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 -

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

- R&D Status of Digital Platform including 3D-ADRES-Indoor -

日本原子力研究開発機構

町田 昌彦、山田 進、金 敏植、奥村 雅彦、宮村 (中村) 浩子 Alex Malins、志風 義明、佐藤 朋樹、沼田 良明、飛田 康弘 山口 降司、鈴木 政浩、岡本 孝司

東京大学工学研究科 Wei SHI

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、放射線源、逆推定、LASSO、DX技術、可視化、AR技術

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の一つとなっている。この課題の解決に資するため、日本原子力研究開発機構(JAEA)は、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開発)」を受託し、令和3年6月より放射線源の逆推定と推定線源に対する対策を仮想空間にて実施するためのデジタル技術及びその関連技術の研究開発を開始した。本記事では、上記技術のコアとなる概念(逆推定に用いるLASSO: Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)を紹介するとともに、開発技術を集約したプラットフォーム機能を持つソフトウエア:3D-ADRES-Indoorの開発進捗と、その活用の際に重要な役割を果たす放射線量の可視化技術等の研究開発の進捗について報告する。

1. はじめに

2011年に発生した東京電力ホールディングス(株)(以下「東電」という)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

する。図1は、そのような状況の想像図であり、高い放射線量を生み出す線源の存在は、 廃炉作業を進める上での大きな障害となっている。

この状況を打開し廃炉を加速するには、図

1に示したように、放射線源の位置と強度を特定することが重要となる。もし、高強度の放射線源の位置やその強度が判明すれば、作業空間の線量低減に係る除染・遮へい計画の立案が可能となり、廃炉工程において極めて重要な役割を果たせるものと考えられる。

JAEA は上記背景の下、「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」及び「2021年度廃炉研究開発計画」(廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第86回))に基づく廃炉・汚染水対策事業費補助金事業「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開発)」を、岡本孝司をプロジェクトリーダとして受託し、令和3年6月より、放射線源の逆推定と推定線源に対する対策を仮想空間にて実施可能とするデジタル技術の研究開発事業を開始した。

当該事業では、1F廃炉対策を円滑に進行させるため、上記の技術開発を推進するとともに、最先端のデジタル技術の研究開発を行うことで、我が国の科学技術水準の向上を図ることも目的とする他、廃炉実施者である東電の視点(ニーズ)を反映させ、本事業の成果が、東電が行うエンジニアリング事業に活用されることを考慮し推進するものと位置付

けている。

従って、本事業実施主体であるJAEAは、 昨今、産業上の戦略的重要性を有するデジタル技術の研究開発という枠組みの下、特に先端的機械学習技術(本事業ではスパースモデリング:LASSOを適用し線源逆推定を実施する技術開発)を主軸とした研究開発を進める他、その先端的技術を1F廃炉現場にて適用し、東電のニーズを反映するプラットフォーム・ソフトウエアとしての開発を進める一方、当該事業の多面的目的にも配慮し、広範囲な新規技術の研究開発体制を構築し事業に当たっている。以下では、その具体的実施体制の概略を示す。

JAEA は上記事業の目標の下、下記の3 テーマ (a.~c.)を設定し、総合的かつ有機 的に研究開発を進めている (図2参照)。体 制の構築に当たっては、我が国唯一の原子力 の総合研究開発機関としての特徴を活かし、 広範な専門家を集結させた他、JAEA外にも 協力体制を拡げ、先端技術の研究開発を実施 する体制としている。以下、3テーマの概要 を示す。

a. 線源逆推定・線量率推定技術の研究開発 (図2内a.の項目参照):

当該テーマでは、廃炉対象となる現場の環

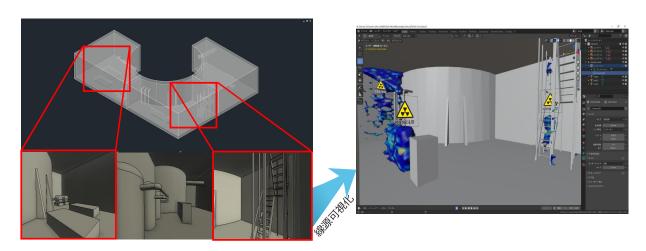


図1 仮想1F原子炉建屋内における構造情報と線源分布(想像イメージ)の可視化

境データ (構造物情報及び線量率観測情報) を基に、主に構造物表面の線源分布を推定す る「線源逆推定エンジン」を開発する。な お、高線量の建屋内では、線量率測定に際し 測定作業者の被ばくを伴うことから、一般に 充分な線量率の測定情報(測定点数)は期待 できない。このような状況での逆推定は、数 学的には不良設定問題となり、解は一意に定 まらず、線源逆推定は困難になることが知ら れており、線量率データが十分に有効活用さ れないという課題がある。この課題に対し、 本テーマでは、線量率の測定情報が不足する 場合でも、逆推定を可能とする機械学習手法 (LASSO: 2.にて説明) の活用を目標とする 他、逆推定精度を可能な限り向上させるため、 最適な観測情報収集に向けた最適観測点を指 示する機能も研究開発する。線源が特定され た後は、線源の除染や、線源構造物の撤去の 他、遮へい等の環境変化をデジタル化し、期 待される線量率分布の変化を推定する「線量 率推定エンジン」の開発も行う。さらに、下 記テーマb.の実環境データ等の計測・収集手 法及びデータ処理・蓄積を行うデータベース との連携を図り、上記エンジンが推定した線 源・線量率分布を可視化する 「インタラクティ ブ可視化エンジン」の開発もあわせて行う。

b. 実環境データのデジタル化基盤技術の研 究開発 (図 2 b.の項目参照):

a.で示した二つのエンジンを統合した「線源逆推定・線量率推定システム」の構築に際し、実環境データ等の計測・収集手法を確立し、データの処理・蓄積を行うデータベース等を整備するため、各機能の要求事項、設計仕様について検討を行う他、「線源逆推定・線量率推定システム」を検証・評価するための試作モデルを構築する。特に、作業空間内の線量率分布や作業空間の構造等のデータから線源逆推定計算の入力となるデータ形式への変換プロセス及び取り扱うデータ(点群、

