

**令和3年度開始 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))
に係る補助事業**

2022年度 最終報告

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

本資料は「経済産業省の令和3年度開始廃炉・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))に係る補助事業」の一部として実施された成果を含みます。

1. プロジェクトの全体像	p.2
● 背景・目的	p.3
● 現場のニーズ	p.4
● 目標	p.5
● 実施項目	p.6
● 実施項目間の関連性	p.7
● 各研究チーム間の主なリンク	p.8
● 目標達成を判断する指標（TRL）と達成状況	p.9
2. 各実施項目の開発成果	p.14
3. 全体総括	p.170
4. 参考資料	p.172
● 実施スケジュール	p.173
● 当事業からの要求/提供インプット	p.175
● 実施体制	p.177
● 事業成果の情報発信	p.178

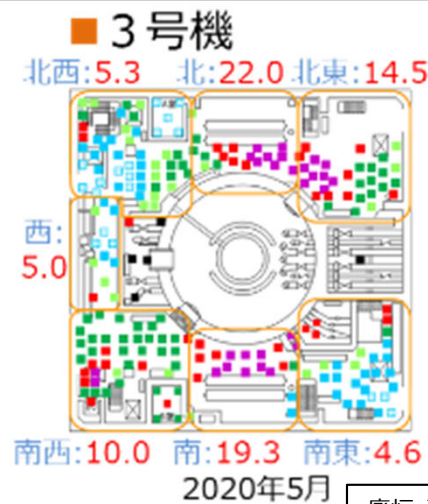
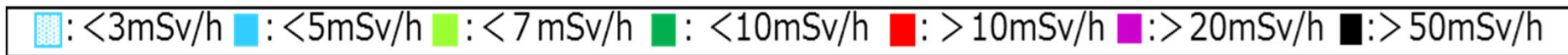
1. プロジェクトの全体像

燃料デブリの取り出しに先立って、事故による損傷状態が不明な場所が残り、未だに線量率が高い原子炉建屋（R/B）内でのアクセスルート構築準備作業を安全、効率的に行うための環境改善が必要。環境改善の重要な技術要素は、作業環境と線量・線源分布の把握、環境変化に対応した被ばく低減計画の策定であり、これに資する技術開発が求められている。

〈具体的には〉

- 建造物の状態（位置、形状、物性等）、空間線量率等の情報から建造物の表面の線源分布を推定する線源逆推定システムを開発する。
- 線源逆推定システムと、実環境データ等の計測・収集システム、可視化システム及びデータ処理・蓄積を行うデータベースを含む被ばく線量の推定評価システムの構築に必要な機能の要求事項、設計仕様について検討する。
- その際、システムの現場への実装及び現場の作業計画への適用性を踏まえる。
- 必要に応じて東京電力福島第一原子力発電所（1F）サイトにおける現場調査を行う。
- 被ばく線量の推定評価システムの要求事項、設計仕様について検証・評価するためのプロトタイプを試作する。
- 作業員の動線、機器配置、遠隔装置等の現場環境と解体、撤去等による環境変化及び線源を配置した施設モデルによる線量分布解析・実測を実施する。
- 解析・実測で得られた結果と試作したシステムによる推定結果の比較、照合を行い、被ばく線量の推定評価システムの有効性を確認する。

- 今後、燃料デブリ取り出し作業の本格化により、R/B内での作業増加が予想される。R/B内での作業を行うためには、**可能な限り作業員の被ばく低減を図り、安全かつ効率的な作業計画を策定**することが必要である。
- そのためには、
 - **環境データ（構造、線量率等）の調査**を効率的かつ精度良く行い、これらのデータを用いて、**的確に線源分布を推定**できるようにする。
 - 的確な線源分布を得ることにより、**機器等の撤去や除染による環境変化に対応しながら効率的な工事計画を策定することで効果的な線量低減工事を可能**にする。
 - 効率的な作業計画の策定及び確実な現場作業を実現するために、被ばく低減計画の段階から現場作業、作業結果の評価までを通じた関係者間の情報共有が必要である。そのために、**VR等のデジタル技術によってサイバー空間上に可視化**することが効果的である。



※左図は、1F現場の空間線量率が高いこと、及び各エリアの線量率の平均値を示している。

➡作業計画などの立案を行う際には、現場の3次元的な線量率分布の可視化情報が重要であると考えている。

原子炉建屋1階 各エリアの線量率の平均値 (単位 : mSv/h)

R/B内でのアクセスルート構築準備作業等において、
被ばくを伴わずに作業員の高線量下での被ばく低減を
サイバー空間上で検討できるシステムの構築を目標。

1F実空間（東京電力）

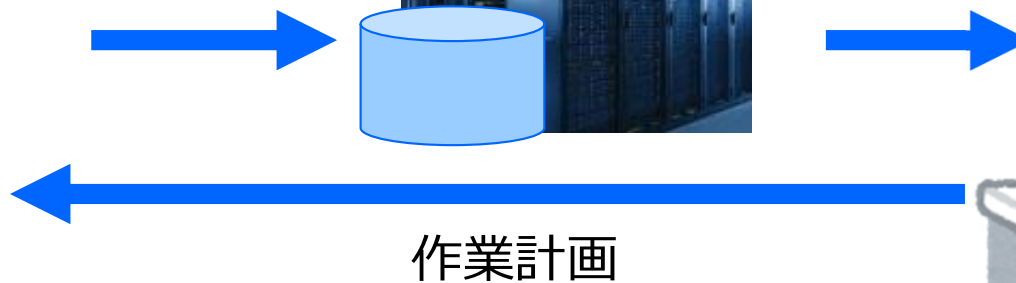
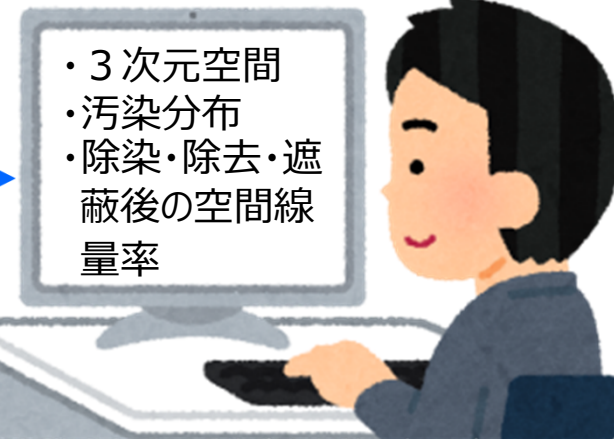


- ・空間線量率
- ・レーザー点群
- ・画像 等

プロトタイプシステム
(JAEA)



サイバー空間
(東京電力居室)



本事業を達成するために、以下の3サブテーマについて総合的に開発を進める。

a.線源逆推定・線量率推定技術開発

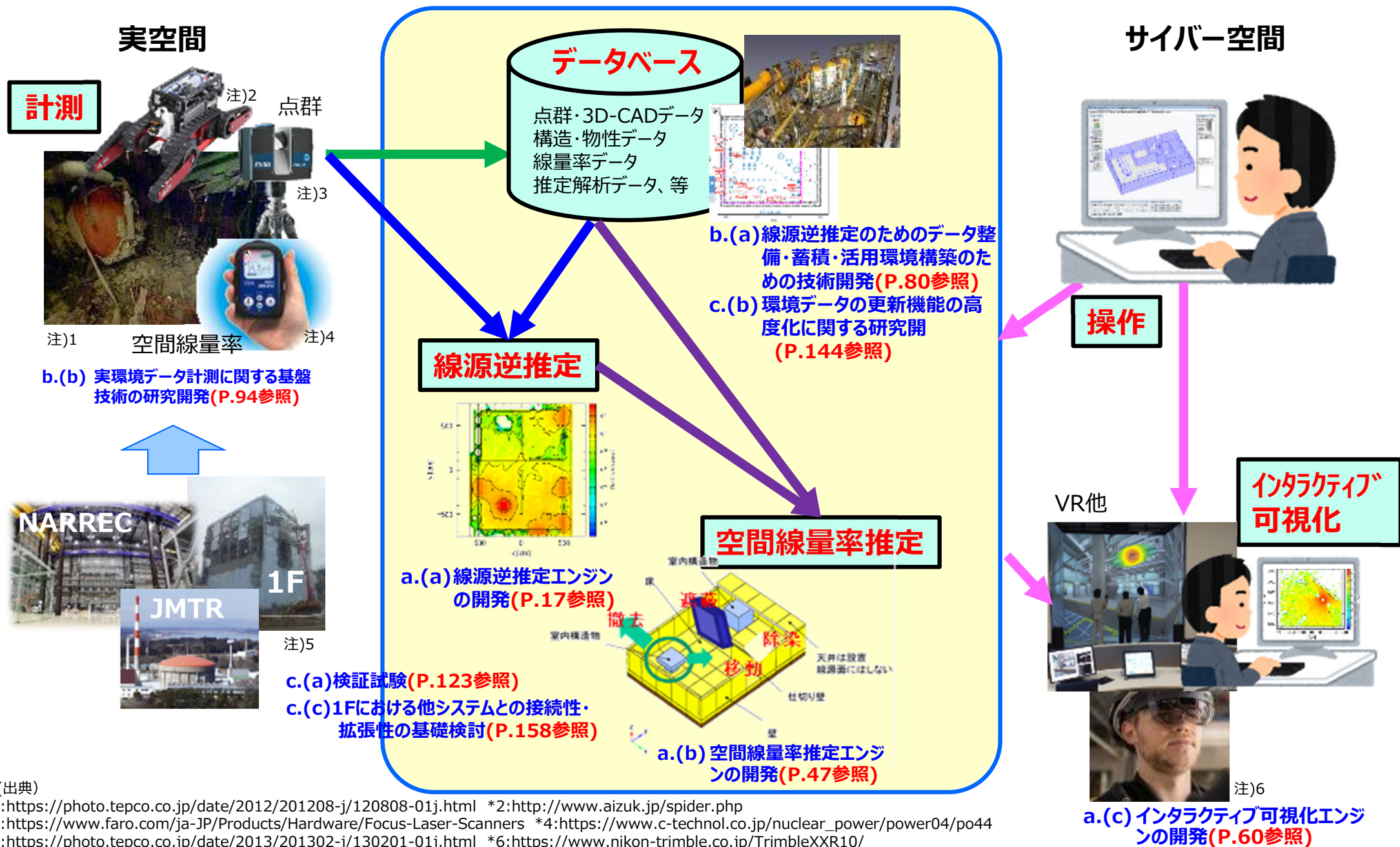
- (a)線源逆推定エンジンの開発
- (b)空間線量率推定エンジンの開発
- (c)インタラクティブ可視化エンジンの開発

b.実環境データのデジタル化基盤技術の開発

- (a)線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発
- (b)実環境データ計測に関する基盤技術の研究開発
 - ①放射線計測技術の研究開発
 - ②データ収集効率化技術の研究開発
 - ③高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発

c.現場適用のための技術開発

- (a)検証試験
 - ①線源逆推定計算手法の検証試験
 - ②線源・線量率推定システムの有効性評価
- (b)環境データの更新機能の高度化に関する研究開発
- (c)1Fにおける他システムとの接続性・拡張性の基礎検討



注(出典)

*1: <https://photo.tepco.co.jp/date/2012/201208-j/120808-01j.html> *2: <http://www.aizuk.jp/spider.php>

*3: <https://www.faro.com/ja-JP/Products/Hardware/Focus-Laser-Scanners> *4: https://www.c-technol.co.jp/nuclear_power/power04/po44

*5: <https://photo.tepco.co.jp/date/2013/201302-j/130201-01j.html> *6: <https://www.nikon-trimble.co.jp/TrimbleXXR10/>



各研究チーム間の主なリンク

項目	2021(令和3)年度			2022(令和4)年度		
a. 線源逆推定・線量率技術開発	(a)線源逆推定エンジンの開発	線源逆推定関連ツール（観測点指示、拡張LASSO、複数線源対応LASSO、ベイズ統計手法活用）の開発、モンテカルロ輸送計算の超並列化、高速化、最適化		逆推定計算のエンジン化と検証		
	(b)空間線量率推定エンジンの開発	空間線量率推定関連ツール（高強度線源対策デジタル化・計算簡略化）の開発、モンテカルロ輸送計算の超並列化・高速化・最適化		逆推定計算ツール群のエンジン化と検証		
	(c)インタラクティブ可視化エンジンの開発	インタラクティブ可視化エンジンの開発		対策効果推定計算のエンジン化と検証		
b. 実環境データのデジタル化基盤技術の開発	(a)線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発	データベース構造設計 データ抽出・変換機能設計		データベース試作モデルの開発		
	(b)実環境データ計測に関する基盤技術の研究開発	放射線計測手法の試作モデルの開発 作業員運搬型、遠隔操作型計測手法の試作モデル開発		試作モデルの動作検証実験		
		高等等計測手法・核種弁別手法試作モデルの開発				
c. 現場適用のための技術開発	(a)検証試験	線源逆推定手法検証試験（JMTR） 試験場の検討		JMTRでの線源・線量率推定システム有効性評価 線源逆推定手法検証試験（1F） 試験場の製作		
	(b)環境データの更新機能の高度化に関する研究開発	環境データ更新機能の高度化エンジンの開発		試験場での線源・線量率推定システム有効性評価 高度化エンジン評価試験		
	(c)1Fにおける他システムとの	1Fにおける他システムとの接続性・拡張性の基礎検討				
主なマイルストーン	接続性・拡張性の基礎検討 有識者会議▽		▽HP:線源逆推定エンジン構成ツールの仕様等確認 有識者会議▽ 中間報告会△	▽HP:逆推定・線量率推定関連機能の適正化確認 有識者会議▽ 年度末報告会△	▽HP:開発プロトタイプシステム試作の検証 有識者会議▽ 中間報告会△	
					有識者会議▽ 最終報告会△	

目標達成を判断する指標(TRL)と達成状況(1/5)

項目	目標達成を判断する指標の設定	達成状況
a.	(a)線源逆推定エンジンの開発	<ul style="list-style-type: none"> ・逆推定に係る「観測点指示ツール」、「寄与率行列作成ツール」、「逆推定(LASSO)計算ツール」、「ベイズ統計手法活用ツール」及び「線量率3D分布高速化ツール」を開発。(pp.30-46) ・上記ツール類から構成される「線源逆推定エンジン」を組上げ、入力データ（構造データ・観測線量率）から線源分布の推定を可能とする一連の動作検証試験を実施・確認。(p.139)
		<ul style="list-style-type: none"> ・上記線源逆推定エンジンをリモートデスクトップ等で遠隔地間（例：柏－楢葉）にて動作（線源逆推定）可能なWindowsデスクトップアプリ「3D-ADRES-Indoor」に集約する開発を実施した他、動作結果を遠隔共有するWEBアプリを開発し確認。(p.58、p.71)
	(b)空間線量率推定エンジンの開発	<ul style="list-style-type: none"> ・空間線量率推定に係る高強度線源対策（除染、除去、移動、遮蔽）時の「線量率分布計算ツール」等を開発し、モンテカルロ輸送コード（PHITS）及び簡易推定コードを使用可能とするシステムを構築した他、計算ツールをエンジン化した「空間線量率推定エンジン」を組み上げ、動作検証試験を実施・確認。(pp.47-59)
		<ul style="list-style-type: none"> ・上記空間線量率推定エンジンをリモートデスクトップ等で遠隔地間（例：柏－楢葉）にて動作（空間線量率推定）可能なWindowsデスクトップアプリ「3D-ADRES-Indoor」に集約する開発を実施した他、動作結果を遠隔共有するWEBアプリを開発し確認。(p.58、p.71)

TRLレベル1（基礎研究）：開発、エンジニアリングの対象について、基本的内容を明確化している段階。

TRLレベル2（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。

TRLレベル3（応用研究）：従来経験を応用、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。

TRLレベル4（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。

TRLレベル5（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

TRLレベル6（模擬実証）：現場での実証を行う段階

TRLレベル7（実運用）：実用化が完了している段階

	項目	目標達成を判断する指標の設定	達成状況
a.	(c)インタラクティブ可視化エンジンの開発	(TRL : 1⇒3) 「線源逆推定エンジン」及び「空間線量率推定エンジン」の計算結果のAR・VR可視化システム開発。	<ul style="list-style-type: none"> ・逆推定した線源分布結果の可視化システム（Hololens2 等）を開発。 ・推定した空間線量率分布結果をAR・VRで可視化。 ・AR可視化の動作を1F5号機にて実施。 (pp.60-75、 p.140)

TRLレベル1（基礎研究）：開発、エンジニアリングの対象について、基本的内容を明確化している段階。

TRLレベル2（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。

TRLレベル3（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。

TRLレベル4（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。

TRLレベル5（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

TRLレベル6（模擬実証）：現場での実証を行う段階

TRLレベル7（実運用）：実用化が完了している段階

目標達成を判断する指標(TRL)と達成状況(3/5)

項目	目標達成を判断する指標の設定	達成状況	
b.	(a)線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発	<ul style="list-style-type: none"> データ形式分析等を踏まえ、DB構造、汎用性等の要求仕様の抽出、拡張性を考慮したストレージ設計、ハード構成等の論理的構造概念の構築を踏まえ、DB試作モデルを開発。(pp.81-93) 動作検証ではデータに適切なタグ付けが行われ、入出力動作可能であることを確認。(p.141) 	
	(b)実環境データ計測に関する基盤技術の研究開発	(TRL : 1⇒2) 放射線計測手法の試作モデルの開発、成立性評価の実施。	<ul style="list-style-type: none"> 放射線計測装置の試作モデルの仕様検討、耐放射性データ等取得し、既存測定器(γ線イメージャ、γ線スペクトロメータ)を遮蔽した試作モデル構築。(pp.95-99) 照射場で高線量率環境において特性評価試験を実施。(pp.99-100)
		(TRL : 1⇒3) データ計測ユニットの検証実験用試作モデルの製作、動作検証及び実験結果の提示。	<ul style="list-style-type: none"> データ計測ユニット(可搬型・遠隔操作型)の基本設計、試作モデル開発、機能確認を行い、検証実験による動作確認並びに測定位置及び線量率データを取得。遠隔操作移動及び空間線量率センサ昇降を組合わせた計測が可能であることを確認。(pp.101-111、p.141)
		(TRL : 1⇒2) 高所等計測手法の試作モデルの詳細設計、試作(一部)、成立性評価・課題抽出。	<ul style="list-style-type: none"> 1F現場投入された高所調査用ロボット事例の調査・分析を踏まえて、試作モデルの概念設計及び基本設計、詳細設計、試作(一部)、成立性評価・課題抽出の実施。 高所調査システムの課題である粉塵巻上低減策と制御精度の検証を行い、成立性確認。(pp.112-115)
		(TRL : 1⇒2) 核種弁別方法の試作モデルの開発、性能評価結果の提示。	<ul style="list-style-type: none"> UAVに搭載可能な小型軽量化を図ったホスウィッチ検出器モジュールを開発、目標値(150g)以下のホスウィッチ検出器を製作し、方向特性を確認済(β・γ線弁別可能を確認)。(pp.117-118)

TRLレベル 1 (基礎研究) : 開発、エンジニアリングの対象について、基本的内容を明確化している段階。

TRLレベル 2 (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。

TRLレベル 3 (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。

TRLレベル 4 (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。

TRLレベル 5 (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

TRLレベル 6 (模擬実証) : 現場での実証を行う段階

TRLレベル 7 (実運用) : 実用化が完了している段階

目標達成を判断する指標(TRL)と達成状況(4/5)

項目	目標達成を判断する指標の設定	達成状況
c.	(TRL : 1⇒3) 線源逆推定計算手法のJMTRにおける検証試験の実施。	<ul style="list-style-type: none"> ・JMTRプールカナル循環系機器室の簡易解析モデルで検証試験を実施。 ・詳細モデル（サーフェスデータ）で逆推定解析結果と現場実測値の比較を実施し、直達線のみで得られた線量率分布（誤推定）の補正を確認（直達線、散乱線、透過線の考慮により実測値に近い結果を確認）。(pp.123-132)
	(TRL : 1⇒3) 線源逆推定計算手法の1Fにおける検証試験データ整備、検証試験の実施。	<ul style="list-style-type: none"> ・1Fにおける検証試験データを整備。(p.133) ・逆推定から空間線量率分布の算出結果と実測値との比較等の検証試験の実施。(p.69) ・1F2号機の1階全域のCADデータ（一部）及び線量率データ（限定的な範囲）を基に線源逆推定エンジンで動作検証を実施。(p.69)
	(TRL : 1⇒4) 試験場の製作、JMTR及び試験場での有効性評価実施。	<ul style="list-style-type: none"> ・線源・線量率推定システムの有効性評価フローの作成、評価要素の抽出。(pp.135-136) ・評価要素を踏まえ、概念検討、設計仕様を具体化を図り、1F現場の代表的な構造物を模擬した試験場を設置。(p.137) ・線源・線量率推定システムについて、JMTR及び試験場における有効性評価を実施。(pp.138-143)
	(b)環境データの更新機能の高度化に関する研究開発	<ul style="list-style-type: none"> ・自動同期、差分抽出、自動認識及び自動変換機能を試験場にて現場変化を想定した有効性評価を実施し、点群データ及び3Dモデルデータを用いた試作モデル動作を検証。(pp.145-157) ・差分計算による追加・除去された点群の抽出、各差分点群に対する属性ラベルの推定が可能であることを確認。(pp.155-156)

- TRLレベル1（基礎研究）：開発、エンジニアリングの対象について、基本的内容を明確化している段階。
- TRLレベル2（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。
- TRLレベル3（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。
- TRLレベル4（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。
- TRLレベル5（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
- TRLレベル6（模擬実証）：現場での実証を行う段階
- TRLレベル7（実運用）：実用化が完了している段階

項目	目標達成を判断する指標の設定	達成状況
c. (c)1Fにおける他システムとの接続性・拡張性の基礎検討	(TRL : 1⇒2) 1Fの現状分析・調査及び先行事例の調査結果を提示し、接続性・拡張性を明確化する。	<ul style="list-style-type: none"> ・運用内容や事例、業界の最良慣行、国際的推奨事項等の調査・整理・分析を実施し、海外原子力業界のデジタルシステム活用実績及び課題の整理。(pp.158-162) ・プロセス検討、プロジェクト定義、要求事項抽出についての整理及びシステムの接続性・拡張性に関する要素・定義を具体化し、課題抽出。(pp.163-166)

TRLレベル1 (基礎研究) : 開発、エンジニアリングの対象について、基本的内容を明確化している段階。

TRLレベル2 (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。

TRLレベル3 (応用研究) : 従来経験に応用、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。

TRLレベル4 (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。

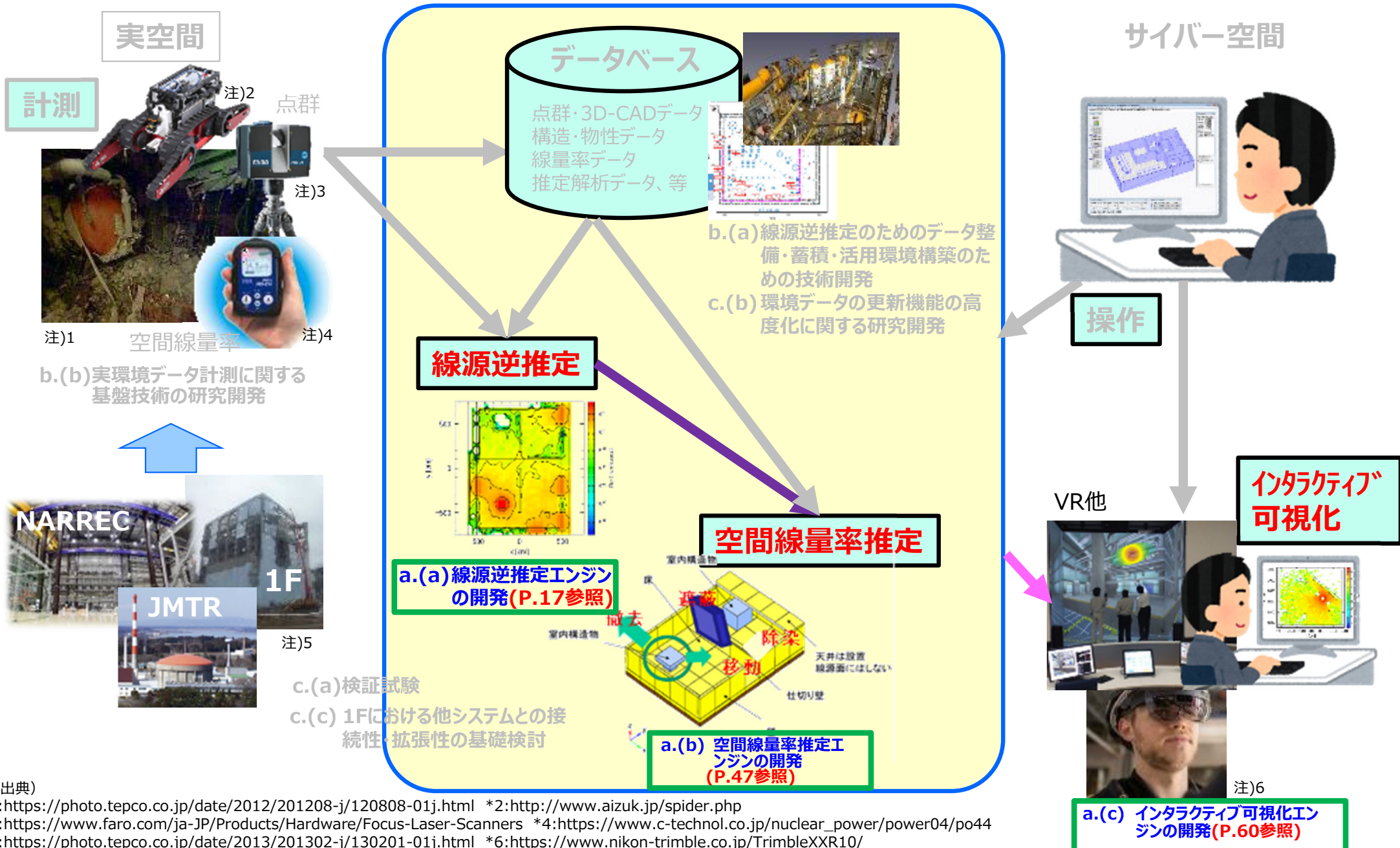
TRLレベル5 (実用化研究) : 実機ベースでのプロト機を製作し、工場等で模擬環境下での実証を行う段階

TRLレベル6 (模擬実証) : 現場での実証を行う段階

TRLレベル7 (実運用) : 実用化が完了している段階

2.各実施項目の開発成果

- a. 線源逆推定・線量率推定技術開発
 - (a) 線源逆推定エンジンの開発
 - (b) 空間線量率推定エンジンの開発
 - (c) インタラクティブ可視化エンジンの開発



注(出典)

*1: <https://photo.tepco.co.jp/date/2012/201208-j/120808-01j.html> *2: <http://www.aizuk.jp/spider.php>

*3: <https://www.faro.com/ja-JP/Products/Hardware/Focus-Laser-Scanners> *4: https://www.c-technol.co.jp/nuclear_power/power04/po44

*5: <https://photo.tepco.co.jp/date/2013/201302-j/130201-01j.html> *6: <https://www.nikon-trimble.co.jp/TrimbleXXR10/>

● 目的

廃炉が実施される1F屋内の構造物の形状・属性データと測定された線量率の測定情報をインプットとして、最新の機械学習である情報の粗視化を実現するスパースモデリングのアルゴリズムLASSOを用いて、屋内構造物表面（浸透した線源も含む。）の線源分布を逆推定する「線源逆推定エンジン」を開発する。

● 反映先

高強度線源に対する対策を検討する「空間線量率推定エンジン」、線源分布の可視化を行う「インタラクティブ可視化エンジン」のインプットとする。

● スケジュール

実施内容	2021(令和3)年度	2022(令和4)年度
a.(a)線源逆推定エンジンの開発		
①逆推定に最適な観測点数と観測点位置を指示するツールの開発作業(p.30)		
②寄与率行列作成のためのモンテカルロ輸送計算の超並列化及びその高速化・最適化作業(p.31)		
③逆推定ソルバーの高速化・最適化とエンジン実装に係る作業(P.31)		
④逆推定線源分布情報に基づいたモンテカルロ輸送計算の超並列化及びその高速化・最適化作業(p.32)		
⑤逆推定計算のエンジン化及び検証作業(p.33)		
⑥逆推定ツール群のエンジン化及び検証作業(p.36)		
⑦逆推定遠隔共有WEBアプリの開発作業(p.58)		
⑧推定線量率分布の精度向上に向けたベイズ統計手法活用ツールの開発作業(p.32、p.37)		

a.(a)における課題とその解決策(一覧)

No.	当初の課題	解決策等
1	<p>【当初の課題】 1 F現場では十分なモニタリング(線量率測定)が困難 ※限定された線量率情報でも線源分布の逆推定可能な手法の開発が必須</p>	<p>情報量が不足する不良設定問題 ⇒LASSOの利用が最適と判断し、適用</p>
2	<p>簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題① ⇒広範な面積分布($10^2\text{m}^2 \sim 10^{-6}\text{m}^2$) ※各面の寄与が大きく異なる</p>	<p>現実の炉内構造に近づけるために「マルチフラクタル状メッシュ分布」とし、高強度線源(正解)に解を収束(最適化)させることが可能であることを確認し(擬-fused LASSOと命名)適用した。</p>
3	<p>簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題② ⇒膨大な面数計算コストの増大 ※トータルの計算コストの増大</p>	<p>1)直達線のみ、2)ビルドアップファクターで直達線・散乱線及び透過線を考慮した簡易計算方法を開発</p>
4	<p>簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題③ ⇒線量率をどこで観測すべきか? ※全ての構造面が線源候補面の場合、観測点の指示が困難であり、それにより計算コストが膨大になる</p>	<p>観測指示点選択自由度を大幅減で解決</p>

※当初の課題はNo.1であり、No.2～No.4は開発を進めていくうえで新たに抽出された課題である。

線源逆推定エンジンの開発における当初の課題とその解決策

当初課題

1F ⇒ 十分なモニタリング（線量率測定）が困難
⇒ 限定された線量率情報でも線源分布の逆推定可能な手法の開発が必須

当初解決策

情報量が不足する不良設定問題 ⇒ LASSO（※）の利用が最適と判断
 ※物事に潜むスパース性（高強度線源はスポット化している）を利用し線源を逆推定

逆推定の数学表現

観測点ベクトル

寄与率行列

面線源ベクトル

$$M \begin{pmatrix} \color{red}{\bullet} \\ \color{red}{\bullet} \\ \color{red}{\bullet} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C \\ \sim \text{正規分布行列} \end{pmatrix} S \begin{pmatrix} \color{red}{\bullet} \\ \color{red}{\bullet} \\ \color{red}{\bullet} \\ \color{red}{\bullet} \\ \color{red}{\bullet} \\ \color{red}{\bullet} \\ \color{red}{\bullet} \end{pmatrix}$$

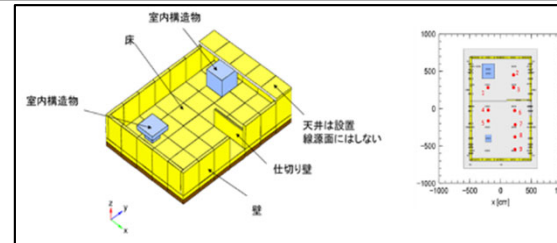
次元：m mの下限値を指定 次元：n

高強度線源はスパース（スポット化）である場合

LASSOは極めて有効な手段となる

最適化評価関数： $|M-CS|^2 + \lambda |S|$ → S推定

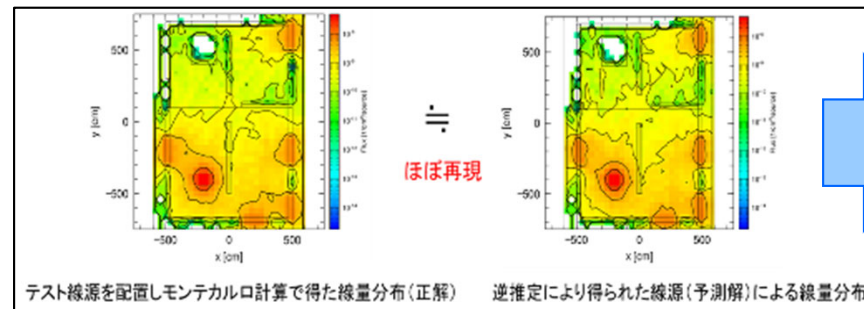
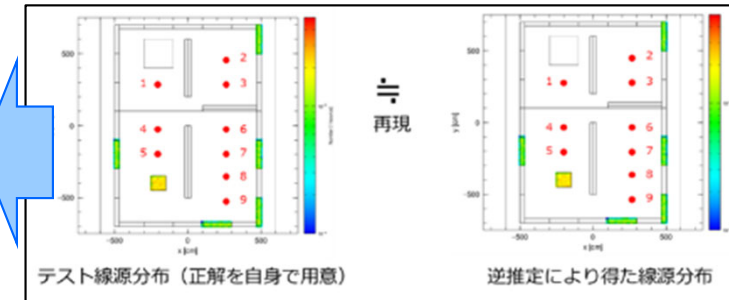
ホットスポットの位置と強度を見出すツールとして有望



- [初期条件]
- ① 図(右側)のように構造物を配置
 - ② 線源を配置
 - ③ 観測点(固定)を9点設定

順推定

先に9箇所の観測点を実測し、正解の線源分布を作っておく。逆推定を行い、その結果と正解を比較する

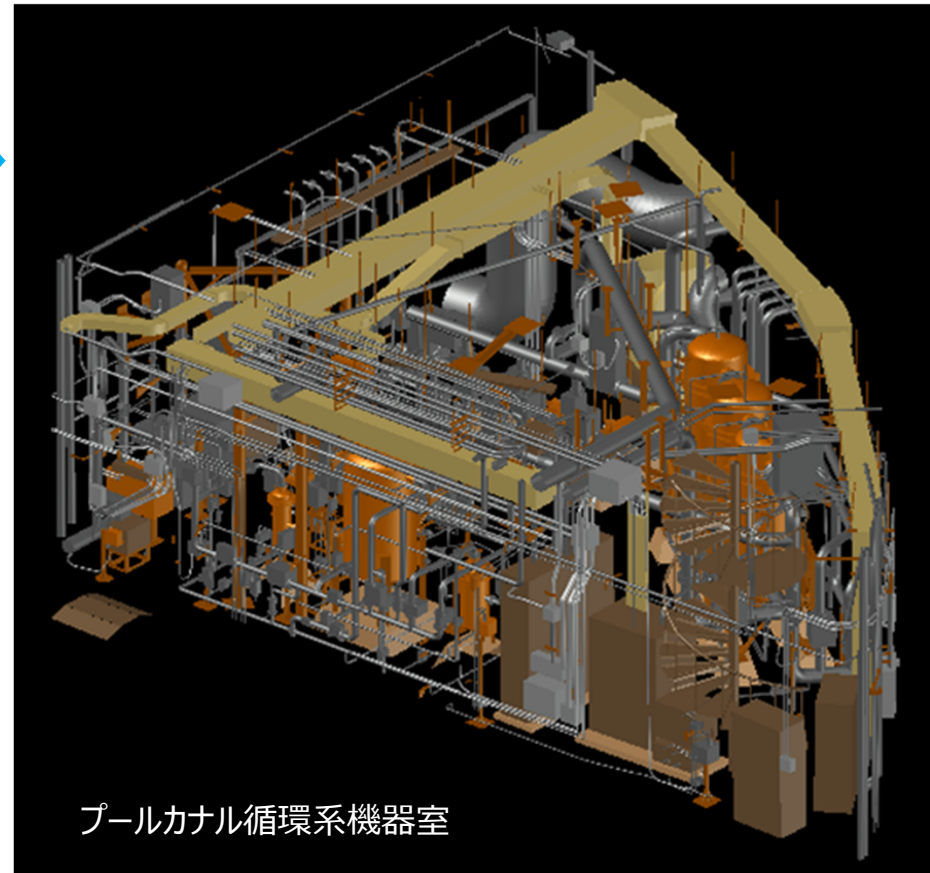
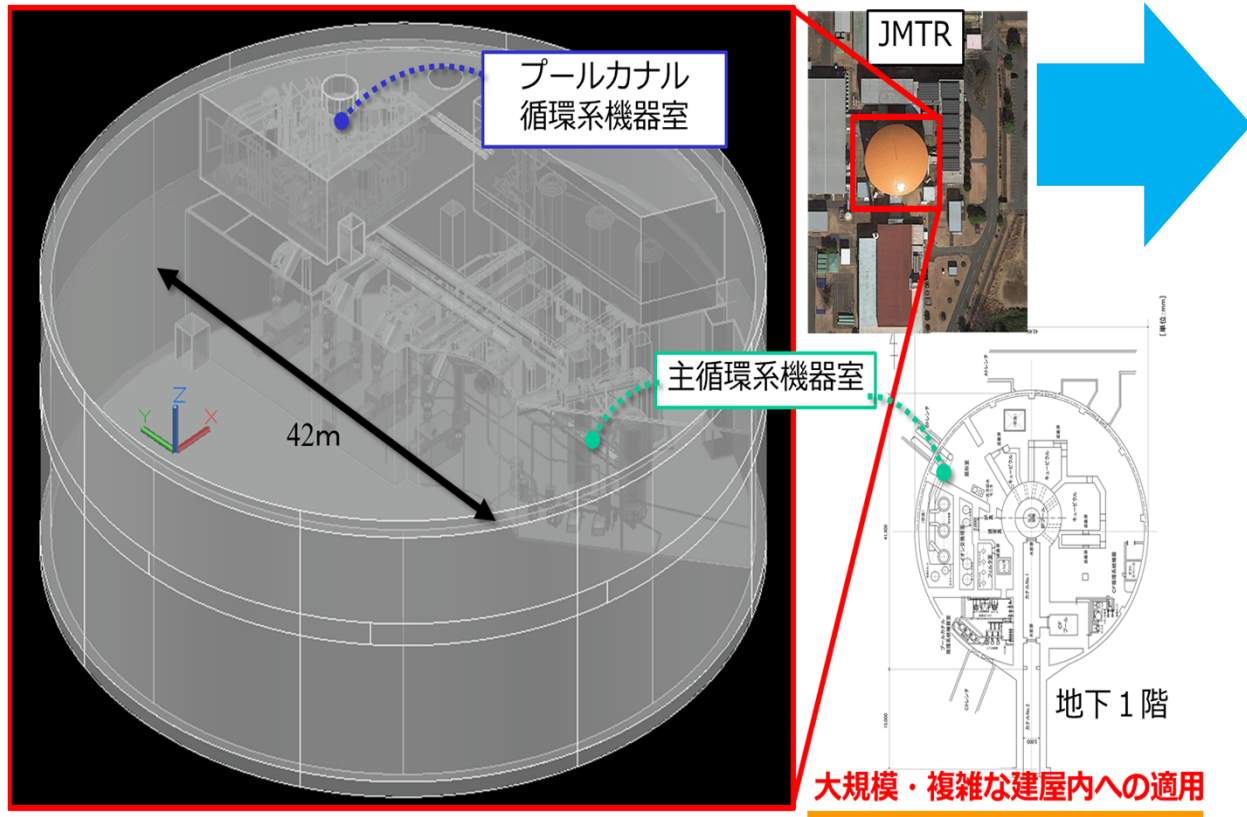


逆推定

線源の位置や個数などの情報が無い(見えない)状態で行うため、ブラインドテストとしての扱いをする場合がある。

簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題抽出とその解決策(1/10)

LASSOを**実際の原子炉(JMTR)屋内等**に適用⇒**線源分布の逆推定が可能かどうか**を検証



課題	①	広範な面積分布 ($10^2\text{m}^2 \sim 10^{-6}\text{m}^2$)	各面の寄与が大きく異なる
	②	膨大な面数 (~ 200万面数)	計算コストの増大

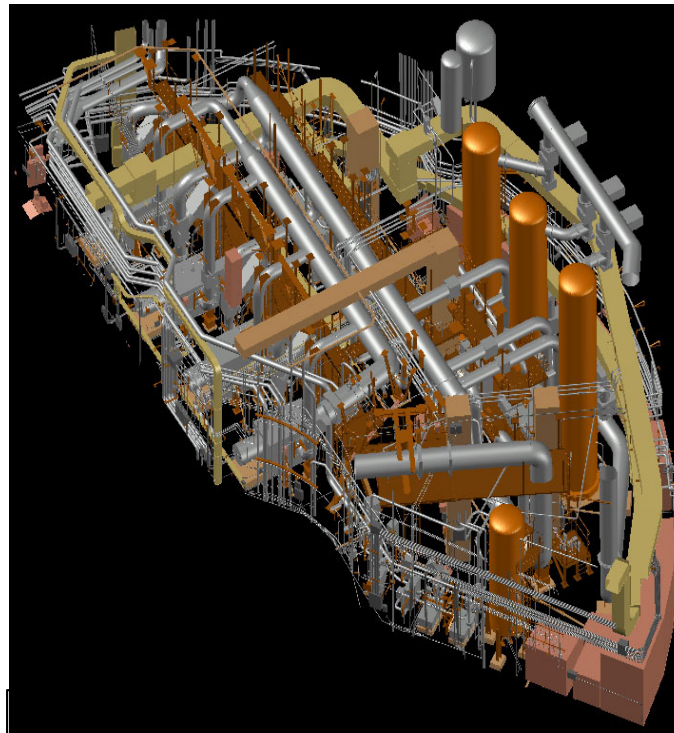
簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題抽出とその解決策(2/10)

事例(1) : JMTR

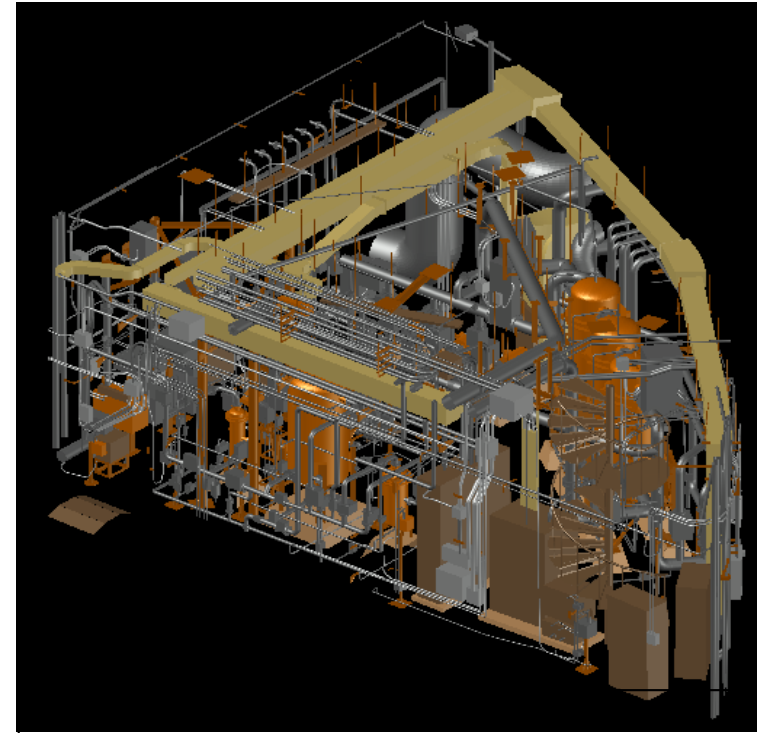
課題①

広範な面積分布 ($10^2\text{m}^2 \sim 10^{-6}\text{m}^2$)

セルの面積(m^2)	セルの頻度	
	主循環系機器室	プールカナル循環系機器室
$10 \sim 100$	0	14
$1 \sim 10$	19,287	1,196
$10^{-1} \sim 1$ m^2	60,388	10,446
$10^{-2} \sim 10^{-1}$	292,924	60,049
$10^{-3} \sim 10^{-2}$	807,607	249,337
$10^{-4} \sim 10^{-3}$	1,725,603	603,357
$10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm^2	1,693,145	532,199
$10^{-6} \sim 10^{-5}$	210,065	184,375
$10^{-7} \sim 10^{-6}$ mm^2	22,324	9,645
$10^{-8} \sim 10^{-7}$	42	1,171
$10^{-9} \sim 10^{-8}$	0	28
	4,831,385	1,651,817



主循環系機器室のCADデータ



プールカナル循環系機器室のCADデータ

例1: JMTR 対象2室

mm ~ m レベルの各面からの寄与をどのように処理するのか? ⇒ ナイーブなLASSOでは困難

簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題抽出とその解決策(3/10)

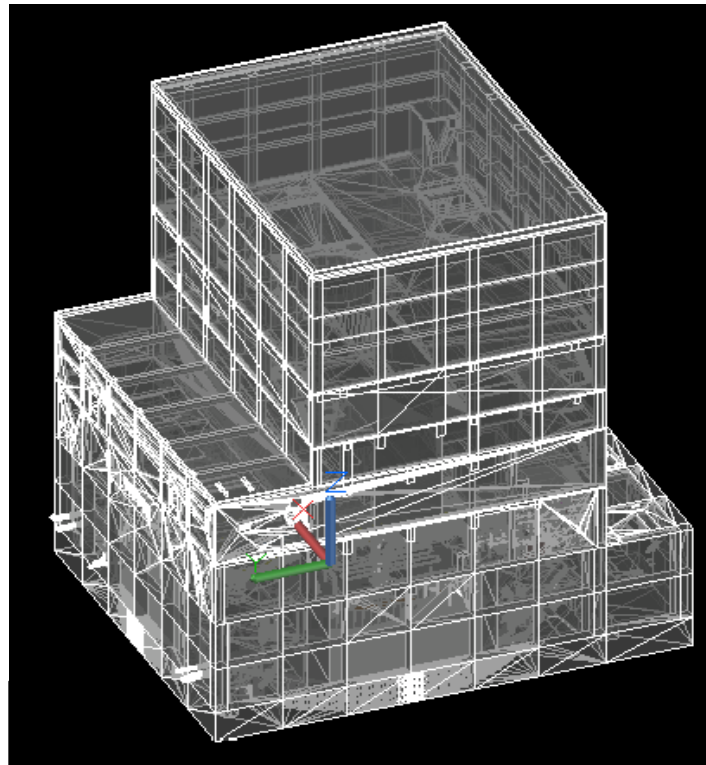
事例(2)：1F2号機1階

課題②

膨大な面数 → 面数の削減 (面数を10分の1以下) ~400万面

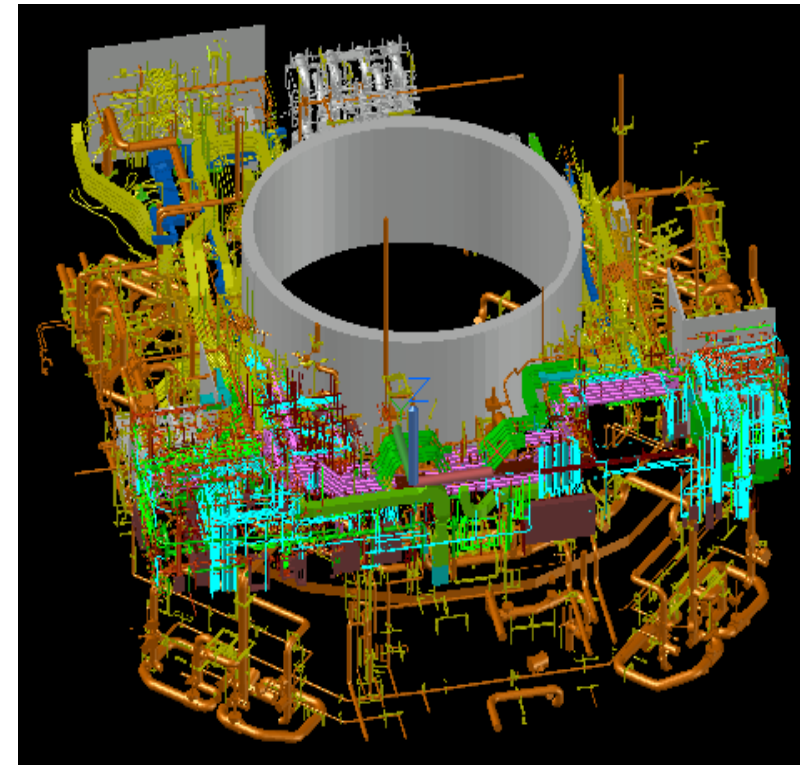
1/10低減系	セルの頻度
セルの面積(m ²)	1F2号機
10~100	24
1~10	70,057
10 ⁻¹ ~1 m ²	316,595
10 ⁻² ~10 ⁻¹	1,093,682
10 ⁻³ ~10 ⁻²	1,666,741
10 ⁻⁴ ~10 ⁻³	572,223
10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁴ cm ²	78,374
10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁵	20,211
10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁶ mm ²	11,745
10 ⁻⁸ ~10 ⁻⁷	3,900
10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁸	1,882
10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻⁹	2,311
10 ⁻¹¹ ~10 ⁻¹⁰	657
10 ⁻¹² ~10 ⁻¹¹	13
	3,838,415

1F2号機1階



2号機俯瞰的CADデータ

更なる大規模・複雑系



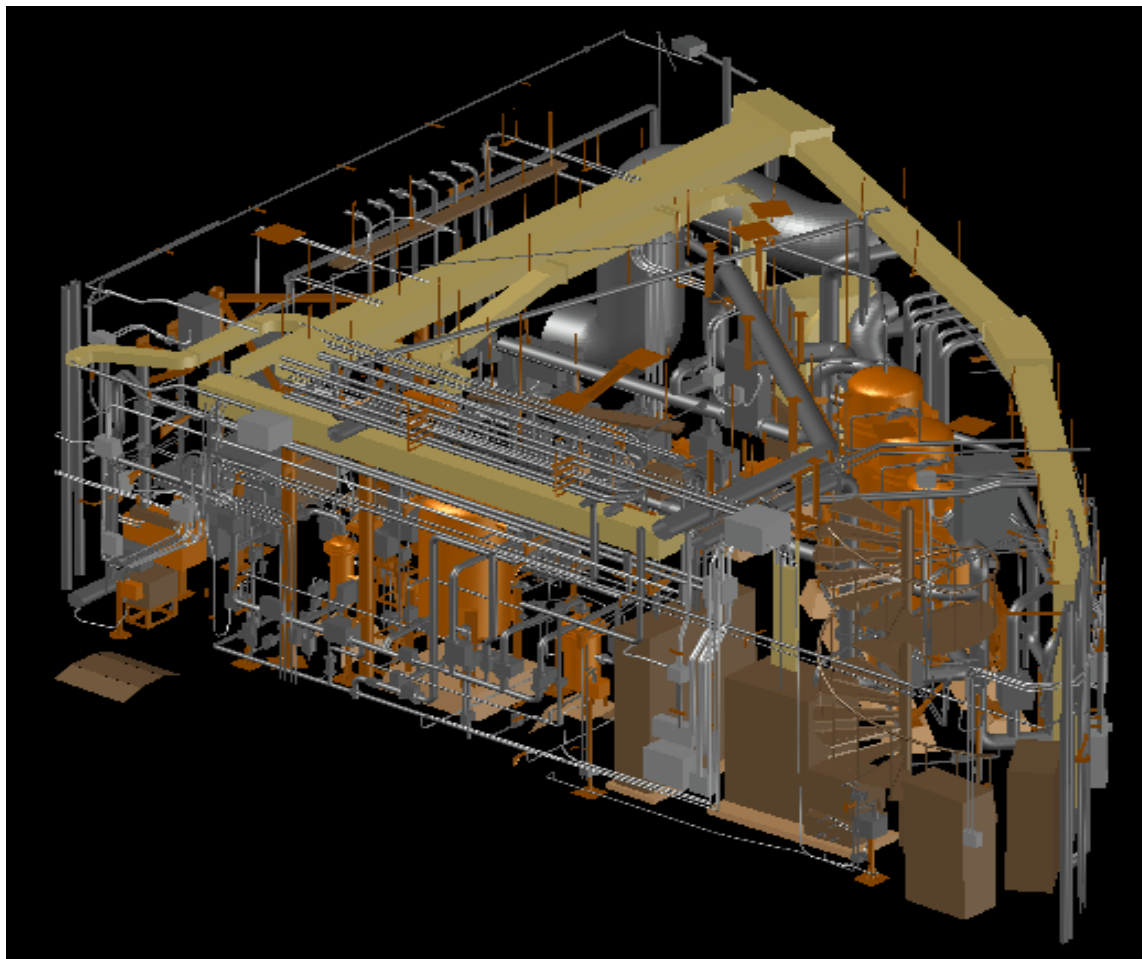
2号機1階CADデータ(躯体除く)

放射線計算 (モンテカルロ輸送計算) ⇒ 大きなボトルネック

簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題抽出とその解決策(4/10)

課題③

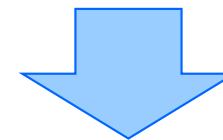
線量率をどこで観測すべきか？



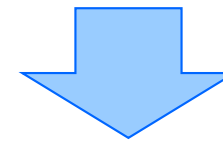
LASSO最適化評価関数： $|M-CS|^2 + \lambda |S|$

例：プールカナル循環系機器室

複雑な構造物が室内に多数あるケース

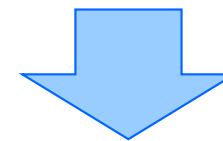


全ての構造面が線源候補面の場合
(ブラインドテスト)



観測点の指示が困難

全ての候補面にバランスをとり
観測点を指示する
(= 左記行列Cの縮退を避ける)



計算コストが膨大

簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題抽出とその解決策(5/10)

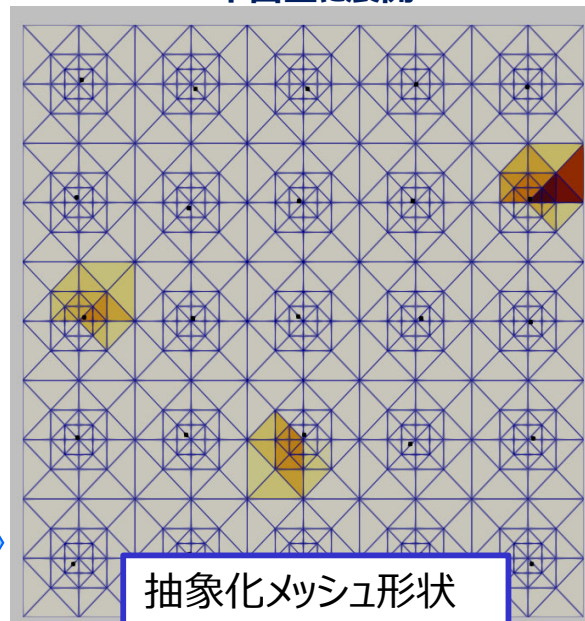
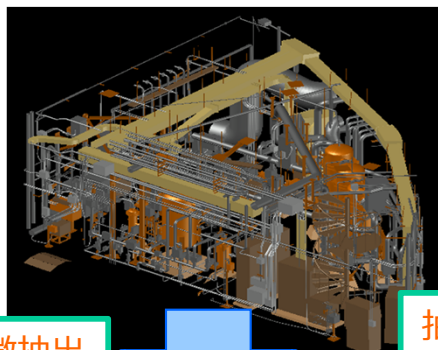
課題①解決策

広範な面積分布⇒現実の炉内構造 (マルチフラクタル状メッシュ分布)

課題の物理的背景を抽出し原理的課題解決を図る

JMTR構造物情報
(プールカナル循環系機器室)

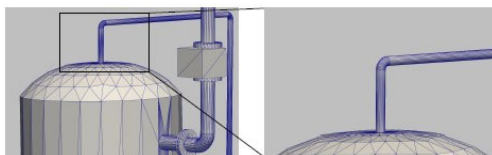
特徴的メッシュ形状を抽象化し
平面上に展開



特徴抽出

抽象化
写像

特徴的メッシュ形状



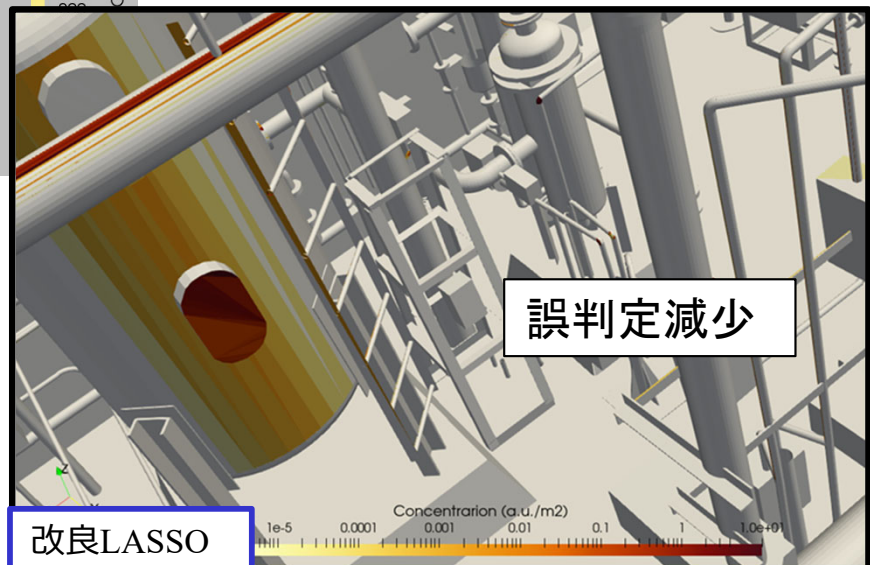
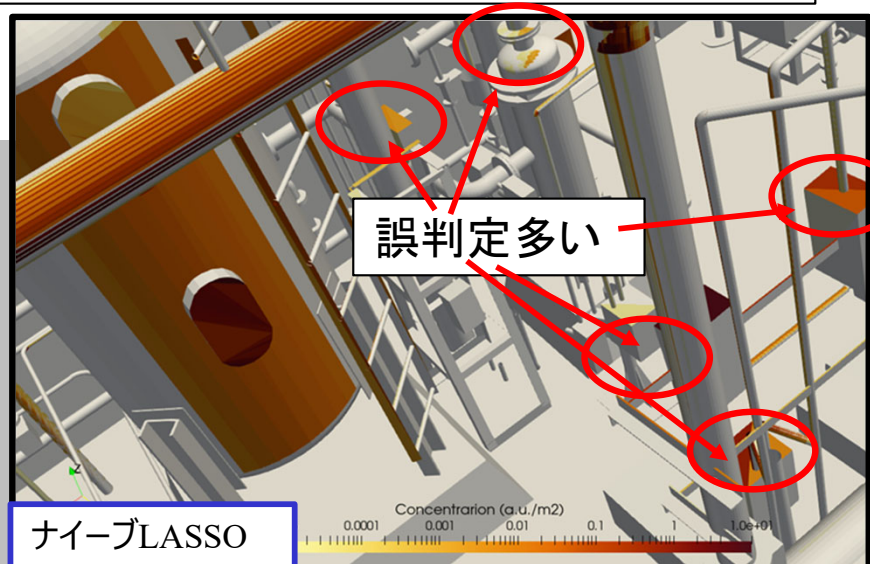
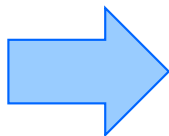
抽象化メッシュ形状

