開発が IRID で進められている。また、多様な 固体廃棄物の発生、保管から処理・処分までの 一連の廃棄物管理・取扱い方法(廃棄物ストリ ーム)の検討が原子力機構で行われている。



図 3-18 新たな ICP-MS を導入した分析プロセスの概要

大熊分析・研究センターでは、多様な分析対 象物から試料を調整し非常に多くの核種を分析 する計画がある。このため、分析に関する工程 の合理化が必要不可欠であり、IRID が進める研 究開発の一環として、ICP-MS を用いた分析法の 開発を進めている。

第1棟で測定対象となる核種の中にはβ線及 び特性X線を測定して定量する核種がある。こ れらの放射線は連続したスペクトルとして観測 されるため、他の核種が共存すると重なり合い 正確な測定ができないことから、事前に精密な 単離・精製が必要となり、測定までの前処理操 作は複雑で長時間を要する。このため、作業負 荷及び被ばく量低減の観点から、より早く、簡 単に測定できるような分析方法の単純化が現在 求められている。そこで、放射線計測が難しい 核種に対して、ICP-MS を用いた分析手法の開発 を行っている。この装置は、放射線を計測する のではなく、特定の質量数の元素の数を数える ことのできる装置で、装置そのものに分離(他 の質量数と分ける)機能をもつことから、前処 理操作の単純化が期待できる。

さらにハイエンドの ICP-MS の機種では、同じ 質量数(例えば <sup>33</sup>Zr、<sup>53</sup>Mo、<sup>53</sup>Nb)の中からさら に特定の元素(例えば <sup>53</sup>Zr)を選択的に分離で きる機能を備えており、大幅な前処理操作の単 純化が期待される(図 3-18)。また、分離プロセ スの合理化を目指した自動化技術を取り入れた 放射性核種の分離装置等の開発も進めている (図 3-19)。

これらの分析法等の開発は、第1棟が建設中 のため、CLADS と連携し、国際共同研究棟で実 施している。



図 3-19 自動化技術を取り入れた分離装置 技術開発を行っている固相抽出により核種を分離す るための自動分離装置。

#### 3.3.3 分析技術者の確保・育成とその将来

放射性物質分析・研究施設の運用、分析結果 の評価、品質保証、新たな分析法の研究開発、 分析省力化のための技術開発等を継続し、分析 技術を継承するためには、分析技術者の確保・ 育成が急務である。福島研究開発部門では、数 年前から化学・物質分野の学生を中心に採用し、 原子力機構の東海地区や大洗地区にある複数の 研究開発施設において分析業務や品質保証活動 にあたらせ、分析技術の習得とその向上を図る ための職場内訓練(0,JT)を行ってきた。その一 部の職員は0IT を終えて大熊分析・研究センタ ーに戻り、間近に控える第1棟の運用に向けた 準備や3.3.2に述べた分析方法の技術開発に携 わっている。今後は、新たに運用される第1棟 及び第2棟における分析研究開発等に携わり一 層の分析技術の習得と向上を図っていく。また、 放射性物質分析・研究施設は、1Fにおける特定 原子力施設の一部として、東京電力が保安に関 する統括管理を行う。そのため、大熊分析・研 究センターで分析、工務、放射線管理等の業務 を担当する若手職員を東京電力 1F へ派遣し、 0JTとして1F現場での作業や安全管理を学ぶた めの人材交流を行っている。人材交流について は、東京電力 1F から大熊分析・研究センターへ の出向も行われており、出向者からは第1棟の 施設整備における工事・安全管理等のマネジメ

ントに係る技術指導を受けている。

一方、放射性物質分析・研究施設の運用や分 析研究開発にあっては、大熊分析・研究センタ ーの職員だけでなく、分析技術を有する企業と の連携が必須である。分析作業、施設の維持管 理、設備・機器の更新、分析研究開発等に携わ って頂くことにより、その企業の分析技術や放 射性物質を取り扱う施設の運用、維持管理の向 上に寄与し、東京電力が検討している「廃炉作 業における分析環境の整備」の将来の運営にも 貢献できるものと考えている。

さらには、原子力機構内では継続する研究開 発や今後本格化する研究開発施設の廃止措置、 それらに伴って発生する放射性廃棄物等の処 理・処分事業においても分析要員の確保が必要 不可欠である。大熊分析・研究センターにおけ る研究開発に携わった分析技術者が他の研究開 発や事業において活躍することも期待されてい る。

# 3.4 廃炉国際共同研究センター(現廃炉環境 国際共同研究センター)

1Fの廃止措置は過去に例のない取り組みで あり、国内外の英知を結集して研究開発を行う 必要がある。そのため、CLADS を組織し、茨城県 東海村の原子力機構の核燃料物質や放射性物質 の取扱いが可能な研究施設を活用してその活動 を開始した。その後、CLADS の中核となる国際 的な研究開発拠点として「国際共同研究棟」(図 3-20) を 1F の近傍である、福島県富岡町に整備 することとなり、5月には国際共同研究棟の設 計を開始し、8月に福島県からの要望も踏まえ、 立地地点として 1F から約 10 km の距離に位置 する富岡町王塚地区に決定、2016年3月には富 岡町と用地売買契約を締結した。国からの富岡 町の避難指示区域解除に合わせた国際共同研究 棟の運用開始との要請に応えるべく、2016年4 月に工事に着工し、2017年3月に竣工、4月よ り運用を開始した。

#### 3.4.1 施設概要

国際共同研究棟には1階に6つの研究室と緊 急時対策室等があり、2階には研究者の居室、 事務管理者の居室、会議室等がある。1階の研 究室のエリアでは、レーザー遠隔分析技術の研 究、放射線計測技術の開発、廃棄物の分析技術、 廃棄物の処理処分技術の研究、放射性微粒子等 の分析解析等を実施している。また、一部を東 京電力や大学等の共同研究室として利用してい る。主な分析装置等としては、多目的X線回折 装置、実験室 XAFS 装置、走査型電子顕微鏡など、 多種多様な手法を用いる廃炉研究の基盤となる 機器を整備している。

また、国際共同棟に併設された多目的試験棟 (図 3-21)では、燃料集合体等の溶融状況を模 擬できる制御棒ブレード破損試験装置(LEISAN: Large-scale Equipment for Investigation of Severe Accidents in Nuclear reactors)(図 3-22)等、事故時の原子炉内状況を部分的に再 現できる水蒸気雰囲気での急速昇温反応炉等、 1Fの廃炉研究に特化した機器群を整備してい る(表 3-1)。



図 3-20 国際共同研究棟 2016年4月に安全祈願祭及び起工式を開催して着工し、2017年3月に竣工した。



#### 図 3-21 多目的試験棟

模擬試験と解析により、燃料破損・溶融挙動の理解の 深化に取り組み、シビアアクシデント解析での信頼性 向上、アクシデントマネジメントに役立てることを狙い としている。

#### 表 3-1 施設·設備概要

CLADS には、国際共同研究棟の他、多目的試験棟が 設置されている。

#### ○国際共同研究棟

構造・規模	真:	鉄骨造、地上2階建て
建築面積	:	$1,096 \text{ m}^2$
延床面積	:	2, $115 \text{ m}^2$
高さ	:	10.3 m (屋上ルーバー12 m)

#### <u>主な設備</u>

- 多目的X線回析装置
- 実験室 XAFS 装置 (X 線吸収微細構造分析装置)
- · 走查型電子顕微鏡
- ・オートラジオグラフィシステム
- ・顕微ラマン分光装置
- ・光ファイバ式レーザラマン分光光度計

#### ○多目的試験棟

構造・規模: 鉄骨造、地上1階建て 延床面積:229 m<sup>2</sup> 高さ: 7.5 m

#### <u>主な設備</u>

・制御棒ブレード破損試験装置(LEISAN) ・レーザー加熱装置

# 3.4.2 CLADS で開発された 1F の廃炉研究に特 化した試験装置群の例

1979 年に起きた米国スリーマイル島原子力 発電所(加圧水型原子炉)の事故以降、シビア アクシデントに関する研究は欧州・米国でも 様々な視点でなされ、知見も共有されていた。 しかし、これまでの知見では不十分で、1F 特有 の条件を想定した事故進展挙動に係る知見が必 要とされていた。そこで CLADS としては、まず、 1F(2号機)の事故で生じたような水蒸気が枯 渇するような特殊条件下で、事故初期段階の進 展挙動把握に重要となる制御棒破損のメカニズ ムを解明するために、「制御棒ブレード破損試験 装置」及び「レーザー加熱装置」を開発した。

これらの装置を用いて取得する試験データは、 BWR 体系での燃料破損・溶融進展における要素 過程モデルの構築及び解析コード検証データと して活用できるとともに、シビアアクシデント 時の燃料破損と溶融進展状況の視覚化にも使用 できる。

また、これらの装置は国際的にも類を見ない 試験が可能なものであり、海外からも高く評価 され、共同研究の提案などがされているところ である。

#### (1) 制御棒ブレード破損試験装置

制御棒ブレード(原子炉の出力を調整する板 状のもの)とチャンネルボックス(燃料棒を包 むカバー)の溶融反応を評価するために、温度 (最高温度約1800 ℃)及び水蒸気枯渇条件を 含めた水蒸気環境条件、急速昇温で試験が可能 な装置である。急速昇温(~1 ℃/秒)と最高温 度を限られた空間で実現するため、表面積あた りの熱出力の大きな黒鉛ヒーターを使用してい る。黒鉛ヒーター保護のため、試験部と黒鉛ヒ ーターを隔離することとし、熱衝撃や温度勾配 による破損防止のためSiCコーティング黒鉛製 の隔壁を設置している。また、試験体の温度勾 配がつけられるよう、適切な炉内ヒーターの配 置となるような設計とし、実際の事故を想定し た条件で試験可能な機能を有している。

#### (2) レーザー加熱装置

燃料棒やチャンネルボックス材の酸化挙動を 評価する装置である。最高温度約2000 ℃と急 速昇温(~100 ℃/秒)、高温水蒸気中で長時間 保持を実現するための適切な容器材を選定して いる。試験体に対し、石英窓を通して反応容器 外部からレーザー照射して加熱する方式を採用 することで試験体のみを高温に加熱することが できる。

上記試験装置での試験実績については、 「4.2.3 炉内状況の解明」の項、「BWR 制御棒ブ レードの崩落試験」で記述する。



図 3-22 制御棒ブレード破損試験装置及びレーザー加熱装置 国内外に類を見ない試験装置群を多目的試験棟に構築した。

# 3.5 福島環境安全センター(現廃炉環境国際 共同研究センター)

2015年4月、原子力機構は、福島県、国立環 境研究所との三機関で、「環境創造センターにお ける連携協力に関する基本協定」を締結し、協 力して福島の環境回復・創造に向けた調査研究 等の取り組みを進めていくこととした。このた めの施設として、2016年、福島県は福島県環境 創造センターを設置し、原子力機構も三春町の 研究棟および南相馬市の環境放射線センターに おいて、環境回復に係る調査研究を進めてきた (図 3-23、3-24)。

#### 3.5.1 設備・装置の概要

三春町の研究棟においては、環境動態に関する調査研究と環境試料中の放射性核種の分析・

計測技術開発を行っており、そのための施設整備を進めてきた(表 3-2)。

放射能測定のうち、環境試料中の放射性セシ ウム濃度の測定に関しては、ISO/IEC 17025 によ る認証を得ており、オートサンプルチェンジャ ーを備えた5台のGe半導体検出器(図 3-25) による測定体制を構築し、年間7,000~10,000 試料の測定を行っている。

液体分析に関しては、誘導結合プラズマ質量 分析装置(ICP-MS)を用いた元素濃度分析体制 を構築してきたが、ここに単粒子分析機能(SPC) や固相抽出分離機能を付加することにより、環 境中での放射性核種の移行でカギを握るコロイ ドのような微粒子や、放射性核種の濃度を迅速・ 高感度に測定するための技術も開発を進めてい る。



図3-23 福島県環境創造センター交流棟・本館・研究棟(三春町)[福島県 HP より]



図 3-24 福島県環境創造センター環境放射線センター(南相馬市)[福島県 HP より]

固体分析に関しては、環境中における放射性 核種の保持媒体の解明を目指し、電子顕微鏡と

#### 表 3-2 研究棟での設備概要

### 放射能測定装置 ・Ge半導体検出器、 $\gamma$ 放射能測定装置 ・液体シンチレーション測定装置 ・全身放射能測定装置搭載車(WBC 車) γ 放射能測定装置搭載車(Ge 車) 笙 液体分析装置 ・誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS、 単粒子分析・固相抽出分離機能付き) ・誘導結合プラズマ発行分光分析装置(ICP-AES) ・高速液体クロマトグラフィー(HPLC) 築 固体分析装置 ・走査型電子顕微鏡 (SEM、EDS・低真空分析 機能付き) ・電子プローブマイクロアナライザ (EPMA、 EDS・WDS・粒子解析機能付き) ・集束イオンビーム加工装置(FIB) ・マイクロマニピュレータ ・透過型電子顕微鏡(TEM、EDS・EELS・液中 観察機能付き) ・飛行時間型二次イオン質量分析装置(ToF-STMS) ・示差熱質量分析・赤外分光装置(TG-DTA-MS/FT-IR) X線回折装置(昇温・雰囲気制御機能付き)

・X 線回折装置 (昇温・雰囲気制御機能付き ・光電子分光分析装置 (XPS) 等



図 3-25 Ge 半導体検出器

X 線分光学的手法を主体とした分析装置を整備 した。特に、環境試料に含まれる1万以上の粒 子の中から、電子プローブマイクロアナライザ

(EPMA) で元素濃度に基づき分析対象粒子を特定し、マイクロマニピュレータで粒子を採取、 集束イオンビーム加工装置 (FIB) で透過型電子 顕微鏡 (TEM) 等の詳細分析用試料を加工すると いう複数装置での一連の作業を、粒子解析機能 と座標共有システムにより、効率的に進められ るよう、カスタマイズされている。

その他、樹木や海産物中の放射性核種濃度測 定のための解体・乾燥・仮焼等の前処理設備、 環境水のろ過・遠心分離等の前処理設備等、様々 な環境試料の分析に対応するための設備を整備 している。

また、南相馬市の環境放射線センターにおい て2台のGe半導体検出器による測定体制を構 築しているほか、所有機器類としては、無人へ リコプター(ヤマハ発動機社製のR-MAXG1、現 在は後継機種であるFAZER-R)や無人飛行機 (UARMS: Unmanned Airplane Radiation

Monitoring System)また、無人観測船 (ASV: Autonomous Surface Vehicle) 等がある。

なお、上記試験機器類での試験実績について は、「5.3.2 モニタリング技術開発の進展」の項 で記述する。

- 3-1) 経済産業省、東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議(第1回)、研究拠点施設の基本的な考え方、2013.
- 3-2) 原子力規制庁,特定原子力施設監視・評価 検討会(第24回)廃炉関係の研究開発拠 点施設の整備について,2014.
- 3-3) 文部科学省,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,2014.

# 4. 廃止措置等に向けた研究開発

#### 4.1 研究開発の進め方

1F の安全な廃止措置とその終了後も続く 放射性廃棄物の処理・処分(廃止措置等)を 推進するためには、国内外の英知を1か所に 集中させ、研究開発と人材育成を一体的に進 めることが効果的である。原子力機構では、 廃止措置等に必要な基礎基盤研究として燃 料デブリ状況の解明、炉内状況の解明、放射 性廃棄物の処理処分及び遠隔操作計測技術 開発等を進めており、CLADSを中核に「国内 外の英知を結集する場の整備」「国内外の廃 炉研究の強化」「中長期的な人材育成機能の 強化」「情報発信機能の整備」の4つを柱に取 り組んでいる。

CLADS では、活動の拠点となる国際共同研 究棟に加え、茨城県の東海・大洗地区にある 原子力機構特有の核燃料物質・放射性物質の 使用施設、照射施設等を活用して研究開発に 取り組んでいる。また、原子力科学研究部門、 高速炉・新型炉研究開発部門、核燃料・バッ クエンド研究開発部門、各々に福島研究開発 推進室を設置し、横断的に福島研究開発を推 進するとともに、これらの推進室と CLADS が 密接に連携することで、原子力機構全体で 1F 廃炉の研究開発に取り組んでいる。

「国内外の英知を結集する場の整備」とし ては、国内外の大学や研究機関と連携して、 廃炉に向けた研究開発に取り組んでいる。ま た、国内外の英知を結集する場として、定期 的に「福島リサーチカンファレンス(FRC)」 を開催し、国内外の研究者との交流や情報共 有等を行っている。

「国内外の廃炉研究の強化」を図るために 海外からの研究者を招聘するとともに海外 の研究機関との国際協力等を実施し、廃炉に 必要な研究分野について、外部の研究者や専 門家を交えたワーキンググループ等の活動 を行っている。

「中長期的な人材育成機能の強化」として は、文部科学省「英知を結集した原子力科学 技術・人材育成事業(以下「英知事業」とい う)廃止措置等基礎基盤研究・人材育成プロ グラム」、原子力機構「英知事業研究人材育 成型廃炉研究プログラム」等の採択研究機関 と連携して人材育成に取り組んでいる。2019 年度からはクロスアポイントメント制度等 を用いて、原子力機構と各大学が連携ラボを 形成し、研究人材の育成を加速させている。 また、国内外の研究機関や大学、産業界等の 人材が交流するネットワークを形成するこ とで、産学官による研究開発と人材育成を一 体的に進めている。

「情報発信機能の整備」としては、国立国 会図書館と連携して、国、東京電力等が発信 する情報を IAEA の原子力事故情報分類に従 って整理し、「福島原子力事故関連情報アー カイブ」(FNAA)として発信している。また、 各研究成果は文献として適宜発信されるが、 FNAA では原子力機構の研究成果を含む文献 情報についても発信している。

# 4.1.1 原子力機構における 1F 廃炉のための研 究開発体制

1Fの廃炉には様々な課題が存在しており、その解決のための研究開発は、基礎基盤から応用研究、開発・実用化に至るまで、産学官の多様な実施主体により行われている〔図 4-1 (a)〕。 原子力機構では、福島研究開発部門を中心に、 1F 廃炉の課題解決のために必要な研究開発に取り組んでいる。 福島研究開発部門では CLADS が、NARREC を用 いた遠隔操作機器の実証試験を行ったり、大熊 分析・研究センターが、CLADS 国際共同研究棟 の実験室を用いて分析技術開発を行ったりする など、それぞれ連携を図っている。また、環境 動態・放射線モニタリング等の研究開発で得ら れた成果は部門内で共有しながら研究開発を実 施している〔図 4-1(b)〕。



図 4-1 福島第一原子力発電所の廃炉に係る(a)研究開発実施体制の概略(NDF 戦略プランより抜粋)、(b) 福島研究 開発部門の研究開発体制 他部門では、原子力科学研究部門、高速炉・ 新型炉研究開発部門及び核燃料・バックエンド 研究開発部門の各々に福島研究開発推進室を設 置して、横断的に福島関連の研究開発を推進す るとともに、これらの推進室と CLADS が密接に 連携している。それによって、茨城県の東海、 大洗地区の施設を有効活用するなど、原子力機 構全体で 1F 廃炉の研究開発に取り組んでいる。 また、事業計画統括部と福島研究開発部門は、 2018 年度より 1F 廃炉研究開発推進費の機構内 提案募集を行っており、原子力機構として主体 的に実施すべき 1F 廃炉の基礎基盤研究を、部門 を超えた連携を強化しながら着実に進めている。

#### 4.1.2 国内外の英知を結集する場の整備

#### (1) 廃炉基盤研究プラットフォーム

国内外の英知を結集する場として、CLADS 及 び文部科学省英知事業「廃止措置等基盤研究・ 人材育成プログラム」採択事業者の共同運営に よる廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体 として、廃炉基盤研究プラットフォームを整備 した。

基礎・基盤研究を推進するためには、多様な 分野の知識や経験を動員し、創造的なアイデア とその活用が必須であり、研究者個人の独自性 を尊重する「バザール的アプローチ」によるコ ミュニティーの構築を目指している(図 4-2)。

この廃炉基盤研究プラットフォームは広く開 かれたものであり、国内外の多くの研究者、研 究機関の参加が得られるように運営し、NDF、 IRID、東京電力、その他関連機関はオブザーバ ーとして会議に参加することができる。

これまでも廃炉基盤研究プラットフォームの 中で廃炉の課題や研究ニーズの検討、研究の進 め方等を議論し、その結果、「廃炉に関する基礎・ 基盤研究の課題リスト」の整備を行い、また廃 炉全体を俯瞰する「基礎・基盤研究の全体マッ プ」の提示、更新を行っている。





図 4-2 廃炉基盤研究プラットフォームの位置付け

廃炉の課題や研究ニーズを共有し、大学、研究機関の基礎・基盤研究成果を 1F の廃炉の現場に橋渡しする。

#### (2) 福島リサーチカンファレンス

廃炉基盤研究プラットフォーム事業の1つと して、福島研究開発部門の国際セミナーを「福 島リサーチカンファレンス」(以下「FRC」と いう)として実施している。

#### ① FRC の開催趣旨

CLADS は内外の専門家の助力を得て、廃止措 置に必要な特定のテーマを選定して、年に 5-6 回の FRC を福島県で継続的に開催している(表 4-1)。

FRC は、廃止措置に関連する種々の分野で時 代をリードする世界の研究者、若手研究者及び 学生が参加し、最先端の技術や研究に関する報 告や議論を行うことで、将来の廃炉人材の育成 と国内外の英知の結集を図るだけでなく、最新 の 1F の状況や廃炉研究を紹介することで、廃止 措置の情報発信の場としても位置付けている (図 4-3、4-4)。

② FRC の研究テーマ

FRC で主に議論されているテーマは次のとおりである。

i)核種分析、ii)過酷事故進展解析、iii)被ば
 く防護と除染、iv)遠隔技術、v)プロジェクト・
 マネジメント、vi)コンクリート構造物の保全、
 vii)腐食予測と防食、viii)検査技術、ix)補修技術、
 x)燃料デブリの物性と処理、xi)放射性廃棄物の処分、xii)臨界管理。

FRCは、大学、高専、学協会からのトピカルな テーマについても、提案を受ければ原子力機構 と連携して企画運営することができる柔軟な会 議である。

CLADSでは1Fの現場ニーズを収集して研究テ ーマへ反映すると共に、本カンファレンスでの 知見を廃止措置へと反映している。



図4-3 若手研究者による成果発表 ポスター発表にて若手を中心に研究の成果を報告し、 シニアとの質疑応答を実施。



図4-4 FRC の様子 国内外からの研究者を集めて開催。学生や若手研究 者の参加を促し、廃炉人材育成を図る。

#### 表 4-1 FRC 開催状況(1/2)

これまで、福島県内(富岡町:8 回、楢葉町:6 回、いわき市:5 回、三春町:1 回)、茨城県東海村(1 回)で計 21 回開催をした。(開催回数には付随する現場視察場所・回数は含めていない)

開催日	開催テーマ	開催場所	参加人数	成果
2015年11月10日	CLADS 廃止措置研究国 際ワークショップ	東海村 (いばらき量子ビーム研究セン ター)	128名	「デブリ取出しに向けた事故進展挙動解析」及び 「デブリの取出し・保管に向けた性状評価」につい て、研究開発の現状と今後の国際協力の進め方 等について議論。
2016年4月19-20日	廃炉に向けた耐放射性 センサー及び関連研究 に関する国際ワークショ ップ(R2SRT2016)	いわき市 (LATOV)	100 名	宇宙産業や一般産業界を含む先端研究との更な る連携の重要性を認識。
2016年8月4-6日	廃炉のための放射線計 測研究カンファレンス	楢葉町 (サイクリングターミナル展望 の宿「天神」)	56名	国内外の放射線計測に関わる専門家が廃止措置に向けた情報交換及び連携体制を構築。
2016年11月7-9日	事故廃棄物の安全管理 に関する研究カンファレ ンス	いわき市 (LATOV)	60 名	海外の廃棄物管理の経験と 1F 事故廃棄物への 活用のための更なる研究協力の重要性、及び若 手研究者の人材育成の重要性を認識。
2016年11月24-25日	廃炉のための遠隔技術 に関する研究カンファレ ンス	楢葉町 (楢葉遠隔技術開発センター)	83 名	モックアップ試験設備の構築にあたって、建築や 構造物設計の有識者との協力の必要性を認識。
2017年6月2021日	廃止措置及び廃棄物管 理におけるセメント系複 合材料に関する研究カン ファレンス(RCWM2017)	富岡町 (学びの森)	194名	1F の廃止措置を促進するために、国内外の機関 の更なる研究協力の重要性を認識。
2017年7月5-6日	シビアアクシデント時の 燃料・炉心破損:係る、 材料科学、熱力学、シビ アアクシデント解析とモ デリングの専門家ワーク ショップ	富岡町 (学びの森)	100 名	シビアアクシデント時の燃料・炉心の破損進展に 関して、多くの専門分野の研究者が横断的に情報 交換し、1F廃炉のみならず、今後の安全研究へも 効率的に知見を蓄積していく必要性を認識。
2017年9月5-6日	「燃料デブリ」の性状把 握こ関する研究と人材育 成カンファレンス」 (ConFDeC2017)	富岡町 (学びの森)	50 名	国内外の連携の重要性が再認識されるとともに、 廃炉に関わる人材の確保・育成を進めるために は、学生が参加しやすい基礎研究分野の拡充や 研究支援システムの構築等の必要性を認識。
2017年11月27-29日	1F の主要⊐ンポーネン トの腐食予測と緩和に関 するカンファレンス	富岡町 (学びの森)	100 名	腐食予測や緩和の技術開発に必要とされる研究 課題に関して様々な意見が述べられるとともに、 技術開発の難しさや重要性を認識。
2017年11月29-30日	原子力施設における遠 隔技術に関するカンファ レンス	楢葉町 (楢葉遠隔技術開発センター)	60 名	国内外の専門家との意見交換を通じ、廃止措置・ 災害対応に関する遠隔技術の重要性や難しさに ついて再認識。
2018年3月4日	放射性セシウムの陸域 環境や生態系における 移行(第3回国際セシウ ムワークショップ)	三春町 (福島県環境創造センター)	100名	農林水産物に影響を及ぼす因子として、森林内で の放射性セシウムの動きや環境中の放射性セシ ウムの移行パラメータが重要で、今後もそれらを 詳細に評価していくことの必要性を認識。

#### 表 4-1 FRC 開催状況(2/2)

これまで、福島県内(富岡町:8 回、楢葉町:6 回、いわき市:5 回、三春町:1 回)、茨城県東海村(1 回)で計 21 回開催をした。(開催回数には付随する現場視察場所・回数は含めていない)

開催日	開催テーマ	開催場所	参加人数	成果
2018年6月1921日	廃棄物の分析技術開発 に関する研究カンファレ ンス(FRCWM2018)	富岡町 (学びの森)	224名	廃棄物の分析、性状把握の重要性を再認識。若 手研究者の積極的な参加、ポスター発表の場よ、 廃炉研究を進める上での大きな成果。
2018年9月18-20日	1F 事故の知見に基づく 炉心溶融挙動の解明と 燃料破損現象に関する 国際セミナー	いわき市(LATOV)、 楢葉町(J ヴィレッジ)	50名	国内外の若手研究者がどのようなモチベーション のもと研究に取り組んでいるのか等、通常の国際 会議ではあまり機会のない話題について意見交 換することで、学生・若手研究者の人材ネットワー ク整備に貢献。
2018年10月30-31日	原子力施設における遠 隔技術に関する国際カン ファレンス	楢葉町 (楢葉遠隔技術開発センター)	80 名	実地での試験訓練ができない環境に対応するロ ボット等遠隔技術開発において、模擬環境が重要 になることを認識。
2018年11月5日	燃料デブリの性状把握 に関する研究カンファレ ンス	いわき市 (LATOV)	50名	1F の燃料デブリも含めて、各国における損傷燃 料や燃料デブリの取扱いという困難な課題に向 けて、国際機関を通じた情報共有の重要性、国際 的な連携の必要性を認識。
2018年11月2627日	廃炉遠隔技術のための 耐放射線化、運用技術及 び計測技術の高度化の 展望に関する研究カンフ アレンス	富岡町 (学びの森)	330 名	議論を通じて 1F の廃止措置を促進するために遠 隔技術や耐放射線性デバイスの開発、放射線分 布の可視化技術の重要性について再認識。
2019年5月24日	福島廃炉研究に関する 国際ワークショップ (FDR2019)	楢葉町 (J ヴィレッジ)	182 名	事故解析、デブリ取出し戦略等の5つのトラックで 議論し、廃炉の進展に向けて世界の英知を結集。
2019 年 7 月 10-12 日	1F の廃炉とシビアアク シデント研究のための材 料科学ワークショップ 2019	楢葉町 (J ヴィレッジ、楢葉遠隔技術開 発センター)、 いわき市(ハワイアンズ)	89 名	材料科学が事故進展解析やデブリ特性評価に果 たす役割に関するパネルセッションが開催され、 今後の研究協力に向けた方向性を提示。
2019年10月17-18日	原子力水素安全に関す るワークショップ 2019	富岡町 (ホテル蓬人館)	45名	国内外の原子力水素安全に係わる専門家が、我 が国及び海外での取り組みの状況や最新の研究 成果を紹介し、意見交換。
2019年10月23-24日	原子力施設における遠 隔技術	楢葉町 (楢葉遠隔技術開発センター)	40名	国内外の知見を共有するとともに、今後も協力を 継続することを確認。
2019年12月9-11日	1F の主要コンポーネン トの腐食に関するカンフ アレンス「30 年後の健全 性を維持するための腐 食課題とは」(FRC- Corrosion2019)	富岡町 (学びの森)	80名	腐食予測や緩和の技術開発に必要とされる研究 課題に関して様々な意見が述べられるとともに、 事故炉特有の条件下での腐食予測の重要性と研 究の必要性を再認識。

#### 4.1.3 国内外の廃炉研究の強化

# (1) 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

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 (2014年6月文部科学省)」等を踏まえ、2015 年度から「英知事業」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 クラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化 プログラム」を推進してきた。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 育成の取り組みが推進されてきた。

一方、原子力機構では、2015年4月に CLADS

を組織し、廃炉研究の実施や「廃炉基盤研究プ ラットフォームの運営、FRC の開催等の取り組 みを進めてきた。その後、2017年4月に CLADS の中核拠点である「国際共同研究棟」の運用開 始を踏まえ、国内外の大学等と CLADS の連携を 強化し、CLADS に期待される機能をさらに発揮 していくこととなった。具体的には、2018年度 の新規採択課題から英知事業の実施主体を文部 科学省から原子力機構に移行させ、原子力機構 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なっ た。従来のプログラムは、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 (2019 年度よ り新設)の4つに再編された(図4-5)。



#### 図 4-5 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

CLADS は研究開発の企画・公募、人材育成等を実施する。この際、研究開発の戦略性の確保等の観点から、1F の廃 炉現場のニーズに基づいた研究課題を設定するとともに、補助金業務運営に係る運営体制を敷き、大学等との連携 強化を図る。

#### (2) 国際協力研究

1Fの廃止措置は、世界にも前例のない極めて 技術的難易度の高い課題が山積しており、国内 外の英知を結集して取り組まなければならない。 このため、CLADSを中核に、国内外の研究機 関、大学、産業界を始めとする関係機関との連

関、大学、産業界を始めとする関係機関との連 携を図り、共通の課題に直面している原子力先 進国の英知と経験を結集させるとともに、中長 期的な研究開発及び関連する活動を担う国際的 に通用する人材の育成(4.1.4 参照)等を行っ ている。

英知事業の国際協力研究としては、図 4-5 の 枠組みで行われているところであるが、これら に限らず原子力機構が独自で取り組んでいる国 際協力を表 4-2 に示す。