画像、線量率等)の蓄積・保持及び保持データの利活用を実現するための基盤技術を確立する。さらに、上記の研究開発と並行して、将来、実環境でのデータ計測・収集(測定難易度が高い高所の測定を含む)を効率化するために必要となる計測器や収集装置等の基盤的な技術の研究開発や技術調査を行う。

c. 現場適用のための技術の研究開発(図2 c.の項目参照):

試作する「線源逆推定・線量率推定システ ム」の現場適用を行うため、コールド空間/ ホット空間において検証試験を実施する。試 験に際し、JAEAの有する原子炉施設を活用 し、a.、b.で開発した各エンジン及びデータ ベースに基づく「線源逆推定・線量率推定シ ステム」による推定結果と計測結果を比較・ 照合し、システムとしての有効性を確認する。 また、東電との事前検討を踏まえ、1Fサイ トのあるエリアにおいて、取得データに基づ く検証試験も実施する。さらに、上記システ ムの現場実装及び現場作業計画への適用性を 高めるために、時間的に変化する環境データ の更新速度を向上させる更新機能の高度化に 関する検討及び1Fにおける他システムとの 接続性や拡張性を考慮した現場適用性のある デジタルシステムとするための検討を行う。

以上、各テーマを担当する3つのチーム (チーム a. b. c は各々テーマ a. b. c を担当する:図2参照)を構成し、各チームは各テーマの研究開発に集中する一方、互いの連携を深めつつシステムの高度化や利便性等の向上を考慮したシステムの開発を進める体制としている。

本記事では、上記3テーマの中から、事業の主たるデジタル技術の研究開発を担うテーマa.に焦点を当て、その目的と開発する技術の概念、執筆時における研究開発の進捗につ

いて報告する。以下、2.ではテーマa.が開発 を進めている3つの主要エンジン (線源逆推 定・線量率推定・インタラクティブ可視化の 各エンジン)の概略を紹介し、3.では、線源 逆推定エンジンにおいて採用する機械学習技 術としてLASSOによる線源逆推定の概念と その研究開発の進捗について示し、4.では、 「線源逆推定エンジン」と「線量率推定エン ジン」の両方を包含する本事業のプラット フォーム・ソフトウエアとなる 3D-ADRES-Indoorの概念と開発状況を示し、その実装状 況について、原子炉内での適用例を例示しな がら説明する。5.は、線源逆推定・線量率推 定エンジンが出力する結果を効果的に可視化 するための「インタラクティブ可視化エンジ ン」の技術開発の現状を示す。

2. テーマa.において研究開発を進めている 3つの主要エンジンの概略

当該事業では、数学的限界の精度内で、未 知の線源分布を逆推定する「線源逆推定エ ンジン」をコア技術として開発すると定め、 その主たるアルゴリズムとして、LASSOを 選択した。LASSOとは、数学的にはモデル の正則化に際し、L1ノルムを付加し、本対 象では、スポット化した高強度な線源を推 定する技術である。現実の線源分布が、お およそ一様な低強度の線源分布の中に少数 の高強度線源が存在するという状況であれ ば、LASSOはその高強度線源を高精度に探 索可能とするアルゴリズムに位置づけられ る。以上、「線源逆推定エンジン」とは、こ のLASSOを計算機上で実施するための準備 と実際の逆推定計算を行うエンジンに該当す る。

次に、推定された高強度線源に対して、東

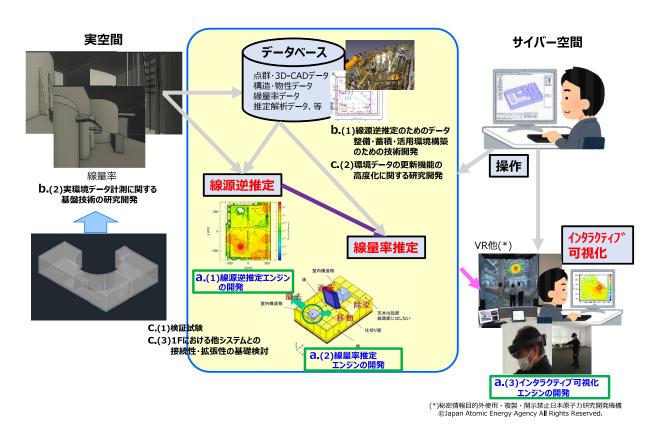


図2 プロジェクトの全体概要(模式図)

電が実施する予定の各対策(線源の除染、線源を含む構造物の移動・撤去、遮へい体等の設置)毎に、線量率の3次元分布の変化を放射線モンテカルロ輸送計算(JAEAを中心に開発中のPHITSコード[1]を主とするが簡易コードもあわせて開発予定)を用いて、高速にその変化分を推定可能とする「線量率推定エンジン」である。

最後に、上記の両エンジンが出力する逆推 定した線源分布や線量率の空間 3 次元分布 を、作業者に向け効果的に可視化する他、各 対策を実施した場合の線量率の空間 3 次元分 布の変化とそれに係る影響をインタラクティ ブに可視化可能とする「インタラクティブ可 視化エンジン」である。

テーマa.では、当該事業の実施期間である 約2年間において、上記の3つのエンジン を研究開発し、3D-ADRES-Indoorと呼ぶプ ラットフォーム・ソフトウエアに統合し、プ ロトタイプとしてのプラットフォームを試作 する。