上記抽象化メッシュ形状で訓練⇒LASSO評価関数を工夫
(逆推定精度が高い評価関数を発見)

$$\frac{\|y - Ax\|_2^2 + \lambda_1 \|x\|_1}{+ \lambda_2 \left(\sum_{i,j \text{ は隣接セル}} \left| \frac{x_i}{S_i} - \frac{x_j}{S_j} \right|^2 \right)}$$

ナイーブLASSO

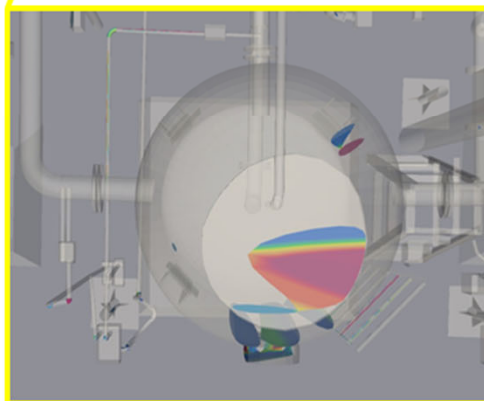
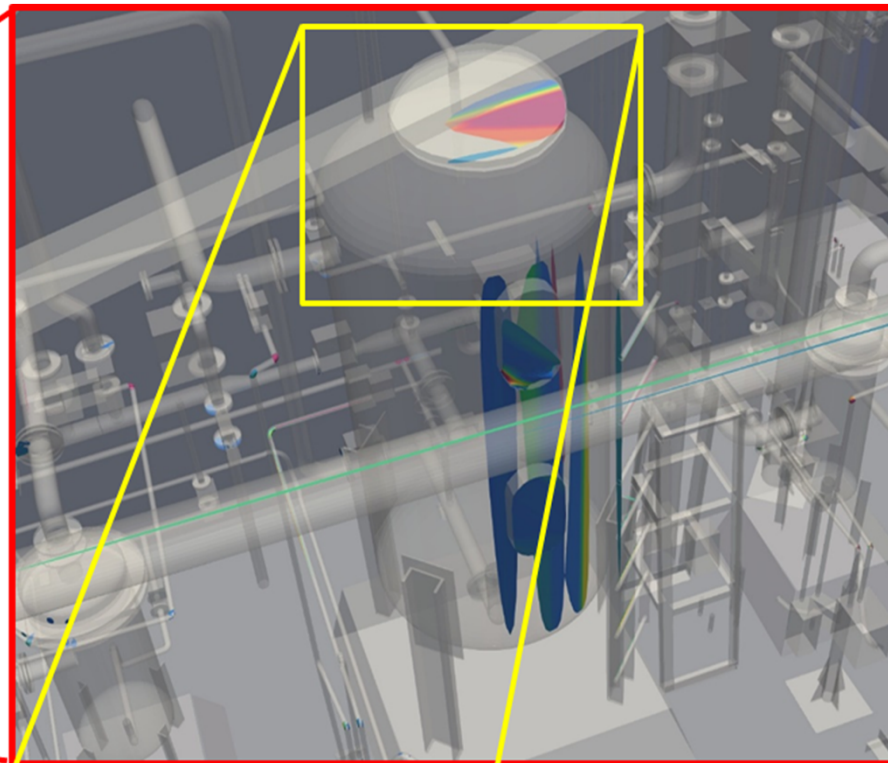
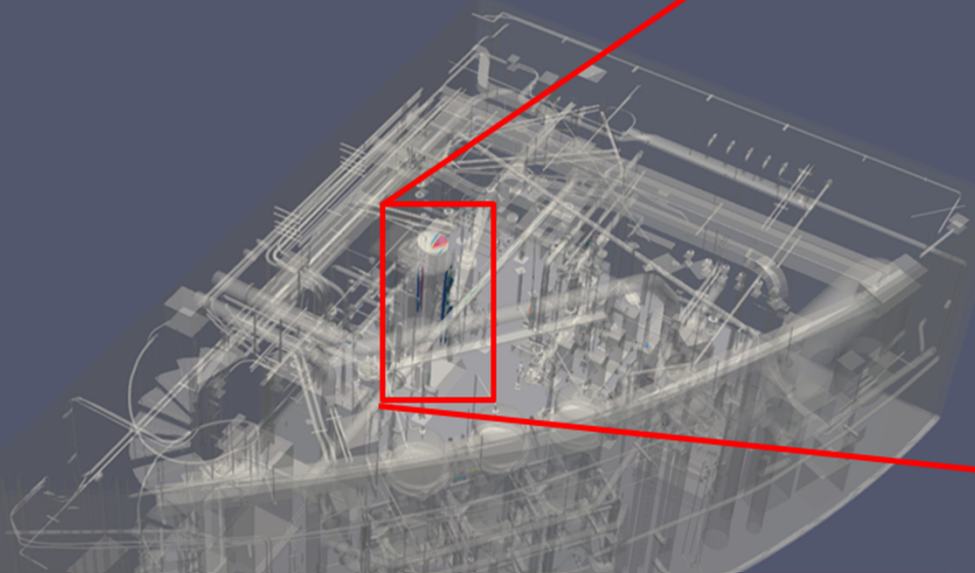
面積



簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題抽出とその解決策(6/10)

高強度線源 (正解) に解を収束 (最適化) させることが可能であることを確認

線源マップ (プールカナル循環系機器室)



擬-fused-LASSOと命名

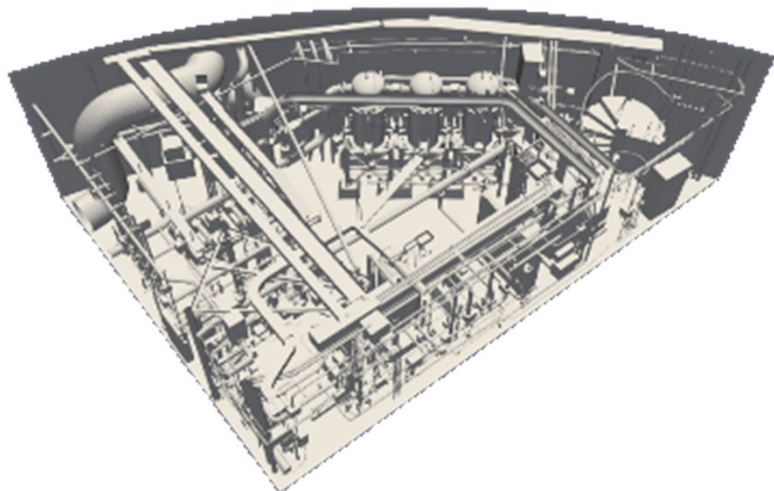


将来課題：
改良LASSOの更なる
精査(1F適用性)

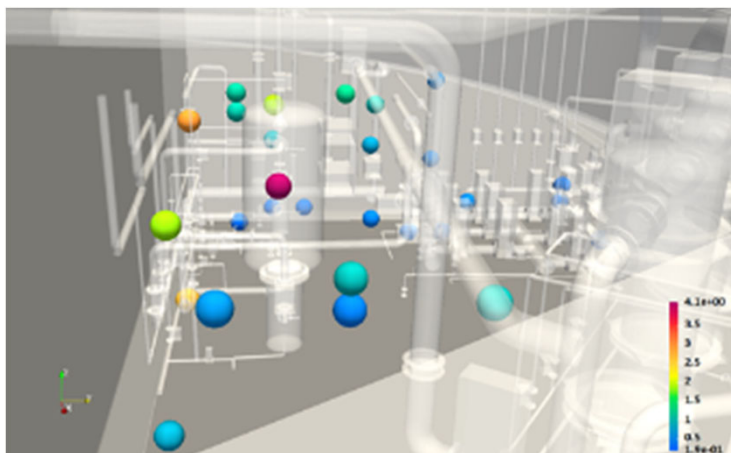
$$\|y - Ax\|_2^2 + \lambda_1 \|x\|_1 + \lambda_2 \left(\sum_{i,j \text{ は隣接セル}} \left| \frac{x_i}{S_i} - \frac{x_j}{S_j} \right|^2 \right)$$

簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題抽出とその解決策(7/10)

JMTRを用いた検証実験

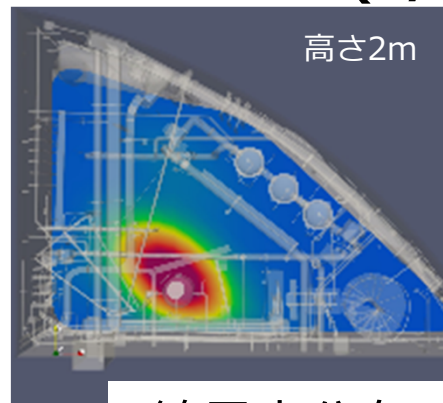


プールカナル循環系機器室 (CAD)

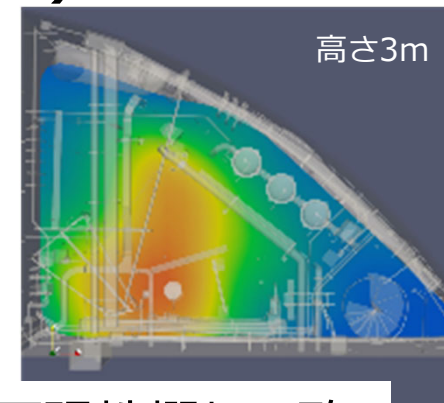


測定点と計測された線量率

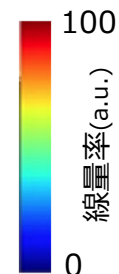
現場実測値



高さ2m

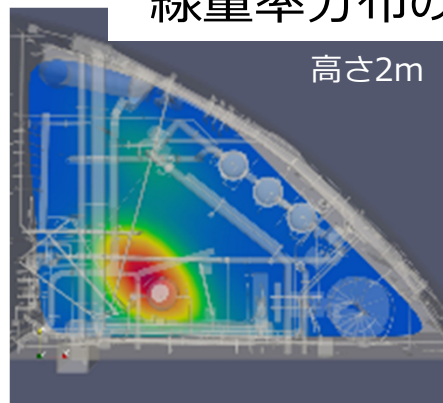


高さ3m

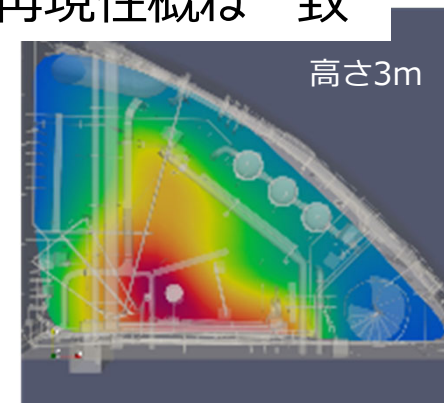


線量率(a.u.)

推定(逆解析)値



高さ2m



高さ3m

線量率分布の再現性概ね一致

実用上問題なく再現できることを確認

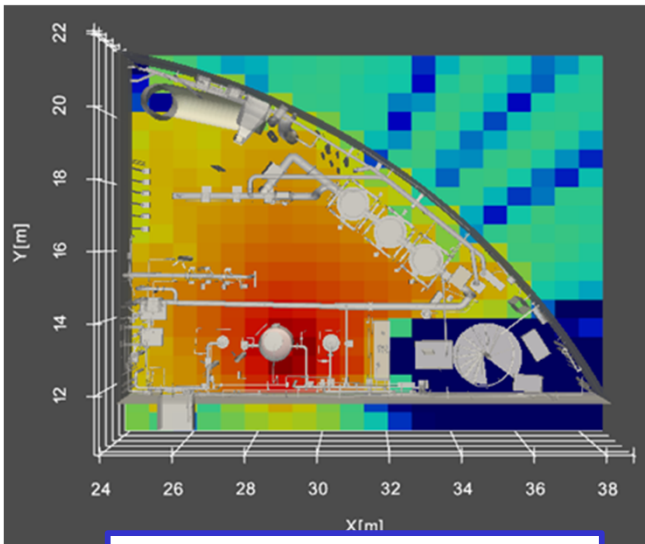
1F現場への適用

課題：不一致箇所の更なる精査（構造ミスフィット対応）

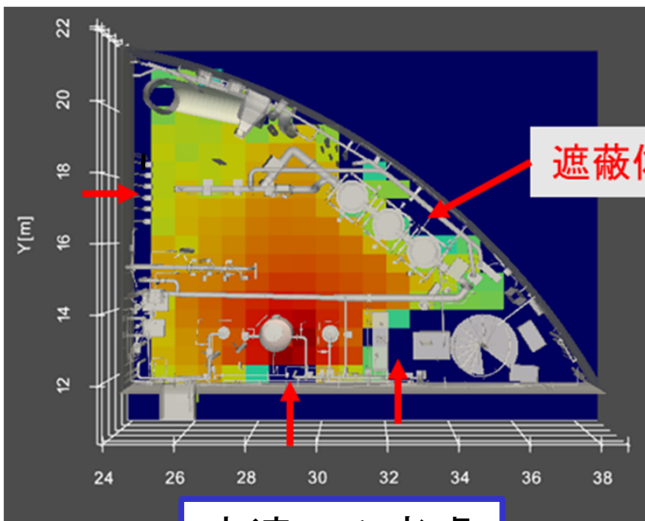
c. 報告参照

簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題抽出とその解決策(8/10)

例: 1F2号機1階エリア



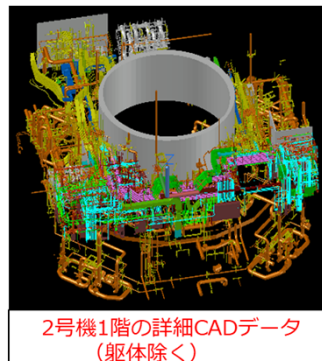
BF^(*)で直達以外も考慮



直達のみ考慮

課題②
解決策

膨大な面数 → 面数: ~4000万 (1F) → 膨大な計算コスト
 ~400万 (10分の1以下)



簡易計算導入

2つの簡易計算手法を開発し、解決を図る

放射線 (直達、散乱、透過)

1. 直達のみを計算 (超高速計算が可能)
1F2号機1階エリアの逆推定 ⇒ ~2日程度
2. BF^(*)で直達以外を考慮 (高速計算が可能)
プールカナル室の線量率 ⇒ 2~3倍の計算コスト

※BF:ビルドアップファクター

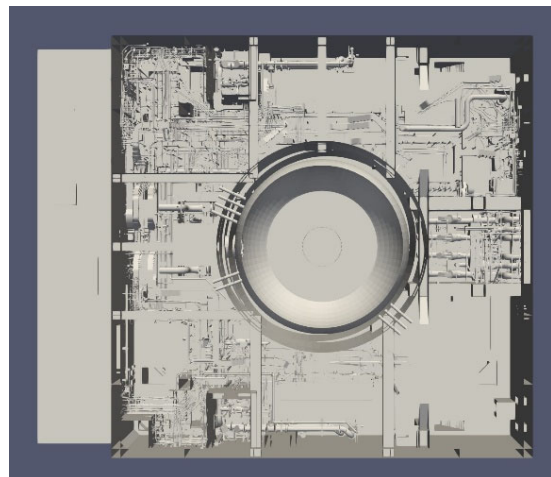
将来課題: 更なる高速化を目指す (GPU活用)

a.(a)線源逆推定エンジンの開発(12/30)

簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題抽出とその解決策(9/10)

擬Fused-LASSO + 簡易計算を1Fに適用⇒線源分布の仮(※)推定マップ出力確認

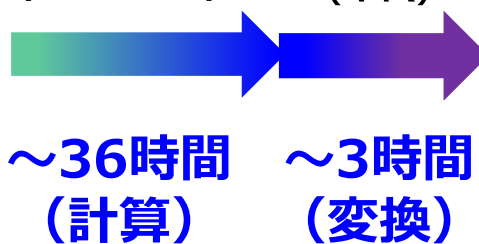
(※) 構造情報は不完全



点群⇒CADデータ

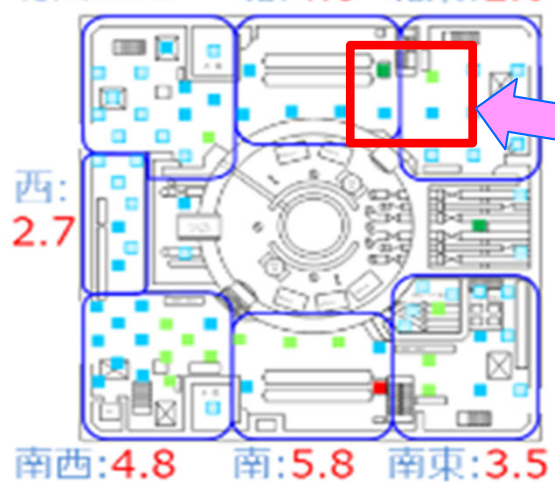


逆推定 (LASSO) 可視化 (VR)

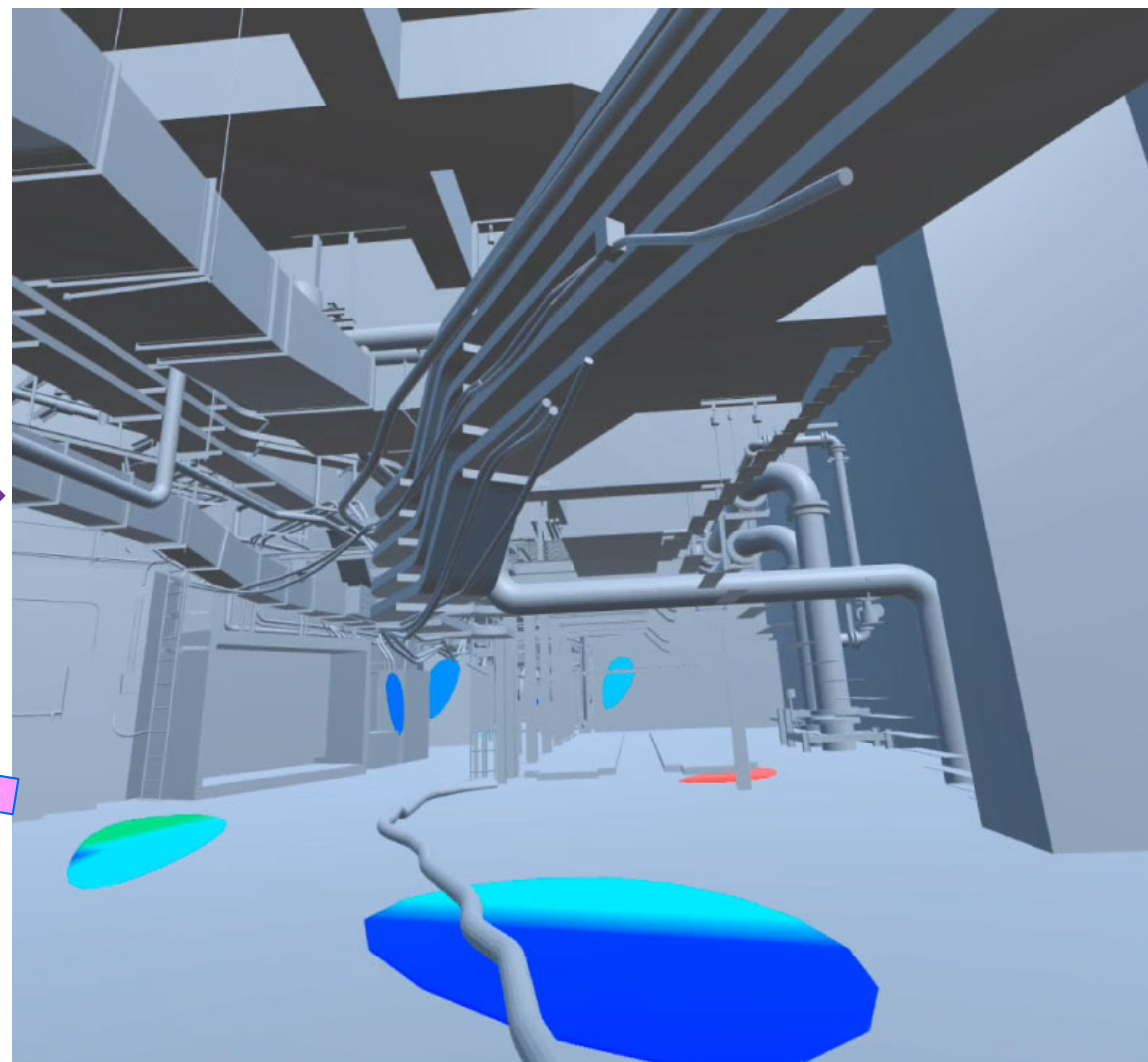


■ 2号機 1階線量データ

北西:3.2 北:4.8 北東:2.6



赤枠部分を右から
左方向へ見たもの



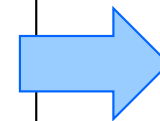
線源分布の仮推定マップの可視化

2020年9月

簡易CADから詳細CADへの条件変更による課題抽出とその解決策(10/10)

課題③
解決策

線量率をどこで観測すべきか？



膨大な線源候補面数
(どれも候補になる条件)

計算コストが膨大

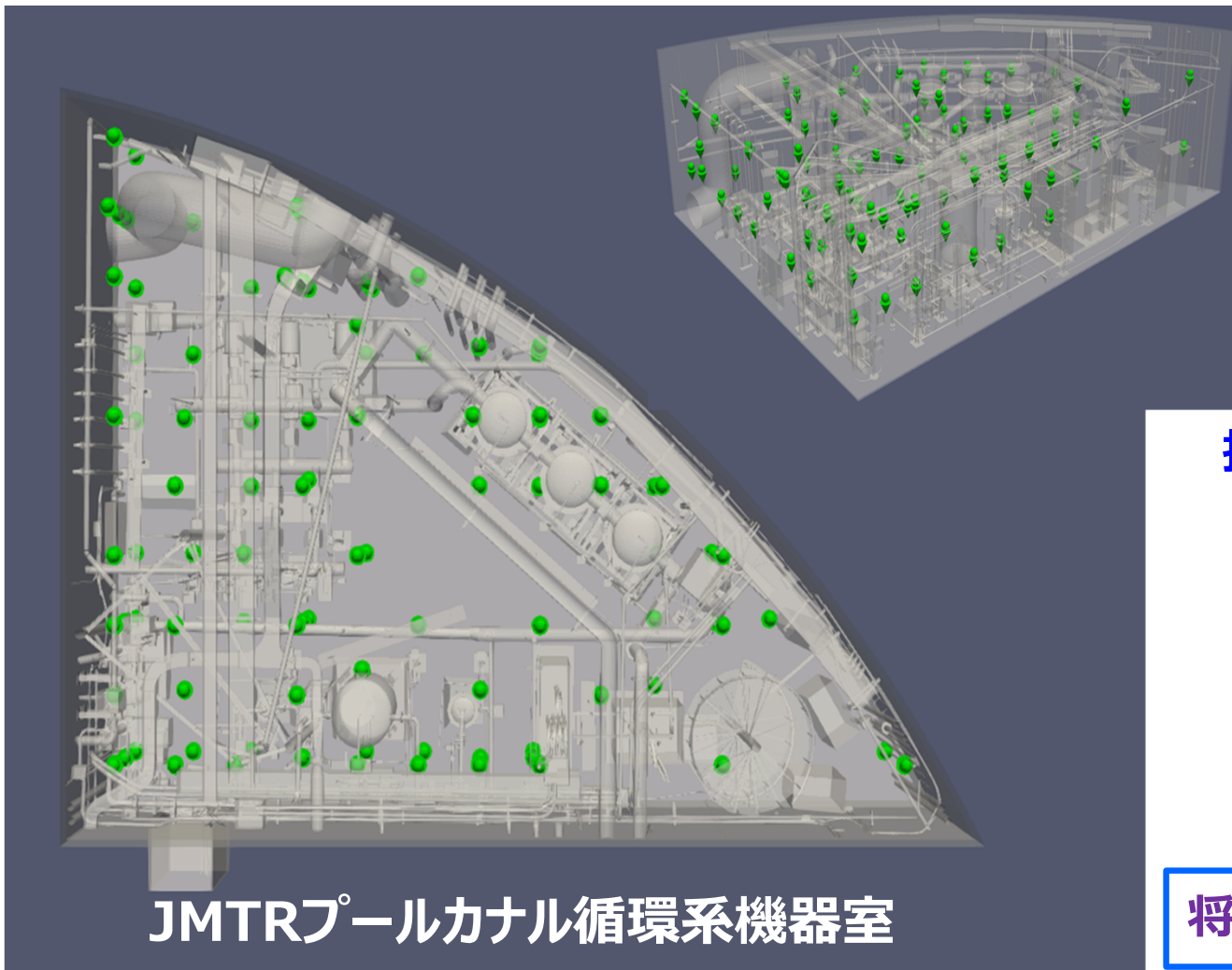
- ・観測点候補をグリッド状に配置
- ・各面からそれらへの直達率を計算
- ・高いカバー率の候補点を選択

指示点選択自由度を大幅減で解決

計算コストを1~2日レベルに削減

Candes-Tao条件で100点程度
(10点の線源探索)を指示

将来課題:測定容易点の指示(c.報告参照)



JMTRプールカナル循環系機器室

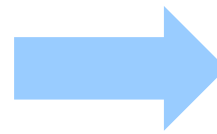
a.(a) 線源逆推定エンジンの開発(14/30)

① 逆推定に最適な観測点数と観測点位置を指示するツールの開発作業

目的(開発)：逆推定手法 (LASSO) の推定精度を向上させるために必要な観測点を指示する

現場の要請

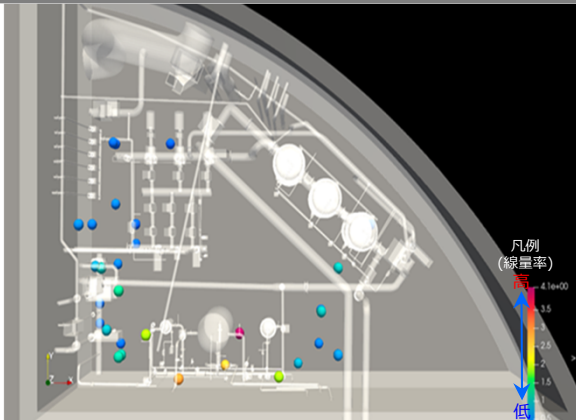
- (1)：観測点数は最小限とすること
- (2)：観測には制限がある可能性も考慮できること



現場の要請を満たす観測最適化技術を開発し、
開発技術をJMTRにて検証
(例:30点以内の観測と高さ3m以下の観測に限定)

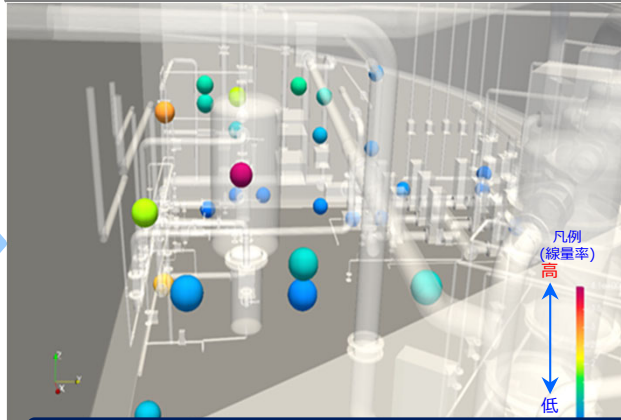
観測点指示ツールの概要

Step1: 構造情報を基に観測点指示



成果1：JMTRでの観測点を指示⇒逆推定の成功

Step2: 現場での観測点指示



成果2：観測指示点のAR可視化・入力

Step3: 観測ベクトルの作成



Shop | Microsoft HoloLens 2 (insight.com)

AR空間内の指示点で線量計をかざし
測定値代入 (a.(c)の成果にて紹介)

構造情報から決まる線源面数 n
特定したい線源数 (強度No.1~ n_s)

Candes-Tao条件⇒観測点数 $m(n, n_s)$ を決定

死角なし条件⇒観測点位置を
決定更に現場の制限も考慮

[2022年5月 特許出願中]

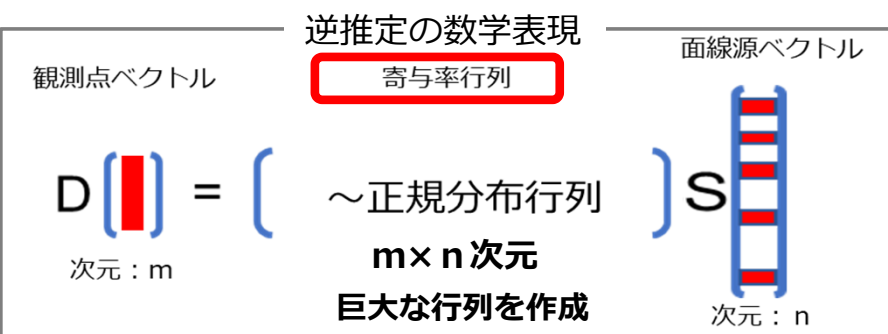
開発の流れ

仕様策定⇒R3年度 簡易構造データにて開発・実装⇒ JMTRへの適用試験(仮試験)実施
⇒R4年度 詳細構造データにて開発・実装⇒ JMTRへの適用試験(本試験)実施

a.(a) 線源逆推定エンジンの開発(15/30)

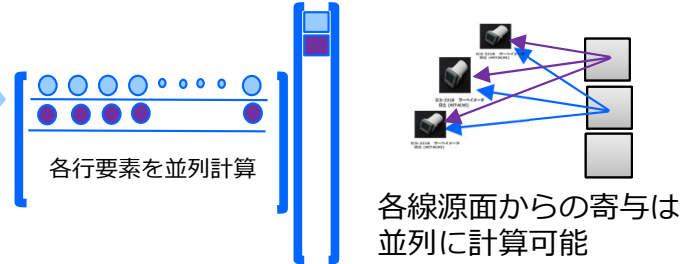
② 寄与率行列作成のためのモンテカルロ輸送計算の超並列化及び高速化・最適化作業

目的（開発）：逆推定に際し寄与率行列を高速に作成する必要がある



各線源面から寄与率計算の並列性を活かして凡そCPUコア数分の1に計算時間の低減を実現

--- 例：100コアの計算機⇒計算時間100分の1に ---



JAEAスパコン/計算サーバー

寄与率行列作成時間を予測する計算コストモデルを作成

計算時間予測ツールとしてエンジンに実装

開発の流れ

寄与率行列作成の並列性の特定 ⇒ 並列化 ⇒ 高速化・最適化作業 ⇒ ベンチマーク試験

高速計算ツール開発とJMTRでの適応試験を実施

③ 逆推定ソルバーの高速化・最適化とエンジン実装に係る作業

目的（開発）：逆推定を高速に実施する必要がある

LASSO (least absolute shrinkage and selection operator)

$$\underline{G} = |D-FS|^2 + \lambda|S|$$

最小化する λ : ハイパーパラメータ

PC～スパコン λ : 小 より密な解を推定
: 大 よりスパースな解を推定

現場の変化、再観測、線源絞り込みに際し、線源ベクトルSを何度も求める必要から高速化が必須である

最新の文献調査

並列計算機用の高速アルゴリズム発見

実用に供する計算時間内での実行を確認

16GB メモリ：PCでのベンチマーク試験結果

モデル (case)	構造物 部品数	建物の規模 [m × m × m]	メッシュ サイズ [m]	使用線源 面数m	推定実行時間 [min]	実行可能
1	312	30 × 20 × 6	0.5	29872	15	○
2	1248	50 × 40 × 10	2	24692	11	○
			1	43744	26	×
3	1744	75 × 50 × 15 1F相当	~4	~33000	14(実測)	○
			2	68196	51	×
			1	116932	126	×
			0.5	292904	568	×

部品数：JMTR (~1400) ⇒ 1F (~100000) 並列計算機利用必須

開発の流れ

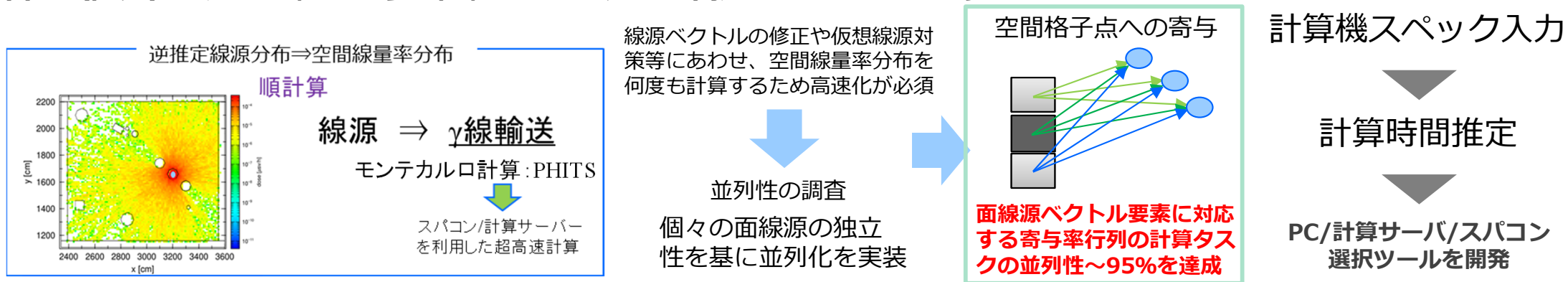
逆推定ソルバーの文献調査 ⇒ 性能調査 ⇒ 実装作業 ⇒ ベンチマーク試験

高速計算ツール開発とJMTRでの適応試験を実施

a.(a) 線源逆推定エンジンの開発(16/30)

④ 逆推定線源分布を基にしたモンテカルロ輸送計算の超並列化及び高速化・最適化作業

目的（開発）：逆推定線源から空間線量率3D分布を高速に求める必要がある

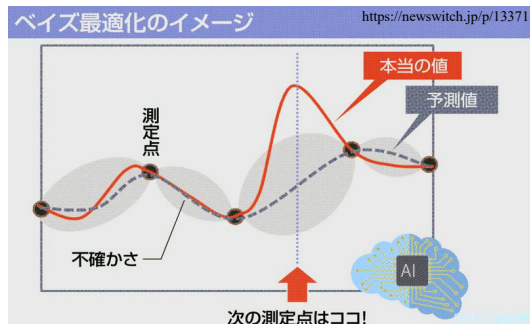


開発の流れ

建屋内モンテカルロ輸送計算並列性の特定 ⇒ ベンチマーク試験 ⇒ 超並列化・高速化・最適化作業
計算高速化・最適化実施(JMTRでの適応試験)

⑧ 推定線量率分布の精度向上に向けたベイズ統計手法活用ツール開発作業(詳細p.37参照)

目的（開発）：線源・線量率推定精度の向上を図る取り組みを実装する必要がある



線量率分布の精度を段階的に向上させる取り組みが必須

複数回の測定による
精度向上の手法

精度向上を目的とした測定点の指示

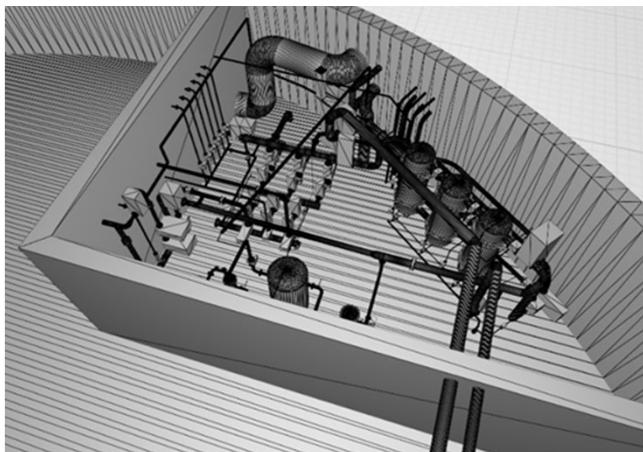
二つの手法を開発実装する

- ①ベイズ最適化の方法活用
※線量率分布取得のための最適化
- ②ベイジアンLASSOの活用
※推定線源に確率分布付与（自己修正）
上記手法を実装

開発の流れ

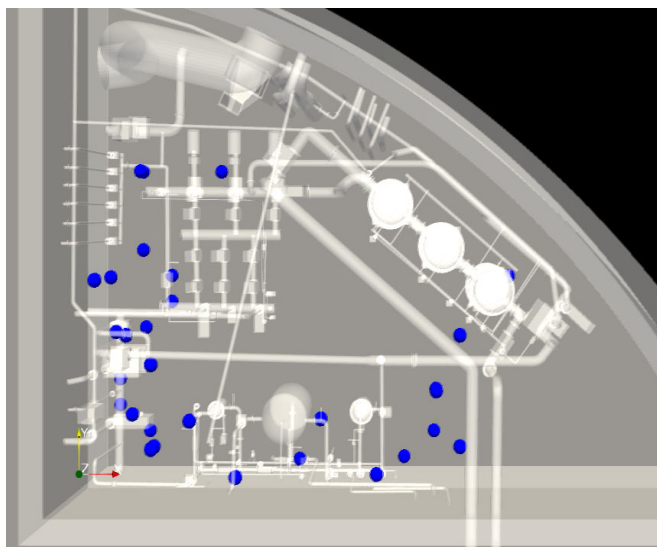
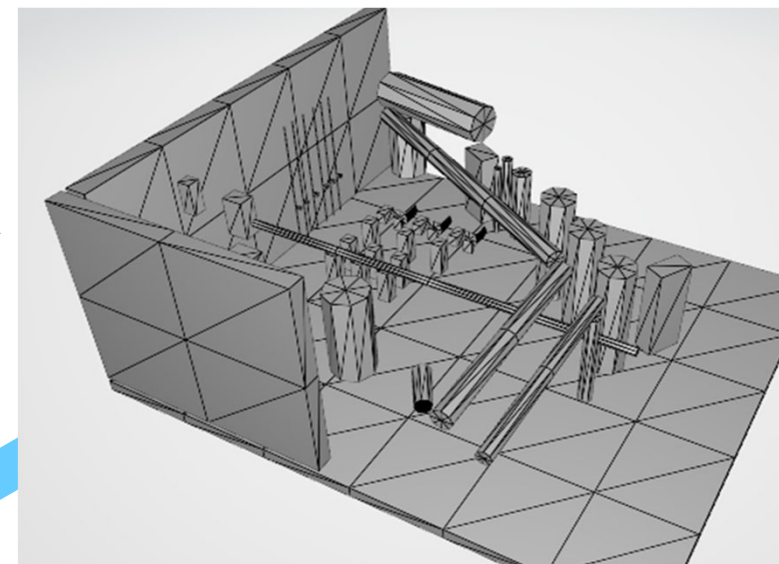
ベイズ統計活用法の調査と仕様策定 ⇒ 開発及び実装作業 ⇒ 検証試験（比較）
ツール開発(JMTRでの適応試験)

⑤ 逆推定計算のエンジン化及び検証作業(1/3)

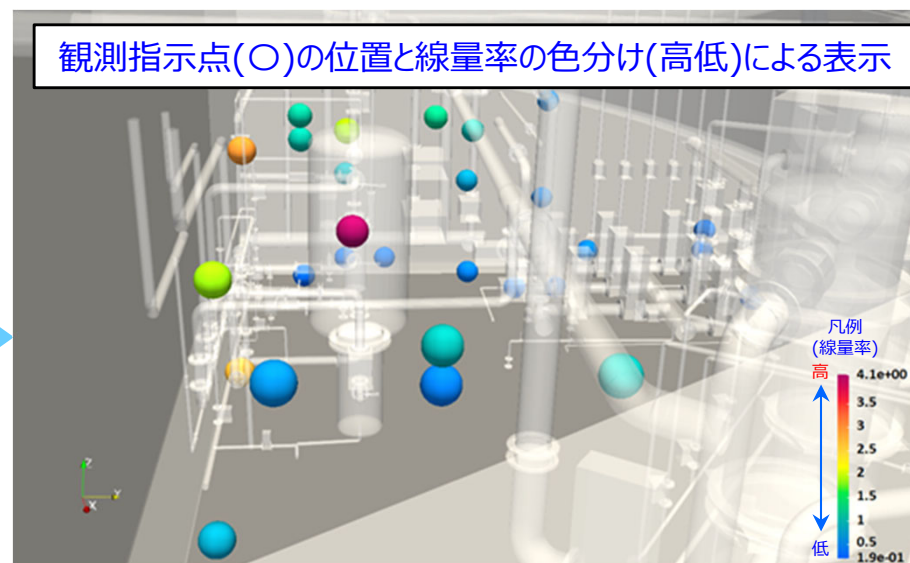


JMTRプールカナル循環系機器室

構造物・壁面・床⇒ 簡略化
構造の概略：継承



構造情報を基に逆推定可能とする
観測点指示ツールを動作し、観測指示点を作成



観測指示点(○)の位置と線量率の色分け(高低)による表示

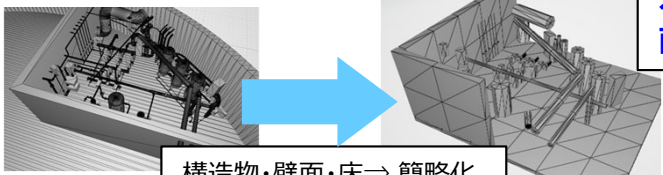
観測指示点に基づき、現場にて線量率測定を実施

⑤ 逆推定計算のエンジン化及び検証作業(2/3)

全1452面※に対する逆推定結果 (線量率分布取得)

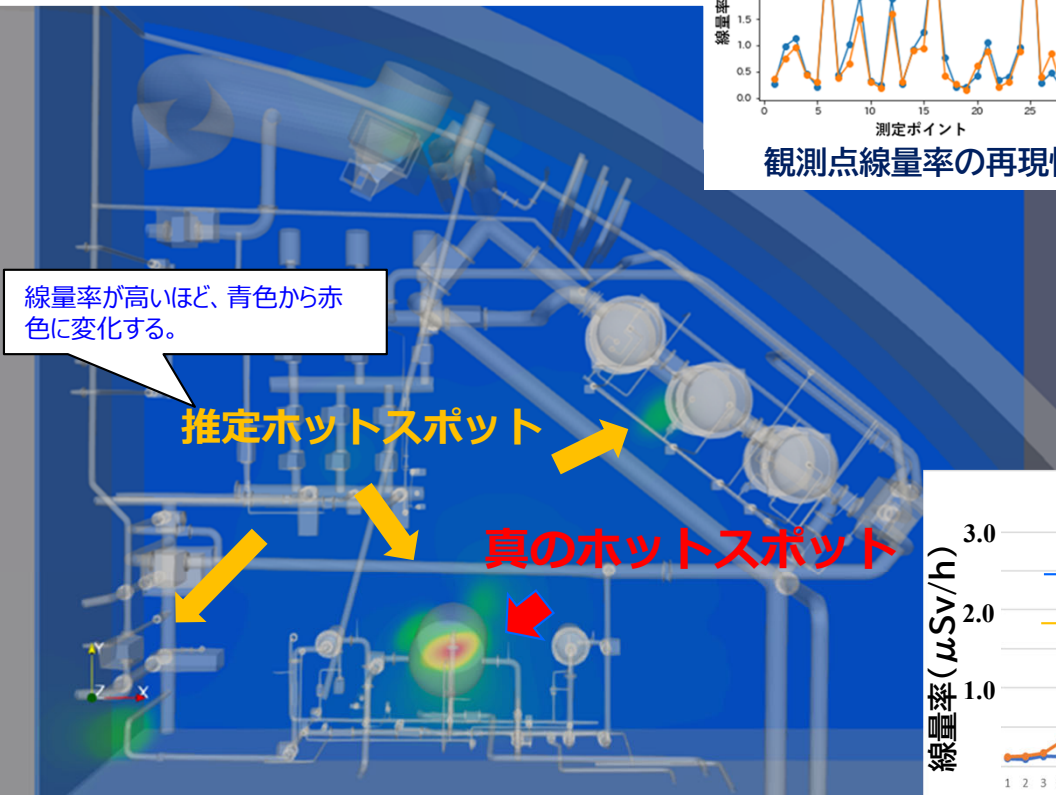
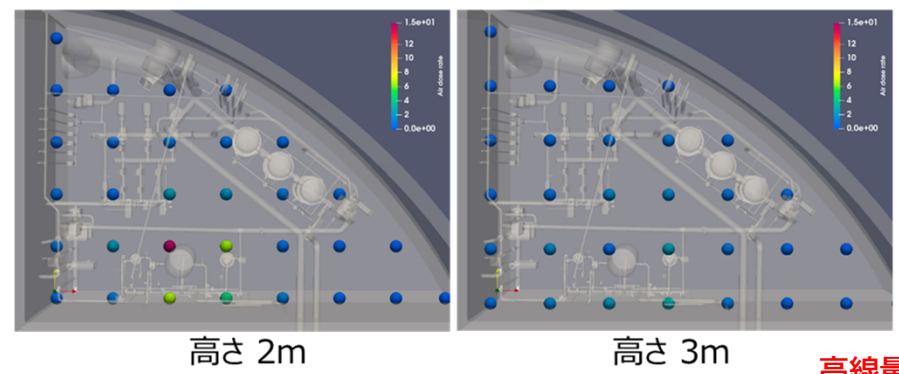
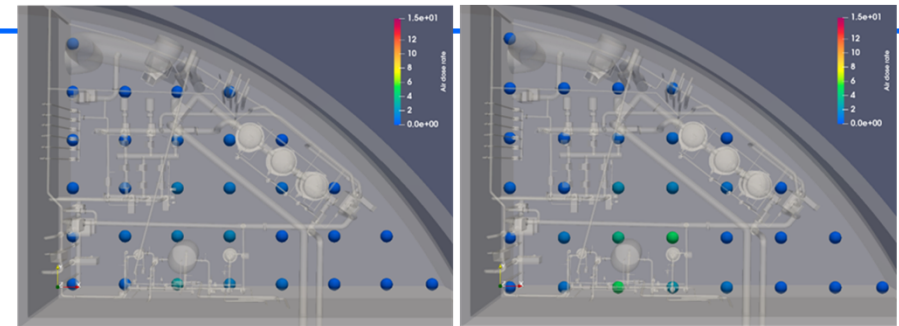
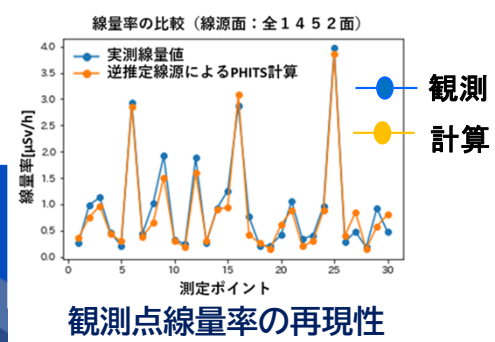
観測指示点における線量率分布を可視化(ブラインドテスト用)

JMTRプールカナル
循環系機器室



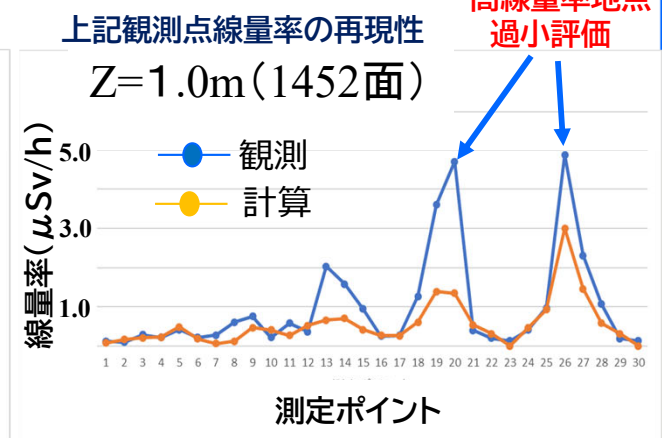
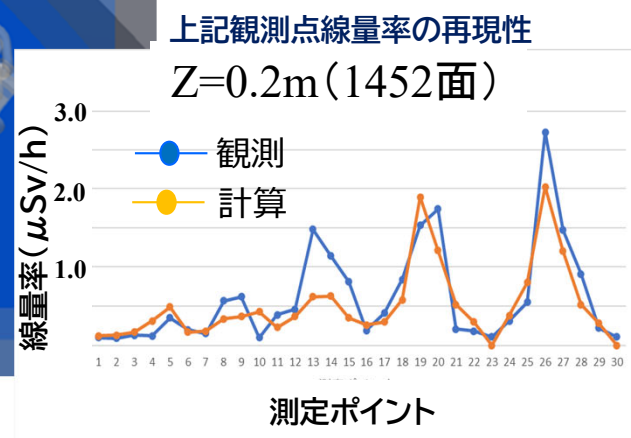
構造物・壁面・床⇒ 簡略化
構造物の概略：継承

※対象エリア全体を簡略化しメッシュ化すると1452面となった。それらを汚染候補面として、簡易解析を行った。



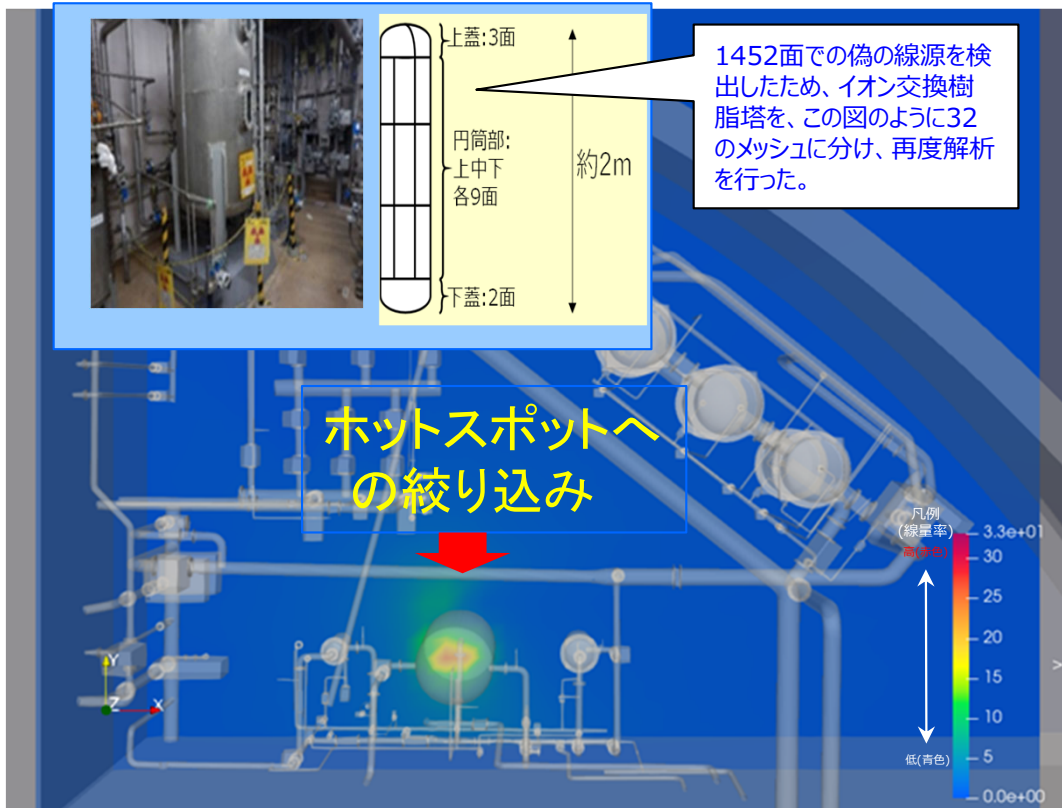
線量率が高いほど、青色から赤色に変化する。

成功：真のスポット位置の逆推定に成功 (過小評価)
失敗：偽のスポット位置も推定

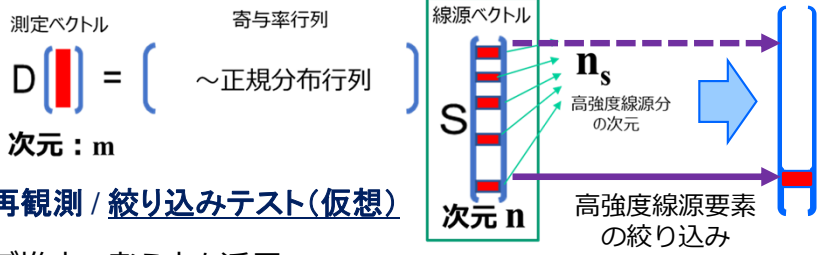
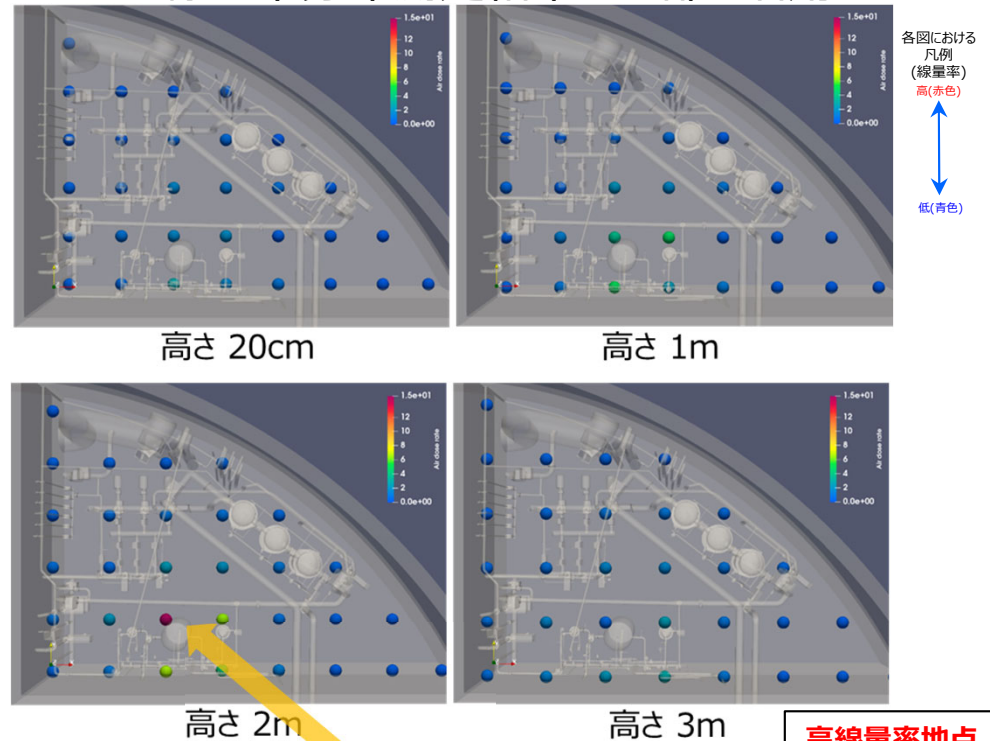


⑤ 逆推定計算のエンジン化及び検証作業(3/3)

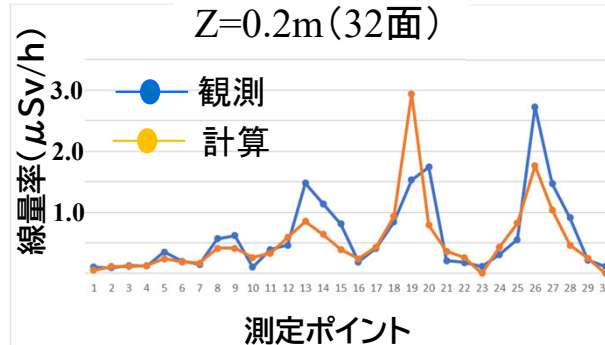
全32面 (ホットスポット面) での逆推定結果



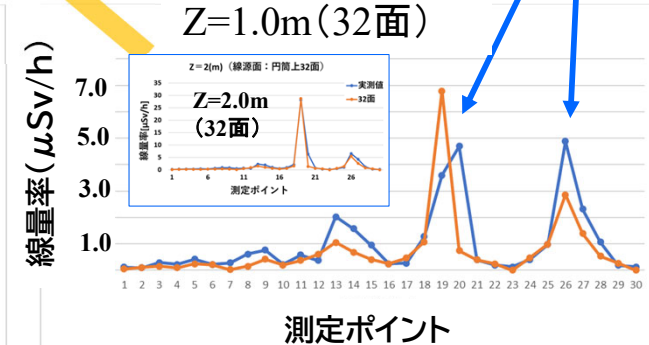
c. の線量率分布測定結果の一部を活用



上記観測点線量率の再現性
Z=0.2m (32面)



上記観測点線量率の再現性
Z=1.0m (32面)



高線量率地点
評価精度向上

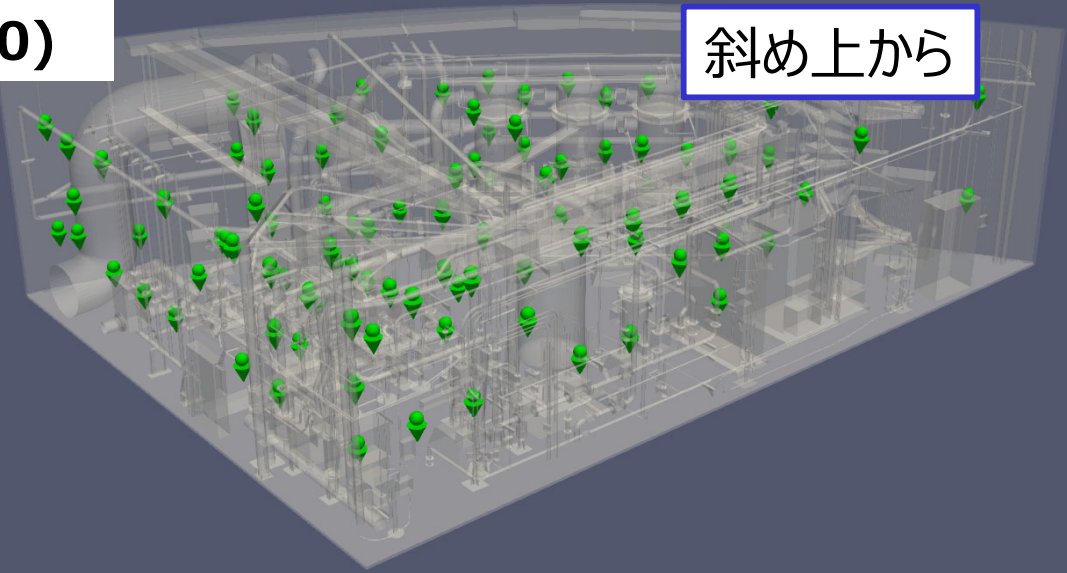
ベイズ推定の考え方を活用:

真及び偽推定線源附近のデータを活用 → 真推定線源絞り込み → 再現性向上確認

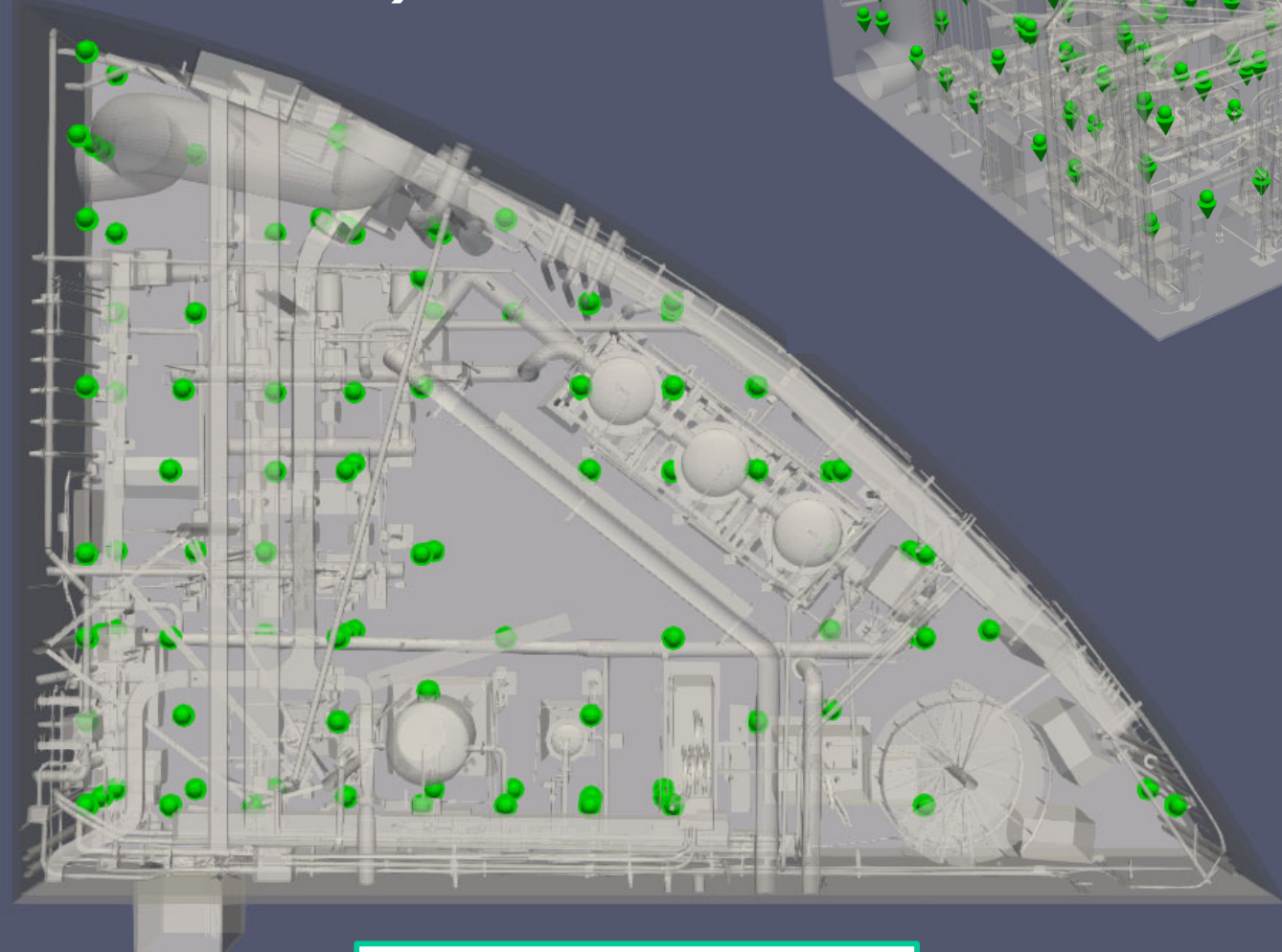
⑥ 逆推定ツール群のエンジン化及び検証作業(1/10)

適用例：JMTRプールカナル循環系機器室
(165万セル：線源候補面)

斜め上から



上から



AR表示⇒AR入力

適用条件

計算時間は
PCで数時間程度

↓

10個程度の
線源探索を目標

↓

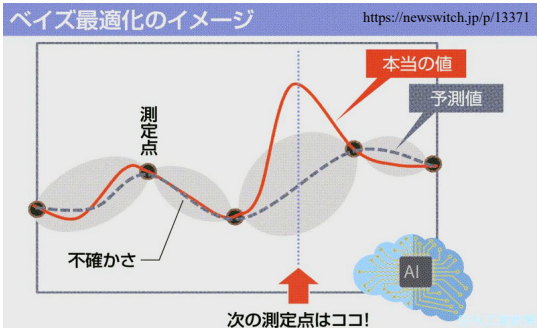
約90点の
観測指示点を設定

⑥ 逆推定ツール群のエンジン化及び検証作業(2/10)

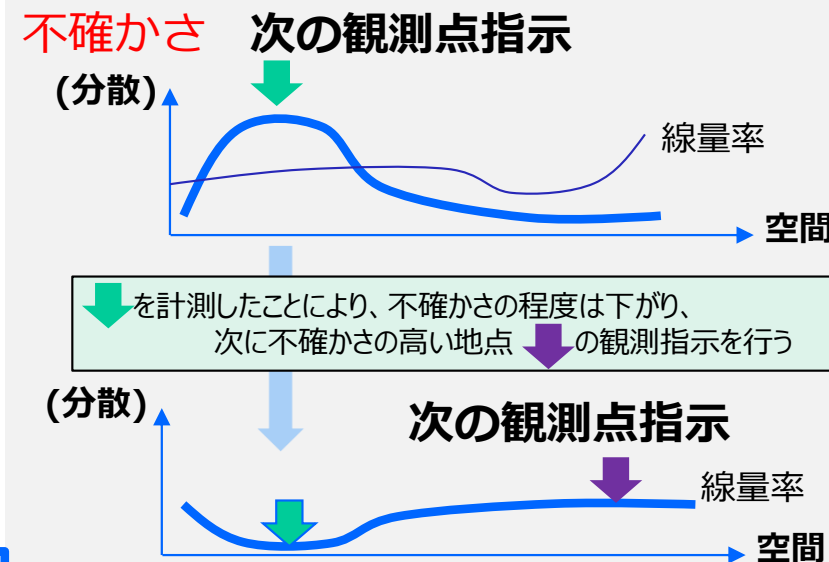
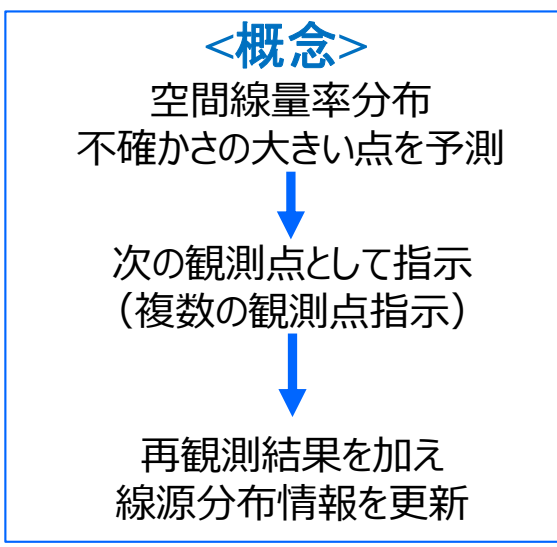
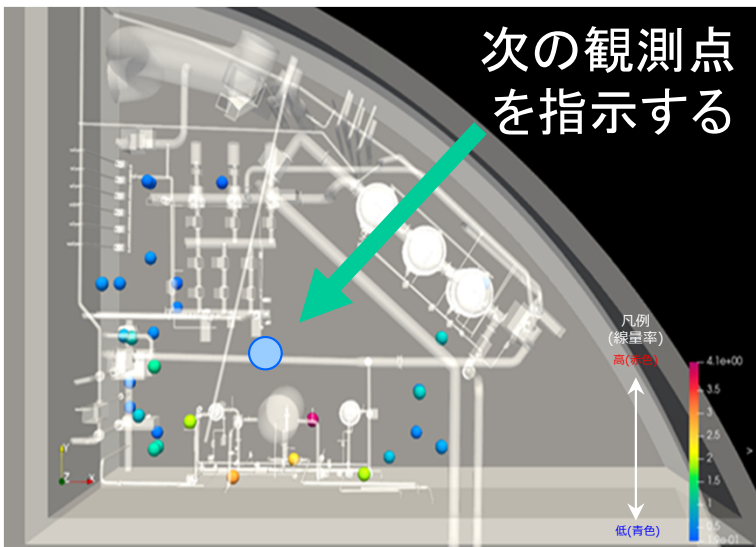
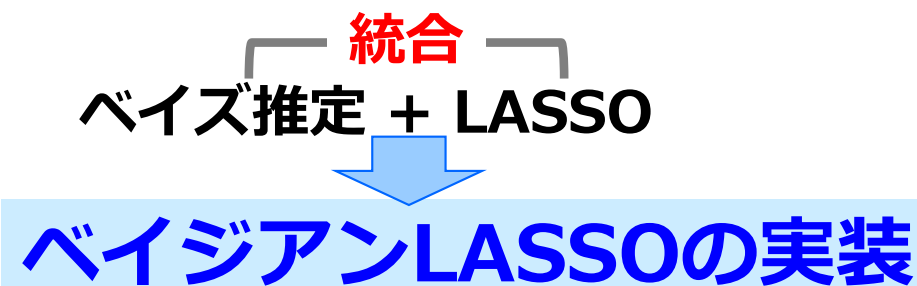
(⇒ ベイズ統計手法活用ツール開発作業～逆推定ツール群「ベイジアンLASSO」の実装)

「a.(a)⑧ 推定線量率分布の精度向上に向けたベイズ統計手法活用ツールの開発作業」を含む

目的（開発）：線源逆推定精度の向上に資する手法ツールが必須である。



再観測により推定精度の向上を目指す



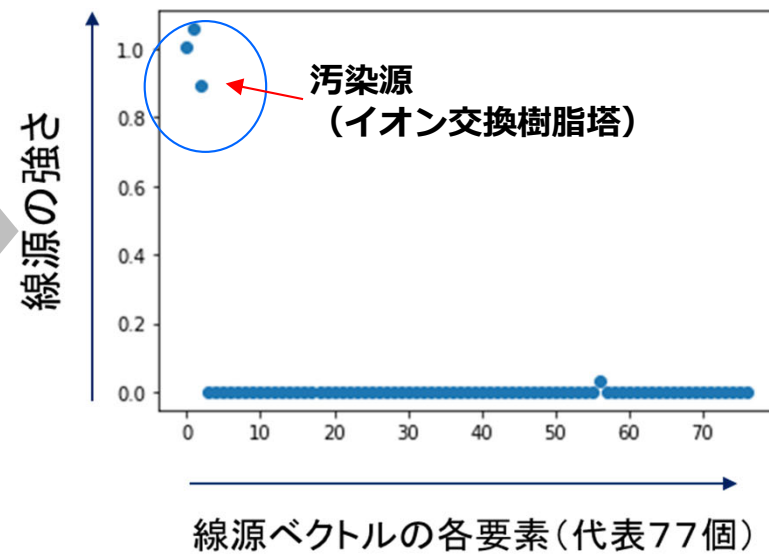
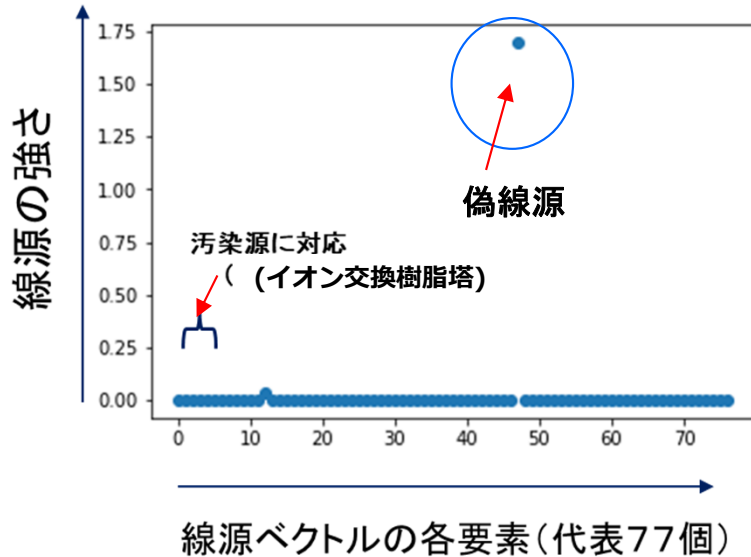
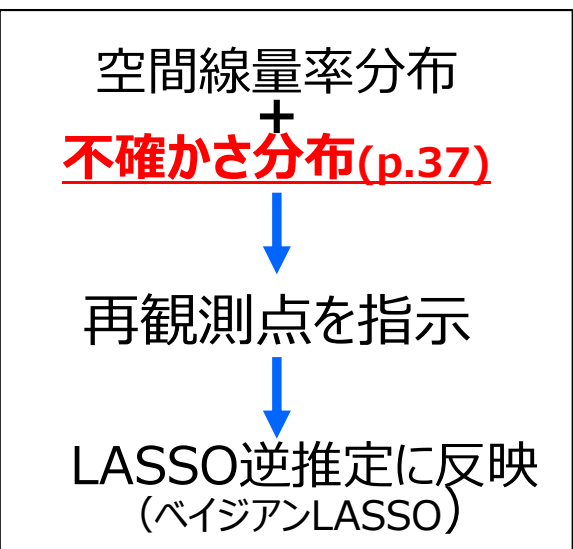
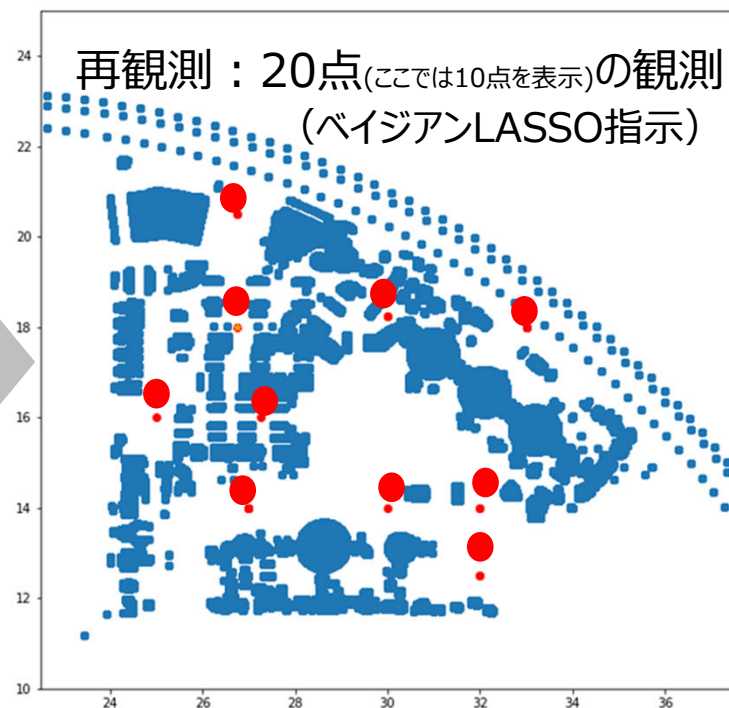
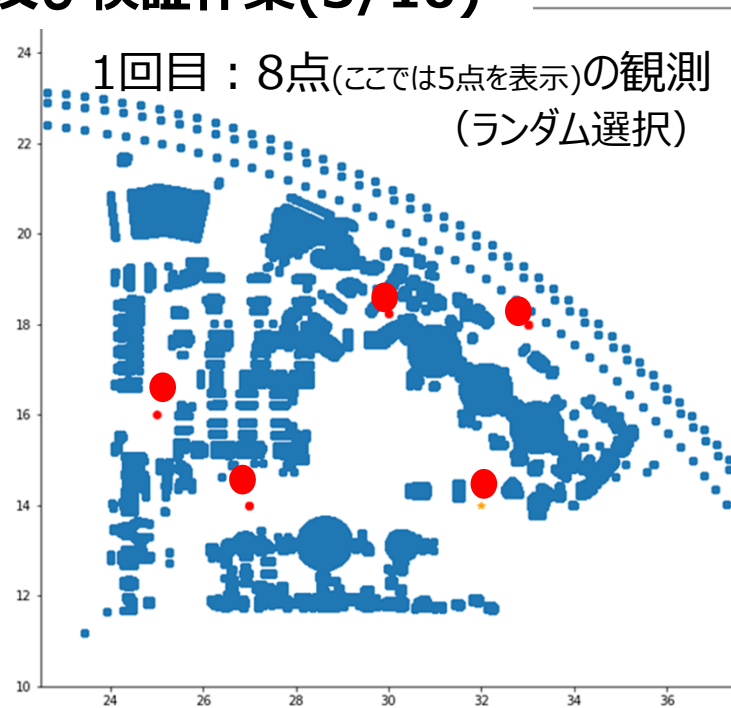
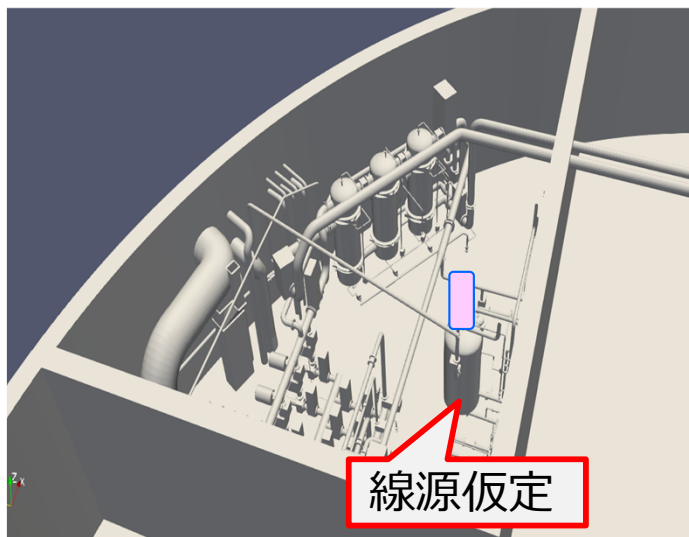
開発の流れ

2021(令和3)年度開発 ⇒ 2022(令和4)年度本適用

ツール適応試験 (JMTR・プールカナル循環系機器室)

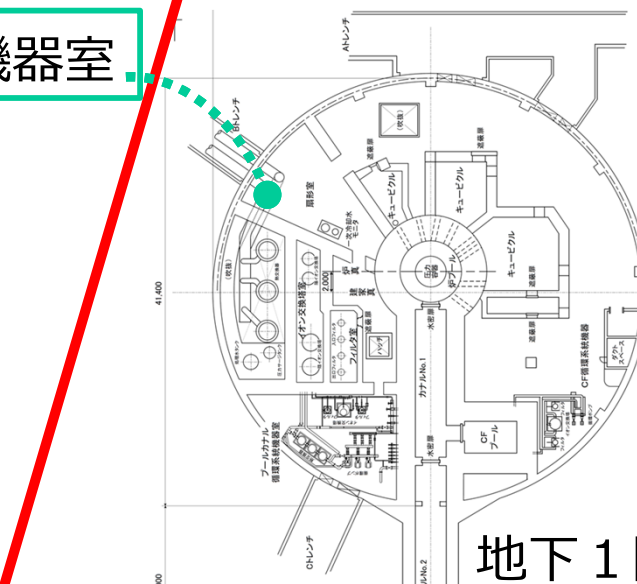
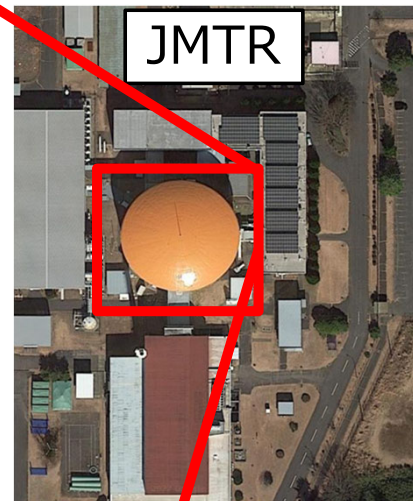
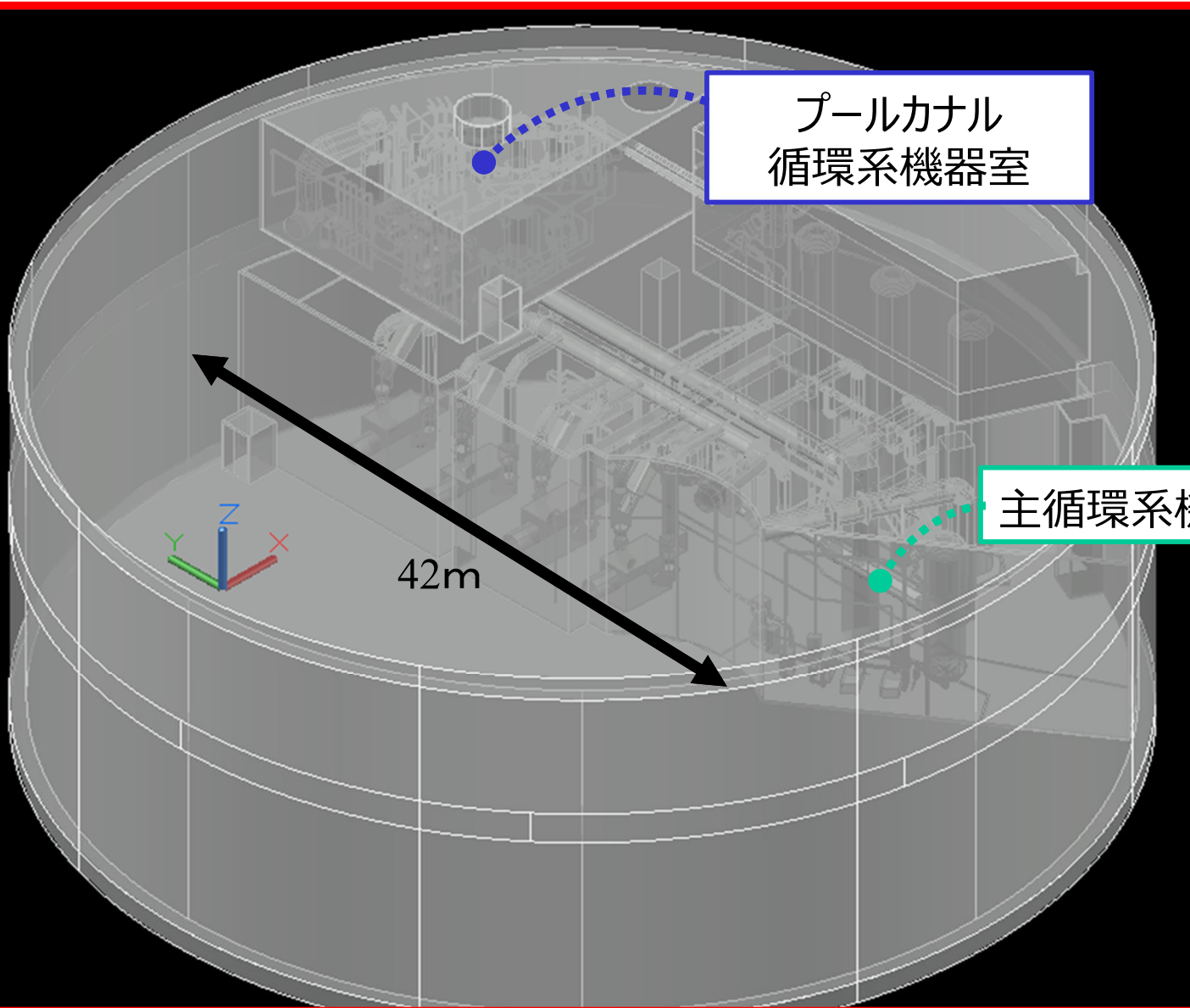
⑥逆推定ツール群のエンジン化及び検証作業(3/10)

プールカナル循環系機器室 (JMTR) : 数値検証実験



⑥逆推定ツール群のエンジン化及び検証作業(4/10)

JMTRプールカナル循環系機器室・主循環系機器室（原子炉主要屋内）での線源分布予測(1)



大規模・複雑な建屋内への適用

⑥ 逆推定ツール群のエンジン化及び検証作業(5/10)

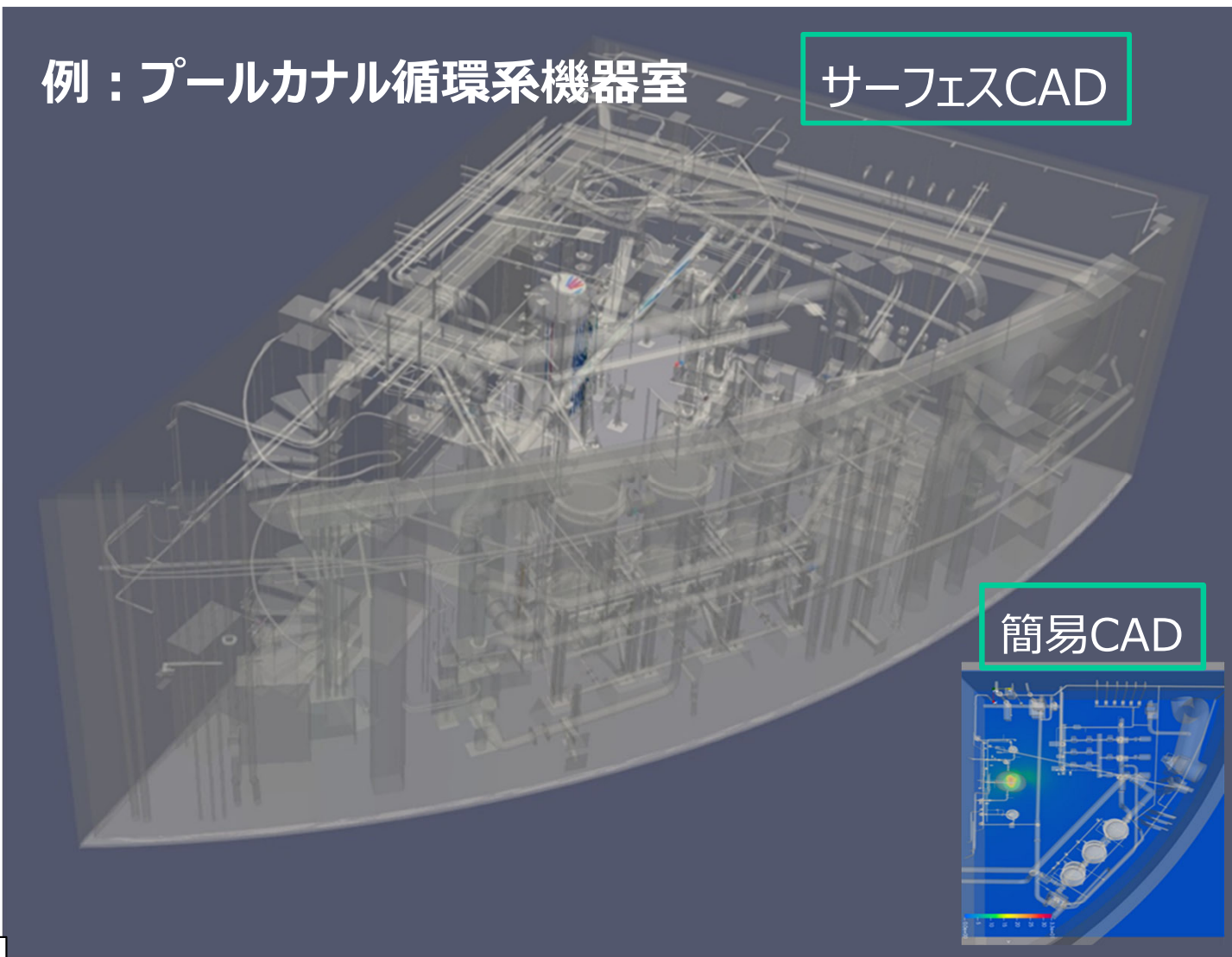
JMTRプールカナル循環系機器室・主循環系機器室（原子炉主要屋内）での線源分布予測(2)

大規模・複雑な建屋内への適用

点群⇒サーフェスCAD⇒簡易CAD

<<メッシュ・セル情報>>

セルの面積(m ²)	セルの頻度	
	主循環系機器室	プールカナル循環系機器室
10~100	0	14
1~10	19,287	1,196
10 ⁻¹ ~1	60,388	10,446
10 ⁻² ~10 ⁻¹	292,924	60,049
10 ⁻³ ~10 ⁻² ~10cm ²	807,607	249,337
10 ⁻⁴ ~10 ⁻³ ~1cm ²	1,725,603	603,357
10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁴	1,693,145	532,199
10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁵ ~1mm ²	210,065	184,375
10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁶	22,324	9,645
10 ⁻⁸ ~10 ⁻⁷	42	1,171
10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁸	0	28
セル総数	4,831,385	1,651,817
	480万セル	165万セル



例：プールカナル循環系機器室

サーフェスCAD

簡易CAD

⑥ 逆推定ツール群のエンジン化及び検証作業(6/10)

JMTRプールカナル循環系機器室・主循環系機器室（原子炉主要屋内）での線源分布予測(3)

点群データ ⇒ 詳細CAD(サーフェスデータ) ⇒ 簡易推定ツールと擬fused LASSOの開発

<<メッシュ情報>>

	主循環系機器室	プールカナル循環系機器室
セル総数	480万セル	165万セル



1セル2時間(PC)かかるので・・・
⇒165万セルでは、
320万時間(～365年！)かかる。

富岳レベル > JAEAスパコン

構造データ
簡略化

放射線計算
簡略化

・簡易推定ツールを開発し適用

放射線 { 直達線 ⇒ 直達線のみ考慮
散乱/透過線 現時点

・擬fused LASSOを開発し適用

膨大な線源候補セル数 ⇒ 線源は面に跨り分布するという仮定

$$\lambda_1 |S| + \lambda_2 |S_i - S_{i+1}|^2$$

線源ベクトル



線源ベクトル

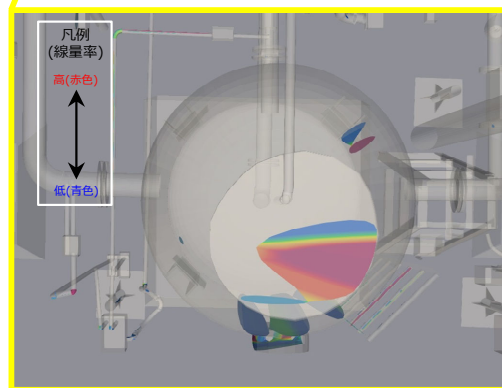
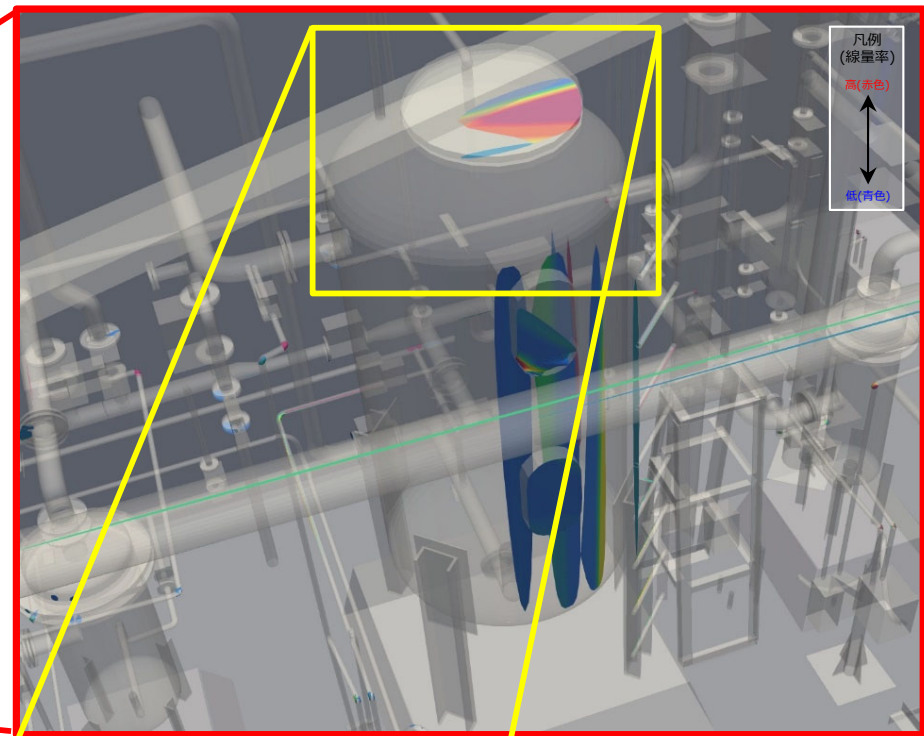
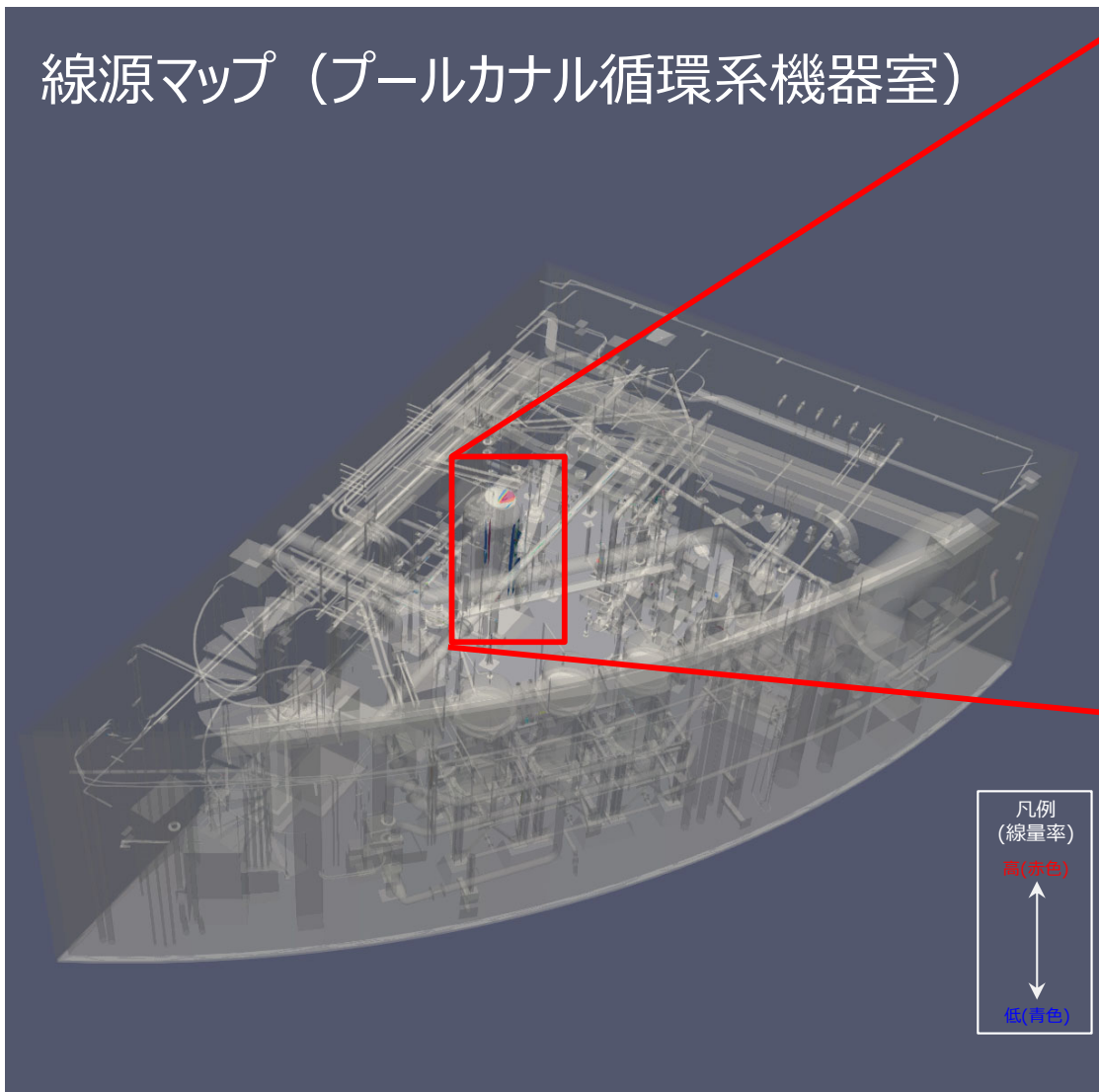


パーツレベル
線源の割当て

⑥ 逆推定ツール群のエンジン化及び検証作業(7/10)

JMTRプールカナル循環系機器室・主循環系機器室（原子炉主要屋内）での線源分布予測(4)
点群データ ⇒ 詳細CAD(サーフェスデータ) ⇒ 簡易推定ツールと擬fused LASSOの開発

線源マップ（プールカナル循環系機器室）

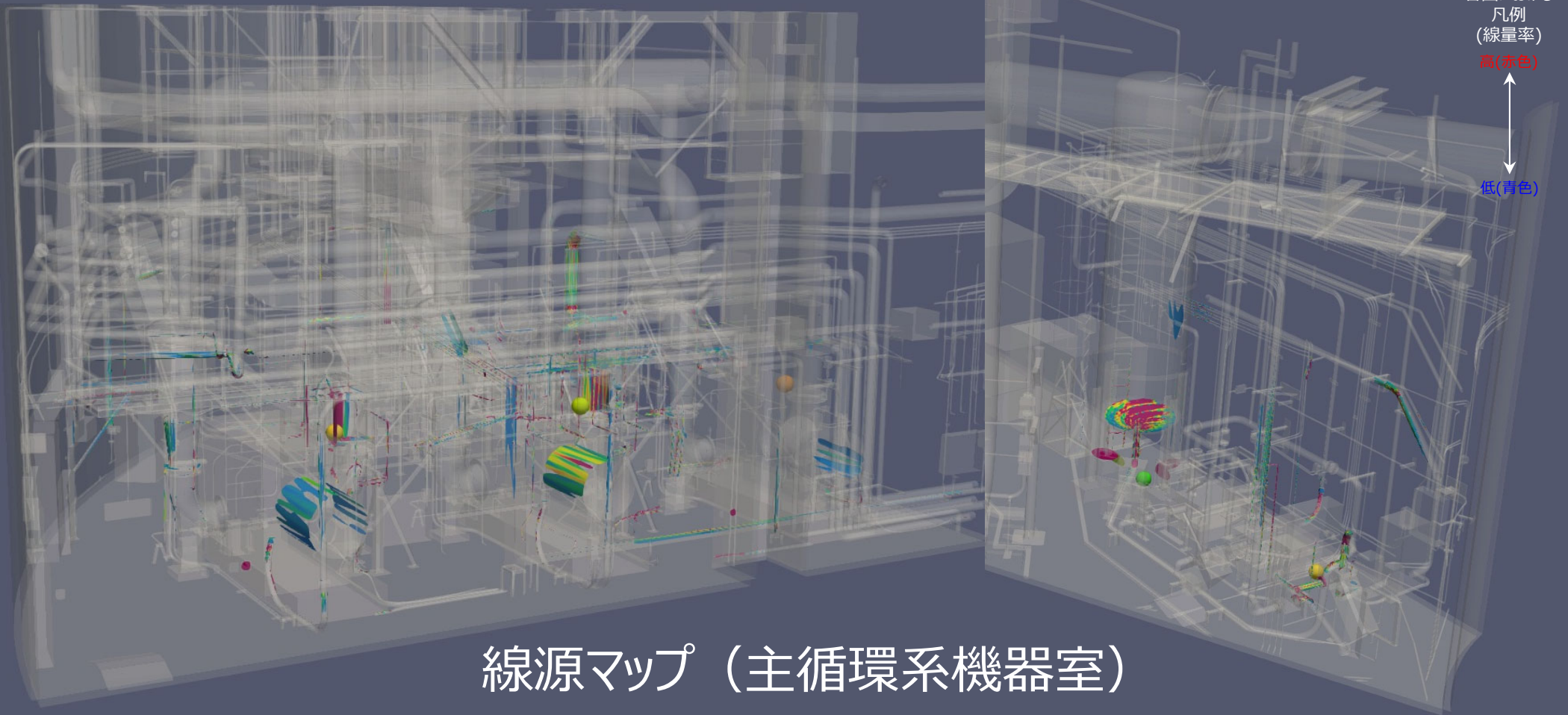


- ✓ イオン交換樹脂塔
線源の予測に成功
- ✓ 現実的サイズの連続
セル線源の予測も成功

⑥逆推定ツール群のエンジン化及び検証作業(8/10)

JMTRプールカナル循環系機器室・主循環系機器室（原子炉主要屋内）での線源分布予測(5)

点群データ ⇒ 詳細CAD(サーフェスデータ) ⇒ 簡易推定ツールと擬fused LASSOの開発

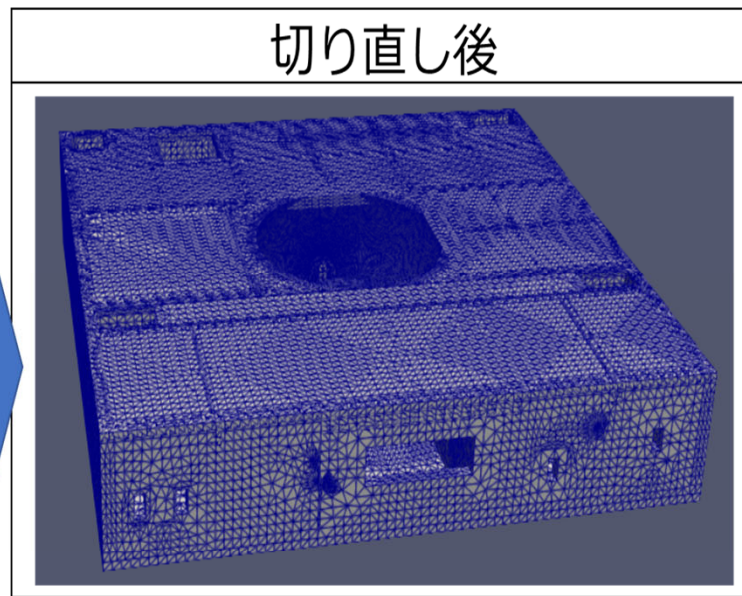
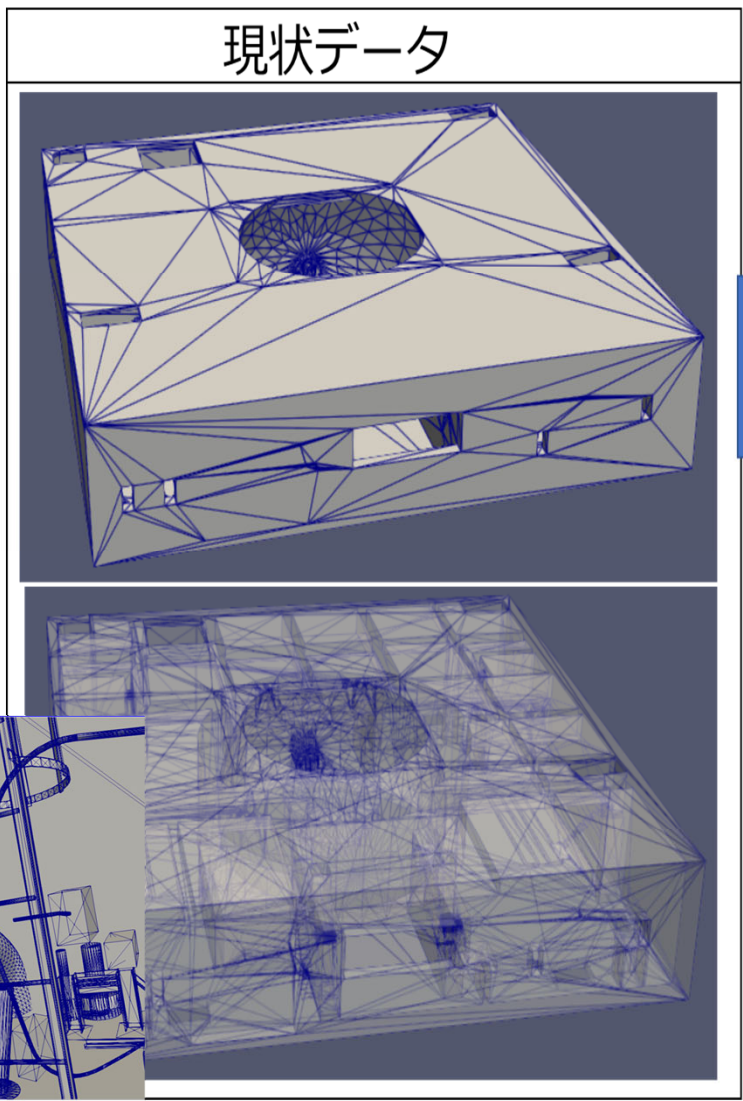


⑥ 逆推定ツール群のエンジン化及び検証作業(9/10)

1F2号機1階での線源分布予測①

1F2号機1階エリアでの線源分布予測 (現状のサーフェスデータを使用)

2号機1階のセルの面積の頻度 (生データ)	
面積 (m ²)	個数
10~100	12
1~10	327
10 ⁻¹ ~1	7481
10 ⁻² ~10 ⁻¹	45393
10 ⁻³ ~10 ⁻²	84854
10 ⁻⁴ ~10 ⁻³	97283
10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁴	83675
10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁵	11961
10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁶	2709
10 ⁻⁸ ~10 ⁻⁷	1894
10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁸	813
10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻⁹	445
10 ⁻¹¹ ~10 ⁻¹⁰	482
10 ⁻¹² ~10 ⁻¹¹	133
10 ⁻¹³ ~10 ⁻¹²	4



10cm~1mレベルの解像度に均一化

・線源分布面の解像度を均一化



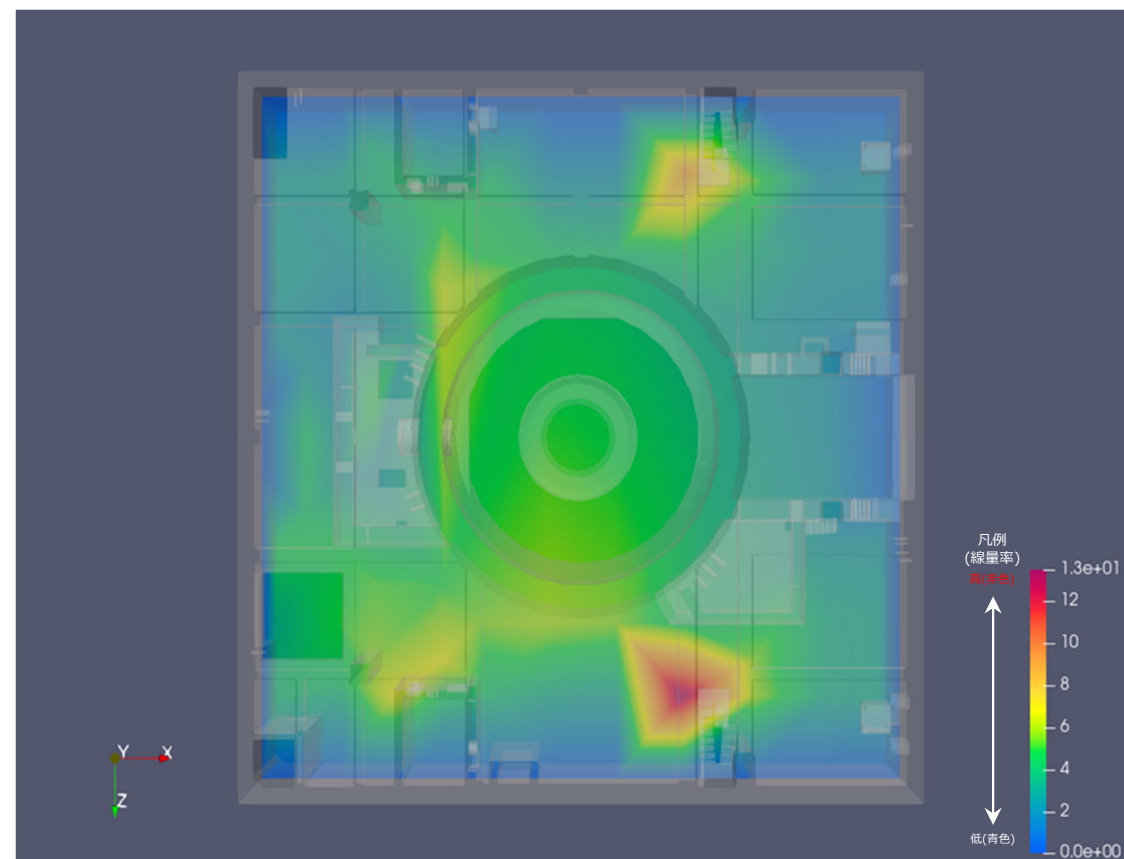
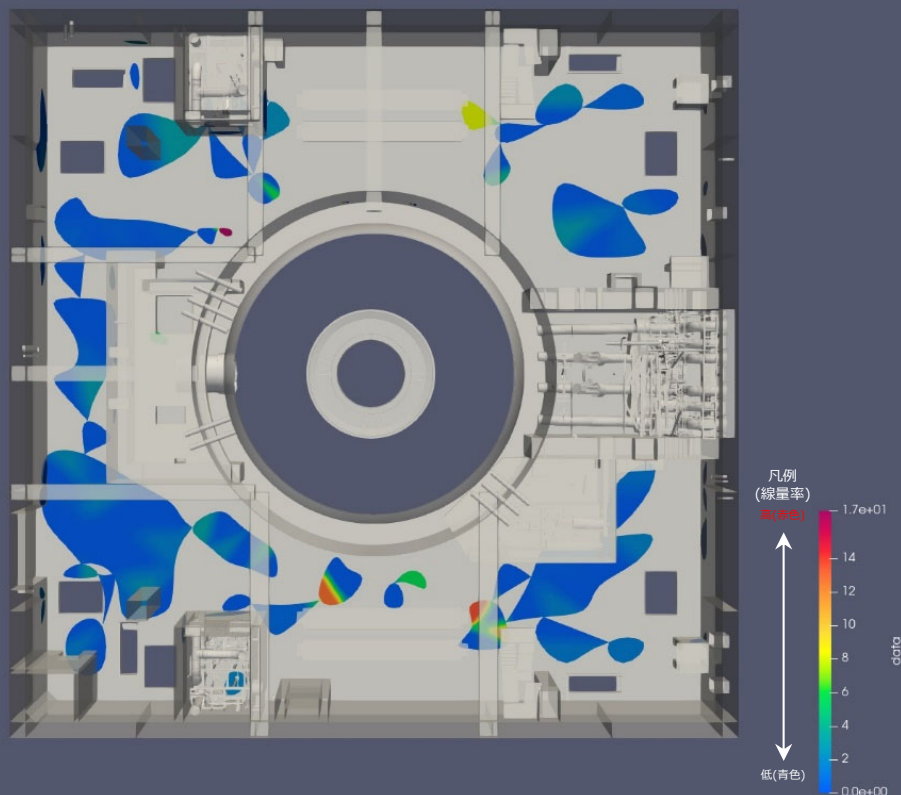
マニュアル (現在) ⇒ 自動化 (将来)

⑥逆推定ツール群のエンジン化及び検証作業(10/10)

1F2号機1階での線源分布予測②

線源分布 (擬fused-LASSO法利用)

線量率分布



現場計測にて得られた線量率データをもとに、
擬fused-LASSO法を利用し、線源分布を可視化。
(2020年の計測データを東電より受領)

左図の線源分布から計算した線量率分布を可視化。

1F2号機1階エリアでの線源・線量率分布予測結果

a.(a)まとめ

各ツール(観測指示点指示、寄与率行列作成、逆推定計算、線量率3D分布高速化)を完成させ、3D-ADRES-Indoor内の線源逆推定エンジンとしてこれらを実装し、現場での限られた実測値から線源の逆推定を行い、線源分布を特定可能とした。

- 逆推定に係る「観測点指示ツール」、「寄与率行列作成ツール」、「逆推定(LASSO)計算ツール」、「ベイズ統計手法活用ツール」及び「線量率3D分布高速化ツール」の開発
- 上記ツール類から構成される「線源逆推定エンジン」を組上げ、入力データ(構造データ・観測線量率)から線源分布の推定を可能とする一連の動作検証試験を実施・確認
- 線源逆推定エンジンをリモートデスクトップ等で遠隔地間(例: 柏-楢葉)にて動作(線源逆推定)可能なWindowsデスクトップアプリ「3D-ADRES-Indoor」に集約する開発を実施した他、動作結果を遠隔共有するWEBアプリの開発

● 目的

「線源逆推定エンジン」により予測された強度の強い線源に対して、線源の除染及び線源を含む構造物を移動・撤去するケースと遮蔽体を設置するケース等をデジタル化し、対策ごとに線量率の3次元分布の変化をモンテカルロ輸送計算（PHITS）により超高速にシミュレーションする「空間線量率推定エンジン」を開発する。

● 反映先

線源分布の可視化を行う「インタラクティブ可視化エンジン」のインプットとする。

● スケジュール

実施内容	2021(令和3)年度	2022(令和4)年度
a.(b)空間線量率推定エンジンの開発		
①高強度線源への対策のデジタル化に係るツール開発作業(p.51)		
②CAD等による線源対策に係る入出力インターフェース開発作業(p.52)		
③対策効果推定のためのモンテカルロ輸送計算の超並列化及び高速化・最適化作業(p.53)		
④対策効果推定に係る計算簡略化ツールの開発作業(p.53)		
⑤対策効果推定計算のエンジン化及び検証作業(p.54)		
⑥対策効果推定ツール群のエンジン化及び検証作業(p.55)		
⑦対策効果推定遠隔共有WEBアプリの開発作業(p.58)		

a.(b)における課題とその解決策(一覧)

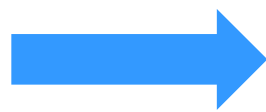
a.(b)空間線量率推定エンジンの開発	課題(開発項目)	解決策(実施内容)
①高強度線源への対策のデジタル化に係るツール開発作業 (p.51)	<ul style="list-style-type: none"> 高強度線源に対する対策を仮想空間で実施しその効果を検証するためのデジタル化ツールを開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> 基本エンジン (3D-ADRES-Indoor) 内に高強度線源対策デジタル化ツールを開発し、組み込んだ。 線量率分布の変化を計算可能にするまでの一連の動作を確認した。
②CAD等による線源対策に係る入出力インターフェース開発作業(p.52)	<ul style="list-style-type: none"> CAD等を活用し、構造物をパーツ化し線源対策を実現するツールを開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> 3D-ADRES-Indoor内において、パーツ単位での線源対策作業を実現した。
③対策効果推定のためのモンテカルロ輸送計算の超並列化及び高速化・最適化作業(p.53)	<ul style="list-style-type: none"> 対策効果 (除染、除去、移動、遮蔽等) による再計算を高速に且つ精度良く効果を推定するツールを開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> 線源対策効果を高速に計算するアルゴリズムを策定し、PHITSのダンプファイル活用～変化分のみ高速計算が可能であることを確認。
④対策効果推定に係る計算簡略化ツールの開発作業 (p.53)	<ul style="list-style-type: none"> 対策効果 (除染、除去、移動、遮蔽等) による効果を簡略計算し高速に効果を推定するツールを開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> 対策効果推定に係る計算簡略化ツールを開発し、実空間(JAMTR)にて試験を実施した。
⑤対策効果推定計算のエンジン化及び検証作業 (p.54)	<ul style="list-style-type: none"> 簡易計算にて、3D-ADRES-Indoorの開発整備 (線源対策シミュレーション) を実施した。 	<ul style="list-style-type: none"> 簡易モデルに対して簡易計算を行い、高強度線源対策 (除染、除去、移動、遮蔽)のそれぞれの対策とそれぞれの結果が問題なく可視化できることを確認した。
⑥対策効果推定ツール群のエンジン化及び検証作業 (pp.55-57)	<ul style="list-style-type: none"> 上記⑤を一連の流れで行うことができるようにする。 	<ul style="list-style-type: none"> 簡易モデルに対してPHITS計算を適用し、高強度線源対策の結果が問題なくできることを確認した。
⑦対策効果推定遠隔共有WEBアプリの開発作業 (p.58)	<ul style="list-style-type: none"> 対策効果 (除染、除去、移動、遮蔽等) による低減効果を遠隔共有する。 	<ul style="list-style-type: none"> 対策効果を遠隔共有した。

空間線量率推定エンジンの開発における課題

課題

線源対策の効果確認のツール開発

逆推定した
高強度線源

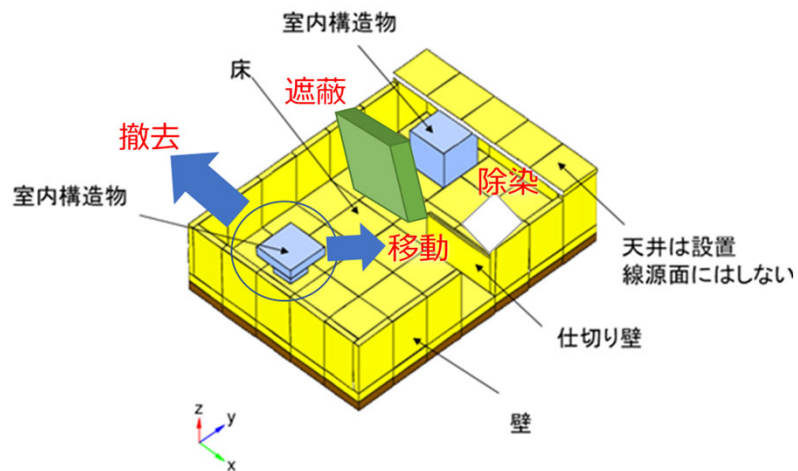


高強度線源対策（除染、除去、移動、遮蔽）をサイバー空間上でシミュレートすることで、実際の作業空間にて空間線量率を低減できるか、効果を確認する必要がある。

高強度線源への各対策（デジタル化）

各対策を選択

各対策の効果を実感



<https://pretiaar.com/artimes/article/12101/>



<https://eiki-business.co.jp/blog/2017/04/20/70>

高強度線源対策の効果（各対策実行後）を実感できるツールの開発

- 各対策に対して線量率低減を体感し、効率の良い除染計画立案を可能にする



廃炉作業の加速に繋がる

解決策

STL操作 & 放射線計算設定をGUI化により解決したが、**数多くの条件設定が必要であった**
➔課題：更なるユーザビリティの向上が課題 [a.(c)報告参照]