囲	相手機関	技術目標		
アメリカ USA	LBNL	1Fでの三次元放射線可視化等、放射線イメージング技術を共同開発。		
	SNL	原子力機構の要素モデルを基に燃料破損・下部プレナム破損モデルの共同開発。		
	SRNL	燃料デブリ経年変化に及ぼす放射線分解等の影響評価に係わる基礎データの取得を計画。		
イギリス	国立原子力研究所	水分を含む固体廃棄物の処理・保管・輸送・処分における水素発生評価手法及び発生する水素に関		
ик 😹	(NNL)	わるベント要件について、英国の知見を調査し、廃棄物分析計画へ反映。		
		照射済燃料を用いたBWR制御棒共存条件でのCsなどの放出試験データ拡充。FP化学挙動の基		
		礎知見を取得。		
フランス 🔳 📕	フランス原子力・代替エ	MCCI(溶融燃料ーコンクリート反応)生成物の特性情報等を 1F のデブリ取出しへ反映するとともに廃		
France	ネルギー庁(CEA)	炉における燃料デブリの特性に精通した研究者の育成を図る。		
		大型 MCCI 試験時の MCCI 生成物の生成形態や特性を 1F のデブリ性状の推定、デブリ取出し計画		
		等へ反映。		
ベルギー	ベルギー原子力研究セ			
Belgium	ンター (SCK・CEN)	破預燃料の取扱い、保管及び保管に関わる R&D の知見をナフリの取扱い・保管作業等に反映。		
フィンランド	フィンランド技術開発セン	水素再結合触媒を用いた水素濃度低減技術の整備による廃棄物の輸送・保管方策の検討、並びに		
	<b>ኇ(</b> \/TT)	FP 放出移行基礎実験及び解析による FP 化学挙動・分布評価に反映(研究員受け入れ)。		
Finland		水素再結合触媒を用いた水素濃度低減技術の基盤整備を通して廃棄物の輸送・保管方策の検討に		
	ヘルシンキ大学	反映。		
ウクライナ	原子力安全問題研究所			
Ukraine	(ISP-NPP)	ナエルノノ1リ」〜ゐける燃料ナノリ」〜関9 る知見をナノリの休官作来寺□〜反映。 		
717	チェコ原子力研究所/ジェ	コールドクルーシブル設備を用いた模擬デブリ凝固試験の実施。1F で想定される遅い凝固過程で		
Czech Rep.	シュ研究所 (NRI/CVR)	の物理化学的な偏析に関する知見獲得。		
国際機関		各種燃料形態からの核種浸出メカニズムを把握し、損傷燃料の取扱いの知見をデブリの保管作業		
	IAEA	等に反映。		
		廃炉基盤研究における材料科学的な解析に活用できるように、国際熱力学データベースを整備する		
		(TAF-ID)。1F 事故進展のシナリオ解析に基づき、1F のデブリ特性や FP 挙動の評価に材料科学		
国際機関	OECD/NEA	的な知見を提供(TCOFF:文科省の資金拠出型プロジェクト)。燃料デブリの分析に関する議論を通		
-	(Nuclear Science	じて、サンプリングや取出し作業の計画立案、作業安全の確保等について検討(PreADES)。		
(INEA	Committee)	備考:TCOFF 資金の一部を活用した国際研究基金の設立と、それを用いたロシア研究機関(NITI、		
- 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990 - 1990		KRI)あるいはアカデミー(デルフト大、サンクトペテルブルク大)との研究協力(ロシアのデブリや		
		FP に係る未公開データの入手、アカデミーの特殊設備を用いた FP 重要データの取得)。		

表 4-2 主な国際協力

TAD-ID: Thermodynamics of Advanced Fuels – International Database

TCOFF: Joint project on Thermodynamic Characterization Of Fuel debris and Fission products based on scenario analysis of severe accident progress at Fukushima Daiichi NPS

PreADES: Preparatory Study on Analysis of Fuel Debris

#### (3) 基礎・基盤研究の全体マップ

1F の廃炉プロジェクトを合理的に進めるた めには、現在だけでなく将来も見据えて必要と 考えられる重要な研究課題を実施時期と実施方 法とあわせて特定しなければならない。従って、 まず、現場のニーズ、研究のシーズのマッチン グを図り、プロジェクト全体を対象として手つ かずの重要な研究や埋もれている(気づかれて いない)研究課題を掘り起こし、重要な研究課題 として提示する必要がある。

原子力機構では、これまでも「廃炉基盤研究 プラットフォーム」の中で、「廃炉に関する基礎・ 基盤研究の課題リスト」の整備を行ってきた。 それに加えて、前述のとおり英知事業とアカデ ミアとの連携を引き続き強化し、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。

これによって汚染水対策から放射性廃棄物の 処理・処分・環境回復までの廃炉全体を俯瞰す る「基礎・基盤研究の全体マップ」を整備し、 それぞれの廃炉プロセスの中にあるニーズの相 関を示すことで、基礎・基盤研究の解決すべき 課題を整理した(図4-6)。



### 図4-6 福島第一原子力発電所廃炉のための『基礎・基盤研究の全体マップ』

「基礎・基盤研究の全体マップ」は、汚染水対策から処理・処分・環境回復までの廃炉全体を俯瞰し、それぞれの廃 炉プロセスの中にあるニーズの相関を示すことで、基礎・基盤研究の解決すべき課題を整理したものである。 1Fの廃炉プロジェクトを合理的に進めるためには、現在だけでなく将来も見据えて必要と考えられる重要な研究課 題を実施時期とあわせて特定する必要がある。 廃炉作業の進捗により、そのニーズやニーズ の重要度は変化することから、継続的にこのマ ップを更新していく必要がある。

「基礎・基盤研究の全体マップ」の整備にあ たっては、NDFの「6つの重要研究開発課題」も 考慮している。ここで、「6つの重要研究開発課 題」とは

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(αダスト対策を含む)

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

であり、NDF の廃炉研究開発連携会議の下に設 置された研究連携タスクフォース中間報告 (2016年11月)において抽出された、1F 廃炉 に向けて戦略的かつ優先的に取り組むべき課題 である。

また、NDFの廃炉研究開発連携会議において、 これらの課題に関して、課題別分科会における 議論も参考にしつつ、課題の背景、ニーズ側の 問題意識、想定される研究のイメージなどを含 め、研究開発を進めていく上での基本的方向性 が示された。原子力機構は、この基本的方向性 に沿って、燃料デブリの取り出し、放射性廃棄 物の処理処分、事故進展シナリオの解明及び遠 隔操作技術等に係る基礎・基盤的な研究開発に 取り組んでおり、「基礎・基盤研究の全体マップ」 との関連付けについては、図4-7のとおりとな っている。



図 4-7 基礎・基盤研究の全体マップと CLADS 研究との関連・位置付け

CLADS としては「基礎基盤研究の追求により課題解決につながる(青色評価)」と評価された課題の解決に資する研究 を中心に推進している。

# 4.1.4 中長期的な人材育成機能の強化と情報 発信機能の整備

#### (1)連携ラボ

英知事業のプログラムの中で、2019 年度から 開始した研究人材育成型廃炉研究プログラムで は、原子力機構における人材派遣制度(クロス アポイントメント制度、博士研究員制度等)を 活用して、大学と原子力機構の間に「連携ラボ」 と呼ばれる共同研究室を構築し、緊密に連携し て研究を行っている(図 4-8)。

これまでの委託研究と違い、委託研究者は原 子力機構の組織の一員となるため、機構内の実 験設備等が活用できることになった。さらに、 企業との連携を義務化したことで研究の実用性 を高めることとなった。

加えて、この連携ラボは、福島県内に所在す るセンターのみならず、機構の各拠点(例えば 茨城県に所在する大洗研究所)も対象となって おり、福島研究開発部門を超えた原子力機構全 体との連携へと繋がっている。

#### (2) NEST プロジェクト

優秀な若い世代の原子力科学技術への興味関 心を高め、原子力科学技術に係る教育・人材育 成のため、2016年にOECD/NEAから「原子力教 育・スキル・技術(NEST:Nuclear Education, Skills and Technology)」の提案があり、2017 年に文部科学省はCLADSをハブとした国際的な 人材育成への貢献を念頭に、NEST活動に関する 枠組みへの参加を表明した。2019年2月にNEST 参加10か国ごとの指名された機関の署名(日本 は原子力機構が実施)により、NEST活動に関す る枠組み協定が発効された。

2019 年度の NEST 活動として、東京大学とと もに計5名の海外の若手研究者を受入れ、遠隔 技術に関する最新の研究実習を行った。

なお、2018 年度には、OECD/NEA からの依頼に 基づき、パイロット版の NEST 活動として、国内 外の若手研究者計9名を受け入れている。



図4-8 連携ラボの概要(研究人材育成型廃炉研究プログラム) 委託研究者は、原子力機構の一員として、原子力機構の設備等を使用することができる。

# (3) 次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス (NDEC)

文部科学省が推進してきた英知事業の「廃止 措置研究・人材育成等強化プログラム」採択機 関は、その事業の一環として、廃止措置に関係 する若手研究者が成果を発表する場を設け"次 世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス" を 2016 年度から開催してきた。

英知事業の実施主体が文部科学省から原子力 機構に移行したことから、今後はNDECを廃炉基 盤研究プラットフォームの事業の1つと位置づ け、FRC は国内外の様々な分野の科学者、技術 者が集う専門的な場として、NDEC は若手研究者 の人材育成の場として開催していく予定である。

#### (4) 情報発信機能

原子力機構では、1F 情報及び事故からの環境 回復に関する情報をインターネット上で将来に 亘って提供することを目的として、国等の公的 機関、学術機関及び研究機関等のウェブサイト から発表された情報、及び学会等のロ頭発表情 報を幅広く収集・整理し、「福島原子力事故関連 情報アーカイブ」(FNAA)として提供している

(2020年9月現在で約20万件収録)。現在では アクセスが困難となった情報も、国立国会図書 館が実施する「インターネット資料収集保存事 業(WARP)」と連携することで同情報へのアクセ スが可能となっている。FNAA はインターネット 上で公開しており、誰でも自由に利用することが できる(図4-9、https://f-archive. jaea. go. jp/)。

また、「基礎・基盤研究の全体マップ」のニ ーズ詳細情報のページでは、関連する研究課題 を示すとともに、その成果情報への紐付けを行 っている。



#### 図 4-9 福島原子力事故関連情報アーカイブ(FNAA)

様々な機関のウェブサイトから発信されたインターネット情報及び学会等のロ頭発表情報をコンテンツの種類や分類、 機関名等から検索できる。

#### 4.2 廃止措置等に向けた研究開発の進捗

原子力機構では、1Fの廃止措置等に向け、中 長期ロードマップに示される工程に沿って研究 開発を実施している。特に、NDF が策定する戦 略プラン等の方針や、中長期的な視点での現場 ニーズを踏まえつつ、①燃料デブリの性状把握・ 分析技術の開発、②放射性廃棄物の処理・処分、 ③炉内状況の解明及び④遠隔技術等に係る基礎 基盤的な研究開発について、体制を整備すると ともに、人材の確保・育成も視野に入れ、着実 に進めている。

これらの研究開発で得られた成果を活用して 廃止措置等の実用化技術を支えるとともに、廃 止措置等の工程を進捗させ得る代替技術等の提 案に繋げることにより、1Fの廃止措置等の安全 かつ確実な実施に貢献する。さらに、専門的知 見や技術情報の提供等により、NDF等における 廃炉戦略の策定、研究開発の企画・推進等を支 援する。

廃止措置等に向けた研究開発の各進捗については、以下に概説する。

#### 4.2.1 燃料デブリの性状把握・分析技術の開発

中長期ロードマップでは、1Fの廃炉に向けて、 1~3 号機で生成していると考えられている燃 料デブリ(溶融等により著しく破損している燃 料や構造材等の混合物)の取り出し作業が計画 されており、取り出し作業の検討や使用する装 置類の設計や開発において、その対象となる燃 料デブリの特性を早期に推定する必要があった。

また同時に、取り出し時の放射性飛散微粒子 挙動の解析や、プラント内線源・線量率分布評 価手法の開発、取り出した後の保管技術開発、 長期保管中の経年変化挙動の評価についても、 重要性が指摘された。

こういった状況を踏まえ、原子力機構におい

ては事故直後より「燃料デブリの性状把握・分 析技術の開発」としてこのような多くの課題に ついて研究開発を実施してきたが、ここではそ の中から次の3つの項目に関して述べる。

- (1) 燃料デブリの性状推定
- (2) 燃料デブリの処理・処分に関する検討
- (3) 燃料デブリの分析技術開発

#### (1) 燃料デブリの性状推定

1Fの廃止措置においては、事故炉から安全か つ着実に燃料デブリを取り出すことが必要とな る。燃料デブリの取り出し工法や工具を検討す る際に、対象となる燃料デブリの性状を適切に 推定することが重要であるため、原子力機構で は、事故直後より、この課題に取り組んだ。

まず、原子力機構内における検討として、ス リーマイル島原子力発電所 2 号炉(TMI-2)にお ける燃料デブリ取り出しの実績を調査し、どの ような工具が利用されたかを整理した(図 4-10)。工具の原理等から、利用された工具は概ね 6 種類に分類され、これら工具の設計にあたり 把握すべき燃料デブリの物性を整理した<sup>4-1)</sup>。



図4-10 TM-2 で利用された取り出し工具の分類 TMI-2 の燃料デブリ取り出しでは、種々の工具が利用 されたが、概ね上記の6種類に分類できる。

一方、それと並行して、原子力機構において は、熱力学平衡計算による燃料デブリの化学組 成の推定<sup>4-2), 4-3)</sup>や模擬燃料デブリを用いた試験 研究により、燃料デブリの性状に関する仮説を 立てるとともに、可能な範囲で推定を試みた。 生成が推定されるウラン(U)-ジルコニウム(Zr) 混合酸化物の機械的性質評価<sup>4-4)</sup>や、制御材であ る炭化ホウ素 (B<sub>4</sub>C)と燃料、被覆管との反応生 成物の評価<sup>4-5)</sup>、Pu 含有模擬燃料デブリの融点 測定<sup>4-6)</sup>等を実験室規模で試験するとともに、原 子力機構の原子力科学研究所で保管されていた TMI-2 の燃料デブリサンプルについて、改めて 性状評価を行い、1F の燃料デブリの性状推定を 進めた(図 4-11、4-12、4-13)。

また、1F 特有の事象として大きなトピックス であった溶融燃料とコンクリートとの反応 (MCCI : Molten core concrete interaction) による生成物に関しては、集光加熱試験装置を 用いた小規模試験に加えて、フランス原子力・ 代替エネルギー庁 (CEA: Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)  $\mathcal{EO}$ フレームワーク協定の下に新しく STC (Specific Topics of cooperation) を締結し、2014 年か らの人材派遣を含めた協力により、その性状に ついて調査を行った。2016~17 年度には、CEA カダラッシュの PLINIUS 施設において、1Fの条 件を考慮した大型 MCCI 試験を実施し、その試 験生成物を分析することにより、MCCI 生成物 の性状に関して多くの知見を得ることができ た (図 4-14)。

2018 年度以降は、格納容器内調査等によって 格納容器内から得られたサンプルの分析や取り 出し作業時に発生すると考えられる放射性微粒 子の性状に関しての研究を進めている。このう ち格納容器内調査等によって得られたサンプル は燃料デブリそのものではないものの、U を含 有する微粒子を含んでいることが明らかになっ ており、この微粒子を分析することで燃料デブ リに関する多くの情報が獲得できると期待でき る。また、これらのデータやその解析結果を取 りまとめるデータベースの整備にも着手してお り、今後計画されている燃料デブリのサンプリ ング・分析や中長期ロードマップの第3期以降 の新たなニーズに対応する予定である。



**図 4-11 (U.Zr)O₂ビッカース硬さの組成依存性** 燃料デブリの主成分と考えられている(U.Zr)O₂は Zr の 比率が高くなると、硬さが大きくなる。



### 図 4-12 燃料デブリとして生成すると考えられる各相 の微小硬さ

制御材である炭化ホウ素(B<sub>4</sub>C)との反応により生成す るホウ化物は、主成分と考えられる(U,Zr)O2に比べて 硬さの値が大きく、工具の摩耗等を促進しやすい。



図 4-13 試験に利用した TMI-2 燃料デブリ

原子力機構で保管していた TMI-2 の燃料デブリサンプルのうち、上記のものを試験で利用し、性状推定に役立てた。



図 4-14 大型 MCCI 試験生成物の外観 非常に堅く多層構造になるなど、取り出し作業を検討する上で多くの情報を入手することができた。

(2) 燃料デブリの処理・処分に関する検討

取り出し後の燃料デブリをどうするかについ て、選択・決定に関する議論を行い、その選択 肢や技術的成立性等を社会に示す必要があると 考え、取り出し後の燃料デブリの処置に関する シナリオについて検討するとともに、各シナリ オに関するフィージビリティスタディを 2011 年より実施した。 考えられるシナリオについて、そのシナリオ 全体の比較評価を、放射性廃棄物発生量、技術 的成立性、社会的受容性、経済性等の観点から 実施し、その得失をまとめ、各シナリオの比較 評価及び課題について一定の結論を得た<sup>47)</sup>(図 4-15)。

また、シナリオスタディと同時に、燃料デブ リの最終的な扱いのオプションのひとつとして、



図4-15 燃料デブリの処置シナリオの例 TMI-2の事例等を参考に、日本の国情も考慮しながらシナリオ案を複数作成した。 再処理技術の適用性に関して重点を置いた研究 開発を実施した。特に、燃料デブリの処理技術 における枢要技術として湿式法の場合は溶解、

乾式法の場合は電解還元、塩素化溶解について 模擬デブリを用いた試験により、技術的な課題 があることを確認した。

2014 年度以降は、当時ニーズの高かった、取 り出し直後を想定した燃料デブリの乾燥プロセ ス検討のための基礎データを取得し、IRID の収 納保管プロジェクトにおける検討に資する成果 を得た<sup>4-8)</sup>。

#### (3) 燃料デブリの分析技術開発

燃料デブリの性状に関しては、取り出し作業 を安全かつ着実に進めるために不可欠な情報で あると考えられ、取り出し前あるいは取り出し 開始以降、サンプリング・分析が行われ、可能 な範囲でその性状を確認していくものと考えら れる。燃料デブリは、従来の使用済燃料とは異 なり、溶融燃料に加えて、構造材やコンクリー ト等の多様な成分が含まれることが予想され、 サンプリング・分析により有用な情報を遅滞な く提供するためには、前処理技術等を含めた燃 料デブリの分析技術を事前に整備しておく必要 がある。そのため、2014年度より燃料デブリの 分析技術開発を開始した。

まずは、分析ニーズを IRID の関連プロジェク ト等からヒアリングし、必要になると考えられ る分析項目を明らかにするとともに、これらの 分析を合理的に実施するための分析フローを検 討した。

並行して、要素技術開発として、前処理とし てのアルカリ融解法の検討や ICP-AES による主 要元素の分析、X線 CT を用いた気孔率測定、 ICP-MS/MS を用いた多核種同時分析を行い、そ れぞれ燃料デブリの分析に対して適用可能な見 通しが得られた。

また、燃料デブリの試験的取り出しが2021年 に着手され、段階的に取り出し規模が拡大され る計画であることから、2019年度において、燃 料デブリに係る機構内の専門家を集めた検討作 業部会を設置し、燃料デブリの分析について検 討を行った。この検討作業部会では、廃炉作業 を安全かつ着実に進めるニーズの観点で、燃料 デブリの取り出し、保障措置、保管管理、処理 処分及び事故原因の究明において、どのような 課題があるのか、その課題を解決するためには、 燃料デブリについて何をどのように分析すれば よいのかについて検討した。作業部会で得られ た成果は、大学、NDF、東京電力、IRID、NFD、 他の有識者で構成された分科会でレビューされ、 機構外部の意見を取り込んだ上で、最終的に原 子力機構の報告書4%として取りまとめた。

これらの成果は、実際に取り出される燃料デ ブリの分析計画の検討において活用される見込 みである。

#### (4) まとめ

安全かつ着実な燃料デブリの取り出しに向け て、事故直後より、燃料デブリの性状推定や処 理処分に関する検討、分析技術開発を実施して きた。これまでは実際の燃料デブリにアクセス できない状況であったが、今後は、燃料デブリ の試験的取り出しが開始され実際の燃料デブリ の性状が確認できる段階になるとともに、その 後に計画されている段階的な取り出し規模の拡 大に向けて、より工学的な課題が明らかになる ため、これらに対応していく必要があると考え る。
#### 4.2.2 放射性廃棄物の処理・処分

1F 事故により、1~3 号機原子炉の燃料が損傷 し、内蔵されていた放射性核種が放出され、原 子炉施設のみならず周辺環境が広範に汚染した。 発電所内にあっては、汚染水対策等、周辺への 放射性物質・核種の拡散抑制と線量率の低減が 急務であったが、付随する放射性廃棄物の管理

(前処理、保管、処理、処分を含む)について も、廃止措置等の完了までの間、長期・継続的 な取り組みが求められ、中長期ロードマップに 基づいて NDF が技術戦略プランを定めてきてい る。廃棄物対策は、燃料デブリ取り出しととも に重要な技術戦略分野の一つとなっており、原 子力機構はこれに重点を置いて取り組んでいる。 検討においては、IRID 組合員として関係組織と 連携し、要素技術の開発に貢献するとともに東 京電力のニーズに応えてきている。ここでは、 汚染水対策に係る緊急的な分析・検討をはじめ、 様々な固体廃棄物の性状を把握するための分析、 安全な保管、処分のための固型化処理、将来の 安全な処分などに係る研究開発の実績を紹介す る。

#### (1)事故後の緊急的な分析・検討

燃料中の放射性核種は、燃料冷却のために注 入された海水と淡水を含む地下滞留水に溶け込 み、汚染水となり、原子炉建屋の地下に滞留し た。このため、汚染水を汲み上げてこれを除染 する化学処理システムが必要となった。

スリーマイル島原子力発電所では、発生した 汚染水には<sup>137</sup>Cs や<sup>90</sup>Sr の放射性核種が含まれ、 これを複数の種類のゼオライトを用いて除染し た。1F においても、同様の除染技術が必須にな ると考えられ、日本原子力学会の有志は2011 年 3月22日に除染の基礎データを収集するチーム を発足させた。原子力機構もこれに協力し、モ ルデナイトに対する Cs 等の分配係数を提供した。

東京電力は、4 号機の南に位置する集中廃棄 物処理建屋等に汚染水処理の設備を設置し、 2011年6月から運用を開始した。当初、ゼオラ イトを用いる吸着、沈殿、逆浸透膜と蒸発濃縮 の装置からなるシステムにより、水の循環を達 成し、以後、吸着装置の増設や多核種除去設備 (ALPS)の設置等の改良が重ねられている。

原子力機構は、汚染水処理システムの構築に 資するため、上述の<sup>137</sup>Cs 等の吸着のほかにもフ ェロシアン化物沈殿<sup>4-10)</sup>やチタン酸吸着<sup>4-11)</sup>に よる除染プロセスを検討した。これらは東京電 力のシステムに採用されるには至らなかったが、 後述する分析や廃棄物中の放射能量の推定にそ の経験が役立っている。

## (2) 性状を把握するための分析

放射性廃棄物の管理方策を検討するためには 放射性核種による汚染の様子や廃棄物の性状を 把握する必要がある。原子力機構は、分析手法 の開発や分析の実施に取り組んできた。

事故の発生後直ちに東京電力は汚染水と土壌 の採取を開始した。これらの試料はいずれも核燃 料サイクル工学研究所に輸送して分析された<sup>4-12)</sup>。 汚染水は、原子炉建屋等の滞留水を分析し、<sup>137</sup>Cs、 <sup>134</sup>Csとともに半減期の短い核種の濃度を明らか にし、スリーマイル島原子力発電所事故との挙 動の比較がなされた。土壌は、3か所を定点と して採取し、変化の様子が調べられた。

放射性核種による汚染物は廃棄物としての取 り扱い、管理方策を検討する必要がある。保管 や処理のためには、主要な放射性核種とともに 物質の性状が、また、処分の安全に関しては、 将来、処分を実施するときに重要となる可能性 のある、長半減期の核種の挙動を知る必要があ る。そのような核種には、U や Pu 等のアクチノ イド核種、<sup>129</sup>I 等の核分裂生成物、<sup>59</sup>Ni、<sup>63</sup>Ni 等 の放射化生成物がある。分析に先立ち、分析方 法が確立していなかった<sup>93</sup>Zr、<sup>93</sup>Mo、<sup>107</sup>Pd 及び <sup>126</sup>Sn の分析法を開発し、順次実用に供した<sup>4-13)</sup>。

汚染した物質は多種多様であり、できるだけ 多くの種類の物質についてデータを得る必要が ある。これまでに、原子炉建屋の内外で収集さ れた瓦礫、土壌、植物、汚染水、汚染水処理に 伴い発生する二次廃棄物を試料として得て、分 析してきた。試料は東京電力から提供を受ける 他に、原子力機構と IRID は発電所に赴き、試 料を採取してきた。原子力機構は、原子炉建屋 周辺から瓦礫を、発電所の全域から植物と土壌 を採取して分析に供した。分析試料は、茨城県 に所在する5つの分析施設、原子力機構の原子 力科学研究所(バックエンド技術開発建家)、核 燃料サイクル工学研究所(高レベル放射性物質 研究施設)、大洗研究所(照射燃料集合体試験施 設)、ニュークリア・デベロップメント株式会社、 日本核燃料開発株式会社に輸送し、分析してい る。得られた分析データは、廃炉・汚染水対策 チーム会合/事務局会議に報告し、その後、デ ータベースに収録し、廃炉作業の促進に役立て ている。

① 汚染水

2020年4月9日時点で汚染水は1~4号機建 屋と集中廃棄物処理建屋の地下にそれぞれ約 9,700 m<sup>3</sup>、約10,180 m<sup>3</sup>が滞留している。汚染水 はその除染処理により二次廃棄物が発生し、ま





表 4-3 除染処理がなされた汚染水と除去された <sup>137</sup>Cs 放射能の量

発電所	処理した汚染水量 (m <sup>3</sup> )	使用済み吸着材量	<sup>137</sup> Cs 放射能 (PBq)	
福島第一	約 2,199,460	779 (基)*1	$170  {}^{*1,  3}$	
		224 (基)*2	90 *2, 3	
スリーマイル島	2,780	230 (L) ×10	2.2	

\*1 セシウム吸着装置使用済ベッセル。

\*2 第二セシウム吸着装置使用済ベッセル。

\*3 2014年8月12 日まで。

た、上記建屋地下の汚染源ともなるため、放射 性核種組成は重要な情報である。主な核種であ る<sup>137</sup>Cs、<sup>90</sup>Sr や<sup>3</sup>H とともに長半減期である<sup>129</sup>I と<sup>238</sup>Pu も検出されており、図 4-16 に示すよう に、濃度の時間に対する変化は、2013 年以後、 低下が緩やかになっている<sup>4-14</sup>。Pu の濃度は、

より上流にある原子炉格納容器 (PCV: Primary Container Vessel) 内の水では高く、滞留水位 を下げる上で考慮が必要である。汚染水の情報 は、水処理二次廃棄物の含有する放射能量を推 定するために利用できる。セシウム吸着装置に より除去された放射能は 2014 年 8 月までに約 260 PBq に達しており<sup>4-15</sup>、これは表 4-3 に示す ようにスリーマイル島原子力発電所事故の 100 倍を超えている。

② 汚染水処理時の二次廃棄物

汚染水処理により上述のゼオライト等の吸着 材や沈殿物が廃棄物として発生する。このよう な廃棄物は線量率が高いために試料の採取が難 しく、分析の実績は限られているが、これまで に、除染装置のスラッジ、多核種除去設備の炭 酸塩及び水酸化鉄スラリー<sup>4-16)</sup>を分析した。これ らは化学的に安定であるので、分析に先立ち、  $\gamma$ 線測定準備としてのCs 核種分離、 $\beta$  及び  $\alpha$ 線測定のために、吸着材や沈殿を分解する方法 を確立した。得られたデータによって、汚染水 処理の設備は、目的の核種を除去していること が確認されている。汚染水の増加は、地下水バ イパス、サブドレン、陸側遮水壁等の対策によ り減じられており、発生量は約 200 m<sup>3</sup>/d で推 移している。汚染水処理二次廃棄物は今後も発 生するので、分析も継続していく。

③瓦礫、伐採木等

コンクリートや金属等の不燃物、難燃物や可 燃物(使用済み保護衣を除く)が「瓦礫類」に 分類、保管管理されている。これらのうち、主 にコンクリート系の物質を対象として分析して きた。原子炉建屋の内外で採取された瓦礫の分 析データのうち、<sup>90</sup>Sr、<sup>129</sup>Iと<sup>238</sup>Pu 濃度の例を図 4-17 に示すように、<sup>137</sup>Cs との相関がうかがわれ る。これは、様々な廃棄物の放射能を推定する 上で重要な知見である。瓦礫は、廃炉作業の進 展に伴い発生し、また、燃料デブリの取り出し の作業が本格化すると、線量率がより高い廃棄 物の割合が高くなる。瓦礫の分析を継続し、デ ータを蓄積していく。

発電所構内の樹木は、設備や施設の設置のために順次伐採され、保管されている。2012年に 構内の各所からマツ等の試料を採取し、一部を 分析した。マツの枝葉、落葉、表土・腐葉土を 採取し、Cs 核種の濃度を比べると、枝葉に対し て落葉や表土(腐葉土を含む場合がある)で高



図4-17 原子炉建屋内で採取された瓦礫試料に検出された核種の濃度(137Csに対するプロット)

い傾向にあった。これは事故当初、汚染した枝 葉等が木の根元に集積し、Cs 核種も移行した結 果と考えられた。核種に関しては、原子炉建屋 の近傍の樹木からは<sup>137</sup>Cs、<sup>90</sup>Sr の他に<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C、 <sup>79</sup>Se が検出された。また、一部の試料から Pu 核 種が検出され、その濃度は 10<sup>-3</sup> Bq/g 程度であ り環境のフォールアウト相当であった。

土壌に関しては、汚染した土壌は既に集積され、また、敷地内の舗装(フェーシング)の処置も進んでおり、当初に汚染された土壌の露出面積は減じられている。<sup>137</sup>Cs、<sup>90</sup>Sr、PuやAm核種の濃度から、汚染核種の組成は発電所敷地外側の土壌や、原子炉建屋内外の瓦礫に似ていることがわかってきた。

④ 処分技術検討のための分析

廃棄物の処分技術は、現在保管管理されてい る廃棄物とともに、将来発生する物を含めた全 てを対象として検討する必要がある。NDFの技 術戦略プランでは、分析データに基づいて様々 な廃棄物の放射能含有量(インベントリ)を解 析的に推定する方針が示されている。原子力機 構は、電力中央研究所と協力して解析的なモデ ルを開発している<sup>4-17)</sup>。モデルは、汚染源(ソー スターム)から種々の廃棄物に放射能を分配す るものであり、放射性核種の挙動を考慮するパ ラメータ(移行の割合)を文献や分析データに 基づいて設定し、放射能量を計算する。年々蓄積している分析データを反映し、推定の確からしさを高めてきている。また、事故廃棄物のキャラクタリゼーション技術の検討に関して、 OECDの取り組みに参画している。

#### (3) 安全な保管(汚染水処理時の二次廃棄物)

廃棄物処理・処分の方策が定められるまでの 間、廃棄物を安全に保管することとなる。保管 が長期にわたる場合に備え、安全保管のための 技術の検討が必要である。技術戦略プランでは、 リスク源として、汚染水処理の二次廃棄物と瓦 礫等が挙げられており、前者が潜在的な影響と 管理上の重要性の観点から高いリスクレベルに 分類されている。原子力機構は、ゼオライトを 内蔵するセシウム吸着塔や多核種除去設備スラ リーを対象として、放射線に起因する水素生成 の影響や材料の健全性を検討し、東京電力の講 ずる措置に協力してきている。