3. LASSOを活用する線源逆推定エンジン

3.では、当該事業の最もコアとなる技術として選定したLASSOの概念と、その概念を現実に実行するためのツール群を集約する「線源逆推定エンジン」について、その概略を説明する。

先ずLASSOを選択した理由から説明しよう。廃炉対象となる原子炉おいては、様々な線源が存在するが、1Fのように事故により放射性物質の漏洩が起こった建屋内では、高強度な線源が多数存在することが知られている。中でも重要な点は、周囲に大きな影響を及ぼす高強度線源は、スポット化した状態で存在する(ホットスポット)ことである。本事業では、この事実を背景として、LASSOによる逆推定手法を用いて、ホットスポットを精度良く推定するという技術の研究開発を行う。

LASSO選択のもう一つの理由は、1Fのような建屋内では、アクセスが困難な箇所が多々あり、線量率の測定点数が不足するからである。則ち、線量モニタリングが限定されることで、線源分布の推定が困難という状況が一般的となる。この状況を、対象とする建屋内の構造情報の取得後、その構造物表面に線源があると考えた場合、以下の条件となる。

線源が分布する建屋内の構造物表面の 区画面数 >> 線量率測定点数 (1)

この条件では、明らかに線源分布を逆推定 することは情報不足で困難となるが、そのよ うな場合でも妥当な解を得ることが、1Fで は大きな研究開発ニーズとなっている。

以下、上記条件下でのLASSOの適用について、具体的に簡単な屋内での状況を用いて説明しよう。一例として図3(a)のような簡単な部屋を考える。部屋の壁や構造物の表面を図3(a)のように一定の大きさの区画に分け、その区画総数をpとすると、各区画の線源面密度(Bq/m²)を要素とするp次元のベクトルが定義できる。これが、本事業で最も重要となる線源ベクトルXである。こうして、本事業のコア技術である線源の逆推定とは、対象屋内の全ての区画面に線源が存在しうるとし、各区画面の線源面密度(Bq/m²)を逆推定し、妥当な解Xを得ることとなる。

次に、観測点情報を含む観測ベクトルYを定義する。観測は、図 3 (b) の赤点で示されるような点にて行われ、計 q 個の点が観測点とすると、q 次元のベクトルYが得られるが、このベクトルの要素には、各点にて測定される線量率の値が入る。ここで、式(1)で説明したように、線源ベクトルXの次元 p と観測ベクトルYの次元 q との関係は p>> q となる。実際、ここで例とした図 3 (a) の部屋では、p (=150: 天井、壁、床、構

最後に、線源ベクトルXと観測ベクトルY との関係を表わす行列Aを定義する。当該事 業では、この行列を寄与率行列と命名する。 なお、行列Aは以下の式を満たす行列となる。

$$Y = AX \tag{2}$$

ここで、行列Aを構成する要素を考える と、各要素は線源ベクトルXの各要素(各線 源候補面)から各観測点の線量率への寄与率 を表わしていることが分かる。従って、式 (2) より、Aが決まれば、Yを測定により取得し、Xを逆推定すればよいことが分かる。なお、Aの各要素を決めるに当たっては、その性質(各線源面から各観測点への寄与率)から、各線源面に1Bq/m²の単位線源を与え、各観測点での線量率を求めることで、決定できることが分かる。こうして、寄与率行列Aは、各線源面に単位線源を置き、放射線輸送シミュレーションを行い、各観測点での線量率を取得することで作成できる。本事業では、シミュレーションを行うに当たり、JAEAが中心となり開発を進めているモンテカルロコードPHITS[1]を使用することとする。PHITSを使用し寄与率行列Aを求める際、線

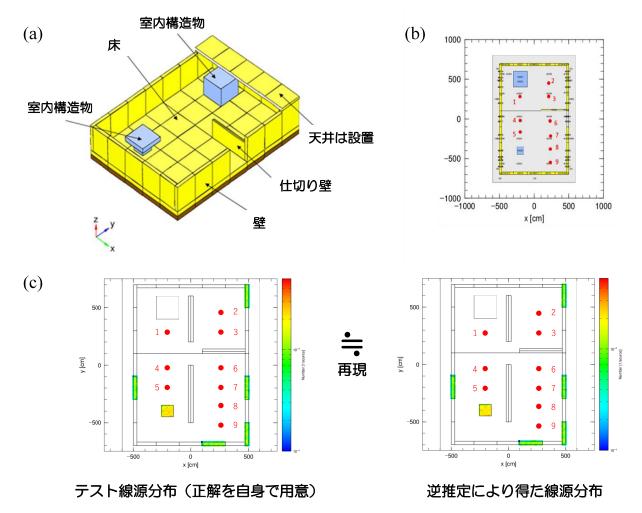


図3 LASSO検証用の(a)室内構造(模式図:天井部を抜いて表示)、(b)観測点位置、(c)テスト 線源と逆推定線源の比較結果

源ベクトルの次元(即ち線源となり得る面数)が増大すると、計算コストもそれに比例し増大するが、各面毎のシミュレーションは全く独立であることから、並列化効率100%の並列計算により、寄与率行列Aを求められることが分かる。従って、面数の極めて大きい複雑な建屋内構造の場合、スーパーコンピュータや計算サーバの利用が推奨されるが、PCでも、時間はかかるが計算は可能であることを付記する。なお、本事業では、簡単に寄与率行列を作成できる簡易計算手法の利用も想定し、研究開発を進めており、適宜、ニーズにあわせて使い分けることを想定した実装を検討している。