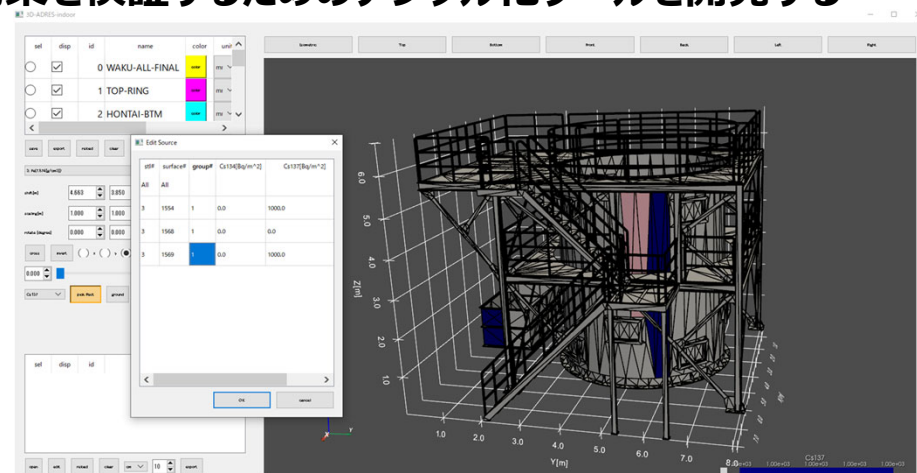
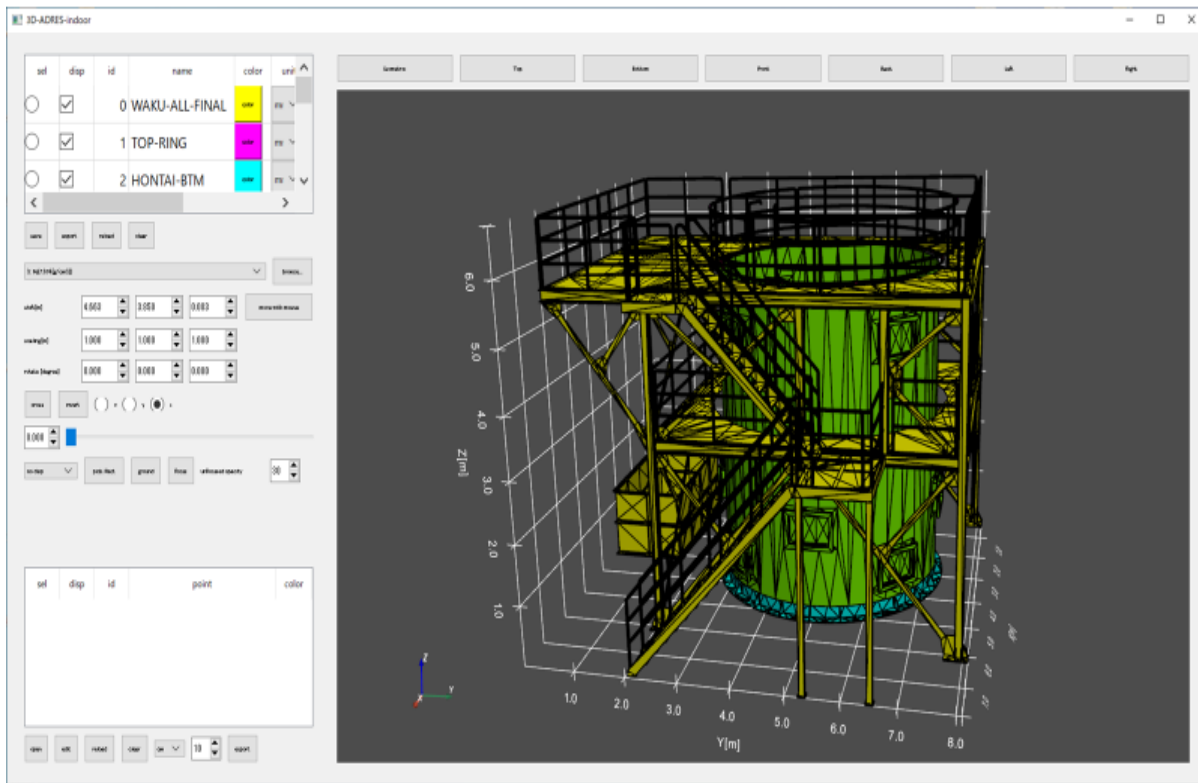
**対策#2
 (除染)追加
 →遮蔽体撤去**

選択	候補	id	ファイル名
<input type="checkbox"/>		0	Poolcanal_1_cut
<input type="checkbox"/>		1	Poolcanal_2
<input type="checkbox"/>		2	Poolcanal_3
<input type="checkbox"/>		3	Poolcanal_4
<input checked="" type="checkbox"/>		4	Poolcanal_5
<input type="checkbox"/>		5	Poolcanal_6
<input checked="" type="checkbox"/>		6	Poolcanal_7

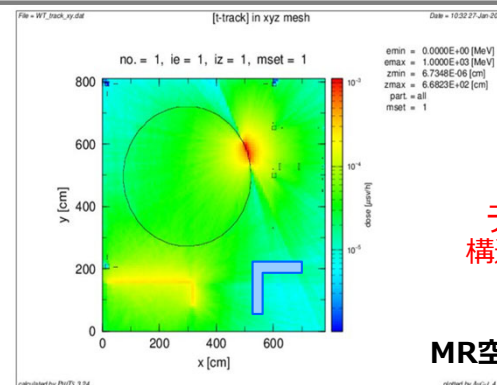
① 高強度線源への対策のデジタル化に係るツール開発作業

目的（開発）：高強度線源に対する対策を仮想空間で実施し其の効果を検証するためのデジタル化ツールを開発する

- 基本エンジン（3D-ADRES-Indoor）内に高強度線源対策デジタル化ツールを開発し組み込み、線量率分布の変化を計算可能にする。



Step2 線源付与: 楢葉モックアップ壁面に仮線源（逆推定後）を付与



高強度線源への対策
(除染、除去、移動、遮蔽)

デジタル化技術：
構造情報の変化⇒放射線シミュレーション
一連の動作を確認

MR空間内でデモ a.(c)の成果にて紹介)

Step1 エンジン動作: 構造データ（楢葉モックアップ施設）読み込みの確認

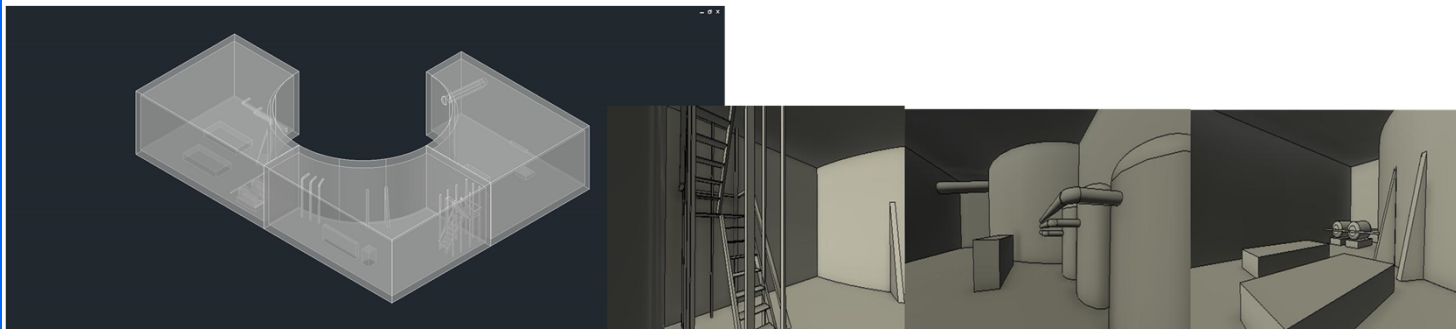
Step3 構造環境変化を仮想空間上で実現する

開発スケジュール

高強度線源への対策のデジタル技術の策定 ⇒ 実装作業 ⇒ 検証作業 ⇒ 試験作業 ⇒ まとめ
デジタル化ツールをJMTRで適応試験を実施

② CAD等による線源対策に係る入出インターフェース開発作業

目的（開発）：CAD等を活用し構造物をパーツ化し線源対策を実現するツールを開発する



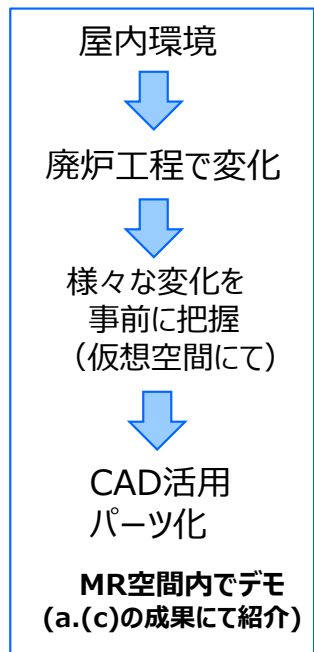
高強度線源への対策
(除染、除去、移動、遮蔽)

↓
詳細作業の仮想空間での実現

↓
CAD利用によるパーツ準備ツールの開発

パーツ単位での線源対策作業の実現 (3D-ADRES-Indoor)

例：除去操作



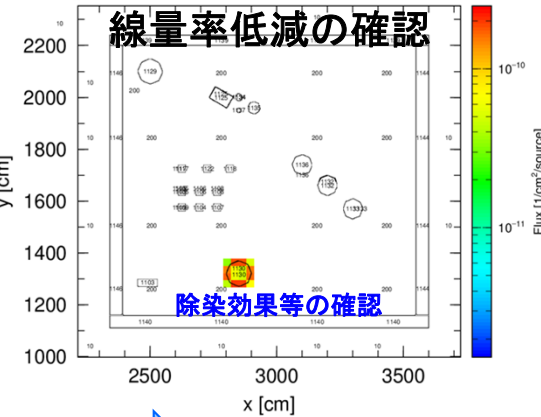
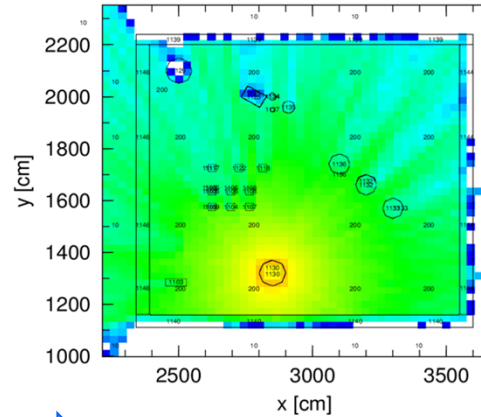
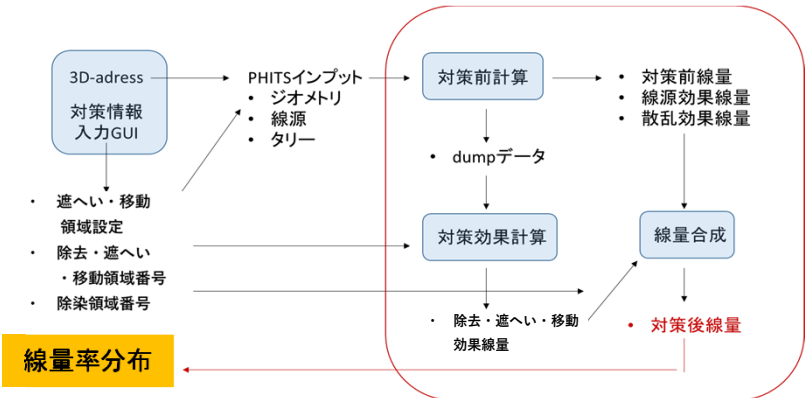
開発スケジュール

CADによる線源対策に係る入出インターフェース仕様策定 ⇒ 実装作業 ⇒ 検証作業
線源対策用ツールをJMTRで試験

a.(b) 空間線量率推定エンジンの開発(7/13)

③ 対策効果推定のためのモンテカルロ輸送計算の超並列化及び高速化・最適化作業

目的(開発)： 対策効果（除染、除去、移動、遮蔽等）による再計算を高速に且つ精度良く効果を推定するツールが必要



線源対策効果を高速に計算するアルゴリズムを策定 → PHITSのダンプファイル活用 → 変化分のみ高速計算可能を確認

開発の流れ 仕様策定⇒開発及び実装⇒仮想空間での検証⇒実空間（JMTR）での試験

線源対策後の線量率高速計算ツールをJMTRで試験

④ 対策効果推定に係る計算簡略化ツールの開発作業

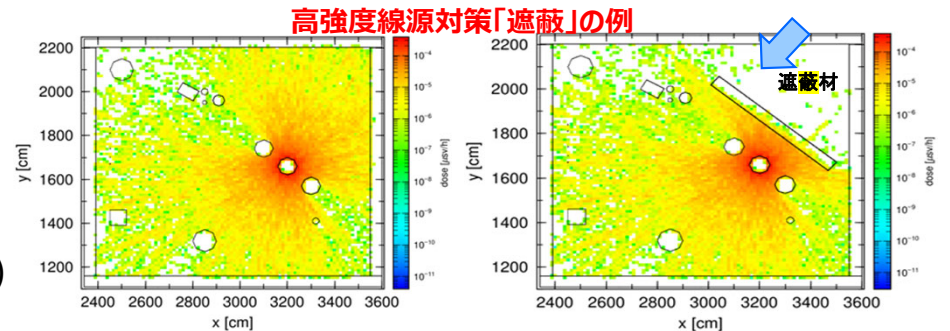
目的(開発)： 対策（除染、除去、移動、遮蔽等）による効果を簡略計算し高速に効果を推定するツールが必要

高強度線源対策（除染、除去、移動、遮蔽）

対策後の空間線量率 3D分布の変化

簡略計算（高速）

モンテカルロ計算(上記ツールに該当)



開発の流れ 仕様策定⇒開発及び実装⇒仮想空間での検証⇒実空間（JMTR）での試験

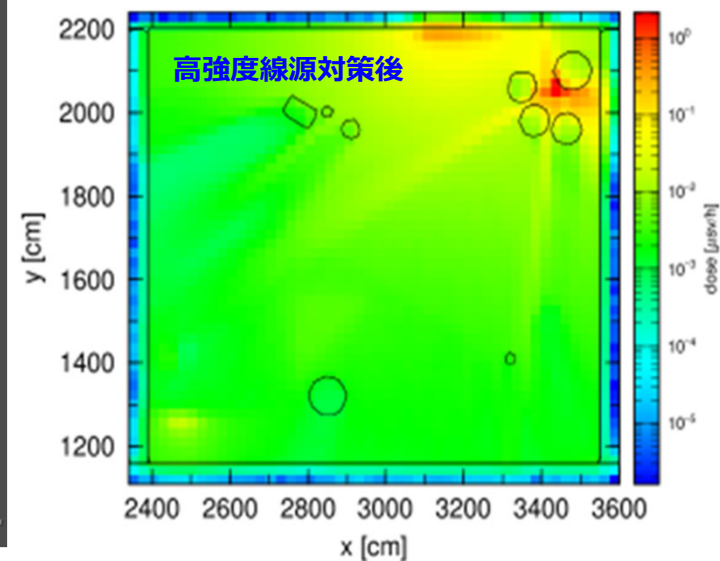
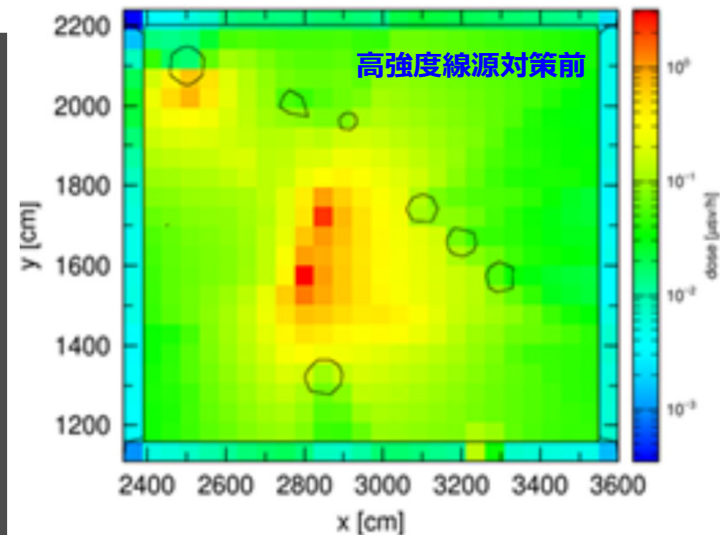
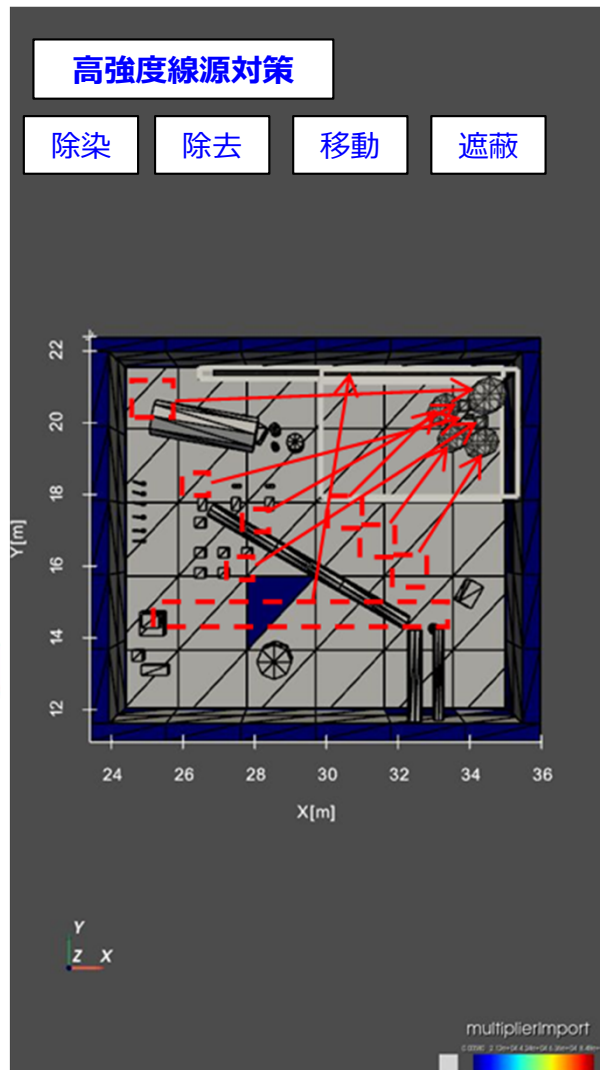
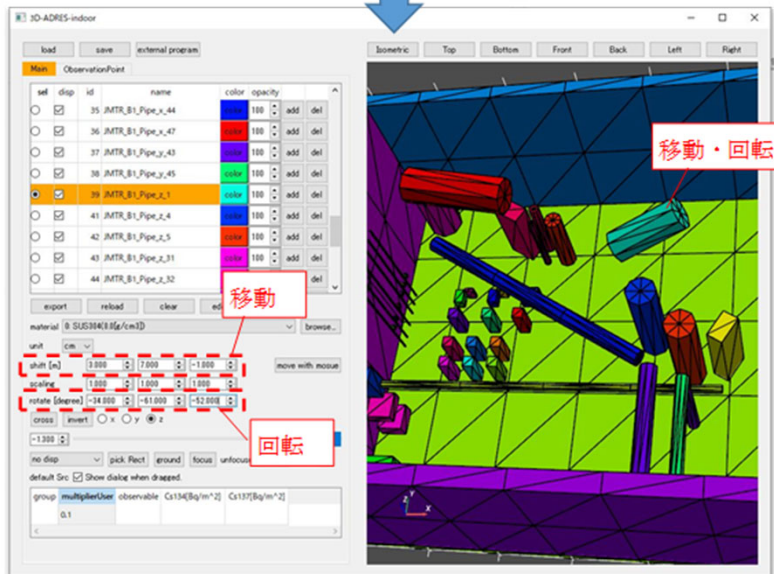
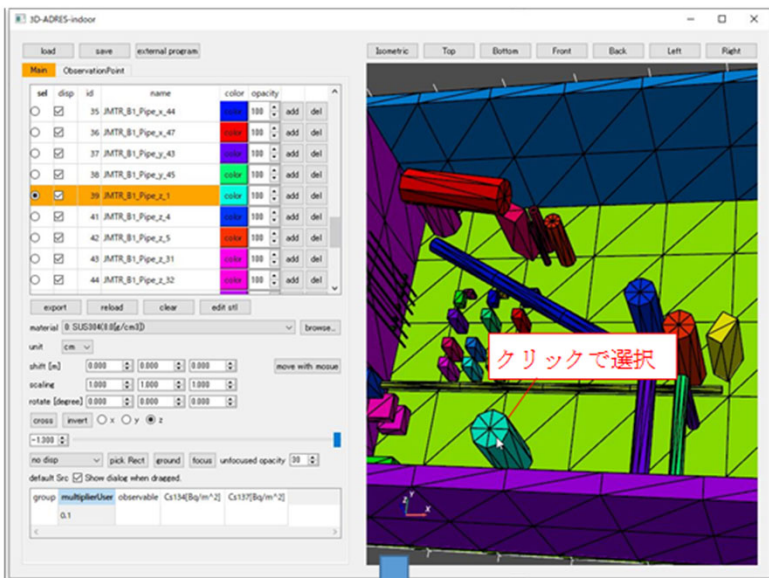
線源対策後の線量率簡略計算ツールを様々な環境で試験

⑤ 対策効果推定計算のエンジン化及び検証作業

3D-ADRES-Indoorの開発整備 (線源対策シミュレーション)

簡易モデルに対して簡易計算を行った結果を表示したもの

→大規模、複雑な建屋への適用を見据え、検証を実施

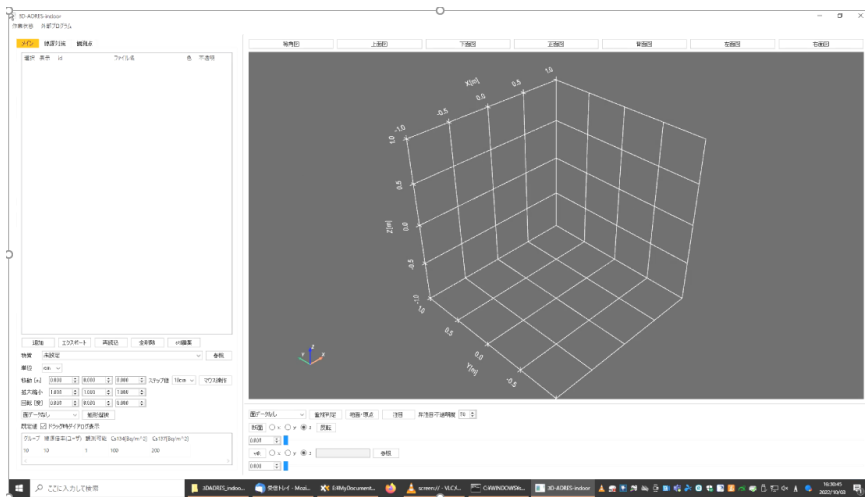


⑥ 対策効果推定ツール群のエンジン化及び検証作業 (1/3)

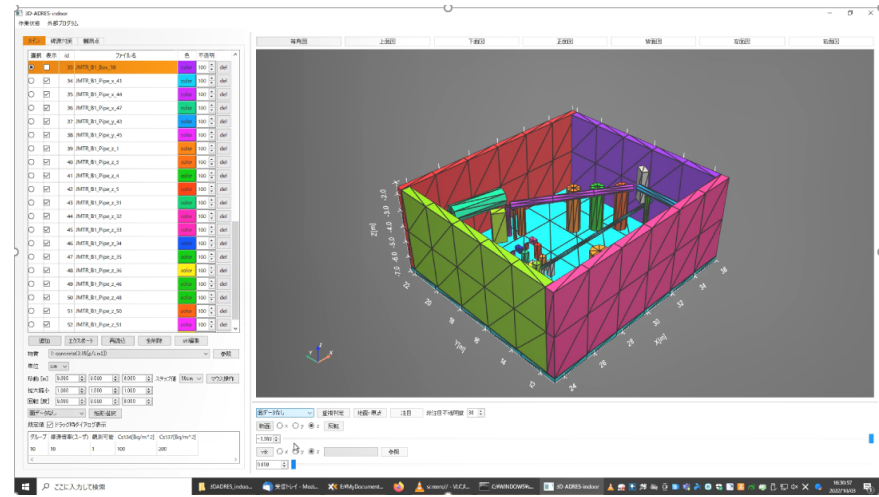
3D-ADRES-Indoor動作のデモ動画 (1/2)

※簡易モデルに対してPHITS計算を行った結果を示したもの

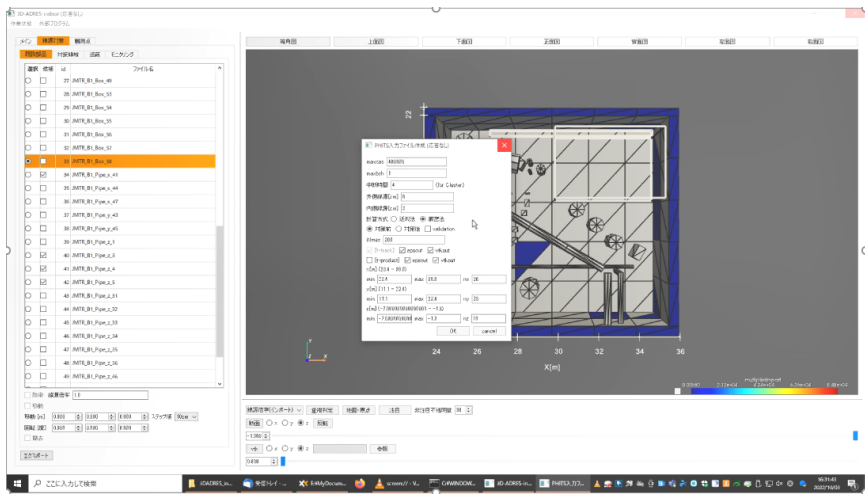
(1) 3D-ADRES-Indoorの起動



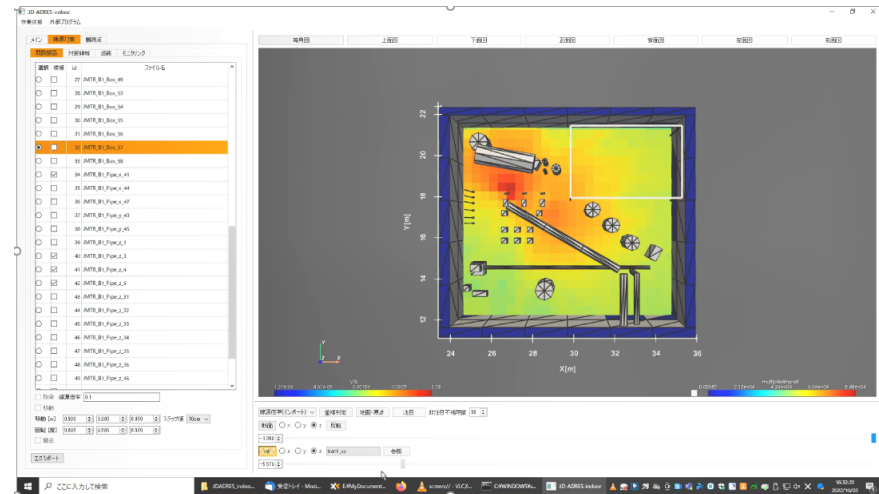
(2) STLデータの読み込み



(3) 線量データの読み込み



(4) 線量データの可視化(ビューワでの確認)



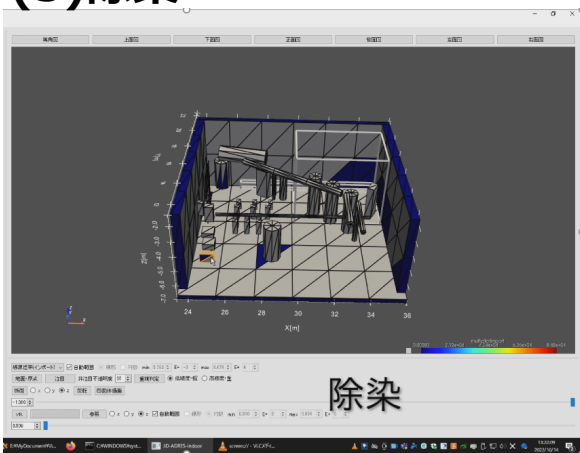
⑥対策効果推定ツール群のエンジン化及び検証作業 (2/3)

3D-ADRES-Indoor動作のデモ動画 (2/2) -高強度線源対策-

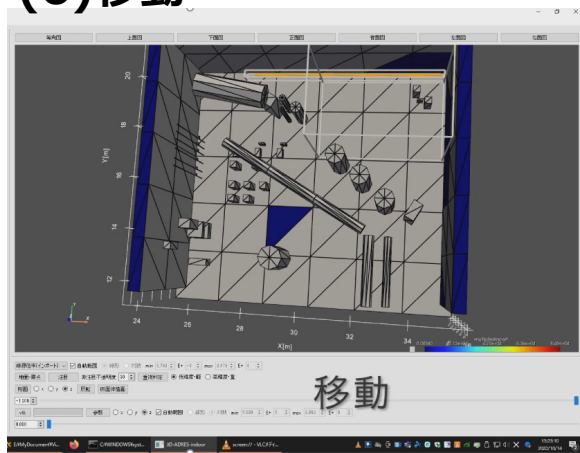
高強度線源対策(5)~(8)と計算結果の可視化

前頁より

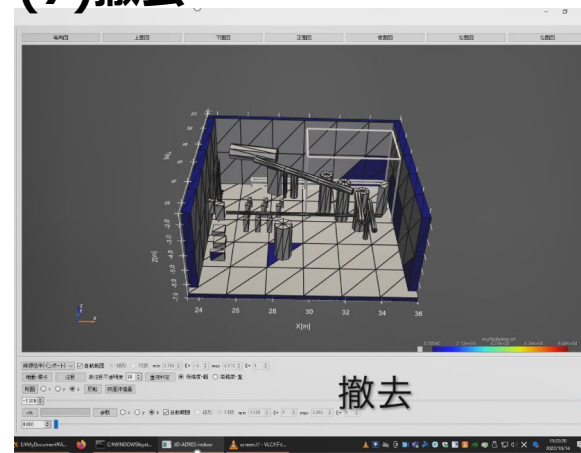
(5)除染



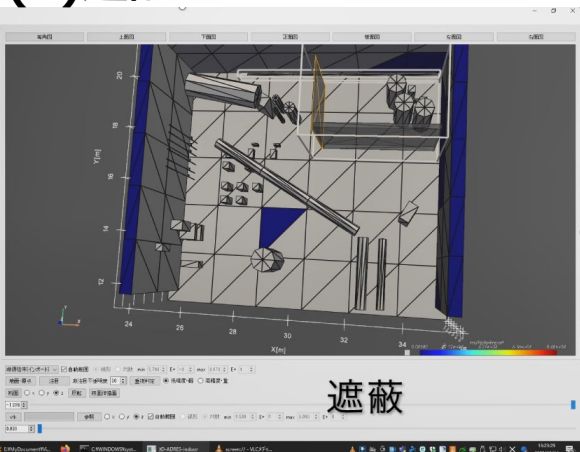
(6)移動



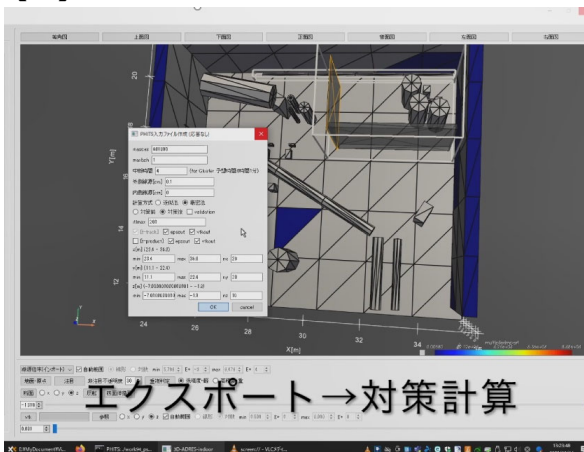
(7)撤去



(8)遮蔽



(9)線源対策後の線量計算

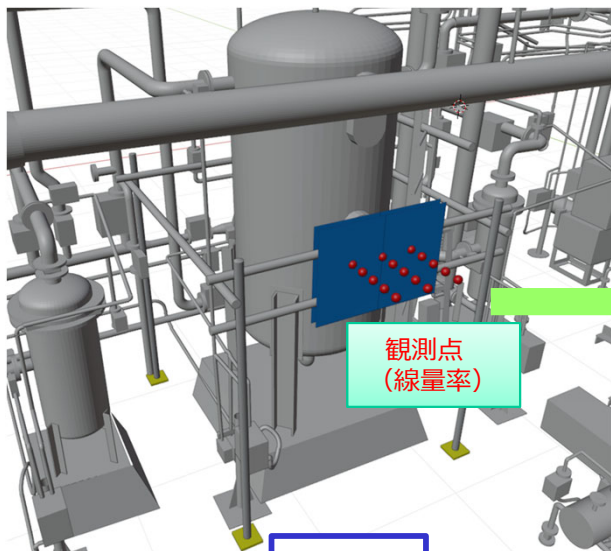


(10)計算結果の可視化(ビューワでの確認)

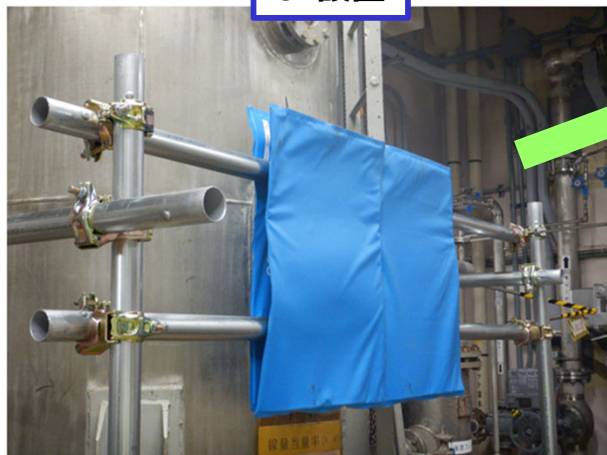


⑥ 対策効果推定ツール群のエンジン化及び検証作業 (3/3)

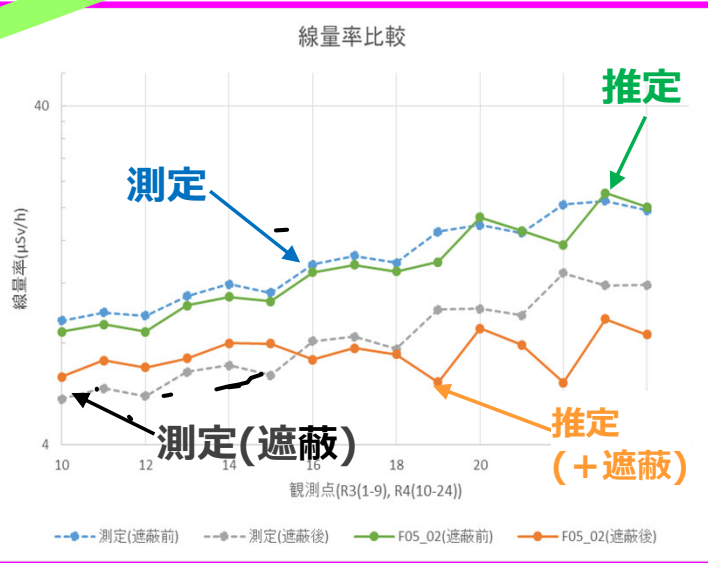
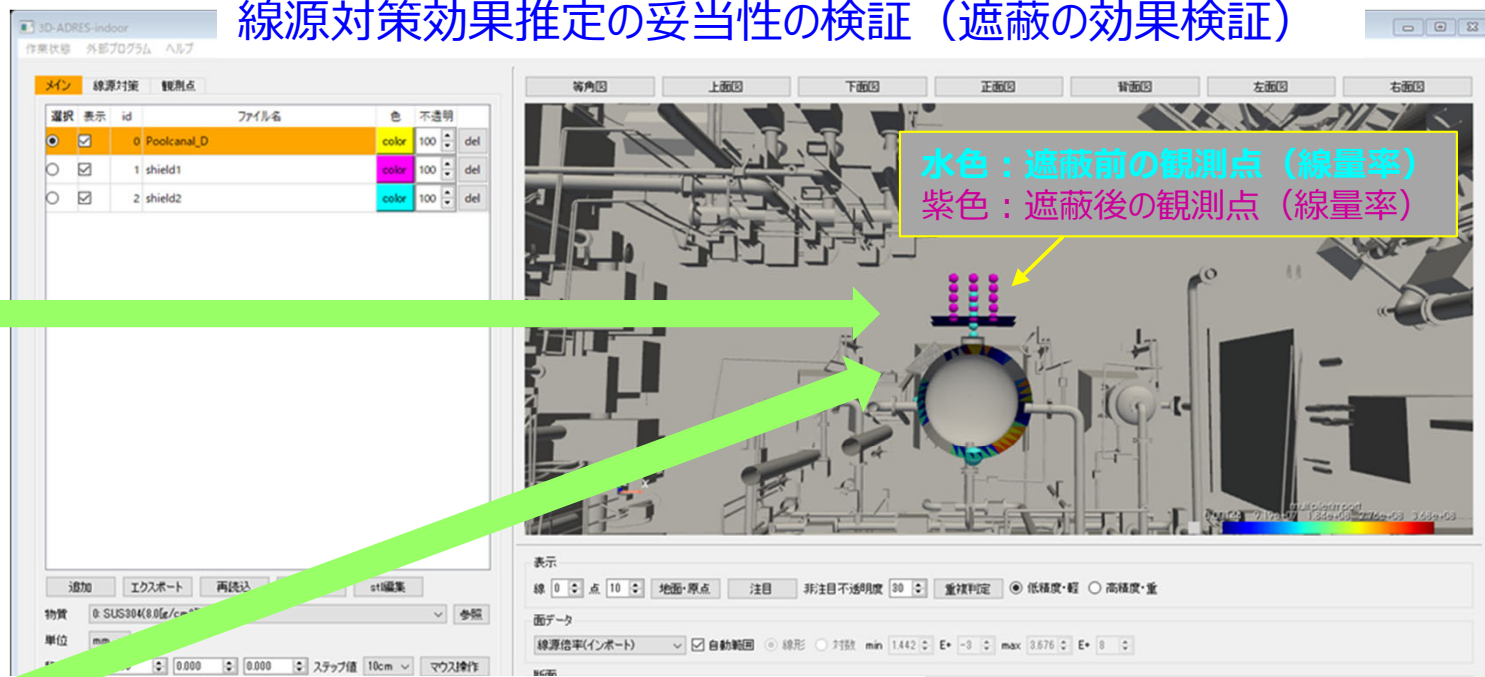
線源対策効果推定の妥当性の検証 (遮蔽の効果検証)



c. 設置



遮蔽材(鉛板:2枚)の設置



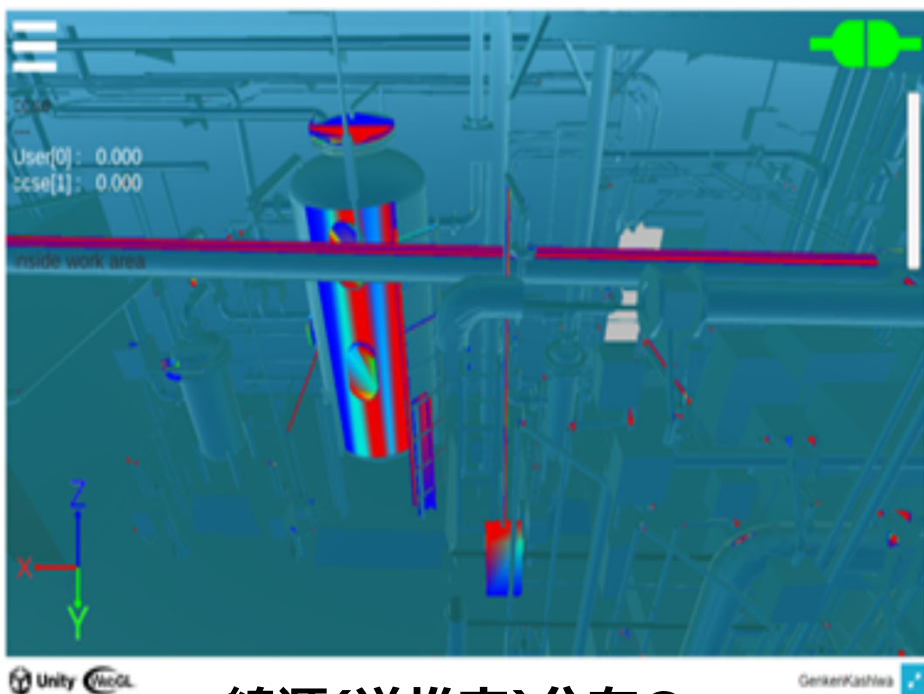
- 将来課題：
- ① 容易な設定+グラフ出力等 (左図)
 - ② 遮蔽時の推定線量率の過剰推定

3D-ADRES-Indoor (線量率推定エンジン) → 線源対策模擬

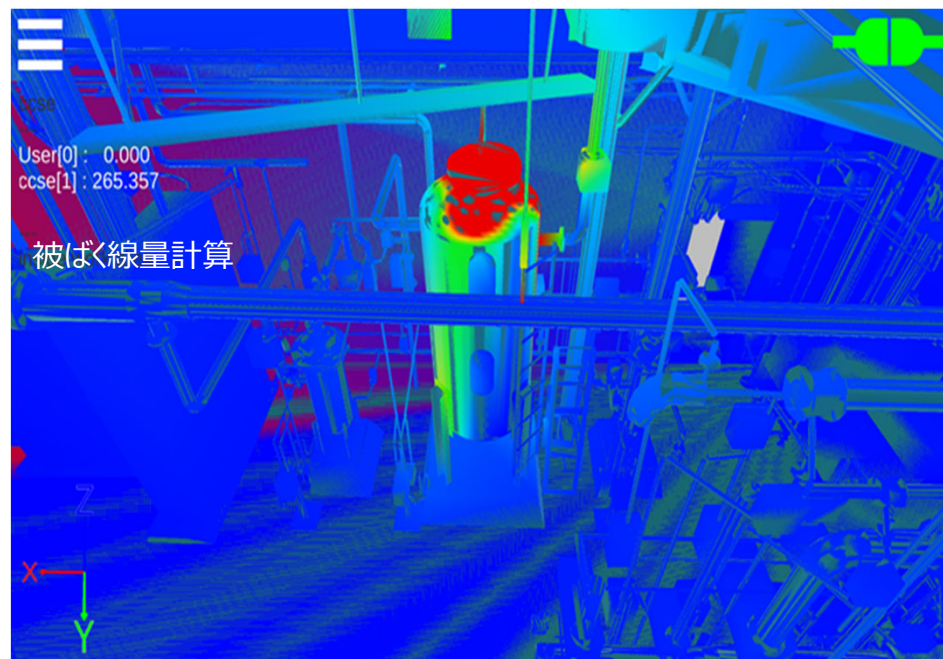
⑦ 対策効果推定遠隔共有WEBアプリの開発作業

→a.(a) ⑦に示す「遠隔共有WEBアプリ」としても利用可能

各エンジンの動作結果の遠隔共有WEBアプリケーション

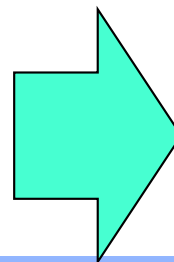


線源(逆推定)分布の
WEBアプリ表示例



線量率 (逆推定線源⇒順推定)
分布のWEBアプリ表示例

WEB-GLをベースとして開発
⇒WEBブラウザで結果
(プールカナル室)を遠隔共有



今後の課題
更なる機能追加とユーザビリティ向上

a.(b)まとめ

高強度線源対策ツールを完成させ、線源対策(除染、除去、移動、遮蔽)効果を確認した。

- 空間線量率推定に係る高強度線源対策（除染、除去、移動、遮蔽）時の「線量率分布計算ツール」等の開発、モンテカルロ輸送コード（PHITS）及び簡易推定コードを使用可能とするシステムの構築他、計算ツールをエンジン化した「空間線量率推定エンジン」の組み上げ、動作検証試験の実施
- 上記の空間線量率推定エンジンを、リモートデスクトップ等で遠隔地間（例：柏一橋葉）にて動作（空間線量率推定）可能な、Windowsデスクトップアプリ「3D-ADRES-Indoor」に集約する開発を実施した他、動作結果を遠隔共有するWEBアプリの開発

- **目的**
1F廃炉にて想定される各現場に対し、逆推定した線源分布や線量率の3次元分布を可視化する他、構造物、配管、遮蔽物等の移動や撤去の対策を実施した場合の線量率の3次元分布の変化をインタラクティブに可視化する「**インタラクティブ可視化エンジン**」を開発する。その際、作業者目線での可視化エンジンとするため、最適なデバイスを検討する。
- **反映先**
対策を実施した場合の線源や線量率の3次元分布を可視化することにより、安全かつ効率的な作業計画の策定及び確実な現場作業を実現に資する。
- **スケジュール**

実施内容	2021(令和3)年度	2022(令和4)年度
a.(c)インタラクティブ可視化エンジンの開発		
①高速インタラクティブVR/AR可視化実現機能開発作業 (P.64)	<p>詳細計画立案</p> <p>エンジン開発</p>	<p>まとめ</p>
②線量率低減対策効果のインタラクティブ可視化ツールの開発作業 (P.68)		<p>詳細計画立案</p> <p>ツール開発</p> <p>まとめ</p>
③VRによる没入感実現及びモックアップ施設でのAR化作業 (P.70)		<p>詳細計画立案</p> <p>AR化作業</p> <p>まとめ</p>

a.(c)における課題とその解決策(一覧)

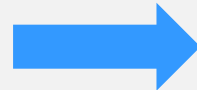
a.(b)空間線量率推定エンジンの開発	課題(開発項目)	解決策等(実施内容)
①高速インタラクティブVR/AR可視化実現機能 開発作業 (pp.64-67)	・観測点を3次元空間 (VR/AR) で指示する可視化ツールを開発し観測情報の取得を支援する(p.64)	JMTRでの可視化ツール動作 (観測点指示結果の可視化機能)を確認した。
	・構造物(配管、タンク、制御盤)等の移動や撤去の対策実施状況を可視化する(p.65)	JMTRでの可視化ツール動作(構造物:配管、タンク、制御盤)等の移動や撤去を可視化した。
	・線源の遮蔽等の対策実施状況を可視化する。(p.66)	JMTRでの可視化ツール動作 (線源の遮蔽等の対策実施状況)を確認した。
	・観測点を3次元空間 (MR/AR) で指示し、線量率を <input/> 可能な可視化ツールを開発する。(p.67)	JMTRでのAR可視化機能開発と動作確認(MR)観測点指示結果や線源及び線量率結果を可視化した。
②線量率低減対策効果のインタラクティブ可視化ツールの開発作業 (pp.68-69)	・現場計測で得られたデータを用いて、効果的な可視化技術を開発すること	現場の環境に、放射線場 (線源・線量率) を投影することで、効果的にその情報を伝えることを目標として、種々の可視化技術 (特に3D可視化) を開発した。
③VRによる没入感実現及びモックアップ施設でのAR化作業 (pp.70-74)	・モックアップ施設にてバーチャルで立体的(=3D)で可視化することで没入感を実現することをVR/ARで実現する。	モックアップ施設にてバーチャルで立体的(=3D)で可視化することで没入感を実現することをVR/ARで実現した。

1.課題の抽出とその解決策(1/2)

課題

現場計測で得られたデータを用いて、効果的な可視化技術を開発する

推定結果を効果的に可視化



仮想（デジタル）空間での**対策等を最新技術で可視化**し関係者（作業員+管理者）間で**イメージを遠隔共有**し意志決定をスムーズに ⇒ 廃炉作業の加速に繋がる

作業空間
線量率3D分布
対策効果3D分布変化
作業員

遠隔共有

仮想（デジタル）空間
線量率3D分布
対策効果3D分布変化
管理者

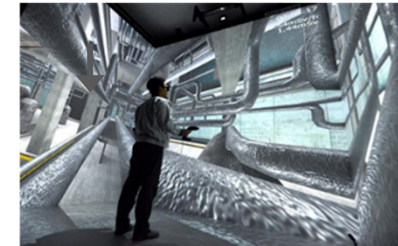
VR技術開発
3D放射線量可視化

ヘッドマウントディスプレイ



<https://www.rawpixel.com/image/2762332/null>
遠隔共有（簡易体験）

楢葉VRの活用



遠隔共有（本格体験）

AR技術開発
対策3次元効果可視化

シースルーARデバイス



<https://shiropen.com/2016/03/03/13919/>

可搬型ARデバイス



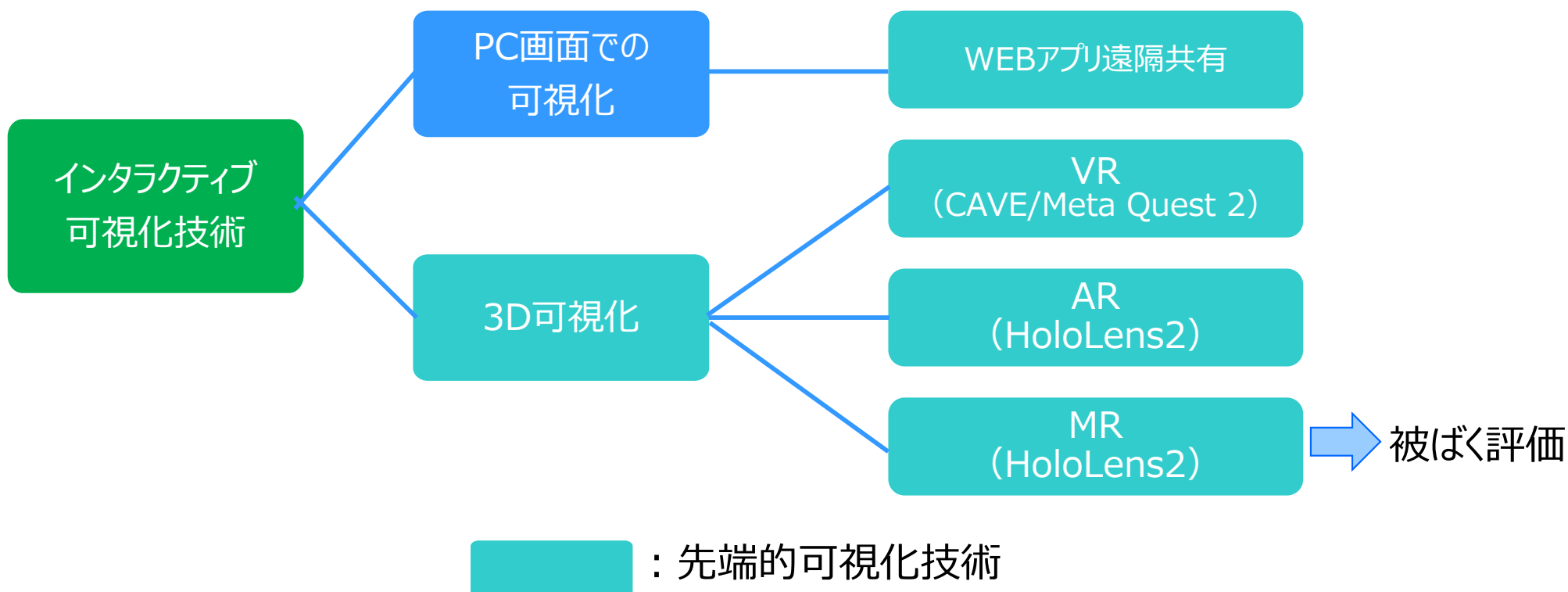
<https://eiki-business.co.jp/blog/2017/04/20/70>

遠隔共有（作業現場での活用）

2.課題の抽出とその解決策(2/2)

課題 現場計測で得られたデータを用いて、効果的な可視化技術を開発すること

解決策 現場の環境に、放射線場（線源・線量率）を投影することで、効果的にその情報を伝えることを目標として、種々の可視化技術（特に3D可視化）を開発



① 高速インタラクティブVR/AR可視化実現機能開発(1/4)

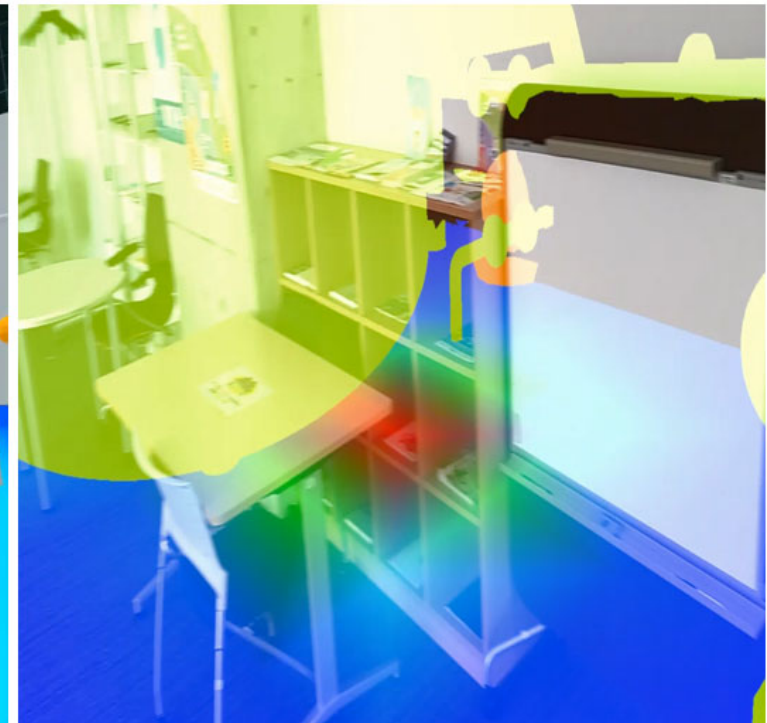
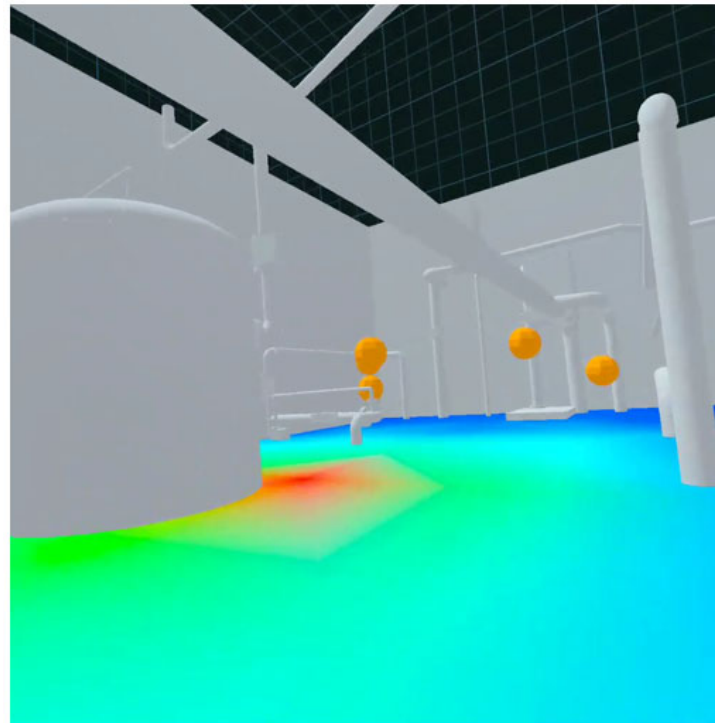
目的(開発) : 観測点を3次元空間 (VR/AR) で指示する可視化ツールを開発し、観測情報の取得を支援

<開発した可視化ツール (VR・AR) の概要> **観測点指示結果の可視化 (VR/MR)**



東大FC (JAEA・柏地区) の2階
仮想空間実験スペースとして活用

<利用デバイス>



開発の流れ

仕様策定 ⇒ 開発及び実装 ⇒ 動作確認 ⇒ JMTRでの可視化ツール動作確認
観測点指示結果の可視化機能確認済

① 高速インタラクティブVR/AR可視化実現機能開発(2/4)

目的(開発): 構造物(配管、タンク、制御盤)等の移動や撤去の対策実施状況を可視化

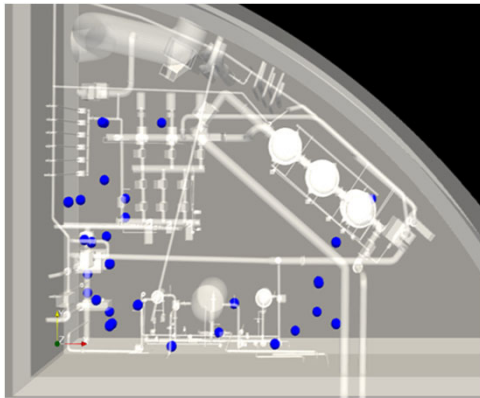
<開発した可視化ツール (MR*) の概要>

※MR (複合現実 : Mixed Reality)

