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 -

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、志風 義明 佐藤 朋樹、沼田 良明、飛田 康弘、山口 隆司、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、デジタル技術、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の一つとなって いる。この課題解決に資するため、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年度より2年間に渡り、放射線源の 逆推定と推定線源に対する対策を仮想空間で実施可能とするためのデジタル技術の研究開発を実 施してきた。本記事では、上記プロジェクトの成果(以下、前期プロジェクトと呼び、その2年 間の研究開発の成果)を紹介する他、令和5年度4月より、新たに開始した継続プロジェクト(以 下、後期プロジェクトと呼ぶ)の計画についても報告する。前期プロジェクトにて当初予定して いた機械学習技術(LASSO)については、建屋内の複雑な構造情報と汚染源の性質を反映した 一つの派生版手法へと結実させた成果を報告する他、実際の原子炉施設での検証結果を示す。 更に、開発技術を集約したプラットフォームとしての機能を持つソフトウエア:3D-ADRES-Indoorを紹介し、継続して実施する予定の後期プロジェクトの研究開発計画も紹介する。

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 し、廃炉作業を進める上で大きな障害となっ

-2-

ている。この障害を克服し、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。実際、 高強度の放射線源の位置やその強度が判明す れば、作業空間内の線量を低減させるための 有効な除染・遮蔽の計画立案が可能となり、 廃炉作業者の被ばく量を可能な限り低減する 取り組みを効率良く且つ計画的に進めること が可能になると考えられる。

上記目的を達成するには、放射線源の位置 及び強度を推定する技術が鍵となることが明 白である一方、可能な限り、モニタリングに 係る労力及びコストを減らす技術の確立が求 められる。線源位置と強度を高精度で把握す るには、線源周囲のモニタリング頻度を上 げ、線量率の分布を精度良く取得することが 近道と考えられるが、その場合、線量率観測 に係る時間と経済的コストの他、何より現場 に近づく作業者の被ばく量が増大するため、 できうる限り、モニタリングは最低限として、 線源位置と強度を精度良く推定できることが 望ましい。

前期プロジェクトでは、上記要請に応える ため、観測点数は少ないが、精度良く線源 逆推定が可能な機械学習手法であるLASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) 「1] を適用し、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「2-5]。その結果、原子炉建 屋内で有効なLASSOの派生モデルを見出し、 JAEAの 廃 炉 対 象 と な る Japan Materials Testing Reactor (JMTR) 内にて検証を行い、 良好な逆推定結果を得ることに成功した「3、 4、6]。更に、逆推定結果を基に除染や遮蔽 効果を調べるためのデジタルツール群を開発 し、そのツール群を組み込み、線源・線量率 解析のプラットフォームとして3D-ADRES-Indoorの開発を行った。

本稿では、次章(第2章)にて、オリジ ナルなLASSO手法の概説と原子炉建屋内に 適したLASSO派生モデルを解説し、第3章 では、その派生モデルをJAEAの廃炉対象と なる原子炉JMTRに適用した結果について報 告する。第4章では、前期プロジェクトに て開発したツール群をシステム化した線源・ 線量率解析プラットフォーム:3D-ADRES-Indoorの最新の開発状況を報告し、第5章で は、実際に1F廃炉現場での活用を目指す後 期プロジェクトの計画と将来構想について記 す。

LASSO手法の概説と原子炉建屋内に適 するLASSO派生モデルの研究開発

本章(第2章)では、当該事業の主要技術 であるLASSO手法を線源の逆推定に適用す る方法について概説した後、実際の廃炉対象 となる原子炉建屋内へ適用する際に、工夫を 施したLASSO派生モデルの着想とその効果 について記す。

