

1F 廃炉に向けた放射線源逆推定及び線源対策に係る デジタル技術の研究開発

－ 3D-ADRES-Indoor FrontEnd：廃炉現場で用いる
ファストデジタルツイン技術－

R&D Status of Digital Technology on Inverse Estimation of
Radioactive Source Distributions and Related Source
Countermeasures

- Fast Digital Twin Tech. in Decommissioning Field:
3D-ADRES-Indoor FrontEnd -

日本原子力研究開発機構

町田 昌彦、山田 進、金 敏植、田中 伶詞、飛田 康弘、岩田 亜矢子
青木 勇斗、青木 和久、柳澤 憲一、山口 隆司、鈴木 政浩、岡本 孝司

(株)アイプランツ・システムズ、岩手県立大学

高橋 弘毅、加藤 徹、山下 圏、土井 章男

サイバネットシステム株式会社

松本 陽司

高度情報科学技術研究機構

吉田 亨、古立 直也、柳 秀明、長谷川 幸弘

キーワード：福島第一原子力発電所、廃炉、放射線源、逆推定、LASSO、デジタルツイン技術、
線源対策、可視化

福島第一原子力発電所（1F）建屋内には、原子炉内から漏洩した放射性物質の汚染により高い放射線量を示す地点が多数存在し、廃炉作業を円滑に進める上での大きな障害となっている。日本原子力研究開発機構（JAEA）は、この課題解決に貢献するため、経済産業省の廃炉・汚染水対策事業費補助金「原子炉建屋内の環境改善のための技術の開発（被ばく低減のための環境・線源分布のデジタル化技術の高機能化開発）」を受託し、令和（R）5年度4月より、廃炉屋内の放射線環境改善に係るデジタル技術の研究開発事業を進めている。本事業では、前期事業（R3～4年度実施）にて開発した3D-ADRES-Indoor（プロトタイプ）を発展させ、現場で活用可能な高速デジタルツイン技術より成るFrontEnd、1F新事務本館等の居室で詳細解析を行うPro、そして、収集したデータ及び解析したデータを集中管理するデータベースの役割を果たすBackEndの3つの連携システムの開発を目標としている。本報告では、この3つの連携システムの中でも、現場で活用するシステムとして、点群測定後、迅速に3Dメッシュモデルを作成し、線量率の計測結果から線源を逆推定し、その推定線源の位置や強度を更に高精度化する計算技術

(再観測指示と再逆推定)を有するFrontEndを中心に、その開発状況について報告し、その検証結果として5号機での試験結果を示す。また、簡単に当該事業の今後の研究開発の計画も報告する。

1. はじめに

2011年に発生した1F事故により、放射性物質の漏洩が発生し、原子炉建屋内には高い放射線量を示す地点が数多く存在し、廃炉作業を進める上で大きな障害となっている。廃炉作業の中核となる溶け落ちた核燃料から成るデブリの取り出しのためには、上記の障害を克服し、炉心への安全なルートを確保し、可能な限り上記作業に携わる廃炉作業者の被ばくを低減することが求められる。

作業員の被ばくを低減し、廃炉作業を加速させるには、高い放射線量を生み出す線源の存在を明確にすることが求められる。高強度の放射線源の位置やその強度を明らかにすることができれば、作業空間内の線量を低減させるための有効な除染・遮蔽等の計画立案が可能となる他、廃炉の取り組みを効率良く且つ計画的に進めることも可能になると考えられる。

以上、高強度の放射線源の位置及び強度を精度良く推定する技術が求められるが、モニタリングに係る労力を減らし、推定を高精度に実施可能とする技術の確立が必須となる。つまり、被ばく等の危険を伴うモニタリングを最低限としつつも、高精度に線源を推定可能とする技術が求められる。これは、ある意味、情報が不足する中でも、線源の位置や強度を可能な限り精度良く推定可能とすることを意味しており、従来の限界を突破する技術の開発が必須と考えられる。

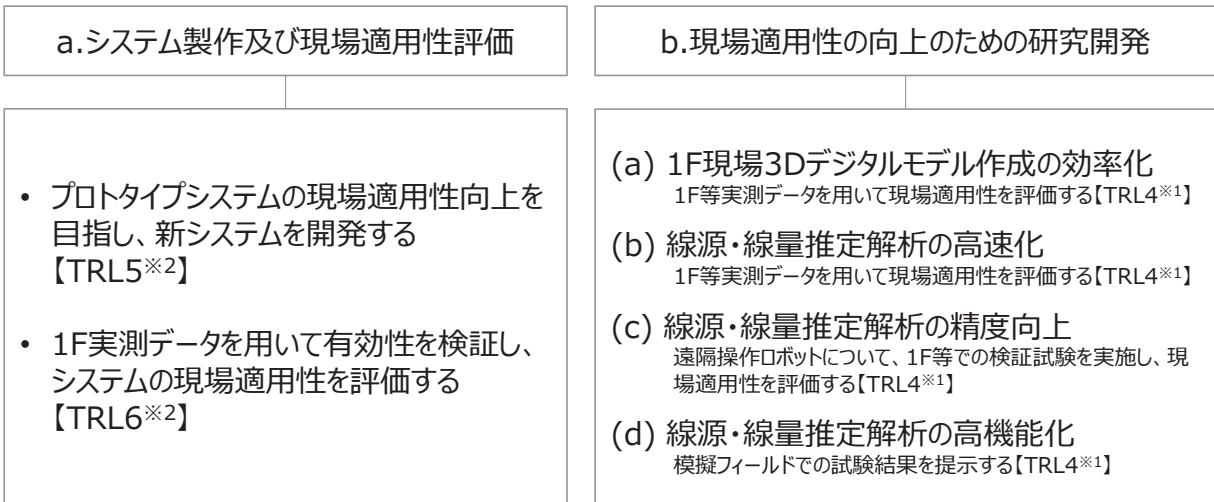
上記のような相反する条件下でも、精度良く線源推定を実現するには、最新の機械学習技術の活用が考えられるが、本事業では、Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO) を適用する。LASSOは、一定の条件の下、観測点数は少なくとも精度

良く逆推定を可能とする技術であり、当該課題に適用するには最適な手法の一つと言える [1,2,3,4,5,6]。なお、LASSOを上記課題に活用する技術開発については、前期事業にて、JAEAの廃炉対象となっているJapan Material Testing Reactor (JMTR) 等の原子炉建屋現場を活用し、適用性検証を進め、それを動作させるプロトタイプシステム：3D-ADRES-Indoorを構築してきた [7,8]。その成果を受け、本事業では、実際の1F現場での適用試験を行い、現場適用性を更に向上させる研究開発を行っている。

本事業では、研究開発体制をaチーム、bチームの2つに分け、aチームは、3D-ADRES-Indoorの現場適用性の向上を目指し、実際の1F現場での試験及び活用を通して、開発及び改良を行うチームとする一方、bチームは、aチームが目指す適用性を抜本的に向上させるための最先端技術の研究開発を行う体制とした(図1参照)。従ってaチームの目標はTRL6(現場での実証を行う)、bチームの目標は、各項目共にTRL4(試作レベルの試験を行う)としている(図1参照)。

なお、前期事業では、LASSOを活用する原子炉建屋内での線源逆推定法の確立を目指して研究開発を推し進めたが、その結果、原子炉建屋内の3Dモデルに対し、有効なLASSO派生モデルを見出し、JMTR内にてその検証を行い、良好な逆推定結果を得ることに成功している [9]。その際、逆推定結果から屋内の3D線量率の詳細分布を取得する他、各線源に対し、除染や遮蔽効果を調べるためのデジタルツール群を開発し、線源・線量率解析のプラットフォームとする3D-ADRES-Indoor(プロトタイプ)の開発を行ってきた [7,8]。その後、JAEAは、現

<研究開発体制>



目標達成を判断する指標(TRL)

※1	TRL2(応用研究)	従来経験として適用できるものがほとんど無い領域の開発、エンジニアリングを実施し、要求仕様を設定する作業をしている段階
	TRL3(応用研究)	従来の経験を応用、組合せによる開発、エンジニアリングを進めている段階。または従来経験のほとんど無い領域で基礎データに基づき開発、エンジニアリングを進めている段階
	TRL4(応用研究)	開発、エンジニアリングのプロセスとして試作レベルの機能試験を実施する段階
※2	TRL5(実用化研究)	実機ベースでのプロト機を製作し、工場等で模擬環境下での実証を行う段階
	TRL6(模擬実証)	現場での実証を行う段階