セシウム吸着装置の使用済み吸着塔(ベッセ ル)には、<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Csを吸着した(最近では<sup>90</sup>Sr も含んでいる)ゼオライトが内包され、表 4-3 に示すように、これまで1,000基以上が発生し、 保管されている。保管にあたっては予め水が抜 かれるが、構造上底部に一部が残ること、ゼオ ライト自体が吸湿性であり本質的に水分を含有



図 4-18 実物の吸着塔における Cs の吸着分布 (左 試験装置、右 実験及び計算により求めた Cs 吸着分布)

しやすいことから、ベッセルには水が残留する。 ベッセル内では、放射性セシウムからのβ線及 びy線により水が分解して水素(H)が発生す る。ベッセル内の水と放射性セシウムの分布を 図 4-18 に示す実験により求めてモデル化する とともに、ベッセル内部の水素のふるまいを熱 流動計算により推定した 4-18)。結果として、水素 はベント管を通じて外部へと移行し、水と放射 能の量を最大に見積もった場合にあっても、水 素濃度は爆発限界に入らないことを結論した。 また、材料の健全性に関しては、中間的に生成 する過酸化水素をゼオライトが分解し、材料の 腐食を抑制する効果をもたらすことなどを見出 し 4-19)、保管中に材料の健全性が保たれる見通 しが示唆された。また、放射性セシウムの発す る熱により水がベッセル内で蒸発し分布が変化 する挙動についての検討を進めている。

多核種除去設備にて生成される炭酸塩及び水 酸化鉄のスラリーは、高性能容器(HIC)に入 れて保管される。2014年10から11月に16基 のHIC上部に溢れた上澄み水が発見された。漏 洩防止のために、東京電力はHICから上澄み水 を抜き出す処置を施している。これに対して、 水が溢れた原因を実験的に調べており、これま でに、放射線分解による水素がスラリー層に気 泡として保持され、これが成長して水位を押し 上げる機構が考えられ、その条件を詳細に検討 している。

#### (4) 処分のための固型化処理

放射性廃棄物は、その特性に応じて、固型化 (廃棄体化)の処理を施した上で、所定の処分 場に定置、処分される。1Fでは、植物や土壌等、 通常の原子炉施設では放射性廃棄物とはならな い物・物質が、汚染して放射性廃棄物となって いる。また、汚染水処理により、汚染水に含ま れる核種を化学的に除去することにより、吸着 材や沈殿物等の二次廃棄物が発生している。こ れには<sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Cs や<sup>90</sup>Sr 等の放射性核種が高濃 度に含まれるとともに、化学的に多様な性状の ものが湿潤状態で保管されていることなどから、 それらの処理技術を優先的に検討する必要があ る。

従来の廃棄体化の方法としてはセメント固化 とガラス固化が代表的であり、それぞれ低放射 性、高放射性の廃棄物に適用されている。セメ ント固化は処理操作が比較的容易であり、安価 である一方、水を含むため放射能濃度(比放射 能)の高い廃棄物では、放射線分解により水素 等の気体を生ずることから適用しにくい。ガラ ス固化は、ガラスのマトリックスに放射性核種 を保持できることが特長であるが、様々な化学 的性状の廃棄物を高温処理する必要がある。汚 染水処理二次廃棄物に含まれる Cs は比較的低 温で揮発しやすいため、ガラス固化処理を適用 する場合にはその閉じ込めと遮へいの対策が必 要になるとともに、制御可能な温度で溶融可能 なように廃棄物ごとに適切な混合組成を求める



セメント固化体 (左からケイチタン酸、Sb吸着材)

ジオポリマー (SIAL) 固化体 (左からスラッジ 鉄共沈スラリー、炭酸塩スラリー)

焼結固化体 (左から鉄共沈スラリー、炭酸塩スラリー、ケイチタン酸)



必要がある。これら処理技術に加えて、アルカ リ活性材料 (AAM、しばしばジオポリマーと呼ば れる)による固化はセメントと同様に常温付近 での処理が可能であることに加えて、ガラスに 近い構造を有するため、より水分の少ない固化 体を得られる可能性が高いことから、近年注目 を集めている。

汚染水処理二次廃棄物に適用可能な固化処理 技術を見出すために、まずは様々な処理技術に ついての既存の情報を整理し技術カタログを整 理<sup>4-20)</sup>するとともに、基本的な固化可能性を確 認するための種々の固型化材料を用いた基礎試 験を行った。廃棄物を充填する割合や操作条件 をパラメータとして、図4-19に示すように固化 体を製作し、その基礎的な性質を調べ適用可能 性のある技術があることを確認した。

固化処理技術は、目的とする廃棄物との相性 の他にも、処分場の設計や、処理設備を設置、 運転する上での合理性等を考慮し、総合的に判 断、決定する必要がある。今後は汚染水処理二 次廃棄物のほか、今後の廃炉工程に応じて、保 管時のリスク低減等の観点等から、早期に固型 化する必要がある廃棄物も発生することが想定 される。この際には、その特性を踏まえた多面 的な評価に基づき、図 4-20 に示すような固化可 能な技術を見出す評価の方法論の整備が重要と なる。これに向けて現在は、技術的成熟度の観 点等から、セメント固化、ガラス固化(溶融固 化含む)及びジオポリマー固化技術を対象に、 多様な廃棄物を前提とした、様々な評価の尺度 に関する検討を進めている。

#### (5) 将来の安全な処分に向けての検討

廃棄物の処分方法は、従来、含有する放射能 や主たる核種の特徴に応じて、浅地中(トレン チ、ピット)処分、中深度処分、地層処分に区 分され、適用されている。1Fでは事故に伴い運 転中の核燃料が溶融し、揮発性及び低沸点の放 射性核種は気体とともに、水溶性の核種は溶融 燃料の冷却水に溶出し、それらとともに拡散し たため、汚染の様態が従来の放射性廃棄物と異 なることが想定される。これら廃棄物の処分に 対しては、上記区分への適合性を改めて調べる 必要がある。そこで、分析によって長半減期核 種を中心とした放射性核種の汚染状況や含まれ る化学物質等を把握した上で、処分区分の評価



図 4-20 適用可能な固化処理技術を抽出する方法論のイメージ図





や処分場の設計等を検討している。これら検討 においては、従来の廃棄物には含まれていなか った物質が共存することにより、処分した放射 性核種が遠い将来に容易に拡散する可能性を考 慮する必要がある。

このため、まずは様々な既往情報を調査した 上で、そのような影響を及ぼす可能性のある物 質とその影響プロセスや、影響が発現する閾値 と度合い及び影響度を評価する方法等について 整理した。結果として直接的な影響と影響度合 いが明確になっている物質は限られていること がわかった。

そこで、1Fで発生する廃棄物の発生状況等か ら、それらに含まれると想定される物質を整理 した。そのうち影響があるとされ、かつ共通的 に含まれると想定される有機物、津波や冷却水 として利用された海水成分及び臨界防止のため に注入されたホウ酸水と、共通性は高くないも のの検討の優先度が比較的高いと想定される汚 染水処理二次廃棄物として含まれる若しくは合 成されたフェロシアン化合物、硫酸塩及び炭酸 塩の6種類を検討対象物質として抽出した。こ れら物質の処分場を構成するセメント系材料と ベントナイト系材料である人工バリア材への定 量的な、影響の度合いを図4-21 に例を示すよう に実験的に調べている。

他にも、処分場からの放射性セシウムの拡散 を抑制する材料や、地中での放射性核種の3次 元拡散を模擬するための計算技術等の検討を進 めている。

#### (6) まとめ

廃棄物の問題に対しては、廃止措置の進展と ともに長期間にわたって継続的に取り組むこと となる。技術課題としては、事業者である東京 電力が抱える緊急性の高い事象から、将来に備 えるための基礎的な課題までそのスペクトルは 幅広い。これらに対して柔軟に取り組めるよう 進めていく。

中長期ロードマップでは、廃棄物の性状を把 握するために分析試料の増加や、早期に安定化、 固化を必要とする廃棄物に関してその処理方法 を選定する手法の開発が求められている。これ らとともに、廃棄物が含有する放射能量(イン ベントリ)を確率論的に推定する技術の開発、 これとよく接続する処分安全の評価手法の導入 や、有害物と放射性核種をともに含む廃棄物の 取り扱い技術に取り組んでいく。

#### 4.2.3 炉内状況の解明

## (1) 1F 炉内状況把握に向けた取り組み

IF の廃止措置を進めるにあたり、原子炉内 の燃料デブリや核分裂生成物等の状況を推定・ 把握することが必要であった。(燃料デブリの特 性把握については、4.2.1 参照)しかし、事故 後の原子炉建屋内は高線量下にあって内部を直 接観察することが困難であり、特に、原子炉圧 力容器 (RPV: Reactor Pressure Vessel) やPCV内 の状況を把握することは容易ではなかった。ま た、1Fの1~3 号機は、津波で直流電源を喪失 したことで原子炉プラントの様々な計測データ の取得が困難となったため、事故進展そのもの に関する情報も不足していた。このような事故 時の情報の不足を補う上では、スリーマイル島 原子力発電所(TMI-2)事故の経験やこれを踏 まえた模擬試験等の知見を活かしたシビアアク シデント(SA)解析コードによる解析・評価が 有効と考えられた。しかし、1F は沸騰水型軽 水炉 (BWR: Boiling Water Rector) であり、加圧 水型軽水炉 (PWR: Pressurized Water Reactor) のTMI-2と比べて、炉心内の燃料集合体やRPV下 部のプレナムと言われる部分の構造や配置が複 雑であることなどにより、解析の不確かさが大 きいという課題があった。

そこで、原子力機構を中心にして、東京電力、 エネルギー総合工学研究所、プラントメーカー、 大学が連携して、経済産業省資源エネルギー庁 の「廃炉・汚染水対策事業費補助金(総合的な 炉内状況把握の高度化)」プロジェクト(2016 年から2017年)に取り組んだ。プロジェクトで は、1Fの現場で取得された貴重なデータ(事 故時プラントデータ、PCV内部調査データ、PCV 内の堆積物分析データ等)の分析や、BWR炉心 に固有の課題に関する検証試験や解析を実施し た。そこで得られた知見に基づいて専門家チー



図4-22 2号機炉内状況推定図(全体)<sup>40</sup> RPV 及び PCV 内部に、どのような物質がどの程度堆 積しているか、構造物はどのように破損している か、等について、専門家チームの検討結果を、号機 ごとに取りまとめ、公開した。

ムによる総合評価を行い、事故炉心内部の状況 推定図や核分裂生成物(FP: Fission Products) の分布推定図を取りまとめ、燃料デブリ取出し 工法の確定(2018年)のための重要な成果物と して提供した。それ以降の内部調査の結果等も 集約しつつ、炉内状況推定図やFP分布推定図は 現在も活用されている。図4-22には2号機の炉 内状況推定図を一例として示す。

#### (2) BWR 炉心に固有の課題の検討

炉内状況推定図を取りまとめるために、BWR の事故進展に固有の課題を解決する必要があっ た。本項では、原子力機構が取り組んだ主な課 題について紹介する。

#### 値擬燃料集合体の破損・溶融試験

2015年から2018年にかけて、BWR の燃料集合 体構造を模擬した模擬試験体を高温のプラズマ で加熱し、炉心物質の崩壊・溶融・移行挙動を 把握するための模擬試験とその解析を実施した (図4-23)。この試験では、これまでのBWR 体 系を模擬した試験の多くで達成できなかった酸 化物燃料の溶融温度以上の加熱をプラズマ加熱 法で実現することで、IF 事故を模擬した条件 での軸方向の炉心物質移行を再現した。試験結 果から、高温化した炉心燃料は部分的に閉塞を 形成するものの、燃料の溶融温度近くまで柱状 の形状を保つこと、従って、高温まで水蒸気等 のガスの透過性を有することが明らかとなった。 BWRでの事故時のガス透過性は、SA解析コード での大きな不確かさ要因となっていたが、今回 の試験で得られた知見等を用いて、国際的なSA 解析コードMAPにデブリふるまいに関する新た なモデルが組み込まれ、解析精度が大きく改善 された。



図4-23 2号機炉内状況推定図(局所) 420 (a) 模擬燃料集合体のプラズマ加熱試験の様子と (b) 試験後の模擬破損燃料の概観。高温加熱後に、 燃料が柱状を維持していることが確認できる。

② 燃料崩落時の炉心エネルギーの評価

国内外で実施された 1F 事故の解析により、 号機ごとの注水条件の違いによって事故の途中 段階での炉心エネルギー(崩落した燃料の有す る熱量)に差がある可能性が高いことが次第に わかってきた。そこで、炉心溶融や RPV 減圧等 のタイミングと炉心エネルギーの関係を調べる ために、プラントデータが比較的多く取得され ている2号機と3号機について解析を実施した。

その結果、2 号機では炉心が空焚きになって から約4時間後に下部プレナムへの燃料移行が 生じたと考えられるのに対し、3 号機では約 10 時間後と大きな差があることが示された。図4-24に、原子力機構で実施した検討で予想した空 焚き開始のタイミングと燃料崩落のタイミング を示す。さらに、様々な SA 解析コードで評価 した空焚き開始からの炉心エネルギーの増加量 の最確値を評価したところ、3 号機の炉心崩落 時点での炉心エネルギーは2 号機の約 1.5 倍あ ったことが明らかとなった。図 4-25 に、炉心 エネルギーの評価結果を示す。

これらの解析により、下部プレナムに移行し た燃料物質は、2 号機では相当割合が未溶融で 粒子状であったのに対して、3 号機では相当割 合が溶融していたと推定された。この堆積状態 の違いは、RPV の破損状態の違いにも影響を与 えたと推定され、現在評価を進めている。



図4-24 炉心露出、減圧、燃料崩落の予測結果 事故時のプラントデータを分析し、プラズマ加熱試 験等で新たに取得した知見も加味して、炉心露出、 減圧、燃料崩落等のタイミングの最確値を評価し た。図中で RPV 圧力、D/W 圧力、S/C 圧力は、それぞ れ原子炉圧力容器、原子炉格納容器のドライウェル とサプレッションチャンバーの圧力変化を、時系列 に沿って示す。



図4-25 炉心エネルギーの評価結果 様々な SA 解析コードの解析結果を分析し、2号機と 3 号機での、炉心露出開始から燃料崩落・下部プレ ナムへの移動時点までの炉心エネルギーの増加を評 価した。3 号機では2 号機の約1.5 倍の熱エネルギ ーを有した炉心が崩落したと推定される。

③ BWR 制御棒ブレードの崩落試験

上で示したプラントデータから、号機ごとに、 スクラム後から炉心露出開始、さらに水位低下 を経た空焚きに至るまでの時間に差があること、 また、2 号機では炉心露出と RPV 減圧のタイミ ングが重なり、水蒸気の少ない条件で空焚きさ れた可能性が高いことなどが予想された。これ らは、炉心崩落の初期に発生する制御棒ブレー ドの溶融・崩落にも大きく影響したと予想され た。溶融・崩落した制御棒ブレードは炉心下部 での閉塞や金属溶融物の下部プレナムへの移行 を引き起こし、それ以降の炉心溶融進展に大き く影響する可能性が考えられた。それらの影響 を把握するために、昇温速度や水蒸気流量を制 御し、軸方向に温度分布を付加しつつ、試験中 にその場で破損挙動を観察しながら高温加熱試 験を実施できる、国内外に類を見ない試験装置 (LEISAN)を、福島県富岡町にある廃炉環境国際 共同研究センター多目的試験棟内に整備した (図 4-26)。

比較的速い昇温速度で水蒸気流量の差を見た 試験を行った結果、水蒸気流量が少ない場合に は、制御棒ブレードとチャンネルボックスの溶



図 4-26 制御棒ブレード破損試験装置と模擬制御 棒ブレード試験体の外観<sup>42,420</sup> LEISAN 試験装置内に設置した模擬制御棒ブレードの 試験前後の様子を示す。

融・崩落が促進されるのに対し、水蒸気流量が 多い場合には、チャンネルボックス上に形成さ れる酸化膜により、溶融・崩落が抑制されるこ とが示された<sup>422</sup>。

また、比較的水蒸気が少ない条件で炉心溶融 したと推定されている2 号機の事故進展過程

(温度と水蒸気流量)を模擬した試験では、実 機条件では、通常運転時にチャンネルボックス 表面に形成されていると考えられる数 10 µm の 酸化膜を予め付加した試験を行った。この場合 にも、制御棒ブレードの溶融・崩落が抑制され ることが確認された(図 4-26)<sup>423</sup>。

これらの結果から、水蒸気が少ない2号機の 条件でも制御棒ブレードとチャンネルボックス の溶融・崩落はある程度抑制され、固体と液体 が混合した状態で崩落した可能性が高いことが 示された。このことは、事故初期に制御棒溶 融・崩落物による炉心下部の完全な閉塞が起こ りにくかったことを示唆している。現在、溶 融・崩落を抑制する酸化膜厚の閾値の評価を進 めている。

# (3) RPVからの燃料デブリ流出と堆積挙動に着 目した新たな研究

IFでは、溶融した燃料の一部あるいは大部分 が RPV を破ってペデスタル領域に落下し燃料デ ブリとして堆積したと考えられている。その特 性を把握するためには、燃料デブリの移行と堆 積過程、さらには凝固過程の情報が重要となる。 そこで、原子力機構では、事故時プラントデー タの分析と、模擬試験や解析により、燃料デブ リ移行タイミングと RPV 破損メカニズムの評価 を継続している。

① 燃料デブリのペデスタル移行挙動の評価

図 4-27 に各ユニットについて推定した燃料 デブリの格納容器ペデスタル領域(圧力容器下 部の空間)への移行時間帯を示す。1 号機では、 3/12 6:05 から 6:30 の間に D/W 圧が上昇し、以 後水位計指示値の変化は D/W 領域内の高温化を 示唆していることから、この時点で燃料デブリ のペデスタル移行が生じたと推定した。2 号機 では、現場で観測された白煙、正門付近で観測 された放射線量率、ライブカメラの映像等から



## 図 4-27 1~3 号機における燃料デブリの主要なペデ スタル移行時間帯の推定結果

1 号機では、比較的短時間で RV からペデスタルに 溶融炉心が崩落・移行したのに対し、2.3 号機で は、崩落・移行に数時間かかった可能性が検討され ている。この違いは、堆積している燃料デブリの特 性に大きく影響した可能性がある。 3/15 の 8:30~11:20 の時間帯に移行したと推定 した。3 号機では、3/14 0:00~7:00 の D/W 圧力 上昇は燃料デブリが徐々にペデスタル移行する ことで生じたことに対応していると推定した。 3 号機では、ペデスタルへの燃料デブリ移行に 比較的長い時間がかかったと推定されることか ら、デブリは主に固相または流動性の低い固体 と液体の混合状態であったことが示唆された。 一方、1 号機では移行時間が短く、液相で移行 した可能性が考えられる。2 号機では、内部調 査により、ペデスタルへの流出デブリの量は少 ないことがわかっているが、その移行時間は比 較的長いと推定された。このような移行挙動の 違いは、ペデスタル領域での燃料デブリの堆積 状態に影響したと考えられる。

#### ② デブリ凝固挙動に着目した最近の研究

1F事故では、燃料、制御棒、構造材等の炉心 物質が、炉心部で溶融して下部プレナムに落下 し、そこで、一旦冷却された後に、崩壊熱で再 溶融したと考えられる。さらに、下部プレナム で再溶融した物質は、号機ごとに異なったシナ リオで、一部は下部ヘッドにおいて凝固、一部 は RPV を破損してペデスタルに移行したと推定 される。この際、従来の模擬試験結果に基づい て、下部プレナムでは溶融金属層と溶融酸化物 層等の 2~3 層からなる成層化を起こして溶融 すると推定される。この溶融物は、冷却条件に よっては、非常に遅い過程で凝固する可能性が 示唆された。凝固過程では、一般に、成分や相 の偏析が起こるが、冷却速度の違いは偏析傾向 に大きく影響する。UやPu等の燃料成分、被覆 管酸化物、ガドリニウム (Gd) 等の中性子吸収 物質、FP、構造材等の偏析は、燃料デブリの特 性に大きく影響することから、原子力機構では 模擬燃料デブリの凝固試験とその解析を進めて

いる。

模擬試験では、チェコのジェシュ研究所と共 同で、U酸化物や Gd 酸化物、及び、鉄や Zr の 酸化物を混合溶融させ、1 号機の事故条件を模 擬したゆっくりとした冷却速度で、成分偏析を 調査した。その結果、燃料デブリの臨界安全評 価に重要となる Gd や鉄は、初期凝固部と最終 凝固部にそれぞれ濃縮される傾向があることが わかった。この偏析挙動を評価できる偏析挙動 モデルを東北大学との共同で整備し、現在、1F 事故の条件で、どの程度の成分偏析が起こった のかの解析を進めている。

## (4) まとめ

炉内状況把握は、燃料デブリ取出しにおいて 羅針盤としての役割を期待される重要な研究分 野である。原子力機構では、東京電力等との協 力によって整備した炉内状況推定図を、1Fの 現場で得られる新たな知見等を活用して随時高 精度化していくと共に、現在、この分野で重要 課題となっているRPV下部ヘッドの破損メカニ ズムと燃料デブリの堆積・凝固状態の解明に向 けた研究開発を進めている。

#### 4.2.4 遠隔技術に関する研究開発

## (1) はじめに

1F 事故によって飛散・沈着した放射性物質の 分布を把握することは、作業員の被ばく線量の 低減や、作業計画を立案する上で重要である。 1F の建屋内では床面や壁、天井、機器、瓦礫等 の様々な物体に放射性物質が付着しており、汚 染箇所が3次元的に存在している。また、建屋 内には線量率が高いために作業員の侵入が難し い、もしくは長時間作業が実施できないといっ たエリアも多く存在する。このような高線量率 環境において、汚染の分布を遠隔で測定可能と するためには、放射性物質の3次元的な可視化 が可能な放射線検出器と、3次元空間の把握及 び自己位置認識が可能な遠隔操作による移動体 とを組み合わせた放射線の遠隔計測技術開発が 不可欠となる。

一方、炉内においては、事故により溶融した 核燃料物質と構造材などが混在した燃料デブリ が形成され、これらが圧力容器内部及び格納容 器底部に存在しており、廃炉を進めるためには、 これらを取出し、安定的に保管・処分しなけれ ばならない。燃料デブリの炉内からの取り出し 作業等を安全かつ効率的に推進するためには、 採取試料あるいは炉内のその場で燃料デブリ等 の素性を把握するスクリーニング分析が求めら れることから、線量率が極めて高い環境・試料 を対象とした簡便・迅速な遠隔分析技術開発が 不可欠となっている。

これらに対応するため、原子力機構は、2017 年から CLADS に遠隔技術ディビジョンを設け、 1Fの建屋内部に飛散したγ核種を対象とした 放射性物質の3次元的可視化技術、α核種の迅 速検出・可視化技術、カメラ映像等から移動体 の自己位置認識を可能とする3次元立体復元技 術、レーザー光を活用した燃料デブリ等の遠隔 その場分析技術といった遠隔計測・分析技術の 開発研究を行ってきた。

#### (2) 放射性物質の3次元可視化技術の開発

#### 作業現場の汚染状況の把握

飛散した放射性物質による汚染の分布を測定 するための装置として、目に見えない放射性物 質を可視化できるガンマカメラという放射線測 定器が選択肢の一つとして有望視されている。 しかし、従来のガンマカメラは数 kg~数+ kg と重いため、廃炉現場での活用は容易ではなか った。

そこで、原子力機構は、早稲田大学と浜松ホ トニクス株式会社が共同開発したコンプトンカ メラ(ガンマカメラの一種)をベースに、空間 線量率が高い現場でも持ち込みやすく、ドロー ンやクローラーロボットといった遠隔機器にも 搭載可能なように、1 kg以下の小型軽量化した コンプトンカメラを製作した(図 4-28)。小型 化を達成したことにより、従来のガンマカメラ では大きな遮へい体が必要となる高線量率環境 においても、遮へい体を小さくし、可搬性を保 ったまま測定を行うことが可能となった。

このコンプトンカメラを用いて、東京電力の 協力のもと、1Fの3号機タービン建屋内通路で



図 4-28 小型軽量コンプトンカメラ

汚染分布の測定試験を実施した。その結果、空間線量率が 0.4~0.5 mSv/h の比較的高線量率の作業環境において、表面線量率が最大 3.5 mSv/h 程度の局所的な汚染源の撮影に成功した 4-23)。



#### 図 4-29 1F タービン建屋内での汚染箇所の特定

図 4-29 は、光学カメラで取得した測定現場の 写真に得られた汚染分布のイメージを重ねて放 射性物質(主として<sup>137</sup>Cs)を可視化したもので あり、測定の所要時間は1分未満と短時間であ った。さらに、レーザー光を利用した測域セン サーを用いて測定現場の3次元モデルデータを 取得し、ここにコンプトンカメラで取得した汚 染分布のイメージを重ねることにより、汚染分 布を3次元的に描画することにも成功した。

また、東京電力社員が装置を操作して、3 号 機原子炉建屋内部のホットスポット調査を実施 した。

このような技術によって作成することが可能 な汚染分布図は、実環境の寸法や外観を反映し ていることから、作業員が汚染源の在りかをこ の分布図を用いて視認することにより、注意喚 起に伴う被ばく線量の低減や、除染計画の立案 に役立つものと考えており、作業現場に本格的 に導入するための改造を進めている。 ② 遠隔ロボットを用いた放射線イメージング 測定

IF の廃止措置作業の計画立案においては、作 業員の被ばくを抑制するために、原子炉建屋内 のホットスポット等の放射性物質分布に関する 正確な情報が必要である。しかし、建屋内の高 い線量率や現場に散乱した瓦礫・機器等が障害 となり、人間による放射性物質の分布の測定は 困難であった。

こうした中、原子力機構では、小型軽量化に 成功した「コンプトンカメラ」をロボットに搭 載し、遠隔で建屋内のホットスポットを検知し た。更に、作業場所の写真を組み合わせて建屋 内部の3次元モデルを仮想空間上に構築し、コ ンプトンカメラで捉えたホットスポットのイメ ージと統合することによって、肉眼では直視で きない汚染状況を立体的に把握することを可能 とした。

これらの成果により、建屋内に人間が立ち入 ることなく、作業員の被ばく量を最小にする作 業計画の詳細な検討や事前訓練等が実現できる 可能性が拓かれた。



図 4-30 ドローンに搭載したコンプトンカメラと 3 次元 位置測定センサー(3D-LiDAR)



図 4-31 帰還困難区域での測定結果

さらに、コンプトンカメラは小型軽量である ことから、ドローン等の無人飛行体にも搭載で きる(図4-30)<sup>4-24)</sup>。原子力機構では、福島県内 の帰還困難区域でコンプトンカメラをドローン に搭載して飛行させ、動きながらでも放射線源 の位置分布を把握できることを福島県内の民間 企業等と一緒に実証した(図4-31)<sup>4-24)</sup>。

③ 次世代型モニタリングカーiRIS-Vの開発

これらの技術をさらに発展させ、車輌に放射線 源の位置推定が可能なコンプトンカメラを多数 配置することで全方位型の3次元のコンプトンカ メラシステムとし、レーザー光を用いた3次元距 離測定センサー(3D-LiDAR)やGPSシステム等に よる空間・位置情報システムを統合した放射線イ メージングシステム車(integrated Radiation



図 4-32 iRIS-V に用いられている検出器と車輌



図 4-33 iRIS-V を用いた放射線源の可視化 (パノラマ画像)

Imaging System-Vehicle:以下「iRIS-V」という)を開発した(図4-32)。

これまでのコンプトンカメラでは装置の前方 しか測定できなかったことから、小型コンプト ンカメラを正十二面体(正五角形を12個組み合 わせた立体図形)の上側6面に配置することに より、図4-32のように、高感度であらゆる方向 の放射性物質分布をパノラマ的に可視化できる 全方位型コンプトンカメラとし、これをワンボ ックスカーに搭載した。これにより iRIS-V は、 放射線源がある場所を赤く示すカラーコンター

(等高線)図で表示でき、放射性物質の在りか をパノラマ画像として可視化可能となった。さ らに、3次元距離測定センサーで取得した周辺 の3次元画像と、コンプトンカメラで取得した 放射線イメージを統合することにより、放射線 源の位置や広がりを3次元的に推定することが 可能である(図 4-33)。この特長を活かし、1F サイト内への応用では、廃炉作業の進展に応じ て放射線源の分布状況が変わっても、迅速にそ の変動を把握できるようになることから、作業 者の安全や被ばく低減にも貢献できると考えて いる。

また、通常のモニタリングカーは空間線量率 の連続測定を行っているが、iRIS-V は空間線量 率に加えて、放射性物質の位置や変動を短時間 で把握し可視化できることから、次世代型のモ ニタリングカーとして整備していくことも考え ている。

#### (3) a線検出機器の開発

① a線用ダストモニタの開発

α線は物質との相互作用が大きいため、内部 被ばく防止の観点から、Pu等のα核種の測定は 重要である。Pu等の空気中のα核種の濃度測定 のため、原子力施設の建屋内外にα線用のダス



図 4-34 αダストモニタの検出部

トモニタが設置されている。 α線の計数率がダ ストモニタで設定された警報設定値を超えると 警報が吹鳴し、作業者への退避を促すことにな っている。

このダストモニタにシリコン半導体検出器が 使われているが、湿気等の環境要因により度々 誤警報が発生することがある。1Fの廃炉におい ては、燃料デブリ切削等の作業に伴い、α核種 を含むダストの発生が懸念されるため、誤警報 の少ない高信頼のα線用ダストモニタの開発が 求められている。

そこで、原子力機構は、エネルギー分解能の 高い GPS (Gd2Si207) シンチレータプレートを 用いたα線用ダストモニタを開発し、核燃料取 扱施設に設置して連続測定試験を行った<sup>4-25)</sup>。

図 4-34 に開発したα線用ダストモニタの検 出部の写真を示す。GPS シンチレータプレート は、GPS シンチレータの層の厚みが40 μm で、 3 mm 厚の高透過ガラスと結合されている。シ ンチレータは50 mm 幅で八角形となっており、 空気を集塵するためのろ紙と同じ径となってい る。ノズルを通って採取された空気がろ紙へと 導かれ、ダストが空気ろ紙に捕集される。ろ紙 上に存在するαダストから放出されるα線は GPS シンチレータへと入射されて光に変換され、 その光が光電子増倍管で電気信号へと変換され る。光電子増倍管からの出力信号はアンプで増 幅されて、マルチチャンネルアナライザ (MCA) に入力され、ディスプレイにα線エネルギース ペクトルがリアルタイムに表示される。

この GPS シンチレータを用いた測定器はエネ ルギー弁別が可能であることから、天然の核種 であるラドン(Rn)の子孫核種の計数を77%除 去することが可能である。そこで、警報設定値 を下げて検出感度を上げることに成功した。

また、GPS シンチレータプレート表面に水が 有る場合と無い場合でのα線スペクトルの比較 をするために アメリシウム (<sup>241</sup>Am) 線源 (5.5 MeV α線)を測定した。水が有る場合では、計 数効率は下がるものの、水が無い場合と同じ形 状のスペクトルが確認できた。

このダストモニタは 1F の作業環境のように たとえ温湿度の管理がされていない環境や屋外 でも信頼性の高いα線ダストモニタリングへの 応用が期待できる。

② α 核種可視化検出器の開発

廃止措置作業を進める上で、内部被ばくへの 影響が大きいα核種の検知は非常に重要である。 そこで、原子力機構が研究開発を進めている「α 核種可視化検出器」(図 4-35)