<利用デバイス>



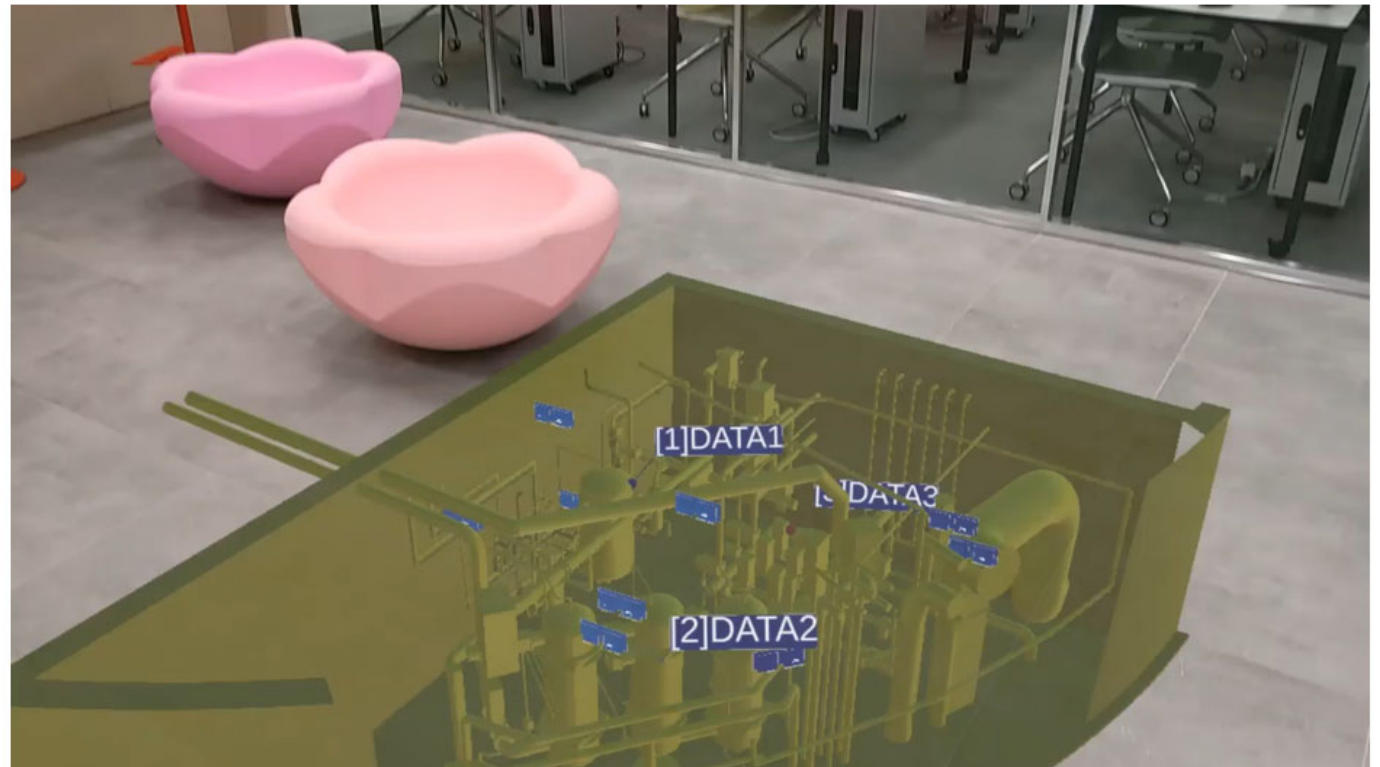
AR:HoloLens2



JMTRデータをスケールダウンし構造物等の移動や撤去の環境変化を可視化 (MR技術の活用)



廃炉に係る様々な対策を仮想空間上で計画することが可能



開発の流れ

仕様策定 ⇒ 開発及び実装 ⇒ 動作確認 ⇒ JMTRでの可視化ツール動作確認
構造物 (配管、タンク、制御盤) 等の移動や撤去を可視化

① 高速インタラクティブVR/AR可視化実現機能開発(3/4)

目的（開発）：線源の遮蔽等の対策実施状況を可視化する技術が必要。

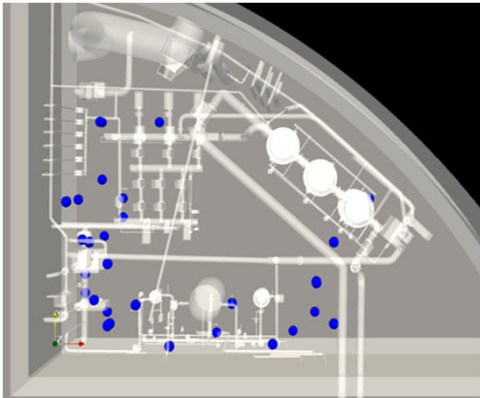
<開発した可視化ツール(AR※)の概要>

※AR（拡張現実：Augmented Reality）

<利用デバイス>



AR:HoloLens2



JMTRデータを実スケールにて
構造物等への遮蔽等の環境変化を可視化
(AR/MR技術の活用)



廃炉に係る様々な対策を仮想空間上で
計画することが可能



開発の流れ

仕様策定 ⇒ 開発及び実装 ⇒ 動作確認 ⇒ JMTRでの可視化ツール動作確認
線源の遮蔽等の対策実施状況を可視化

① 高速インタラクティブVR/AR可視化実現機能開発(4/4)

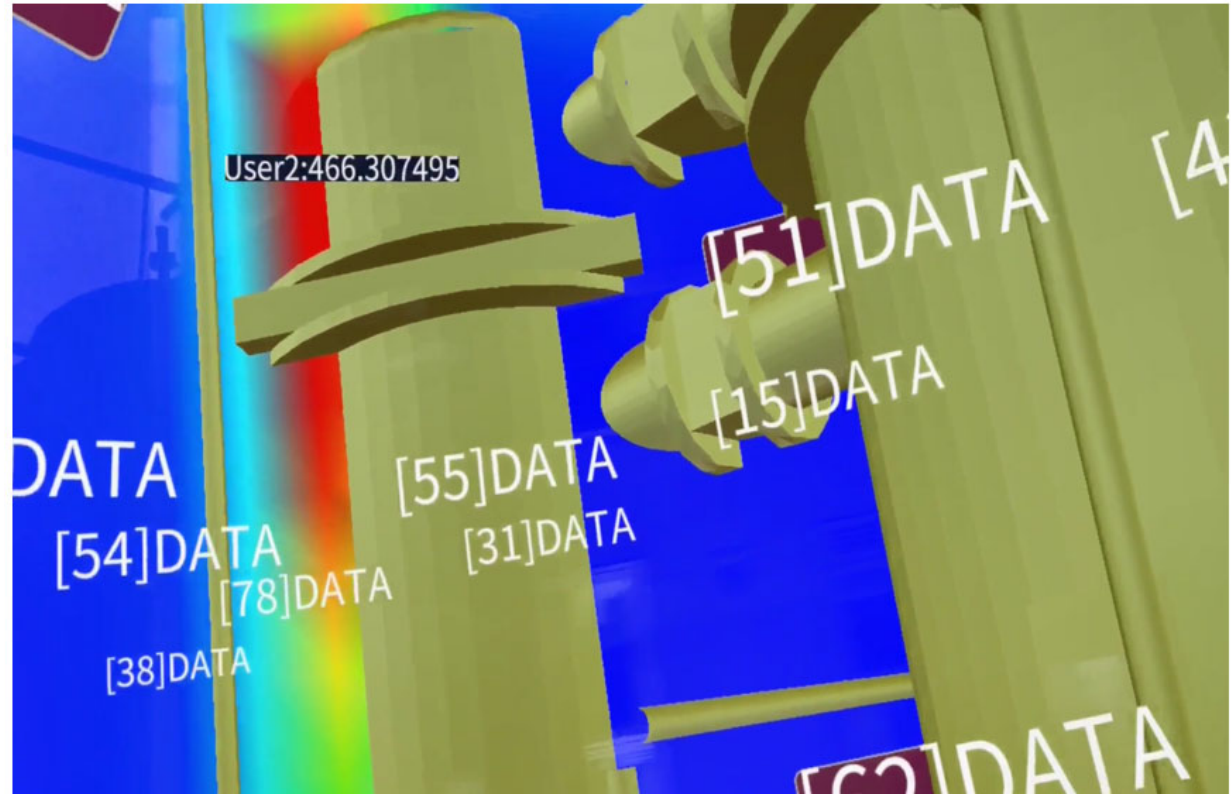
目的(開発) : 観測点を3次元空間 (MR/AR) で指示し線量率をインプット可能な可視化ツールを開発

<可視化ツール (MR/AR) の適用>

観測点指示結果の可視化 (MR/AR)



東大FC (JAEA・柏地区) の2階
仮想空間実験スペースとして活用



VR <利用デバイス> AR



Oculus Quest 2



HoloLens2 位置合わせ

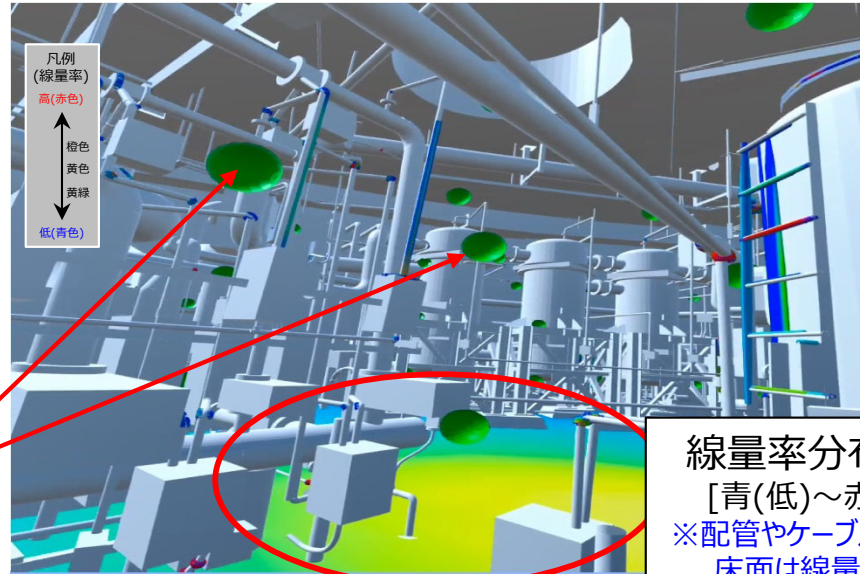
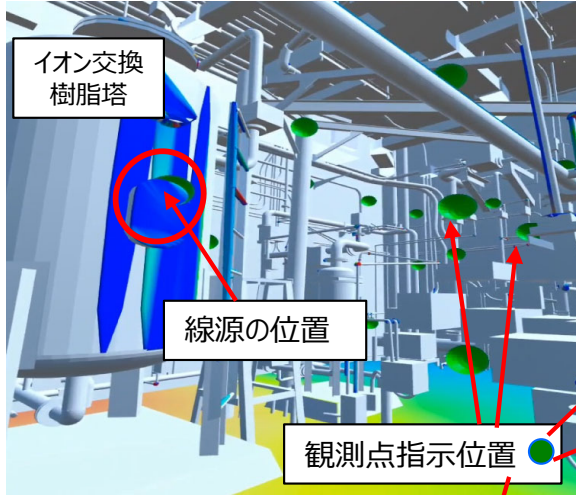
開発の流れ

JMTRでのMR可視化機能開発 ⇒ JMTRでのAR可視化機能開発と動作確認 (MR)
観測点指示結果や線源及び線量率結果の可視化

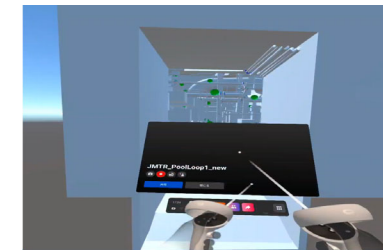
②線量率低減対策効果のインタラクティブ可視化ツールの開発作業(1/2)

1. JMTRプールカナル循環系機器室での各種結果可視化

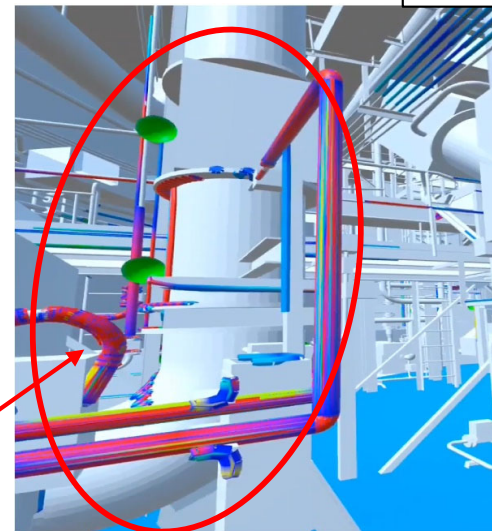
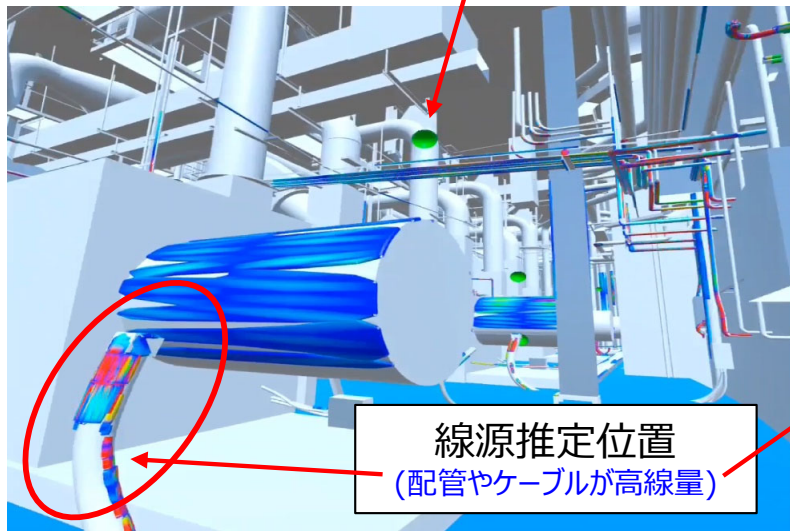
JMTR プールカナル循環系機器室(VR可視化)



Oculus Quest 2



2本のコントローラーにて操作



JMTRプールカナル循環系機器室

- ・3次元空間での観測点指示点の可視化
- ・線量率分布の可視化

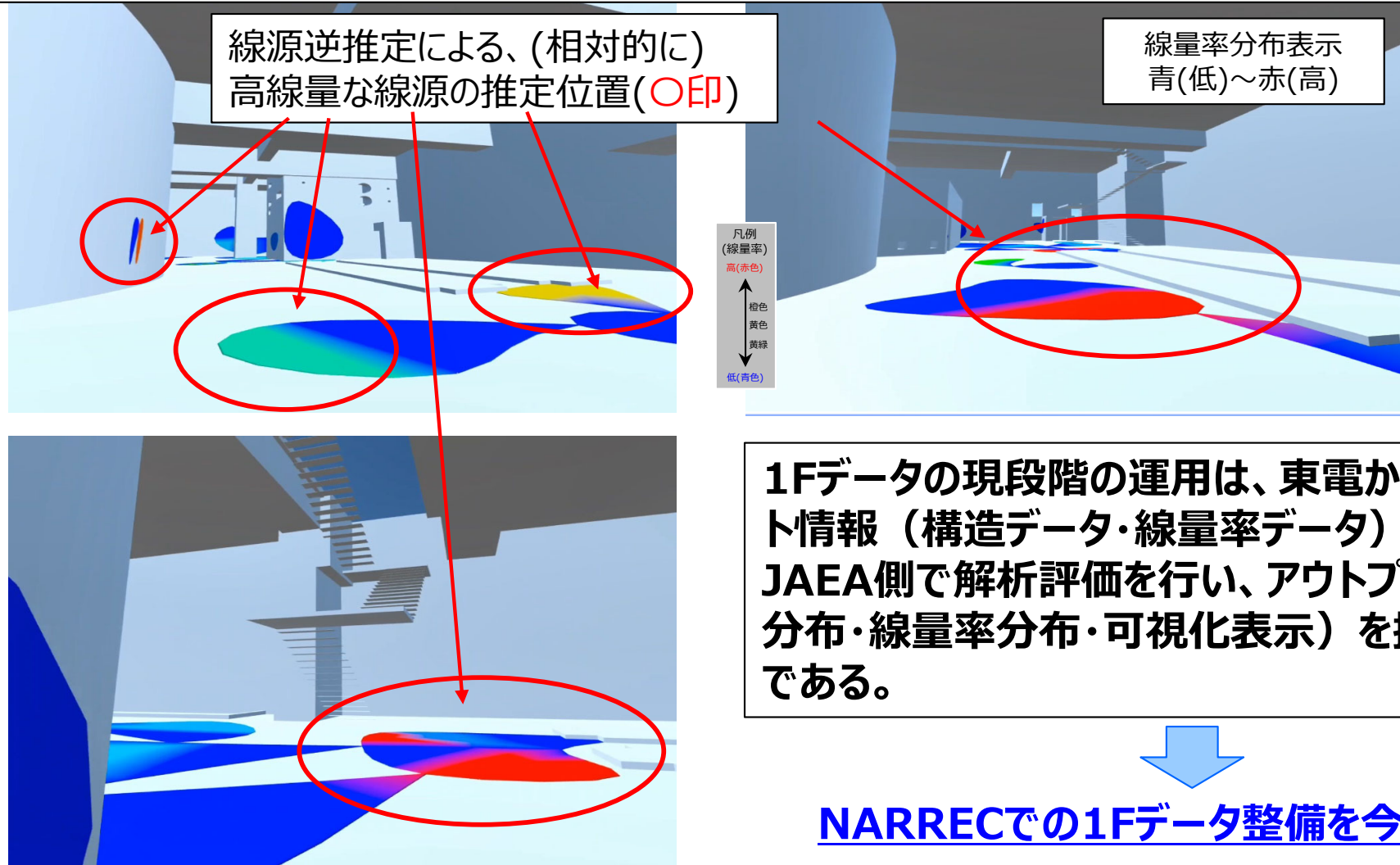


高速インタラクティブVR可視化

②線量率低減対策効果のインタラクティブ可視化ツールの開発作業(2/2)

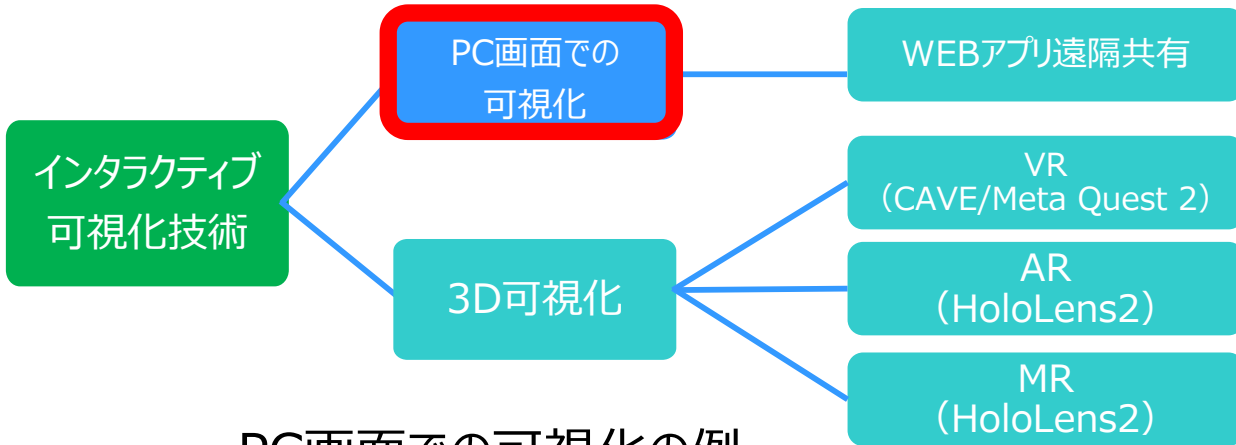
2.1F2号機1階での逆推定結果可視化

1F 2号機の可視化データについて、北西-南西エリアを対象(東電ニース)とした。
・「2013年：構造データ」及び「2014年：事故後の線量率データ(東電からの受領データ)を使用



③VRによる没入感実現及びモックアップ施設でのAR化作業(1/5)

インタラクティブ可視化技術の開発...①PC画面での可視化

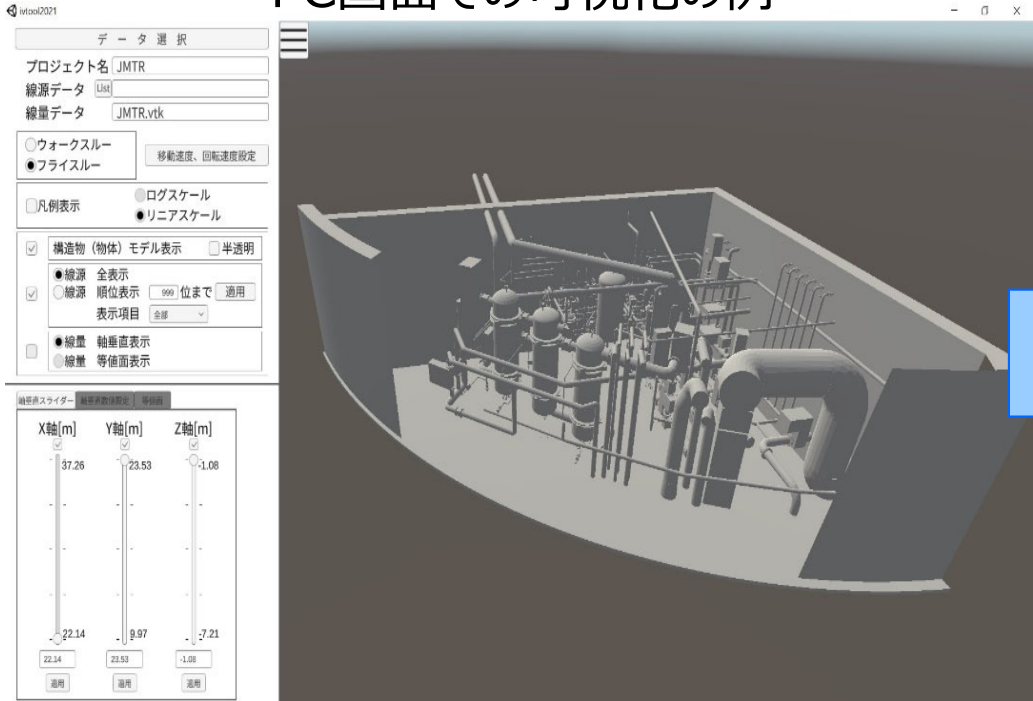


PC画面での可視化
 PC画面で高い応答性を示す可視化を実現
 高次プラットフォームを利用せず開発
高速応答を実現し課題を解決

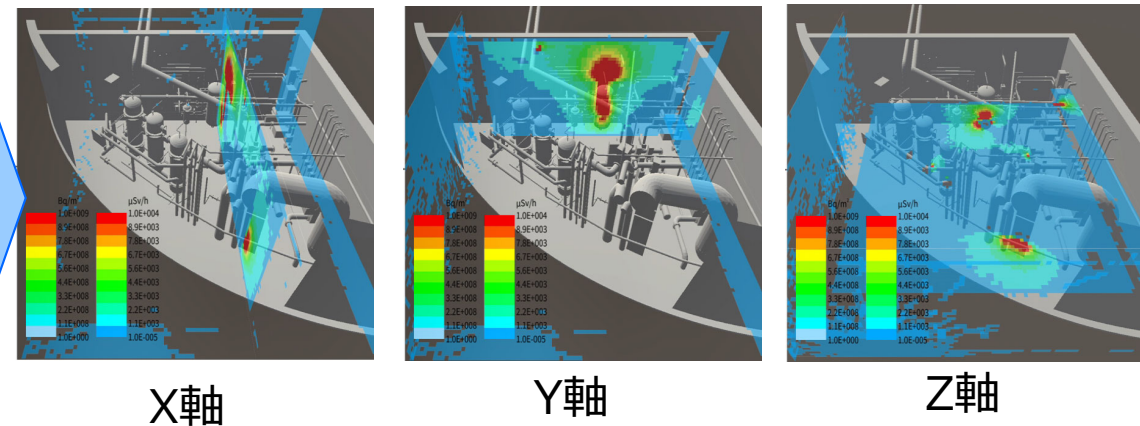
被ばく評価

課題：更なる操作性の向上
 (c. 報告参照)

PC画面での可視化の例

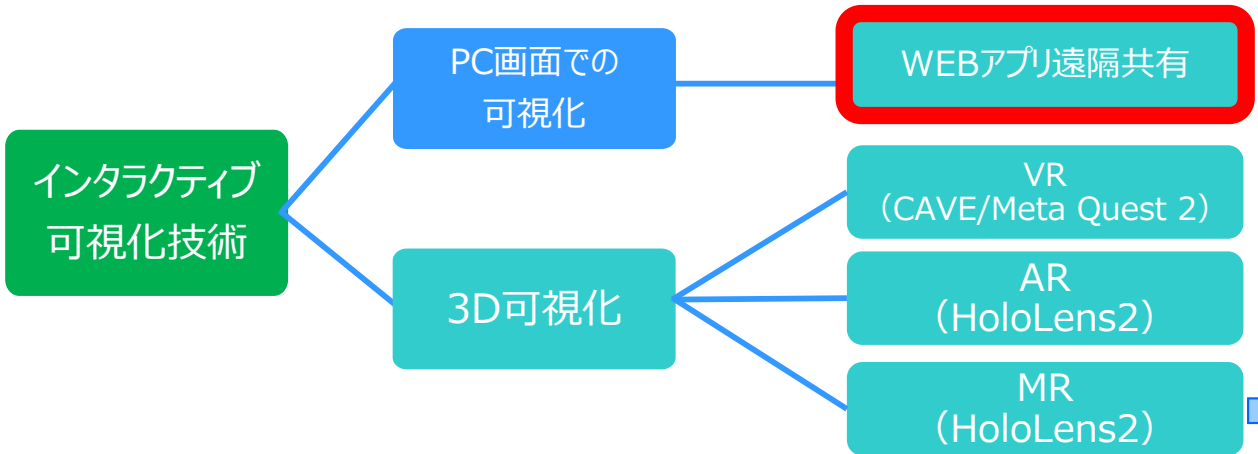


XYZ軸方向の線量率分布の可視化



③ VRによる没入感実現及びモックアップ施設でのAR化作業(2/5)

インタラクティブ可視化技術の開発...②WEBアプリ遠隔共有



WEBアプリ遠隔共有

取得データや作業結果の遠隔共有

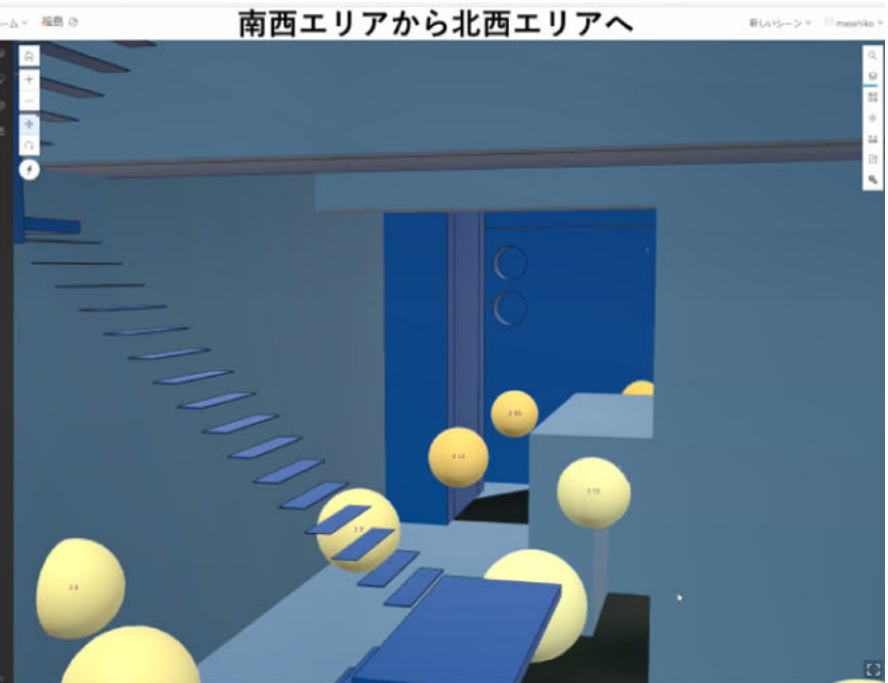
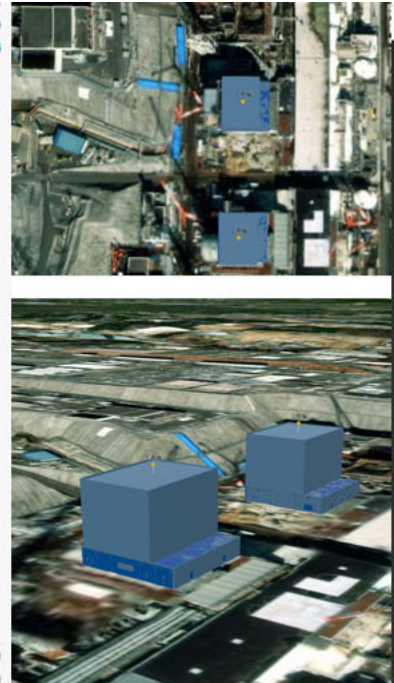
ネットワーク上の、どのPCからもアクセスできるWEBアプリの開発で解決 (認証ユーザーのみ)

課題：更なる操作性の向上 (c. 報告参照)

被ばく評価



ArcGISへのアクセス

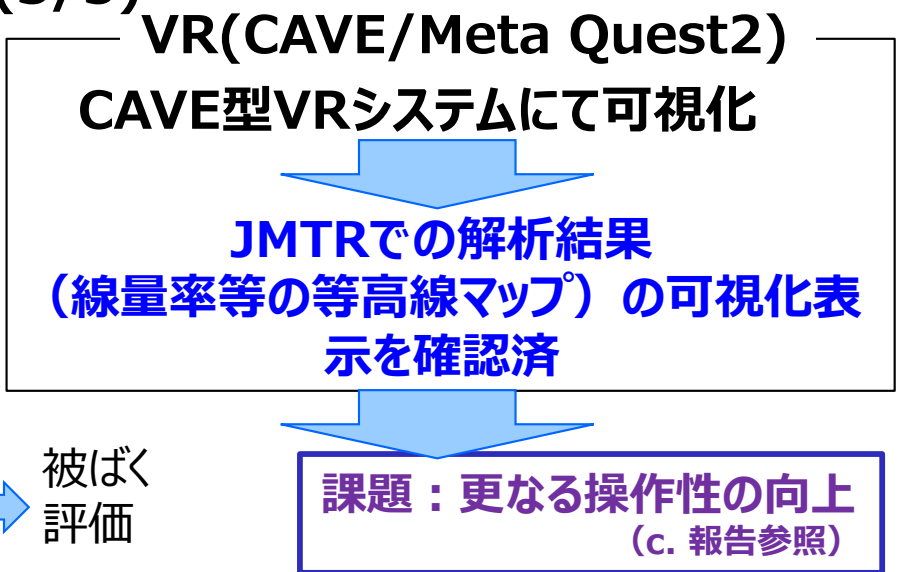
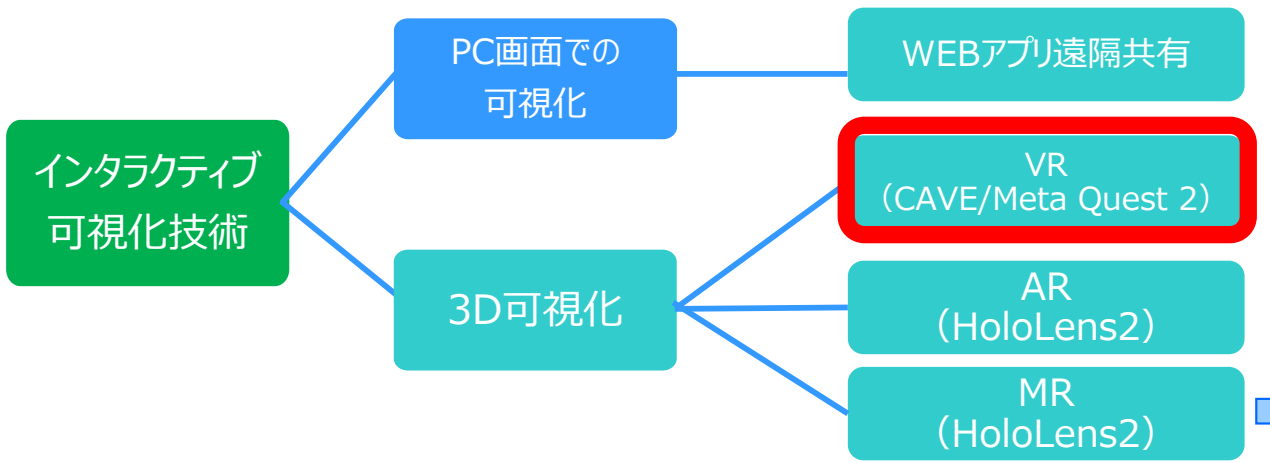


1 Fへのアクセスと情報の共有(PC画面)

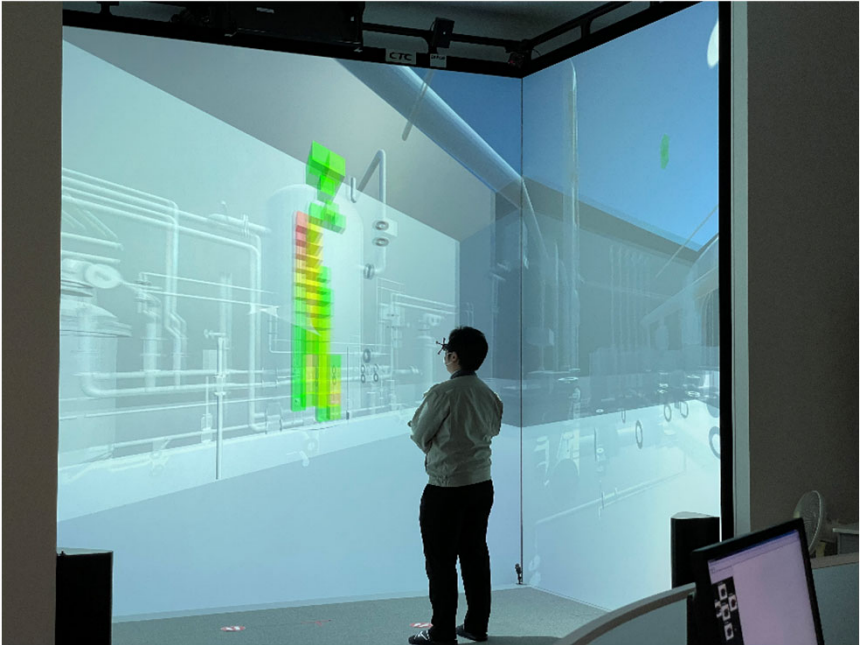
a.(c) インタラクティブ可視化エンジンの開発(13/16)

③VRによる没入感実現及びモックアップ施設でのAR化作業(3/5)

インタラクティブ可視化技術の開発…③VR(CAVE/Meta Quest2)



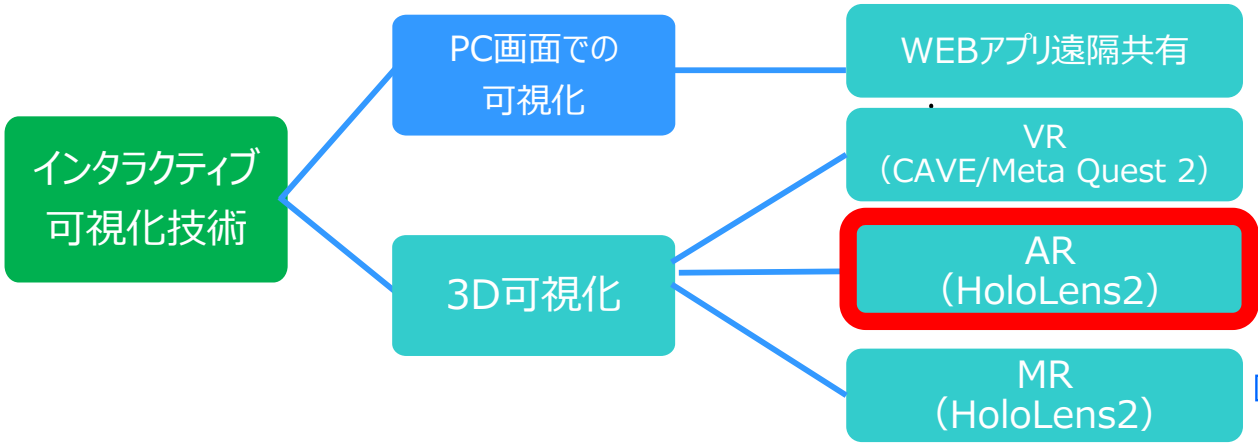
CAVE型VRシステムにて可視化



等高線マップの表示

③ VRによる没入感実現及びモックアップ施設でのAR化作業(4/5)

インタラクティブ可視化技術の開発...④AR(HoloLens2)



被ばく評価

AR(HoloLens2)

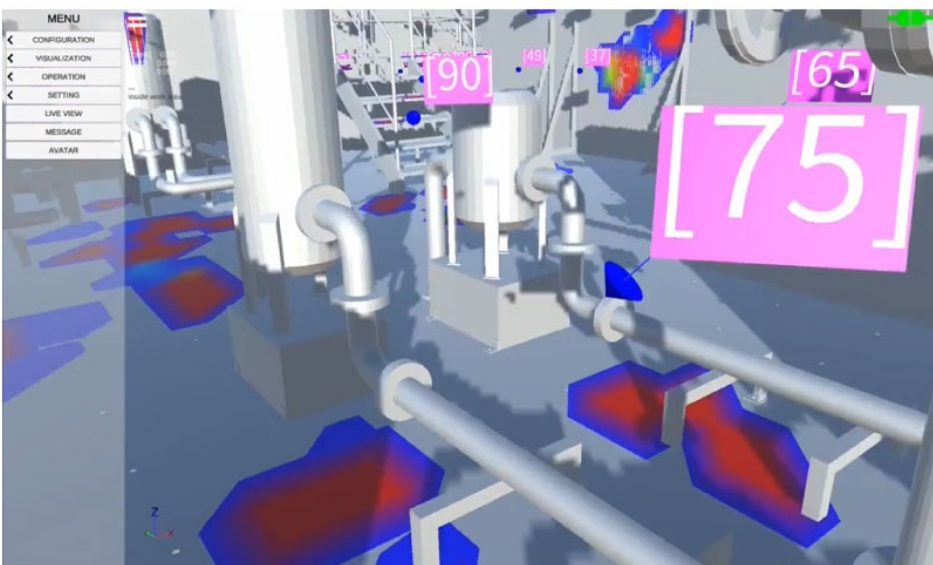
現場でAR (推定情報の重畳) による線源視認

↓

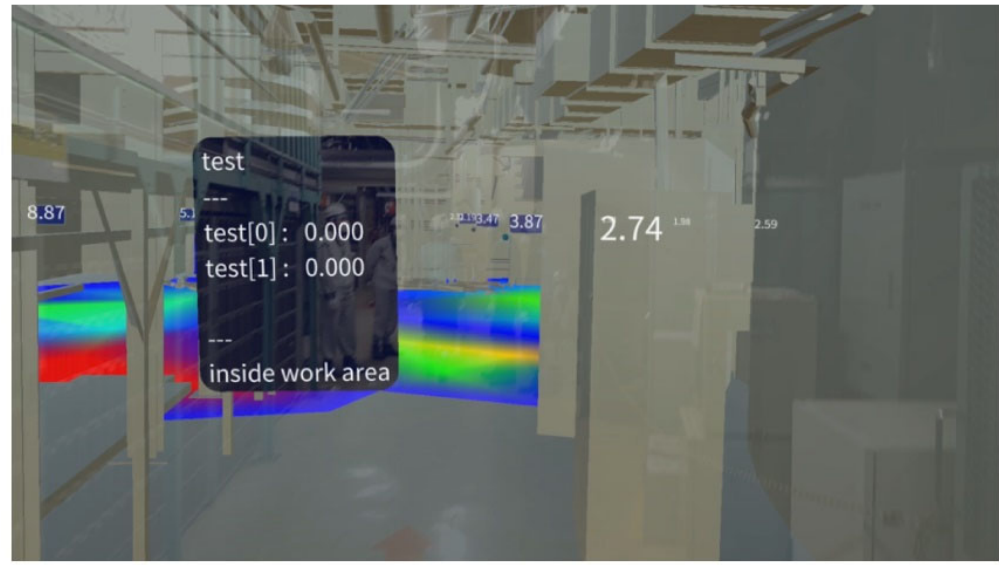
**HoloLens2やタブレットを利用し
ARを実現し解決**

↓

課題：更なる操作性の向上
(c. 報告参照)



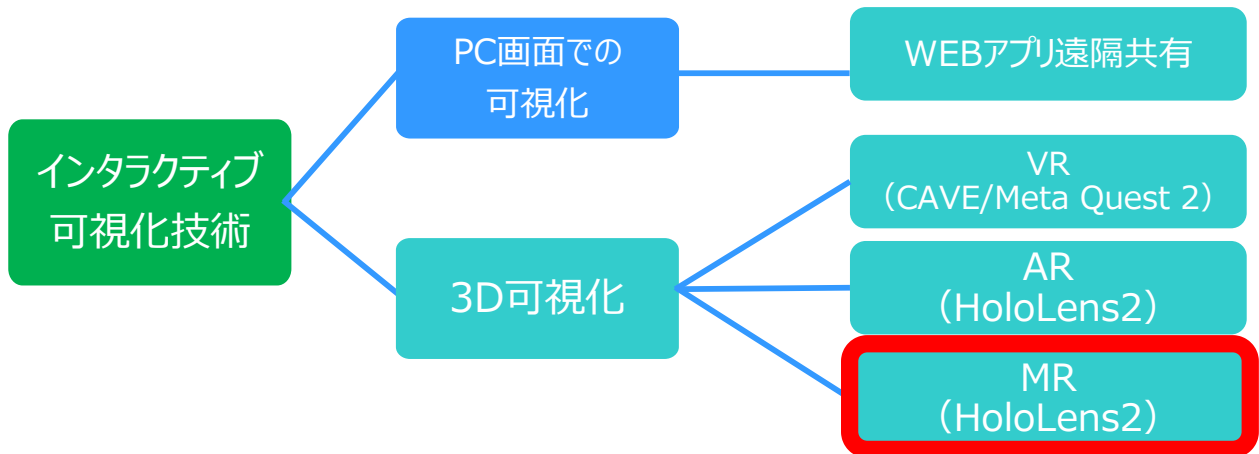
試験場におけるAR可視化



1F5号機(1階)におけるAR可視化

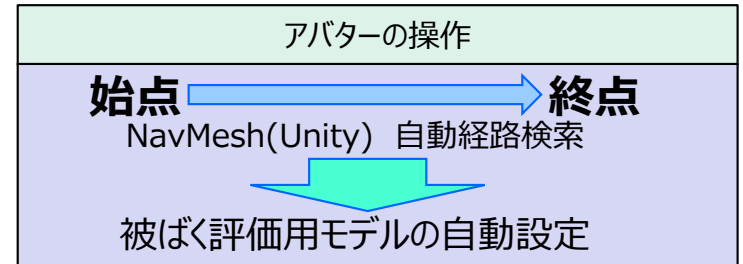
③ VRによる没入感実現及びモックアップ施設でのAR化作業(5/5)

インタラクティブ可視化技術の開発...⑤MR(HoloLens2)



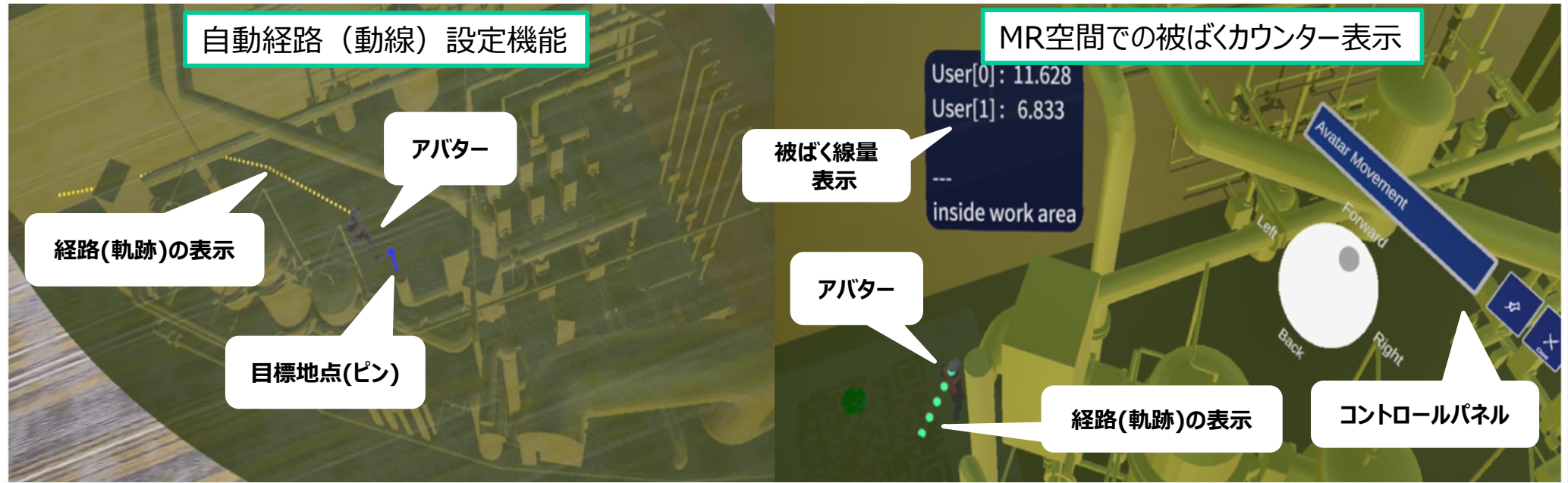
MR(HoloLens2)

被ばく評価システム (プロトタイプ) 開発
従来：煩雑な条件設定が大きな課題



ゲームツールの導入による解決

課題：システム化と操作性向上



a.(c)まとめ

上記(a)及び(b)で推定した線源位置及び線量率分布等の結果を、AR・VRで可視化するエンジンを完成させた。また、1F5号機にてARを用いて問題なく作動することを確認した。

- 逆推定した線源分布結果の可視化システム（Hololens2 等）開発
- 推定した空間線量率分布結果をAR・VRの可視化
- AR可視化の動作を1F5号機にて実施

1 F現場特有の大規模・複雑な状況に対応可能とする線源・線量率推定技術を開発し、JMTR等での検証試験において適切に再現できることを確認した。また、推定結果を可視化可能であることを確認した。

a.(a)線源逆推定エンジンの開発

- 各ツール(観測指示点指示、寄与率行列作成、逆推定計算、線量率3D分布高速化)を完成させ、3D-ADRES-Indoor内の線源逆推定エンジンとしてこれらを実装し、現場での限られた実測値から線源の逆推定を行い、線源分布を特定可能とした。

a.(b)空間線量率推定エンジンの開発

- 高強度線源対策ツールを完成させ、線源対策(除染、除去、移動、遮蔽)効果の確認を可能とした。

a.(c)インタラクティブ可視化エンジンの開発

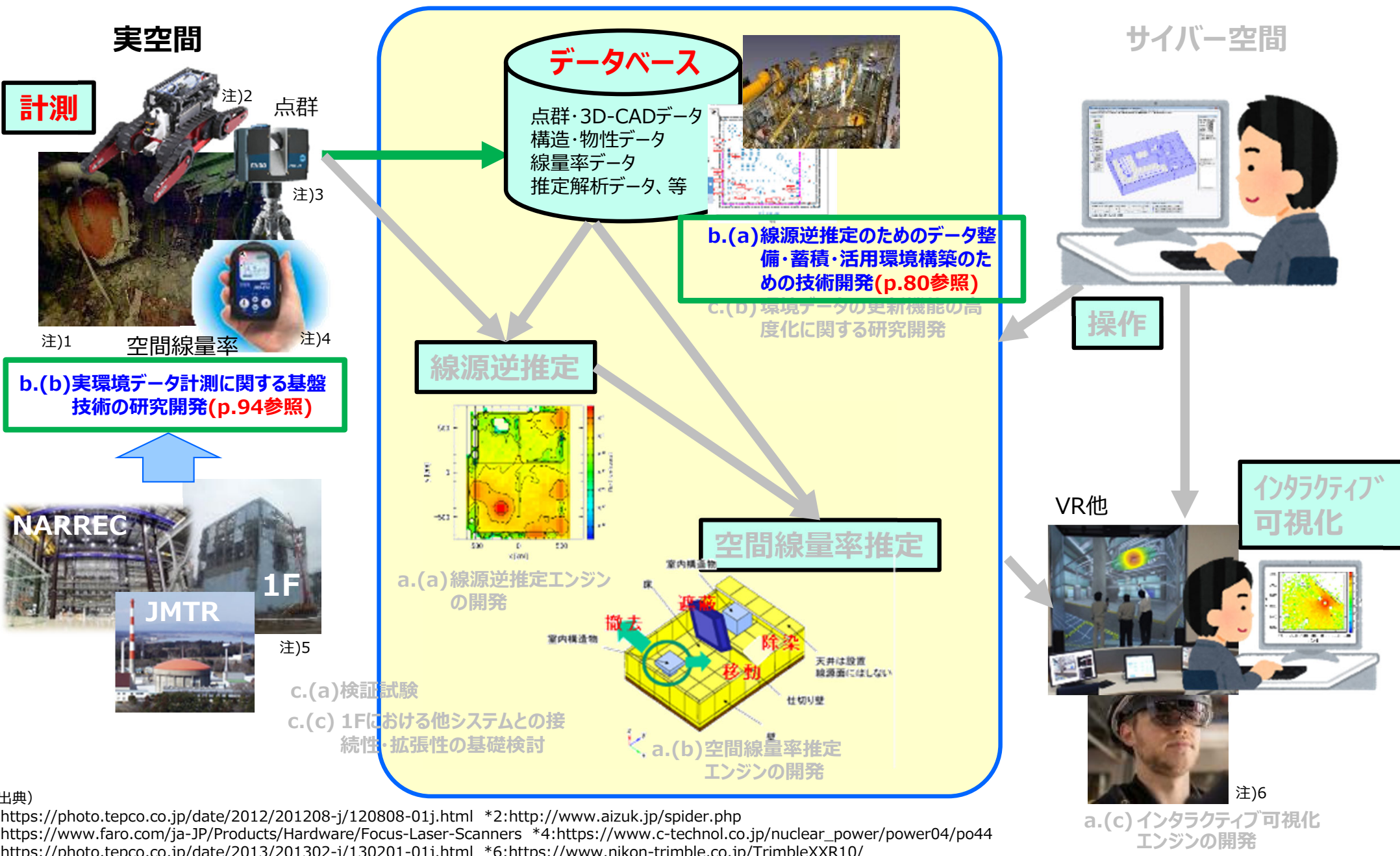
- 上記(a)及び(b)で推定した線源位置及び線量率分布等の結果を、AR・VRで可視化するエンジンを完成させた。また、1 F5号機にてARを用いて問題なく作動することを確認した。

b. 実環境データのデジタル化基盤技術の開発

(a) 線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発

(b) 実環境データ計測に関する基盤技術の研究開発

国プロの全体像と b. の役割



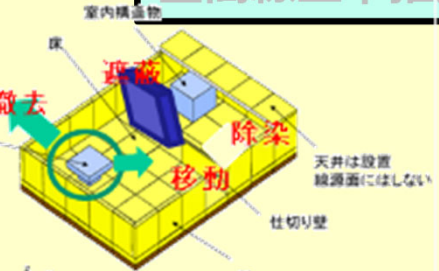
b.(b) 実環境データ計測に関する基盤技術の研究開発 (p.94参照)

b.(a) 線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発 (p.80参照)

c.(b) 環境データの更新機能の高度化に関する研究開発

a.(a) 線源逆推定エンジンの開発

空間線量率推定



c.(a) 検証試験
c.(c) 1Fにおける他システムとの接続性・拡張性の基礎検討

a.(b) 空間線量率推定エンジンの開発



a.(c) インタラクティブ可視化エンジンの開発

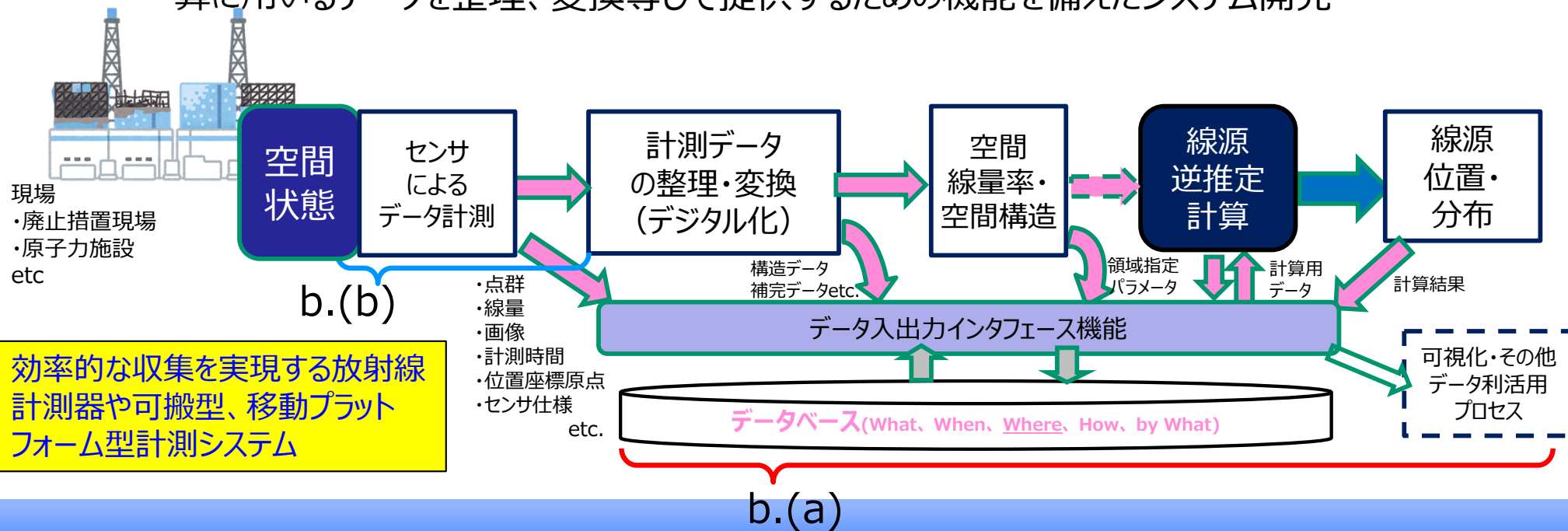
b.(a) 線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発(1/14)

課題：様々な測定器で測定されるデータに対し、一括管理するデータベースを構築できるか？また、GPS等が利用できない環境で測定位置の同定をどのように行うか？

解決策：複数の測定器を用いて、測定データを取得し、データベース体系を構築する。構築したデータベースを用いてサイバー空間内に3D環境を構築し、a.で実施する線源逆推定計算、空間線量率推定計算で利用できる形式を受け渡せるようにする。

(a) 線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発

実環境で取得したデータや計算過程のデータを蓄積・保持するデータベースと線源逆推定計算に用いるデータを整理、変換等して提供するための機能を備えたシステム開発



b.(a) 線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発(2/14)

●目的

実環境で取得したデータや計算過程のデータを蓄積・保持するデータベースと線源逆推定計算に用いるデータを整理、変換等して提供するための機能を備えたシステムの開発。

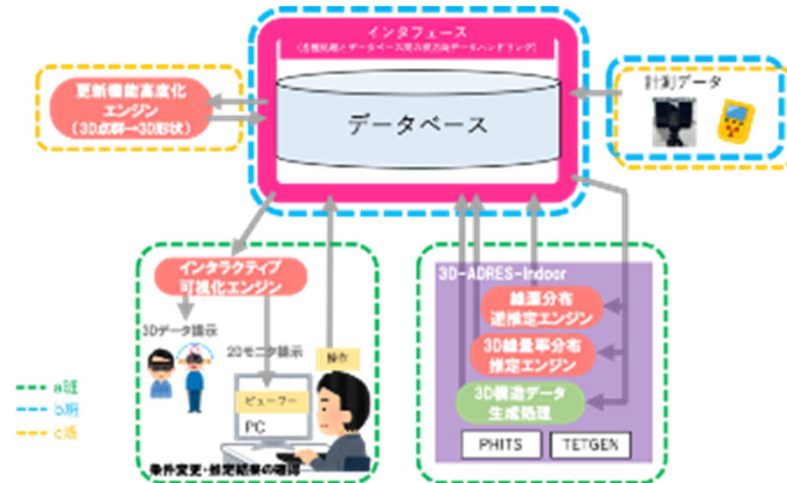
●反映先

線源・線量率推定システムのプロトタイプシステムにおけるデータベース及びデータ登録・抽出機能の実現。

●スケジュール

実施内容	2021(令和3)年度	2022(令和4)年度
b.(a)線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発		
①データ形式の分析及び整備仕様抽出 (P.81)	計算に用いるデータ形式の分析	
②データベース構造設計 (P.82)	概念設計 論理構造の設計	まとめ
③指定データ抽出・データ変換機能の設計 (P.85)	概念設計	
④データベース及びデータ入出力機能の開発 (P.89)	実装のための要求仕様確定 試作モデルの開発	動作検証試験 まとめ

※ 図中桃色部分が本課題実施担当分



システムの概念設計とデータ/情報フロー構造のイメージ

①データ形式の分析及び整備仕様抽出

● 調査

各チームに対して聞き取りを行い、必要となるデータの形式及び条件の洗い出し及び調整を実施。

● 実施結果

下記項目に示した内容について抽出・整理を実施。(次ページのデータ処理フローイメージを参照)

(1)管理対象データ

- ・構造データ (点群、3D-CAD)
- ・線量データ (線量測定、線源・線量推定、 γ 線イメージ)
- ・画像データ、動画データ、各エンジン等で使用するデータ
- ・その他センサデータ etc.