図1 本事業2チーム(a.及びb.チーム)体制と各チームの課題及び終了時目標TRL

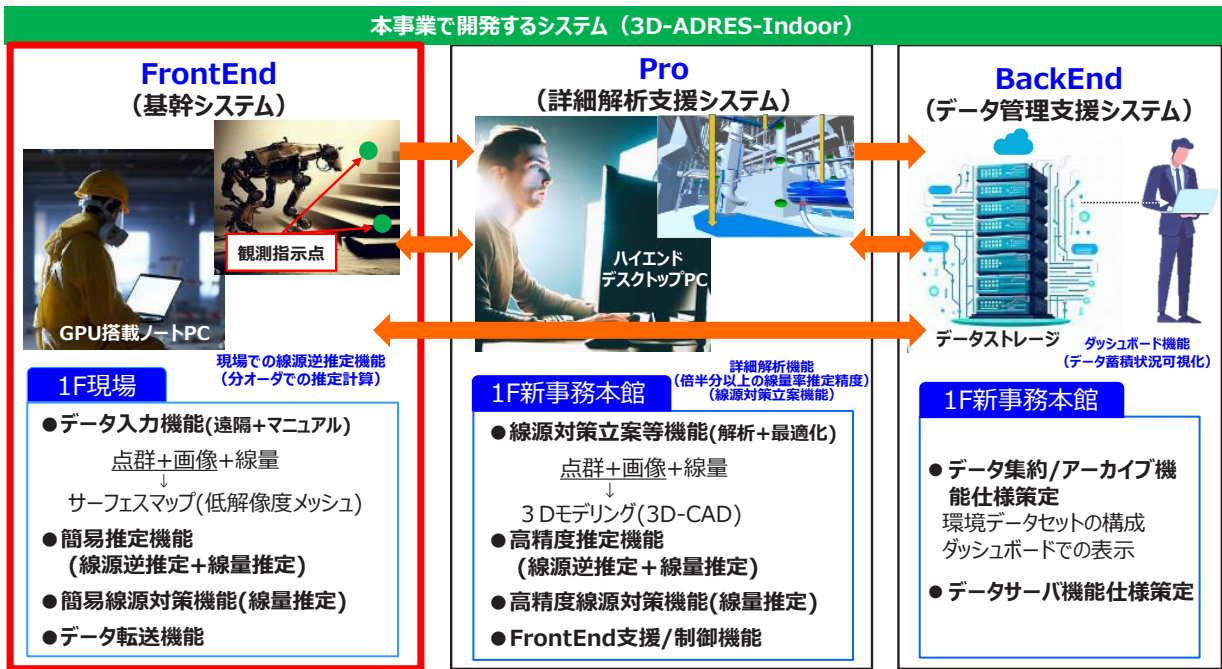


図2 aチームが開発する3つの連携システムの構成(3D-ADRES-Indoor FrontEnd/Pro/BackEnd)

事業にて実際の1F現場での活用が可能となるレベル(TRL6)まで引き上げることを目標に研究開発を進めている(図1参照)。

R5開始の現事業では、実際の1F現場での適用性の向上を主目標として設定した他、先端的デジタルツールも併せて研究開発し、今後の長い廃炉過程に向け、更に有用となる先端的技術の開拓も併せて進めている(図1参照)。

上記の主目標達成に向け、これまでに一つのシステムとしてきた3D-ADRES-Indoor(プロトタイプ)を1Fの状況にあわせ、3つの連携システムとして開発することとした(図2参照)。その理由は、未だ放射線量の高い過酷な現場があり、その現場にて必要となるシステムを早急に開発するニーズがあるからである。現場測定(線量が高いことから遠隔操作が主となり、ロボットを活用とした測定が主となる)では、放射線環境に対する有効な測定を現場にて指示するツールが必要であり、本事業では、この目的を達成するため、FrontEndシステムを開発することとした。一方、現場での観測結果から更に詳細に線源分布や線量率分布を高精度に推定し、最適な線源対策を施すためのProシステムの他、FrontEndにより取得した点群及び線量率データの他、FrontEnd/Proにより解析した推定線源分布等を保管・管理するシステムとして、BackEndも開発し、それらを一つのシステムとして連携させる計画とした(図2参照)。なお、現事業では、当該事業の主目的である放射線環境の明確化に向け、最適な測定点指示が現場で可能なFrontEndシステムが最も重要と考えており、これを基幹システムとして、特に力を入れて開発することとしている。

上記FrontEndの目的を達成するには、現場の測定と共に、現場で高速に線源分布の逆推定を可能とし、その分布情報の位置や強度の絞り込みを行うため、最適な測定を指示す

る仕様を盛り込んだシステムとして開発を実施している。なお、当該システムは、ほぼ未知な環境にも対応するため、構造物の3Dプロファイルを取得するため、点群を測定するレーザースキャンと線量計測を同地点(異なる地点での計測もある)で実施し、取得した点群と線量率データを用いて即座に線源逆推定と再観測指示を行うシステムを設計要件とした。これにより、未知の建屋内においても、点群と線量率を同時に測定することで、構造物の情報と線源分布及び線量率分布の概略を測定現場で明らかにし、それらの情報から追加の再観測指示を行い、放射線環境の推定精度を向上させることがFrontEndの主機能である。

上記の現場測定支援用システムFrontEndでは、現場活用に向け、高速に逆推定を行うための仕組みとして、3Dメッシュモデルを点群から構成する高速メッシュ作成ツールを導入した。これは、短時間での逆推定そして再観測指示を行う要請に応えるために必須だが、再観測等を行った後は、現場をほぼ正確に捉えた3Dモデルを再構成することで、線源位置の更なる明確化が可能になると考えられる。これを実現するのがProである。また、Proでは、精度の高い逆推定の他、線源対策を仮想空間で実施し、被ばく低減に向けた線源対策の立案を支援する機能を持たせることとした。

以上、FrontEndは、現場に持ち込めるノートPC上での高速動作が想定される一方、Proは1F事務本館等で、ハイエンドなデスクトップPCで詳細3Dモデルを用い、逆推定計算や線源対策計算を、時間をあまり気にせず実施するシステムとする。また、Proでは、整備された詳細3D-CADモデルにも対応することで、様々な線源対策(除染、遮蔽、撤去、移動)を仮想空間上で実施し、線源対策の最適化を支援する機能も持たせ、線源対策戦略の策定に寄与することも目的とした。な

お、上記の最適化においても、機械学習技術を適用する [10]。Proの機能は他で紹介し、本稿では、FrontEndに焦点を当てる。

以上、FrontEndとProの開発を併せて進めることとしたが、これらのシステムが順調に機能し、様々なデータが集積可能となった際、重要となるシステムとして、データベースシステムBackEndも開発することとしている。現在、点群を始めとする3D構造情報を便利に保管管理するクラウドサービス [11] が提供されており、それらの利用も有効である一方、測定及び解析結果をより適切に管理するため、上記のFrontEndやProと連携する独自のBackEndも併せて開発することとした。BackEndは、今後の廃炉進展と共に、その役割は益々、重要なものになると考えられるが、その話題についても、他で紹介する。

次章（第2章）以降の本稿の構成を示す。2章では、FrontEndシステムの全容、即ち、その利用目的と開発するシステム機能を記す。3章では、FrontEndシステムの魅力の一つである、ファストデジタルツイン機能と呼ぶべき高速な機能について紹介する。4章は、FrontEndの検証試験について記す。検証試験は、R5年度の12月に5号機を用いて実施しており、その試験の内容と結果について報告する。5章は、その後に行われる実際の1F現場での試験検証の計画及び今後の将来展開の概略を記す。6章は、本稿のまとめとする。

2. FrontEnd システムの全容（利用目的とシステム構成）

本章（第2章）では、当該事業で開発する3D-ADRES-Indoorの基幹システムであるFrontEndの全容を紹介する。FrontEndの主要機能は、現場での計測動作の流れの中で説明する必要がある（図3参照）。その詳細説明の前に、先ずFrontEndを一言で表す。

FrontEndシステムとは、高速な線源逆推定及び再観測指示システムと位置づけられる。即ち、現場で取得した情報（点群、線量率）より、高速に線源位置と強度を逆推定し、その線源情報の高精度化を目的として、迅速に再観測点を指示するシステムである。これは、遠隔にて取得した初期観測情報より、おおよそその線源位置と強度を現場で推定するが、得られた重要な高強度線源位置とその強度を精確に把握するには情報不足であり、線源推定位置付近の適当な地点で再観測指示を行う。従って、高速動作がシステムに対する重要要件であり、その目的を達するため、内部で作成する3Dモデルの空間解像度を低減する一方、可能な限り現場の状況を反映するメッシュモデルの作成を行う他、逆推定計算では、その決定が必須となるLASSOのハイパーパラメータに対し、交差検証（CV） [12] による当該ハイパーパラメータの決定プロセスを可能な限り簡略化し計算を高速化する [13]。更に、再観測指示機能では、LASSOによる逆推定の精度を保証するためのCandes-Tao条件式の考慮 [1,2] や、構造物表面から死角となる測定を可能な限り避ける観測点の指示を行う詳細機能（前期事業の開発事項）を省き、逆推定した各線源の位置や強度の高精度化を図る機能のみとした。上記に加えて、現場での測定条件（例：測定高さや構造物への接近距離等は、用いる遠隔利用機材から限定される）を入力可能とし、現場にあわせて臨機応変に再観測点を指示するシステムとした。以上の工夫により、現場において最も重要な迅速性の要請に応えるシステムとした。

以下では、実際のFrontEndのPC画面での動作状況をもとに、当該システムについて更に詳しく紹介する。FrontEndは、Pythonで開発されたWindowsアプリケーションであり、立ち上げとともに、図4のような画面が立ち上がる。左側には、上記FrontEnd機能を実際に動作させるためのボタンが上から