を用いて 1F の原子炉建屋内で採取されたスミ ヤ試料の測定を試みたところ、エネルギー分布



図 4-35 α 核種可視化検出器



図 4-36 1F でのスミヤ試料と Pu 試料のα線エネ ルギースペクトルの比較

両者のエネルギースペクトルが一致している。



α線イメージング結果 図4-37 α線を放出する粒子のα線分布可視化結果

から、核燃料物質由来と考えられるα核種を検 知することに成功した(図4-36)。また、この検 出器を用いることによりα線を放出する粒子か らのα線分布の可視化にも成功した(図4-37) <sup>4-26)</sup>。これにより、核燃料物質由来か天然由来か を現場の測定で判断することができ、更に、そ の2次元的な分布と放射能が測定できることか ら、α核種の分布状況を簡便かつ迅速に把握す ることが可能となった。

この「α核種可視化検出器」は、作業環境の 放射線管理や作業員の放射線防護等への応用が 期待できる。

## (4) 3 次元立体復元技術の開発

1Fの廃炉作業はロボット等の機器を遠隔操 作することで実施されている。これらの遠隔操 作による作業は主に搭載カメラから送信される 映像に基づいて行われているが、2次元映像の みでは作業空間の十分な把握が難しい場合があ る。作業空間の3次元的な情報を用いることが できれば、遠隔操作機器による安全かつ効率的 な作業の推進に貢献できると考えられる。この ため原子力機構では、ロボット等の遠隔作業支 援を目的として、作業現場(遠隔地)で取得さ れた映像から画像を複数抽出して立体的に復元 する手法について研究開発を行っている。

立体復元計算アルゴリズムには、入力画像か ら特徴点を抽出して画像間における対応付けを 行うことで画像間の相対的な位置関係を計算し、 構造物の形状データ(3 次元点群データ)を推定 する手法である Structure from Motion(SfM)を 用いている。これまでに、1F で撮像された映像 から抽出された画像を解析し、画像への前処理 (コントラスト調整、先鋭化)427)を適用すること で、SfM による立体復元の精度が向上すること を実験により確認している。また、SfM で得ら れる疎な密度の3次元点群に多視点ステレオ (MVS)を適用することで、復元対象の視認性が改 善されることを示した 4-27)。さらに、立体復元計 算負荷の低減のために映像から得られる時系列 画像から立体復元計算に寄与しない重複画像を 除去する画像選択手法の研究開発を行い、立体 復元のクオリティを維持しつつ計算負荷が軽減 されることを実験により確認している4-28)。

図 4-38 は、例として、東京電力が公開してい る 3 号機 PCV 内部調査〔制御棒駆動機構(CRD) ハウジング付近で撮影された部分〕の動画から 抽出した画像を対象として、前述の前処理、MVS、 画像選択手法を適用して立体復元を行った結果



図 4-38 開発手法を用いた立体復元結果の例 (画像出典:東京電力)

を示している。映像から抽出された全画像枚数 のうち約20%程度の枚数で立体復元を行い、構 造物を確認するために十分な視認性を有してい るモデルが生成されている。一部欠損している 部分も存在することから、引き続き分析を行っ て手法の開発に反映させていく。また、オペレ ータの遠隔操作支援に資するために、迅速に立 体復元計算を行うための画像選択手法のための パラメータ最適化や復元モデルのオペレータへ の提示方法について検討を進めていく。

#### (5) レーザー遠隔分析技術の開発

レーザー遠隔分析技術開発は、文部科学省原 子カシステム研究開発事業「低除染 TRU 燃料の 非破壊遠隔分析技術開発」(2005~2009 年度) の課題採択から本格的に開始し、「次世代燃料の 遠隔分析技術開発と MOX 燃料による実証的研究」

(2010~2013 年度) で MOX 試料の分析実証に成 功した。遠隔分析手法の基本技術は、レーザー 集光照射により生成したプラズマからの原子発 光を分光分析する LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy)による元素分析と、 レーザーアブレーションにより生成される原子 プルームに波長可変精密レーザー光を入射し、 共鳴吸収分光分析により同位体測定を遠隔・非 接触で行おうというものである。概要を図4-39 に、U、Puの分光例を図4-40、図4-41<sup>4-29</sup>に示 す。





図 4-41 共鳴吸収分光による Pu 同位体測定例 4-29)

本研究により、U酸化物中のPuの元素分析性 能として、測定下限5000ppm、分析精度5%以上 (存在率30%)、U及びPuの同位体比分析性能 として、同位体比分析精度5%以上の分析を5

分以内で実現できることを実証した。

東日本大震災後の2012年には、大洗研究開発 センター(現大洗研究所)の「常陽」の炉内を 観察するために開発した耐放射線性光ファイバ ー技術に着目し、大洗研究開発センター、量子 ビーム応用研究部門〔現量子科学技術研究開発 機構(QST)〕との三者合同で、耐放射線性光フ ァイバーとレーザー遠隔分析技術を組み合わせ、 高線量率・狭隘空間での元素組成その場分析の 実現を目指した技術開発「炉内レーザーモニタ リング・内部観察技術開発」を開始した。2013 年には、長さ50mの光ファイバーでの遠隔分析 手法の原理実証と、気中・水中でのU/Zr酸化物 の分光を成功させるなど、本手法の基本的な実 現性を実証した<sup>4-30),4-31)</sup>。確立した光ファイバー



図 4-42 光ファイバー利用レーザー遠隔分析技術の概念 (上)と小型化した可搬型装置の外観(下)



図 4-43 光ファイバーLBS による水中での Zr/U 混合酸化 物のスペクトル取得例

LIBS 法による遠隔分析技術概念と小型化した 可搬型装置外観を図 4-42 に、水中での Zr/U 混 合酸化物のスペクトル測定例を図 4-43 に示す。

2015年には、廃炉国際共同研究センターが設 立され、光ファイバー利用遠隔分析技術開発が より強力に推進されることとなった。この結果、 特に光ファイバーLIBS 技術の耐放射線性が確 認され、線量率10 kGy/h 積算線量2 MGy のガ ンマ線環境下でも元素分析が可能であることが 実証された。また、並行して、英知事業 廃炉 加速化プログラムにおいて、「先進的光計測技術 を駆使した炉内デブリ組成遠隔その場分析法の 高度化研究」を開始し、より高感度、より遠距 離、より小型の分析装置開発に必要な基盤技術 の確立が図られた。特に、プラズマ生成用のレ ーザー光源を手元に置いて光ファイバーで伝送 する従来の概念を見直して、プローブの先端に 開発が目覚ましい、超小型マイクロチップレー ザー光源 4-32)を取り付けた新しい概念を提案し た (図 4-44)。これにより、マイクロチップレー ザーLIBS プローブの性能試験・実証に成功した。 マイクロチップレーザーの発振モードをバース トモードとすることで、従来法に比べ10倍のス ペクトル強度が得られること、耐放射線性は従

来の光ファイバーLIBS 法には劣るものの、数 100 Gy/h程度の線量率環境で定常的に使用可能 であることも実証された。

さらに並行して、不均一な試料における分析 特性、元素の面分布取得性、XRF(蛍光X線分析 法)との比較による分析結果の妥当性評価等、 廃炉現場での活用に求められる実用上の問題を クリアした。

一方、1Fにおいては、2号炉で、小型ロボッ トによる内部調査が進み、デブリが疑われる物 体の存在も映像から明らかになりつつあった。 2019年になると、2号炉の格納容器底部にデブ リらしき物体が確認され、小型の遠隔マニピュ レータで、初めてデブリに触れることに成功し、 より具体的なデブリ取り出しスキームが提示さ れるに至った。

初期の取り出しにおける、グラム程度のデブ



図 4-44 マイクロチップレーザー利用 LIBS 計測系の概念



図 4-45 採取デブリの受払セルにおけるスクリーニング 技術提案例

リについては、グローブボックス内で処理し、 蛍光X線分析法(XRF)によるスクリーニング分 析が採択された。次の100g~数kgの採取デブリ については、その線量率の高さ(数 Gy/h~ 10Gy/h)から、受払い鉄セル内での取り扱いが 計画されており、東京電力では、耐放射線性、 遠隔操作性に優れたレーザー遠隔分析法を、ス クリーニング分析手法の有力候補の一つとして 選定している。スクリーニング技術の提示例を 図4-45に示す。今後、鉄セル内の装備機器の一 部として、東京電力と協力しつつ具体的な設計 を進めていく計画である。

#### (6) まとめ

1F 廃炉は、線量率の高さや、溶融燃料の取り 扱い等、これまで経験したことのない作業の連 続である。このため、既存技術だけでは通用し ないことも多く、広範囲な基礎基盤技術の中か ら的確な手法を見出し、組み合わせ、困難を打 開していくことが求められる。遠隔技術ディビ ジョンでは、廃炉現場に近い視点から、放射性 核種の3次元的可視化技術、α核種の迅速検出・ 可視化技術、可視化技術を支える移動体の自己 位置認識技術、そして、レーザー光を活用した 燃料デブリ等の遠隔その場スクリーニング分析 技術を開発してきた。これらの技術は、東京電 力も現場適用を前提として極めて高い関心を寄 せており、導入に向けた具体的協議も進められ ている。今後、廃炉現場での実用化に向けて技 術開発を加速し、その完成度を高めることが、 遠隔技術ディビジョンとしての重要な使命であ る。一方、現場適用化のための技術開発のみに 目を向け過ぎると、その視野や先見性が失われ る可能性もあることを自覚しなければならない。 事故後10年を迎え、原子力の唯一の総合的研究 機関として、廃炉の進展に応じ、即自的に利用

可能な計測技術の提供と、基礎基盤技術に根ざ した先見性のある遠隔計測技術開発とを両輪と して推進していくことが求められる。

- 4-1) Yano, K. et al., Direction on Characterization of Fuel Debris for Defueling Process in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Proceedings of International Nuclear Fuel Cycle Conference (GLOBAL2013), Salt Lake City, USA, 2013, paper 8167, p. 1554-1559, in CD-ROM.
- 4-2) Ikeuchi, H. et al., Suggestion of Typical Phases of In-Vessel Fuel-Debris by Thermodynamic Calculation for Decommissioning Technology of Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station, Proceedings of International Nuclear Fuel Cycle Conference (GLOBAL2013), Salt Lake City, USA, 2013, paper 8174, p. 1349-1356, in CD-ROM.
- 4-3) Kitagaki, T. et al., Thermodynamic evaluation of the solidification phase of molten core-concrete under estimated Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident conditions, Journal of Nuclear Materials, vol. 486, 2017, p. 206-215.
- 4-4) Hoshino, T. et al., Mechanical Properties of Fuel Debris for Defueling Toward Decommissioning, Proceedings of 23rd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 23), Chiba, Japan, 2015, ICONE23-2111, 6p., in DVD-ROM.
- 4-5) Takano, M. et al., Characterization of solidified melt among materials of UO<sub>2</sub> fuel and B<sub>4</sub>C control blade, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.51

issue 7-8, 2014, p. 859-875.

- 4-6) Morimoto, K. et al., The Influences of Pu and Zr on the Melting Temperatures of the UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> Pseudo-Ternary System, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.52, issue 10, 2015, p. 1247-1252.
- 4-7) Washiya, T. et al., Study on treatment scenarios for fuel debris removed from Fukushima Daiichi NPS, Proceedings of 23rd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 23), Chiba, Japan, 2015, ICONE23-1953, 7p., in DVD-ROM.
- 4-8) Nakayoshi, A. et al., Prediction of the drying behavior of debris in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station for dry storage, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 55, issue 10, 2018, p. 1119-1129.
- 4-9) Takahatake, Y. et al., Decontamination of Radioactive Liquid Waste with Hexacyanoferrate(II), Procedia Chemistry, vol. 7, 2012, p. 610-615.
- 4-10)高畠容子ほか、チタン酸塩イオン交換体の製造方法、特開 2016-43329(P2016-43329A)、2019-06-19.
- 4-11) 西原健司ほか,福島第一原子力発電所の 滞留水への放射性核種放出,日本原子力
   学会和文論文誌,vol.11,no.1,2012, p.13-19.
- 4-12) 青野竜士ほか,福島事故廃棄物を対象とした<sup>93</sup>Zr,<sup>93</sup>Mo,<sup>107</sup>Pd 及び<sup>126</sup>Sn 分析法の開発, JAEA-Technology 2017-025, 2017, 32p.
- 4-13) Shibata, A. et al., Estimation of the Inventory of the Radioactive Wastes in Fukushima Daiichi NPS with a Radionuclide Transport Model in the

Contaminated Water, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.53, issue 12, 2016, p.1933-1942.

- 4-14) Kato, J. et al., Inventory Estimation of <sup>137</sup>Cs in Radioactive Wastes Generated from Contaminated Water Treatment System in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, E-Journal of Advanced Maintenance, vol.7, no.2, 2015, p.138-144.
- 4-15) Fukuda, Y. et al., Characterization of Carbonate Slurry generated from Multiple Radionuclides Removal System in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Proceedings of 2017 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2017), Fukui and Kyoto, Japan, 2017, p. 1923-1929.
- 4-16) Sugiyama, D. et al., Development of Calculation Methodology for Estimation of Radionuclide Composition in Wastes Generated at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 56, issues 9-10, 2019, p. 881-890.
- 4-17) Yamagishi, I. et al., Characterization and storage of radioactive zeolite waste, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.51, issues 7-8, 2014, p. 1044-1053.
- 4-18)加藤千明ほか、γ 線照射下における希 釈海水を含むゼオライト中ステンレス鋼 の局部腐食挙動、日本原子力学会和文論 文誌, vol. 14, no. 3, 2015, p. 181-188.
- 4-19) 加藤潤ほか,福島第一原子力発電所の廃 炉によって発生する放射性廃棄物の処理

に向けた固化技術及び減容技術カタログ, JAEA-Review 2017-015, 2017, 173p.

- 4-20) Yamashita, T. et al., The CMMR Program: BWR Core Degradation in the CMMR-4 Test, Proceedings of the 9th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR 2019), Prague, Czech Republic, 2019, 012, 13p.
- 4-21) Shibata, H. et al., Control blade degradation test under temperature gradient in steam atmosphere, Annual Topical Meeting on LWR Fuels with Enhanced Safety and Performance (TopFuel 2016), Boise, U.S.A., 2016, p. 1033-1042, in USB Flash Drive.
- 4-22) Pshenichkov, A. et al., Features of a control blade degradation observed in situ during severe accident conditions in boiling water reactors, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 56, issue 5, 2019, p. 440-453.
- 4-23) Sato, Y. et al., Radiation Imaging Using a Compact Compton Camera Inside the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Building, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.55, issue 9, 2018, p.965-970.
- 4-24) Sato, Y. et al., Remote detection of radioactive hotspot using a Compton camera mounted on a moving multicopter drone above a contaminated area in Fukushima, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.57, issue 6, 2020, p.734-744.
- 4-25) Morishita, Y. et al., Development of an Alpha Dust Monitor Using a GPS

Scintillator Plate, Radiation Measurements, vol. 122, 2019, p. 115-120.

- 4-26) Morishita, Y. et al., Detection of alpha particle emitters originating from nuclear fuel inside reactor building of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Scientific Reports, 2019 9:581.
- 4-27) Hanari, T. et al., 3D Environment Reconstruction Based on Images Obtained by Reconnaissance Task in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, E-Journal of Advanced Maintenance, vol.11, no.2, 2019, p.99-105.
- 4-28) Hanari, T. et al., An Image Selection Method from Image Sequences Collected by Remotely Operated Robot for Efficient 3D Reconstruction, Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, 2020.
- 4-29) Miyabe, M. et al., Laser ablation absorption spectroscopy for isotopic analysis of plutonium: Spectroscopic properties and analytical performance, Spectrochim Acta Part B, vol. 134, 2017, p. 42-51.
- 4-30) Ito, C. et al., Development of radiation-resistant optical fiber for application to observation and laser spectroscopy under high radiation dose, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 51, issue 7-8, 2014, p. 944-950.
- 4-31) Saeki, M. et al., Development of a fiber-coupled laser-induced breakdown

spectroscopy instrument for analysis of underwater debris in a nuclear reactor core, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 51, issue 7-8, 2014, p.930-938.

4-32) Pavel, N. et al., Composite, allceramics, high-peak power Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG monolithic micro-laser with multiplebeam output for engine ignition, Optics Express, vol. 19, issue 10, 2011, p. 9378-9384.

# 5. 環境回復に係る研究開発

#### 5.1 研究開発の進め方

- 5.1.1 緊急時からの対応
- (1) 環境放射線のモニタリング・マッピング

1F 事故により、放射性物質(主に放射性セシ ウム)が広い範囲にわたって拡散したことから、 我が国において今まで経験したことのない環境 汚染への対処に取り組むことが求められた。

原子力機構は、事故直後から環境放射線のモ ニタリング技術の開発を行うとともに、継続的 に福島県内を中心とした空間線量率や放射性セ シウムの沈着量の分布状況とその時間変化を地 図上にわかりやすく示したマップを作成してき た。

事故による空間線量率や放射性セシウムの沈 着量の状況を把握するための放射線モニタリン グとして、航空機、無人へリコプターによる空 からのモニタリング、自動車による走行サーベ イ、人による歩行サーベイ、定点での可搬型ゲ ルマニウム半導体検出器を用いた放射性物質の 土壌沈着量の測定及び放射性セシウムの深さ方 向の分布評価(土壌試料のサンプリングや分析) 等の技術を整備し、標準化した。

空からの測定としては、航空機が広域の測定 を担い、無人ヘリコプターは航空機が立ち入れ ない発電所から3km圏内での低高度飛行(より 位置分解能に優れたマップが作成できる)での 測定を担った。これにより、山林等の人が立ち 入りにくい場所の飛行を含め、全国レベルの広 域から放出源近傍の狭いエリアまで、空間線量 率・放射性物質の沈着量を面的に測定できるシ ステムを構築した。地上での測定としては、人 手によるサーベイメータを用いた定点測定に加 え、人が検出器を携帯して歩きながら測定する 歩行サーベイが、人の立ち入りができる場所に 限定されて効率性に劣るものの、位置分解能に 優れたデータ取得方法として用いられた。車両 による走行サーベイは、効率性や位置分解能の 観点から、両者の中間に相当するものとして活 用された。

1F 事故直後から継続的に調査して得られた 空間線量率や沈着量とその時間変化を地図上に わかりやすく示したマップが、国や自治体の避 難区域の設定・解除、除染区域の決定等の放射 線防護対策を立案する際に唯一無二の基盤デー タとして活用された。その際、1F 事故による放 射性セシウム沈着の影響を受けた広い範囲をカ バーすることと、対策上重要なエリアについて は高解像度で測定すること、という一見相反す る要請に対し、特長の異なる上記モニタリング 技術を組み合わせることで、応えることを可能 にした。

さらに、放射線モニタリング結果を統計的手 法により解析し、空間線量率の将来予測を行う 手法や除染による空間線量の低減を評価する手 法を開発し、放射線防護対策の見直しや、復興 計画立案等の基礎となる情報を提供した。

(5.2.1 参照)

#### (2) 除染モデル実証事業

原子力機構は、国から除染モデル実証事業を 受託(2011年9月~2012年6月)し、我が国で 初めてとなる広域の除染について、事前モニタ リング、除染計画の立案、除染の実施、事後モ ニタリング、除去物の仮置きといった一連の除 染に関わる手続きを整理した。

当時の警戒区域、計画的避難区域のうち11市 町村の年間数mSvから300mSvを超える地域 として、2.1km<sup>2</sup>にわたる広いエリアを対象とし て実施した。また、対象地域のそれぞれの線量 レベルに応じて、宅地・大型構造物、農地、道 路、森林といった様々な土地利用区分に対して 複数の除染技術を適用し、除染効果、施工速度、 歩掛(ある一定の工事に要する作業手間並びに 作業日数を数値化したもの)、コスト、施工適用 条件、施工上の留意点等を系統的にデータシー トとし、1000 頁を超える報告書として取りまと め、公表した。

除染技術についてはチェルノブイリ原子力発 電所事故後の旧ソ連やヨーロッパにおいて水洗 浄や農地の耕起等の除染技術が試験され、デー タシートとしてまとめられているが、広いエリ アで対象地域の線量レベルに応じて、様々な土 地利用区分に対して複数の除染技術を適用し、 系統的にデータシートとしてまとめたモデル事 業は世界でも例がない。

これらのモデル事業で得られた知見等を基礎 として環境省により「除染関係ガイドライン」 が取りまとめられ(初版 2011 年 12 月 14 日公 表、第2版 2013 年 5 月 2 日公表)、これに基づ き、国、自治体による本格的な除染が進められ て、2018 年 3 月に帰還困難区域を除き、面的除 染が終了した。(5.2.2 参照)

#### 5.1.2 研究開発の概要

2.3.1 で述べたとおり、環境回復に係る研究 開発は、「基本方針」に基づき、放射性物質に より汚染された環境の回復のための調査及び研 究開発を行うこととされている。その中でも原 子力機構に対しては、特に森林、河川域等の広 いフィールドを対象とした放射性物質の環境動 態研究に関する研究を行うとともに、その成果 を基に放射線量の可視化と将来予測が可能なシ ステムを提供するなど、調査・研究開発の実施 とその成果の普及を図ることが求められている。 このことから、環境動態研究を進めるとともに、 調査・評価の基盤となるモニタリング技術を進 展させ、被ばく評価技術の活用を図ることとし た。さらに、除染効果の評価として放射線量の 可視化と将来予測が可能なシステムを構築し、 自治体への利用に供するとともに、帰還困難区 域の解除に向けた評価を行うこととした。

#### (1) 除染効果の評価

帰還困難区域にある地元自治体の要請に基づ き除染効果評価システム(RESET)を開発し、そ れを用いた除染シミュレーション結果と線量率 の将来予測結果を提供し、帰還困難区域と接す る避難指示区域の除染効果評価では国による境 界部の帰還困難区域の除染が実現するなど、地 元自治体の復興計画の立案等に貢献した。 (5.3.1参照)

#### (2) モニタリング技術開発の進展

特長の異なるモニタリング技術により得られ たデータを総合的に組み合わせて、継続的なモ ニタリング結果をマップ上に可視化し、避難指 示解除の指標となる空間線量率の着実な減少傾 向を提示した。さらに効率的な放射性物質の土 壌深度分布の推定手法を開発した。(5.3.2 参 照)

#### (3) モニタリング・被ばく評価技術の活用

国からの要請を受け、特定復興再生拠点区域 の整備に向けて、放射線モニタリング結果を統 計的手法により解析し、空間線量率の将来予測 を行う手法や除染による空間線量の低減を評価 する手法を適用して評価することにより科学技 術的な知見を提供し、国による放射線防護対策 の策定や自治体の復興計画立案に貢献した。 (5.3.3 参照)

#### (4) 環境動態研究

環境放射線のモニタリング・マッピングで得 られた測定結果に加え、放射性セシウムの沈着 状況やダムの有無等、特徴の異なる福島県浜通 りの8河川水系(主に帰還困難区域を横切る河 川)を対象とした現地調査で得られた様々な環 境中の放射性セシウムの濃度データの経時変化 と室内実験・分析データを組み合わせて、事故 で沈着した放射性セシウムが森林から河川、河 ロ域へと移動・沈着する挙動を定量的に明らか にし、それらを支配する現象を理解するととも に、それらを表現する数理モデルを構築して、 移動・堆積挙動予測解析を実施した。

森林から河川水系への懸濁態(土壌粒子等に 吸着された状態の放射性セシウム)の年間流出 量は、樹種や傾斜によらず初期沈着量のコンマ 数%程度と極めて少ないこと、溶存態(イオン のように水に溶けた状態の放射性セシウム)は 地下水が湧水点から森林表土を流出する過程で 水に溶出していること、ダムのある河川では懸 濁態の移動は大幅に抑制されることなど、河川 水系全体での放射性セシウムの量と動きを定量 的に俯瞰するとともに、移動・堆積挙動の支配 因子を明らかにした。

従来の方法では、それぞれの環境コンポーネ ント(森林、河川、湖沼等)内における挙動評 価が主であったが、本研究では、例えば、河川 水中で様々な条件下で観測される溶存態・懸濁 態が、森林等のどのような陸域からどのように 発生し、どのように河川に流入するのか、とい った、一方から他方の環境コンポーネントへの 移動挙動を一つ一つ明らかにすることで、河川 水系全体を俯瞰して、放射性セシウムがどのよ うに移動・蓄積しているのかを定量的に示した ストック&フロー解析を可能にした。

また、従来の調査・解析方法では、過去の濃

度の変化傾向に基づいて、年間の平均的な挙動 しか推測できなかったが、本方法では、放射性 セシウムの移動・堆積の影響因子を明らかにし、 移動・堆積のメカニズムに立脚した現象論モデ ルを整備したことで、従来法では困難だった 様々な自然現象や環境条件の変化を想定した放 射性セシウム移動・堆積のケーススタディを可 能とした。その結果、移動による二次的な汚染 が発生する可能性は極めて低いことを明らかに して、避難指示解除等の放射線防護対策の見直 しに貢献した。

環境放射線のモニタリング・マッピングと環 境動態研究の取り組みによる成果情報が、避難 指示解除の決定と解除後の住民の生活に密接に 関わる被ばく線量の予測や除染計画の策定にと って重要な基礎情報として活用され、2017年4 月までに葛尾村、川内村、南相馬市、飯舘村、 川俣町、浪江町、富岡町での避難指示が解除さ れ(帰還困難区域を除く)、2018年5月までに 帰還困難区域における特定復興再生拠点(6町 村)の復興再生計画が認定された。さらに1Fの 立地自治体として初めて避難指示解除を2019 年4月に行った大熊町では町内を流れる熊川の 河川敷の放射性セシウム分布の調査結果が町の 広報誌に掲載され、自治体の復興計画策定に大 きく貢献した。(5.4.1、5.4.2参照)

#### 5.1.3 研究内容の伝え方・コミュニケーション

成果普及のための取り組みとして、環境動態 研究の成果に基づき「福島総合環境情報サイト (https://fukushima. jaea. go. jp/ceis/)を開 設し、閲覧者が知りたい知見として、実測デ ータの経時変化、Q&A と根拠となる科学的知 見、シミュレーション結果を分かりやすく提示 した。これにより住民ひとりひとりの疑問や不 安の解消から、自治体による被ばく低減のため の合理的な安全対策の検討、及び避難指示解除 等の福島復興に係る施策検討への活用まで、地 域のニーズに応える情報発信を行った(5.4.3 参照)。

また、コミュニケーション活動として、2011 年7月から「放射線に関するご質問に答える会」 を開催してきており、住民の方々の放射線によ る健康影響への心配について、環境動態研究の 成果も踏まえ、直接対話方式で様々な質問に答 えてきた(6.2.2(2)参照)。

## 5.2 政府プロジェクトとしての研究開発(緊 急時からの対応)

#### 5.2.1 大規模環境モニタリング調査

環境中の放射線モニタリングは、事故後の住 民の被ばく評価や避難区域の設定に必要な情報 として優先度の高い課題であった。事故直後の 緊急時モニタリングについては、大熊町のオフ サイトセンターに現地対策本部が設置され、経 済産業省(本部長:副大臣、原子力安全・保安 院)、文部科学省、福島県、自治体、電力事業者、 警察庁、消防庁及び防衛省等により開始された。 原子力機構も第1陣7名が防衛省のへリで支援 に向かったのを皮切りに、現地での活動範囲を 拡大していったが、それらの活動により、徐々 に事故の重大さが明らかとなり、既存のモニタ リング手法では対応しきれない課題も明らかと なった。

このような状況を踏まえ、原子力機構は本格 的な研究開発を伴った活動を、2011年4月に開 始する。初めに各拠点の放射線管理や被ばく評 価業務に携わっていた専門家6名が東京事務所 に招集された。最初のミッションは、①既に福 島県や他指定公共機関からの応援者で実施され ていた緊急時モニタリングのデータの整理・統 合と②地上のモニタリング(広域調査等)のプ ランニング及び③米国エネルギー省が実施した 有人の飛行機やヘリコプターを用いた空からの モニタリング(航空機モニタリング等)の国内 への技術移転及び国内人員のみでの実施である。 以下、①及び②を担当したチームを陸モニチー ム、③を担当したチームを遠隔チームと表記す る。また、2011年からの放射線モニタリング全



#### 図 5-1 放射線モニタリングに関する原子力機構の対応経緯

現在でも原子力規制庁所掌の国家プロジェクトとして大規模モニタリングを継続的・一元的に実施 している。



## 図 5-2 福島市における代表的な空間線量率モニタリ ング例

空間線量率は事故直後から 10-20 日程度で減少し、 現在でも減少傾向にある。

体に関する原子力機構の対応経緯を図 5-1 に示 す。

事故後、放射線モニタリングは空間線量率の 測定を中心にして、自治体や指定公共機関によ り実施されており、地理的な密度は細かくない ものの経時的なデータが得られている。図 5-2 にその一例として福島県庁の屋上で得られたデ ータを示す。

## (1) 陸モニチーム(地上のモニタリング)

陸モニチームでは、前述のようなデータを組 織的に取得して解析する体制を構築することを 目的とし、政府(当時文部科学省)プロジェク トとしての「放射性物質分布状況等に関する調 査研究」を開始した。また、2011年5月時点で 得られていたモニタリングポストの情報や大学 や研究機関による情報を基に詳細な放射性物質 の分布状況を調査することを目的に加えた。実 施機関としては、原子力機構の他、6大学及び4 研究機関が中心となり、土壌のサンプリングに は100以上の団体の協力を得て、放射能測定器 を保有する21の大学、研究機関及び民間企業で 測定を分担した。2011年8月には空間線量率及 び土壌の放射性物質濃度のマップを暫定公開し た。2011年6月の調査でマップを作成するのに 十分な数の地点で、検出された放射性核種は <sup>134</sup>Cs、<sup>137</sup>Cs、<sup>131</sup>I、<sup>129</sup>Te、<sup>110m</sup>Ag、<sup>89</sup>Sr、<sup>90</sup>Sr、<sup>288</sup>Pu、 <sup>239+240</sup>Puであった。この時点で既に、空間線量率 への寄与の99%以上が放射性セシウムによる ものであった。また、長期的な被ばく線量評価 の観点からも放射性セシウムが圧倒的に重要で あることが確認された。本プロジェクトは、「マ ップ事業」と呼ばれ、事業内容を効率化しつつ、 現在でも原子力規制庁の事業として継続的に実 施されている。

#### (2) 遠隔チーム (空からのモニタリング)

一方、米国エネルギー省は、事故直後から軍 と連携し、有人の飛行機やヘリコプターを用い た航空機モニタリングを実施できる技術・体制 を所有していた。当時の日本では、そのような 技術や体制が整っていなかったことから、原子 力機構が我が国としての技術移転の受け皿とな り、技術を習得しつつ、モニタリングを実施す ることとなった。事故直後は、日米共同の形で、 自衛隊及び各自治体の消防防災隊のヘリコプタ ーに米国から借用した検出器を搭載してモニタ リングを行っていたが、2011年9月より文部科 学省より政府プロジェクトとしての委託事業を 受託し、民間のヘリコプターを用いて北海道か ら沖縄までの全国のモニタリングを実施するよ うになった。本モニタリング結果は、汚染の全 貌を視覚化することが可能であるため、避難指 示区域の解除や除染範囲の設定等の政府の政策 決定等に活用された。このような空からのモニ タリング技術は、測定員の被ばく防止や地上か ら近づけない山間部等の測定が可能となるメリ ットを改めて確認できたことから、次章以降の 無人機へのモニタリング技術の活用に繋がって いくことになる。有人へリのモニタリングにつ いては、汚染分布を可視化できる手法として、 現在も原子力機構の NEAT が定期的に実施して いる。

#### (3) まとめ

図 5-3 に、事故直後及び 2017 年に実施され た「マップ事業」において、サーベイメータで 測定した定点測定の結果、車両で広域に測定し た車両測定の結果及び有人のヘリコプターで測 定した航空機測定の結果を示す。このように、 事故直後から定期的に放射線量率の分布図等を 公表しており、数多くの研究のベースとなると ともに、政策、計画の立案に大きく寄与・貢献