先ず、線源逆推定の概念とLASSOの適用 についてその概略を説明する。線源[7-9] を逆推定する際、建屋内の構造物の表面が線 源候補面となるため、その表面を適当なサイ ズのメッシュに分割する(図1参照)。ここ で、メッシュ数をn、観測点の個数をmとする。 この時点で、i番目のメッシュの線源強度を x_iとし、i番目メッシュからj番目の観測点へ の寄与率(放射線源から発する放射線の減衰 率に相当する)をa_{j,i}とすると、j番目の観測 点での空間線量率y_iは、

$$\mathbf{y} = A\mathbf{x} \tag{1}$$

と表現できる。ここで、左辺のyは観測値を $y=(y_1,y_2,...,y_m)^T$ と配置したベクトル(観測ベ クトル)であり、右辺のxは各メッシュの線 源強度を $x=(x_1,x_2,...,x_n)^T$ と配置したベクトル (線源ベクトル)である。また、行列Aは寄 与率を

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix}$$
(2)

と配置した行列(寄与行列)である。ここで、 寄与率a_{i,i}は、i番目のメッシュに単位線源を 付与(例:1Bqを付与)した際のj番目の観 測点における空間線量率と定義されるため、 PHITS等の放射線シミュレーションを行う ことで正確な値を得ることもできる他、i番 目のメッシュ(線源)からj番目の観測点ま での距離の2乗の逆数等で簡単に推定するこ ともできる(寄与行列作成の計算量は極めて 小さくなる)。尚、PHITS等の放射線シミュ レーションで計算する寄与率を用いる場合 は、正確な線源量が推定可能となる一方、距 離の2乗の逆数を用いるような場合、求める 線源量は相対的な値になる。以上より、線源 量を逆推定するには、方程式(1)を解くこ とで線源ベクトルを求めればよいことが分か る。しかし、通常、線源候補のメッシュ数は 観測点数よりもはるかに多い(*m≪n*)ため、 (1) 式から線源ベクトルの値(不定となるた め)を求めることはできない。また、観測値 や寄与率には誤差が含まれることを念頭に置 く必要がある。しかし、実際の状況では、大 きな影響を与える線源(高強度線源)は一部 であり、それ以外の多くをゼロとみなして良 い(スパース性を持つ)と考えられることか ら、スパース性を利用する解法として、下記 の評価関数

$$\frac{1}{2} \| \boldsymbol{y} - A \boldsymbol{x} \|_2^2 + \lambda \| \boldsymbol{x} \|_1$$
 (3)

を最小化するベクトルxを求めるLASSOの適 用が有効であると考えられる(当該問題では、 ベクトルxの成分は線源量であり、非負であ ることから、成分を非負に限定できるNonnegative LASSOを用いる)。尚、 $\lambda \|x\|_1$ は ペナルティ項と呼ばれ、xの成分の絶対値の 総和を小さくする効果(この問題に対しては 総線源量を少なくする効果)があり、λを大 きくすることで、スパース性が高くなる(ゼ ロになる成分が多くなる)。実際に、図2の 簡単な床モデルに対してLASSOを用いて逆 推定した結果を図3に示す(メッシュ数(50) >観測点数(25))。この結果から、線源の 位置および線源量を高精度で再現できている ことが確認できる。尚、寄与率は三角形メッ シュの重心から観測点までの距離の2乗の逆 数で与え、観測値として寄与率と図2に示し



図1 構造物表面上の放射線源と観測点の関係の図(問題を簡単にするため、放射線源は床に分布する と仮定)

たテスト線源から計算される値に誤差として 最大で±10%の変動を入れたものを利用し た。

次に、当該LASSO手法の原子炉屋内モデ ルへの適用と、前期プロジェクトの成果であ るLASSO派生モデル導出の研究開発成果に ついて記す。実際の原子炉建屋内では、高強 度線源は疎に分布するが、各々の分布は、複 数のメッシュに跨って分布すると考えられる (実際の汚染分布とメッシュは関係ない一方、 あまりに小さいメッシュに孤立する汚染は大 きな影響を与えない)。実際の建屋内の構造 物メッシュの一例を図4に示すが、複雑な構 造物をメッシュで表現すると、様々な面積を 有するメッシュが隣接し構成されることが分 かる。従って、通常のLASSO((3)式)で はなく、隣接したメッシュ間の濃度(面積に 依存しない)差を最小化するペナルティ項を