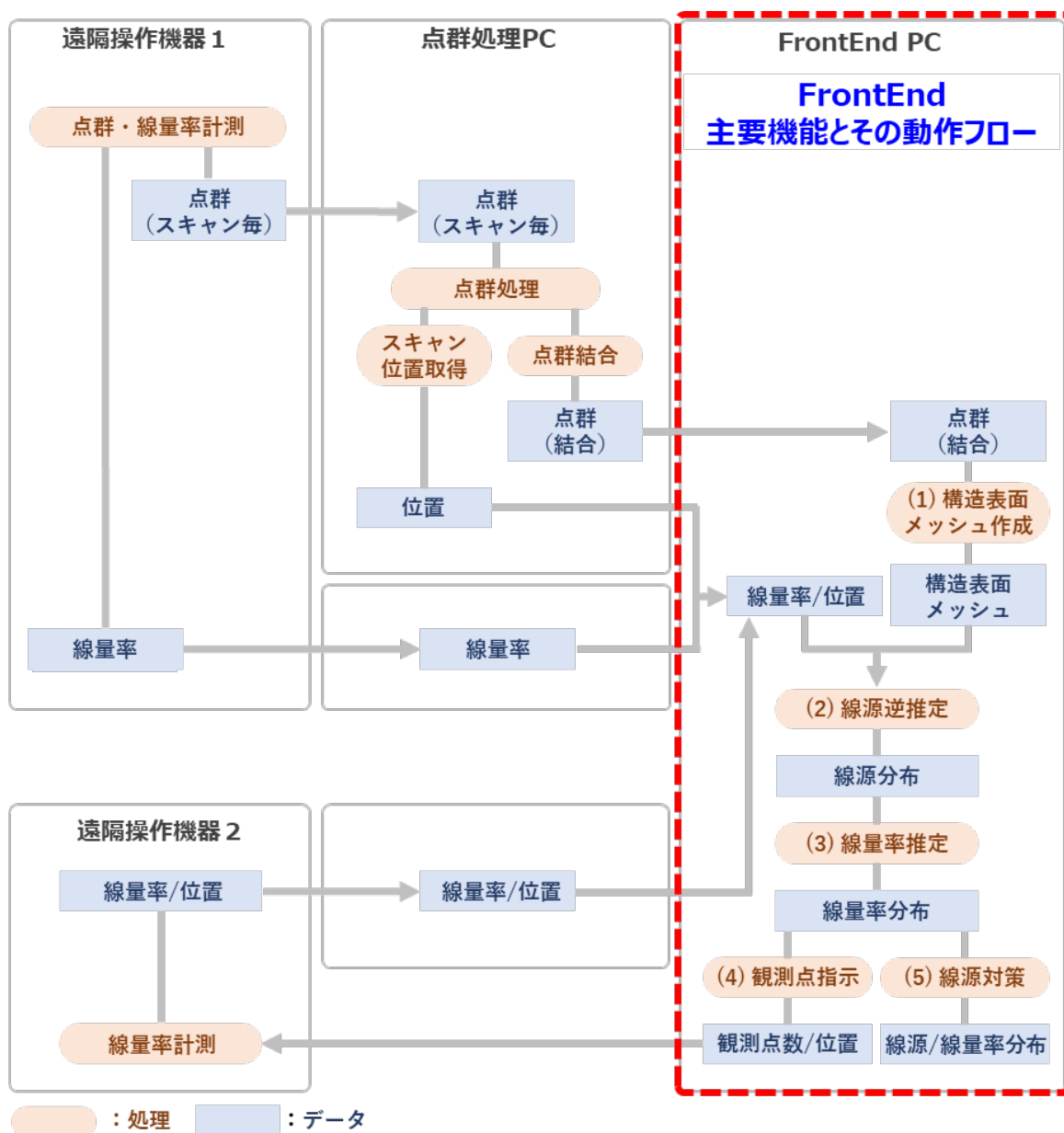


図3 1F現場での環境情報取得の過程（機器と機器ごとに実施する過程）とFrontEndの動作フロー及び主要機能（オレンジは処理を示し、青は機能を表わす）

下に、動作順序にあわせて配置されている。ユーザーにとって、上から順にボタンを押して、各機能を動作させるという直感的なシステムとなっている。なお、各ボタンを押すと、当該機能を効果的に動作させるために、必要となるパラメータ値の設定等のウィンドウが開き、設定項目に従い、適切な入力パラメータを入力することで、FrontEndによる高速動作を現場の状況にあわせて更に最適化する

ことが可能である。FrontEndの基本動作は、上記の通りだが、現場の状況にあわせて、最適な放射線環境情報を測定し、そのデータを保存・蓄積するためのBackEndとの連携機能も現在、開発している。なお、Proでは、これらの情報と測定点群から後に構成される詳細3Dモデル（高解像度のメッシュデータ、或いはCAD及びBIMデータ等）を用いて、高解像度且つ高精度の逆推定計算や線源対策

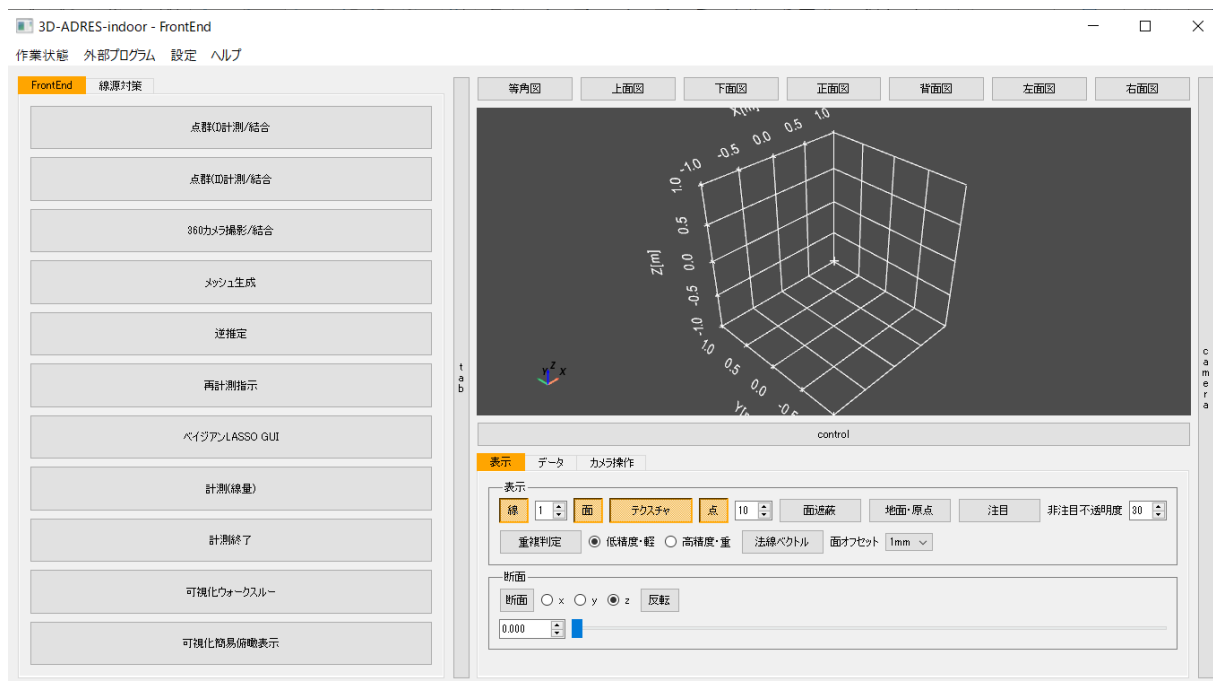


図4 FrontEndの立ち上げ画面（左側：現場での動作フローに従い上からボタンを配置、右上：点群、作成メッシュ及び線源・線量率マップの可視化ウィンドウ、右下：可視化ウィンドウの調節機能）

計算が実施されることが想定される。なお、FrontEndも簡単な線源対策機能を有していることを記す。これは、現場にて線源推定の後、簡単な対策が施される可能性も考え、将来、線源対策機能の自動化等の技術が発展し、現場での線源対策の支援も可能となるよう簡易対策機能も組み込んでいる。

3. FrontEndの高速性能（ファストデジタルツイン技術）

本3章では、2章にて概要を記したFrontEndについて、メッシュ生成機能、逆推定機能、再観測指示の主要機能の詳細を紹介する。まず、メッシュ生成機能の迅速性は、デジタルツイン技術において、最も重要な機能の一つに位置付けられる。通常、現場の点群を取得した後、様々なシミュレーションを実施し、現場環境の改善へ働きかけるためには、点群をもとに現場の3Dモデル（表面形状のみをメッシュ化したモデルからCADモデル及び3次元の内部の情報を持つBIMモ

デル等）を構築する必要があるが、その作成作業に、人手が必要なマニュアル作業が含まれると、モデル構築までに相当のコストと時間がかかる。従って、可能な限りモデル構築作業を簡略化し、マニュアル作業を省略する技術が求められる。特に、現場ですぐにシミュレーションを開始し、結果を得るには、ほぼ完全な自動化が必須で、且つ、モデルがシミュレーションの初期及び境界条件設定と可能な限り合致する必要がある。こうした技術は、ファストデジタルツイン技術と呼ばれ、その価値は非常に高い[14]。なぜなら、現場で迅速にシミュレーションを実施し、現場にてフィードバックを返すことができれば、リアルタイムでの現場環境の把握やその制御と改善に繋がるからである。なお、本事業でのフィードバックとは、放射線環境の再観測指示であり、現場で即座に、より良い観測情報を取得するための技術である。この事業が成功した後は、現場での適切な除染や遮蔽の指示の他、実際に除染や遮蔽等を遠隔で自動的