図 5-3 2011 年と 2017 年に実施された政府プロジェクトによるモニタリング結果 いずれのモニタリング結果とも分布の傾向は似通っており、空間線量率の減少が確認できる。

してきた。これらの実績は、日本原子力学会に おいて 2017 年及び 2018 年に貢献賞を受賞する などの評価を受けている。

また、今後の原子力防災の技術として継承・ 収斂するための取り組みも実施されている。

具体的には、NEAT 内に 2015 年 4 月、約 10 名 の人員で航空機モニタリングの専門チームを設 立した。

本チームのミッションとしては、福島の航空 機モニタリングだけではなく、全国にある他の 原子力発電所周辺のバックグラウンドを測定す る事業の推進や自衛隊との定期訓練等も担いな がら、当該専門技術の継承・最適化に取り組ん でいくものとしている。

#### 5.2.2 除染モデル実証事業等

## (1) 除染モデル実証事業等のねらい

事故に伴い放出された放射性物質の地表への 沈着状況等を踏まえ、除染により人々の健康や 生活環境に及ぼす影響を速やかに低減すること が喫緊の課題となった。このため、国は2011年 8月26日に「除染に関する緊急実施基本方針」 を決定し、モデル事業を通じて効果的な除染方 法、費用等、除染に必要な技術情報等を継続的 に提供することとした。この方針を踏まえ、原 子力機構は「除染モデル実証事業」等を国から 受託した。

特定避難勧奨地点等2市2地区を対象とした 除染ガイドライン作成調査業務<sup>5-1)</sup>(2011年8月 ~2012年3月)に引き続き、警戒区域、計画的 避難区域等11市町村16地区(全2.1 km<sup>2</sup>)を対 象とした除染モデル実証事業<sup>5-2)</sup>(2011年9月 ~2012年6月)を実施した。1地区当たり3万 ~37万m<sup>2</sup>といった、全体で広い面積を対象とし て、宅地、グラウンド、農地、公園、森林、道 路等、様々な土地利用状況の除染対象を扱った。 このような様々な対象を含む広い範囲での除染 に必要な技術情報等を得ることは世界的にも例 がなく、民間の土木技術等を適用し、必要に応 じて改良することで、当該事業後の本格除染に つながる技術情報等を取得することに留意した。

#### (2) 実施内容

除染計画を立案し、除染対象地区ごとに下記 の手順で除染を実施することとした。

- 除染前の放射線サーベイ(放射性核種の 分布図の作成、深度方向の分布調査を含 む)
- 除染方法の適用

- 除染方法の効果の評価
- 適切な除染方法の選定及び除染ガイド ラインへの入力情報の評価

除染モデル実証事業では、それぞれの土地利 用状況ごとに複数の除染手法を適用し、除染効 果、施工速度、歩掛、コスト、施工適用条件、 施工上の留意点等を整理した(表 5-1)。特に除 去物発生量は仮置場等の確保と密接に関わるた め、除染効果を確保しつつ除去物の発生量を抑 えることに着目してデータを取得した。このた め、試験施工を行い、あらかじめ剥ぎ取り深さ 等と除染効果の関係を把握し、剥ぎ取り深さ等 を決定して本施工を行った。また、除染計画の

土地利用区分			総合評価				
森林			◎落葉・腐植土層除去 (平地及び傾斜地), 〇落葉・腐植土層・表土の除去 (平地), ▲樹幹洗浄				
農地		農地	◎薄層土壌剥ぎ取り機 ○パックホウ(5cm剥ぎ取り), ◎反転耕(トラクタ+ブラウ), ○天地返し(パックホウ)				
		屋根	▲高圧水洗浄、Oブラシ掛け、 〇拭き取り、▲剥離剤塗布				
		雨樋	△高圧水洗浄、〇拭き取り				
宅地		壁	0ブラシ掛け				
		庭土	〇表土剥ぎ取り				
		砕石部	O砕石洗浄, O砕石除去				
		芝生	O芝生除去				
		庭木	▲剪定				
	1	(ンターロッキング	△高圧水洗浄				
+8	עב	クリート・モルタル面	△集塵サンダー (コンクリートカンナ), 〇超高圧水洗浄 (150Mpa以上), 〇高圧水洗浄 (10~20Mpa), 〇ショントプラスト				
横道物		コンクリート仕上げ	〇高圧水洗浄 (ブラッシング等含む)				
	屋上	防水シート仕上げ	<b>〇高圧水洗浄(ブラッシング等含む)</b>				
		縦樋	O高圧水洗浄(最大50Mpa)				
グラウンド		ラウンド	○薄層土壌剥ぎ取り(ハンマーナイ死ア+スイー バー), ○薄層土壌剥ぎ取り(路面切削機), ○薄層土壌剥ぎ取り(モーターグレーダー), ○天地返し				
プール			〇高圧水洗浄				
芝地			ロターフストリッパー				
舗装道路			▲路面清掃車+搭乗式ロードスイーバー、 △高圧水洗浄機(15MPa程度)+ブラッシング 公排水性舗装機能回復車、 〇超高圧水洗浄機(120~240MPa), 〇ジョントプラスト、OTS切削機				

表 5-1 土地利用区分毎の除染方法の評価結果のま とめ

◎:効果が非常に高かったもの,○:効果が高かったもの,
 △:効果が中程度であったもの,▲:効果は限定的であったもの

土地利用区分ごとに複数の除染手法を適用し、除染 による線量低減率、作業効率、費用、除去物発生量、 環境への影響等の観点から総合的に効果を判断。 立案には、除染効果を予測する解析評価を有効 に活用した。作業監理においては、現場で得ら れた良好事例や留意事項について日々の現場で の会議等で情報共有を図った。

#### (3) 主な成果

除染モデル実証事業等により、得られた知見 として、対象地区の線量分布等の評価、除染方 法、及び廃棄物管理についてまとめる。

① 除染作業の計画や実施にあたっての留意点

対象地区の線量分布等の評価に必要な放射線 量等の測定や土壌のサンプリングのためのマニ ュアルは、作業者にとって使いやすくかつ作業 者によるばらつきが生じないように留意したも のを用いることが有効であった。

除染作業は、従来の土木工事とは異なり作業 の進捗が把握しにくい側面があるため、除染範 囲が広くなればなるほど除染中のモニタリング 抜けによる手戻りのないよう綿密なモニタリン グ計画を立案した上で進めることが重要であっ た。

人力による表土剥ぎ取りにおいては、剥ぎ残 しや取りこぼしの有無の判断が目視だけでは困 難であったため、除染作業中に測定要員を現場 に配置し、適時除染効果を確認することにより 除染作業のやり直し防止に努めた。除染作業の 成果管理として、線量率や表面密度が高い場所 を探索する除染作業後のモニタリングを実施し、 ホットスポットの見落としや土壌等の取り残し を極力減らすことができた。

#### ② 除染方法

#### i)森林(生活圈近隣)

森林の除染では、常緑樹林、落葉樹林ともに、 地表を対象に落葉、腐植土の除去を行った。こ れらの除去に当たっては、熊手や鋤簾を利用し た人力作業が主となったが、作業が可能な場合 にはバックホウ(ショベルを操縦者向きに取り 付けたショベルカーで土壌の表面を操縦者に引 き寄せるように剥ぎ取る)等の重機を利用した。

落葉、腐植土の除去に先立ち、除去深度と除 染効果の関係を調査し、除去深度を決定するこ とが重要であった。また、人力で行う区間は作 業員の違いによる除去程度のばらつきを極力少 なくするように事前に目合わせ等を実施するこ とが有効であった。

図 5-4 に示すように、生活圏に接する森林外 縁から森林の奥部方向に除染(落葉除去と腐植 土層除去)を進め、放射線量の影響変化を調査 した。10 m 奥部まで除染したところで、生活圏 境界において測定される空間線量率は除染前に 比べて 40%程度低下した。他方、10 m 以上の森 林奥部に除染を進めても、生活圏境界において 測定される空間線量率は、ほとんど低下しなか った。

#### ii) 農地

適用した手法としては、表土剥ぎ取りと土壌 の上下入れ替えであり、同様の線量低減効果が 得られた。

事故の直前に田起こししていない農地では、 放射性放射性セシウムによる汚染の多くが地表 面から深さ5 cm 程度の表土にとどまっていた。

一方事故直前に田起こししている農地では、田 起こししていない農地よりも深くまで放射性放 射性セシウムが浸透していた。表土の剥ぎ取り の適用において、前者では除染前の土壌サンプ リングの測定の結果や、除染前に試験的に表土 の剥ぎ取りを実施して剥ぎ取る表土の厚さを効 率的に決定することができた。一方、後者では、 前者よりも深くまで放射性セシウムが浸透して

#### JAEA-Review 2020-023



森林の奥行き方向の除染広さに対する森林入口付近の空間線量率(1m)の推移 (µSv/h)									
領域	測定 点No	除染	区面1 除染後		区画2 まで除染後		区画3 まで除染後		
			除草・落ち 葉かき*1	リター層 除去	入口付近枝 打	除草・落ち 葉かき	リター層 除去	除草・落ち 葉かき	リター層 除去
針葉樹エリア 入口	1	2.6	2.2	1.4	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2
	2	2.5	2.3	1.6	1.4	1.5	1.4	1.2	1.3
広葉樹エリア 入口	3	2.4	1.7	1.4	-*2	1.5	1.4	1.4	1.6
	(4)	2.7	2.3	2.0		2.2	2.2	1.5	1.9

\*1 区画1除草・落葉掻きの線量率は、地表面1cmで測定。1m高さでの値は概ねこの0.8倍程度。

\*2 広葉樹は全て落葉しており枝打ちは実施していない。

#### 図 5-4 森林除染試験結果 (除染ガイドライン作成調査業務の例)

林縁部から森林奥方向に 10 m ずつ除染を実施。林縁部での 4 つの測定地点(常緑樹林と落葉樹林、各々2 地点)において、森林奥方向の 10 m ずつの除染範囲ごとに落葉除去後、リター層除去後、各々1 m 高さでの空間線量率を測定。 10 m より奥にさらに範囲を広げて除染しても線量率(低減効果)はほとんど変わらなかった。

おり、トラクタの轍等の凹凸により濃度分布が ばらついた。そのため、事前に剥ぎ取り機の走 行回数と剥ぎ取り厚さ及び除染率の関係を把握 し、施工方法を決定する必要があった。

表土剥ぎ取りにおいては、バックホウを主に 利用したが、畝のある畑等では鋤簾等を用いて 人力で表土剥ぎ取りを行った。薄層表土剥ぎ取 り機による表土剥ぎ取り(2 cm)も試行した。 これは、ハンマーナイフモア式草刈り機をベー スにした薄層表土剥ぎ取り機により表層 2 cm 程度までの草根の切断とほぐしを行うもので、 ほぐした土壌はバックホウで回収した。

土壌の上下入れ替えとしては、トラクタに牽 引されたプラウ(トラクタに取り付ける耕作用 の農機具で表層土壌を反転させる)により30 cm 深さで、放射性セシウムで汚染された表層付近 の土壌(表層土)と下層にある土壌(下層土) を反転させる「反転耕」を実施した。また、「天 地返し」という、表層土及び下層土を一時的に 撤去した後、下方に表層土を、上方に下層土を 埋め戻す方法を利用した。天地返しでは、十分 な耕盤の深度があることを確認した後、地表面 から深さ5 cm 程度を「表層土」、深さ5 cm か ら50 cm までを「下層土」として土壌の入れ替 えを行った。

土壌の上下入れ替えを選ぶには、現地の土壌 の放射性セシウムの深度方向の分布だけでなく、 耕盤の深度、田畑の規模、将来の農業利用、地 権者の希望も考慮する必要があった。

iii) 宅地

除染前に線量率等のモニタリングを実施し、 これらの情報を基に、高圧水洗浄、拭き取り、 剥離剤塗布による剥ぎ取り等の除染方法を宅地 の除染に適用した。このとき、雨樋下部にある 周りに比べて汚染の度合いが特に高い部分(ホ ットスポット)等を見つけて、これらを事前に 除去した(図5-5)。

屋根の除染は高所作業のため、足場や梯子が 必要になり、斜面で瓦等の曲面に対して施すた

#### JAEA-Review 2020-023



図 5-5 適用した除染方法の例(宅地)

土瓦、陶器瓦では拭き取りで一定の除染効果が得られるものの、コンクリート瓦では瓦表面の凹凸により比較的低い除 染効果となり研磨も実施した。

め、人力による作業が中心となった。適用した 除染方法では、瓦等の屋根の材質の違いによっ て除染効果に差異が確認できた。剥離剤塗布に よる除染効果が他の方法よりも低減率が高い結 果となったが、用いた剥離剤では養生に1~3日 程度を要し、剥ぎ取り完了まで足場の撤去がで きないなどの作業性のデメリットがあった。ま た、高圧水洗浄では、洗浄水と共に飛散する土 埃等の飛散防止・回収等の作業が必要であった。 一方、ブラシ掛けや拭き取りは、洗浄水と共に 飛散する土埃等の二次汚染の可能性が低く、建 物の損傷等による室内への漏えいの可能性が無 いという点で有利であった。雨樋は、堆積物を 除去し、さらに拭き取ることによって高い除染 効果が得られた。

壁の除染については、図 5-6 に示すとおり、 高圧水洗浄による結果とブラッシングによる結 果に顕著な差は見られなかったが、拭き取りに ついては表面が土壁や木製の場合は、ほとんど 除染効果が得られず、トタン等の金属やガラス についても顕著な効果はなかった。高圧水洗浄 については、洗浄水と共に飛散する土埃等の飛 散防止・回収、水処理等の作業が必要となった。 水を使った洗浄と比較し、建物の損傷等による





高圧水洗浄、ブラッシングに比べ、拭き取りでは除染効果が得られにくかった。

室内への漏えいの可能性が低い、水処理等が必 要ないという点でブラッシングの方が有利とも 考えられた。ただし、他の除染において高圧水 洗浄を用い、既に水処理等の用意がある場合は、 漏えいに留意しつつ壁にも高圧水洗浄が適用可 能と考えられた。

学校、工場等の大型建造物も同様の方法で除 染したが、簡単な洗浄では効果のない広いコン クリート表面の除染には、小さな鋼球またはド ライアイスを用いた空気圧式ショットブラスト を用いた。除去されたコンクリート表面の薄い 層は、吸引機で回収した後に除去物とした(鋼 球は磁気選別して再利用した)。

#### iv) グラウンド

グラウンド土壌中の放射性セシウム濃度の深 度分布を測定した結果、ほとんどの地点におい て、表面から深度3~5 cm 程度の範囲に90%以 上が残留していた。このことから、事前に試験 区間を設け、剥ぎ取り深度と低減率の関係を調 査し、剥ぎ取り深さを決定することが重要であ った。また、凹凸がある場合は凹部が削り残さ れることになるため、事前に平らにならす必要 があり、剥ぎ取りが不十分な場所については人 力で剥ぎ取ることが有効であった。

1 cm程度の薄層で剥ぎ取る必要のある場合は、 前述の薄層用に改造したハンマーナイフモアで 表土のほぐしを行い、グラウンド表面をほぐし た後スイーパーで掻き取った(図5-7)。目標剥 ぎ取り厚さとなるまで複数回同一部分を走行し た。薄く剥ぎ取りができるため、除去物の発生 量を抑制することができたが、施工スピードが 遅いため、大面積には適さない場合もあった。 モーターグレーダーは、平らで広いグラウンド に利用した。表面の凹凸がある場合は、事前に 振動ローラーによる地ならしを行った後にモー ターグレーダーを利用し、さらにスイーパーを 併用することで剥ぎ取りの精度が高くなった。 掻き取った表土を溢散させず、取り残しを防ぐ ために、バックホウでかき集めることも重要で あった。

大面積を除染するときは、切削幅が広い路面 切削車による剥ぎ取りが効率的であり、剥ぎ取 り厚さが均質にできる利点があった。ただし、 路面切削車等の大型重機は重いため、表面が柔 らかいグラウンドの場合は事前に振動ローラー で大型重機が走行できる程度に締め固めたのち に除染した。大型重機での作業が困難なグラウ



図 5-7 適用した除染方法の例(グラウンド) 広い面積の表面土壌を効率的に薄く剥ぎ取る手法が効果的だった。
ンドの境界部では、人力やバックホウの剥ぎ取 りを併用した。寒冷地の凍結した土壌において は、事前の調査による放射性セシウムの深度分 布を踏まえて決定された剥ぎ取り厚さでの剥ぎ 取りができず、それ以上の厚さの土壌を剥ぎ取 らざるを得ない場合があった。また、凍結した 土壌が日中融けると、土壌が緩んで重機を使用 した施工ができなくなる事象もあった。

排水処理が施されているグラウンドでは、排 水処理の施工部分を壊してしまう可能性がある ため、天地返しは適用できなかったが、排水処 理が施されていない未舗装駐車場や空き地等で は、天地返しによる除染は効果的であった。天 地返しは、施工スピードが表土剥ぎ取りに比べ て劣るものの、剥ぎ取り残し・剥ぎ取りこぼし が極めて少なく、除染エリア外へ搬出する除去 物が発生しないなどの利点が大きかった。 深度 2~3 mm 程度まで、多孔質な排水性舗装で も表面から深度 5 mm 程度までに大部分が残留 していることが分かった。除染手法として、ブ ラシがけ、高圧洗浄、超高圧洗浄(最高約 200 MPa)、ショットブラスト、切削を適用した(図 5-8)。

舗装道路に対し表面の削り取り(超高圧洗浄、 ショットブラスト)や切削等の薄層切削は効果 が高かった。切削厚さを可能な限り薄くするこ とにより発生除去物量を抑制するとともに、高 い除染効果を達成する方法を選択することが重 要であり、事前に舗装面深さ方向の放射性物質 の残留・蓄積状況を把握した上で、最適な方法 を決定することが効果的であった。

超高圧洗浄は水圧と回数により、ショットブ ラストは投射密度と回数により低減率が変化す ることから、事前に効果を確認して仕様を決め ることが重要であった。

v) 道路

道路の深度方向の放射性物質の分布を調べた ところ、高線量地域でのアスファルト舗装面で は、放射性物質は密粒度の舗装面では表面から

#### ③ 廃棄物の処理と保管

可燃物の容積減少や圧縮、凍結土壌の融解に 伴う沈下に対する防止策を講じる必要があった。



図 5-8 適用した除染方法の例(道路) 舗装面表面から数 mm 程度を効率的に剥ぎ取る手法が効果的だった。

防止策としては、フレキシブルコンテナ間の間 隙を間詰砂等で埋める方法が有効であった。ま た、仮置場/現場保管場の内部に配管等を敷設 する場合は、除去物の荷重による応力を考慮し て、配管周りのフレキシブルコンテナを安定に 定置するとともに、フレキシブルコンテナと配 管の隙間に砂等を充填させることが効果的であ った。積雪量が多く、表土が凍結するような地 域においては厳寒期以外の期間に仮置場/現場 保管場を建設することによって、除去土壌等か らの多量の浸出水や、不具合の多くを避けられ ることがわかった。仮置場/現場保管場を設計 する際には、遮へい方法や除去物の定置方法等 の仕様の長所短所を考慮した上で、その場の条 件や優先的に考慮する事項の整理を踏まえ、仕 様の最適化を図る必要があった。

#### (4) 同意取得

地元の行政区長や地元自治体の首長の助言を 踏まえて住民からの同意取得方法・手順を企画 し、意見集約においても多大な協力を頂いて、 必要な同意を得ることができた。

除染について住民や自治体関係者に説明し、 同意を得るための基本情報として、除染作業及 び仮置場/現場保管場の計画書、並びに除染方 法の効果の評価についての速報を用意すること が有効であった。住民説明会を開催せず、同意 文書の送付によって除染モデル実証事業の実施 を周知した例があったが、住民からの問合せ等 の対応に時間を要し、結果として除染の時期、 計画からの遅れが生じた場合もあった。

同意書を用いず、除染計画書による口頭説明 のみで同意取得とした除染実施対象地区におい ては、除染の進捗とともに除染方法等に対する 細かな要望が増える傾向があった。除染の事前 調査では、家屋の破損状況だけではなく、当該 家屋に適した除染手法を技術的に適用できる環 境条件にあるかどうかや、施工上の条件から、 制約を受けるところはないかなどを確認するた めの調査も併せて行うことが効率的であった。

# (5) まとめ

除染モデル実証事業等により以下の知見が得 られた。

- 効果的、安全、かつ効率的な除染計画を策定し、調整し、実施するための経験と除染技術
- 様々な除染技術の適用性の比較評価
- 様々な対象地域の条件に合わせるための
  手引き

我が国で初めてとなる広域の除染を事前モニ タリング、除染計画の立案、除染の実施、事後 モニタリング、除去物の仮置きといった一連の 除染に関わる手続きを整理した。

除染技術についてはチェルノブイリ原子力発 電所事故後の旧ソ連やヨーロッパにおいて水洗 浄や農地の耕起等の除染技術が試験され、デー タシートとしてまとめられているが、広いエリ アで対象地域の線量レベルに応じて、様々な土 地利用区分に対して複数の除染技術を適用し、 系統的にデータシートとしてまとめたモデル事 業は世界でも例がない。

これらのモデル事業で得られた知見を基礎と して環境省により除染関係ガイドラインが取り まとめられ、これに基づき、国、自治体による 本格除染が進められ、帰還困難区域を除き面的 除染が終了した。

現在も除染モデル実証事業実施区域において 再汚染のないことをフォローモニタリングによ り確認している。

# 5.3 除染・モニタリング・被ばく評価に係る研 究開発の進捗

# 5.3.1 除染効果の評価

# (1) 除染効果評価のねらい

原子力機構は、国や自治体が進める除染活動 を技術面で支援するために、除染の効果を予測 する除染活動支援システム(RESET: Restoration Support System for Environment)を開発した (図5-9)。

空間線量率のデータに基づいて、一定のエリ ア内での除染効果を計算・評価するもので、主 に自治体の要請に応じて、歩行サーベイ等で空 間線量率のデータが整っている比較的狭いエリ ア(公園や農地等)を対象とし、除染後の線量 率予測評価を実施して、除染の実施に係る判断 材料の提供を行っている。



図5-9 RESET による除染シミュレーションの流れ 除染前の1 m高さの空間線量率のデータに基づいて、 除染前の表面汚染密度(単位面積あたりの放射性セ シウムの沈着量: Bq/cm<sup>2</sup>)を算出する。帰還困難区域 の除染モデル実証事業で得られたデータに基づき算 出した表面汚染の低減係数を使って除染後の表面汚 染密度を計算し、除染後の空間線量率を求める。

# (2) 自治体の要請に応じた除染効果の評価

RESET を用いた評価の例としては、富岡町からの要請への対応が挙げられる。富岡町からは、 除染した居住制限区域に接する未除染の帰還困 難区域からの放射線の影響についてと、居住制 限区域の境界から帰還困難区域側を何m除染し たら影響が無くなるのかを調べて欲しいという 要請を頂いた。線量低減効果の予測評価を実施 したところ、境界部での除染の効果が予測でき た(図 5-10)。この予測評価に基づく富岡町の 要望が国に認められ、国による境界部の帰還困 難区域の除染が実現した。



## 図 5-10 RESET による居住制限区域と帰還困難区域 との境界での除染効果の予測例

居住制限区域(左半分)の境界から帰還困難区域(右 半分)側に20 m程度除染すれば、境界付近での線量 低減効果が得られることがわかった。

#### (3) 特定復興再生拠点の除染効果の評価

1Fの事故に伴い設定された避難指示区域の うち、空間線量率が特に高く、長期にわたり居 住を制限するとされてきた帰還困難区域につい ては、2016年8月31日、政府の原子力災害対 策本部において帰還困難区域の取り扱いに関す る考え方が決定され、5年を目途に線量の低下 状況も踏まえて避難指示を解除し、居住を可能 とすることを目指す特定復興再生拠点区域(以 下「復興拠点」という)の整備について、基本 的な方針が示された。

このため、住民の帰還や帰還後の安全な生活 を取り戻す際に必要な科学的・技術的知見の提 供を行うべく、復興拠点の線量率の低下状況を 予測するための帰還困難区域全域の除染シミュ レーションと空間線量率の将来予測解析を実施 することとした 5-3)。

今回、広範囲で比較的空間線量率の高いエリ アが対象となる復興拠点の線量率の低下状況を 予測するため、さらに何が必要かを検討して問 題点を抽出し、その問題点を解決することによ り、現実的に信頼性をもって解析できる手法を 開発した。さらに、自治体が復興拠点の設置場 所を検討する際や、重点的に除染が必要な場所 を判断するときの材料となるよう、解析結果の 示し方を分かりやすく工夫することとした。

# ① 実施内容

帰還困難区域の面積は、これまで RESET で対 象とした面積(1 km<sup>2</sup>未満)に比べ、遥かに大き い(377 km<sup>2</sup>)ことから、従来どおり歩行サーベ イ等で数メータ間隔の空間線量率を得ることは 時間とコストの面から困難であった。また、計 算対象領域(図 5-11)が桁違いに大きいことか ら、復興拠点の範囲・境界が判断できる程度の 分解能で土地利用区分に応じた予測解析を行う ことが求められた。さらに復興拠点を判断する ための線量の低下状況をできるだけ現実的に信 頼性をもって予測解析することが求められた。

復興拠点を判断するための線量の低下状況の 予測解析は、国・自治体の政策に関わることか ら、国・自治体のニーズを踏まえるとともに、 予測結果の示し方は復興拠点を判断するのに効 果的なものとすることが求められた。

できるだけ現実的に信頼性をもって復興拠点の線量の低下状況を予測し、復興拠点選定の判断材料に資するため、以下の解析手法の整備を行った。

- i) 広範囲を対象とした膨大なデータを処理 し、地図上で可視化する仕組みを開発した。
- ii)歩行サーベイによるデータでなく、航空機
  モニタリングデータを活用できるような手
  法を調査・導入した。
- iii)除染係数については、帰還困難区域における除染モデル実証事業で測定された既存の関係データからの推定を検討した。



図 5-11 帰還困難区域における解析対象とした宅地・農地 解析対象は、帰還困難区域(右図の赤線の枠内)の内側で緑で示した宅地・農地の範囲。

iv)さらに精度向上を図るため、ウェザリング 効果を考慮した方法の導入も検討した。

2 主な成果

できるだけ現実的に信頼性をもって復興拠点 の線量の低下状況を予測し、復興拠点選定の判 断材料に資するため、抽出した問題点を下記の とおり解決した。

i) 広域シミュレーションの大量データ処理と 可視化

帰還困難区域は広い面積を占めるため、RESET で利用できる最大のメッシュ(50 mメッシュ) を使っても従来の約350倍の面積のシミュレー ションが必要となる。さらに RESET には複数の 領域のシミュレーション結果を一括して表示す る機能が無いため、各メッシュに必要な情報や 結果(土地利用、除染係数、空間線量率)を地 図上で可視化する工夫を施した。

ii) 航空機モニタリングを地上測定値に直す換 算係数

航空機モニタリングと走行サーベイデータの 比較から、地上測定結果は航空機モニタリング 結果より低めになることがわかっていたが、こ の評価にあたっては統計処理によって換算係数

(0.69)を算出することができた。

iii) 除染係数の設定

国や自治体が実施した除染は、対象地域の空 間線量率を低減することを目的としており、各 作業の除染係数を評価することが目的ではなか ったため、適切な除染係数を設定する必要があ った。そこで、2013年度に環境省が実施した「帰 還困難区域の除染モデル実証事業」の6地区を 始め、福島市21地区、除染特別地域4町村で行 われた膨大な除染結果を調査し、同調査で得ら れたデータを整理・集約して、空間線量率の高 い帰還困難区域で適用できる信頼性の高い除染 係数を推定した。 iv)2成分モデルによる空間線量率の将来予測 RESET にはウェザリング効果を考慮した精度 の高い予測機能は無かったので、原子力機構が 開発した「空間線量率減衰の2成分モデル」に よる予測計算を RESET の除染シミュレーション 結果を使ってできるように後処理プログラムを 作成した。「空間線量率減衰の2成分モデル」の 除染済みエリアへの適用性については、環境省 が公表している除染済の20地区を対象とした 空間線量率の追跡調査結果と比較することによ り、除染済のエリアに対しても精度よく線量予 測ができることを確認した。

さらに、自治体が復興拠点の設置場所を検討 する際や、重点的に除染場所を判断する際の材 料となるように、解析結果の示し方を工夫した。 年間の追加被ばく線量基準の視点では、除染を 実施する地域を定める際の基準である1 mSv

(0.23  $\mu$  Sv/h) と、避難指示解除の基準である 20 mSv (3.8  $\mu$  Sv/h) との2区分だけでなく、 除染特別地域における除染の方針(除染ロード マップ)で示された、線量に応じた除染の実施 順序等の区分目安 (1.0 $\mu$  Sv/h)や除染特別地域 の作業における除染電離則の適用基準 (2.5 $\mu$ Sv/h)等とも比較できるよう、きめ細かに解析 結果を示した。

また、土地利用という視点で、除染範囲(宅地と農地)における線量率ごとの面積比を表示することや、宅地と農地だけを抽出した線量率マップの可視化も行い、線量の低下状況の観点から復興拠点の設置場所等を検討しやすくした(図5.12,5.12)

(⊠ 5-12、5-13)。

復興を目指す自治体に対して、RESET を用い て帰還困難区域における除染シミュレーション を実施し、除染することで5年後の帰還困難区 域の全てにおいて、避難指示解除の基準である 年間の追加被ばく線量20 mSv (3.8µSv/h)を 下回ることを示すことができ、復興拠点設定の 参考情報になった(図 5-14)。

# (4) まとめ

帰還困難区域にある地元自治体の要請に基づ き、除染シミュレーション結果と線量率の将来 予測結果を提供した。除染することで5年後の 帰還困難区域の全てで避難指示解除の基準であ る年間の追加被ばく線量を下回ることなどを示 すことができ、復興拠点設定の参考情報になっ た。帰還困難区域と接する避難指示区域の除染 効果評価では国による境界部の帰還困難区域の 除染が実現するなど、地元自治体の復興計画の 立案等に貢献した。



図 5-12 除染前の空間線量率予測マップ 航空機モニタリングの結果から除染前(2017年4月1日 時点)の空間線量率マップを予測した。 地図データ©2017 Google. ZENRIN



図 5-13 除染後の空間線量率予測マップ

実際の除染は、2017年度から2021年度にかけて順次 行われるが、除染による空間線量率の低減効果が除 染の時期に依らないと仮定すると、除染をいつ実施し ても除染後のある時点における空間線量率は同じに なることから、シミュレーションでは除染終了日を2017 年4月1日に統一した。

地図データ©2017 Google. ZENRIN



図 5-14 空間線量率の区分毎の除染後の宅地・農地の面積比率の推移予測(参考として未除染の場合も提示) 除染の実施で、避難指示解除を目指す 5 年後には、約 7 %の面積が 0.23 µ Sv/h 未満になり、3.8 µ Sv/h (年間 20 mSvに相当)を超える面積は 0 になる。除染直後の空間線量率は除染をしない場合の約 20 年後に相当し、除 染後 20 年後の空間線量率は除染をしない場合の約 50 年後に相当することから、除染の実施により線量率の低 減が 20~30 年早くなる。

#### 5.3.2 モニタリング技術開発の進展

事故後、放射線モニタリング技術は、ニーズ に合わせて様々な技術開発が行われた。ここで は、原子力機構の開発した3つの放射線測定技 術について紹介する。

## (1) UAV を用いた放射線測定技術

5.2.1 で述べたように、有人のヘリコプター を用いた空からの放射線モニタリング技術は、 広域な放射線分布を短時間で可視化する技術と して効力を発揮した<sup>5-4</sup>。そのような基礎技術と 近年技術革新の目覚ましい UAV (Unmanned Aerial Vehicle)を組み合わせ、有人のヘリコ プターを用いるより、さらに詳細に分布を測定 する技術を生み出した<sup>5-5</sup>。