図2 床モデルのメッシュの形状とテスト線源濃度分布。灰色の点は観測点を表し、床から1mの高さの地点に対し、最大で10cmのずれを乱数で与えた位置で観測する。



図3 LASSOによる濃度分布の逆推定計算結果。交差検証によりパラメータんは16とした。

追加した評価関数

$$\frac{1}{2} \|\boldsymbol{y} - A\boldsymbol{x}\|_{2}^{2} + \lambda_{1} \|\boldsymbol{x}\|_{1} + \lambda_{2} \sum_{\substack{i,j \notin \mathbb{R} \notin \mathcal{S} \neq \mathcal{S}_{a} \\ i < j}} \left| \frac{x_{i}}{S_{i}} - \frac{x_{j}}{S_{j}} \right|$$

$$(4)$$

を用いるFused LASSO [1] を用いるの が適切と考えられる。ここでS_iはi番目の メッシュの面積である。しかし、LASSOの 計算において一般的に用いられる交互方向 乗数法 (Alternating Direction Method of Multipliers: ADMM) に基づく反復法を用 いると、反復ごとにメッシュ数とメッシュの 隣接数の和の2倍の次元の行列を係数行列と する連立一次方程式を解く必要があるため、 メッシュ数が多くなると計算時間が膨大にな るとともに、必要なメモリ量の増大する点が 大きな欠点であった。そこで、隣接セルとの 濃度差の2乗をペナルティ項とする

$$\frac{1}{2} \|\boldsymbol{y} - A\boldsymbol{x}\|_{2}^{2} + \lambda_{1} \|\boldsymbol{x}\|_{1} + \lambda_{2} \sum_{\substack{i,j \in \mathbb{R}; k \neq y \neq z, \\ i < j}} \left| \frac{x_{i}}{S_{i}} - \frac{x_{j}}{S_{j}} \right|^{2}$$
(5)

を評価関数とする派生Fused LASSOを考え た。この評価関数はNon-negative LASSOの 解法の1つであるMultiplicative update法 により、逆行列を計算することなく計算で きるため、メッシュ数が多い問題でも現実 的な時間で隣接メッシュ間の濃度差を考慮 しながら、線源を逆推定できる利点がある。 この評価関数を用いたLASSOをここでは、 "擬Fused LASSO"と呼ぶ(本来のFused LASSOの評価関数(4)から一部修正がある ため)。実際、図2の線源分布に対して、図 5のような不均一なメッシュ(図4に示す複 雑な構造物を表現するメッシュの特徴をモデ ル化)で床モデルを構成した場合のLASSO (式 (3)) および擬Fused LASSO (式 (5)) を用いて逆推定を行った結果を図6に示す。



図4 JMTR内のイオン交換樹脂塔の上部をメッシュに分割した際の図

これらの結果から、複数のメッシュに線源が 跨っている場合、隣のメッシュの影響を考慮 しないLASSOを用いると、観測点近くのメッ シュのみに集中し分布する解が得られる他、 その選択された線源メッシュが小さいとその メッシュの濃度は実際の濃度よりも1桁以上 高くなることが確認できる。その一方、擬 Fused LASSOでは、複数の面積の異なるメッ シュに跨り線源が分布している状態(正解の 分布)を充分に再現できていることが確認で



図5 図4を模擬し、不均一メッシュの隣接に より構成される床モデル。



(a) LASSOによる逆推定の結果

きる。以上より、線源が面積の不均一なメッシュに跨って分布するような場合、隣接セルの影響として濃度差を考慮する評価関数(式(5))を用いる必要があることが分かる[6]。

LASSO派生モデルのJAEA・JMTRプー ルカナル室への適用成果

3章では、2章にて有効性を示したLASSO 派生モデル(擬Fused LASSO)を実際の原 子炉JAEA・JMTRのプールカナル室に適用 した際に得られた成果を記す。

先ず、JAEA・JMTRについて説明す る。JMTRとは、Japan Materials Testing Reactorの略であり、JAEAが運営する材料 試験炉である。1968年の運転開始から原子 炉材料や燃料の基礎研究、安全研究、発電炉 の開発やRI製造のような様々な原子力研究 開発活動に貢献してきたが、2021年3月に 廃止措置計画が認可され、原子炉の解体や放 射性廃棄物の処理・処分が計画的に行われて いる。