に実施すること等が将来の技術発展形として考えられよう。

以下では、上記のメッシュ生成機能を紹介する。本開発は、アイプランツ・システムズが担当し、メッシュ生成機能とメッシュ削減機能を統合したツールをFrontEndに組み込んだ。点群データからメッシュへの生成には、(a) Ball Pivoting Algorithm (BPR) [15] と (b) Poisson Surface Reconstruction (PSR) [16] を使用している。BPRは境界面でボールを転がしながらメッシュを生成し、逐次的なメッシュ生成に向いており、メッシュ生成時間も速い。一方、PSRは点群データから高次のPoisson曲面を近似して、その曲面か

らメッシュを生成するため、穴のない滑らかなメッシュ生成が可能である。なお、どちらの手法においても、メッシュを削減しながら、同時にメッシュの大きさを制御するため、Quadratic Error Metrics (QEM) と呼ばれるポリゴン削減技術を使用している。QEMは元の形状を保ちながら、2頂点の統合とメッシュ消去を逐次的に行うことで指定されたメッシュ数までデータ削減が出来る。さらに生成されたメッシュに対して、点群の色情報を用いて2次元画像（テクスチャ）を作成し、そのテクスチャをメッシュ表面に貼りつけ(マッピング)ている。このテクスチャマッピングと呼ばれるCG技術により、少ないメッ

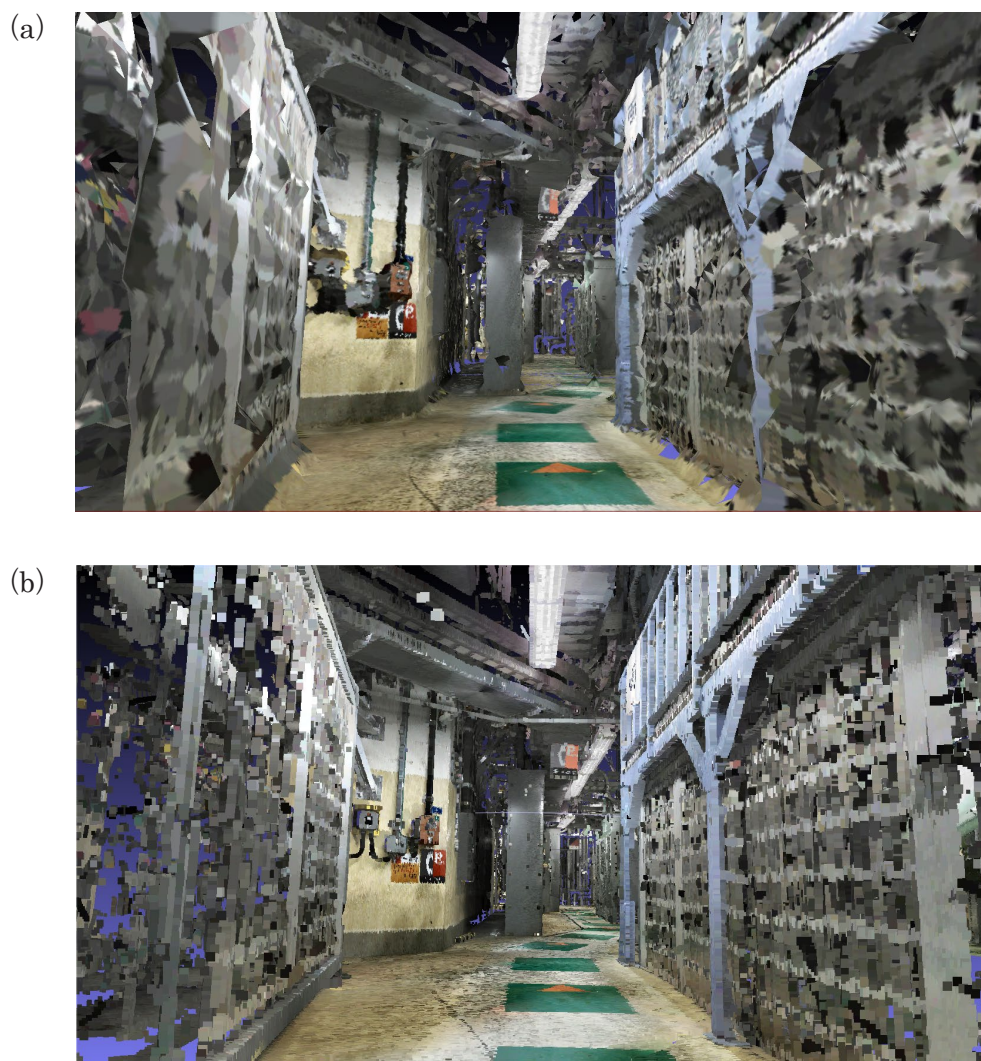


図5 5号機内部において、(a) BPA及び (b) PSRにより作成されたメッシュ生成の結果

シュ数でも現場環境を認識しやすい3Dモデルが作成可能となる。図5は、1F5号機1階エリアを対象とし、2つのメッシュ生成手法((a) BPR、(b) PSR)により作成したメッシュモデルである。両者ともに、メッシュ数は100,000、テクスチャ解像度は4096画素である。図5より、解像度は低いが、このレベルで線源位置と強度が推定可能であれば、十分であることが分かる。なお、生成されたメッシュはSTL、OBJ形式でファイルとして出力される。

次に、逆推定技術(本稿では特に高速化)について記す。逆推定では、原子炉建屋内の構造物表面に対して逆推定を実施するため、LASSOの派生版を前期事業にて開発した[9]。その手法は、オリジナルなLASSOのL1ノルムのハイパーパラメータだけでなく、隣接するメッシュ間の相関も考慮し、複数のメッシュに跨る線源を逆推定可能とするL2ノルムのハイパーパラメータを持つ他、複雑な構造物を再現するために現れる極小メッシュの面積の効果を考慮し、不自然な推定線源が顕在化しないように抑制するL1ノルムのハイパーパラメータの3つがある[9]。これらの3つのパラメータを定めるには、その各々に対し、クロスバリデーション(CV)[12]を適用し、その値を定める必要があるが、その計算コストの低減が必須であることは言うまでもない。この低減のアイデアとして、パラメータを変化した際、上記の派生LASSOの評価関数の変化を理論的に予測し解析式をあてはめることができれば、相当のコスト削減が可能になる。この技術の開発はRISTが担当した。詳細は、文献[13]に譲るが、二つのパラメータに対する解析式を導出し当てはめたことで、FrontEndシステムの逆推定機能の計算性能は格段に向上したことを記す。

上記の高速化のための工夫を取り込み、高速化した派生版LASSO[9]を動作させるこ

とで、迅速に3Dメッシュ上の線源分布が推定可能となる。更に、この線源分布をもとに放射線シミュレーションを行い、3Dの線量率分布を求めることができる。FrontEndでは、逆推定ボタンを押下げることで、この3D線量率分布の推定までを一気に実施可能とした。

次に、現場の放射線源情報を更に高精度化するため、再観測を促す再観測指示機能について記す。再観測指示とは、初期の観測線量を用いて逆推定した結果を更に高精度化するための機能と位置付けられ、現場環境情報の高精度化というデジタルツイン機能の一つである。この再観測のアルゴリズムは以下の通りである。まず、空間内をボックス形状(一辺が50cm程度)で埋め尽くし、そのボックス内の中心点を観測候補点とし、逆推定により得られた線源の中でも、最も強い1番目の線源、2番目に強い線源という順に、線源近くの再観測指示点を指示する。ただし、遠隔にて、ロボットを使用し観測できる範囲は一般に限られていることから、線量計の計測位置として、推定線源より、どれだけの距離、離れている必要があるかを入力可能とした他、測定高さについても、ロボットへ線量計を搭載している関係から、その計測限度(下限～上限高さ)を入力可能とした。また、現場で再観測を行う時間に限りがあることから、前もって、重要な高強度線源情報のみの再観測指示をおこなうため、可能な再観測指示点数を入力パラメータとして入力可能としている。この再観測指示機能の開発は、RISTが主にその開発を進めている。

次に、この再観測指示点での再観測を円滑に進めるため、線量計の自動認識機能を開発した。通常の観測では、ロボットのアームに線量計(RadEye)を取り付け、線量計のデジタル画面をカメラで撮影し、その画像を見て人が線量率を入力してきたが、本開発ではこの人手による作業を自動化するため、カメ



図6 再観測指示機能が動作し、線量率を再観測する際の線量計自動認識画面スナップショット（左図はNARREC試験場での本動作試験の様子、右図は、自動認識画面であり、再右端に線量計の画面情報と数字枠を指定し、線量値を記録する）

ラ撮像画像からの自動認識機能を開発した。図6は、その自動認識機能が動作している画面のスナップショットであり、緑の枠内に線量値が入るよう画面内を操作し、その数字を自動認識する。本開発では、この認識を5回ほど実施し、その平均値を再観測線量率値とする設定とした。これは、現場では観測される線量率値が頻繁に変動するためである。取得した線量数値は、中央の3Dビューで点群やCADデータを参照しながら計測点を指定してセットする他、新たな計測点情報の追加もできる。今後は、この機能を現場での観測状況にあわせて更なる改良を実施していく予定である。この機能の開発は、サイバネットが担当した。