特に、1F事故以前から日本国内で主に農薬散 布用として用いられていたヤマハ発動機社製の R-MAX G1 (現在は後継機種である FAZER-R) に



# 図 5-15 2013 年と 2017 年に実施された無人機による モニタリング結果

左 R-MAX G1: 年間 100 時間以上のフライトを実施 右 現行機である FAZER-R ついては、事故直後から UAV 本体と検出器と組 み合わせたシステム化に着手し、除染前後のモ ニタリングや 1F 構内のモニタリング等に活用 するなどの実績を重ね、2012年8月には、「マ ップ事業」において、1F周辺のモニタリングの ツールとして採用された<sup>5-6)</sup>。図 5-15 に 1F 周辺 におけるモニタリング結果例を示す。このよう に、有人のヘリコプターよりも低高度でのフラ イトが可能であるため、より詳細な放射線分布 マップの作成が可能である。R-MAX G1 は 2011 年度から年間100時間以上のフライトを実施し、 運用当初でのオペレータによる人的事故以降、 大きなトラブルなしに運用されている。2019年 からは、エンジン性能が向上した後継機である FAZER-R により、現在でもモニタリング事業が 継続されている。本モニタリング技術の高度化 に関する取り組みは続いており、近年では、こ れまで取得した放射線のビッグデータと写真測 量で取得できる地形データを学習させ、人工知 能により自動的により詳細なマップを再現させ る技術開発に成功した。

さらに、応用技術として、ヘリコプターより フライト時間の長い無人飛行機(最大6時間) による放射線測定技術について、JAXA と 2012 年から共同研究を開始し、3年間で機体を完成 させた。本システムはUARMS (Unmanned Airplane Radiation Monitoring System)と名付けられ、 IF 周辺での多くのフライト試験を行うことに より運用技術の確立までこぎつけた<sup>5-77</sup>。また、 ドローンについても、機体の開発を注視しつつ 適用可能な放射線検出器をカスタマイズするな どの研究開発を続けている。これらの、開発経 験は、政府が現在検討を始めた原子力防災にお ける無人機の活用に活かされつつある。 (2) プラスチックシンチレーションファイバ

事故後の放射線計測のニーズとして、広い範 囲を効率的に測定できるいわゆる"面"での測 定技術が求められた。具体的なニーズとしては、 除染の前後の測定や局所的な空間線量率の高い 場所(ホットスポット)の探査等である。原子 力機構では、そのようなニーズに応えるためプ ラスチックシンチレーションファイバ (PSF) の開発に取り組んできた(図 5-16)5-8%。PSF は光 ファイバのコア材に放射線に感度のあるプラス チックシンチレータを使用している。ファイバ 内に放射線が入射すると光が両端に配置されて いる光電子増倍管に伝わり、光を検知した時間 差で放射線が入射した位置の特定が可能である。 PSFの歴史は古く、1980年代に高エネルギー物 理の分野で高速荷雷粒子の飛跡測定用を目的と して開発され、2000年代には、時間差の測定手 法と組み合わせて原子炉内や施設内の線量率分 布測定用途として応用されていた。1F 事故後は、 環境測定用に応用することを試みてきた。



図 5-16 プラスチックシンチレーションファイバの 概観

ファイバ内に入射した放射線による発光の時間差に よって位置を特定可能。 PSF の特徴は、サーベイメータ等と比較する と検出部が長いことと位置を検出できることに ある。そのような特徴を生かし、事故後初期は、 除染前後の測定ニーズに応えてきた。PSF で地 表面ぎりぎりをスキャンできるような台車を準 備し、そのデータからリアルタイムに放射線分 布のマップを作成できるシステムを開発した。 図 5-17 に除染効果確認のためのシステム構成 と除染前後の測定例を示す。このように最大10 m の範囲を一度に計測可能であり、地面の亀裂 等の比較的高い放射性セシウムのホットスポッ トが検知できている。また、除染前後で比較す ることから除染の残しや効果の確認も視覚的に 判断できる。

一方、PSF はβ線にも感度があることから、 1F の廃炉現場でも活用されている。1F では、汚 染水の管理に苦労しており、特に海洋等への敷 地外への漏出を防ぐため、リアルタイムにモニ ターすることが求められていた。PSF はコイル 状に巻いて使用することにより、水との接触面 積を大きく確保でき、比較的低い濃度まで検知 可能なモニターとして重宝されている。



# 図 5-17 除染効果確認のためのシステムと除染前後 での測定例

PSFの検出部と地上の距離は10 cm 程度で移動しながらリアルタイムに測定可能。

### (3) 水底の放射線モニタリング技術

1F 事故後、営農再開において、もっとも課題 となったのは、農業用の福島県内に3,600 か所 ある農業用のため池底の放射性セシウムの分布 状況の把握である。従来行われていた、サンプ リングによる水底の濃度測定は時間と手間がか かり、全体像の把握が難しいという課題があっ た。

前述した PSF の検出部はファイバであり、機 械的な要素もないことから水中での測定にも向 いている。農業用のため池底の放射線分布を計 測する用途が浮上し、水中測定用のカスタマイ ズを行った。本技術は農林水産省の「ため池の 放射性物質対策技術マニュアル」に採用され、 2013 年度から水土里ネット福島に技術移転を 行い、現在でも農業用ため池の測定ツールとし て利用されている(図 5-18)。

さらに水底の直接測定技術は発展を見せてお り、水底の表面でγ線スペクトルと取得するだ けで、放射性セシウムの鉛直方向の分布を推定 できる分析手法を考案した(図 5-19)<sup>5-9)</sup>。この 手法により浚渫深さの決定やインベントリー評 価が可能となる。また、より広域な水域への適 用のための技術開発が行われている。2014 年か ら無人観測船 (ASV: Autonomous Surface Vehicle) による河口域の水底放射線モニタリ



図5-18 農業用ため池底の放射線分布測定例 東側の浚渫を行った場所の濃度低下が可視化されている。

ング手法の開発に着手し、2016 年からは原子力 防災への適用を目指した新たな ASV の開発を海 洋研究開発機構(以下「JAMSTEC」という)と行 っている。本 ASV は浜通り企業を中心として開 発され、i-BOAT (Intelligence Boat for Oceanologic Survey from Hama-dori)と名付 け、運用技術の最適化を行っている(図 5-20)。



# 図 5-19 スペクトル情報を利用した水底の深度方向 の放射性セシウム分布推定手法

表面で測定するだけで放射性セシウムの深さを推定 可能。



図 5-20 福島沖の河口域で放射線モニタリングに活用されている無人観測船 (ASV) 左: i-BOAT (JAMSTEC 所有),右: Windy-3S (Windy-Network 所有)

## 5.3.3 モニタリング・被ばく評価技術の活用

1F周辺に位置する大熊町等では、2022 年春頃 までの避難指示解除を目標に、復興拠点の除染 やインフラ等の整備が行われている。これに併 せ、内閣府原子力被災者生活支援チーム(被災 者支援チーム)は、復興拠点への住民の帰還を 現実のものとすべく、必要な放射線防護対策の 検討を進めている。原子力機構では、2018 年夏 から被災者生活支援チーム等からの協力依頼に 基づき、復興拠点における(1)無人へリコプター による迅速かつ詳細な面的な空間線量率分布状 況の把握、(2)代表的な地点における大気浮遊塵 の採取と放射能濃度の測定、(3)代表的な行動パ ターンにおける外部・内部被ばくの評価等を実 施している。

被ばく線量は、自治体等からのヒアリングの



図 5-21 復興拠点のモニタリング例

2019 年 8 月 1 日現在原子力規制庁受託事業として原子 力機構が測定した結果を元に、原子力被災者生活支援 チームが作成。 結果に基づき、復興拠点区域内の行動パターン を設定し、空間線量率分布測定結果や大気中放 射性物質濃度の測定結果等の実測データを用い て、実測データの代表値を用いた評価(決定論 的評価)と実測データの分布を用いたモンテカ ルロ解析(乱数を用いたシミュレーション)に よる線量分布の評価(確率論的評価)を実施し て求めた(図 5-21、5-22)。また、大気中放射性 物質濃度の測定結果から算出した放射性セシウ ムの再浮遊に伴う吸入による内部被ばく線量は、 外部被ばく線量と比べて5桁ほど低い値となる ことが分かった<sup>5-10</sup>。

これらの調査結果を踏まえた放射線防護対策 案が、第47回原子力規制委員会(2018年12月 12日)で了承され、具体的な対策について、国 と自治体等との調整が進められている。今後も 放射線のモニタリングから被ばく評価までの一 連の手法を高度化するとともに、より現実的な 評価を行い、避難指示解除の加速化に直接的に 貢献する成果を創出していく。



図5-22 復興拠点の被ばく評価例 移動場所や滞在場所を想定し、当該区域の線量率を 抽出しリアルな被ばく評価を実施。

#### 5.4 環境動態研究の進捗

#### 5.4.1 福島長期環境動態研究

# (1) 環境動態研究のねらい

原子力機構が進めてきた除染モデル実証事業 の成果に基づき、避難指示解除に向けて生活圏 の除染が行われてきた。一方で、大部分の森林 は未除染のままであり、現時点で、除染の計画 もないことから、除染モデル実証事業を実施し た自治体や住民の方々からは、「未除染の森林か ら放射性セシウムが風や雨、河川水等によって 移動し、生活に影響を及ぼすのではないか」と いった懸念の声が聞かれた。具体的には、土壌 粒子等に吸着された状態の放射性セシウム(懸 濁態)が森林から流出し、生活圏近くの河川敷 に堆積することにより、空間線量率が上昇する 可能性が考えられた。また、イオンのように水 に溶けた状態の放射性セシウム(溶存態)は生 物に取り込まれやすいため、河川水中の放射性 セシウムの溶存態濃度が上昇し、農産物や水産 物中の放射性セシウム濃度が増加する可能性が



図5-23 環境中におけるセシウムの化学形態と特徴の違い 生態系への移行は溶存態、環境中での蓄積は懸濁態が重要。



図5-24 環境中におけるセシウムの動態研究のモチベーション 現地調査・室内実験、解析ツール整備、情報提供を一体的に進めた。

考えられた (図 5-23)。この ため、放射性セシウムの移 動・堆積挙動に関する知見・ データを蓄積し、科学的根 拠に基づき挙動を定量的に 推測するとともに、関係機 関・自治体に適時・的確に情 報提供する必要があった。

そこで、原子力機構では、 2012 年秋から、現地調査・ 室内実験・計算機シミュレ ーションにより、福島県の 環境中に放出された放射性 物質の移動挙動を解明・予 測することを目的として、 福島長期環境動態研究(F-TRACE プロジェクト)を開始 した(図 5-24)<sup>5-11),5-12)</sup>。本 項では、このうち、現地調 査・室内実験について述べ る。

#### (2) 実施内容

1F 事故で陸域に放出された放射性セシウム の約70%は森林に沈着したが、生活圏となって いない大部分の森林は当面除染される予定がな く、放射性セシウムの大きなインベントリーと して懸念されていた。そこで、現地調査・室内 実験では、福島県浜通りの8河川水系(太田川、 小高川、請戸川・高瀬川、前田川、熊川、富岡 川(荻ノ沢川を含む)、井出川、木戸川下流域、 図 5-25) を対象とし、水源であり放射性セシウ ムの流出源となりうる森林から河口域まで、 様々な環境中の放射性セシウム濃度データを取 得し、水系全体における放射性セシウムの移動・ 堆積挙動を定量的に評価した。特に、一つの河 川水系の水源となる森林から河口域まで、系統 的にデータを取得することにより、河川水系全 体における放射性セシウムの挙動を俯瞰するこ とを目指した。また、複数河川を同一手法で調 査・比較することにより、放射性セシウム移動 の支配因子解明を目指した。

#### (3) 主な成果

#### 森林調査

森林内における放射性セシウム移動量の調査 (図 5-26)の結果では、総沈着量の90%以上の 放射性セシウムは、既に樹冠から地表に移動し ているが、森林地表面から河川水系への流出率 は、樹種や斜面の傾斜によらず、1年間に総沈着 量の0.1%程度と極めて低かった(表 5-2)<sup>5-13</sup>。 雨が降った時には、土壌粒子とともに放射性セ シウムが流出することが考えられるが、それは 主に、水滴が地表面に落ちた時の衝撃(雨滴衝 撃)で土壌粒子が飛散し、地表面を流れる水流 (表層流)によりその粒子が押し流されること で起こる。しかし、リター(腐葉土)や下層植 生が繁茂していると、雨滴衝撃や表層流の力が



# 図 5-25 調査対象河川水系と空間線量率分布(2014 年 11 月 7 日時点)

小高川から富岡川までの比較的線量率が高いエリア を流れる5河川水系で調査研究を開始し、その後自 治体等のニーズを踏まえ、8河川水系にまで拡大し た。



図5-26 森林内におけるセシウム移動量調査 林内雨(中央の白いロート)、樹幹流(左の幹に巻い た灰色のプラスチックシート)、落葉・落枝(左奥の 白いネット)による樹冠から地表への移動や、地表 面での移動(右奥の板で囲った区画)を観測してい る。

抑えられるため、森林からの流出率が極めて低 くなると考えられた。また、放射性セシウムは 土壌中の粘土鉱物に強く吸着されるため、水の 浸透に伴う深さ方向への移動も極めて遅いこと から、将来においても、森林内の放射性セシウ ムは、地表から 10 cm までの表土中に長くとど まると予測される。

同一の森林内における樹木各部、山野草、キ

# 表5-2 森林からのセシウム流出率 樹種や傾斜によらず、流出率は極めて低い。

	2013 (期間)	2014 (期間)	2015* (期間)	2016 (期間)
<u>川内 (KA)</u> 常緑針葉樹(スギ) <i>急</i> 傾斜	<b>0.10%</b> (6.10-11.18)	<b>0.06%</b> (4.11-10.8)	<b>0.30%</b> (6.24 - 10.28)	<b>0.04%</b> (6.16 - 11.28
<u>川俣 (KE)</u> 落葉広葉樹 緩傾斜	<b>0.02%</b> (3.29-11.19)	<b>0.10%</b> (4.7-10.20)		<b>0.01%</b> (6.15 - 11.29
<u>川侯 (KW)</u> 落葉広葉樹 <i>急</i> 傾斜	<b>0.05%</b> (6.28-11.19)	<b>0.11%</b> (4.7-10.20)	<b>0.23%</b> (6.30 - 11.5)	<b>0.02%</b> (6.15 - 11.29

ノコ等への放射性セシウムの移行係数を定量的 に評価した。樹木では、養分とともに樹木内を運 ばれること(転流)により、葉、木材、果実等に 放射性セシウムが移行しているのが認められ、 一部の山野草やキノコでも高い移行係数を示し たことから、今後もこれら樹木、山野草、キノコ 等への放射性セシウムの移行について、継続し て観測する必要があると考えられた<sup>5-14),5-15)</sup>。

## ② 河川調査

1年間に河川水系から海に流出する放射性セシウムは、河川水系全体の初期沈着量の1%未満で、大部分は年数回の高水時に懸濁態として移動し、ダムのない河川で比較的多かった。河川敷のうち、1年に1回程度の高水時のみ浸水する高水敷付近では、放射性セシウムを含む土



## 図 5-27 小高川河川敷の空間線量率分布の経時変化

2014年には、河道からやや離れたところに空間線量率が比較的高い場所が認められる.その後、時間とともに、空間線量率が減少していくのが分かる.特に、2015年(平成27年)年9月の関東東北豪雨や、2019年(令和元年) 10月の台風19号とその後の大雨など、災害を引き起こすような大雨の後は、空間線量率が大きく低下している。 壌粒子が堆積しているのが認められたが、生活 圏の空間線量率への影響はほとんどなかった。 その後、大雨の際に上流から流れてくる放射性 セシウム濃度の極めて低い土砂が堆積すること により、放射性セシウムの放射性崩壊による放 射能の減衰より速い速度で、空間線量率は減少 した(図 5-27)<sup>5-16)</sup>。特に、2015年(平成 27 年) 年9月の関東東北豪雨や、2019年(令和元年) 10月の台風19号とその後の大雨など、災害を 引き起こすような大雨の後は、上流から大量に 土砂が流出し、堆積するため、空間線量率は大 きく減少した。

また、農林水産物中の放射性セシウム濃度に 影響を与える溶存態は、森林湧水点付近で溶出 していると考えられた。その濃度は、源流域の 放射性セシウム沈着量により決まるが、最も濃 度が高い河川でも現在では1Bq/L未満と、飲料 水の基準である10Bq/Lを大きく下回っており、 灌漑用水として用いても玄米中の放射性セシウ ム濃度への影響は無視できると考えられた。河 川水中の溶存態濃度及び懸濁態中の濃度は、放 射性セシウムの放射性崩壊による放射能の減衰 より速い速度で、時間とともに減少した(図5-28)<sup>5-17)</sup>。このように溶存態濃度が非常に低い環 境下でも、ヤマメやアユ等、ごく一部の淡水魚 種については100Bq/kgを超える放射性セシウ ム濃度が観測されていることから、今後も継続 的な観測が必要である。淡水魚への放射性セシ ウムの移行については、5.4.2(3)④に詳述する。 放射性セシウムの多くは、放射性セシウムを吸



図 5-28 太田川 (左) 及び請戸川 (右) における河川水中の溶存態セシウム濃度 (上) 及び懸濁態中のセシウム 濃度 (下)の経時変化

いずれも2~3年程度で濃度は半減している。

着しやすい粘土鉱物の一種である風化黒雲母に 強く吸着され、河川を移動すると考えられる。 一方で、河川敷や河床の堆積物は、比較的粒径 が大きく、雲母鉱物のほか、角閃石等の有色鉱 物や石英、長石等の無色鉱物にも同程度の放射 性セシウムが含まれていた。中でも角閃石には、 雲母鉱物と同程度の濃度の放射性セシウムが含 まれており、特に堆積場での挙動において、重 要な役割を占めていると考えられた<sup>5-18)</sup>。

#### ③ ダム・ため池調査

ダム湖では、高水時に土壌粒子とともに流入 する放射性セシウムの約 90%が堆積しており、 下流への懸濁態の流出が抑制されていた <sup>5-19)</sup>。 湖底堆積物の深さ方向の濃度分布や湖に流入す る土壌粒子中の放射性セシウム濃度の時間変化 から、土壌粒子とともに流入する放射性セシウ ム量は時間とともに減少していると考えられた <sup>5-20)</sup>。大柿ダムの場合、ダム湖に流入する河川水 とダム湖から放流される水の中の溶存態濃度は、 冬に低く夏に高い季節変動を示しながら、徐々 に減少した(図 5-29)。一方、ダム湖水中の深さ 方向の溶存態濃度の分布をみると、表層より底 層の方が、溶存態濃度が高いのが認められた(図 5-30)。これは、湖底堆積物からの溶出によるものと推測されるが、春から秋にかけて水温躍層が発達した場合、表層水と底層水は混合せず、 表層水のみが下流に放水されることから、灌漑 用水への影響は限定的であることが明らかとなった。ダム湖に比べて水の交換速度が遅いため 池では、溶存態濃度が比較的高いものの、ため 池の多くに認められる水草や藻類への濃縮は顕 著ではなく、影響は小さいと考えられた<sup>5-21)</sup>。

# ④ 河口域調査

河口域において、比較的放射性セシウム濃度 が高い堆積物が認められたのは、粒径の細かい シルト成分が堆積している場所であった(図5-31)。シルト成分の堆積物が認められるのは凹状 の窪地であったが、そのような地形はごくわず かで、他の場所における堆積物中の放射性セシ ウム濃度は河床堆積物の1/100以下であった。 したがって、放射性セシウムを吸着した土壌粒 子の大部分は沖合に移動しており、沿岸付近へ の堆積による影響は限定的と考えられた<sup>5-22)</sup>。



図5-29 大柿ダム湖に流入する2河川(請戸川・小出谷川)および 大柿ダム放流水中の溶存態セシウム濃度の経時変化 夏時期(黄色網掛け部)に濃度が高く、冬に濃度が低くなるという 季節変化を繰り苛性ながら、徐々に濃度は減少している。



# 図 5-30 大柿ダム湖水中の溶存態セシウム 濃度の深さ方向の分布

湖底(グラフ下方向)付近では、表面付近 に比べて、溶存態濃度が高くなっている。



# 図 5-31 請戸川河口域の堆積物の分布と堆積物中放 射性セシウム濃度の経時変化

請戸川の河口から近く、シルト成分が堆積しやすい場 所では、比較的濃度が高い堆積物が認められるが、 そのような場所は限られており、他の場所の堆積物 中の放射性セシウム濃度は極めて低い。

⑤ 市街地·生活圏調査

市街地では、土被覆面に比べて、アスファル トや建物壁・屋根等の被覆面の沈着量は半分程 度で、洗い流し等により放射性セシウムが流出 しやすいと考えられた(図 5-32)<sup>5-23)</sup>。また、排 水溝流水中の溶存態の移動挙動を調べたところ、 降水直後に濃度が急激に増加するのが認められ た。さらに、除染された市街地や農地等の生活 圏における線量率分布の経時変化を調べたとこ ろ、降水後に地表面に落葉や土砂が堆積し、一 時的に地表面の線量率は高くなるものの、空間 線量率への影響はほとんどなく、全体として物 理減衰より速く低減した<sup>5-24)</sup>。

#### ⑥ 山域·初期沈着調查

本調査で対象とした登山道の線量率分布の共通的な特徴として、針葉樹林内での線量率分布



# 図 5-32 主要な市街地表面要素ごとの相対的なセシ ウム沈着量の経時変化

土壌等の浸透しやすい面に比べて、舗装面等の浸透 しにくい面には、2011 年 12 月の時点で既に初期沈着 量の 2 割程度しか残留していない。

は相対的に線量率が高かった。複数方位の線量 率分布が得られた山域では、1Fからプルーム移 動方向に対する登山道の線量率が他の方位と比 較して相対的にやや高い傾向が見られた。特に、 1Fから北西方向の高太子山では、顕著な方位依 存性が認められた(図 5-33)。これらの特徴は、 乾性沈着の影響が大きいことを示唆している。 また、1F 近傍の3 座(日隠山、十万山、大倉山) で歩行サーベイにより取得した放射性セシウム の沈着量分布をみると、登山道の線量率は、十 万山では登山道山麓付近で、他2座では中腹で 高く、放射性プルームの通過した高さとの相関 が疑われた。この山域調査で取得した線量率分 布データは、後述する十万山林野火災時の影響 評価の際に、火災前のバックグラウンドデータ として役立てられた。

# (4) まとめ

複数の河川水系において、森林から河川水系 を通り河口域に至る放射性セシウムの動きを系 統的かつ定量的に把握することができた。残存 する放射性セシウムのインベントリーの大部分 を森林が占めていること、森林からの年間の放 射性セシウム流出量は森林内全インベントリー の 0.1%程度と極めて少ないこと、森林内土壌 に含まれる粘土鉱物が放射性セシウムを強く吸 着するため河川水中に溶出する放射性セシウム の濃度は極めて低く、飲料水や灌がい用水とし て利用可能なレベルであることなどを明らかに した。これらの情報は、帰還後に農業を再開さ れ、河川水を灌がい用水として利用される方々 にとっては、有益な情報になったと考えている。

一方で、放射性セシウムは、長期にわたり森 林の地表から深さ10 cmくらいまでの表土内に とどまることから、木材、キノコ、山野草等の 林産物への影響については、長期的に観測して いく必要がある。また、河川水中の溶存態濃度 が非常に低い環境下でも、ヤマメやアユ等、ご く一部の淡水魚種については100 Bq/kgを超え る放射性セシウム濃度が観測されている。放射 性セシウムの移行経路を明らかにし、将来の濃 度予測を行うために、今後も継続的な観測が必 要である。



図 5-33 高太石山の空間線量率の分布(1 m 高さ、2017 年 11 月測定) 1F からの放射性物質の流れに面する方向で線量率が相対的に高いことが分かる。

## 5.4.2 環境動態のモデルによる定量的評価

(1) 環境動態のモデル評価のねらい

現地調査・室内実験により、福島県の環境中 における放射性セシウムの挙動が明らかになり つつあった。放射性セシウムの挙動に基づき、 将来の環境中における放射性セシウムの分布状 況を推測することは、将来の外部被ばく線量や、 農産物・林産物・水産物中の放射性セシウム濃 度を推測する上で不可欠である。陸域における 放射性セシウムの水平方向及び鉛直方向の濃度 分布は、外部被ばく線量の予測に必要不可欠な 情報である。また、農産物や林産物に関しては、 陸域における放射性セシウム濃度に加えて、か んがい用水として使われる河川水やダム湖水、 森林内の林内雨や表層水等の環境水中の濃度も、 濃度を決める重要なファクターとなる。水産物 については、いくつかの放射性セシウムの移行 経路が考えられるが、水中の放射性セシウム濃 度が大きな影響を及ぼすといえる。

原子力機構では、放射性セシウムの環境中に おける移行挙動を定量的に推測するため、いく つかの計算機シミュレーションモデルを整備し、 将来の被ばく予測を可能としてきた(図 5-34)。 本項では、このモデルと主な解析結果について 述べる。

#### (2) 実施内容

計算機シミュレーションの開発にあたり、原 子力機構では、移動を支配する物理・化学現象 を明らかにし、個々の支配現象を表現する数理 モデルを組み合わせ、将来の放射性セシウムの 挙動を表すモデルを構築する現象論的なアプロ ーチをとることとした。これにより、過去の調 査中に起こっていない自然現象を想定した放射 性セシウムの移動予測を可能にすることを目指 した。これまでの将来濃度予測手法は、濃度デ ータの変化傾向を簡単な関数で表した経験式を 用いて将来挙動を推測する経験的な手法が主で あったが、この手法では年間の平均的な挙動し か推測できず、様々な自然現象や環境条件の変 化を想定した放射性セシウム移動・堆積のケー ススタディは不可能であった。

また、評価対象範囲、時間スケール、取り扱 う物理化学現象の詳細度が異なる複数のモデル を用意し、評価に必要な適切な組み合わせを提 供することとした。例えば、河川水系全体にお ける放射性セシウムの挙動評価は、大きな空間 スケールのモデルを使用し、陸域のごく表層に おける放射性セシウムの移流分散による移動挙 動、高水時の河川敷における侵食・堆積挙動、 ダム湖や河口域のような水深が深く流れも複雑



#### 図 5-34 環境中におけるセシウムの動態解析ツールの概要

流出源である森林から外洋まで、生態系も含めた環境中の要素間の個々の移行プロセスに着目しているのが特徴。

な領域における移動・堆積挙動等については、 より詳細なモデルを整備した。

さらに、単に放射性セシウムの移動挙動を評 価するのではなく、移動により起こる将来の空 間線量率の変化や、農林水産物中の放射性セシ ウム濃度の変化等、福島県の自治体、関係機関、 住民の方々が必要とするところまで評価するこ とを目指した。

#### (3) 主な成果

# ① 陸域

土砂とともに移動・堆積する放射性セシウム の挙動を解析・予測するため、まず、一般的に 利用されている土壌流亡予測式(USLE)と地理 情報システム(GIS)を活用した簡易迅速な土砂 及び放射性セシウム移行解析モデル SACT を構 築した。試解析の結果、ダム湖や貯水池におけ る顕著な堆積や、シルト・粘土等の細粒成分の 遠方への運搬等が計算で再現され、定性的には 既存の観測結果と概ね整合的であることが確認 された。また、放射性セシウムの約70%は森林 に沈着したが、森林から流出する放射性セシウ ムは、全流出量の約33%に留まり、農耕地から の流出の方が多かった<sup>5-25)</sup>。一方、2011 年の放 射性セシウムの年間流出量は観測結果と整合し たが、それ以降は、特に阿武隈川について、観 測されている早い減少傾向を再現できていなか った。そこで、放射性セシウムの垂直方向の移 行や土壌への吸着過程等を考慮し、SACTを改良 したところ、観測結果を再現できた 5-260。

## ② 河川水系全体

河川水系では、特に高水時に、大量の土砂や 河川水とともに、放射性セシウムの移動が起こ り、放射性セシウムの濃度分布が劇的に変化す る可能性がある。そのため、既存の三次元水循 環モデル GETFLOWS を用いて、陸域から河川水系 全体における懸濁態及び溶存態形態の放射性セ シウム移動挙動を解析した。浜通りの5河川(小 高川、請戸川、前田川、熊川、富岡川)を対 象とし、2011年9月の台風時と2013年(9つの 出水が発生)における放射性セシウムの河口か らの流出量を計算した結果、観測値をよく再現 した (図 5-35) <sup>5-27)</sup>。 富岡川の支流である 荻ノ沢 川では、より詳細な解析を行ったところ、河道 への放射性セシウムの供給は主に河川近傍と森 林のガリ(水で侵食された溝状の地形)で発生 し、河川から離れた森林域における寄与は小さ



図 5-35 水環境シミュレーションを用いた河川水系からのセシウム流出比 上流にダムがある請戸川及び富岡川で、流出比が小さくなっていることがわかる。

いことが示唆された<sup>5-28)</sup>。一方、溶存態は、放射 性セシウムの移動挙動への寄与は小さいものの、 生態系への移行評価上、濃度評価は重要である。 溶存態の放射性セシウム濃度と懸濁態等、固相 に吸着された放射性セシウム濃度が、一定の比 となるところで吸着・脱離がバランスすること を仮定した吸脱着モデル(分配係数モデル)を 用いて、河川水中の溶存態及び懸濁態濃度を解 析した。その結果、平水時及び出水時の懸濁態 濃度は再現できた一方、平水時の溶存態濃度の 季節変動(夏に高く、冬に低くなる)や出水時 の一時的な濃度上昇を再現することができなか った<sup>5-29)</sup>。

データが少ない 1F 事故直後の河川から海洋 への放射性セシウム流出量を推定するため、タ ンクモデルと L-Q 式を用いた簡易な流出モデル を構築した <sup>5-30</sup>。事故後約半年間における放射 性セシウム流出量〔( )内は流域沈着量に対す る流出率〕は、阿武隈川及び浜通り河川につい て、それぞれ 18 TBq(3.1%)及び 11 TBq(0.8%) であった。これらは 2011 年 9 月以降の流出率 に比べ 1~2 桁程度高かったが、1F からの直接 放出(3.5 PBq)及び大気由来の沈着量(7.6 PBq) に比べ、2 桁程度小さいため、海洋への影響は 限定的であることが示唆された。

③ 詳細モデル

土壌中の放射性セシウムの鉛直方向移動を記 述するための修正拡散-収着-固定化モデルを提 案した<sup>5-31)</sup>。このモデルは、可逆収着サイトに対 し、異なる収着・脱着速度を導入していること が特徴である。これにより、これまでの単純な 指数関数による経験的なフィッティングでは再 現できなかった初期の比較的速い深さ方向への 移動を分配係数、収着速度、分散係数によって、 深い個所での放射性セシウム濃度分布のテイリ ングを収着と脱着の速度の違いによって、それ ぞれ再現することが可能になった。これは、陸 域からの放射性セシウム供給能力の時間変化の 再現に役立つものである。

2次元河川シミュレーションコードNays2Dを 用いて、大柿ダムでの懸濁態放射性セシウムの 移動・堆積挙動の予測を試みた<sup>5-32)</sup>。2013 年 9 月の洪水時や平均的な洪水時の流量等を条件と して計算したところ、粒径の小さいシルト及び 粘土の挙動はダム放流口の高さに大きく依存し、 排水口の位置を高くすることでダム内にシルト 及び粘土を多く沈殿させることが可能であるこ とを示した。

#### ④ 生態系移行

放射性セシウムの森林内での循環と河川への 流出、渓流に生息する淡水魚への移行を考慮し たコンパートメントモデルを構築した<sup>5-33)</sup>。そ の結果、淡水魚に影響を与える放射性セシウム の流出源は、落葉の河川への直接流入、落葉層 からの側方流入、土壌層からの側方流入の3つ からなることがわかった。また、森林内の放射 性セシウムの循環は、事故後10年程度で平衡状 態に近づき、それに伴って河川水や淡水魚の放 射性セシウム濃度は、物理減衰程度になると推 測された(図5-36)。