当該事業では、このJMTRを活用し、上記 LASSO派生モデルを適用し、線源逆推定を 行い、その機能の有効性を検証した[3、4]。 図7にJMTRの全体画像を示し、その炉内の



(b) 擬Fused LASSOによる逆推定の結果

図 6 不均一なメッシュでの逆推定結果(a) LASSOにより逆推定した線源分布(この結果のみ濃度の スケールが異なることに注意)。交差検証によりパラメータλは0.5。(b) 擬Fused LASSOによ り逆推定した線源分布。交差検証によりパラメータはλ₁=0.5, λ₂=10⁻⁴。尚、各々の図の水色で ハイライトされた三角形は正解である図 2 の線源位置を示している。

12000

10000

8000

6000

4000

2000

0

(a.u./m

客

濦

一室であるプールカナル室(前期プロジェク トの検証サイト)の模式図を示す。

プールカナル室の大きさは、図7左に示さ れた通り、原子炉内の区画として標準的区 画である一方、内部には図7右の通り、複 雑な構造物が多数配置されており、線源逆 推定LASSOの適用は当初困難な課題と見込 まれた。実際に当該プールカナル室の計測点 群を基に作成した3D-CAD (サーフェスモデ ル:点群より作成したCADモデルで表面の 形状のみをモデル化したもの)から線源を逆 推定するため、構造物表面をSTL化したモデ ルデータのメッシュの面積の分布を表1に示 す。この表から分かるように、各メッシュの 面積は、極めて小さいものから大きいものま で、広範囲に分布しており、複雑な構造物情 報をそのまま取り扱うことの困難さを示して いる。また、メッシュ総数も極めて多く、 百万を超えており、そのメッシュ総数を次元 とするベクトルの線形計算となることから、 計算コストが大きな課題になると想定され た。

数学的には、当該百万メッシュ以上を線源 ベクトルとし、その線源ベクトルから線源候 補となる要素面を高強度線源として選択する 必要がある。従って、必要となる観測点数は、 膨大な量になると想像されるが、LASSOの 逆推定問題を精度よく解くためのガイドライ 表1 プールカナル室3D-CADデータから得られ るSTLメッシュ毎の面積の分布とその数

プールカナル循環系機械室	
メッシュの面積 (m²)	メッシュ数
10~100	14
1~100	1,196
10 ⁻¹ ~1 (m ²)	10,446
10-2~10-1	60,049
10-3~10-2	249,337
10-4~10-3	603,357
10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁴ (cm ²)	532,199
10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁵	184,375
10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁶ (mm ²)	9,645
10-8~10-7	1,171
10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁸	28
メッシュ総数	1,651,817

ンとして用いられるCandes-Tao [10] の式

観測点数>
$$kn_s \log n/n_s$$
, (6)

を利用すると、一例としてユーザーが当該室 にて線源数10個を見出したいとする場合、 観測点数は100個程度でよいことが分かる。 ここで、kは定数(~O(1))、nは線源ベクト ルの次元、n_sは見つけ出したい線源数となる。 一般に上記で過程した10個(線源数:n_s)と は、ユーザーが指定すべき量であり、事前に



図7 JMTRの全体図とプールカナル室

10個程度の線源がありそうだとの情報があ る場合は、観測点数の下限値が決まることか ら便利な関係式であることが分かる。また、 上式を意識し事前情報から、高強度の線源を 数個程度、見つけることで十分であるとすれ ば、必要な観測点数も少なく済むことが明確 に分かる。尚、ここで記した100個の観測点 数については、実際に現場での観測に係る作 業時間(1Fでは滞在時間即ち被ばく量が課 題)の関係から、限界であるとの指摘があっ たため、選択される最大数と考えている。以 上、図8には、当該事業で開発した線量率の 観測点指示ツールが示す上記100個の観測点 を示す。