以上、再観測指示機能まで説明してきたが、再観測指示点での観測情報を加えて逆推定を再度実施する。再観測情報は、線源周囲での情報となるため、線源を逆推定するには有効な情報の追加となり、逆推定の精度は格段に向上すると考えられる。次章（第4章）にて、実際の精度向上の一つの例を示す。

4. FrontEndの1F5号機での試験—試験結果とその後の改良—

本4章では、2、3章で記したFrontEndの

各機能を検証した結果を記す。検証は、実際に1Fにて行われたが、最初の検証段階であることから、5号機を対象とした。5号機は、事故が発生した1～4号機とは異なり、放射性物質の漏洩はなく、線源となる地点は限定され、且つ放射線量は極めて低い。但し、その構造の類似性や構造物の大きさ等は同等であり、1F1～4号機のモックアップ試験として非常に有効と考えられる。本事業では、当該試験を事業開始年度（R5）の12月に実施し、その結果の概要を下記にて報告する他、試験結果に基づくFrontEndの改良項目についても記す。なお、当該試験は、その適用性を検証する最初の試験であったため、様々な課題が露呈し、改良すべき点が明らかとなった。従って、5号機モックアップ試験は、1Fの実際の現場で発生する課題解決に向けた準備として、貴重な機会となったことを記す。まず、5号機での試験対象エリアを図7に記す。図7は5号機1階エリアの躯体及び構造物を簡略化した模式図であるが、本試験対象エリアは、図7の赤枠にて示す1階全体の1/4程の南東エリアとした。当該エリアに対し、図8に示す4足歩行ロボット（Boston Dynamics社製SPOT）を採用し、点群計測装置としてFARO社製Focus Premiumを搭

<5号機モックアップ試験計測エリア>

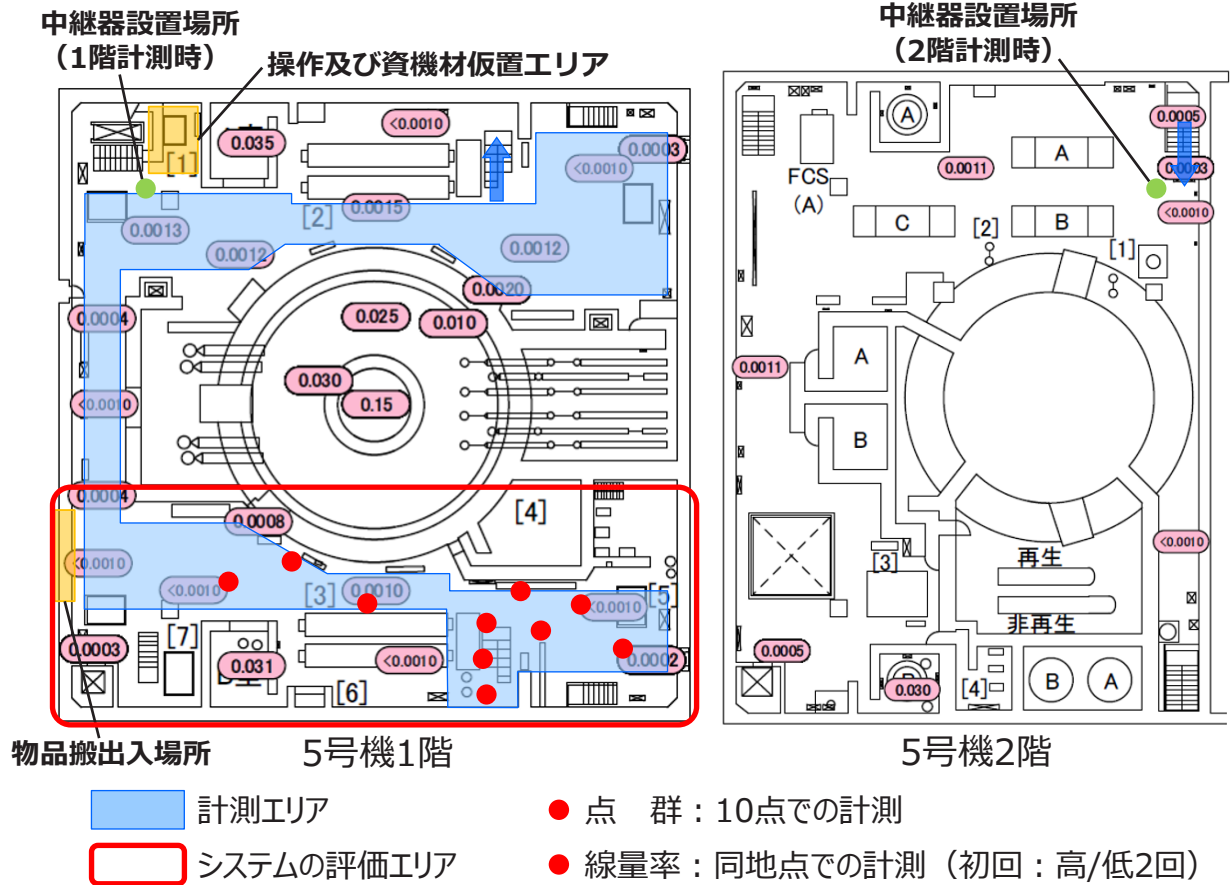


図7 モックアップ試験対象エリア (5号機1階南東エリア: 赤枠内、赤点: 点群及び線量率の初期観測点)

<計測機器構成図>



図8 測定で用いた機材一覧

載した他、ロボットアームに線量計（Thermo Scientific社製RadEye）を搭載したSPOTも用意し、点群と線量率を同地点で測定した（測定地点位置は図7で示す赤点である）。測定ポイント数は、当エリア内10点とし、SPOTの体高から線量率の計測高さは、0.5mと0.8mの二つとし、計20点の線量率データが計測された。これらのデータが測定された後、メッシュの作成と線源の逆推定及び再観測指示の試験が行われた。以下では、その結果と課題について記す。

まず、点群を基に作成したメッシュについて示す。試験初日、JAEAチーム（筆者4名）は、逆推定から再観測指示までのFrontEndの重要機能の試験を試みたが、試験が一切できないという状態となった。その原因は、メッシュ作成の失敗であり、すべての出発点となる3Dモデル（表面メッシュモデル）の構築が重要であるとあらためて認識する機会となった。当日、分かった点は、点群のノイズを消去しないと、生成に失敗する（構造物が実際存在しない点も含めてメッシュ作成することと、更に点群数のダウンサンプリン

グの重要性の体得であった。現場で全ての作業を実施できる時間は限られており、十分な速度（5分程度）でメッシュ生成を行うためには、適切な点群数の限度がある（数千万点に絞る必要がある）。以上の経験を踏まえると、FrontEndでは、5万メッシュ数の場合、凡そ5分程度の時間内で、3Dメッシュモデルを構築し、次の逆推定計算に移れることが分かった。なお、本例のように、極めて迅速にモデルを構築し、放射線のシミュレーションを可能とする例は筆者の知る限り、他の業界も含めても世界でも初めてではないかと考えている。点群数を低減し空間解像度を落としつつも、現場の構造を凡そ捉え、線源位置と強度をその場で推定する技術の確立の他、様々なシミュレーションが、上記の作成3Dモデルで更に実現可能となれば、正にファストデジタルツイン技術の構築という成果に位置づけられる。ファストデジタルツインの例としては、文献[14]にて、その技術の有用性が報告されているが、それでも、半日ほどの時間での3Dモデルの作成技術であり、その速さは革新的と評価されている[14]。但



図9 作成した3Dモデル（全体：5万面数のモデル）

し、そこでの対象は、放射線環境ではなく、人が立ち入り、様々な作業が可能な環境であることを付記する。本件で対象とする1F屋内環境の厳しい状況は、そのモデル作成の速さを更に加速させたと言えよう。なお、1F現場では、上記のように限られた時間の中での作業となることから、モデル作成に当たり、作成終了までの経過をステータスバー等で示

し、動作中（終了までの経過時点も）であることを明示することが必須であることも分かった（これは、全ての機能の動作においても同様であり、システム開発側の盲点であったことを記す）。