(2)データ管理のコンセプト

- ・データは計測時の生データから処理済みの整形されたデータに至るまでのプロセスを含め、削除することなく蓄積し、トレーサビリティを担保できること。
- ・多様なデータ形式、構造化されたテーブル構造を持たない「非構造化データ」を管理できること。
- ・データは時間情報と空間情報 (計測場所) の属性を持ち管理できること。

(3)データ管理の課題

- ・座標系定義 (多種かつ別々に計測されるデータ間の位置の関係性を保持して取り扱うため、同一の基準点を持つ統一座標系を設定してデータを管理することが必要)。
- ・データレベル定義 (構造データはデータ計測時、データ閲覧時、線源逆推定計算時など用途によって使用するデータの粒度や範囲が異なるため、場面に応じた適切なレベルのデータを定義し、取り扱うことが必要)。

②データベース構造設計(1/3)

● 構造設計検討

データベースにおけるストレージ及びハードウェア構成について、今後の拡張性も踏まえた設計の実施。

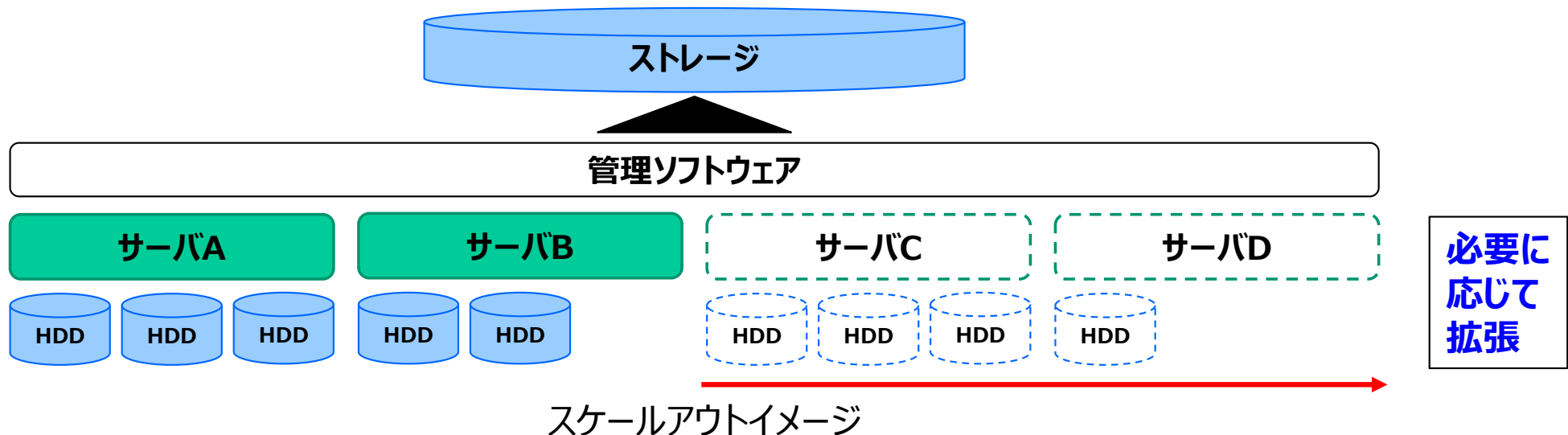
● 実施結果

(1)ストレージ設計

階層構造を持たないフラットなストレージ空間に全データを格納し、データ種別による固有の管理及び処理を必要としない構造とすることで、上限の無い柔軟なデータ容量の増加、将来のセンサデータの追加や管理データの追加等にも対応可能な設計とする。

(2)ハードウェア構成

システムを構成するサーバの台数を増やすことにより、システムの処理能力（容量や性能）をリニアに拡張可能（スケールアウト）な設計とし、必要最小限の規模でのハードウェア構成で基盤を構成しつつ、将来的な性能要求の変化にも対応可能な設計とする。



②データベース構造設計(2/3)

データベース方式及び機器構成に関する要求仕様の作成(データ処理フローはp.84参照)

● 実施結果

データベース方式

(1)非構造化データ管理

非構造化データの管理においては、NoSQL系データベース管理システムやHadoop等分散処理フレームワークのほか、パブリッククラウドサービス等が利用可能であるが、メリットやデメリット（DB言語の汎用性、バックアップ・障害対応、運用リスク、セキュリティ、コスト）を考慮し実装方法を策定。

(2)ストレージ方式

従来型ファイルストレージでは論理構成上の制約（ディレクトリやファイル）があるため、データとメタデータを1つのオブジェクトとして管理するオブジェクトストレージを想定。

(3)ハードウェア構成

汎用サーバを利用して処理性能や容量をスケラブルに拡張可能なSDS（Software-Defined Storage）をベースとした構成を想定。

(4)システム稼働環境

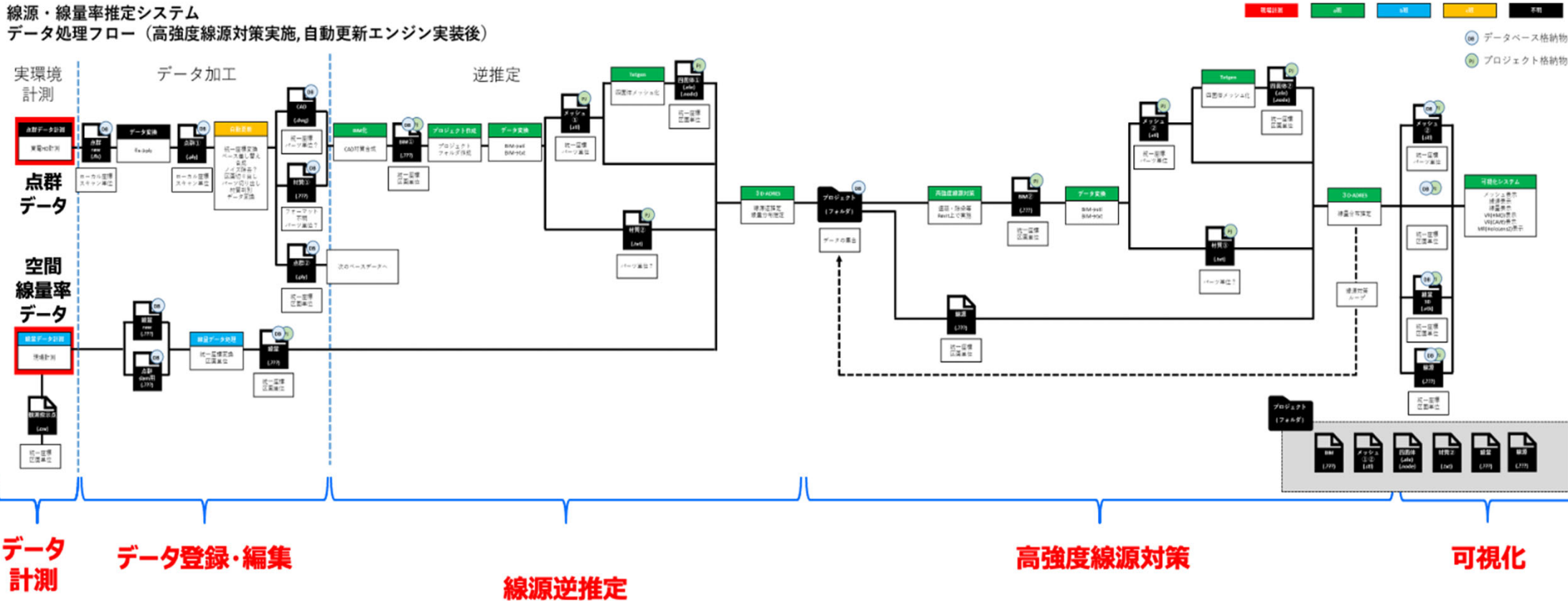
取り扱うデータの機密性の観点から**機構内クロスドネットワークでの構築を前提**とする。ただし、今後の状況変化を考慮し、クラウドサービス利用時における拡張性も考慮する。

②データベース構造設計(3/3)

データ処理フローを下に図示(関係するデータ形式の抽出と処理システムの整理)

線源・線量率推定システム

データ処理フロー (高強度線源対策実施, 自動更新エンジン実装後)



③ 指定データ抽出・データ変換機能の設計(1/4)

● 機能要求抽出

本システムにおいて必要となる「データ抽出機能」の要求を抽出するため、各エンジンごとのユースケース及び利用シナリオの検討。

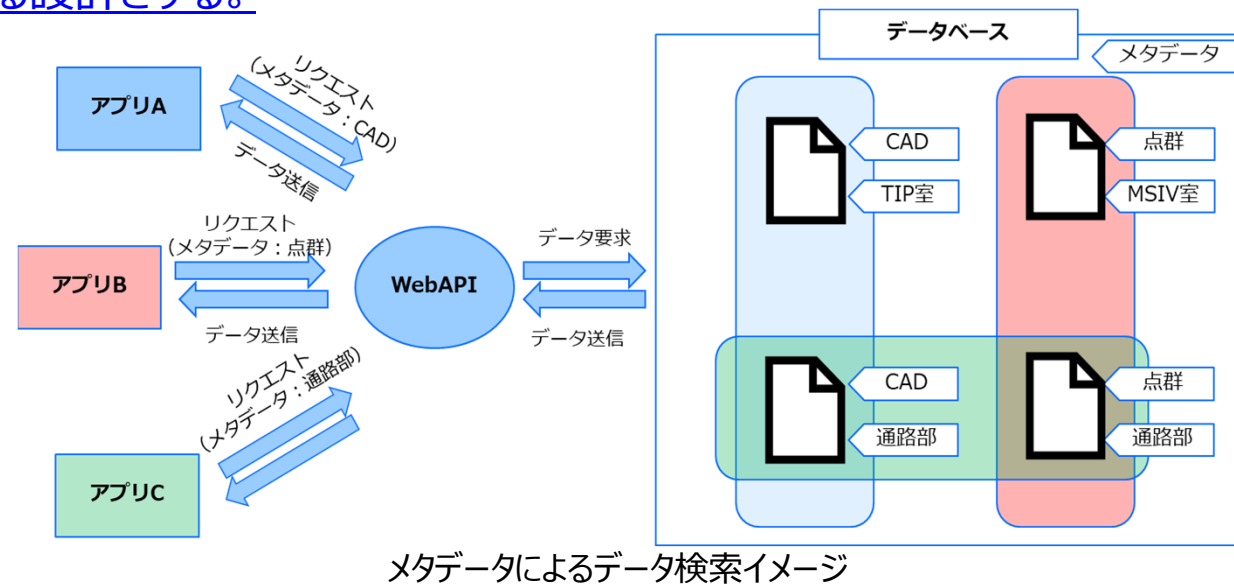
● 実施結果

(1) データ抽出

本システムで取り扱う非構造化データは、データそのものと、そのデータがどのようなデータであることを説明する属性情報（メタデータ）を1つのセットとして管理する。メタデータにより詳細なデータ検索を可能とし、様々な要求に応えられる汎用性と拡張性を両立できる設計とする。

(2) インターフェース設計

計測データの登録・編集から各エンジンとの取り合いなど、多様なインターフェースを考慮する必要があり、将来的に様々なデバイスで利用可能なクラウドストレージサービスと同様な使用法にも対応可能なWebとの親和性に優れたシンプルなインターフェース（WebAPI*）とする。



* API: Application Programming Interface、ソフトウェア構築と統合のためのツール、定義、プロトコル
 WebAPI : Web等に用いられる通信技術（HTTPプロトコル）を用いて構築したAPI

③指定データ抽出・データ変換機能の設計(2/4)

- 概念設計

- [データ抽出・インターフェース開発に関する要求仕様](#)の作成

- 実施結果

- (1)データ管理方針

- [生データと履歴の管理](#)

- 計測データは生データから処理済の整形されたデータに至るまで蓄積し、トレーサビリティを担保

- [時間と空間情報の管理](#)

- 実環境データは時間情報と位置情報（統一座標系）により管理

- [非構造化データの管理](#)

- データそのものとその属性情報であるメタデータを1つのセットとして管理

- 多様なデータ形式を管理し、今後新たなセンサデータや各エンジンで使用するデータの追加等、
現段階で性状が明確となっていないデータについても柔軟な形式で格納

- (2)機能要求

- [データ登録、検索・抽出。](#)

- データ登録の際にはメタデータの自動付与やユーザー入力により付与

- R/B等の平面図等を表示し、画面上でデータ登録点を選択、検索

- (3)インターフェース

- [将来的にタブレット端末等様々なデバイスで利用可能なパブリッククラウドストレージサービス](#)

- Amazon S3 API互換等と同様な使用方法にも対応可能なWebAPI（RESTful API）の活用

③指定データ抽出・データ変換機能の設計(3/4)

●実施結果 (データ抽出・インターフェース開発)

(1)機能要件

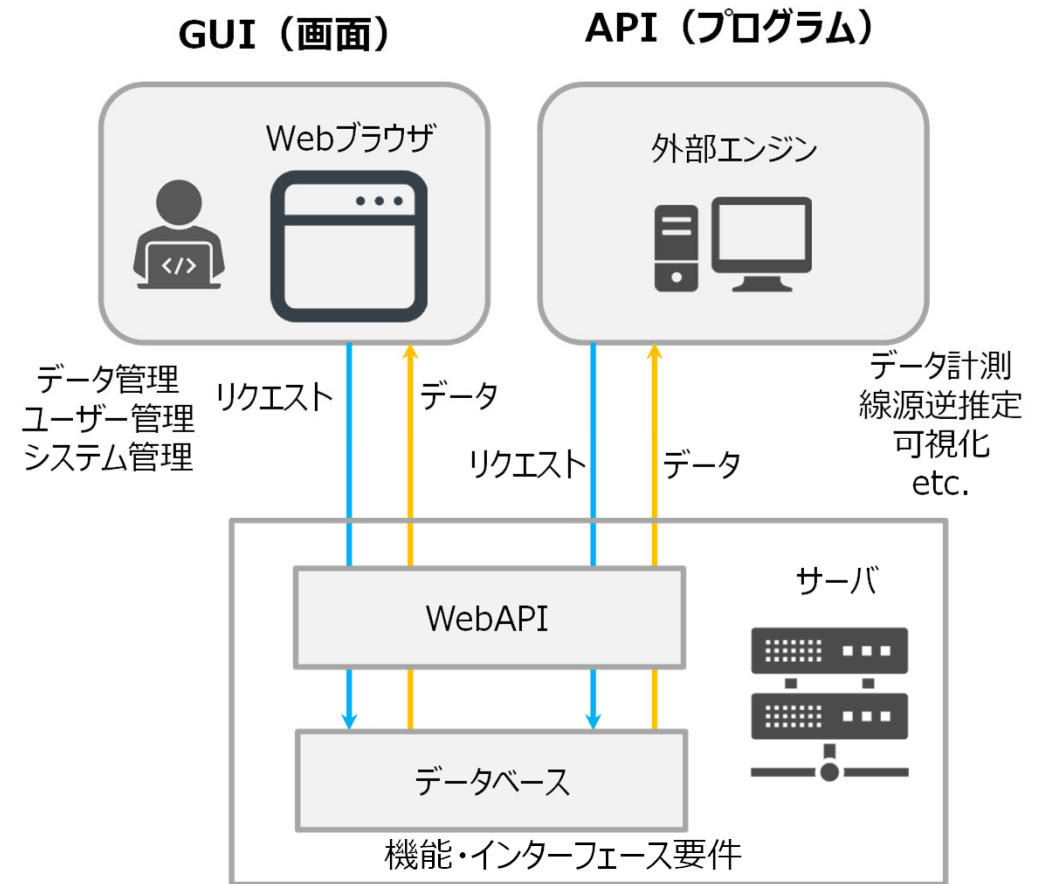
- ・データ管理
- ・データ入登録、検索、抽出、データリネージ^(注1)、データ管理者用機能
- ・ユーザー管理
- ・ユーザー登録、削除、アクセス権限管理機能
- ・システム管理
- ・システムログ、アクセスログ管理機能

(注1)データリネージ(Data Lineage)

・一定期間のデータの流れを追跡するプロセスで、データがどこから発生し、どのように変化したか、及び最終的なデータの格納場所を明確に把握できるようにすること。

(2)インターフェース要件

- ・画面要件
クライアントがWebブラウザ上で利用するための操作画面を提供
- ・外部インターフェース要件
各エンジンとのインターフェースはWebAPIで提供



指定データ抽出・データ変換機能の概念図

※GUI及びAPIのどちらでも扱う(操作ができる)ようにシステム構成をしている

③指定データ抽出・データ変換機能の設計(4/4)

- 実装のための要求仕様確定
データベース方式・機器構成、データ抽出、
インターフェース開発

- 実施結果 (データベース方式・機器構成)

(1)データベース要件

a)オブジェクトストレージ

- ・CLOUDIAN HyperStore
- ・信頼性・ライセンス形態により採用

b)データカタログDB

- ・オブジェクトストレージデータ登録・検索
- ・メタデータ・データ保管場所をカタログ化

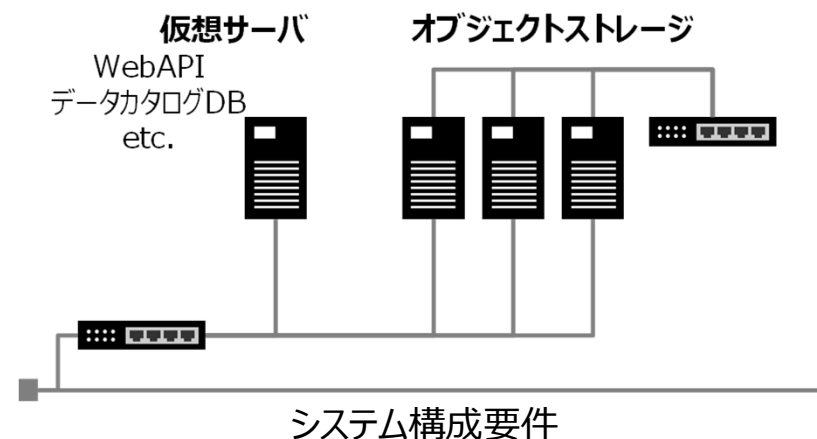
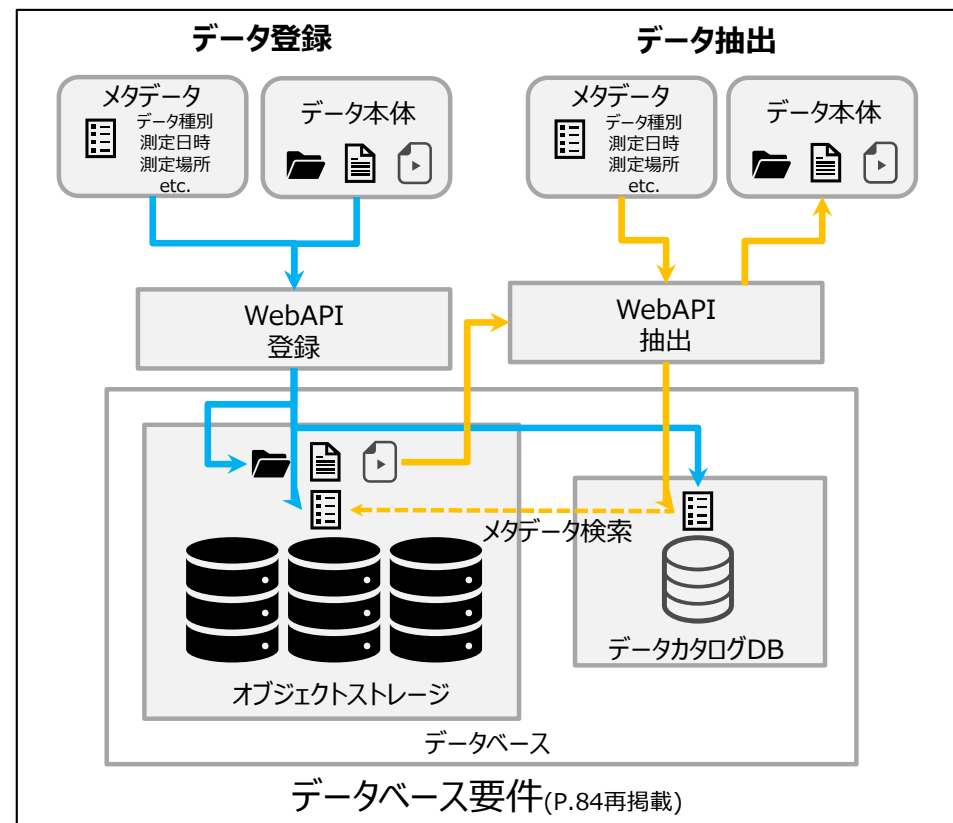
(2)システム稼働要件

a)ハードウェア構成

- ・オブジェクトストレージ (3 ノードクラスタ構成)
- ・仮想サーバ
Webサーバ、データカタログDBサーバ等

b)ミドルウェア構成

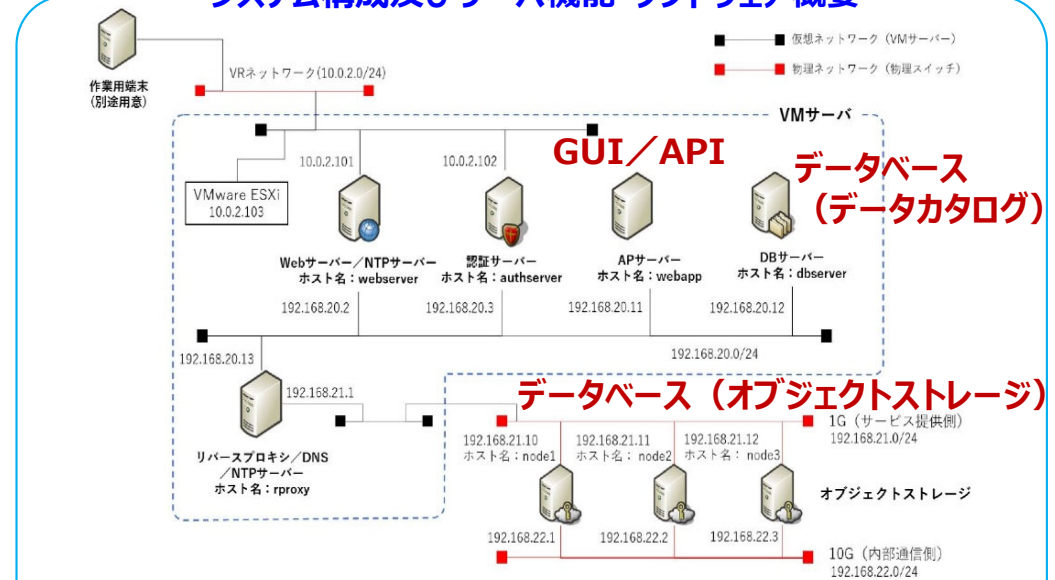
- ・CLOUDIAN HyperStore (オブジェクトストレージ)
- ・Apache (Webサーバ)
- ・PostgreSQL (データカタログDB)



④データベース及びデータ入出力機能の開発(1/3)

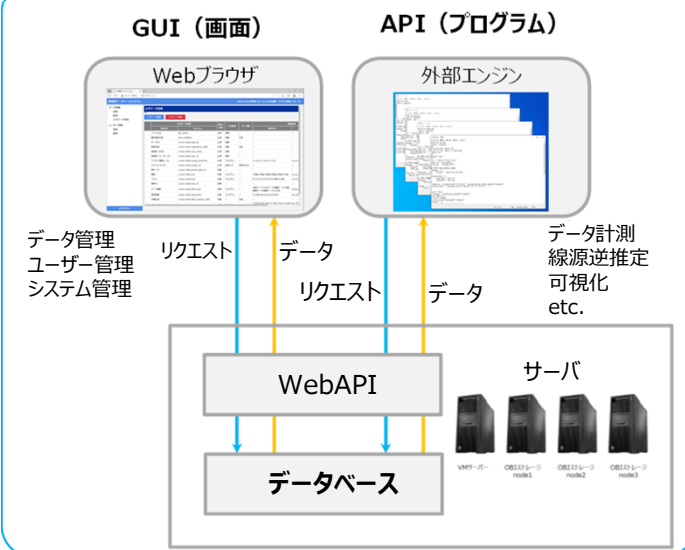
- 試作モデルの開発
実装のための要求仕様に基づくシステムの開発
- 実施結果
(1)試作モデルの開発の実施
(2)オブジェクトストレージ
(3)ノードクラスタ構成)+データカタログDB
(3)仮想サーバ
(Web/DBサーバ etc.)

システム構成及びサーバ機能・ソフトウェア概要



サーバ/機器名称	機能	ミドルウェア/ソフトウェア	
仮想化サーバ	仮想化ホストサーバ	仮想化ホスト機能	VMware ESXi
	Web/NTPサーバ	Webサーバ/サーバ監視/時刻同期機能	Apache/SyLAS/ntpd
	APサーバ	Python Webフレームワーク/Webサーバゲートウェイ機能	FastAPI/uvicorn
	DBサーバ	メタデータカタログ/ユーザー情報DB機能	PostgreSQL
	認証サーバ	認証機能	Keycloak
	リバースプロキシ/DNS/NTPサーバ	リバースプロキシ/DNS/時刻同期機能	HAProxy/BIND/ntpd
オブジェクトストレージ	オブジェクトストレージサーバ	オブジェクトストレージ機能	CLOUDIAN HyperStore

システム機能のイメージ



公開WebAPI一覧

項目	メソッド	リクエストURL	機能
認証API	GET	http://10.0.2.101/auth?username={name}&password={pass}	リクエストでユーザーID/パスワードを受け取り、ユーザー認証を行う。レスポンスで認証トークンを発行し返却する。
検索API (検索結果一覧取得)	POST	http://10.0.2.101/api/search	リクエストで検索条件を受け取り、データ検索を行う。レスポンスで検索結果の一覧情報を返却する。
抽出API (詳細情報取得)	GET	http://10.0.2.101/api/files/{data_id}?param=meta	リクエストでデータIDを受け取り、対象データのメタデータを詳細情報として抽出する。レスポンスで抽出した詳細情報を返却する。
抽出API (データダウンロード)	GET	http://10.0.2.101/api/files/{data_id}	リクエストでデータIDを受け取り、対象データをオブジェクトストレージよりダウンロードする。レスポンスでダウンロードしたファイルデータを返却する。
登録API	POST	http://10.0.2.101/api/files	リクエストで登録するファイルデータと、データに付するメタデータを受け取り、オブジェクトストレージにアップロードする。レスポンスで登録されたデータIDを返却する。

サーバ機器スペック

項目	仮想化サーバ	オブジェクトストレージサーバ
OS	VMware ESXi8	CentOS7
CPU	2CPU, 6コア	2CPU, 6コア
メモリ	128GB	128GB
SSD	-	500GB
HDD	8TB	20TB
通信ポート	1GbE×2, 10GbE×2	1GbE×2, 10GbE×2
台数 (ノード)	1	3

④データベース及びデータ入出力機能の開発(2/3)

動作検証試験及び結果(1):機能ごとの表示

要求仕様に基づいた試作モデルを開発し、データ登録・抽出機能が問題なく動作することを確認した。

データ管理機能

項目名	登録内容
データID	登録したデータのID
登録日時	データを登録した日時
登録者 (氏名)	データを登録したユーザーの氏名
登録者 (ユーザーID)	データを登録したユーザーのID
アクセス権限レベル	データへのアクセス可能レベル
プロジェクトID	登録データを作成したプロジェクトのID
親データ	親となるデータのID
建屋	号機番号
フロア	建屋内フロア、PCV内部、その他
場所ID	データを計測したフロア内のエリアID
データ種別	登録したデータの種別
使用機器	計測に使用した機器
作業日	計測を行った日時
データ作成グループ	データを作成したグループ
(追加項目)	(追加した項目の内容)

メタデータ項目

データ検索

メタデータ管理

データ登録・削除

データリネージ (トレーサビリティ)

場所表示

場所選択

実環境データベースシステム

- データ管理
 - 検索
 - 登録
 - メタデータ管理
- ユーザー管理
 - 検索
 - 登録

メニュー画面拡大

メイン画面

ユーザー管理機能

ユーザー検索

ユーザー登録・削除

システム管理機能

- ストレージリソース**
- システムログ**
- アクセスログ**

動作検証試験及び結果(機能ごとの表示)

④データベース及びデータ入出力機能の開発(3/3)

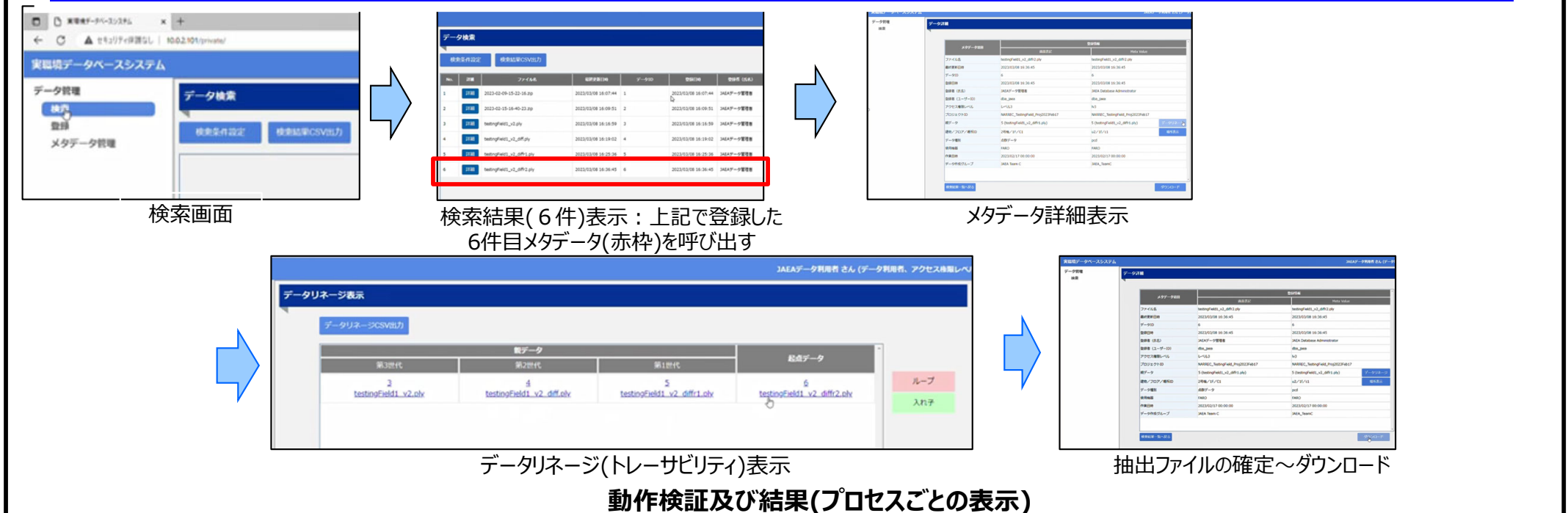
動作検証試験及び結果(2) : プロセスごとの表示

・要求仕様に基づいた試作モデルを開発し、データ登録・抽出機能が問題なく動作することを確認した。

データ登録時 : データ検索→新規点群データ登録 (ファイル選択、メタデータ入力) に至るプロセス



データ抽出時 : データ検索→データ履歴 (依存関係表示) →メタデータ詳細表示→点群データダウンロードに至るプロセス



b.(a)まとめ

線源・線量率推定のためのデータシステムを試作し、適切に動作することを確認した。具体的には、実環境で取得したデータや計算過程のデータを蓄積・保持するデータベースと線源逆推定計算に用いるデータを整理、変換等して提供するための機能を備えたシステムを開発した。

- データ形式分析等を踏まえ、DB構造、汎用性等の要求仕様の抽出、拡張性を考慮したストレージ設計、ハード構成等の論理的構造概念の構築を踏まえ、DB試作モデルの開発
- 動作検証ではデータに適切なタグ付けが行われ、入出力動作可能であることの確認

b.(b)において、研究開発項目を下記のように3テーマに分けて実施した。

- ① 放射線計測技術の研究開発 (線源逆推定に寄与する放射線データの計測技術)
- ② データ収集効率化のための技術開発 (可搬型及び遠隔操作型のデータ計測・収集技術)
- ③ 高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発 (調査研究：高所アクセス、核種弁別技術)

①放射線計測技術の研究開発 (線源逆推定に寄与する放射線データの計測技術)	②データ収集効率化のための技術開発 (可搬型及び遠隔操作型のデータ計測・収集技術)	③高所データ計測および核種弁別に関する技術開発 (高所アクセス、核種弁別技術) (福島高专と連携)
<div data-bbox="185 590 817 1133"> <p>高線量環境</p> <p>ガンマ線イメージャ 放射性物質の位置や 拡がりを特定する</p> <p>ガンマ線 スペクトルメータ</p> <p>1 cm³ CZT検出器</p> <p>¹³⁷Cs-662 keV @1 mSv/h</p> <p>その場の放射線情報 (エネルギー・核種)を 高精度で特定する</p> </div> <ul style="list-style-type: none"> • 高線量環境で、放射性物質の位置・拡がり・核種データを効率的に取得する計測技術の基盤となるガンマ線イメージャ及びスペクトロメータの整備と性能評価の実施 	<div data-bbox="817 590 1444 1133"> <p>線量計</p> <p>リフト</p> <p>3D-LiDAR</p> <p>カメラ</p> <p>IMU</p> <p>センサユニット</p> </div> <ul style="list-style-type: none"> • 線量と位置を併せて計測するセンサユニットの開発 • 遠隔操作により移動して空間データ計測する手法の試作モデルの開発 	<div data-bbox="1444 590 2080 1133"> <p>線量計等 UAV</p> <p>パラレルテザー機構</p> <p>移動台車からUAVにテザーを張り、UAVの姿勢を制御</p> <p>移動台車</p> <p>高所データ計測手法の概念図</p> </div> <div data-bbox="1444 1133 2080 1516"> <p>面的汚染</p> <p>3種類のセンサ</p> <p>複数の核種を計測</p> <p>画像認識</p> <p>核種弁別技術 (例)</p> <p>核種弁別手法の概念図</p> <ul style="list-style-type: none"> • 高所の空間線量計測技術の提案と成立性の評価 • 核種弁別技術の提案と成立性の評価 </div>

b.(b) 1 放射線計測技術の研究開発(1/7)

●目的

作業環境の線源分布及び線源逆推定に寄与する放射線データを取得するための計測技術に関する研究開発を行う。

●反映先

(将来、) 作業環境条件に応じて選定した γ 線イメージャにより線源位置を推定し、線源逆推定に寄与。

●スケジュール

実施内容	2021(令和3)年度	2022(令和4)年度
b.(b)1 放射線計測技術の研究開発		
①線源逆推定に寄与する放射線データ計測手法の試作モデルの仕様検討 (P.95)	仕様検討、設計	
②放射線計測手法の試作モデルの開発及び成立性評価 (P.99)	試作モデルの開発	成立性評価試験 まとめ

b.(b) 1 放射線計測技術の研究開発(2/7)

①線源逆推定に寄与する放射線データ計測手法の試作モデルの仕様検討(1/4)

γ線イメージャ整備

・線源分布逆推定に貢献する高強度汚染箇所（ホットスポット）に関する情報を収集するために下記装置の調達を実施。



i. ミオンテクノロジーズ・キャンベラ株式会社：iPIX

- ・2号機原子炉建屋内の調査において東京電力が使用したもの。
- ・高線量率環境由来のバックグラウンドノイズが可視化結果にのったことが報告されており、現時点で不明確である測定可能な線量率範囲やバックグラウンドの影響について照射試験により知見を得る計画。

https://www.canberra.com/jp/products/pdf/CJSPCST-2015001-rev-2-0-iPIX%20_small.pdf



ii. nuviaTECH INSTRUMENTS : NuVISION

- ・メーカー公開データシートでは数十mSv/hの条件で線源位置特定可能との記載があり、1F原子炉建屋内における利用可能を期待できる。
- ・測定可能な線量率範囲やバックグラウンドの影響について、照射試験により知見を得る計画。

<https://www.nuviatech-instruments.com/wp-content/uploads/sites/3/2019/09/NVG-375045-FicheNuVISION-UK-Sept2020-1-2.pdf>



iii. H3D : M100i

- ・コンプトンカメラ用のγ線センサであり、γ線のイベントデータを1つずつ取り出すことが可能な仕様となっており、γ線イベントデータ（生データ）を確認可能であることを生かして、画像再構成時の精度向上について研究を実施。

<https://h3dgamma.com/home.php>(サイト内、Mシリーズ参照)

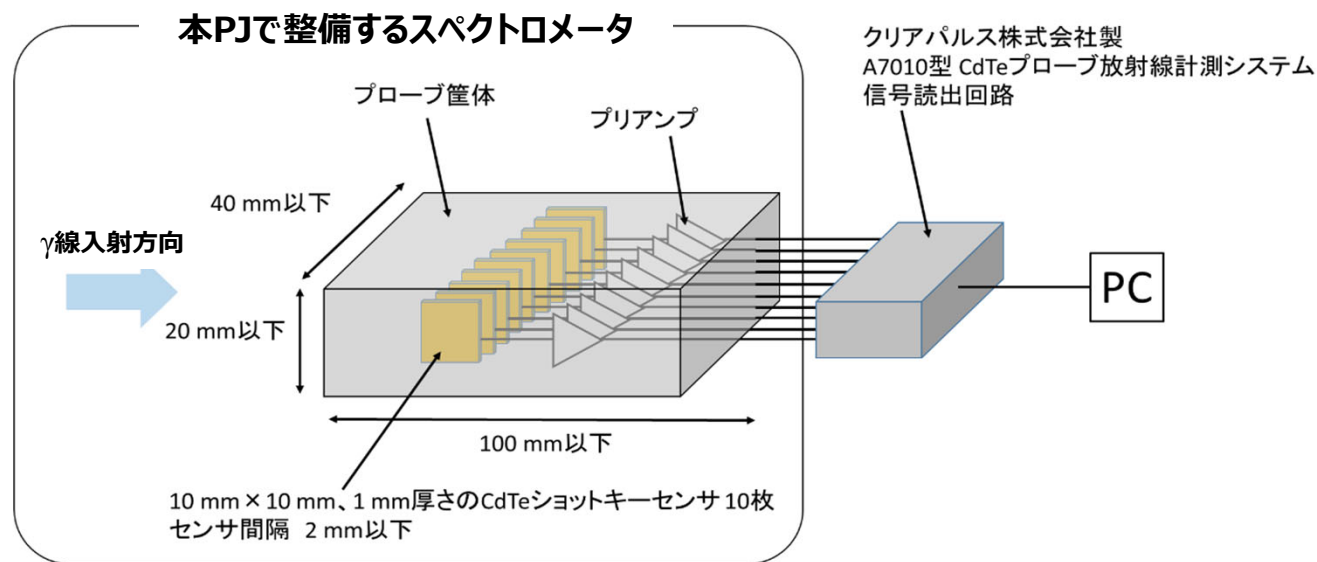
b.(b) 1 放射線計測技術の研究開発(3/7)

① 線源逆推定に寄与する放射線データ計測手法の試作モデルの仕様検討(2/4)

γ線スペクトロメータ整備

・γ線のエネルギーを識別することで、作業環境に分布する複数種類の核種情報を取得するために装置の調達、整備を実施。

⇒放射性セシウム¹³⁷Cs、¹³⁴Cs以外の核種(⁶⁰Co等)を計測できることを確認する。



γ線照射場における照射試験の実験条件に関する検討、実験準備

・γ線イメージa. 及び ii. について、¹³⁷Cs照射場における照射試験を実施。

- (1)照射線量率を1mGy/hから徐々に増加させていき、線源の位置特定が可能な線量率範囲を調査。
- (2)線量率の増加に伴い線源の位置特定が難しくなることが予想されるため、遮蔽体を利用することで適用可能環境の拡大可能性について確認。

b.(b) 1 放射線計測技術の研究開発(4/7)

① 線源逆推定に寄与する放射線データ計測手法の試作モデルの仕様検討(3/4)

線源逆推定に寄与する放射線データ計測手法の試作モデルの仕様検討

- (1) γ 線イメージャである(i) iPIX 及び(ii) NuVISIONの仕様検討を行った。
- (2) スペクトロメータを構成する(iii) M100i 及びCdTe検出器プローブ(p.98右図参照)の仕様検討を行った。
- (3) コンプトンカメラを用いた全方位イメージングを実施するための画像再構成手法の検討を行った(下図参照)。

仕様検討方法

(1) γ 線イメージャに対して ^{137}Cs 照射場で照射試験として以下を実施。

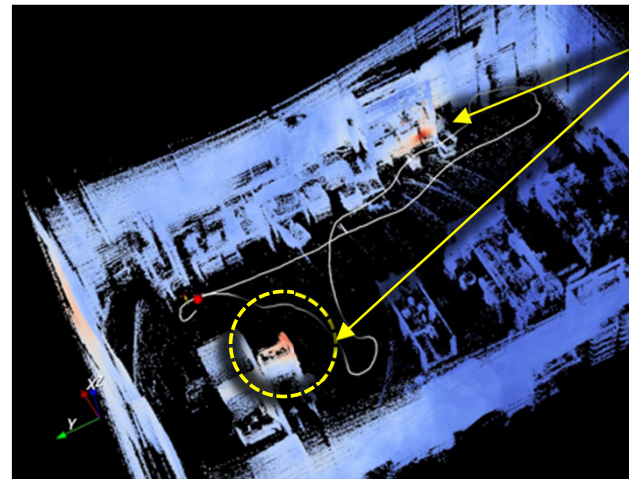
- ① 線源を可視化できる線量率の範囲 (γ 線の照射が一方向からのみの場合に限る)
- ② 線源方向を変化させたときの可視化能力の変化について
- ③ 2つの装置における①、②の性能比較

(2) スペクトロメータの調達。実験室でのテスト線源を用いた γ 線測定を実施。

- ① ^{137}Cs 及び ^{60}Co の γ 線に対するエネルギー分解能
- ② 公称10MBq- ^{137}Cs 線源をスペクトロメータの直近に配置し、高線量率環境(1~2mSv/h)を模擬した環境においてエネルギー分解能が劣化するか否かを検証

(3) 2台のコンプトンカメラを背中合わせに配置し、全方位コンプトンカメラを模擬。

- ① これを用い、移動しながらの測定にて線源位置を同定することに成功。



^{137}Cs 線源の可視化イメージ※1
(※1: ^{137}Cs 線源は1つしか所有していなかったため、カメラが1箇所目の線源付近を通過後に、線源を2か所目に移動した。)

可視化に使用したソフトウェアは、CLADS開発技術をもとに(株)V.I.C.が製品化した放射能汚染可視化ソフトウェアCOMRIS※2を基盤としている。

※2:(株)V.I.C.商願2021-40045

b.(b)1 放射線計測技術の研究開発(5/7)

① 線源逆推定に寄与する放射線データ計測手法の試作モデルの仕様検討(4/4)

線源分布の逆推定に寄与するための、環境に応じたツール（選択の見通しづけ）の照射実験を実施

a) γ 線イメージャ（ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ株式会社製iPIX及びnuviaTECH INSTRUMENTS社製NuVISION）について、 ^{137}Cs 照射場における特性評価試験を実施。

b) γ 線スペクトロメータ（H3D社製M100i及びクリアパルス株式会社製CdTe検出器プローブ）について、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co のテスト用線源を用いた動作確認を実施。

※ γ 線イメージャ及び γ 線スペクトロメータは、ホットスポット位置及び放射性核種の種類をそれぞれ測定する装置



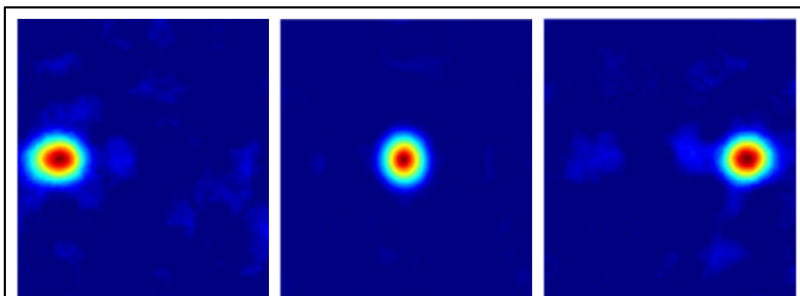
実験結果

a) γ 線イメージャについて（iPIX使用 ^{137}Cs -30 mGy/hでの照射例）：p.100参照

- ・iPIXでは、 ± 15 度方向で30 mGy/hまでイメージ結像を確認。
- ・30 mGy/h以上で取得したデータを**確認**
- ・NuVISIONでは正面30 mGy/hにおいて結像の再現性が取れなくなる現象も発生。

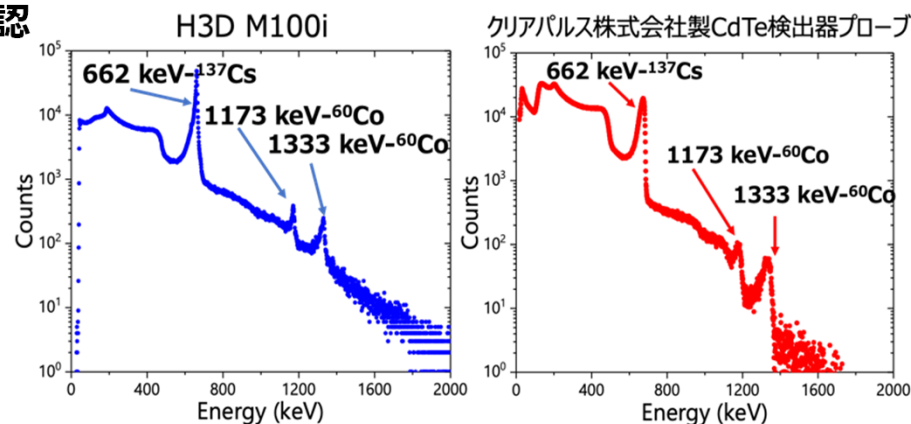
b) γ 線スペクトロメータについて：p.101参照

- ・テスト用線源で ^{137}Cs 及び ^{60}Co でエネルギーピークの観測を確認済。
- ・照射場における高線量率環境で取得したデータを**確認**



左15度 正面 右15度

γ 線イメージャの ± 15 度方向のイメージ結像



テスト用線源で ^{137}Cs 及び ^{60}Co でエネルギーピークの観測

b.(b) 1 放射線計測技術の研究開発(6/7)

②放射線計測手法の試作モデルの開発及び成立性評価(1/2)

線源逆推定に寄与する放射線データ計測技術 (1/2)

- 既存の測定器 (γ 線イメージャ、 γ 線スペクトロメータ) について照射場で高線量率環境における特性評価試験を実施して結果をまとめた。
- 実施結果 γ 線イメージャとしてiPIX及び厚さ10mmの鉛遮蔽を施したNuVISIONについて ^{137}Cs 照射場において、80 mGy/hまでの環境下で線源可視化が可能であることを確認。



(鉛遮蔽付き)

機器	線源位置の可視化を確認した線量率 (mGy/h)	備考
iPIX	80	-
NuVISION	30	<ul style="list-style-type: none"> ・正面照射30 mGy/hにて再現性の取れない結果が 発生^(※1)。 (^{※1}原因についてメーカーより回答を得た。現状、ソフトウェアとハードウェアの組合せについて最適化が成されておらず、データレートが高くなると、取得データの処理が適切に行われなくなる場合があるとのこと。) ・厚さ10 mmの鉛遮蔽を施すことにより、80mGy/hにおいて線源位置に結像することを確認。

1Fでの適用の際に考慮にいれるべき点

1Fでは照射場と異なり、 γ 線が測定器を取り囲む全方向から入射する点が異なるため、画像再構成の際のアーチファクト^{※2}発生を防ぐために、作業環境の線量率に応じて測定器の側面や背面にも鉛遮蔽設置を検討する必要がある。併せて、場の線量率に応じた遮蔽体の厚さも検討する必要がある。

※ 2 : 画面上に現れるノイズのこと。多重反射や反射体下方等距離に上下逆に出現する鏡面像など、その種類も多く、これらにより正しい解析ができなくなる場合もある。アーチファクトの発生時は、これの撤去などの煩雑な作業が発生するため、極力発生させないような工夫が必要である。

b.(b) 1 放射線計測技術の研究開発(7/7)

②放射線計測手法の試作モデルの開発及び成立性評価(2/2)

線源逆推定に寄与する放射線データ計測技術 (2/2)

● γ 線スペクトロメータとしてM100i及びCdTeスタック検出器プローブについて ^{137}Cs 及び ^{60}Co の照射試験を実施し、高線量率環境の動作安定性、エネルギー分解能、必要な遮蔽量の点から、核種弁別を行う上でM100iの方が優れていることを確認。

機器	核種	エネルギーピークを 観測した線量率 (mGy/h)	備考
H3D社 M100i	^{137}Cs	5	遮蔽なし
	^{137}Cs	80	厚さ24 mmの鉛遮蔽をセット
	^{60}Co	11.37	遮蔽なし
	^{60}Co	94.05	厚さ48 mmの鉛遮蔽をセット
クリアパルス社製 CdTeスタック検出器 プローブ	^{137}Cs	1	遮蔽なし、5 mGy/hでは662 keVのエネルギーピークが観測されなかった。併せて、ポラリゼーションが原因と考えられるエネルギーピークの低エネルギー側へのシフトならびにエネルギー分解能の劣化が観測された。
	^{137}Cs	30	厚さ48 mmの鉛遮蔽をセット
	^{60}Co	3.71	遮蔽なし、5.04 mGy/hでは1172 keV及び1332 keVのエネルギーピークの分離ができなくなった。
	^{60}Co	11.37	厚さ48 mmの鉛遮蔽をセット



・M100iでは、80mGy/hの吸収線量 (^{137}Cs による) が予想されるエリアにおいて、24mm厚さの鉛遮蔽で覆ってロボットに搭載することにより、遠隔にて核種弁別が可能となる。一方でCdTeプローブは、80mGy/hの線量で動作させるためには、より厚い遮蔽が必要であるとともに、動作が不安定なため利用は推奨しない。

[成果] 既存測定器を遮蔽したセットアップの構築、照射場における特性評価実施して利用可能な条件を整理した。

b.(b)2 データ収集効率化技術の研究開発(1/11)

●目的

線源逆推定計算に必要な作業環境に関するデータ計測・収集を効率化するための手法に関する基盤技術の研究開発及び試作モデル開発。

●反映先

(将来、) データベースに提供する空間線量率データと計測位置データを収集する手段となる。

●スケジュール

実施内容	2021(令和3)年度	2022(令和4)年度
b.(b)2 データ収集効率化技術の研究開発		
①データ計測ユニットの基本設計 (P.102)	データ収集効率化のための実装機能等の仕様抽出 データ計測ユニットの試作モデルの設計・開発 まとめ	
②データ計測手法の研究開発 (P.103)	計測・収集手法等の研究	
③作業員搬送型及び遠隔操作型データ計測手法の試作モデルの開発 (P.106)	検証実験用試作モデルの開発	開発した試作モデルの動作検証実験 まとめ

b.(b)2 データ収集効率化技術の研究開発(2/11)

①データ計測ユニットの基本設計

1. データ収集効率化のための実装機能等の仕様抽出及びデータ計測ユニットの試作モデルの基本設計を実施。
2. 線源逆推定計算を行うために必要となる空間線量率データ収集の効率化を実現するために、実装が必要となる機能の仕様を明らかにするとともに、試作モデルの設計を実施。

得られた結果

・逆推定計算のためには線量値と計測位置のデータを整合した状態で収集する必要があり、空間線量率センサのデータ収集とともに、作業空間内の位置を特定する機能と各データを計算機上で束ねて取得・保存できる仕組みを構築する必要あり。

仕様・方針

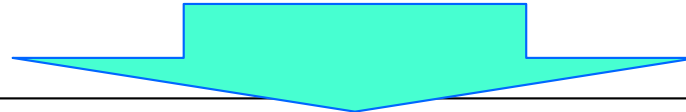
- ①実時間自己位置推定を行うために3D-LiDARセンサデータに基づいたSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 計算手法を採用し、センサ位置の推定を行う。
- ②空間線量率センサのデータをオンラインで計算機に取り込み、SLAMに基づいた推定位置情報とまとめてオンラインで収集。
- ③データ通信は、Ethernet (IP通信) もしくはUSBを採用。
- ④ROS (Robot Operating System)のフレームワークを活用して実装。
- ⑤作業員による収集、遠隔操作による収集の双方でソフトウェアをできるだけ共通化。

b.(b)2 データ収集効率化技術の研究開発(3/11)

②データ計測手法の研究開発(1/3)

計測・収集手法等の研究

・「①データ計測ユニットの基本設計」における検討や仕様の抽出及び、データ計測手法についての研究を行う。



実施結果とまとめ

- 1) 計算機と通信して線量データが取得可能な空間線量率センサ、3D-LiDARセンサ等の選定
 - ・空間線量率センサは、東京電力で採用している線量検出器のスペックをカバー可能なものを選定
- 2) Ubuntu LinuxOS、ROSフレームワークベースでのソフトウェアの開発及び実装
 - ・ROSコミュニティのソフトウェア資源（SLAM計算手法等）の有効活用
 - ・通信／計測ソフトウェアの設計を実施

・空間線量率センサ



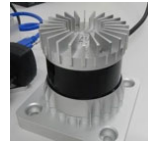
Polimaster社製 BDG-2

<https://www.taroumaru.jp/main/module>

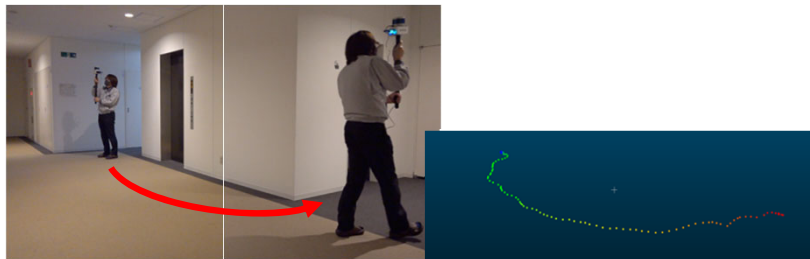
・3D-LiDARセンサ



KAARTA社製 Stencil2



Ouster社製 OS1-32



・ソフトウェア開発OS/フレームワーク



<https://ubuntu.com>



<https://www.ros.org>

・SLAM計算手法

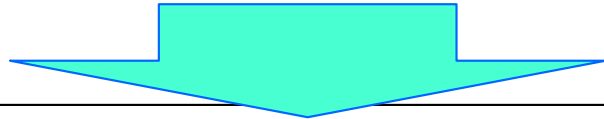
LOAM系
(Laser Odometry and Mapping)
Lego-LOAM、
LIO-SAM等

b.(b)2 データ収集効率化技術の研究開発(4/11)

②データ計測手法の研究開発(2/3)

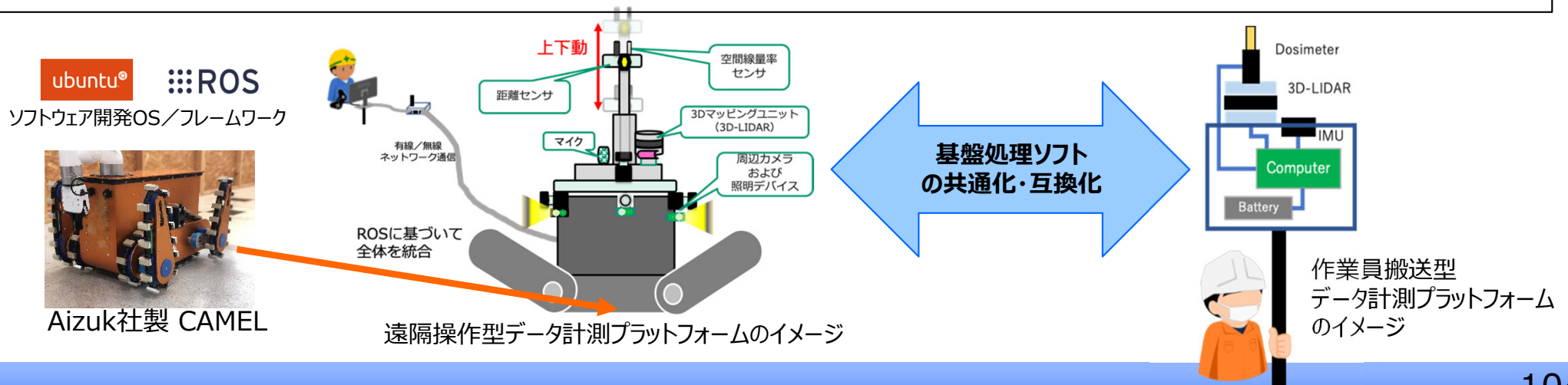
検証実験用試作モデルの開発

・遠隔操作型データ計測手法の開発として、センサを搭載した遠隔操作移動プラットフォームの設計と製作



実施結果

- 1) 移動プラットフォームの基盤に、東京電力で採用されているAizuk社製のCAMELを選定し、遠隔操作で空間線量率と3次元測定位置を収集するシステムの基本設計を行い、製作
 - ・上下伸縮機構(3m)による線量率センサ位置検出及びSLAMによる推定自己位置の統合による3D計測位置推定。
 - ・複数カメラ、照明デバイス搭載による周辺視野の確保。
 - ・移動制御部と上下伸縮機構を含む計測制御部は分離しても動作可能となるシステム設計 (ROSベース) etc.
- 2) 作業員搬送型データ計測手法開発において、構築予定の通信/計測ソフトウェアに関する知見やソースコードを共有することで製作を効率的に推進し実施

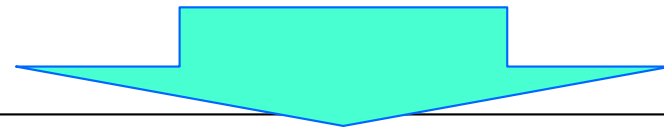


b.(b)2 データ収集効率化技術の研究開発(5/11)

②データ計測手法の研究開発(3/3)

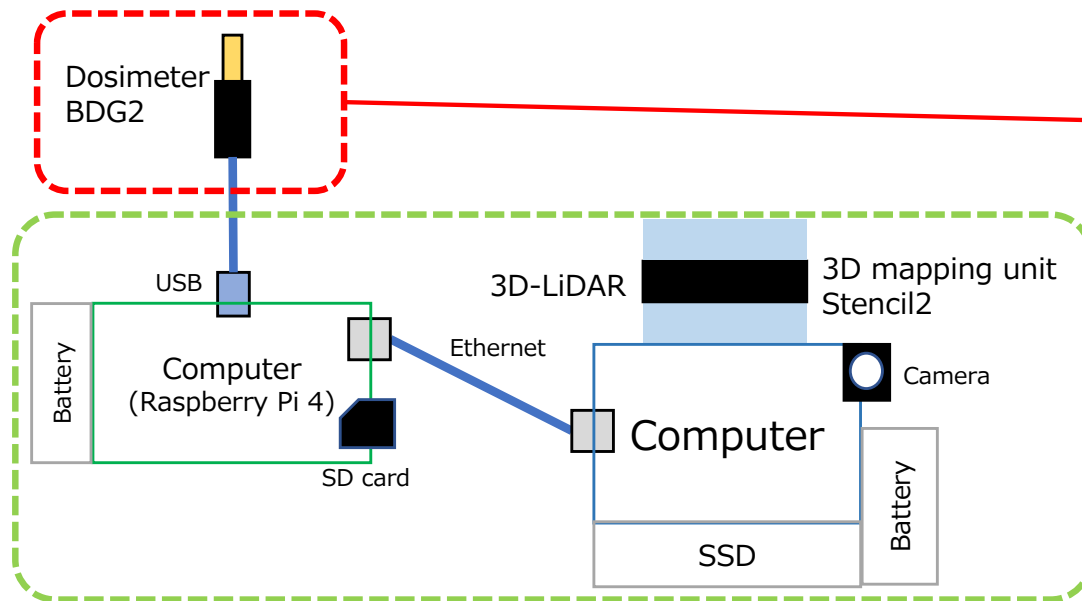
作業員搬送型データ計測ユニットの基本設計

- ・空間線量率センサと3D-LiDARユニット、組み込み計算機等を統合したデータ計測ユニットの試作。
- ・実装機能仕様抽出と基本設計を踏まえて、空間線量率データと計測位置データの計測を行うためのデータ計測ユニット試作モデルの開発を実施。