次に、YとAが実際に与えられたとして、Xの逆推定手法について考える。本事業ではp>>qの関係が一般に成り立つ場合を想定しているが、これは、対象とする屋内構造情報の複雑さが、測定情報である観測点数をはるかに上回ることを意味しており、廃炉対象の屋内では、一般的状況と考えられる。この条件は、数学的にAの逆行列を求めることができない不良設定問題に該当するため、線源ベクトルを逆推定するに当たっては、解にある種の制限を加えながら最適解を求める必要があり、本事業では、L1ノルムを用いた下記の逆推定手法(式(3)のGを最小化する)であるLASSOを採用する。

$$G = |Y - AX|^2 + \lambda |X| \tag{3}$$

ここで、 λ はハイパーパラメータと呼ばれる未定定数であり、本記事内での詳しい説明は省略するが、解の λ 依存性を調べる他、クロスバリデーションと呼ばれる手法等で λ を決定する[2]。

LASSOでは、線源ベクトルXの各要素の 選択において、多くの要素をゼロに導くバイ アスが働くことが知られている(その仕組み については[2]等を参照)。さらに、この バイアスの妥当性については、多くの現象において、重要な要素は少数で限定的であるという性質から、上記逆推定による再現性が妥当となることが示されてきた。本事業でも、1Fのような事故を起こした原子炉建屋内においては、一様に汚染されている部分と強く汚染されている部分(即ちホットスポット)の2極化が見られると考えられることから、後者を見つけ出し、線量を大きく低減させるという目的に対して、本手法は効果的であることが分かる。

逆推定が成功する例として、図3のケース を用いて引き続き例示する。ここでは、図 3 (c) 左下にて示した線源分布をテスト線 源として、図3(b)に示した18個の観測点 (床から 1mと 2mの点でそれぞれ9個の線 量率を観測:計18点)にて線量率を観測し た場合(テスト線源からPHITSを用いた計 算により観測点での線量率を求め、その値を 観測線量率とする)、LASSOを用いた逆推定 (式(3)参照)による線源分布結果を図3 (c) 右下に示す。左側の準備した正解と比 較し、ほとんど正しい位置に推定されている ことが分かる。また、テスト線源を基に線量 率の分布を計算した結果を図4左に、逆推定 した線源分布を基に線量率の分布を計算した 結果を図4右に示した。これらの比較から、 LASSOを用いた逆推定により、極めて正解 に近い分布が得られていることが分かる。以 上から、LASSOを用いた逆推定能力は、不 良設定問題においても、建屋内でのホットス ポット探索に有効であることがわかる。

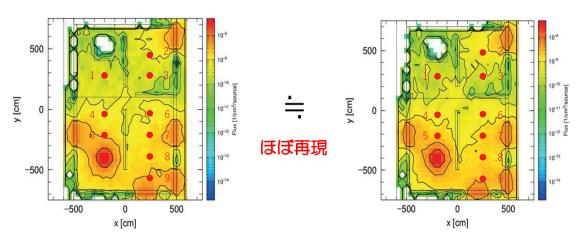
次に、LASSOを用いた逆推定が成功する条件について、これまでに分かっている事実を以下に示す。CandesとTaoらによるLASSOの成功条件(以下「Candes-Taoの条件」という)[3] を本問題に適用すると、観測ベクトル q の次元が $q > \alpha$ n_s \log (p/n_s) の関係を満足するとき、逆推定による解の再

現性が高いことが分かる。ここで、nsは、ホッ トスポット線源面の数である一方、αは定数 であり、おおよそ3~4程度であることが知 られている「4]。この関係式は、n。個程度 の線源を見出したいとすれば、必要な観測点 数の最低限数 q minが求まることを意味して おり、重要な関係式であることが分かる。本 事業では、この最低限の観測点数での線量率 取得を支援するためのツールを線源逆推定エ ンジン内に実装する。則ち、ユーザーは、対 象屋内にて、想定される線源面数か、あるい は、求めたい高強度な線源面数(最も高強度 な線源面から順番に何個という指定)を入力 することで、線源の逆推定を成功するために 必要な観測点数を得る。次に、どこに観測点 を設置するかについては、次のようなルール を基に決定する。そのルールとは、逆推定が 成功するような行列Aを得ることに帰着す る。一般に、放射線の問題を扱う際、線源面 と観測点との関係は、線源面から発する放射 線(光でも良い)が観測点に直達するか否か で、Aの要素の値は大きく変化する。従って、 直達と未直達では、値が大きく異なる(直達 >>未直達) ことから、未直達の要素が多い 場合、小さい値が多く分布し、解の同定を難 しくする。この事実から、観測点はできる限り、多くの線源面からの放射線を直達する場所に取ることが有利であることが分かる。

以上より、本事業では、上記の条件を満足 する観測点を指示するツールを開発した。こ れにより、ユーザーは、線源候補面数の事前 情報を基に、求めたい候補面数を入力した後、 Candes-Taoの条件を満足させ、各線源面か ら直達率の高い観測点が指示され、観測指示 点での線量率を実際に入力することで観測べ クトルを決定し、寄与率行列を、PHITSを 用いて計算することで、LASSOによる線源 ベクトルの逆推定が実行できる。これが、当 事業にて開発を進めている「線源逆推定エン ジン」の全貌である。現在(令和4年6月末 時点)、必要なツールの実装や検証を終え、 各ツールの統合を行うとともに、様々な建屋 内での検証作業を試みている(JAEAの有す る原子炉施設で検証する)。

4. 2つの線源逆推定・線量率推定エンジンを動作させるプラットフォーム:3D-ADRES-Indoorの開発状況

3.にて、本事業のコアとなる開発技術について、数学的背景や、線源逆推定の簡単な例



テスト線源を配置しモンテカルロ計算で 得た線量率分布(正解)

逆推定により得られた線源(予測解)による 線量率分布

図4 線量率分布の比較(テスト線源によるPHITSの計算結果とLASSOによる逆推定線源による PHITSの計算結果)