FrontEndで実際に作成したメッシュモデル（5万面）を示す。図9は、正に試験当日作成した3Dモデルそのものであり、数回の

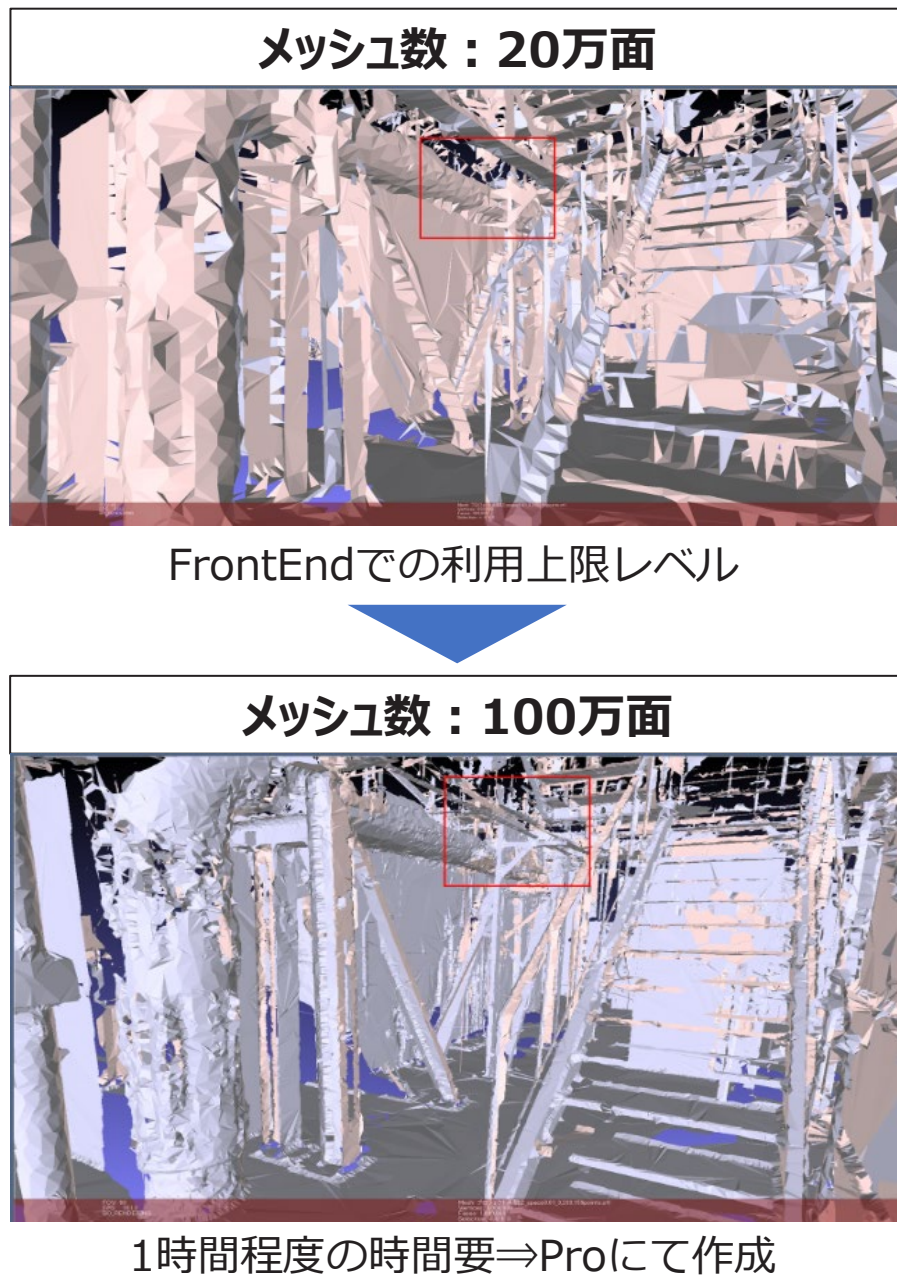


図10 作成した3Dモデル（配管及び階段を含む線源領域をフォーカスしてある：線源のある構造物については、図12参照）(a)（全体：20万面数モデル）(b)（全体：100万面数モデル）

失敗の後、メッシュ数を可能な限り低減して得たモデルを斜め上方から見た図である（BPAを用いて作成）。図を見て分かるように、現場の構造物を詳しく理解するには粗いメッシュであることが分かる。その後、メッシュ生成手法の性能を向上させ、作成したメッシュモデル（20万面）を図10（a）に示す。なお、FrontEndでは、メッシュ生成時間に許される限界の時間（20分程度）を超えてしまうが、構造物の詳細を再現可能とするメッシュ数（百万面）で作成したモデルを図10（b）に示す。図10（a）は、凡その構造物を認識可能とする解像度だが、図10（b）は、殆どの構造物の状況を十分に把握可能とするレベルであることが分かる。

次に、FrontEndの心臓部に当たる逆推定についての試験結果を記す。当該試験では、図9に示した低解像度のメッシュモデルで逆推定を行った。その結果、図11に示すように線源は凡そ一か所に集中している結果（赤線で囲んだ場所）が得られたが、これは後に妥当な推定であることが分かった。現実には、図12に示すCS配管と呼ばれる一部に

線源が集中していることが、これまでの観測情報から知られていた。最初の逆推定では、図13（a）に示すように、そのCS配管周囲に線源があることが推定されたが、どの部位にある等の解像度は十分でない（赤枠の位置が図12で示す線源位置に相当）。従って、FrontEndの重要な機能である再観測指示機能の動作が必須であることが分かる。実際、当該機能を利用すると、上記（図12）の線源付近での指示点が複数提示されていることが分かる（図13（b）参照）。しかし、実際の試験では、現場での計測が明らかに不可能な点も指示していることが分かった。これは、点群密度の関係で、メッシュにボイドが出来てしまい、不適切な場所を指示した他、床にもボイドが生成され、床下を指示する場合もあった。しかし、これらは明らかに測定不可能であることから、現場の判断で測定しないこととし、妥当な範囲の指示点でのみ測定を行い、それ等も含めて逆推定した結果を図13（b）に示す。この結果から、凡そ線源が確からしい位置に絞り込まれた様子が分かる（図13（b）の赤枠位置）。以上より、筆者ら

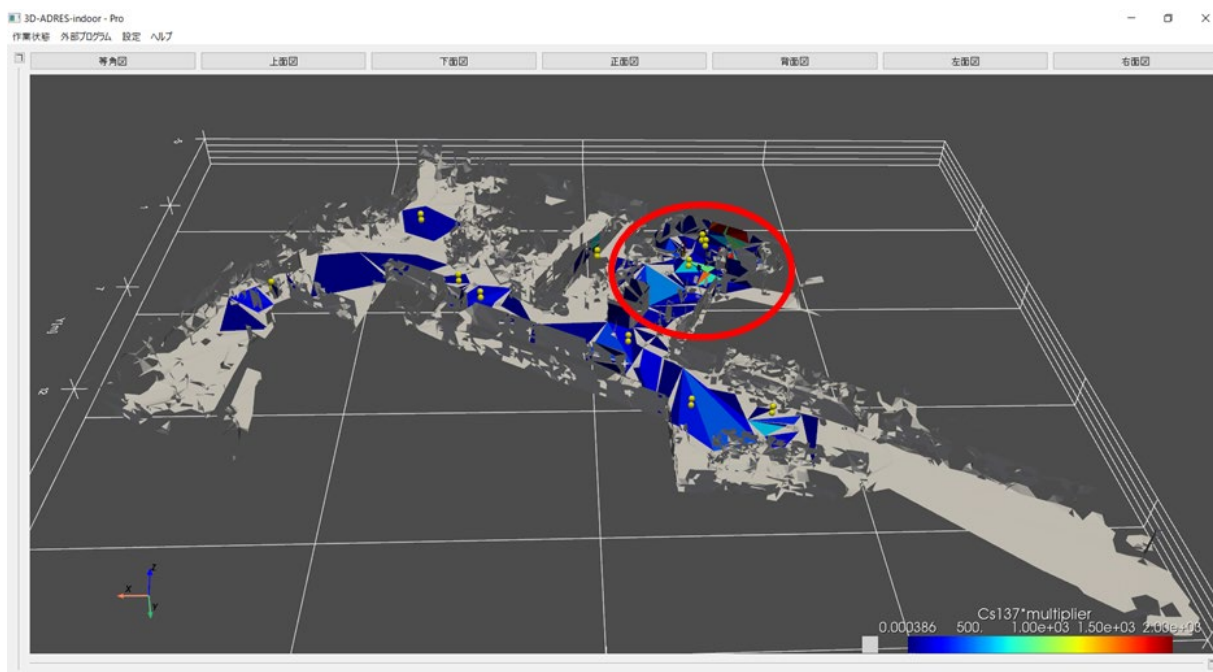


図11 5万面モデルを用いて逆推定した際の高強度線源位置（赤丸枠内）

は、FrontEndの機能の心臓部に当たる逆推定と再観測指示が期待通りの成果を示したと評価した（但し、それ以外の部分にも線源があると指示していることに注意）。5号機という正常な原子炉建屋内において、線源強度は低いが、点群を取得し、対象エリア（1階の凡そ1/3程度）で空間水平方向において10点（高さを1m、1m50と変えて2点を取るため全体として20点）の線量率情報から、線源位置の凡その位置の逆推定に成功し、再観測指示により、線源位置を絞り込めたことは、期待以上の成果であったと見ている。また、本試験では、すべてのシステム側のプロセス（逆推定から再観測指示）を凡そ10分程度の時間で実施できたことを付記する。

次に、再観測指示点も含めて逆推定した結果から順推定（即ち、逆推定線源を基に放射線のシミュレーションを行い線量率の3D分布を得る）を行い、格子状に別途、評価用に測定した線量率分布との比較を行った結果を図14に示す。左図は、床からの高さ2m（最も線量率の高い地点が観測）で格子点状に測

定した線量率分布である。実際の測定点は、格子の中心点である（最大線量率は $41.10 \mu\text{Sv/h}$ ）。一方、右図は順推定により得られた線量率分布である。当然、計算の方が、解像度は高く、線量率の最大ピーク値は $\sim 70 \mu\text{Sv/h}$ 程度となるため、カラーレンジの違いがあるが、測定結果と順推定結果が凡そ一致していること（殆どの点での線量率値が倍半分の精度にある）が確かめられた。なお、この結果は、Proを用いて解像度の高いメッシュモデル（100万面）を作成し、逆推定にも時間をかけた結果であることを注意する。なお、利用した観測線量率の情報は、先に記した通り（初期観測線量率値に加えて再観測指示点での線量率）であり、何ら補助的な測定結果を加えていない。