これらの指示された観測点は、上記の Candes-Tao [10]の関係式(6)に従い、可 能な限り多くのメッシュを直接視認可能であ る。これは、式(1)より、視認できる(即ち、 放射線がメッシュ上の線源から直達すること を意味する)観測点を選ぶことで、寄与率行 列の行列要素が極めて小さい値とならないよ うにするためである(逆推定の精度が低下す る)。

前期プロジェクトでは、これらの観測指 示点での100個の観測線量率情報を基に、 前章にて説明した派生LASSO(擬Fused-LASSO)を用いて線源分布の推定を試みた。 その結果を図9に示す。

当該図9から分かるように、主要推定線源 は、一つの構造物に集中していることが分か る。尚、本構造物は、イオン交換樹脂塔と呼 ばれ、炉心との循環水中に含まれる放射化イ



図8 JMTRプールカナル室にて観測点指示ツールが指示する観測点(緑色の球)

オンを捕獲する装置であるため、比較的強い 線源となっている。JMTRでは、正常稼働を 続けた原子炉であることから、本プールカナ ル室での主要線源は、このイオン交換樹脂塔 であることが分かっており、正しい逆推定が 実施できたことが分かる。尚、前章にて記し た考案した手法(擬Fused LASSO)を用い た場合にのみ、当該線源が逆推定されること も判明しており、提案手法の有効性が分かる。 また、膨大な数のメッシュ数と複雑な構造物 が多数配置されメッシュの面積の分布も大き い場合でも、面濃度を基に隣接メッシュに跨 る線源分布を推定可能なものとした上記手法 によって、上記のようなイオン交換樹脂塔に 存在する線源の推定が可能となったことを指 摘したい。

次に、この推定線源情報を基に、室内の空 間線量率分布を推定した結果と観測結果との 比較を実施した結果を図10に示す。図10の 下段に示した空間線量率分布は、逆推定線源 情報を基に、各点での線量率を距離の2乗の 逆数により求めた寄与率を用いて計算した結 果である。図10の上段は、観測結果であり、 実際に線量率を網羅的に測定して得た結果で ある。尚、図10にて示されている空間線量 率分布は床からの高さが2mおよび3mのケー スであり、どちらの高さでも、凡その線量率 分布を再現できていることが分かる。また、 観測と推定の比較結果から、特に強度の強い 地点(高さ2m)での線量率の一致度は極め て高く、上記提案手法は、高い精度で線源逆 推定を可能とする優れた手法であると結論づ けられる。

3D-ADRES-Indoor (プロトタイプ)の概要 一例: 仮想空間での遮蔽効果の検証ー

4章では、3章で示したJAEA・JMTRの プールカナル室に対し、当該プロジェクトで 開発した線源・線量率推定システムの更なる 活用例について示す。

線源の逆推定に成功し、線量率の3D分布 が順推定(放射線シミュレーション)により 求められた場合、次に実施すべきは、線源対 策の効果を、上記順推定により明らかにする



図9 JMTRプールカナル室で逆推定された線源分布

ことである。1章にて記したように、廃炉を 円滑に進捗させるには、作業者の被ばく量を 最低限とする対策を講じる必要があり、推定 線源に対し、作業空間における線量率低減効 果を事前にシミュレーションを行い、低減可 能となる被ばく量を推定することが重要とな る。前期プロジェクトでは、この点に対する 研究開発を進め、線源対策を仮想空間中で実 施し、対策前後の空間線量率の比較が容易に 可能なシステムとして、3D-ADRES-Indoor (プロトタイプ)を開発した。本章では、このシ ステムの利用例として、実際のJAEA・JMTR のプールカナル室で行った結果を示す。

当該室においては、唯一、イオン交換樹脂 塔が線源となっていることが前章にて示され たが、本章では、この線源に対し、具体的な 線源対策を施した場合の解析結果を示す。先 ず、最も容易な対策の一例として遮蔽が考え られる。この効果を解析するツールである 3D-ADRES-Indoorをどのように動作させる かを以下に記す。本例では、線源となるイオ ン交換樹脂塔の周りをコンクリート片にて周 囲を囲むことで、線量率分布がどのように変 化するかを調べる。このような対策による 効果を評価するため、3D-ADRES-Indoorで は、複数の遮蔽材を準備できるように整備さ れており、最初にデフォルトで現れる直方体 を適切な遮蔽効果が得られるようにマウスを 利用してサイズや厚さを調節した後、一つの 例として、図11(a)のように、イオン交換 樹脂塔を4つの直方体で囲むことで遮蔽を考 慮した空間線量率の評価が可能となる。この