を示したが、複数のツールからなる「線源逆 推定エンジン」を、東電を始めとする廃炉に 係るユーザーが利用するには、各ツールから 成るエンジンを動作させるプラットフォー ム・ソフトウエアを整備し、さらにユーザー フレンドリーなインターフェースを準備する 必要がある。

実際に線源逆推定を実施する際には、上記のように、対象となる屋内情報を取得した後、LASSOによる逆推定を成功させるため、観測点指示ツールを動作させ、観測指示点での測定線量率を入力した後、観測点に対する寄与率行列を作成して、LASSOを動作させるという手順になる。当該事業では、これらの一連のプロセス(複数のツール)をシームレスに動作させるため、プラットフォーム・ソフトウエアとして3D-ADRES-Indoorを開発している。

開発を進めるに当たり、プログラム作成の自由度等や拡張性を考慮し、pythonにより開発を進めている他、新たに必要となるツールを適宜導入するため、外部プログラムを動作させ、発生するファイルの入出力を管理する機能も作成している。図5には、3D-ADRES-Indoorの動作環境(標準的環境)の

模式図を示した。図5に示されているように、PHITSの大規模なシミュレーションが必要となる場合は、JAEAのスーパーコンピュータを利用すると高速計算が可能となるが、基本的にはユーザーが利用することでも十分に動作可能である。本事業では、JAEAのイントラネット内での試験的利用を想定しているが、将来的にはセキュアなクラウド環境の利用も考えられる。もちろん、3D-ADRES-Indoorインストール済みのデスクトップPCやノートPCでも、メモリーを十分に確保すれば、計算時間(逆推定を行う時間)はかかるが動作可能である。

なお、3D-ADRES-Indoorには、3.で示した「線源逆推定エンジン」の他、線源対策機能を有する「線量率推定エンジン」も組み込まれ動作する。本事業のコア技術は線源逆推定であり、その研究開発がメインタスクとなるが、線源が明確となった後は、線量率の3D分布を求め、その分布を可視化すると同時に線源対策を仮想空間で行い、線量率の3D分布がどのように変化するかを評価する「線量率推定エンジン」も一つの重要な開発ニーズとなっている。

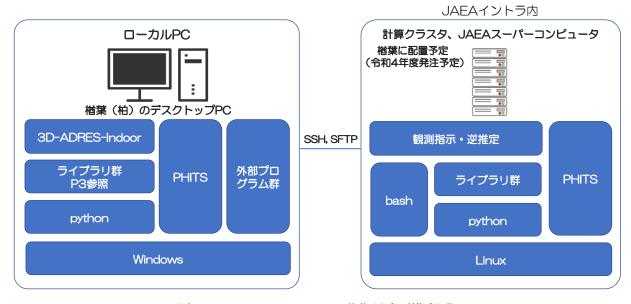


図 5 3D-ADRES-Indoorの動作環境(模式図)

一般に、線源対策として考えられる作業として、除染、撤去、移動、遮へいの4種が考えられる。これらの対策による線量率変化については、構造情報の変化を基にPHITSを動作させ、線量率の再計算を行うが、構造情報の変化は一部に限定されること(対策が施される部分に限定)から、その限定した変化にのみ着目し、計算を高速に実施可能とするツールを開発・実装している。図6に、線源対策の3D-ADRES-Indoor内での実施イメージを示した。図6では、様々な線源となる構造物を一か所に移動させ、線量率の低いスペースを広く中央に確保した様子を示している(右図の線量率の分布の変化を示す上下の

図を比較参照)。これらの動作や精度、さらに高速に結果を可視化するための技術開発については、5.に示す他、別途、論文[5]等に報告する予定である。

なお、これらの線源対策をユーザーが実施することで、対象となる屋内の線量率の変化を評価し、その変化を基にユーザーが対策の試行錯誤を可能とするインタラクティブ性も実装する予定である。そのインタラクティブ性については、「インタラクティブ可視化エンジン」でも研究開発を進めており、5.にその概略を示す。

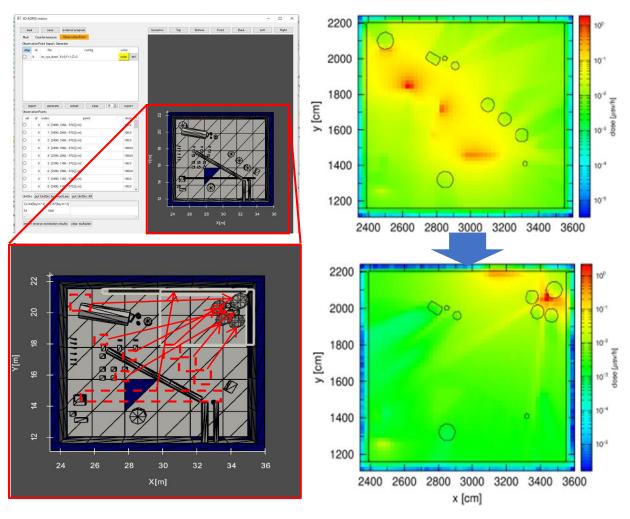


図 6 3D-ADRES-Indoor内での線源対策 (移動) の実施イメージ (左側: 3D-ADRES-Indoorの操作画面、 右側:対策 (移動) 前後の線量率分布)

5. インタラクティブ性を有する可視化エンジン(PC・MRデバイス)の開発状況

本事業で開発する可視化エンジンは、大き く分けて二つの概念から構成される。一つ目 は、逆推定した放射線源の分布や逆推定によ り得られた放射線源から計算される線量率の 3D分布をPC上で可視化するエンジン機能で あり、線量率を2D画面上に可視化する。な お、廃炉対象となる屋内では、線量率を減少 させ、廃炉作業者の被ばく低減を図る必要が あり、特定された線源に対する除染等の対策 を立案し、作業空間を目的とする線量率へと 低減させることが求められる。従って、4.に 示した各線源対策(除染、撤去、移動、遮へ い)を仮想空間内で実施し、その変化を評 価するため、線源対策と線量率の変化の表 示をインタラクティブに実施可能とするこ とを実装目標としている。現在、4.に示した 3D-ADRES-Indoorでは、図7に示すように、 一定の作業空間を定めた(図7の中央左の図 の白枠)後、その作業空間内で除染や遮へい といった線源対策を行うと、線量率の変化が モンテカルロ計算により高速に取得できる (その仕組みの詳細については、論文「5] にて報告予定)。