以上より、筆者らは、5号機のモックアップ試験でのFrontEndの評価試験は十分に成功であったと評価している。これは、主目的である再観測指示による線源位置や強度の絞り込み機構が動作し、実際に線源位置を詳細計測により分かっている位置に絞り込めたか

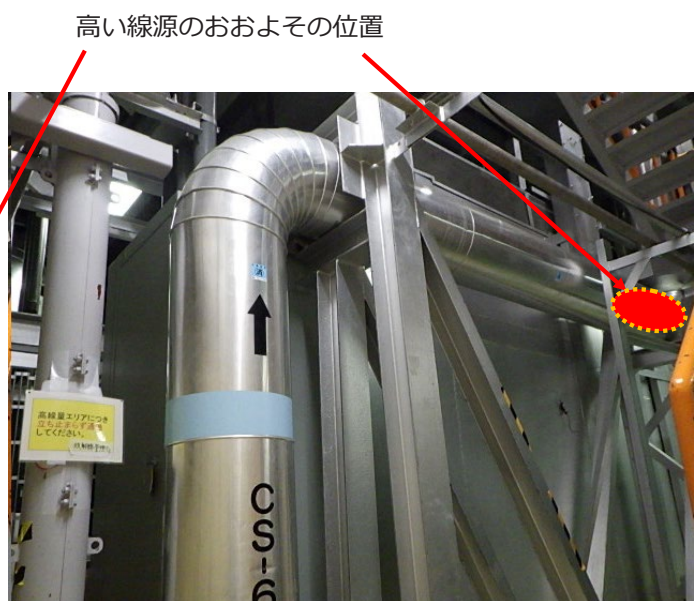
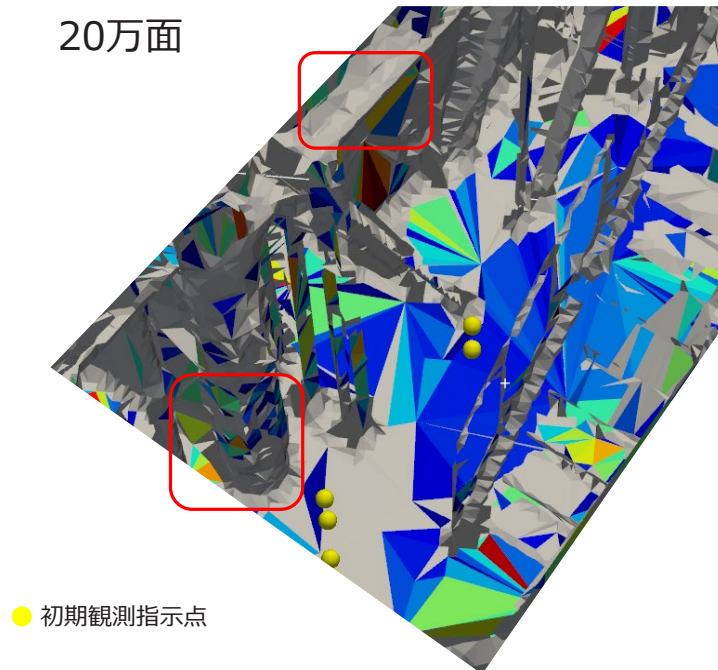


図12 既知の線源位置（CS配管において線源と見られる位置）

(a) 再観測前 → 線源位置を幅広く推定



(b) 再観測後 (再観測データを用いて逆推定) → 線源位置の絞り込みが可能と確認

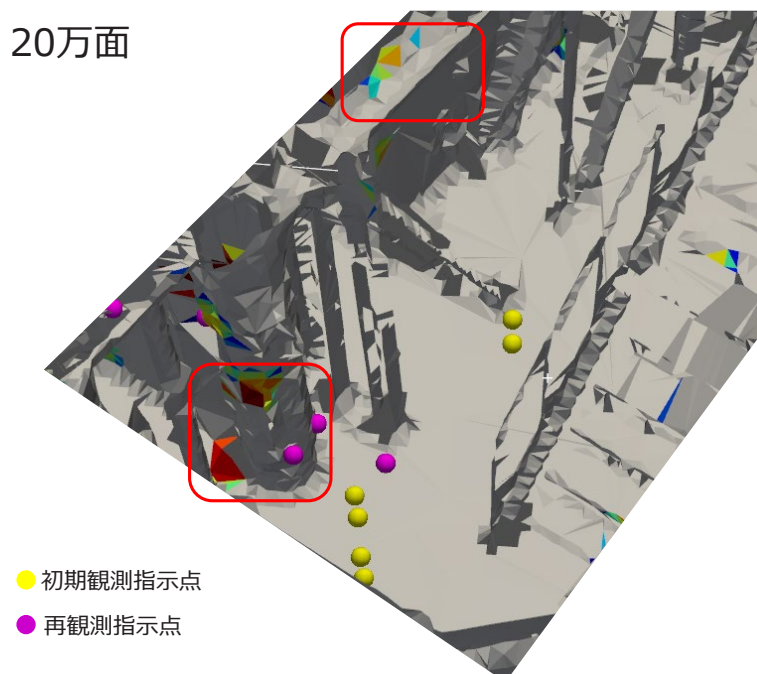


図13 逆推定線源分布 (a) 初期線量率観測結果のみからの逆推定結果 (b) 再観測線量率観測結果も含めた逆推定結果。なお、初期観測点は、黄色の点であり、再観測指示点は、紫色の点で示してある。また、線源強度は赤 (強) - 青 (弱) で表されている。

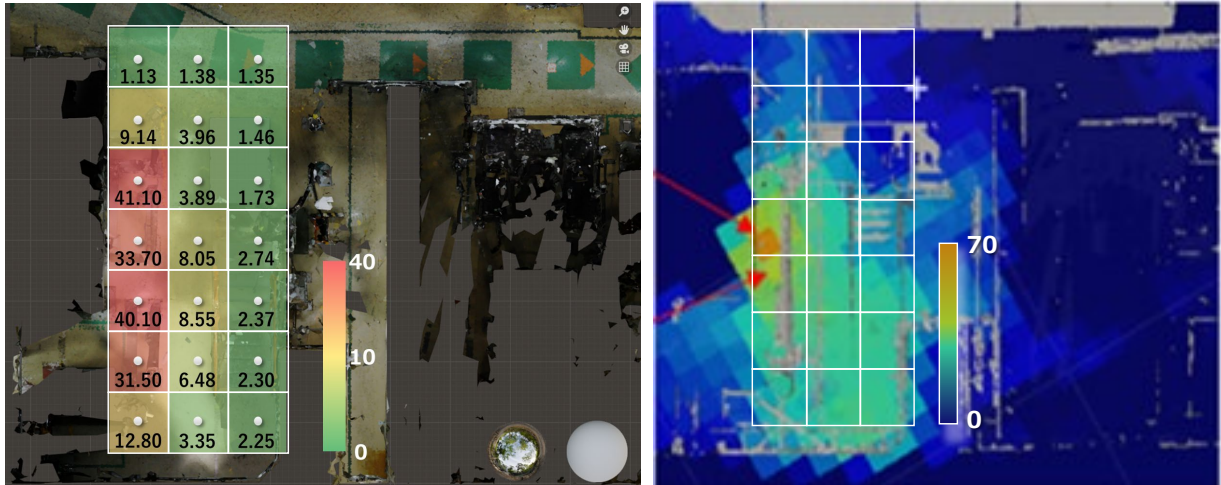


図14 左図 格子状に測定した線量率値分布（格子の中心点にて線量率値を測定）
右図 順推定した線量率値分布

らである他、別途、格子状に測定された線量率値の分布も凡そ再現することに成功したからである。5号機での線源強度は1～3号機と比べると非常に低く、線源の同定は困難と思われたが、凡その正解にたどり着けた成果を受け、次は実際の1～3号機での試験が待たれる。

5. 今後のFrontEnd 検証及び3D-ADRES-Indoorの研究開発計画

4章にて記したように、今期事業での最初の目標であった5号機モックアップでの検証を終え、システムの心臓部分の機能と動作について評価を終えた。今後は、そこで発生した課題解決を図り、いよいよ、当初の計画に従えば、2号機と3号機での検証が始まる予定である。2号機については、R6年6月後半からはじまり、8月初めに終了する予定である。従って、本稿が出版される時期には、2号機での試験も終わり、課題の整理とその解決に向けた取り組みに向かっている時期と考えられる。なお、予定では、2号機試験を終えた後、10月より、3号機での試験も行う予定である。2号機と3号機では、状況が異なり、2号機では、より広範囲に線源が拡散し分布していると考えられる一方、3号