図10 JMTRプールカナル室での線量率(上:計測及び下:推定)分布(床から2、3mでの比較結果)

シミュレーションで重要なことは、直方体の 長さや厚さを任意に変動させることで、室内 の空間線量率の分布状況の変化を確認できる

ことにある。尚、図11(a)のように、4面 で囲む場合、一つの面の縦、横、高さの情報 を開発システムから逆に知ることも可能で、



(a) 3D-ADRES-Indoor にて線源(真ん中下)をコンクリート片4つで遮蔽する。



線量率分布(2D断面)

- (b) 線源をコンクリート四片で遮蔽した際の空間線量率分布(2次元断面)
- 図11 JMTRプールカナル室に対する遮蔽効果のシミュレーション例。(a) 4 面をコンクリート片にて 遮蔽する状況の作成 (b) 遮蔽により得られる線量率分布の可視化

どのようなサイズの遮蔽材を準備すべきかの 情報を取得できるのも便利である。図11(b) には、4面を遮蔽板で覆った場合の空間線量 率分布の変化を示した。明らかに、遮蔽材で のシールド効果で、遮蔽材外側の線量率は減 少していることが分かると共に、室の至る所 で、構造物による遮蔽によって線量率低減効 果が見られることが線量率の可視化により明 らかに分かる。シミュレーションでは、コン クリート片を鉛板に変えることもできる他、 他の材質を用いた場合の効果についても、簡 単に調べることが可能となっている。

以上、本章では、線源対策の一つとして、 遮蔽効果についてのシミュレーション例を示 したが、本例のような、仮想空間内での作 業場の線量率低減効果の解析は極めて便利 であり、作業者の被ばく低減効果を事前に 予測できる。このような技術は、構造物を 自在に配置したり、移動させたりすること が可能な3Dデジタル技術により実現される が、3D-ADRES-Indoorはそれを効果的に実 装したデジタルツールと位置付けられる。尚、 3D-ADRES-Indoor では、構造物の変化を放 射線シミュレーションのインプットとしてい るが、その変化分だけを考慮し、放射線のシ ミュレーションをやり直すという操作の省力 化を図ったことで、大幅な計算コスト削減に も成功しており、線量率変化を手軽に体感で きるレベルのプラットフォームとして構築し た。

しかしながら、当該システムは、放射線シ ミュレーションに詳しく知る者が使うこと で、効果的な計算が可能になるというソフト ウエアであり、一般の人が直観的な操作で容 易に利用できるアプリケーションとなってい ないことが課題の1つとして挙げられる。こ の課題を打破し、実際に1F現場で有効活用 可能とする改良を加えることが、後期プロ ジェクトの主目標となる。

5.後期プロジェクトの目標と研究開発計画

当該事業の後期プロジェクトでは、前章に て示したように、令和4年度までに開発した 逆推定解析技術、可視化技術等を組み込んだ 「線源・線量率推定システム:3D-ADRES-Indoor」に対し、現場適用性向上のための研 究開発を行う。まず、現場適用に必要なシス テムの機能を調査、検討、整理した後、課題 を抽出して、高機能化するシステムの概念検 討を行う。次に、システムを製作し、要素試 験によって機能の検証を行うとともに、1F での実測等によってその有効性を検証し、現 場適用性を評価する予定である。その際、可 能な限り、デジタルモデル作成の効率化、線 源逆推定解析の合理化、システム操作の省力 化等を図りつつ、システムのユーザビリティ 向上を通して現場適用性の向上を目標とし た。以上、本事業では、令和4年度までに開 発した 3D-ADRES-Indoorの現場適用性の向 上を目標に掲げ、大きく分けて以下の2項目 の研究開発を実施する。