なお、対策前後にて、3D-ADRES-Indoorは、線量率の分布をVTK形式で出力し、「インタラクティブ可視化エンジン」は、この分布の変化を可視化し、ユーザーは、これをPC画面上で確認する仕組みとしている。

二つ目では、仮想3次元空間をMRデバイス(当該事業ではHoloLens2を用いた開発を進めている)を用いて3次元的に可視化し、上記のインタラクティブ性を仮想空間だけでなく、現場においても実施するARの実現を目指している。AR可視化は、放射線が人の眼に見えないということから、極めて有用である。現場にいる作業者に対し、その場の線量率の分布を知らせることが可能となれ

ば、無用な被ばくリスクを下げることが可能 となる。本事業では、AR環境の整備と実際 の現場での実証を準備している。ここで、一 例として、仮想の現場(居室)で行ったAR 実施イメージを図8に示す(実際の原子炉内 で可視化すれば真のARとなる)。図8は、原 子炉内の構造物を、炉内空間とは異なる居室 内にてリアルサイズで投影し、その構造物表 面に計算された表面線量率をマップ化したも のである。この図から分かるように、MRデ バイスを装着した作業者は、あたかも、眼前 にある構造物の表面から発する放射線量を知 ることが可能となり、作業を実施する際、可 能な限り近づくことを避けるべき構造物が判 断できる等、有用な情報が得られることが分 かる。また、実空間内(本例では仮想空間) で線量率の分布断面図を投影することも可能 であり、空間内のおおよその放射線量の分布 が分かる (図9参照)。現在、断面分布図を 任意に移動可能とする他、ある特定の線量率 の等値面をバルーン状に示す(線量の高い領 域が一目で分かる) 可視化等についても実装 を検討している。

また、当該MRデバイスを利用すると、図10のように、任意の縮尺を適用することで、ホログラムとして現場のミニチュアを見ることが可能となり、線量率の断面分布図や線量率の等値面を描いて、現場の状況を俯瞰的に見ることも可能となる(本可視化はMRに分類され、ARとは区別される)。さらに、構造物情報をパーツ化することで、各パーツに対する線源対策をミニチュアのホログラム上で行い、その操作の線量率分布への影響を確認することができる。図11は、線源と判断された構造物を撤去する様子を示しており、撤去後の状態で線量率を再度計算し、その変化を見ることが、本事業における「インタラクティブ可視化エンジン」の目標となる。

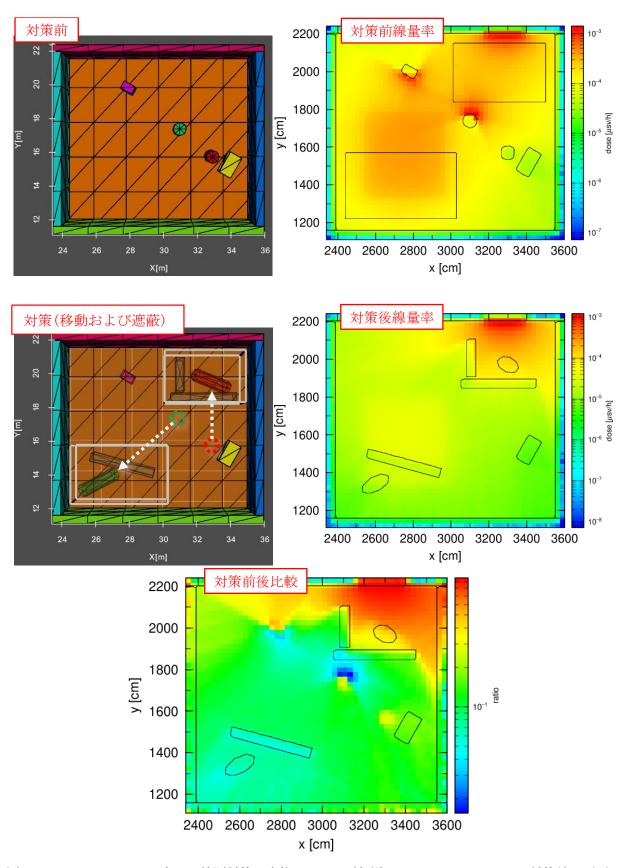


図7 3D-ADRES-Indoor内での線源対策の実施イメージ (左側: 3D-ADRES-Indoorでの対策前の画面、右側:対策前と後の線量率分布、下:線量率比 (対策後/対策前)

以上、MRデバイスを用いた可視化の可能性は広く、本事業では、観測指示点での線量率の観測に用いることも準備している(図12:現場と同スケールの仮想空間で観測指示点を朱色のボールで表示。なお、本可視

化画像はVR(HMD)で表示)。なお、3.で、線源逆推定を成功させるため、観測指示点で線量率を測定することが重要であることを示したが、MRデバイスによるARにより、観測指示点での線量率の計測は簡便なものとな