機では、線源が局在することが指摘されている。これらの違いは、逆推定の際のハイパーパラメータの決定の際に影響を与えられ、様々な状況においても適用性の高いシステムを構築するという目標に合致した計画と考えている。具体的には、2号機では、LASSOの本質的考え方とは異なる拡がった線源分布解の探索になると考えられるが、筆者らのシステムは、そのような拡がりを考慮できる評価関数[9]を導入しており、対応可能と考えている。また、再観測に当たって、拡がりを持つ線源に対する最適な指示についても情報収集が可能と考えられる。一方、3号機では、線源位置の同定とその強度に対する精度が求められると考えている。特に、複雑な構造物中における線源位置の同定と線源強度の分布が課題となるだろう。この目的を果たすには、モデルのメッシュ数を上げ、Proを用いた解析が線源位置の同定のため必要になると考えられるが、そのためにはFrontEndを用いて線源近傍において、いかに有効な線量率観測値を得るかが重要となる。以上、2、3号機にて実施される試験は本事業の正念場であり、機能の確認はもとより、今後の改善点を洗い出し、その課題解決を目指し研究開発を更に加速させていく機会

としたい。

6. まとめ

本事業の目標は、廃炉現場で作業員の被ばく低減を図るという最も重要な課題の解決に当たることだが、その目標を達成するためには、最新のデジタル技術を活用し、最適な解決策を提示する必要がある。その解決策の一つとして、1F内の構造物を3Dモデル化し、数少ない線量率値の観測結果から、線源を可能な限り精度良く見出し、その線源分布をもとに放射線のシミュレーションを行い、線量率値の3D分布を明らかにすることが真っ先に挙げられる。もし、線量率値の3D分布が分かれば、作業空間内でどれ程の被ばく量が想定されるか、事前に推定可能となる他、事前にその3D分布を知ることができれば、作業員は、その分布から高い線量率値を示す区域を避けることが可能となる。また、デジタルツール内で線源対策が可能となれば、作業空間内で、最大線量率値を一定の線量率値に下げための線源対策が指示可能となる等、極めて便利になる（そのような機能を現在、実装中である）。

以上の課題については、前期事業において技術上の解決を見たが、実際の1F現場での適用については、本事業での開発及び改良が鍵となる。前事業も含め、事業の根幹となるアイデアは、観測情報量が限定され、数学的に ill-posed problem であっても、線源分布が比較的スパースであるとすれば、LASSO を用いることで精度良く逆推定が可能となること [1,2] から出発しており、その数学的枠組みを利用するため、放射線のシミュレーションを利用し、逆推定計算を可能にするというものであった。

一般に、上記のような一つのアイデアを実用化し、市場に届け、競争力を確保しビジネスとして成立させるには、三つの大きな障壁があると言われている [17]。一つ目と二つ

目は魔の川及び死の谷と呼ばれ、多くのアイデアが実用には向かず、川に流され、そして、谷を越えることなく終わる。次はダーウィンの海と呼ばれ、実用化できたとしても、市場が真に必要とし、多くのユーザーの使用に耐えうるものでなければ、自然淘汰され消滅していく。

筆者らは、まず、研究開発上のアイデアを実現する枠組み（3D-ADRES-Indoorのプロトタイプ）の開発には成功し、前期事業にて、JAEA内の廃炉対象のJMTR等で適用可能性を確かめ、十分に使えると評価したことで、死の谷は、超えられたと考えている。その一方、ダーウィンの海については、正にこれからが正念場であり、実際に1Fに適用し、その真価が問われると考えている。幸運なことに、進化の過程で必ず現れる競争相手は少ないが、淘汰圧は正に1F現場で使えるかどうかであると言える。筆者らは、5号機というモックアップ試験にて、この淘汰圧に対し、当初の目標を達成し、その利用価値を確かめることが出来たと考えている。但し、5号機での試験では、様々な課題が浮かび上がってきたのも事実である。つまり、淘汰圧は具体化され、生存するための進化の方向性は定まったと言える。後は、実際に進化できるかどうかにかかっている。

その方向性として重要な点としては、メッシュの生成に関する課題とそれに関する解決、逆推定でのハイパーパラメータの設定の課題とその解決、そして、再観測指示に当たり、実際の現場での観測に向け、様々な制限の下、柔軟に対応可能とする機能の実装が鍵になると考えている。また、上記の課題に加えて、ソフトウェアとして使いやすいものであるかという根本的課題もあり、これらを解決して、利用価値を向上させるかが今後の開発の鍵と言える。

最後に、本稿を終えるにあたり指摘したい点がある。現在、逆推定の部分（心臓部分）

に最もスポットが当たっているが、当該システムの価値は、逆推定だけではなく、その後の順推定によって屋内の隅々まで3Dの線量率分布が取得され、その分布より、線源対策を仮想空間内で実施できる点が、今後は重要になると考えている。その際、最適な対策を提案可能なことが重要な要件になると考えている。逆推定は、現場を仮想空間上に再現するデジタルツイン技術として必須だが、実際に私たちが実施したいのは、そのデジタルツイン上で様々な対策やシミュレーションを行うことで、現場環境を適切に変えることにある。筆者らは、その点についても、残りの期間にて研究開発を進め、将来、十分な市場価値を有するシステムにしたいと考えている。

謝辞

本事業を実施するに当たり、本事業の共同実施者である東電とは、定期的にミーティングを行い、情報交換を進めてきた。東電の松浦グループマネージャー、一場氏との議論に感謝する。本事業では、適宜、有識者との会合を持ち、ご意見をいただきながら進めている。今期プロジェクト有識者である東京大学国際高等研究所東京カレッジ浅間一特任教授、東京都市大学河原林順教授、東京大学鈴木俊一上席研究員及び東双みらいテクノロジー(株)石川真澄社長からの適切なご意見に感謝する。更に、今期プロジェクトでは、大阪成蹊大学・小山田教授、福島高専・鈴木教授、川妻教授、(株)TPT、(株)富士テクニカルリサーチ、(株)アドバンスソフト、(株)東京ニュークリアサービス、(株)東北エンタープライズの方々のご協力にも感謝する。最後に、前期プロジェクトのテーマ b. の川端邦明リーダー、c. の伊藤倫太郎リーダー他のメンバー一同のご協力にも感謝する。本事業メンバーである、小泉健治次長、秋山陽一副主幹他のメンバーの協力にも感謝する。

参考文献

- [1] Shi W, et al., “Inverse estimation scheme of radioactive source distributions inside building rooms based on monitoring air dose rates using LASSO: Theory and demonstration”, Progress in Nuclear Energy, 2023,162:104792.
- [2] Shi W, et al., “LASSO reconstruction scheme for radioactive source distributions inside reactor building rooms with spectral information and multi-radionuclide contaminated situations”, Annals of Nuclear Energy, 2023, 184:109686.
- [3] Shi W, et al., “LASSO reconstruction scheme to predict radioactive source distributions inside reactor building rooms; Theory & demonstration”, Proceedings of Waste Management Symposia 2023 (WM2023) (Internet),
- [4] Machida M, et al., “LASSO reconstruction scheme to predict radioactive source distributions inside reactor building rooms; Practical applications”, Proceedings of Waste Management Symposia 2023 (WM2023) (Internet).
- [5] Aoki Y, et al., “LASSO reconstruction scheme to predict radioactive source distributions inside reactor building rooms; Evaluation activities”, Proceedings of Waste Management Symposia 2023 (WM2023) (Internet).
- [6] Suzuki M, et al., “LASSO reconstruction scheme to predict radioactive source distributions inside reactor building rooms; Outline of R&D project”,

- Proceedings of Waste Management Symposia 2023 (WM2023) (Internet).
- [7] 町田昌彦他、「1F廃炉に向けた放射線源の逆推定及び線源対策に係るデジタル技術の研究開発—3D-ADRES-Indoor：デジタル技術を集約するプラットフォームの開発状況—」RISTニュース No.68 (2022).
- [8] 町田昌彦他、「1F廃炉に向けた放射線源逆推定及び線源対策に係るデジタル技術の研究開発—3D-ADRES-Indoor：デジタル技術を集約するプラットフォームの現状紹介—」RISTニュース No.69 (2023).
- [9] Yamada S, et al., “Effectiveness of fused LASSO for prediction of distribution of radioactive materials in reactor buildings”, Proceedings of Waste Management Symposia 2024 (WM2024)
- [10] Furutachi N, et al., “Development of a PHITS simulation technique and a numerical method to optimize measures against radioactive sources”, JAEA-Conf, to be published.
- [11] K O L C + (<https://kolcx.com/feature/#videochat>)
- [12] 二宮嘉行、「LASSOに対するSURE理論に基づく情報量規準」日本統計学会誌 第53巻、第1号、2023年9月29-47.
- [13] Yoshida T, et al., “Estimation of Hyper Parameters in Applying Pseudo Fused LASSO toward Inverse Estimations of Radiation Source Positions and Magnitudes in Reactor Building Mesh Models” (in Preparation).
- [14] 金丸剛久他、「製造業の3D革命 ～ファストデジタルツインで加速するDX最前線 石油・化学メーカー編」技術評論社 (2024)
- [15] Fausto Bernardini, Joshua Mittleman, Holly Rushmeier, Cláudio Silva, and Gabriel Taubin, “The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Volume 5, Issue 4, Pages 349-359, 1999.
- [16] Fausto Bernardini, Joshua Mittleman, Holly Rushmeier, Cláudio Silva, and Gabriel Taubin, “The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Volume 5, Issue 4, Pages 349-359, 1999.
- [17] 出川通、「技術経営の考え方 MOTと開発ベンチャーの現場から」光文社新書 (2004)