# ⑤ 被ばく評価

空間線量率は土壌中放射性セシウムの鉛直・ 水平分布に依存することから、移動モデルで放 射性セシウムの分布状況を推定できれば、空間 線量率を計算することができる。そこで、任意 の放射性セシウムの土壌中分布から線量率を計 算するツールを開発した<sup>5-34)</sup>。放射性セシウム の分布状況既知の地域における実測値と解析結 果は整合的であった。



図 5-36 ①河川への落葉、②落葉層からの流出、③ 有機土壌層からの流出を考慮した渓流魚中のセシ ウム濃度予測

森林からのセシウムの流出が、間接的に魚中の濃度 に影響を与えている可能性を示した。

このような空間線量率のシミュレーション精 度を向上させるため、環境中の放射性セシウム の分布の違い、例えば、農地、都市、森林にお ける三次元的な放射性セシウムの分布状況の違 いや遮へいの効果を考慮した、現実的なモデル の構築を試みた<sup>5-35)</sup>。160 m 四方のモデルエリア に対して得られた空間線量率の分布は、歩行サ ーベイの結果とよく一致した。

# (4) まとめ

環境中に沈着した放射性セシウムについて、 森林等から土壌とともに河川水系に流出する挙 動、河川水系で溶存態・懸濁態となって移動・ 堆積する挙動、溶存態が土壌や河川水等から生 態系に移行する挙動等、環境中での移行挙動を シミュレーションできる様々な詳細度のツール を整備した。また、放射性セシウムの3次元的 な分布や建物・森林等による遮へい効果に基づ き、空間線量率の分布を計算できるツールも整 備することができた。これらによって、将来の 放射性セシウムの環境中及び生態系内の濃度分 布や空間線量率の分布を推定できるようになり、 各個人の行動パターンを仮定することで、個々 の被ばく線量を詳細に評価することが可能にな る。特に、河川水系の移動シミュレーションを 用いると、極端な気象条件下も含めた様々な環 境下での移動挙動を予測するケーススタディが 可能となり、災害対策検討への活用も期待でき る。

一方で、生態系中の濃度予測に不可欠な河川 水中の溶存態濃度については、季節変動や降雨 時の変化を十分再現できておらず、溶存態の生 成メカニズム解明も含めたさらなる調査・研究 が必要である。

# 5.4.3 環境動態の研究成果の公表と国・自治 体への情報提供

## (1) 情報発信のねらい

環境動態研究では、地表に沈着した放射性セ シウムの7割が分布する未除染の森林から、放 射性セシウムが移動することで引き起こされる 生活への影響に関する様々な懸念に、科学的根 拠をもって答えることを目指した。そのため、 特徴の異なる福島県浜通りの8河川水系を対 象として、水源となる森林から河口域に至る系 統的な現地調査と、様々な空間・時間スケール での解析を可能とする計算機シミュレーション の構築と解析を実施してきた。これらにより得 られた知見を、住民の方々の帰還や帰還後の安 全で安心な生活の実現、自治体の復興計画策定 等に活用頂くためには、ニーズに具体的に応え るような形での情報発信が必要である。

そこで、原子力機構では、誰もが福島の環境 情報に簡単にアクセスでき、住民一人一人の疑 問や不安の解消から、自治体による被ばく低減 のための合理的な対策検討、避難指示解除等の 福島復興に係る施策の検討等に活用頂くことを 目指した情報提供環境を整備した<sup>5-36)</sup>。また、定 期的に自治体や関係機関に対し、調査で得られ た知見や、放射性セシウムの移動挙動の解析結 果等を取りまとめ、提供した。

# (2) 実施内容

情報提供環境の整備にあたり、以下の点を念 頭に置いた。

- ・長期調査データ、移動予測、被ばく評価等を 包括した評価システムを構築する。
- ・調査や解析で得られた科学的知見とともに情報を提供する。
- ・研究者の提供しやすい形ではなく、住民の 方々や自治体のニーズに適した活用しやすい 形で情報を提供する。
- ・任意の地点における空間線量率や環境中の放 射性セシウム濃度の将来予測を可能にする。
- ・整備の過程で2016年12月1日に原子力委員 会から示された「理解の深化 ~根拠に基づく 情報体系の整備について~(見解)」を踏まえ、 情報の階層化と体系化を進める。

# (3) 主な成果

原子力機構は、1F 事故後の環境中の放射性セシウムに関する情報をまとめた「福島総合環境 情報サイト」を開設した(2019 年 3 月 29 日に プレス発表・公開、図 5-37)。このサイトは、環 境モニタリングデータベース、根拠情報 Q&A サ イト、解析事例サイトの3つで構成されている。 すなわち、閲覧者が知りたい知見を、シミュレ ーション結果、根拠となる科学的知見、実測デ



**図 5-37 「福島総合環境情報サイト** (https://fukushima. jaea. go. jp/ceis/)」の概要 データ、科学的知見、解析結果を併せて示すことで、多角的な情報提供を目指した。

ータの経時変化等とともに分かりやすく提示す ることで、多角的に理解を深めていけるような、 これまでにないマルチな情報提供環境である。 それぞれについて、開発状況等を示す。

① 環境モニタリングデータベース

原子力機構は、事故直後に広域かつ均一な手 法により測定した貴重なデータを管理・保存す るため、文部科学省の「放射性物質の分布状況 等調査データベース」整備事業を実施し、空間 線量率の測定結果や土壌・河川・地下水等の分 析結果、さらに航空機モニタリング測定結果を 収集・統合し、2012 年9月に公開した。

一方、文部科学省以外の関係省庁や地方自治 体が測定した貴重なデータも、様々な形式で独 立して公開されていた。そこで、原子力規制庁 が「放射性物質の分布状況等調査データベース」 を引き継ぎ、関係機関が公開していた種々の環 境モニタリング測定結果も含める形でこれを発 展させることとし、原子力機構がこれを実施、 活用しやすい CSV 形式等に統一した上で、2013 年11月に公開した。

さらに、原子力機構は、数値データ、地理統 計データ(標高や土地利用等)、可視化に用いる マッピングツール及び可視化されたデータ(マ ップやグラフ等)を追加する等、ユーザーが活 用しやすい形に整備した「放射性物質モニタリ ングデータの情報公開サイト」を、機構ウェブ サイト上で2015年2月から公開している。

(https://emdb. jaea.go. jp/emdb/)

#### ② 根拠情報 Q&A サイト

原子力機構は、機構が行った調査研究で得られ た知見を、他研究機関等の関連調査研究結果と あわせて、一問一答のQ&A形式で取りまとめ、 2016年3月から公開した。(https://fukushima. jaea.go.jp/QA/) 内容は、農林水産業の再開や 住民の方々の帰還にあたり懸念される事項を選 定した。具体的には、大きく「放射性物質と空 間線量率」、「被ばく線量評価」、「環境動態研究」 に分かれ、さらに「環境動態研究」が放射性セ シウムの移行経路である「森林」及び「河川水 系」に分かれている。簡潔かつ平易な言葉を用 いて記述するとともに、図やグラフを用いるこ とで、一般の方々が見て直感的に理解すること ができるようにした。

その後、原子力委員会から公表された「理解 の深化~根拠に基づく情報体系の整備につい て~(見解)」において、原子力利用に関する「根 拠に基づく情報体系」の整備が求められた。具 体的には、情報を、i)一般向け情報、ii)橋渡 し情報、iii)専門家向け情報、iv)根拠等の各階 層に区分するとともに、一般の方々が、自らの 関心に応じて、自らで検索して、必要に応じて 専門的情報までたどれるように、各階層をつな ぐことである。そこで、根拠情報 Q&A サイトで は、i)平易な用語で質問に対し回答する第1 層、ii)やや詳しく図表や写真等を含めて一枚程 度のスライド頁で説明する第2層、iii)文章で具 体的・詳細な情報を説明する第3層、及び、iv) それらの根拠となる情報源(学術論文、報告書、 官公庁のウェブサイト等) へのリンクを集めた 第4層、といった階層構造を取るとともに、各 階層に他の階層への入り口を設置した。これに より、利用者の知識レベルに応じて、求める知 見を自ら選択して参照することができ、必要な 場合は根拠情報にまでたどりつくことができる ようになった。

③ 解析事例サイト

原子力機構は、開発した解析モデルを利用で きる環境を提供することにより、利用者(主に 自治体を想定)の求める条件に応じた解析を実 施可能とし、意思決定に資するためのものとし て、統合解析支援環境の構築を進めている。現 在までに、まず、解析に基づく成果を取りまと め、「解析事例サイト」として公開した。

(https://simu. jaea.go.jp/simulation/) 解析事例サイトでは、解析的研究による成果を、 (a)放射性物質と空間線量率、(b)放射性物質の 動き(森林)、(c)放射性物質の動き(河川水系)、 の三つに区分けし、根拠情報 Q&A サイトと同様 の情報体系で整理して、個々の成果を提示して いる。特に、森林内の樹木の各部位等の放射性 セシウム濃度分布の経時変化や、降雨時の河川 水中の放射性セシウム濃度の変化については、 閲覧者がいくつかある評価エリアの中から好き な場所を選んで、解析結果を閲覧することがで きるようになっているのは、特徴的である。

また、この他に、年1~2回程度、自治体や関 係機関に対して、それぞれの機関毎にニーズの 高い分野を中心に取りまとめた成果報告を行い、 継続的に情報を提供してきた。大熊町及び富岡 町における市街地調査結果は、避難指示解除後 の市街地の被ばく線量予測や除染計画の策定に とって重要な情報として活用され、特に大熊町 では、町内を流れる熊川河川敷の調査結果とと もに町の広報誌に掲載され、復興計画策定等に 貢献した。また、南相馬市では河川敷や山域の 調査結果が市の広報誌に掲載され、帰還後の安 全・安心の醸成のための情報として活用された。

# (4) まとめ

「福島総合環境情報サイト」は、閲覧者が知 りたい知見を、シミュレーション結果(解析事 例サイト)、根拠となる科学的知見(根拠情報 Q&A サイト)、実測データの経時変化(環境モニ タリングデータベース)等とともに分かりやす く提示することで、多角的に理解を深めていけ るような、これまでにないマルチな情報提供環 境である。特に、根拠情報 Q&A サイトと解析事 例サイトでは、情報の詳細度が異なる階層構造 とすることで、利用者の知識レベルに応じて、 求める知見を自ら選択して参照することができ、 必要な場合は根拠情報(学術論文、報告書、官 公庁のウェブサイト等)にまでたどり着くこと ができるようになった。

このような情報サイトは、最新の情報にタイ ムリーに更新していくことが必要であり、今後 も継続的に更新していきたい。また、統合解析 支援環境については、最終的には、開発した解 析モデルを利用して、利用者の求める条件に応 じた解析を実施可能とする環境を提供し、意思 決定等に活用して頂きたい。

## 5.5 環境創造センターにおける活動

# 5.5.1 協力の概要

福島県では、県民の方々が将来にわたり安心 して生活できる環境の回復・創造に向け、モニ タリング、調査研究、情報収集・発信、教育・ 研修・交流を行うための総合的な拠点として、 環境創造センターを整備した。特に、調査研究 の分野では、前例の無い原子力災害からの環境 回復・創造のため、国内外の英知を結集して取 組を進めていく必要があることから、福島県、 原子力機構及び国立環境研究所が緊密に連携し、 放射線計測、除染・廃棄物、環境動態、環境創 造の4つの部門で進めていくこととし、2015年 4月に連携協力の基本協定を締結した。

環境創造センターでは、外部有識者の方が各 研究部門の部門長を務め、3 機関の関連する調 査研究を横断的に俯瞰して、各機関の強みを生 かし、かつ、各機関が協力して効率的・効果的 に成果を挙げられるよう、調査研究項目を設定 している。原子力機構は、放射線計測、除染・ 廃棄物、環境動態の部門で調査研究を実施して おり、次のような項目で各機関と協力してきた。 (1) 放射線計測

・放射性物質分析技術の高度化(福島県と協力)(2)環境動態

・水域における環境動態と水産物への移行挙動 に関する研究(国立環境研究所と協力)

また、林野火災や台風・大雨による河川越流 などの災害が発生した際には、3機関が協力し て影響評価に取り組んできた。

### 5.5.2 協力内容(十万山林野火災対応)

2017年4月下旬から5月上旬にかけて、福 島県の帰還困難区域にある十万山において発生 した林野火災に対して、福島県、浪江町及び原 子力規制庁の要請を受け、3機関が連携し、火

災中及び鎮火後における周辺環境への影響を把 握するための調査を実施した。機構は全体研究 計画作成等で中心的な役割を果たすとともに、 環境モニタリング・マッピング技術開発及び環 境動態研究を通じて開発した手法を適用して、 調査・分析を実施した(図 5-38、5-39)。3機関 の協力の結果、①延焼地からの放射性セシウム の飛散は有意な量ではなく空間線量率増加もほ とんど認められないこと、②延焼地からの放射 性セシウム流出特性は下草やリターが焼失した 斜面では流出量の増加は認められたものの、他 の森林斜面における観測結果の範囲内であるこ と、③河川への放射性セシウムの流出状況に有 意な増加は確認できないこと、などを明らかに した。また、火災時に採取した大気浮遊じんの 放射性セシウム濃度から推計された内部被ばく 線量は、天然の放射性物質の吸入によるものと 比較して十分低いとの結果が得られた。得られ た結果については、浪江町除染検証委員会(2017 年10月)、福島県廃炉安全確保県民会議(同年 11月)及び福島県廃炉安全監視協議会環境モニ タリング評価部会(同年12月)にて報告した。 本件のような突発的な事象に対しても、各調査 研究の成果や開発した調査技術を結集して取り 組み、タイムリーに自治体と地域住民の懸念の 払拭に大きく貢献した。

# 5.5.3 協力内容(台風等による河川越流対応)

2019年10月の台風19号とその後の大雨の際 には、福島県内でも多くの河川で越流が確認さ れた。その際、越流によって泥や砂が運ばれ、 堆積することで、そこに含まれる放射性セシウ ムによる空間線量率の上昇を懸念する声が多く 聞かれた。原子力機構は、福島県と協力し、南 相馬市内の河川を対象に、空間線量率への影響



図 5-38 林野火災時の大気浮遊じん中セシウム濃度(福島県測定)及びレボグルコサン濃度(国立環境研究所測定)の経時変化





図5-39 林野火災前後の空間線量率分布(原子力機構測定)の比較 赤線枠内は焼損範囲。林野火災後の空間線量率の顕著な上昇は認められない。

を調査した。土砂が堆積した複数の場所では、 越流前に比べていずれも空間線量率は低下して いた。特に、流域のほぼ全てが森林に覆われて いる小河川の調査では、土砂が堆積した下流に 比べて、小河川上流の森林の方が空間線量率が 高く、したがって森林表土中の方が放射性セシ ウム濃度は高いと考えられるにもかかわらず、 土砂の堆積により下流の空間線量率は低下した。 この小河川の森林では、渓流の河道両側の森林 土壌が水流で浸食されて、深い部分の土壌が露 出しているような地形(ガリー)が認められた。 このガリーに含まれている土壌や礫は、その色、 粒径、形状等から、下流に堆積していたものと 同様と考えられた。これらのことから、大雨で 河川が越流し堆積した土砂は、河川上流の山地 森林の中でも、ガリーのように浸食されやすい 場所から流出したもので、元々は放射性セシウ ムがほとんど到達していない地表から数十 cm くらいの深さにあったものと結論付けた。これ は、放射性セシウムの沈着量が多い山地森林で あっても、大雨で浸食されて流出する土砂の中 には放射性セシウムがあまり含まれていないた め、将来、同様の大雨があって堆積したとして も、空間線量率はむしろ低下する方向に働く、 ということを意味している。

# 5.5.4 まとめ

現在も、放射線計測と環境動態の研究部門で は、原子力機構と他機関との研究協力を積極的 に進めている。このような研究協力に加え、大 雨、林野火災、土砂崩れ等の災害時には、環境 創造センターの各機関の持つ研究能力を結集し て、県民の安全・安心のために必要な調査・研 究・情報発信をタイムリーに行っていけるよう、 調査研究体制を整備していきたい。

- 5-1) 日本原子力研究開発機構, 福島第一原子 力発電所事故に係る福島県除染ガイドラ イン作成調査業務報告書, 2012, 318p.
- 5-2) 日本原子力研究開発機構, 福島第一原子 力発電所事故に係る避難区域等における 除染実証業務報告書, 2012, 1159p.
- 5-3) 山下卓哉ほか, 福島県の帰還困難区域の除 染シミュレーションと将来予測, JAEA-Research 2019-010, 2020, p. 5.
- 5-4) 眞田幸尚ほか, 有人ヘリコプタを用いた 放射線モニタリング, 分析化学, vol.66, issue 3, 2017, p.149-162.
- 5-5) 眞田幸尚ほか,平成28年度緊急時対応技 術適用のためのバックグラウンド航空機
   モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2017-035, 2018, 69p.
- 5-6) 眞田幸尚ほか, 原子力発電所事故後の無 人へリコプターを用いた放射線測定, JAEA-Research 2013-049, 2014, 129p.
- 5-7) 佐藤昌之ほか, Multiple Model Approach による構造化ロバスト制御器設計法を適 用した放射線モニタリング無人固定翼機 の飛行制御則設計―福島県浪江町におけ る放射線モニタリング飛行―, 計測自動 制御学会論文集, vol.51, no.4, 2015, p. 215-225.
- 5-8) 眞田幸尚, 福島第1原子力発電所事故後 におけるプラスチックシンチレーション ファイバーを用いた環境計測, 光学, vol. 45, no. 8, 2016, p. 300-305.
- 5-9) Ochi, K. et al., Development of an Analytical Method for Estimating Three-Dimensional Distribution of Sediment-Associated Radiocesium at a Reservoir Bottom, Analytical Chemisyry, vol.90, no. 18, 2018, p. 10795-10802.
- 5-10) 舟木泰智ほか,特定復興再生拠点区域に おけるモニタリング及び被ばく評価手法 の検討, JAEA-Research 2018-016, 2019, 48p.
- 5-11) 飯島和毅,森林から河川水系を移動する 放射性セシウムの環境動態研究の現状, 地球化学, vol. 49, issue 4, 2015, p. 203-215.

- 5-12) 長尾郁弥ほか,福島における放射性セシ ウムの環境動態研究の現状(平成 30 年度 版), JAEA-Research 2019-002, 2019, 235p.
- 5-13) Niizato, T. et al., Input and output budgets of radiocesium concerning the forest floor in the mountain forest of Fukushima released from the TEPCO's Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 161, 2016, p. 11-21.
- 5-14) Sasaki, Y. et al., The Transfer of radiocesium from the bark to the stemflow of chestnut trees (*Castanea crenata*) contaminated by radionuclides from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Journal of Environmental Radioactivity, vol.161, 2016, p. 58-65.
- 5-15) Sasaki, Y. et al., Translocation of radiocesium released by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in Japanese chestnut and chestnut weevil larvae, The Horticulture Journal, vol. 86, issue 2, 2017, p. 139-144.
- 5-16) Saegusa, H. et al., Deposition of radiocesium on the river flood plains around Fukushima, Journal of Environmental Radioactivity, vol.164, 2016, p. 36-46.
- 5-17) Nakanishi, T. et al., Trend of <sup>137</sup>Cs concentration in river water in the medium term and future following the Fukushima Nuclear accident, Chemosphere, vol. 215, 2019, p. 272-279.
- 5-18) Hagiwara, H. et al., Mineral composition characteristics of radiocesium sorbed and transported sediments within the Tomioka river basin in Fukushima Prefecture, Journal of Environmental Radioactivity, vol.211, 2020, p.106042\_1-106042\_10.
- 5-19) Kurikami, H. et al., Sediment and <sup>137</sup>Cs behaviors in the Ogaki Dam Reservoir during a heavy rainfall event, Journal of Environmental Radioactivity,

vol. 137, 2014, p. 10-17.

- 5-20) Funaki, H. et al., Evaluation of particulate <sup>137</sup>Cs discharge from a mountainous forested catchment using reservoir sediments and sinking particles, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 189, 2018, p. 48-56.
- 5-21) Sasaki, Y. et al., Fate of radiocesium in freshwater aquatic plants and algae in the vicinity of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Limnology, vol. 17, 2016, p. 111-116.
- 5-22) Tsuruta, T. et al., Horizontal and vertical distributions of <sup>137</sup>Cs in seabed sediments around the river mouth near Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Journal of Oceanography, vol. 73, 2017, p. 547-558.
- 5-23) Yoshimura, K. et al., Distribution of <sup>137</sup>Cs on components in urban area four years after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 178-179, 2017, p. 48-54.
- 5-24) Nakama, S. et al., Temporal decrease in air dose rate in the sub-urban area affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident during four years after decontamination works, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 208-209, 2019, p. 106013\_1-106013\_8.
- 5-25) Kitamura, A. et al., Predicting sediment and cesium-137 discharge from catchments in eastern Fukushima, Anthropocene, vol. 5, 2014, p. 22-31.
- 5-26) Liu, X. et al., Long-term simulations of radiocesium discharge in watershed with improved radiocesium wash-off model; Applying the model to Abukuma River basin of Fukushima, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 203, 2019, p. 135-146.
- 5-27) Sakuma, K. et al., Characteristics of radio-cesium transport and discharge between different basins near to the

Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant after heavy rainfall events, Journal of Environmental Radioactivity, vol.169-170, 2017, p.137-150.

- 5-28) Sakuma, K. et al., Evaluation of sediment and <sup>137</sup>Cs redistribution in the Oginosawa River catchment near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using integrated watershed modeling, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 182, 2018, p. 44-51.
- 5-29) Sakuma, K. et al., Applicability of  $K_{\rm t}$  for modelling dissolved <sup>137</sup>Cs concentrations in Fukushima river water; Case study of the upstream Ota River, Journal of Environmental Radioactivity, vol.184-185, 2018, p.53-62.
- 5-30) Sakuma, K. et al., A Modeling approach to estimate the <sup>137</sup>Cs discharge in rivers from immediately after the Fukushima accident until 2017, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 208-209, 2019, p. 106041\_1-106041\_12.
- 5-31) Kurikami, H. et al., Coupling the advection-dispersion equation with fully kinetic reversible/irreversible sorption terms to model radiocesium soil profiles in Fukushima Prefecture, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 171, 2017, p. 99-109.
- 5-32) Yamada, S. et al., Sediment and <sup>137</sup>Cs transport and accumulation in the Ogaki Dam of eastern Fukushima, Environmental Research Letters, vol. 10, 2015, p.014013\_1-014013\_9.
- 5-33) Kurikami, H. et al., Numerical study of transport pathways of <sup>137</sup>Cs from forests to freshwater fish living in mountain streams in Fukushima, Japan, Journal of Environmental Radioactivity, vol. 208-209, 2019, p. 106005\_1-106005\_11.
- 5-34) Malins, A. et al., Effect of remediation parameters on in-air ambient dose equivalent rates when remediating open sites with radiocesium-contaminated

soil, Health Physics, vol.111, issue 4, 2016, p.357-366.

- 5-35) Kim, M., et al. Simulation study of the effects of buildings, trees and paved surfaces on ambient dose equivalent rates outdoors at three suburban sites near Fukushima Dai-ichi, Journal of Environmental Radioactivity vol. 210, 2019, p. 105803\_1-105803\_10.
- 5-36) 齊藤宏ほか, 福島の環境回復に係る包括的 評価システムの整備に向けた取り組み, JAEA-Review 2017-040, 2018, 34p.

# 6. 研究開発成果の現場への実装

## 6.1 地元企業への技術移転

原子力機構として、研究開発はその成果を社 会に実装することを通じて、社会に貢献させる ことが重要と考えている。そのためには企業と 連携して研究成果を創出するとともに、併せて、 地域産業の活性化、地元企業への技術移転を促 すことが極めて重要である。ここでは、その代 表的事例をいくつか紹介する(本報告書で紹介 した成果に係わるプレス発表成果を巻末付録に 示す)。

# 6.1.1 農業用ため池底の放射能分布測定技術の 開発

(1) 背景と課題

福島県内では農業用のため池が約3,700か所 あり、1Fの事故以来、放射性セシウムによる汚 染状況が懸念されていた。ため池は、上流の集 水域に降った雨を集めるものであり、その水は 農業用水として使われる。水中での放射性セシ ウムは、水に溶けているより、水底の泥の中に 蓄積していると考えられ、蓄積量の評価や蓄積 量の変化観察が課題の一つとなっていた。

これまで、ため池底の土壌の放射性セシウム の濃度を測定するには、土壌をサンプリングし 実験室で放射能を測定する手法が一般的であっ たが、サンプルが廃棄物になってしまうこと、 ため池全体の分布をみることは難しいことから、 一度に幅広い範囲を直接測定する手法が求めら れていた。また、水中においてガンマ線は空気 中よりも遮へいされるため、測定するには検出 器と線源の距離を密着させる必要があった。

(2) 課題解決の技術

原子力機構では、1Fの事故以来、プラスチッ クシンチレーションファイバ検出器 (PSF) (図 6-1)の研究に取り組んでおり、放射性物質対策 の前後の測定等に応用していた。ここでは、一 度に長い距離の測定が可能であること、水中で



# 図 6-1 プラスチックシンチレーションファイバ検出器

本手法により、土壌サンプリングも不要となり、その場測定を実現。しかも 1,000 m<sup>2</sup> 程度の大きさのため池を 4 日間程度 (1 チーム 5 人として) で測定することができる。



# 図 6-2 放射能分布マップによる浚渫範囲の変化の確認 この測定技術を用いると視覚的に放射能の分布をとらえることができ、放射性物質対策の計画や効果の確認に有用。 浚渫(しゅんせつ)した部分の放射性物質濃度が下がっていることが一目で判明。

も測定が可能なこと、測定対象物の形に応じて 形が変えられることという特徴を生かし、ため 池底の測定にも応用を試行した。福島県内の10 か所のため池において本技術の適用試験を実施 した結果、本技術を用いて作成したため池底の 放射能分布マップは、ため池の放射性物質対策 等に活用できることがわかった(図 6-2) (5.3.2 参照)。

原子力機構は、水土里ネット福島(福島県の 農業、農村整備に取り組む団体)と技術指導契 約を締結し、技術移転を進めた。水土里ネット 福島は、この技術による測定条件等を最適化す る取り組みを進め、効果的な測定条件を確立し た。原子力機構としては、福島県内のため池の 放射性物質対策における本手法の利用について、 必要な技術開発及びサポートをこれまでも継続 して実施している。

#### 6.1.2 1F 構内における汚染水監視技術の開発

(1) 背景と課題

1Fでは、汚染水の管理が社会的な問題となっ ており、海洋への流出を防ぐためシビアな対応 が必要な状況が続いていた。格納容器の冷却水 を保管している汚染水タンクや地下水等の発電 所敷地内における汚染水の監視には、人力によ る測定やパトロールによって行われていた。連 続的な濃度監視は、海洋への放出口に設置され ているものの、高額かつ保守に人手が必要であ ったため、台数を増やしたきめ細やかな監視が 難しかった。

(2) 課題解決の技術

PSF は 6.1.1 にもあるとおり、水底の放射性 セシウムの分布測定にも利用されており、福島 県農林水産部では県内の数 100 か所に及ぶ農業 ため池の測定が行われている。PSF は、測定対 象に合わせて測定部の形状を自由に変えられる ことやベータ線に感度があるといった特徴があ る。原子力機構は、1F 事故後の混乱の中、早く から PSF の有効性に着目し、東京電力に積極的 に働きかけた結果、発電所構内のモニターとし て採用されるまでに至った(図 6-3、6-4)。PSF の基礎的な技術は、1980年代に開発されていた が、1F 事故までは大きな適用先がなく、いわゆ る埋もれていた技術であった。その技術を掘り 起し、素材の選定から始めて、データ読み出し・ 処理アルゴリズムの開発及び水密性の向上・長 尺化等の応用研究、さらには現場適用に至るま での一連の技術開発を短期間で実施した(5.3.2 参照)。



図 6-3 PSF 検出器 測定部の形状に合わせて PSF を活用



### 図 6-4 東京電力の設置した PSF モニター

PSF 周辺へ土粒子が堆積しないようにするため、試験的にドレン弁を微開にし、排水を行う仕組み。 測定水槽から、オーバーフローした水が排水路に戻る設計となっている。(第 39 回 廃炉・汚染水対策現地調整会議資 料を基に作成)

#### 6.1.3 "海洋のドローン"の開発

(1) 背景と課題

災害後の調査においては、様々な状況を想定 する必要があり、狭い水路でもアクセス可能な 小型の無人船の開発が求められていた。従来の 無人船では、放射線計測機器等、目的に応じて 一つの測定機器を搭載して船体と測定機器を遠 隔で制御していたことから、海底の地形等、評 価に必要な情報は別に求める必要があった。ま た、海底の堆積物の採取を遠隔で行うこともで きなかった。これらの多目的の測定(マルチセ ンサー)や試料採取の機能を満たすためには、 システムの制御技術の開発が必要であった。

(2) 課題解決の技術

原子力機構は、株式会社ウィンディーネット ワーク及び JAMSTEC と共同で、放射線の測定 をはじめ様々な用途に活用可能な無人船(海洋 のドローン)の開発を行った(図6-5)。

上記3機関が中心となり1Fの事故以来実施し





図 6-5 事業の成果概要

てきた、無人船による河口域のモニタリングの 経験をベースとして、放射線の測定だけでなく 自動で海底土のサンプリングや水温、水深の測 定等の様々な用途に活用可能な無人船を開発し た。福島県浜通りに拠点を持つ企業5社(株式会 社K. S. E. 、Takeru Software、有限会社協栄精機、 株式会社磐梯マリーン、日本オートマチックマ シン株式会社) との共同事業となった。なお、 本事業において、無人船観測に係る以下の要素 技術を開発した。

- ① 無人船の船体製作·製品設計·制御技術開発
- ② ファイバー型検出器を用いた海底放射線測 定システム
- ③ 自動連続海底土サンプリング装置
- ④ 小型自動ウィンチ制御技術
- ⑤ 無人船による海底測量技術

このうち、①③④については、福島県浜通り に拠点を持つ企業が開発を担当した。また、こ

(a) 無人船外観:

船体の中央に海中への機器昇降 用の直径 100 cm のムーンプールを 有している。また、横方向の推進装 置により、運動性能を最適化し、海 洋調査時の定点維持が可能。

(b) 搭載センサー:

放射線測定、自己位置計測及び 水温などの調査環境のデータを取 得し、地上の操縦者までリアルタイ ムに送信可能。また、複数の海底 土試料自動採取も可能。

(c) 無人船の音波測量機器を搭載により 作成した海底地形図:

> 水面から浅い箇所を赤、深い箇 所を青で示す。



#### 図 6-6 事業体制

(株)磐梯マリーンは無人船の船体制作、(有)協栄精機、日本オートマチックマシン(株)、Takeru Software は、自動連続 海底土サンプリング装置、(株)K.S.E.は自動ウィンチ制御技術を担当。

れらの要素技術を、JAMSTEC の所有する無人船 を改造して実際に組み込み実証した。今後、無 人船をはじめとする開発した技術の販売体制を 構築すること及び運用技術を修練することによ って、浜通り発のユニークな技術として 2019 年 度内に事業化を開始している(図 6-6)。この技 術を実用化することは、福島県浜通り地域にお いて水産業等の再開のための基礎データを提供 するだけでなく、将来の原子力防災への活用も 期待できる。本事業は、2016 年度から 3 年間、