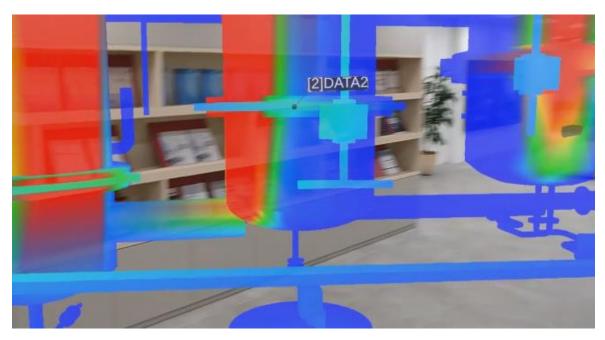


図8 MRデバイスの装着者から見たAR実施イメージ(構造物表面線量率を可視化:現場ではなく居室にて撮影)

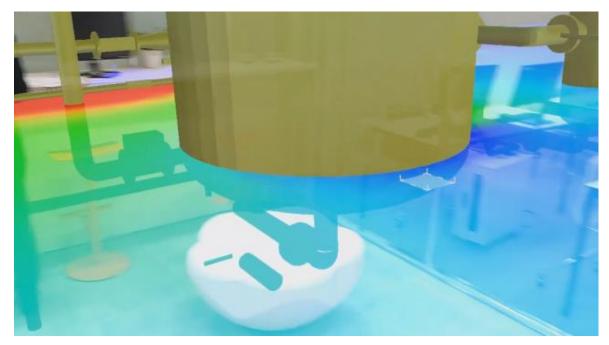


図9 MRデバイスの装着者から見たAR実施イメージ(構造物周囲の線量率の断面を可視化:現場ではなく居室にて撮影)

る。図12は、対象屋内での観測指示点を表 示した図であり、作業者は、その観測指示点

を実空間内にて観察可能であり、実際にその 指示点上にサーベイメータをかざし、計測さ

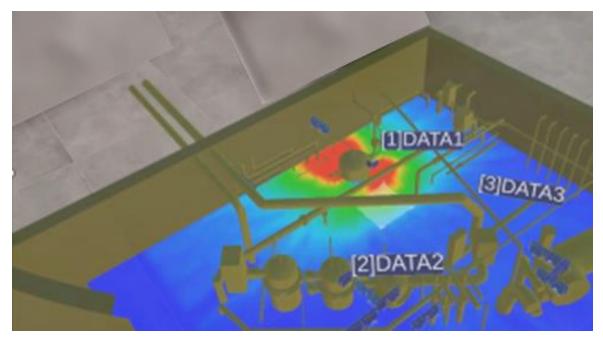


図10 MRデバイスの装着者から見たMR実施イメージ(ミニチュアのホログラム上で線量率の断面分布を表示)

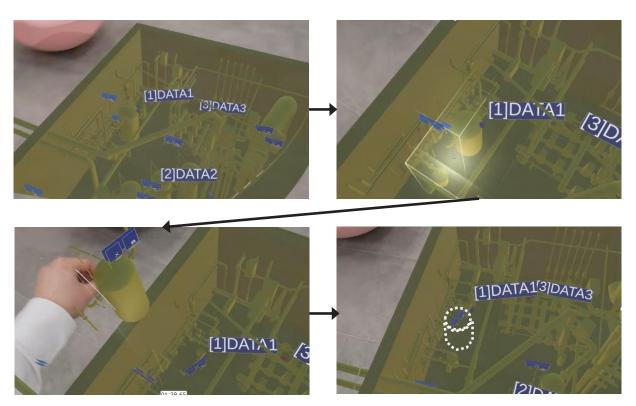


図11 MRデバイスの装着者から見たMR実施イメージ(ミニチュアのホログラム上で構造物を選択し 移動させ撤去)

れた線量率をMRデバイス内にて入力することで、効率良く指示点上の線量率を取得することが可能となる。このような活用は線量率測定のDXにほかならず、線量率の取得と同時に線源逆推定を動作させれば、指示点での線量率測定後に、線量率の3D分布を作業員は現場にて確認することも可能になる。このような技術が発展すれば、廃炉において大きな役割が期待できると考えられ、今後も、さらに研究開発を進めていく予定である。

4. 本事業における課題とその解決及び将来 展開

以上、本記事を終えるに当たり、本事業の 課題と将来の発展の方向性を整理し、本事業 と関連する分野だけでなく、DXを発展させ る上で重要と思われる点について示す。

まず、「線源逆推定エンジン」の要となる LASSOによる線源逆推定には、複数の課題 があることが分かっている。一つ目は、実際 の廃炉の対象となる屋内の区画面数である。 1F屋内には簡単にアクセスすることができ ないため、本事業の主たる検証は、JAEAが

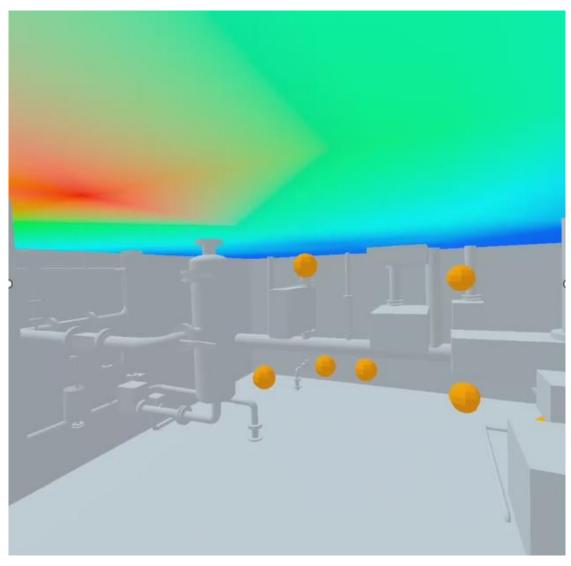


図12 MRデバイスの装着者から見たAR実施イメージ(構造物内で観測指示点を表示:本可視化では VR・HMDを利用)