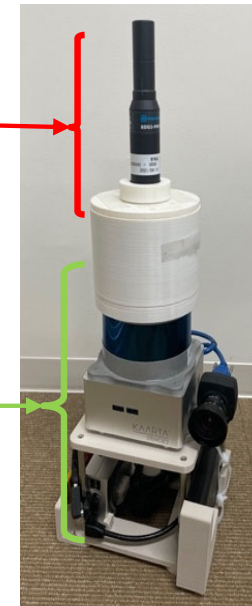


実施結果

- 1) Polimaster社製GM管式空間線量率センサ BDG2、Kaarta社製 3Dマッピングユニット Stencil2及び組み込み計算機を一体化。
- 2) 組み込み計算機にROS (Robot Operating System) を実装、SDメモリへ収集データ記録。



データ計測ユニットのシステム構成図



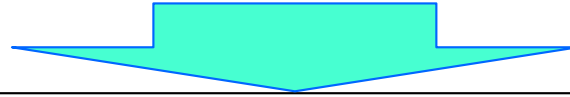
データ計測ユニットのプロトタイプ

b.(b)2 データ収集効率化技術の研究開発(6/11)

③作業員搬送型及び遠隔操作型データ計測手法の試作モデルの開発(1/6)

作業員搬送型データ計測ユニットの試作モデルの開発(1/3)

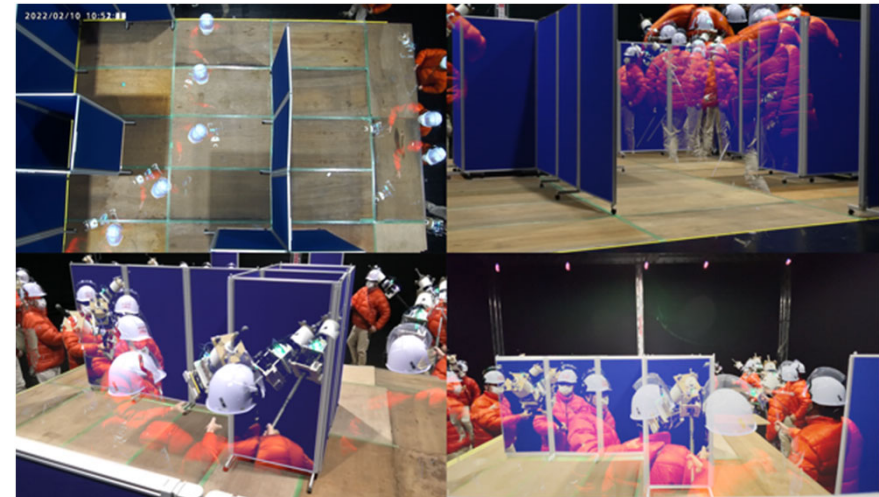
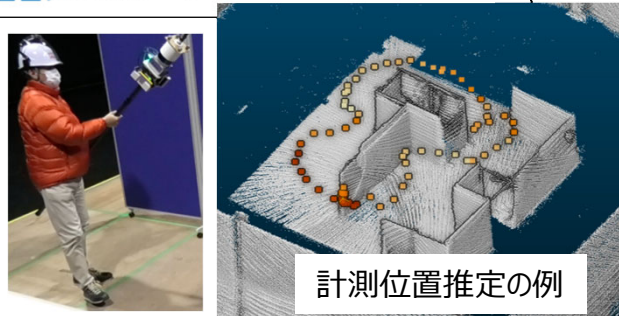
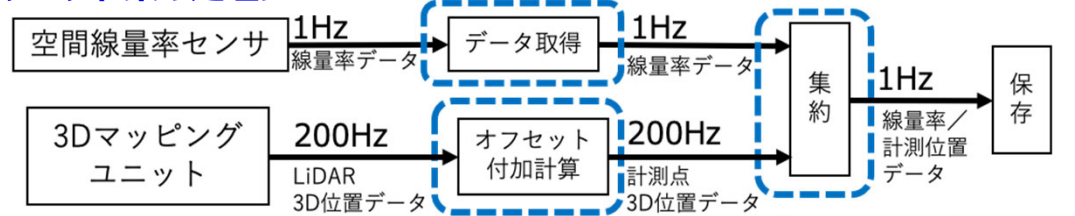
- ・研究内容及びデータ計測ユニットの基本設計を踏まえて、データ計測ユニット試作モデルによる空間線量率と計測位置の同期データ収集を行うためのソフトウェアの開発及び実装を行った。



実施結果

- 1) ROSフレームワーク上で動作する空間線量率データ計測ソフトウェア、3Dマッピングユニットからの位置推定データ取得ソフトウェア、双方を1Hzで同期させてデータを収集するソフトウェアを開発。
- 2) NARREC試験棟における予備実験によって、人によってデータ計測ユニットを搬送し、空間線量率データと計測位置のデータ収集が行えることを確認。
- 3) 開発したソフトウェアは、「遠隔操作移動プラットフォーム」においても共有。

データ収集の処理フロー



NARRECでの計測実験の様子



<https://ubuntu.com>



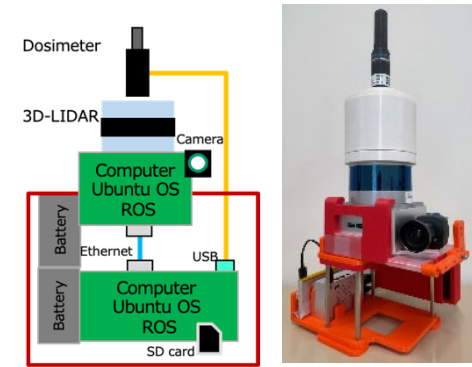
<https://www.ros.org>

b.(b)2 データ収集効率化技術の研究開発(7/11)

③ 作業員搬送型及び遠隔操作型データ計測手法の試作モデルの開発(2/6)

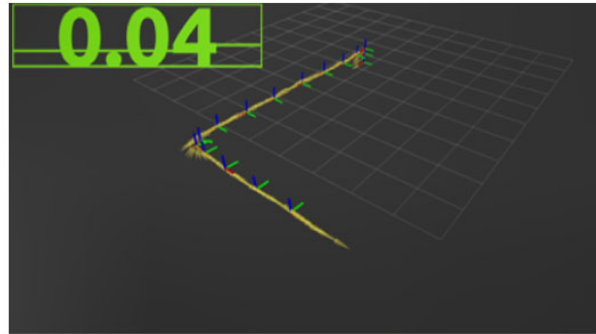
作業員搬送型データ計測ユニットの試作モデルの開発(2/3)

- ・試作したデータ計測ユニットを用いて、NARRECやロボットテストフィールドにおいてデータ収集測定位置、空間線量率) 実験を実施。
- ・オンラインモニタリング機能の実装の検討。



結果: 模擬プラント空間において測定位置と空間線量率のデータ収集が行えることを確認。

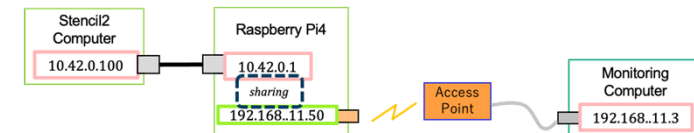
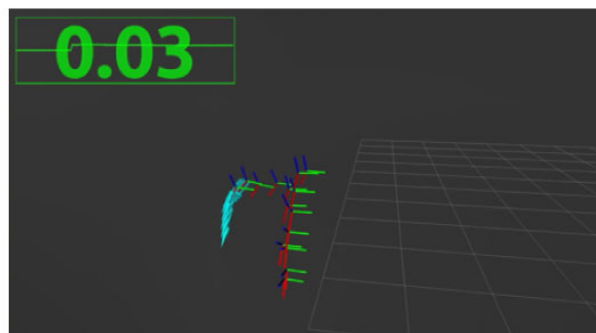
- ・ JAEA NARREC 試験棟内 (試験用プールとモックアップ階段の間)



- ・ オンラインデータモニタリング機能の実装検討



- ・ 福島ロボットテストフィールド (試験用プラント2階)



b.(b)2 データ収集効率化技術の研究開発(8/11)

③ 作業員搬送型及び遠隔操作型データ計測手法の試作モデルの開発(3/6)

作業員搬送型データ計測ユニットの試作モデルの開発(3/3)

・検証実験用試作モデル（作業員搬送型データ計測ユニット）の開発と動作検証

- ① 赤外線センサ追加により任意の初期高さからの3次元位置推定機能の開発。
- ② 測初期状態：センサユニットの姿勢を水平に保ち、複数回測定した高さデータに基づいて決定。

実施結果

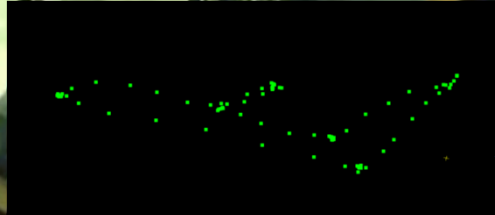
- ・ 模擬環境やJMTRにおいて測定位置と空間線量率を併せてデータ収集可能であることを実験により確認。

→ **位置誤差0.3m程度、狭隘空間（1m四方程度）で精度低下する場合も確認**

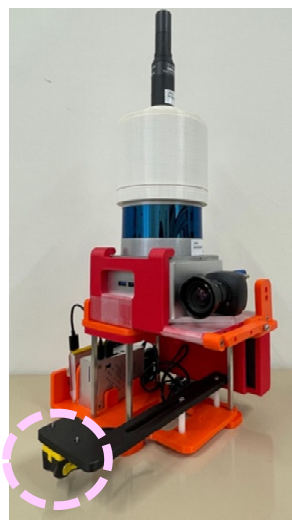
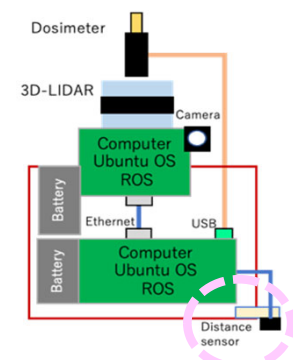
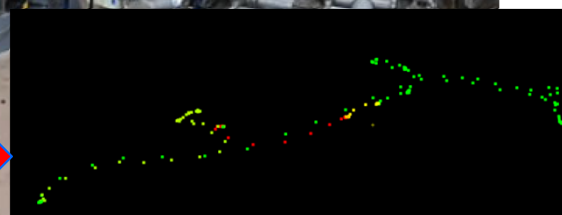
- ・ JAEA NARREC 試験棟内における計測実験の様子



- ・ JMTRプールカナル室における計測実験の様子



測定位置及び空間線量率の計測結果
 ※空間線量率の色分布
 0.0(緑色)~7.56(赤色)[mSv/h]



【成果】

データ計測ユニット（可搬型）の基本設計、試作モデル開発、機能確認を行い、検証実験による動作確認並びに測定位置及び線量率データを取得した上で、自己位置及び空間線量率センサを組合わせた計測が可能である。

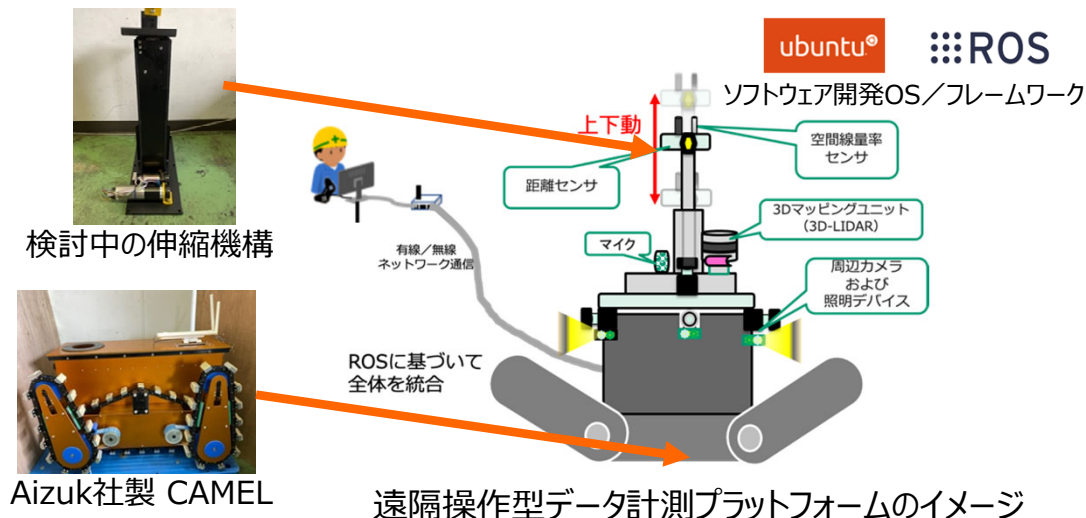
b.(b)2 データ収集効率化技術の研究開発(9/11)

③ 作業員搬送型及び遠隔操作型データ計測手法の試作モデルの開発(4/6)

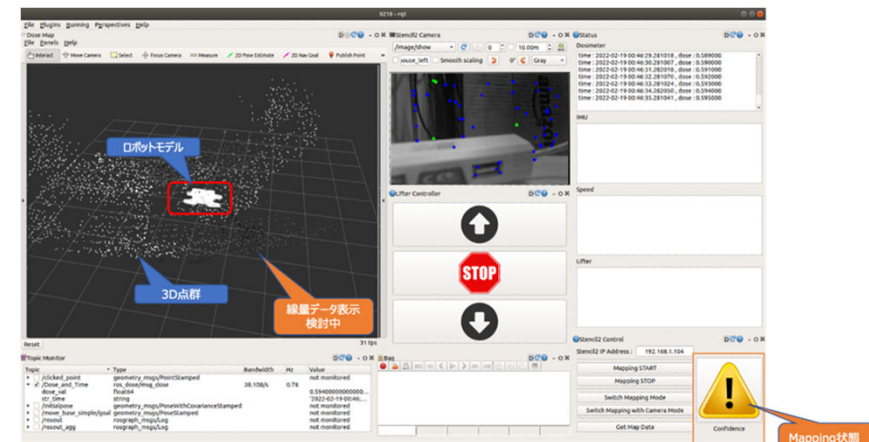
遠隔操作型データ計測手法の試作モデルの開発(1/3)

検証実験用試作モデルの開発結果

- 遠隔操作型データ計測手法の開発としてセンサを搭載した遠隔操作移動プラットフォームの設計と製作。
- 移動プラットフォームの基盤に、東京電力で採用されているAizuk社製のCAMELを選定し、遠隔操作で空間線量率と3次元測定位置を収集するシステム。
 - 上下伸縮機構（3m）による線量率センサ位置検出及びSLAMによる推定自己位置の統合による3D計測位置推定。
 - 複数カメラ、照明デバイス搭載による周辺視野の確保。
 - 移動制御部と上下伸縮機構を含む計測制御部は分離しても動作可能となるシステム設計（ROSベース）等
- 通信/計測ソフトウェアに関する知見、ソースコードを共有することで製作を効率的に推進。



遠隔操作型データ計測プラットフォームのイメージ



操作インターフェースのイメージ

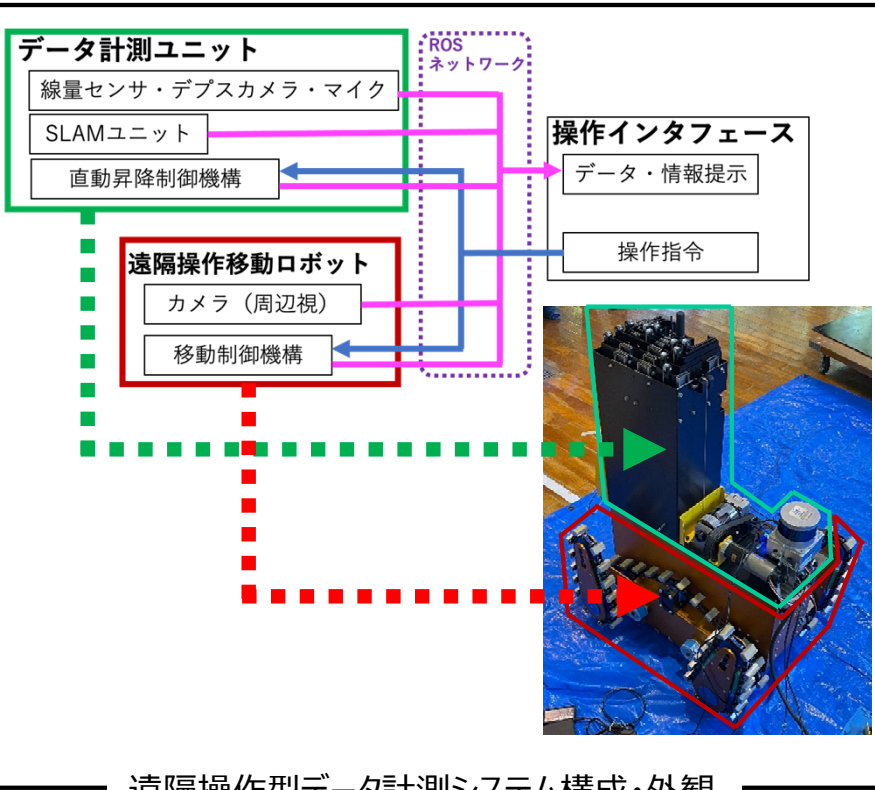
b.(b)2 データ収集効率化技術の研究開発(10/11)

③ 作業員搬送型及び遠隔操作型データ計測手法の試作モデルの開発(5/6)

遠隔操作型データ計測手法の試作モデルの開発(2/3)

- ・システム全体構成の確定及び各部の設計、開発。
- ・空間線量率センサを上下に移動制御する伸縮機構のプロトタイプの動作確認。
- ・センサデータ・情報の取得及び提示に関する動作確認。

実施結果： 空間線量率センサを取り付けた伸縮機構で高さを指定することで動作可能であることを確認。
 データ計測ユニットに搭載したセンサで取得したデータを設定したウィンドウ・位置に提示可能であることを確認。



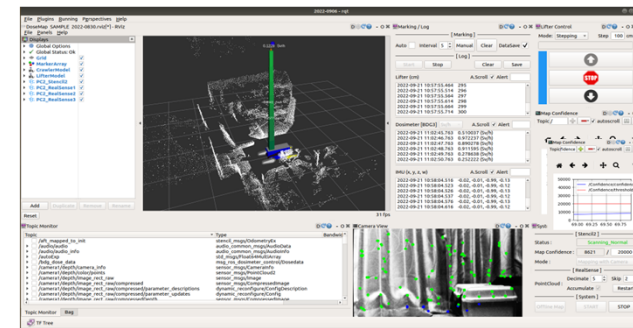
遠隔操作型データ計測システム構成・外観



移動・上下伸縮機構の動作実験



(移動操作用)



(計測データ提示用)

操作インターフェース表示の例

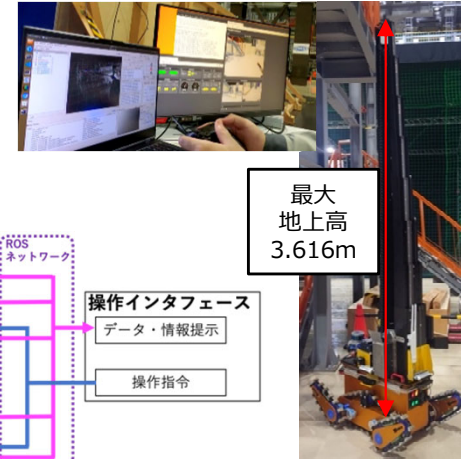
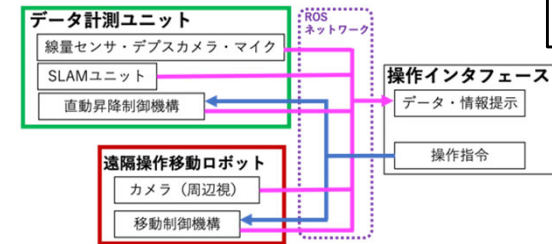
b.(b)2 データ収集効率化技術の研究開発(11/11)

③ 作業員搬送型及び遠隔操作型データ計測手法の試作モデルの開発(6/6)

遠隔操作型データ計測手法の試作モデルの開発(3/3)

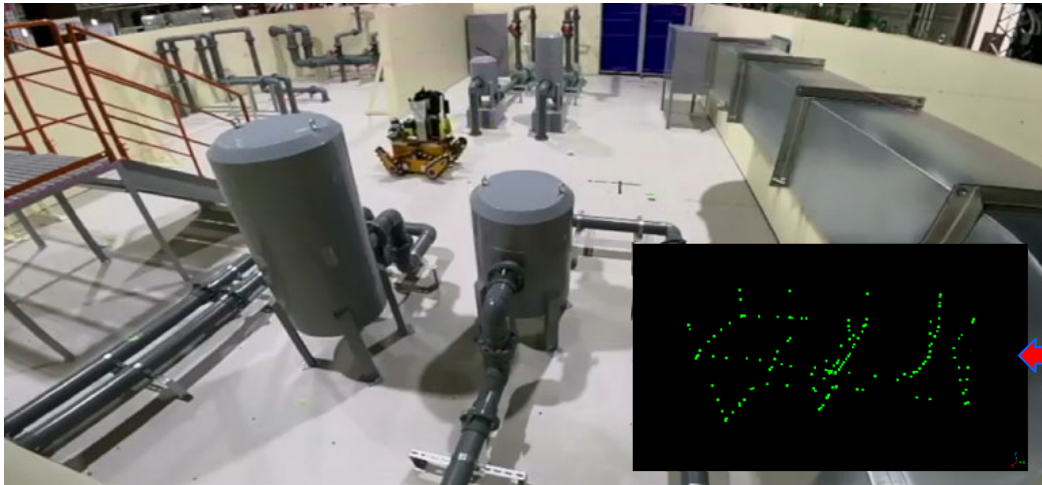
検証実験用試作モデル（遠隔操作型データ計測システム） の開発と動作検証

- ・システム化（ROS）の実施。
- ・データ計測ユニット・遠隔操作移動ロボット・操作インターフェース。
- ・動作確認及び計測実験の実施。

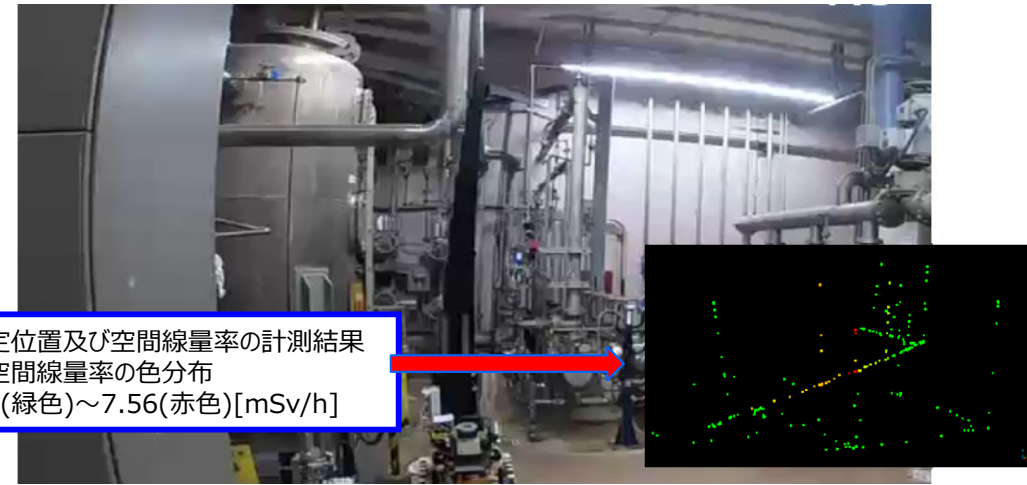


実施結果：遠隔操作により移動及び空間線量率センサ昇降を組合わせて計測可能であることを確認
 （位置誤差0.3m程度、狭隘空間（1m四方程度）で精度低下する場合も確認）

・ JAEA NARREC 試験棟内における計測実験の様子



・ JMTRプールカナル室における計測実験の様子



測定位置及び空間線量率の計測結果
 ※空間線量率の色分布
 0.0(緑色)~7.56(赤色)[mSv/h]

【成果】

データ計測ユニット（遠隔操作型）の基本設計、試作モデル開発、機能確認を行い、検証実験による動作確認並びに測定位置及び線量率データを取得した上で、遠隔操作移動及び空間線量率センサ昇降を組合わせた計測が可能である。

b.(b)3 高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発 (1/7)

●目的

3m以上の高さの空間にアクセスして空間線量率を測定する手法及び γ 線核種と β 線核種を弁別する手法を開発する。

●反映先

データベースに登録する β 線源、 γ 線源分布と計測位置データを収集する手段となる。

●スケジュール

実施内容	2021(令和3)年度	2022(令和4)年度
b.(b)3 高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発		
①1F現場適用における課題抽出(p.113)	調査・分析 課題抽出整理	
②高所等計測手法の試作モデルの開発(p.113)	概念設計 基本設計	詳細設計 試作モデルの開発(一部) 戒立性評価・課題抽出 実験準備・予備実験 本実験 まとめ
③核種弁別手法の試作モデルの開発(p.116)	センサの基本設計 センサの試作・特性試験	試作モデルの開発 性能評価 まとめ

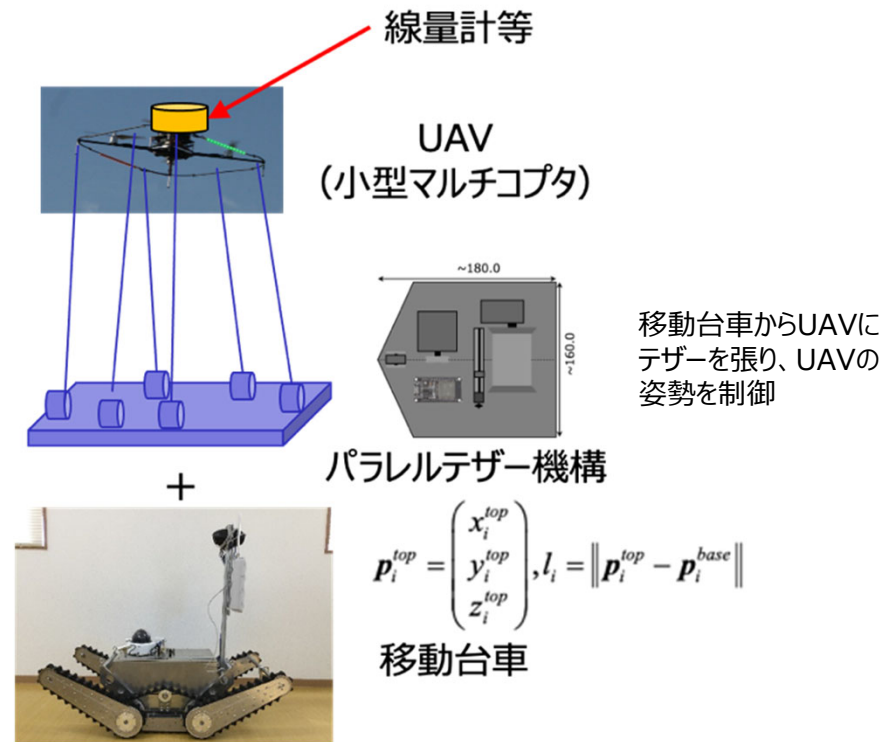
b.(b)3 高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発 (2/7)

① 1F現場適用における課題抽出

- 1F事故緊急時対応及び廃止措置で、原子炉建屋内に投入されたもしくは開発中の高所調査ロボットの事例について使用意図、実績等について調査・分析の実施・整理
- 1Fに投入された高所調査ロボットの事例の調査・分析において、R/Bへの搬入性、操作のための周囲監視法及びUAVの位置姿勢の安定化制御等を課題として抽出

② 高所等計測手法の試作モデルの開発(1/3) [課題抽出]

- 投入環境の制約条件を整理し、**高所（3～7 m程度の範囲）**へアクセスするUAVについて検討を実施し、マルチコプタの採用決定
- 「高所3～7 m程度へのアクセス」、「少人数での投入・操作」及び「狭隘部の通過を実現する小型マルチコプタと制御用平行テザーを接続した機構の設計」の実施
- UAVの可搬重量、推力及び移動台車の仕様より、平行テザー機構の機械／電気に関する要求仕様を定め、機構と制御ソフトウェア設計の実施



高所データ計測手法の構成図

b.(b)3 高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発 (3/7)

② 高所等計測手法の試作モデルの開発(2/3)

UAVによる粉塵巻き上げ評価

- ➔ マルチコプタの課題である粉塵巻上性の評価試験法を考案
 - ・粉塵種類等をパラメータとし、荷重計と風速計による測定及びレーザーカメラによる粉塵の飛散状況の把握(右図参照)
 - ・上記試験方法を踏まえ粉塵巻上性評価試験装置組立(p.115参照)

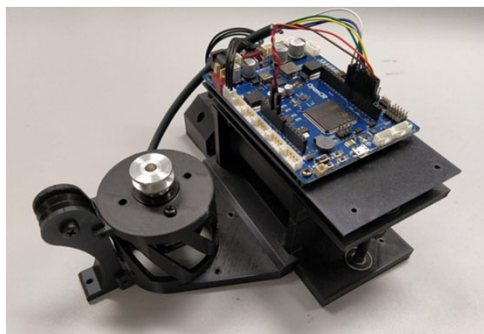
課題:

マルチコプタによる粉塵巻上性の評価及び巻上げ性(量)の推定

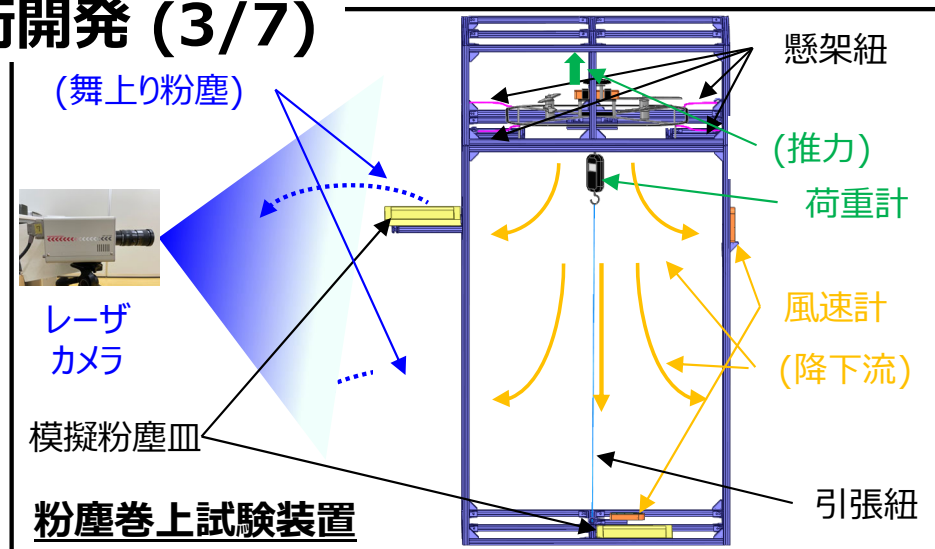
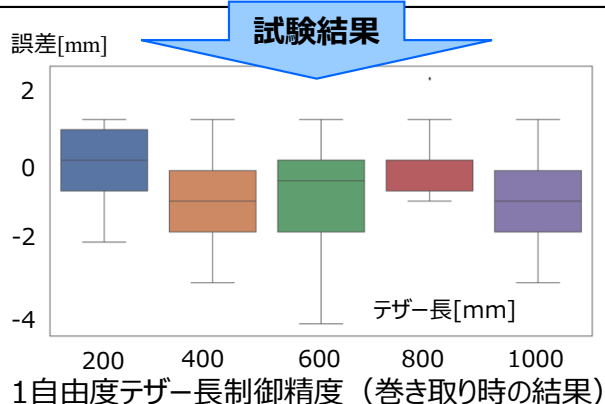
- ・研究開発項目：**1自由度**テザー制御機構の開発及び性能評価の実施
- 1自由度テザー長制御機構を試作 (巻取速度10mm/s)

実施結果

テザー長制御精度 (プーリのすべりが計測に与える影響) について実験により確認 (テザー長によらず-3~+1 mm)

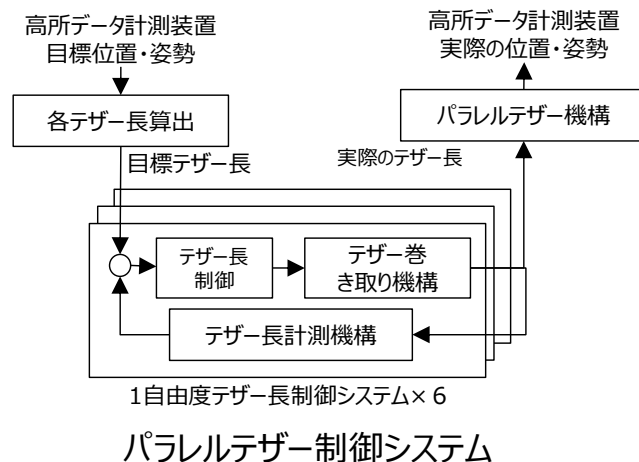


1 自由度テザー制御機構



課題

- ・6台を統合し高所データ計測装置の位置姿勢制御機構の開発
- ・制御精度の実験及び評価

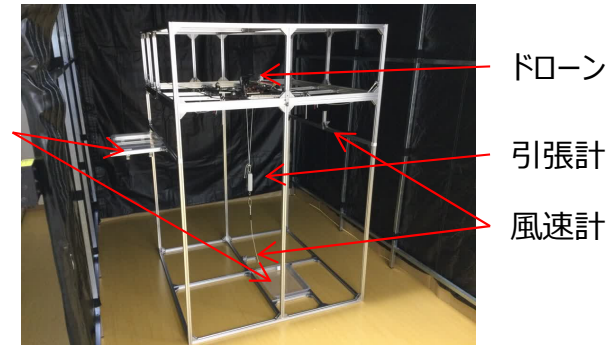


b.(b)3 高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発 (4/7)

② 高所等計測手法の試作モデルの開発(3/3)

開発と評価方法

- 1) マルチコプターの高さ方向の位置制御をパラレルテザー機構で行う、高所等計測手法の試作モデルの開発を実施
- 2) 試作モデルの成立性確認として、マルチコプター粉塵巻き上げ性とテザー機構の位置制御精度を評価

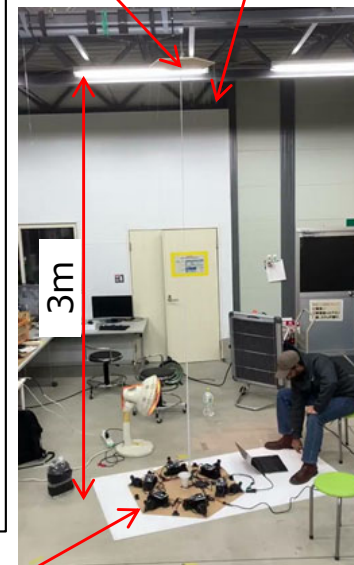


粉塵巻き上げ試験装置

実施結果

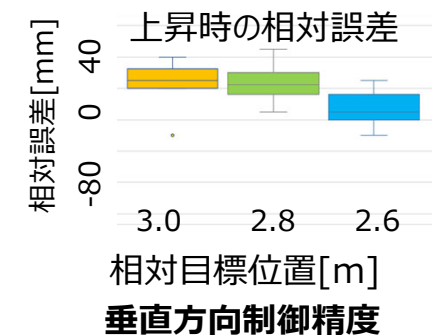
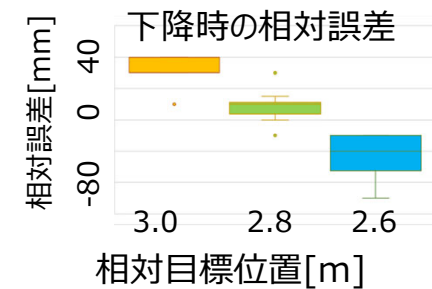
- 巻き上げ性は下方（床面）からが支配的で、上記システムの580mm□級のマルチコプターで、床面に水散布等することで巻き上げ量を約1/10に削減できることを確認
- 移動ロボットに搭載可能な6自由度テザー機構を開発し、3mまでの制御精度検証を行い、垂直方向の絶対誤差は80mm以内を達成（線形的に誤差が増加すると仮定すると、7mにおいては誤差186mm）
- 高所における位置計測のための6自由度テザー機構を開発し、それが搬送ロボットに搭載可能であること、また、580mm□級マルチコプターの吐出力と同じ1kgfの力を天板に付加して垂直方向の制御ができたことから、高所等計測システムとして成立することを確認

天板
テザー×6本



1自由度
巻き上げ機構×6個

パラレルテザー
機構の実験風景



垂直方向制御精度

[成果]

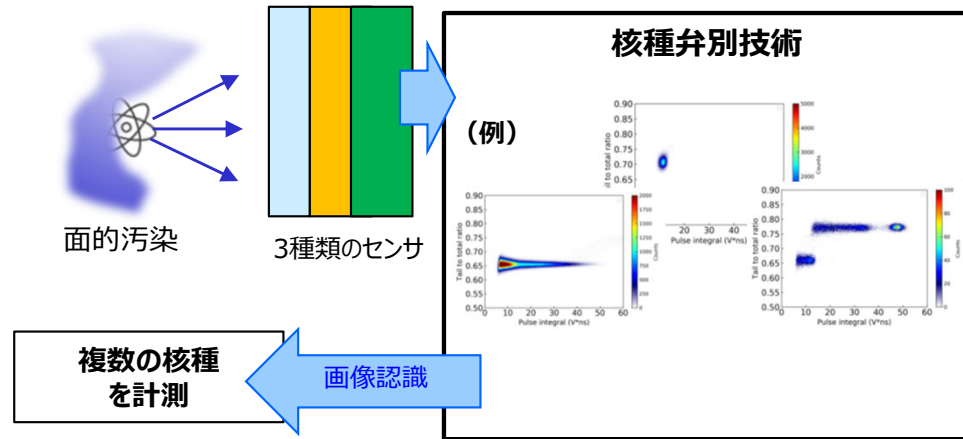
高所調査システムの課題である粉塵巻き上げ低減策と制御精度を検証し、成立性を確認した。

b.(b)3 高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発 (5/7)

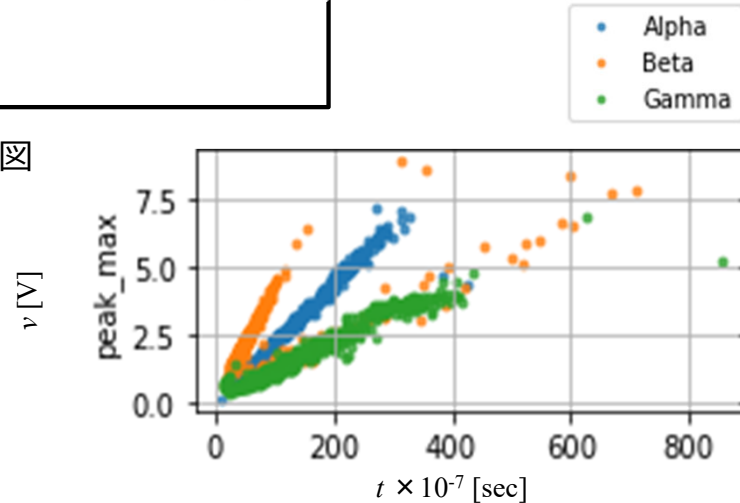
③核種弁別手法の試作モデルの開発(1/3)

[課題抽出]

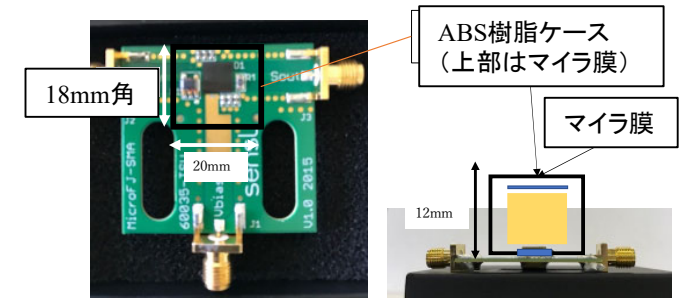
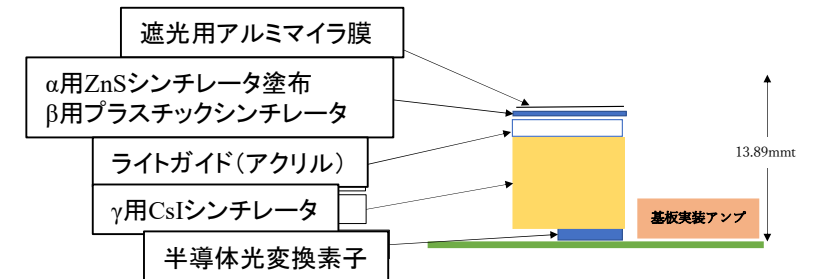
- ・UAVに搭載可能な小型軽量(150g)の核種測定ホスウィッチ検出器の計測ユニット設計の実施
- ・線源位置を求めるための放射線飛来方向を測定のため、4検出器によって同時計測する方法の研究
- ・ α ・ β ・ γ 核種を弁別しながら同時に計測できるホスウィッチ型検出器を試作し、エネルギー及び時間応答特性に関する調査解析の実施



核種弁別手法の概念図



波形解析(KNN)による弁別結果



試作したホスウィッチ検出器

b.(b)3 高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発 (6/7)

③核種弁別手法の試作モデルの開発(2/3)

小型軽量の核種測定ホスウィッチ検出器をドローンに搭載して計測するためのモジュール化と放射線源 (β ・ γ 線源) を用いた検出器の感度特性試験を実施。

- ・発光波長の異なる有機シンチレータ (β 線に高感度なプラスチックシンチレータ) と無機シンチレータ (γ 線用BGOシンチレータ) を組み合わせて小型軽量化を図ったホスウィッチ検出器モジュール* (140g) を製作。

(*シンチレータを複数層にして重ね、放射線により放出される発光波長の違いを利用して、異なる放射線を同時に測定する検出器)

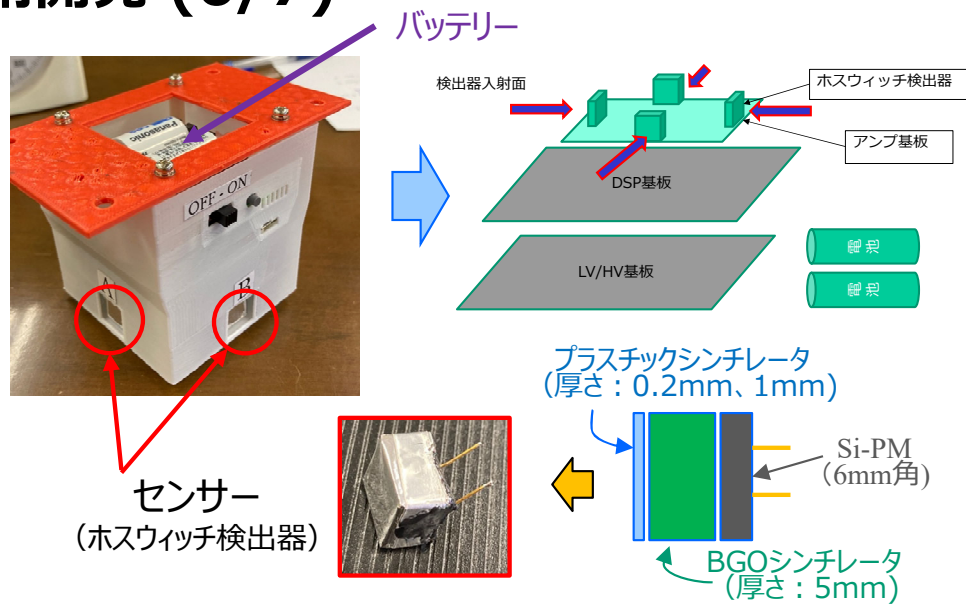


実施結果

- ・ β 線及び γ 線の弁別測定を行ない、発光波形の比を求めることから弁別可能であることを確認。
- ・ β 線及び γ 線の弁別特性を把握するため、プラスチックシンチレータの厚さ (0.2及び1mm) を変えて、特性試験を実施。

課題

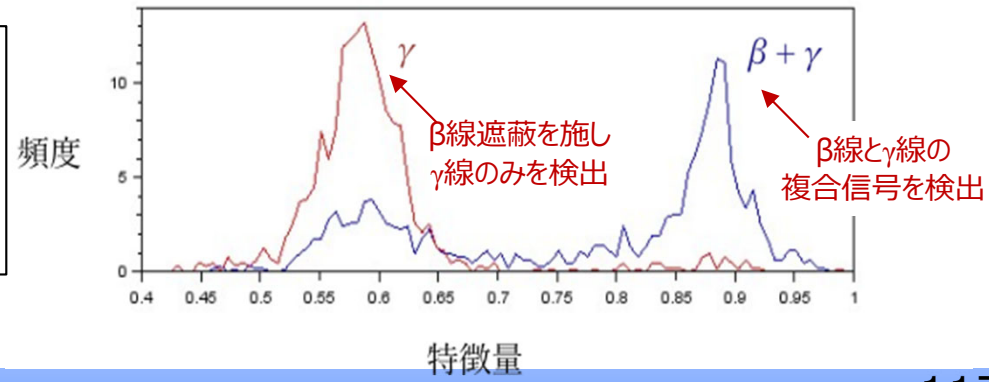
4チャンネルのホスウィッチ検出器モジュールを用いた計測システムを製作・改良し、 β ・ γ 線源を用いて各線種に対する計測感度、方向検出特性についての実験・評価。



4ch ホスウィッチ型検出システムの概念図と外観写真 (約80mmの立方体形状)。

1ch ホスウィッチ型検出器の信号波形の分布

信号パルスの立ち上がり部分 (100ns) と全体波形 (800ns) についての比から γ と $\beta + \gamma$ を弁別。これらの特徴から入射放射線が β 線 (^{90}Sr 起因) であるか、 γ 線 (^{137}Cs 起因) であるかを把握する。



b.(b)3 高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発 (7/7)

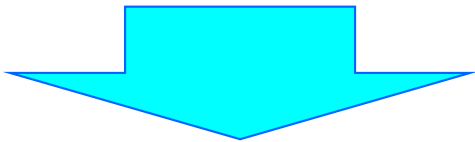
③核種弁別手法の試作モデルの開発(3/3)

核種弁別技術の開発

課題(p.117再掲)

4チャンネルのホスウィッチ検出器モジュールを用いた計測システムを製作・改良し、 β ・ γ 線源を用いて各線種に対する計測感度、方向検出特性についての実験・評価。

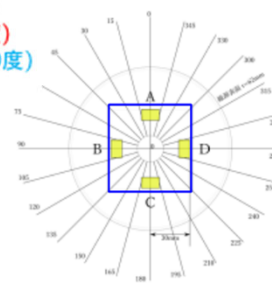
- 1)小型軽量（重量:140g）の核種測定ホスウィッチ検出器を開発。
- 2)信号波形は深層学習のKNN法と、新たに開発したdSINC (derivative of Synchronized Ideal Normalized Curves) 法で弁別解析可能であることを確認。
- 3)発光波長の異なる有機シンチレータと無機シンチレータを組合わせて小型軽量化を図った。
ホスウィッチ検出器モジュールを製作。
- 4) β 線及び γ 線の弁別測定を行ない、発光波形の比を求めることから弁別可能であることを確認。
- 5)線源照射試験により方向特性を確認。



[成果]

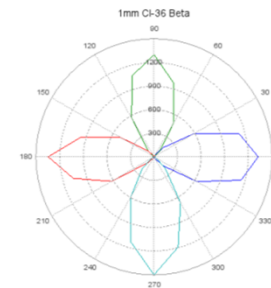
- 小型軽量化を図ったホスウィッチ検出器モジュールを開発し、目標値（150g）以下の140gのホスウィッチ検出器の製作、方向特性を提示した。

青A (0度)
緑B (90度)
赤C (180度)
水色D (270度)



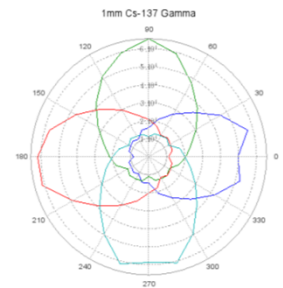
水平方向

$E_{\beta} = 0.709 \text{ MeV (Max)}$



β 線照射試験

$E_{\gamma} = 0.662 \text{ MeV}$



γ 線照射試験

*鉛直方向の照射試験を実施し、 β ・ γ 線に対してほぼ同様の感度特性を把握した。

b.(b)まとめ

実環境データ計測のための各基礎技術の特性について各項目を以下のような成果を得た。

1.放射線計測技術の研究開発

既存の測定器（ γ 線イメージャ、 γ 線スペクトロメータ）について照射場で高線量率環境における特性評価試験の実施

2.データ収集効率化技術の研究開発

作業環境データの計測・収集を効率化する基盤技術として、作業員搬送型及び遠隔操作型の試作モデル開発、計測性能の検証

3.高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発

高所等計測手法の試作モデルを開発し、マルチコプタの飛行時の粉塵巻上げ挙動並びにテザー位置制御精度を確認
小型軽量化を図った β ・ γ 線の核種弁別用センサの試作・性能評価を実施し、核種弁別を確認

線源・線量率推定のためのデータシステムを試作し、適切に動作することを確認した。また、実環境データ計測のための各基礎技術の特性を把握した。

b.(a)線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発

- 実環境で取得したデータや計算過程のデータを蓄積・保持するデータベースと線源推定計算に用いるデータを整理、変換等して提供するための機能を備えたシステムを開発した。

b.(b)実環境データ計測に関する基盤技術の研究開発

1:放射線計測技術の研究開発

- ・既存の測定器（ γ 線イメージャ、 γ 線スペクトロメータ）について照射場で高線量率環境における特性評価試験を実施して結果をまとめた。

2:データ収集効率化技術の研究開発

- ・作業環境データの計測・収集を効率化する基盤技術として、作業員搬送型及び遠隔操作型の試作モデルを開発し、計測性能を検証した。

3:高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発

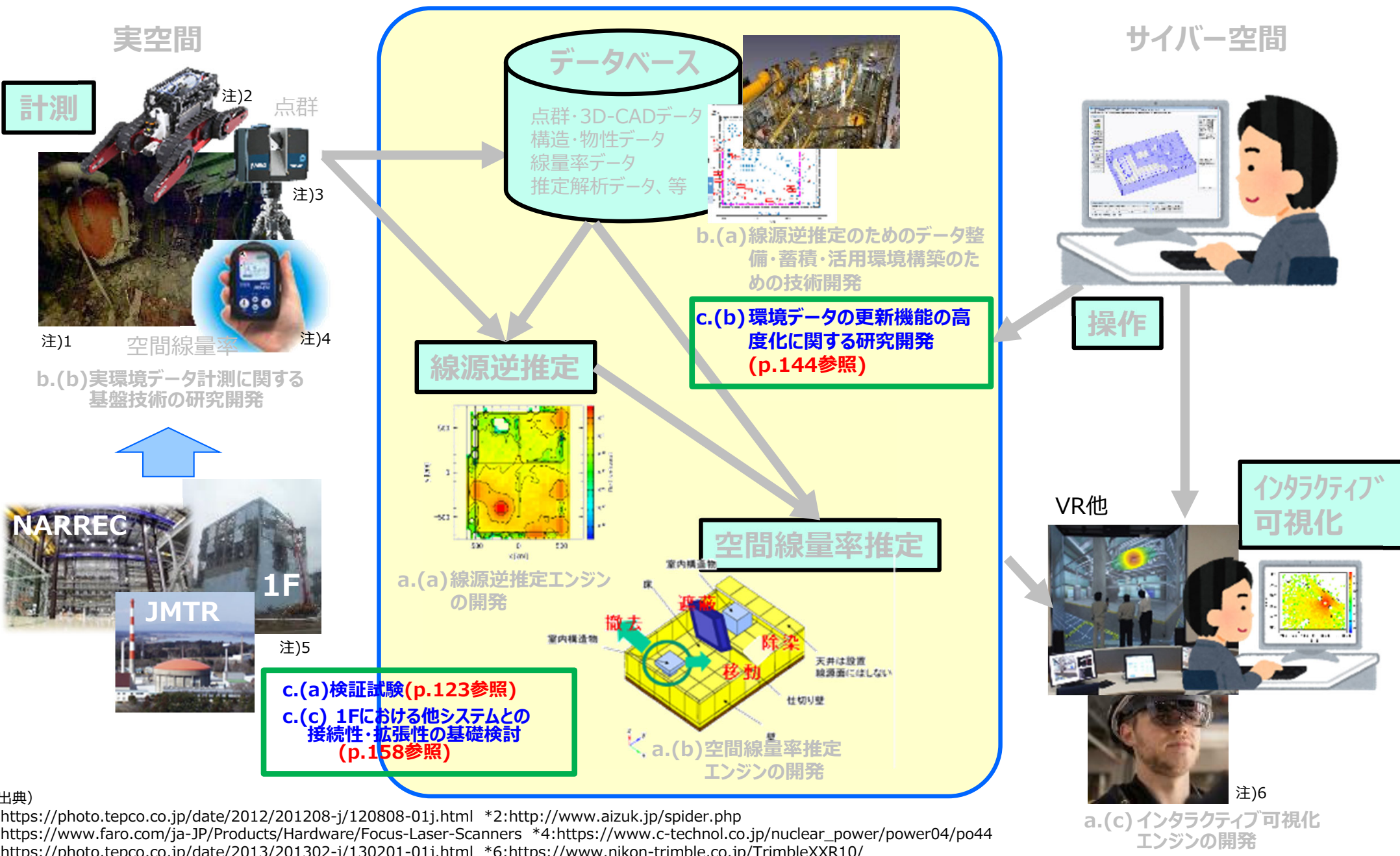
- ・高所等計測手法の試作モデルを開発し、マルチコプタの飛行時の粉塵巻上げ拳動並びにテザー位置制御精度を確認した。
- ・小型軽量化を図った β ・ γ 線の核種弁別用センサの試作・性能評価を行い、弁別可能であることを確認した。

c. 現場適用のための技術開発

(a) 検証試験

**(b) 環境データの更新機能の高度化に関する
研究開発**

**(c) 1Fにおける他システムとの接続性・拡張性の
基礎検討**



注(出典)
 *1: <https://photo.tepco.co.jp/date/2012/201208-j/120808-01j.html> *2: <http://www.aizuk.jp/spider.php>
 *3: <https://www.faro.com/ja-JP/Products/Hardware/Focus-Laser-Scanners> *4: https://www.c-technol.co.jp/nuclear_power/power04/po44
 *5: <https://photo.tepco.co.jp/date/2013/201302-j/130201-01j.html> *6: <https://www.nikon-trimble.co.jp/TrimbleXXR10/>

● 目的

本プロジェクトで開発するシステムを構成する線源・逆推定計算手法の有効性評価及び「線源逆推定エンジン」、「空間線量率推定エンジン」、「インタラクティブ可視化エンジン」、環境データ生成手法及びデータベースの性能評価を行うため、サイバー空間、コールド空間とホット空間とステップを踏んだ検証試験を実施する。

● 反映先

1F廃止措置現場での実証試験につなげるための課題抽出に反映する。

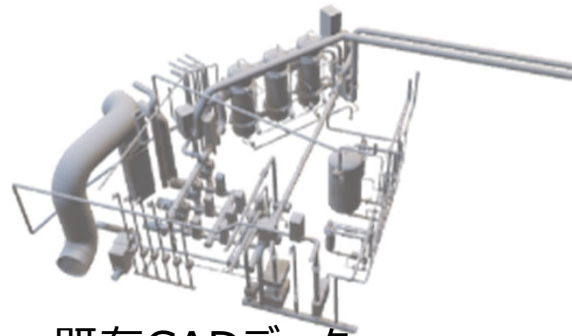
● スケジュール

実施内容	2021(令和3)年度	2022(令和4)年度
c.(a) 1 線源・逆推定計算手法の検証試験		
① JMTRにおける検証(p.125)	検証試験 一次まとめ	検証データの整備 中間まとめ 最終まとめ
② 1Fにおける検証(p.133)	検証エリアの選定、必要データの抽出 必要データの取得方法の検討	検証データ整備 1Fにおける比較検証 まとめ
c.(a) 2 線源・線量率推定システムの有効性評価		
① 試験場における評価(p.135-143)	評価要素の抽出 試験場概念検討、仕様具体化	試験場製作 評価試験 まとめ
② JMTRにおける評価(p.135-143)		試験データ整備 評価試験 まとめ

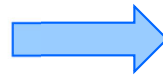
JAEA内施設の材料試験用原子炉 (JMTR) と1Fを対象に検証試験を実施するため、以下の検証用のデータを整備。