「福島県地域復興実用化開発等促進事業費補助 金事業」の課題として採択されたものである (5.3.2参照)。

# 6.1.4 濃度分布の可視化カメラ搭載ドローン システムの開発

(1) 背景と課題

福島県内の帰還困難区域を含む屋外環境において、1Fの事故に伴い環境中に飛散・沈着した 放射性物質の濃度分布を把握することは、除染 作業者への判断材料や住民帰還への指標とする 上でとても重要である。しかし、従来のサーベ イメータを用いた濃度分布の測定では広範囲エ リアの測定に時間がかかり、足場の悪い場所で は怪我等の危険も伴うために事前の処置等も必 要となり、作業コストの増加が懸念された。そ のため、簡便に広範囲を放射性物質分布測定で きる手法が求められていた。

(2) 課題解決の技術

CLADS と株式会社千代田テクノルは、福島県 浜通り地域の地元企業である株式会社栄製作所 (南相馬市)等と連携して、放射線源が測定で きる小型軽量のコンプトンカメラをドローンに 載せて動きながらでも測定できる遠隔放射線イ メージングシステムを開発し、広いエリアの放 射性物質分布の3次元可視化に成功した。

福島県の帰還困難区域において本システムの 測定試験を行い、実環境中に点在する局所的な 汚染(ホットスポット)でも短時間(半日以上 が 30 分未満)で可視化できることを実証した (図 6-7)。

本システムは、広いエリアでも短時間でモニ タリングでき、民家や里山における局所的な汚 染の検知に有効であり、帰還困難区域で自治体 や帰還を望まれる避難者の皆様への情報提供に 資することが期待できる。さらに、廃炉作業が 進行中である 1F においても、サイト内の放射 性物質の濃度分布を3次元的に可視化すること により、ホットスポットの効率的な把握や除去、 効果的な遮へいにより廃炉作業の円滑な推進に 貢献できる。なお、本システムは2019年度内に 実用化を開始しており、広く利用して頂けるよ うにする予定である。

本事業は、2016年度から3年間、「福島県地 域復興実用化開発等促進事業費補助金事業」の 課題として採択されたものである。

以上4つの事例は福島県内企業との連携事例 であるが、その他、福島県内企業からの再委託 という形で業務を受けるケースもあった。例え ば、株式会社FSK (いわき市の企業)が、福島ロ ボットテストフィールドに整備される試験用プ ラントのためのロボットシミュレータ開発事業 を行っていたが、開発中のマルチコプターシミ



測域センサで測定した3次元 地形モデルに航空写真を貼り 付け、さらにコンプトンカメ ラで撮影した放射性物質分布 のイメージを重ね合わせたも の。 放射性物質が多く沈着する筒

所を赤く示している。

同じエリアについてサーベイ メータを用いて測定した結果 (実測値) 測定面積:約7,000 ㎡

※出典:国土地理院 縮尺約1/2000 (https://maps.gsi.go.jp/development /ichiran.html)

# 図 6-7 異なる手法による比較

20µSv/h~30µSv/h

O 10µSv/h~20µSv/h

<10µSv/h

歩行サーベイ(下図)によって既に得られていたホットスポットの位置は、コンプトンカメラによる航空サーベイ(上図)で も同様に捉えることができた。
ュレーション機能と通信障害のシミュレーショ ン機能に課題があったことで、原子力機構は、 自らが保有するロボットシミュレータ開発の知 見・技術を活用して各々の課題を解決するため のプラグインを制作した(2017 年)(4.2.4 参 照)。

#### 6.2 地元等への技術情報の還元

# 6.2.1 コミュニケーションと人材育成

原子力機構は、福島大学とは2011年7月に、 福島工業高等専門学校とは2012年3月に連携 協力協定等を締結し、これまでに共同研究や人 材育成に関する取り組みを連携して行っている。

(1) 福島大学との連携

共同研究として、「環境試料の分析法の高度化 ~放射性ストロンチウムの迅速分析法の開発~」 を行っているほか、英知を結集した原子力科学 技術・人材育成推進事業「化学計測の構築に基 づく廃炉インフォマティックスとタイアップ型 人材育成」を2019年度から開始したところであ る。また、事故後、県内の住民の方々を対象に、 放射線に関する講演会を共同で多数開催してき た。

(2) 福島工業高等専門学校との連携

共同研究として、紫外線による樹脂硬化特性 を利用した流体漏洩防止技術の開発を行ってき たほか、夏期休暇実習生の受け入れ、NARREC を 利用した研修(後述)を通じて、人材育成の支 援を行ってきた。

また、NARREC については、楢葉南工業団地に おいて他事業者に先行して 2016 年度に運用を 開始しており、本施設の活用によるロボット開 発をはじめ、最先端技術の発展及び福島県浜通 り地区における廃止措置関連の産業集積に繋が ったものと考えられる。 (3)県内外教育機関・企業、地元等との連携 NARREC には、2015 年度の一部運用開始より 2020 年 3 月末までに 1,442 件、19,165 名もの 視察・見学者が訪れた。国内外のメディアによ る取材も多数受け、多くの注目を集めていると ともに、地元地域の小・中学生、高校生の来訪 をはじめ、県内外の高校や大学からも多数訪れ ており、福島イノベーション・コースト構想へ の貢献を含む人材育成に向けた活動の場となっ ている。また、同構想に係る事業の施設利用も 行われ、人材育成・事業発展の両面からその趣 旨にあった活動になっている。

さらに、文部科学省英知事業における廃止措 置研究・人材育成等強化プログラムの一環とし て、廃炉創造ロボコンが2016年度からNARREC で開催され、原子力機構では、会場提供及びそ



# 図 6-8 第 4 回廃炉創造ロボコン; (a) 競技の様子、 (b) 原子力機構理事長賞(技術賞)を受賞したチーム (福島工業高等専門学校)

競技の課題は、1F のペデスタル下部に存在する燃 料デブリを回収することを想定。競技はペデスタルを 模擬した環境で行い、制限時間は 10 分で実施。 の運営を支援してきた(図 6-8)。加えて、廃炉 創造ロボコンに参加する学生を対象としたサマ ースクールを開催し、現場の確認に加えて技術 的なアドバイスを含む実習を行った。

また、2019 年度からは、学生や企業の研修を 対象にしたロボット操作実習プログラム(図 6-9)も開始するなど、廃炉人材の育成にも繋げて きた。さらに、福島県内企業・大学 廃炉・災害 対応ロボット関連技術展示実演会(図 6-10)の 開催への協力(2016 年度から 2018 年度で年 1 回)、その他、地域イベント〔マジカル福島(2016 年度から 2017 年度で年 1 回、主催:株式会社福 島ガイナックス)、ふたばワールド 2018 in なみ



図6-9 ロボット操作実習プログラムの整備 県内外の教育機関、企業の研修に活用できるよう、操作体 験と講義を組み合わせたプログラムを作り、運用してい る。写真はクローラー型操作ロボットの操作体験をしてい る様子。



図 6-10 福島県内企業・大学廃炉・災害対応ロボット関連 技術展示実演会(2018 年 12 月)

福島県ハイテクプラザが主催する 1F の廃止措置や除染 作業 及び災害対応分野における新たなビジネス機会の 創出を目的とする展示実演会である。 え(2018 年度、主催:双葉地方広域市町村圏組 合)、磐陽祭(2018 年度、主催:福島工業高等専 門学校)〕等の開催に協力し、福島県内地元企業 の 1F 廃炉技術へのマッチングにより、産業復 興・地域活性化、地域住民の廃炉作業への理解 醸成になったものと考える。

大熊分析・研究センター施設管理棟(2017年 度運用開始)と第1棟建設現場には、2020年3 月末までに125件、1,079名の視察・見学者が 訪れた。視察された方には地元自治体職員や大 学生、高等専門学校生が含まれている。

国際共同研究棟及び大熊分析・研究センター 施設管理棟駐在者約50名が富岡町等近隣に居 住し、機構主催のイベントを実施及び富岡町の 開催するイベントへ積極的に参加するなど地域 活性化の観点で地域復興にも努めた(図6-11)。



図6-11 大熊分析・研究センターにおける施設公開 施設管理棟のワークショップ(分析作業のモックアップを行 う場)で見学の様子。



図6-12 地元とのふれあい 富岡町が開催する「えびす講市」という祭りでの福島 研究開発部門の出展の様子。

国際共同研究棟は 2017 年 4 月に運用を開始 し、2020 年 3 月末までに約 300 件、約 2,800 名 の視察・見学者が訪れた。視察者には、地元自 治体、東京電力・政府・廃炉関係者、大学や高 等専門学校生、国内外の専門家等が含まれ、地 元への廃炉の理解の促進、廃炉研究に関する情 報発信、学生や研究者等の人材育成に繋がった。 2018 年 10 月には、富岡町のえびす講市と併せ て、国際共同研究棟の施設公開を実施し、50 名 を超える見学者が訪れ、地元との共生が図られ た(図 6-12)。2020 年 3 月末時点で、国際共同 研究棟での研究従事者等も 30 人を超え、地元地 域の活性化、富岡町の復興にも繋がった。

## 6.2.2 地元等への技術支援と情報提供

(1)国・自治体の除染活動への協力・支援 福島県内市町村の除染計画の策定を支援す るため、2011年8月24日、内閣府、環境省、 原子力機構等で「福島除染推進チーム」が結成 され、2011年9月から原子力災害現地対策本部 と協働して、国、県、各市町村・自治体への除 染活動への協力・支援(原子力機構の専門家の 派遣等)が開始された。その後、除染作業の本 格化時期においては、原子力機構も除染モデル 実証事業の経験等を活かして、国・自治体が実 施する本格除染への協力を行った。国が除染を 実施する除染特別地域においては、除染作業の 立会・技術指導、除染試験、フォローアップモ ニタリング等の実施及び評価支援等を行うとと もに、市町村・自治体が除染を実施する除染実 施区域においては、除染現場での技術指導等に 加え、除染作業者・業者の教育、人材育成、住 民説明会での説明支援等、要請に応じて、全国 の各拠点から専門の職員を招集し、体制を整備 しながら、国・各市町村等への協力・支援活動 を行った(図 6-13)。2011年10月21日より開



#### 図 6-13 各自治体等に対する除染活動への支援例

福島県内の各市町村のみならず、福島県外の7県(岩手県、宮城県、茨城県、千葉県、埼玉県、群馬県、栃木県)からの 支援要請にも対応していた。 始された、文部科学省の「チルドレンファース ト」の取り組みにも協力し、学校、通学路、公 園等の除染支援、技術指導を行った。これら当 時の福島県内外重点調査地域、8県104市町村 等を対象とした対応の件数は、2020年3月末現 在までの累計で、4,120件となっている。

(2) リスクコミュニケーション・原子力人材育 成

1F 事故により、特に福島県において、園児、 児童の放射線による健康への影響を心配する声 が高まっていた。このため、福島県内の保育園、 幼稚園、小中学校の保護者並びに先生方を主な 対象として「放射線に関するご質問に答える会」



図6-14 答える会の様子 参加者の質問に答える時間をできるだけ長くとるこ とに重点を置いている。

(答える会)と称した直接対話方式の活動を 2011年7月より開始し、集中的に行ってきた。 体制としては全国の各拠点から約500名の職員 を説明者として登録し、答える会の実施要請を 受けてその都度、原則4名でチームを編成、ご 依頼者の指定する日時・場所に出向いて対応す るシステムを整えた。

内容としては事故以前から 10 余年に亘り実施してきた地域住民とのコミュニケーション活動の実践経験を活かしたもので、参加者との双方向性を重視したプロセスを採用し、事前に参加者の関心・ご質問を伺った上で相手に合せた説明を行ってきた(図 6-14)。

会の終了後は参加者へのアンケート調査によ り、講演内容の理解度、不安・心配に思うこと、 意見・要望(自由記述)等を収集した。

福島県内の参加者数を地域別に示すと図 6-15 のようになり、2020 年 3 月末までに 262 か 所で開催し、延べ 23,013 人の方々に参加頂い た。

アンケート等結果からは、概ね理解できたと のご意見が多く、特に小さなお子様の保護者の 方々に対して、放射線に係るご不安の払しょく



※申込書の参加予定数を参加人数と見倣した。

図 6-15 答える会 地域別実施状況(2020 年3 月末時点)

に資することができた。

また、文部科学省国際原子力人材育成イニシ アティブ、福島県除染推進のためのリスクコミ ュニケーション事業、連携協力協定による人材 育成事業(福島工業高等専門学校等)などを実 施した(図 6-16)。

(3) WBC 検査による福島県民健康管理調査支援 事業

事故に伴う住民の方々の内部被ばく検査は、 事故直後の2011年3月下旬に原子力災害対策 本部が実施した甲状腺への放射性ヨウ素蓄積量 に関するスクリーニング検査に始まった。その 後、福島県が中心となり、住民を対象としたWBC を用いた体内放射能の測定を実施している(図 6-17、6-18)。

原子力機構としては、県民健康管理調査(内 部被ばく検査)の立案、検査と結果の評価、そ の他、問い合わせ対応(2011年7月11日~) を行い、2020年3月末までに約94,000人(子 ども約73,220人、大人約20,780人)の測定 を実施した。このうち、茨城県の原子力機構の 原子力科学研究所や核燃料サイクル工学研究所 においても、福島県から多くの県民の方々(約 22,000人)を受け入れ、WBC検査を実施した。



図 6-16 人材育成事業支援 ガンマープロッター(ガンマ線を測定する検出器)を使 った放射線測定実習の様子。



図6-17 WBC車

この車には、内部被ばく検査のためのWBCを搭載 している。この車で地域を巡回し、広範囲に検査を行っている。



図6-18 WBC 検査結果の説明 WBC 検査の結果については、1 対 1 で受検者に説 明、質問・疑問に答える体制をとっている。

# 7. 今後に向けて

1Fの廃止措置に向けては、中長期ロードマッ プに基づき「初号機の燃料デブリ取り出しの開 始」として、2021年内に2号機からの試験的取 り出しに着手し、段階的に、安全かつ着実に取 り出しの規模を拡大していくことで、その後の 取り出し規模の更なる拡大に向けて必要な情 報・経験を得ていくこととしている。

また、廃棄物対策において「処理・処分の方 策とその安全性に関する技術的な見通し」を示 すため、NDFの戦略プランにおいて、2021 年度 頃までを目処に、固体廃棄物の物量低減に向け た進め方を提示し、性状把握を効率的に実施す るための分析・評価手法を開発するとともに、 性状把握等、必要な情報が判明した際に、固体 廃棄物の安全な処理・処分方法を合理的に選定 するための手法を構築することとしている。

さらに、多核種除去設備等で浄化処理された 水の取り扱いについては、風評被害等の社会的 な観点も含め、有識者による委員会における総 合的な議論が継続されているが、国内外に対し て、科学的根拠に基づく正確な情報発信を継続 することが重要となっている

一方、福島の環境回復に向けては、2018 年3 月末までに、帰還困難区域を除く全市町村で面 的除染を完了し、帰還困難区域を除くほとんど の地域で避難指示が解除されている。しかしな がら、帰還困難区域については、国が「たとえ 長い年月を要するとしても、将来的に帰還困難 区域の全てについて避難指示を解除し、復興・ 再生に責任を持って取り組む」との決意の下、 6 町村の特定復興再生拠点区域において、2023 年春頃までの特定復興再生拠点区域全域におけ る避難指示解除を目指している。

これまで原子力機構では、福島の復興・再生

に向けて、「基礎・基盤から応用」までの幅広い 研究開発や、研究施設の整備等を進めてきた。 廃止措置に向けた今後の取り組みにおいては、

- 中長期ロードマップを踏まえた研究開発 を進めるとともに、若手研究者の育成や国 内外の英知を結集するための中核機関と しての役割を担っていく。
- 特に、シーズオリエンテッドに偏らず、現場のニーズに沿った研究開発に取り組む。 環境回復に係る今後の取り組みにおいては、
- 特定復興再生拠点をはじめとする帰還困 難区域の避難指示解除に貢献する研究成 果の創出、情報発信に努めていく。
- 地域の懸念やご不安を払しょくする情報 発信に努め、地域の復興・産業再興に貢献 できるよう努めていく。

技術的な観点だけでなく、学校・関係機関へ の協力を含め、若手・人材育成や浜通り地区の 商工会議所等との協力・連携等、地域社会の活 性化の視点でも福島の復興に貢献できるよう努 めていく。

1Fの廃止措置においては、今後始まる燃料デ ブリの取り出しなど困難でかつ長期にわたる作 業に向けて、燃料デブリ及び放射性廃棄物の保 管、処理、処分の研究開発が重要な課題と考え られる。原子力機構として、その技術の蓄積、 能力を最大限活用し取り組むべき開発分野は、 以下の3点である。

- 放射性廃棄物や燃料デブリの分析結果に 基づく、1Fでの事故進展解析、その結果の 原子炉の安全性向上へのフィードバック
- 放射性廃棄物の分析とその結果に基づく、 保管、処理、処分にあたっての技術的手段、 方策の提言

燃料デブリの分析技術開発と分析結果に 基づく、1F 廃炉への技術的な提言およびデ ブリの安定保管、処理・処分にあたっての 技術的な提言

また、福島の環境回復のためには、福島県、 国立環境研究所とも連携をし、継続的な環境モ ニタリング、環境中でのセシウム動向の環境動 態研究、その結果の政策決定のための情報提供、 地元への丁寧な説明を実施する。

これからも、国内外の英知を結集し、1Fの廃 止措置と環境回復に役立つ研究成果の提供、さ らには福島復興への貢献を目指して参りますの で、引き続き、皆様のご理解、ご支援、ご鞭撻 を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

## JAEA-Review 2020-023

付録 本文で紹介した成果に係わるプレス発表 (1/3)

発表日	件名(主題、副題)	発表のポイント	本文
2020 年 3 月 27 日	環境中の放射性物質分布をパノラマで 可視化 次世代型モニタリングカー「iRIS-V」	<ul> <li> <ul> <li> <ul></ul></li></ul></li></ul>	4. 2. 4
2020年1月30日	水中のβ線リアルタイムモニタリング 技術の開発に成功 福島第一原子力発電所構内の排水路用 放射線モニターとして運用開始 (日本放射線エンジニアリングとの共 同発表)	<ul> <li>o IF構内においては、排水路に汚染水漏えいの可能性がある場合、排水路の水をサンプリングし、汚染水に多く含まれるストロンチウム90(<sup>60</sup>Sr)を想定したβ線計測を行っている。</li> <li>o 現状の管理ではβ線とγ線を区別できないモニターが多く、迅速な対応や効率化のために、水中での進む距離(飛程)が短く直接測定することが難しいβ線をフォールアウト起源のγ線と区別して計測できる簡便なリアルタイムモニタリング技術の確立が求められていた。</li> <li>o 原子力機構などは、β線とγ線を区別して、リアルタイムに測定できるファイバ型モニターの開発を行った。本モニターをIFの現場や模擬的な汚染水を使って検証した結果、水中のβ線核種の<sup>90</sup>Srをγ線と区別して検出することに成功した。</li> <li>o β線のリアルタイムモニタリングが可能となることで、排水路の現場でサンプリング・分析を行うことなく、汚染水の漏えい有無の判断の迅速化及び作業員の負担軽減が期待できる。本モニターは、東京電力HDにより現場設置工事を行い、令和2年1月31日に運用開始。</li> </ul>	6. 1. 2
2020年1月15日	川から海へ、セシウムはどれだけ流出 したか 観測結果とモデルを組み合わせたセシ ウム流出量の推定手法を開発 (福島大学との共同発表)	<ul> <li>         • 河川を通じたセシウムの海への流出は 1F から海への直接放出 および大気経由のフォールアウトに続く第 3 の流出経路と考えられていた。     </li> <li>         • 現在、森林流域から河川に流出するセシウムは年間 1%未満と 非常に小さく、河川水中のセシウム濃度も低下し続けている。しかし、1F 事故後初期の河川水のモニタリングデータは乏しく、 その後も断片的な評価期間や観測地点しか存在しなかった。また、降雨時を含め長期にわたって評価可能な計算モデルも存在しなかった。     </li> <li>         • そこで原子力機構は観測結果を基にした計算モデル「MERCURY」を開発し、1F 事故後の河川を通じて海へ流出するセシウム流出量なりのった。     </li> <li>         • そこで原子力機構は観測結果を基にした計算モデル「MERCURY」を開発し、1F 事故後の河川を通じて海へ流出するセシウム流出量     </li> <li>         • をう出した。その結果、事故後半年間のセシウム流出量は、他の流出経路に比べ流出量が 2 桁程度少ないこと、また、2017年までに河川から海へ流出した量の6割を占めることがわかった。     </li> <li>         • モデルを利用することで、事故後初期に加え長期にわたる海洋への流出量の評価や、降雨ごとのセシウム流出量を評価することで、地域住民の安心につながることが期待される。さらに、本手法はセシウムのみならず、水や土砂流出に伴う汚染物質の移行などにも応用が可能である。     </li> </ul>	5. 4. 2

付録 本文で紹介した成果に係わるプレス発表 (2/3)

発表日	件名 (主題、副題)	発表のポイント	本文
2019 年 12 月 24 日	渓流魚中のセシウム濃度変化の原因を 解明 森林内のセシウムの動きと関係してい ることが明らかに	<ul> <li> <ul> <li> <ul></ul></li></ul></li></ul>	5. 4. 2
2019 年 5 月 24 日	測定・サンプリングなど多目的に使用 できる"海洋のドローン"の開発 無人船開発に浜通り企業の技術を結集 (ウィンディーネットワーク、海洋研 究開発機構との共同発表)	<ul> <li>o 原子力機構、ウィンディーネットワーク及び JAMSTEC は、これまでに蓄積された無人船運用の経験や開発技術を基に、福島県浜通り地区の企業5社[(株) K.S.E. Takeru Software、(有)協栄精機(株)、磐梯マリーン、日本オートマチックマシン(株)]がもつ技術を最大限活用し、組織の枠を超えてアイディアを結集することで、放射線の測定をはじめ様々な用途に活用可能な無人船(海洋のドローン)の開発に成功した。</li> <li>o 本無人船開発の中で、放射線だけでなく水温や電導度の計測及び海底土サンプルの採取が同時にできるシステムもあわせて共同開発し搭載することで、原子力発電所周辺の河口域の詳細なモニタリングを可能とした。また、音響測定システムを搭載することで世界でも例を見ない無人船による海底測量を実現した。</li> <li>o 本無人船は、有人船で行っていた海洋調査の時間やコストの縮減及び人が立ち入ることが困難な過酷環境における調査、人命救助、防災時のツールとしても活用できる。</li> <li>o 本成果は、福島イノベーション・コースト構想の一環である福島県地域復興実用化開発等促進事業費補助金事業の助成を受けている。</li> <li>o 本無人船の販売や測量サービスは、2019年度中に事業化。</li> </ul>	6. 1. 3
2019 年 5 月 9 日	空からすばやく 環境中の放射性物質 分布を3次元で可視化 放射性物質可視化カメラを搭載したド ローンシステムを開発 (千代田テクノルとの共同発表)	<ul> <li>o 福島県内の屋外環境における放射性物質の分布把握は、除染 作業者への情報提供や住民帰還への指標とする上で重要だが、 従来のサーベイメータを用いた手法では帰還困難区域の広範 囲エリアの測定に時間がかかり、作業コストの増加が懸念され る。</li> <li>o 原子力機構と千代田テクノルでは、放射線源が測定できる小型軽量コンプトンカメラをドローンに載せて動きながらでも 測定できる遠隔放射線イメージングシステムを開発し、広いエ リアの放射性物質分布の3次元可視化に成功。</li> <li>o 帰還困難区域において本システムの測定試験を行い、実環境 中に点在する局所的な汚染(ホットスポット)でも短時間(半 日以上⇒30分未満)で可視化できることを実証。</li> <li>o 本システムは、帰還困難区域内の広いエリアでも局所的な汚 染の検知に有効である。また1Fの廃炉作業においても、ホッ トスポットの効率的な把握等への活用が期待される。</li> <li>o 本システムは2019年度中に実用化。</li> </ul>	4. 2. 4

付録 本文で紹介した成果に係わるプレス	発表	(3/3)
---------------------	----	-------

発表日	件名(主題、副題)	発表のポイント	本文
2019年2月22日	福島第一原子力発電所原子炉建屋内に おける核燃料由来のアルファ線放出核 種の検知 アルファ核種可視化検出器を用いたス ミヤ試料の測定を実施	<ul> <li>olFの廃炉作業を進めるうえで、内部被ばくをもたらすアルフ ア線放出核種の検知は非常に重要となるが、従来のサーベイメ ータでは核種の判別、アルファ線を放出する粒子の位置や分布 の特定が不可能であったため、アルファ線を計数してもそれが 核燃料によるものかその場で判別できず、作業員の放射線防護 上の課題となっていた。</li> <li>o 今回、原子力機構が研究開発を進めている「アルファ核種可 視化検出器」を用いて 1F の原子炉建屋内で採取された試料の 測定を試みたところ、エネルギー分布から核燃料由来と考えら れるアルファ線放出核種を検知することに成功した。</li> <li>o この測定結果と、原子力機構が保有するアルファ線放出核種 の試料(プルトニウム粒子)のエネルギー分布を比較したところ、両者は良く一致した。</li> <li>o 今回、アルファ線放出核種が核燃料由来であり、その位置分 布も特定できたことから、迅速なアルファ線放出核種の分布状 況の把握が簡便に可能となり、作業環境の放射線管理や作業員 の放射線防護などへの応用が期待できる。</li> </ul>	4. 2. 4
2019年1月18日	河川のセシウム濃度、減少続く 過去3年にわたる連続的な調査結果か ら	<ul> <li>         ・河川水中の放射性セシウム濃度は1リットルあたり1ベクレルを下回っていることが各種モニタリング結果から判明しているが、その範囲内で具体的にどのように濃度が変化しているかは明らかになっていなかった。         ・平成27年4月から平成30年3月までの継続調査の結果、事故から7年経過した現在も、河川の放射性セシウム濃度は減少し続けていることが分かった。         ・その減少速度は<sup>137</sup>Csの物理的半減期による減少速度のおよそ10倍である。         ・この結果は、陸上に沈着した放射性セシウムが時間とともに地中に移動することによって、河川へ流出しにくくなっていることを示唆している。         ・河川を利用するにあたっての安全・安心に貢献するため、今後も観測を続けていく。     </li> </ul>	5.4.2
2018年10月31日	湖沼等の底質中の放射性セシウムの深 さ分布の可視化 試料を採取しなくても汚染実態解明へ	<ul> <li>o 湖沼や河川の水底の放射性セシウムによる汚染実態把握は、 農業再開に向けて重要な課題。しかし、これまでの調査は柱状の底質試料を採取して、層ごとに分けて分析するため手間がかかっていた。</li> <li>o 原子力機構は水底で測定した y 線スペクトル特性(散乱 y 線と直接 y 線)から、底質中の放射性セシウムの深さ分布を評価する手法を開発した。</li> <li>o この成果により、湖沼・河川等で底質試料を採取しなくても、迅速かつ簡便に水底の放射性セシウムによる汚染実態を把握できるため、モニタリングの効率化が期待できる。</li> </ul>	5. 3. 2
2018年8月28日	福島第一原子力発電所の作業現場の汚 染個所を遠隔で検知し仮想空間上に可 視化する技術を開発 福島第一原発原子炉建屋で遠隔ロボッ トを用いた放射線イメージング測定を 実施	<ul> <li>o1Fの廃炉作業を進めるに当たって、原子炉建屋内に飛散した 放射性物質の分布を正確に把握し、作業員の被ばく線量低減や 除染計画の立案を行うことは極めて重要である。しかし、建屋 内の高い線量率や、現場に散乱した汚染ガレキや機器が障害と なり、建屋内の把握は技術的に難易度が高い課題となってい る。</li> <li>o 原子力機構は、小型軽量化に成功した小型軽量コンプトンカ メラをロボットに搭載し、遠隔で建屋内のホットスポットの検 知に成功した。</li> <li>o さらに、遠隔で取得した建屋内の情報を、作業環境の写真と 組み合わせて仮想空間上で統合し、肉眼では見えない汚染状況 を見えるように加工した仮想空間の構築にも成功した。</li> <li>o これらの成果により、建屋内に人間が立ち入らずとも、遠隔 で汚染状況を把握し、仮想現実技術を用い、作業員の被ばく量 を最小にする作業プロセスの詳細な検討や事前訓練などが可 能になる可能性が拓かれた。原子力機構としては、研究開発を 継続し、1Fの廃炉に資する成果の創出に取り組んでいく。</li> </ul>	4. 2. 4
2014年7月3日	被災地の農業復興に向けた農業用ため 池底の放射能分布測定技術 プラスチックシンチレーションファイ バを用いた放射線検出器の技術開発と 福島県内で実施した適用試験の結果に ついて (水土里ネット福島との共同発表)	<ul> <li>o ため池底の放射能分布の可視化に成功。</li> <li>o 放射性物質対策の計画、放射性物質対策効果の確認に適用可能。</li> <li>o 民間(水土里ネット福島)へ技術移転し、福島県内のため池 底測定に利用。</li> </ul>	6. 1. 1

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本ì	単位			
巫平里	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	立の例			
和午春	SI 組立単位				
和立里	名称	記号			
面和	責 平方メートル	m <sup>2</sup>			
体 利	責立方メートル	m <sup>3</sup>			
速さ,速度	g メートル毎秒	m/s			
加速员	<b>g</b> メートル毎秒毎秒	$m/s^2$			
波数	数毎メートル	m <sup>-1</sup>			
密度, 質量密度	度 キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>			
面積密周	度 キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>			
比 体 利	責 立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg			
電流密度	<b>度</b> アンペア毎平方メートル	$A/m^2$			
磁界の強さ	ミアンペア毎メートル	A/m			
量濃度 <sup>(a)</sup> ,濃厚	<b>度</b> モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>			
質量濃厚	まログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>			
輝厚	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(	<sup>b)</sup> (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) トオ トげわ ろ					

(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

	回伯の石がこれ。	7 (1)(0)	40.2011起至中国	
			SI 組立単位	
組立量	to the	±a ₽.	他のSI単位による	SI基本単位による
	泊你	記万	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立 体 角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 <sup>(b)</sup>	$m^2/m^2$
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>
圧力,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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
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	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
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
光束	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$	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,	ガレイ	Gy	I/b a	2 a <sup>-2</sup>
カーマ	7 6 1	ay	J/Kg	m s
線量当量,周辺線量当量,	(g)	e.,	T/lrm	2 -2
方向性線量当量,個人線量当量		SV	J/Kg	m s
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

#### 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>
力のモーメント	- ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$
表 面 張 九	コニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ミラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角 加 速 度	ミラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
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>
電界の強き	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	E 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	うクーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
電束密度,電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} s A$
誘 電 卒	『ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 卒	ミヘンリー毎メートル	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	ゴグレイ毎秒	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		
$10^{24}$	э 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 <sub>コ</sub>	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	•	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	N	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J			
ダル	ŀ	$\boldsymbol{\mathcal{V}}$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg			
統一原子貿	質量単	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

_	衣o. SIに属さないが、SIC 所用されるての他の単位					
	名称			SI 単位で表される数値		
バ	-	N	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・	- 7	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m		
海		里	М	1 M=1852m		
バ	-	ン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{\cdot 12} \text{ cm})^2=10^{\cdot 28} \text{m}^2$		
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s		
ネ	-	パ	Np 🗋	の形法はいかを目接け		
ベ		ιV	В	対数量の定義に依存。		
デ	シベ	ιV	dB -	749/till - 7644(- p+1) 0		

表 9.	固有の名称	、をもつCGS組立単位
反折	±a ₽.	OI 単片 示主 さわ Z

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	$\operatorname{St}$	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	$^{\rm sb}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$			
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に属さないその他の単位の例					
名称		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
$\nu$	$\sim$	トゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\nu$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ	3	/	7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$
フ	T.	N	Ξ		$1 \ 7 \ \pm \ \mu \ \xi = 1 \ \text{fm} = 10^{-15} \text{m}$
メー	ートルヌ	系カラ:	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 フ	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	IJ	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ		~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m