- 1. システム製作及び現場適用性評価
- 2. 現場適用性の向上のための研究開発

1.については、上記 3D-ADRES-Indoorを 1F現場で活用されるものとするため、1F現 場での計測情報の取得と共に、現場の線源・ 線量推定マップを迅速に出力する他、線源対 策や被ばく評価を容易に実施可能とするため の開発を行う。また、開発システムの1F現 場での適用性を評価し評価結果をフィード バックし利便性の向上を図る。実際、本事業 にて製作するシステムの概念検討を行うた め、令和3年度より2年間にわたり開発し てきた 3D-ADRES-Indoorの現場適用性の向 上に向け、必要な機能を調査・検討・整理 し、主要項目を抽出する。尚、現場適用性の 向上に当たっては、現場での環境情報の収集 が前提となるため、その取得に係る研究開発 も実施する他、その情報を基に実際に線源・ 線量率推定マップを迅速に現場にて出力する ことを目指す。具体的には、令和5年度内 に、1F現場での計測実績のある事業者の支 援の下、環境情報の試計測(モックアップ試 験:1F5号機を想定)を行い、令和6年度 に、実際に2号機および3号機の計測を実施 する。それと併せ、取得可能な計測情報を基 に、線源・線量率マップの作成と出力を現場 にて可能とするシステムとするべく研究開発 を行う。

尚、上記線源・線量マップの作成に当たっ ては、3D-ADRES-Indoorの核となる「線源 逆推定エンジン」及び「空間線量率推定エン ジン」を基に、1F現場計測情報のインプッ ト後、数分レベルの計算速度で現場にてマッ プ作成が可能なシステムとすることを主要要 件とした。これは、現場での作業時間が限定 されており、データ入力・推定・可視化まで の迅速さが求められるからである。

以上、本事業では、上記の現場にて迅速な 応答性を持ち高い現場適用性を有する「基 幹システム」(以下「3D-ADRES-Indoor FrontEnd」という。)を開発し、その支援シ ステムとして2つのシステム(詳細解析支援 システム「3D-ADRES-Indoor Pro」とデー タ管理支援システム「3D-ADRES-Indoor BackEnd」)を併せて開発することとした(図 12参照)。この考え方は、これまで一元的に 開発を進めてきた3D-ADRES-Indoorを、そ の活用の場を考慮し、その特徴・役割毎に開 発を先鋭化させ、現場でも、オフラインでの 詳細解析(特に1F事務本館棟での活用)で も、そして、データの複数部署での共有活用 も視野に入れて開発することにある。

以上、上記「3D-ADRES-Indoor Front End」では、現場にて構造情報と放射線情報 を取得後、迅速に線源・線量率マップを作成 するが、再計測による精度向上も目的として、 1F現場での情報収集技術を最適化するため の遠隔計測技術の研究開発も併せて行う。

次に、2.の研究開発項目だが、1F現場に て想定される様々な複雑環境へも対応可能と するため、上記システムの高機能化に係る研



図12 3D-ADRES-Indoor(プロトタイプ)から今期事業で開発するシステムへ

究開発を行う。その研究開発では、先ず、課 題抽出と概念設計を行い、各機能の要素試験 を通してその機能の評価を行う。その成果 は、1.で開発するシステムに適宜反映させる 一方、独自の技術としての成熟と将来の活用 も視野に入れた研究開発とする。2.の実際の 実施項目を下記に記す。

- (a) 1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化
- (b) 線源・線量推定解析の高速化
- (c) 線源・線量推定解析の精度向上
- (d) 線源・線量推定解析の高機能化

以下では、上記4つの具体的研究開発の実 施内容とその実施方法を紹介する。

(a) 1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化本課題では、取得した構造(点群)情報から詳細3D-CADモデリングを行うための研究開発を行う。1.にて開発整備する「3D-ADRES-Indoor Pro」では、1F現場の詳細 3D-CADモデルの使用を想定するが、その取得にあたっては、点群データを基に人手に依存する作業を経るため、多くの時間や経費等のコストが必要となり、自動化が本事業だけでなく各方面(建築・土木等)から広く求められている。従って、AI等を活用し、自動化を図る研究開発を行う。最終的には、BIMデータ作成を目標にしている(図13(a)参照)。