有する原子炉施設で実施しているが、点群 データから作成したCADデータを用いると、 1室辺りの区画面数は200万以上にも上る。 このような膨大な面の一つ一つに単位線源を 置き、PHITSを用いて放射線モンテカルロ 輸送計算による寄与率行列の作成にかかる計 算コストは極めて大きい(もちろん、富岳や JAEAのスパコン等の豊富な計算資源を使用 できれば、原理的問題はないが、一方でデー タの取り扱いや転送等におけるセキュリティ の課題が発生する)。この課題に対し、本事 業では放射線の簡易計算手法を使用すること で、おおよその線源位置を特定し、その線源 の周囲のみの構造を切り出し、その特定位置 付近でPHITSを利用し精度を向上させる仕 組みを考え、試験を実施する予定である。こ れは、即ち、マルチスケール性を上手く利用 した解決法で、計算コストを大幅に減少させ る試みである。

二つ目は、上記のように膨大な区画面数(即 ち、線源候補面)の場合、もし、計測上の課 題があり、線量率の観測点数が限定される場 合は、非常にスパースな解を想定した逆推定 を実施することとなり、一度の観測のみでは 線源分布を正解に近い状態で推定することが 難しくなるという課題がある。この課題に対 して、本事業では、ベイジアンLASSOの適 用について検討している。これは、則ち、線 源の事前情報(確率分布で表現)に基づいて 観測することで確率分布をアップデートする 仕組みを利用し、段階的に推定線源分布が正 しい線源分布へと収束する仕組みの研究開発 となる。実際には、事前情報として、高強度 の線源がどの辺りにあるかという見当が既に 得られている場合も多く、そのような場合に は、事前情報を基にスタートすることが有効 である他、再観測により、線源推定情報がよ り正確になる技術が今後、重要になると考え ている。

次に「線量率推定エンジン」の課題につい

て示す。当該エンジンの最終目標は、建屋内の線量率を一定以下に低下させるための最適な手段(複数手段の組み合わせ)の提案となる。最適化は容易ではないが、単純な手段にのみ限定(例えば除染のみに限定)すれば、最適化技術の活用は妥当であり、現在、その研究開発の準備を進めている。もし、実現できれば、ユーザーに対し、線源毎に最適な除染率等を提案することが可能となり、便利なツールになると考えられる。

最後に、「インタラクティブ可視化エンジ ン」の課題について示す。当該エンジンにつ いては、実際の廃炉現場で、上記のようなデ ジタル技術活用が利用できるかという課題と 深く関係する。本事業では、観測点指示によ る最適観測手段を提案しており、複数人が観 測点位置を確認しながら、情報を共有して計 測を分担すれば、計測効率は格段に向上する と考えている。また、これらの作業を遠隔か ら指示し実施することもMRデバイス機能を 利用すれば可能であり、当該技術を活用する メリットは非常に大きい。実際、MRデバイ スの活用シーンは、産業の多様な場面で見ら れる。しかし、1Fのような廃炉現場での活 用については、制約条件も加味しながら最適 な提案をする必要がある。

5. まとめ

本事業の目的は、廃炉現場において、最も 重要な課題の一つである廃炉作業者の被ばく 低減という課題に対し、最新のデジタル技術 を適用することで、解決策を提示することに ある(その解決策は最大限、最適化される必 要がある)。しかし、前節に示したように、 廃炉現場には、特有の制約も多く、その適用 は簡単ではない。しかし、高い放射線量とい う目に見えない厳しい状況において、危険を 避けかつ作業コストを最適化するには、デジ タル技術の活用は必須と考えられ、むしろ廃 炉現場から新たなデジタル技術を創出できる 可能性も高いと考えている。制約が多い程、 進歩を諦める力も大きく働くが、技術開発の 高度化が進む可能性も高く、我が国唯一の原 子力の総合研究開発機関であるJAEAとして は、技術開発の高度化を推し進めるという立 場に立ち、東電を始めとする様々な機関と協 力しつつ研究開発を今後も前進させたいと考 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。東電の高平 史郎グループマネージャ、松浦英生グループ マネージャ、大浦正利氏及び高崎新氏との議 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。有識者である東京大学淺間一教授、京 都大学小山田耕二教授及び東京都市大学河原 林順教授からの適切なご意見に感謝する。ま た、開発項目の検証に際し、JAEAの原子炉 施設の環境を利用している。大洗研究所・材 料試験炉部土谷邦彦部長を始めとするスタッ フ一同のご協力に感謝する。さらに、JAEA のスーパーコンピュータを利用している。シ ステム計算科学センター武宮博センター長を 始めとするスタッフ一同のご協力に感謝す る。各エンジン開発では、(株) CTC、(株) サイバネットシステム、(株)みずほ総研、(株) ESRIジャパンの方々のご協力に感謝する。 最後に、本事業のテーマ 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 一同及び基礎エセンター・高橋史明GL他の メンバー一同のご協力に感謝する。

参考文献

- [1] Sato T, Iwamoto Y, et al. Features of particle and heavy ion transport code system (PHITS) version 3.02.
 Journal of Nuclear Science and Technology, 2018, 55(6): 684-690;
 Iwamoto Y, Sato T, et al. Benchmark study of the recent version of the PHITS code. Journal of Nuclear Science and Technology, 2017, 54(5): 617-635.
- [2] 染田貴志他、「ITエンジニアのための スパースモデリング入門」(株) 翔泳 社 (2021).
- [3] Candes E J, Tao T. "Near-optimal signal reconstruction from random projections: Universal encoding strategies?", IEEE transactions on information theory, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [4] Shi W, Machida M, Yamada S, Yoshida T, Hasegawa Y, Okamoto T, "Inverse Estimation Scheme of Radioactive Source Distributions inside Buildings based on Monitoring Air Dose Rates using LASSO: Theory and Demonstration" (投稿準備中).
- [5] 町田昌彦、古立直也、吉田亨他、「線 源対策効果シミュレーションの高速化 手法の開発」(準備中).