(b) 線源・線量推定解析の高速化

1.で開発整備する詳細解析支援システム 「3D-ADRES-Indoor Pro」では、線源・線量 率の高精度マップを出力する他、線源対策や 被ばく評価を実施するため、各解析プロセス にて、放射線のシミュレーションを繰り返し 行う必要がある。その際、高い精度を得るに は、計算時間がかかるシミュレーションが必 要となる。従って、ハイエンド計算機で上記 シミュレーションを動作させることも想定 されるが、1Fでの適用性を向上させるには、 可能な限り高速化を実現させ、PC等での利 用が必須であり、放射線シミュレーションの サロゲーションモデルの構築(図13(b)参照) が一つの解決手段となる。

(c) 線源・線量推定解析の精度向上

本課題では、1.にて実施する1F屋内の詳 細デジタル情報(構造及び線量等の情報)取 得手段の効率化を目標とする研究開発を行 う。1F屋内構造は複雑であり、狭隘部や高 所での構造情報や線量率情報の取得が求めら れているが、線量が高く検出器を開発調整す る必要がある他、遠隔操作による計測となる ため、ロボット制御が必須となる。従って、 本課題では、1F屋内での有効な環境情報取 得性能向上のための研究開発を行う(図13 (c)参照)。

(d) 線源・線量推定解析の高機能化

1F現場での複雑環境の一つの課題として、 例えば、計測作業等による現場立ち入りによ り、擾乱が加わることで、屋内ダスト濃度が 上昇するなどの現象が想定される。そのよう なケースでは、搬入機器汚染が発生する原因 となる他、本事業の主たる目標である作業者 の被ばく評価に対し、追加評価(内部被ばく が主となる)が必要になると考えられる。従っ て、当該課題では、重要な1F現場の解析対 象にもなりうると考えられるダスト挙動予測 の研究開発を実施する(図13 (d) 参照)。

6. まとめ

本事業の目的は、廃炉現場で作業者の被ば く低減を図るという最も重要な課題の解決に 当たって、最新のデジタル技術を適用するこ とで、最適な解決策を提示することにある。 尚、その目的達成に当たっては、当初(前 期プロジェクト)、最小限のモニタリングの 下、線源を逆推定する技術の開発が求められ たが、機械学習技術の一つであるLASSOの 派生モデルを適用することで、複雑な構造物 を多数含むような原子炉建屋内においても、 精度の高い逆推定が可能であることが分かっ た。この成果を活かし、後期プロジェクトで は、開発した逆推定技術を現場でも有効に活 用可能とするためのシステム開発を実施す る。また、現場での有効活用という目的を達 成するための課題を抽出し、それらを解決す るため、4つの研究開発項目を設け、各々の 研究開発に取り組む。

以上、本稿を通じて記したように、廃炉現 場では、特有の制約も多く、研究開発成果の 活用は容易ではないが、高い放射線量という 目に見えない厳しい環境下にて、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る。私たち JAEA及び関係する技術者は、この機会を充 分に活かし、新たなデジタル技術を創出し、 廃炉への活用を通して、広く、産業界での活 用も可能な技術への展開をも視野に入れ、日



図13 後期プロジェクトb.チームの4つの研究開発の柱

本の産業力向上を目指し研究開発を進めてい く。

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、高崎新氏、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。前期プロジェクト有識者で 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JMTR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 コンピュータやハイエンド計算機を利用して いる。システム計算科学センタースタッフー 同のご協力に感謝する。前期プロジェクトで 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及び基礎 エセンター・高橋史明GL他、メンバー一同 のご協力に感謝する。

参考文献

- [1] 例: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).
- 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),

- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 山田進他、「原子炉建屋内環境での放 射線源逆推定に向けた改良型 Fused LASSO の開発」(submitted).
- [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] 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.
- [9] 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.

[10] 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.