1) 詳細CADデータの整備

JMTRの既存CADデータを用いて線源・逆推定計算手法の解析を進め、遮蔽体となりうる機器配管類の一部がCAD化されていないため、詳細版を整備。



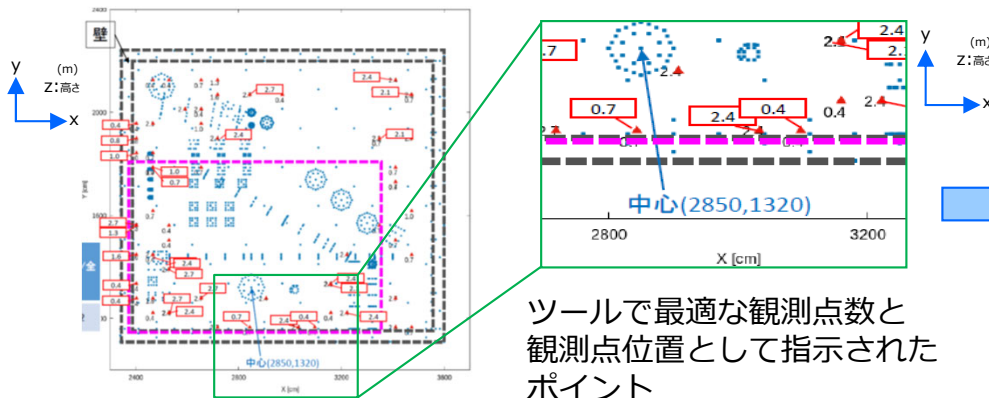
既存CADデータ



3D点群データより詳細CADデータを整備

2) 線源・逆推定手法関連ツールが指示した位置での空間線量率測定

線源逆推定に必要なツールが指示する最適な観測点数と観測点位置において空間線量率を計測し、線源逆推定の計算に必要なデータとして利用。



x、y、z(高さ)、は原点からの距離(m)
高さは地面からの距離を示す

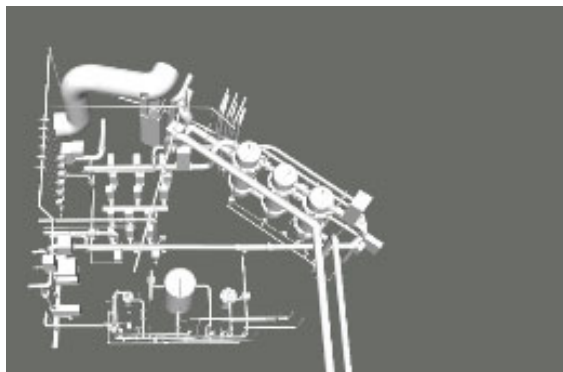
x(m)	y(m)	z(m)	線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)
28.8	11.9	0.7	3.1
29.4	13.1	2.4	3.81
30.6	11.9	2.4	1.91

指示された観測点位置 (空間座標) 及び計測値

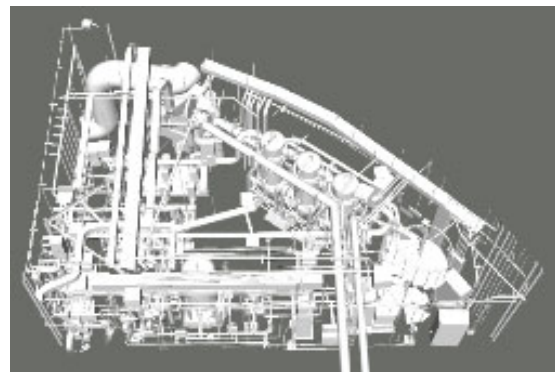
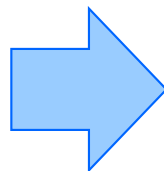
① JMTRにおける検証(1/8)

1) 詳細CADデータの整備

JMTRの既存CADデータでは遮蔽体となり得る機器配管類が不十分であるため詳細版を整備した。



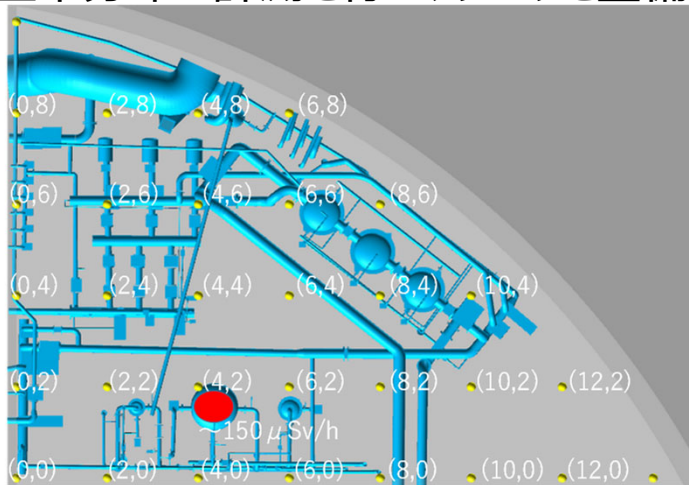
既存CADデータ



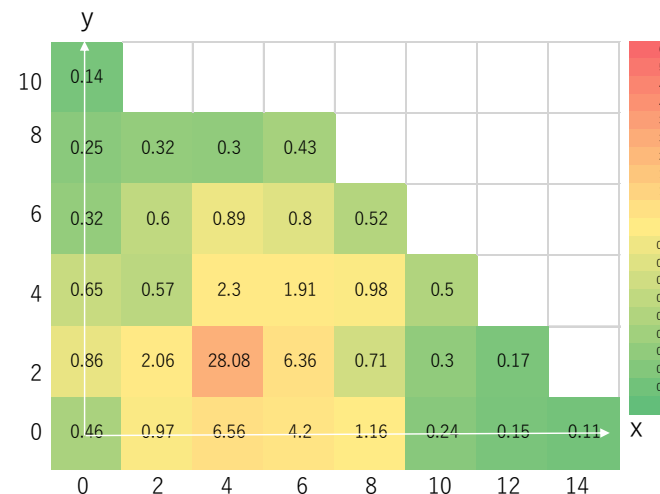
詳細CADデータ

2) 線源・逆推定手法関連ツールの検証用データの整備

線源逆推定による線源位置及び空間線量率分布の結果を検証するため、線源位置の特定、空間線量率分布の計測を行い、データを整備した。



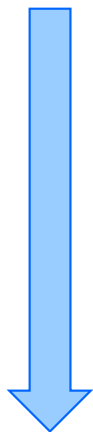
計測ポイント[原点(x,y)=(0,0)からの距離]と線源位置「●」



計測ポイント(高さ:z=2m)での空間線量率 (μSv/h)

①JMTRにおける検証(2/8)

3)簡易解析モデルを用いた逆推定解析結果(1/3)



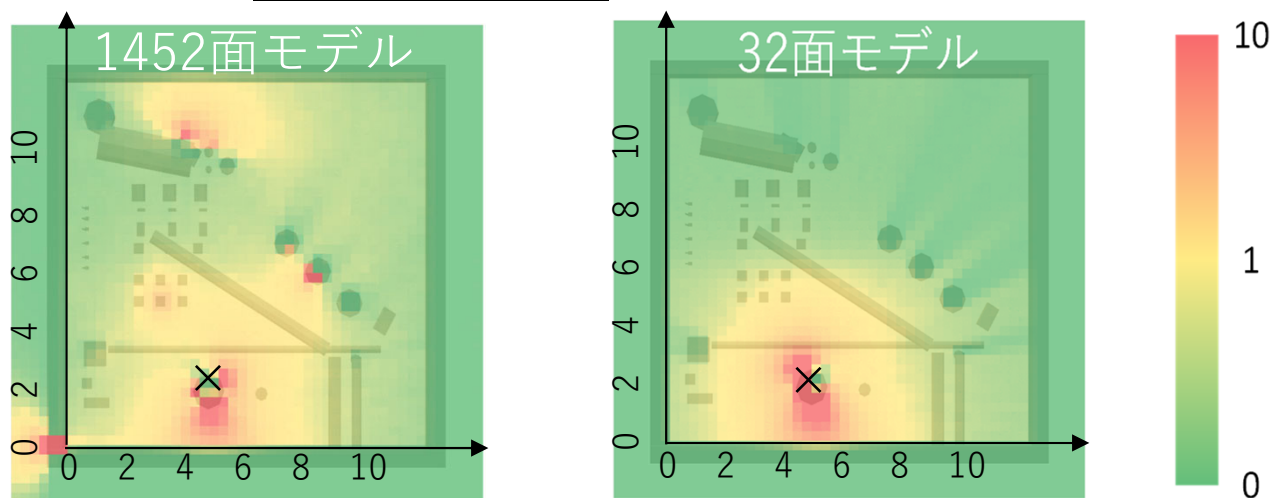
試験手順

1. 観測点指示ツールで観測点を指定
2. 観測点での空間線量率を計測
3. 観測点計測結果に基づき簡易解析モデルを用いた逆推定解析を実施
4. 逆推定解析で得られる線源位置・空間線量率の検証

※簡易解析モデル：既存CADデータベースを簡略化した解析モデル

<結果>

- ・中央下部の強線源の推定位置はおおよそ良好である。
- ・1452面モデルでは実際には線源が無い場所で線源があると推定している。



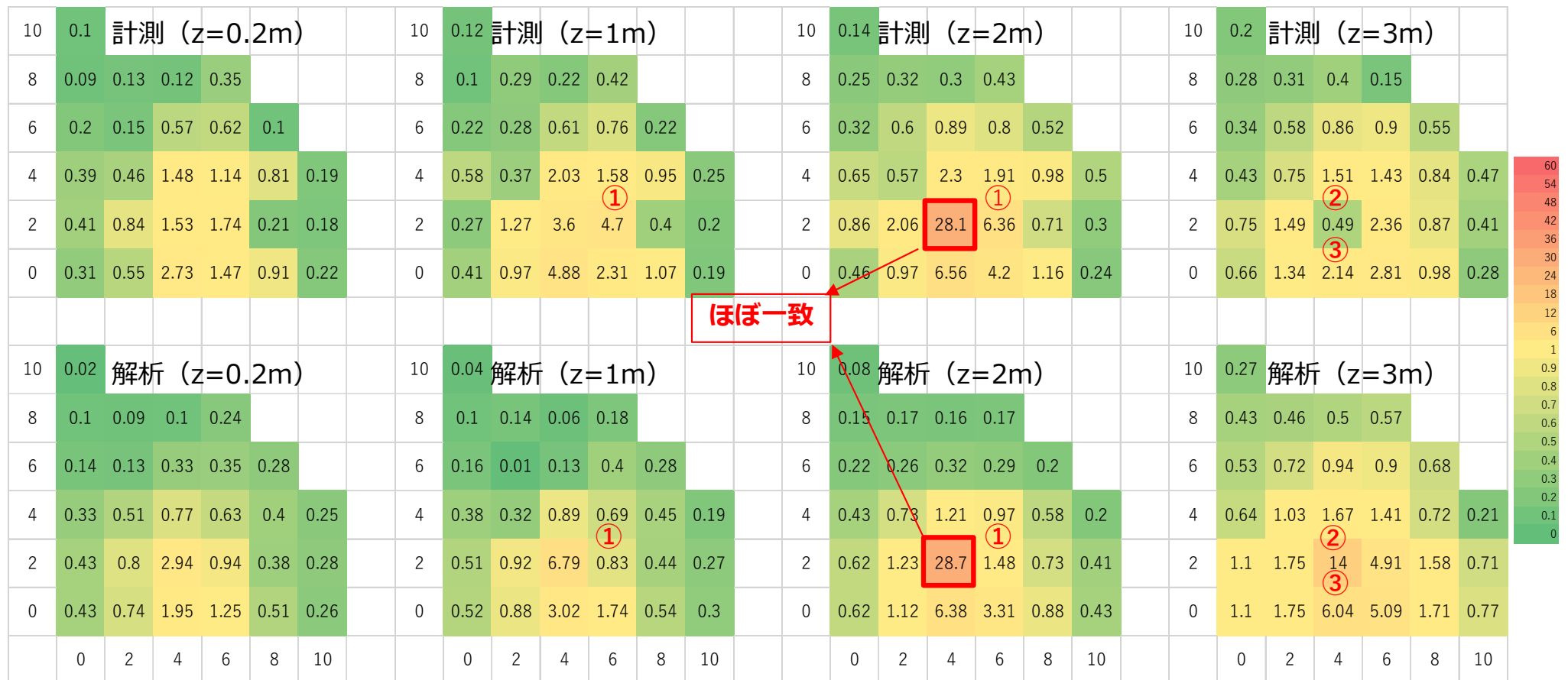
逆推定解析により得られたz=2mにおける空間線量率分布 (μSv/h) × : 線源位置

① JMTRにおける検証(3/8)

3) 簡易解析モデルを用いた逆推定解析結果(2/3)

<結果(前頁の続き)>

- 計測値と同様な傾向が得られた32面モデルの解析値と計測値を比較してみると、**2倍以上の乖離が認められたのは全体の2割程度で良好な結果**となった。
- 特に**①~③**の位置で大きな乖離が認められた。



計測による計測値と逆推定解析32面モデルによる空間線量率 (μSv/h) の比較

① JMTRにおける検証 (4/8)

3)簡易解析モデルを用いた逆推定解析結果(3/3)

- p.127の①の位置における乖離については、今回の解析モデルでは図1の電源盤をモデル化していないため、解析において電源盤の遮蔽効果が考慮されずに計算され、この場所での解析値に計測値との乖離が生じたと考えられる。
- ②の位置はイオン交換樹脂塔の上部付近で、図2に示すようにイオン交換樹脂塔を約60cm程度のメッシュで分割しており、逆推定解析においてその平面に一律に表面線量率を付与しているため、高い推定値となったと考えられる。そのため、今後の解析においてはメッシュ幅の取り方によってこのような乖離が生じることに留意が必要。
- ③の位置における乖離についても、イオン交換樹脂塔の付近であることと同じ高さであることから②と同じ理由に起因するものと考えられる。

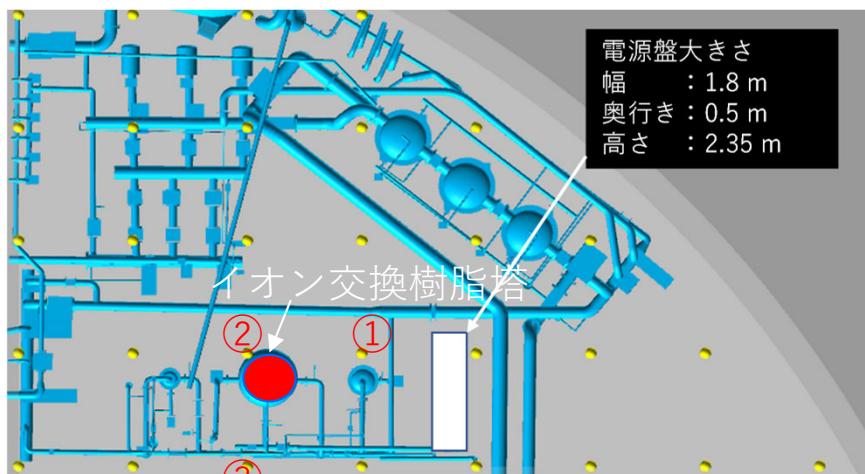


図1 プールカナル循環系機器室

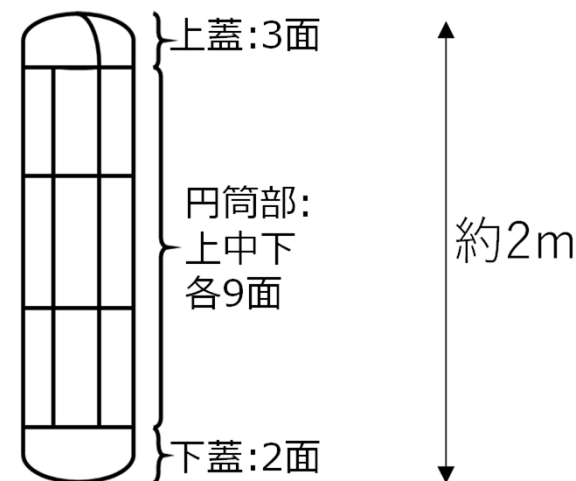


図2 イオン交換樹脂塔32面モデル分割方法

以上の結果より、

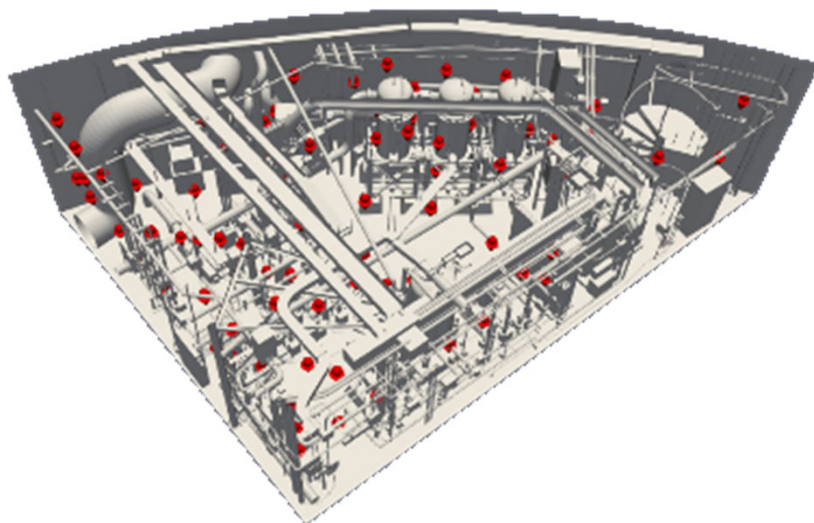
- 整備した詳細CADデータを基にした解析モデルでのさらなる検証が必要
- 解析結果に応じた追計測（新たな観測点）による逆推定解析の検証が必要

① JMTRにおける検証 (5/8)

(1) 詳細モデル (サーフェスデータ) における観測点指示ツールが指示した位置での空間線量率測定
・線源逆推定に必要な最適な観測点数と観測点位置において、空間線量率を計測。

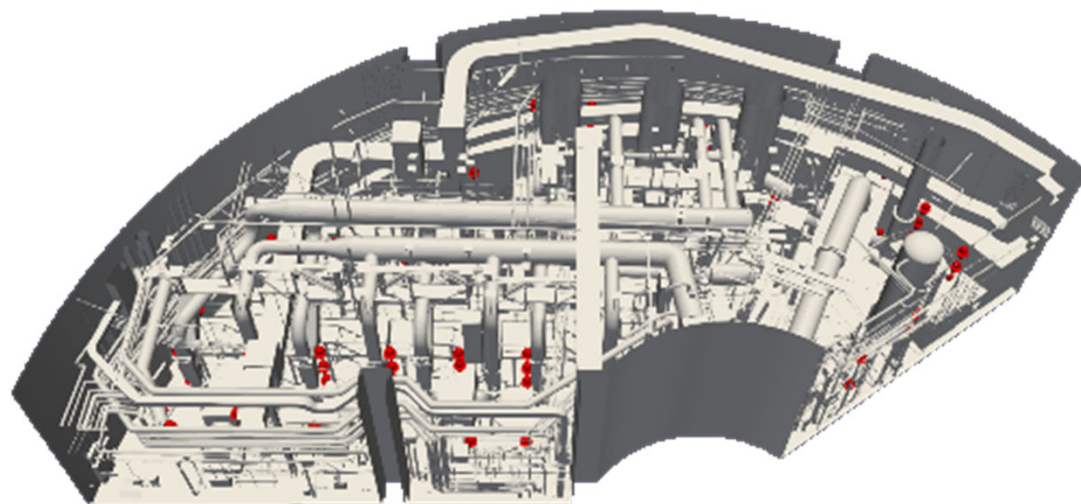
プールカナル循環系機器室

高さ0.8m、1.8m、2.8mで計97点を計測



主循環系機器室

高さ1m、2m、3mで計100点を計測



主循環系機器室計測時の様子

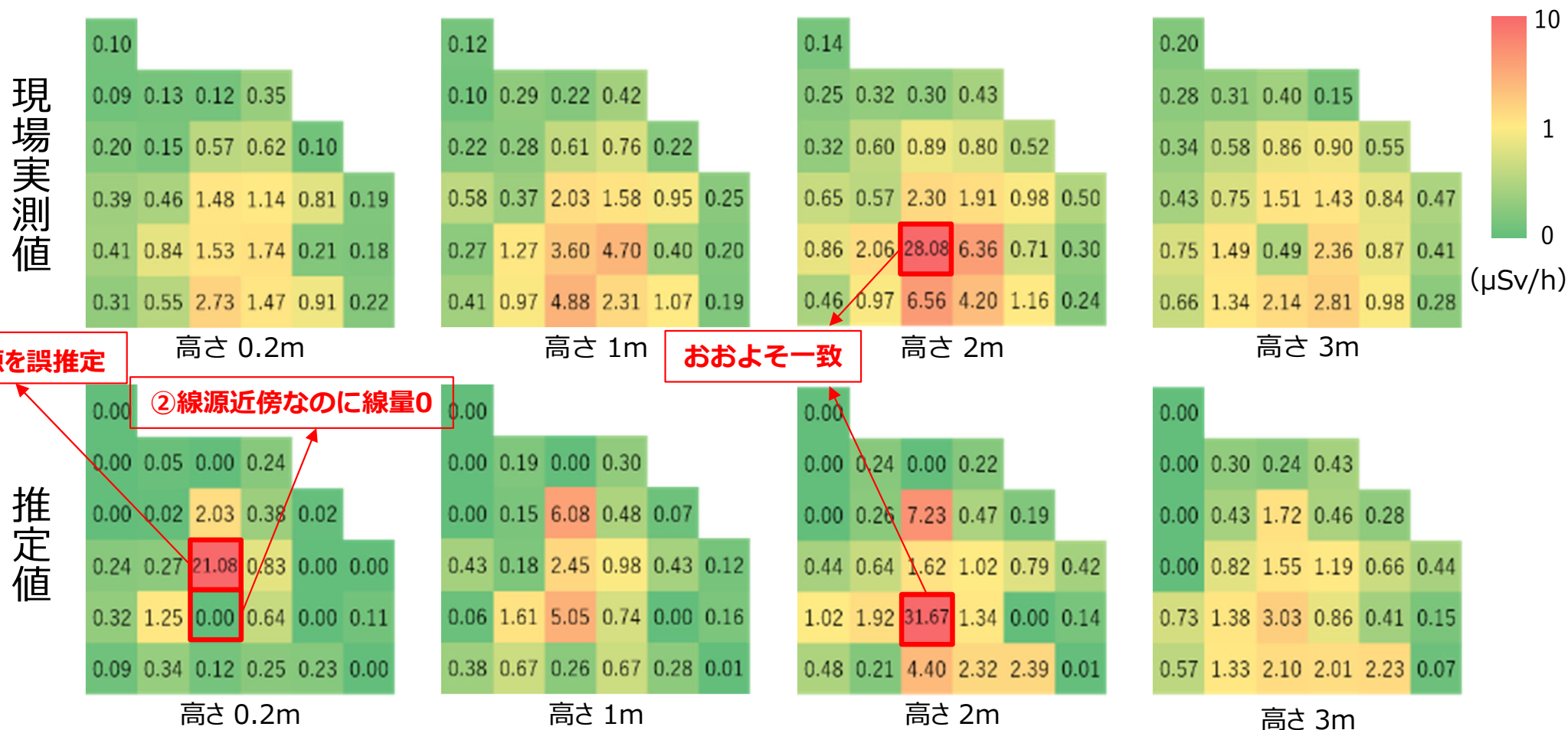
観測点指示においては

- ・ロボットによる計測
⇒ **アクセス性に考慮が必要**
- ・人による計測
⇒ **無用な被ばくや身体汚染に考慮が必要**

①JMTRにおける検証(6/8)

(2) 詳細モデル(サーフェスデータ)を用いた逆推定解析結果と現場実測値の比較(1/3)

- ・プールカナル循環系機器室において詳細モデル(簡易計算)での解析結果と現場実測値の比較を実施
- ・全体の傾向としては**おおよそ現場実測値と同様の傾向**が得られている。
- ・**原因①線源の誤推定**、**原因②線量率分布の差異**(p.131参照)が生じている。



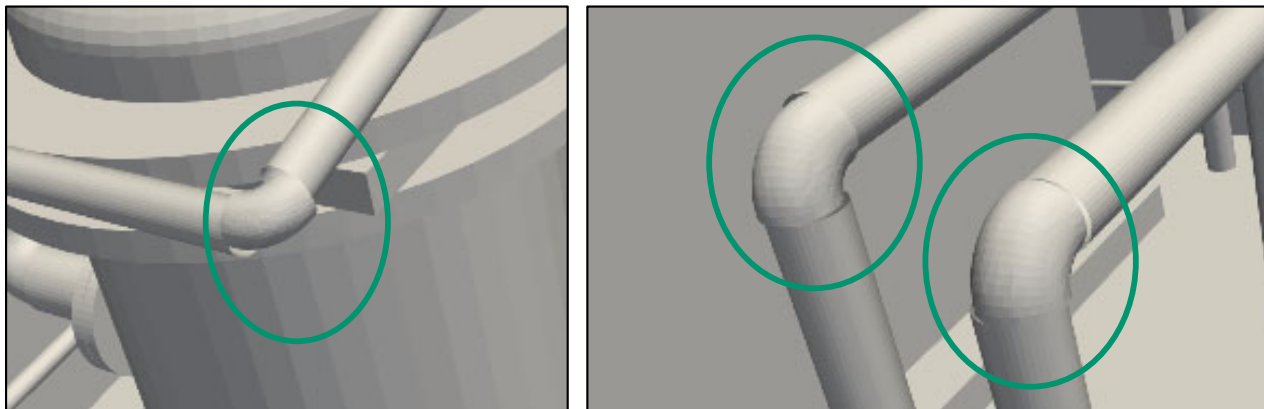
①JMTRにおける検証(7/8)

(2) 詳細モデル (サーフェスデータ) を用いた逆推定解析結果と現場実測値の比較(2/3)

原因①：線源の誤推定 → モデルの配管エルボ部のズレ

・当該箇所においてモデルとしての連続性がなくなったため、今回の逆推定計算に導入しているLASSOの手法の一つである擬fused-LASSOでは、線源になりやすい。

⇒ モデルの基となるCADデータ作成時点でズレを解消することが有効。



連続性が失われてしまい
線源として推定され易い

原因②：線量率分布の差異 → 簡易計算において**直達線のみ**しか考慮していないことが原因

・直達線のみでの計算であるため、構造物が密集しているような箇所では遮蔽により、散乱線等の影響を受けて線量が0ではない箇所でも0といった結果となる。

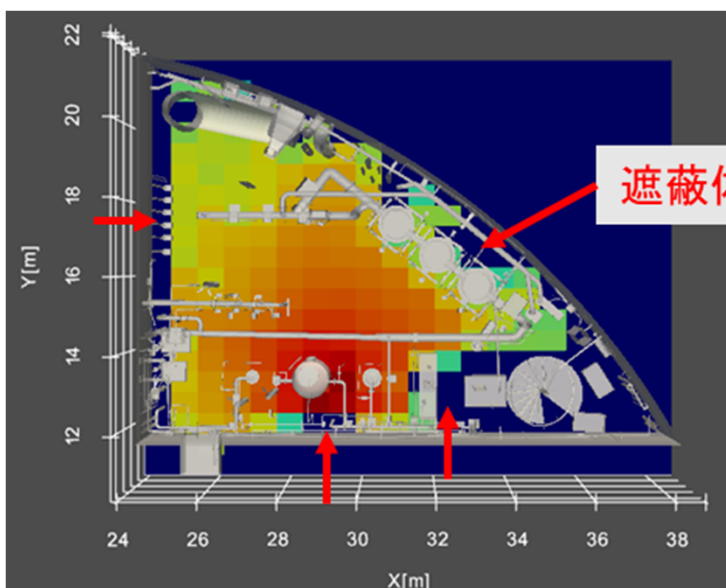
⇒ 散乱線等も考慮した簡易計算を実施・確認。

①JMTRにおける検証(8/8)

(2) 詳細モデル (サーフェスデータ) を用いた逆推定解析結果と現場実測値の比較(3/3)

直達線、散乱線、透過線を考慮した解析結果 (簡易計算)

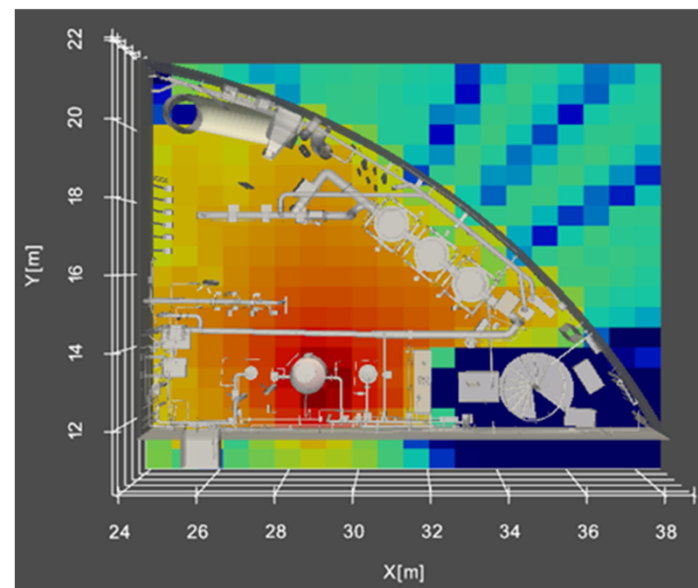
- ・直達線のみで得られた線量率分布 (誤推定) の補正を確認。
- ・直達線、散乱線、透過線を考慮することにより、より実測値に近い結果を得られた。
- ・計算時間は2～3倍程度で動作することを確認。



直達線だけの解析結果

遮蔽体の影響

赤矢印で示す箇所等で
線量率が有限となる



直達線、散乱線、透過線の解析結果

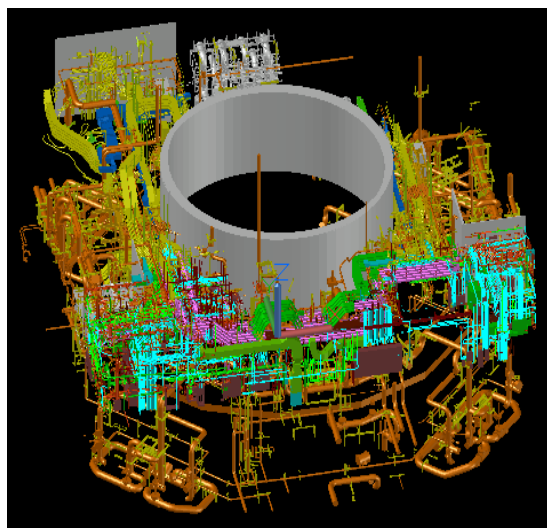
② 1Fにおける検証

検証エリアの選定、必要データの抽出

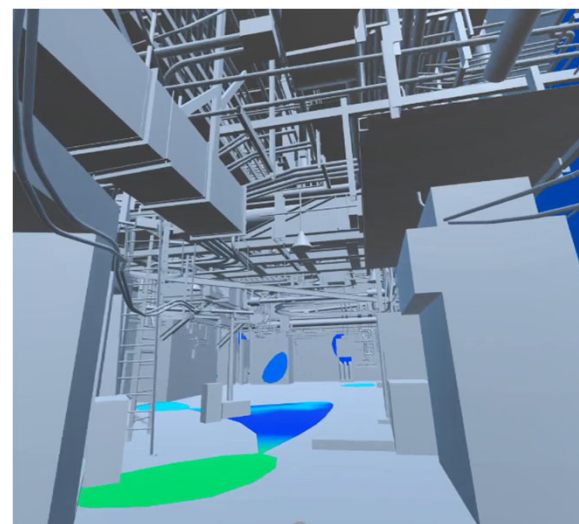
- ・検証エリア：2号機R/B北西・南西エリア
- ・必要データ：CADデータ(2020年)、空間線量率データ(2020年)

検証結果

- ・東京電力と協議し、東京電力保有の当該データを基に解析を実施 (pp.44-45にて説明)
- ・1F2号機の1階全域のCADデータ及び線量率データを基に線源逆推定エンジンで動作検証した。
(動作検証：～36hr程度で逆推定を実施)



CADデータ



線源逆推定結果

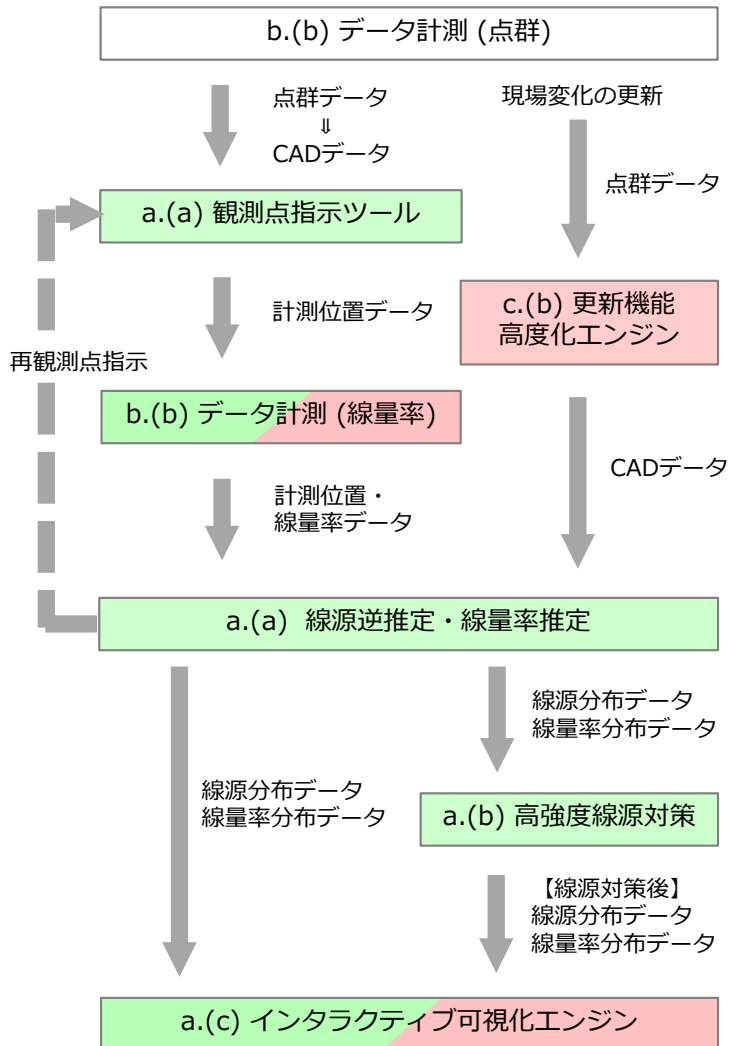
c.(a)1 まとめ

開発した線源・線量率推定システムをJMTR及び1Fにて検証を実施した。

- JMTRプールカナル循環系機器室の簡易解析モデルでの検証試験の実施
- 詳細モデル（サーフェスデータ）で逆推定解析結果と現場実測値の比較を実施し、直達線のみで得られた線量率分布（誤推定）の補正を確認（直達線、散乱線、透過線の考慮により実測値に近い結果を確認）
- 1Fにおける検証試験データを整備
- 逆推定から空間線量率分布の算出結果と実測値との比較等の検証試験を実施
- 1F2号機の1階全域のCADデータ（一部）及び線量率データ（限定的な範囲）を基に線源逆推定エンジンで動作検証を実施

「線源・線量率推定システム」の有効性評価フローを作成し、各項目における評価要素の抽出を実施。

線源・線量率推定システムの有効性評価フロー



■ : 試験場における評価 ■ : JMTRにおける評価

各項目における有効性評価項目

① 試験場における有効性評価

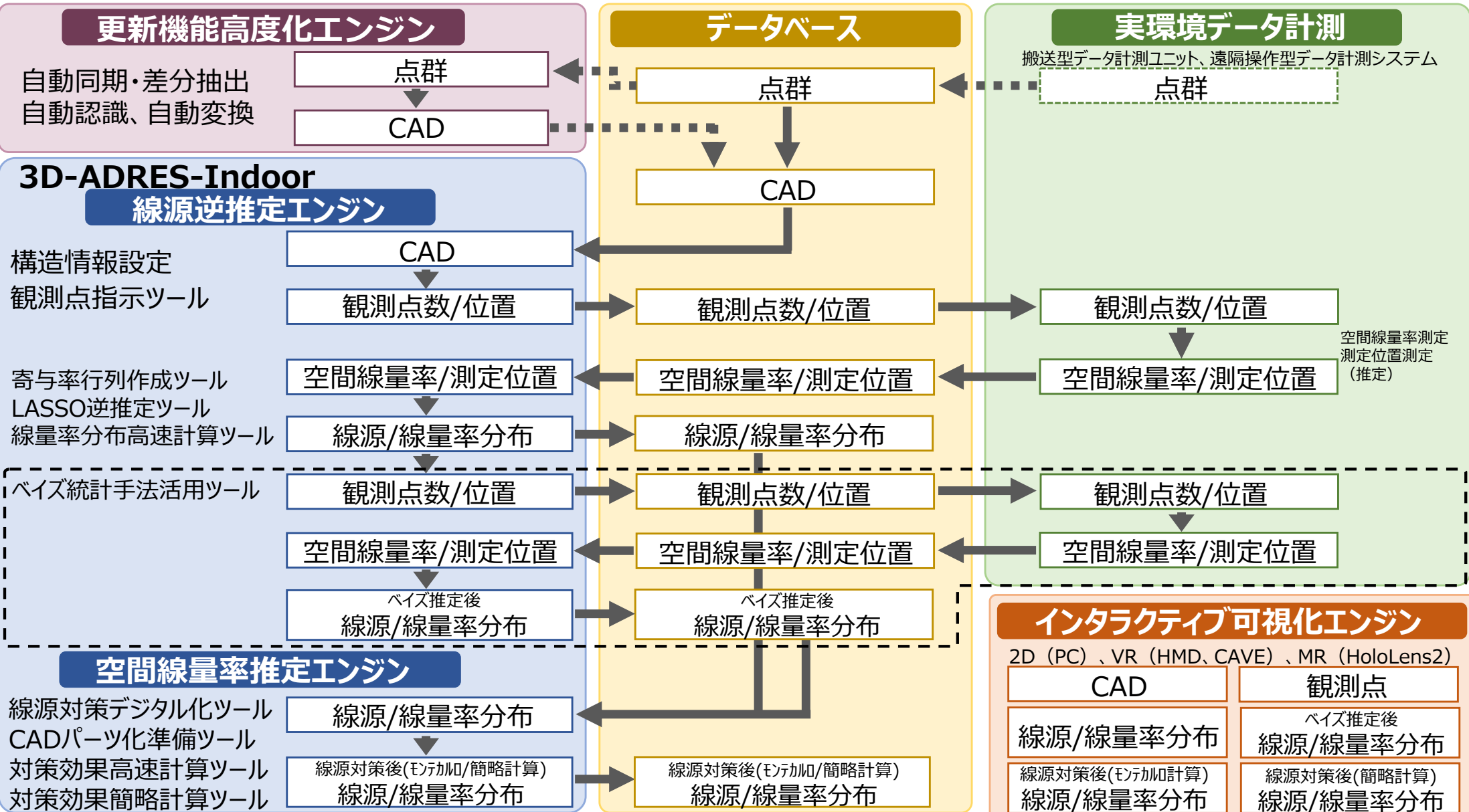
- a.(c)インタラクティブ可視化エンジン
 - ・ 試験場のAR環境構築による可視化の実現
- b.(b)データ計測ユニット
 - ・ 計測ユニットによる推定自己位置の精度(モーションキャプチャによる計測)
 - ・ 構造物の配置状況や種類による推定自己位置への影響
 - ・ 計測ユニットによる計測可能領域
- c.(b)更新機能高度化エンジン
 - ・ 構造物の増加、減少、移動(平行、回転)に対する自動同期・差分抽出、自動認識
 - ・ 差分情報から自動変換により生成されたCADデータの精度

② JMTRにおける有効性評価

- a.(a)線源逆推定エンジン
 - ・ 観測点指示ツールによる最適観測条件の導出 (観測位置制限機能の検証)
 - ・ 現場実測値と線源逆推定結果に基づく空間線量率の比較
 - ・ 再観測(ベイズ推定)による推定精度評価
- a.(b)空間線量率推定エンジン
 - ・ 線源対策後の現場実測値と線量率推定結果の比較
- a.(c)インタラクティブ可視化エンジン
 - ・ 線源・線量率推定結果及び各表示機能のAR可視化の実現
- b.(b)データ計測ユニット
 - ・ 線量率及び計測位置のデータを整合した状態で収集
 - ・ 観測点指示に基づく計測による計測位置データの精度

線源・線量率推定システムのデータフロー図

各エンジン・計測ユニットとデータベース間におけるデータの一連の流れを整理

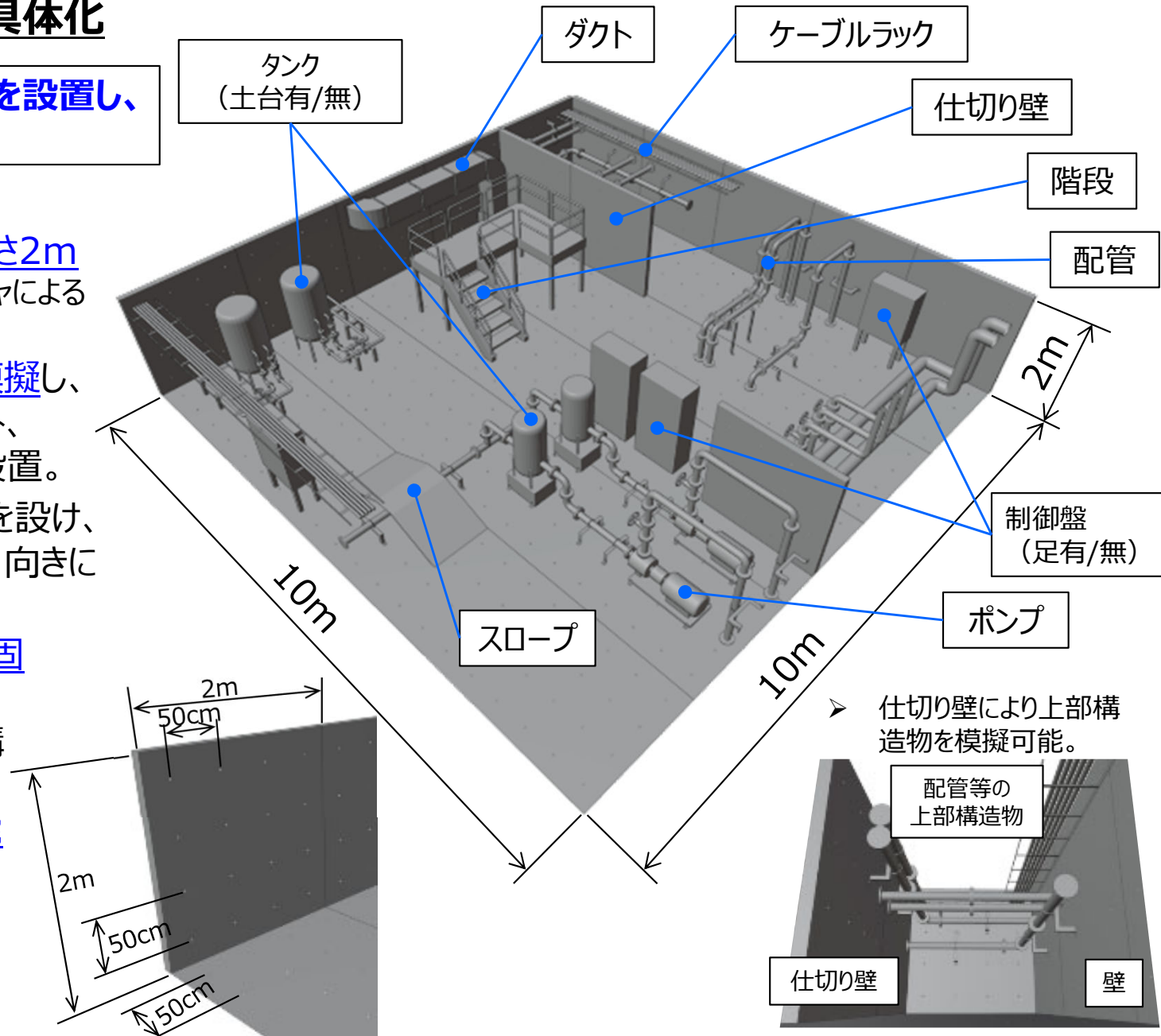


試験場の概念検討・設計仕様の具体化

NARRECに試験場（コールド空間）を設置し、現場の変化を想定した実験を実施。

● 全体仕様

- 寸法は幅10m×奥行き10m×高さ2m
(NARREC試験棟のモーションキャプチャによる計測可能範囲)
- 構造物は現場の代表的なものを模擬し、配管、階段、制御盤、タンク、ダクト、ケーブル、スロープ、仕切り壁等を設置。
- 床・壁それぞれに等間隔の取付穴を設け、構造物を取付穴上の任意の位置・向きに固定可能とした。
- 全ての構造物を床・壁の取付穴に固定可能な構造とし、取付穴間隔に合わせれば、後から必要に応じて構造物の追加が可能
- 構造物は容易に設置・除去を可能とするため、木材やポリ塩化ビニル等の軽量な材質により模擬し、表面を塗装（センサの反射や吸収の影響を考慮）



● 有効性評価手順・スケジュール

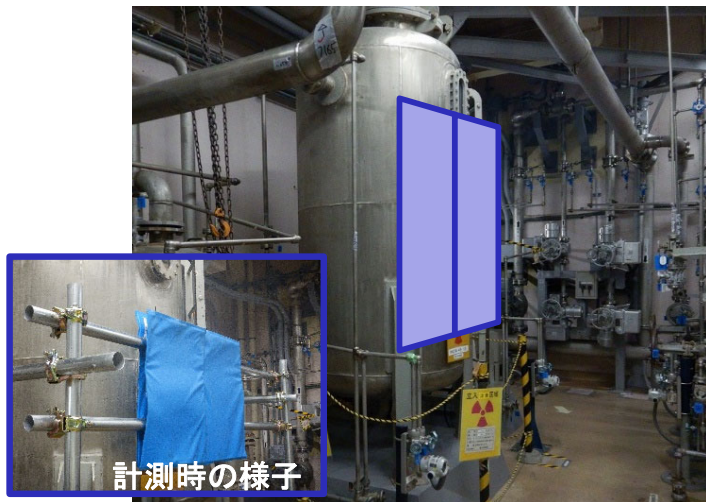
試験場・JMTRにおける有効性評価の実施手順・スケジュールを整理
 以下は実施手順の例を示す。

a.(b) 空間線量率推定エンジン

	評価項目	目標(判断基準)	確認方法
JMTRにおける評価	エンジンによる線量率推定精度	現場実測値に対し推定値が倍半分であること	線源対策後の現場実測値と線量率推定結果を比較する

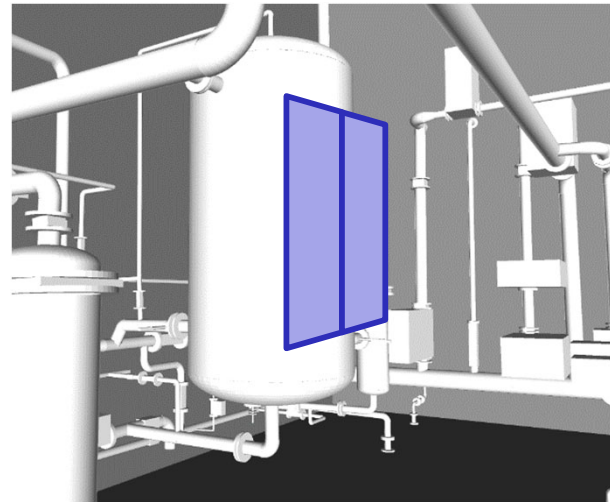
▶ 高強度線源への対策(除染、除去、移動、遮蔽)のうち、JMTRで可能な“遮蔽”を実施

JMTR現場において遮蔽物を設置



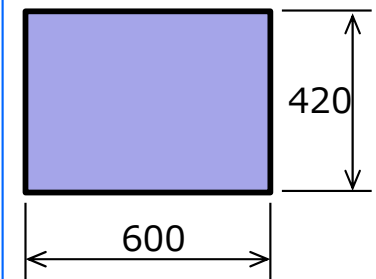
計測時の様子
 遮蔽物設置後の空間線量率を計測

線源対策用ツールにおいて遮蔽物を設置



線源対策後の空間線量率分布を計算

鉛遮蔽体の寸法



厚さ : 3.5 mm

鉛比重 : 11.36 g/cm³

$$42 \times 60 \times 0.35 \times 11.36 = 10019.52\text{g} \approx 10.0\text{kg}$$

線源対策後の「現場実測値」と「推定結果」を比較

● 有効性評価の結果 (1/4)

抽出した評価項目及び実施手順に基づき有効性評価を実施

	評価項目	結果	課題
a.(a) 線源逆推定 エンジン	・観測点指示ツールによる最適観測条件	・線源逆推定計算結果が良好であったため最適であると判断。	・初期条件の設定次第で観測点数が変動するため扱いには習熟が必要。
	・線量率推定精度	・東電二ーズの目標値(倍半分以内)の精度を確認。	・建屋構造モデルの作りに起因する誤推定が発生しているため対策が必要。 ・計算に係るパラメータ(計算条件等)の適切な選択方法や逆推定実行結果の見方にLASSOの知識や習熟が必要。
	・再観測(ベイズ推定)による推定精度	・再観測による推定精度の向上を仮想空間上で確認(観測指示点数を削減しても同程度の推定精度が得られる)。	・実環境での検証が必要。
a.(b) 空間線量率推 定エンジン	・線源対策前後での線量率推定精度	・東電二ーズの目標値(倍半分以内)の精度を確認。	・建造物の寸法や配置座標の精度が対策後の線量率の計算結果に影響。
	・作業員の被ばく線量評価	・従来ツールの煩雑な入力条件を克服するため、作業員の移動経路を自動生成する機能を開発し、当初の目標達成を確認。	・作業は通常、単独で実施しないことから複数人の自動推定機能を今後、作成する必要がある。

● 有効性評価の結果 (2/4)

抽出した評価項目及び実施手順に基づき有効性評価を実施

	評価項目	結果	課題
a.(c) インタラクティブ 可視化エンジン	・可視化機能の動作	・CAVE型VRにて可視化表示。 ・1F5号機(2号機同型)にてAR可視化を確認。	・初期設定等の事前準備に時間が必要。

● 有効性評価の結果 (2/3)

抽出した評価項目及び実施手順に基づき有効性評価を実施

	評価項目	結果	課題
b.(a) データベース	データ入出力機能の動作	<ul style="list-style-type: none"> データに適切なタグ付けがされ、問題なく入出力が可能であることを確認。 	<ul style="list-style-type: none"> 現状各エンジンとのデータ入出力がオフラインであるため、ネットワーク化が求められる。
b.(b) データ計測 ユニット	線量率及び計測位置データの収集	<ul style="list-style-type: none"> 線量率と計測位置（推定）が統合されて計測結果として出力可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 計測位置の座標変換等のデータ加工を計測で後に手動で行う必要がある。
	推定自己位置の精度	<ul style="list-style-type: none"> 遠隔操作型：平均すると0.2~0.3m程度、最大で1.3mの誤差がある。 搬送型：平均すると0.2~0.3m程度、最大で0.6mの誤差がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 観測点を参照する機能がないため、推定位置の精度の他に計測箇所と観測点の位置誤差が発生する。 最大誤差については計測環境が影響しており、1m四方程度の狭隘な空間では誤差が大きくなる傾向がある。
	計測可能領域	<ul style="list-style-type: none"> 遠隔操作型：JMTRでは観測点の約2割、試験場では観測点の約5割が計測可能。 搬送型：JMTRでは観測点の約2割、試験場では観測点の約9割が計測可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 観測点指示において計測ユニットでの計測を考慮した初期条件の設定が求められる。

● 有効性評価の結果 (3/3)

抽出した評価項目及び実施手順に基づき有効性評価を実施

	評価項目	結果	課題
c.(b) 更新機能高度化 エンジン	自動同期・差分抽出、 自動認識の機能の動作	・試験場にて変化前後の点群を取得し、処理した結果、的確に差分を抽出し、自動認識（1F教師データ）において適切なラベル（属性）付けがなされている。	・ラベル（属性）については現場管理の観点で、構造モデル製作過程において考慮することで、より細分化した管理が可能となる。
	自動変換されたモデルの 寸法精度	・自動変換並びに変化後の構造データへの差分反映が問題なく動作することを確認。 実物と変換後モデルの誤差は10mm以内であった。	・モデルが消失（除去）した場合、モデルの分割単位での反映となるため、構造モデル製作過程において、モデル分割の際に除去等を考慮した分割が求められる。

有効性評価まとめ

- ✓ 一連のデータフローに基づき各エンジンが動作し、線源の位置を目標精度内で推定可能であることを確認できた。
- ✓ 現場実装の観点よりシステムのユーザーインターフェース等においては、よりユーザーフレンドリとなるよう改良が必要である。また、データベースと各エンジンのネットワーク化が求められる。

c.(a)2 まとめ

開発した線源・線量率推定システムの検証を実施し、有効性及び課題を整理するとともに、環境データ更新機能の試作モデルを完成・評価した。また、本システムの1F環境における要求事項等を整理した。

- ・線源・線量率推定システムの有効性評価フローの作成、評価要素の抽出
- ・評価要素を踏まえ、概念検討、設計仕様の具体化、1F現場の代表的な構造物を模擬した試験場の設置
- ・線源・線量率推定システムについて、JMTR及び試験場における有効性評価の実施

● 目的

現場に変化が発生した際にb.で計測された実環境データをa.での線源逆推定計算で必要とする情報（メッシュデータ、CADデータ等）に自動的に変換するための研究開発を実施。これにより環境データの更新速度を実用に耐えうる基準まで向上させることを目指す。

● 反映先

現場に変化が発生した際の環境データの更新効率化に反映する。

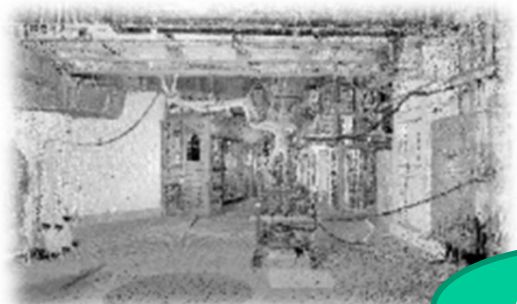
● スケジュール

再評価手法

現場の逐次変化を反映するために必要な環境データを評価（環境データの比較・再評価）するための**自動同期・差分抽出、自動認識**、計測データ変換効率化のための**自動変換**を行う手法の総称。

実施内容	R3年度									R4年度											
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
更新機能の高度化エンジンの開発	再評価手法の概念設計			再評価手法の開発			妥当性検証			高度化エンジンの試作モデル開発						評価試験			まとめ		
①再評価手法の概念設計 (p.146)	高度化エンジンの仕様検討																				
②再評価手法の開発 (p.148)	データの自動同期、自動認識、自動変換の開発																				
③妥当性検証 (p.152)										模擬データ・模擬環境による開発手法の評価											
④高度化エンジンの試作モデル開発(p.153)										開発手法の統合、高度化エンジンの試作											
⑤評価試験(p.154)																製作されたコールド試験場による試作モデルの動作検証					

c.(b)環境データの更新機能の高度化に関する研究開発（岩手県立大と連携）
更新機能の高度化エンジンの開発(1/12)



点群データ



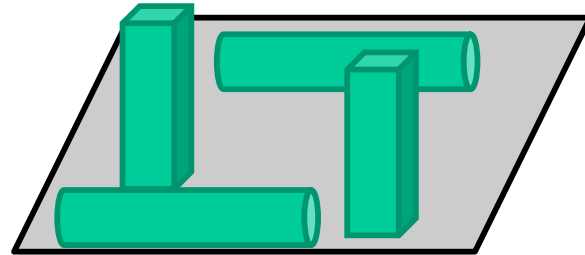
格子データ

AIを活用

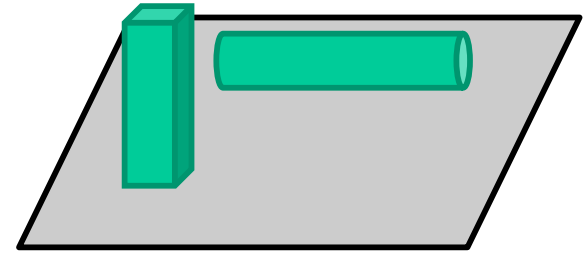


【問題点】

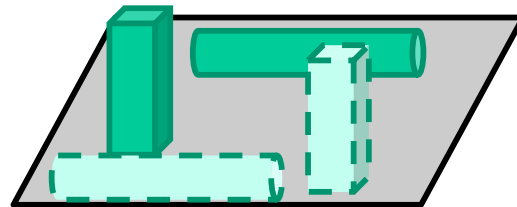
現在手動で実施⇒時間がかかる⇒線源・線量分布の更新に影響



変更前



変更後



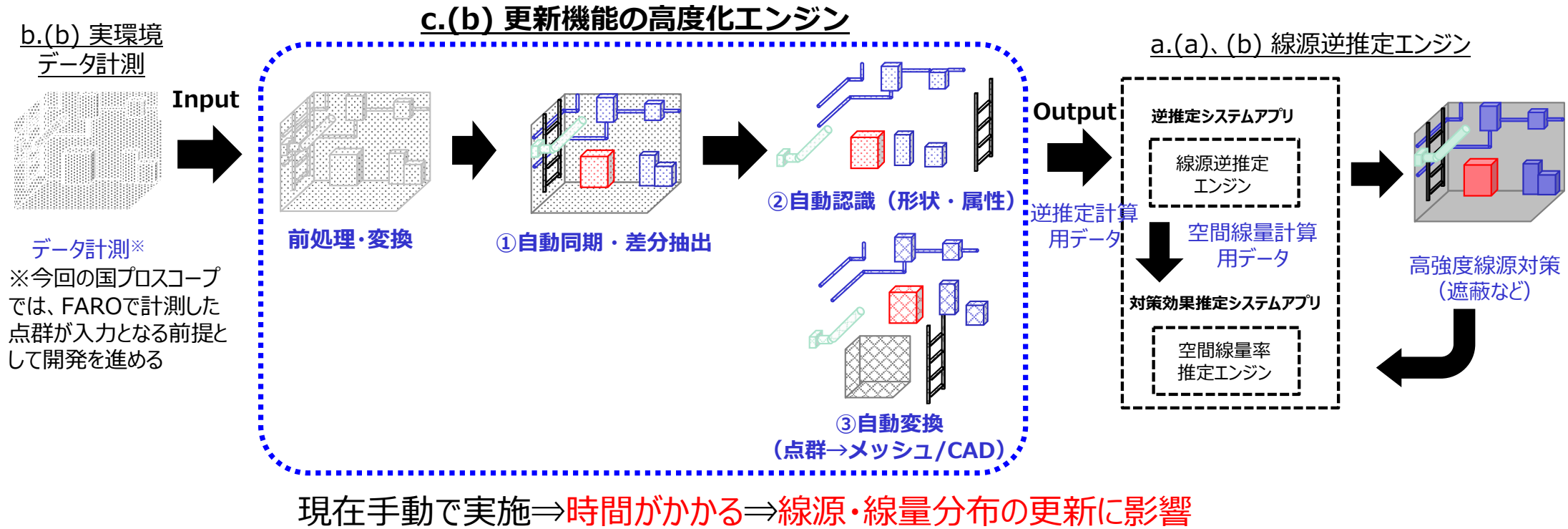
【解決方法】

差分を自動認識

AIを活用

更新機能の高度化エンジンの開発(2/12)

①再評価手法の概念設計

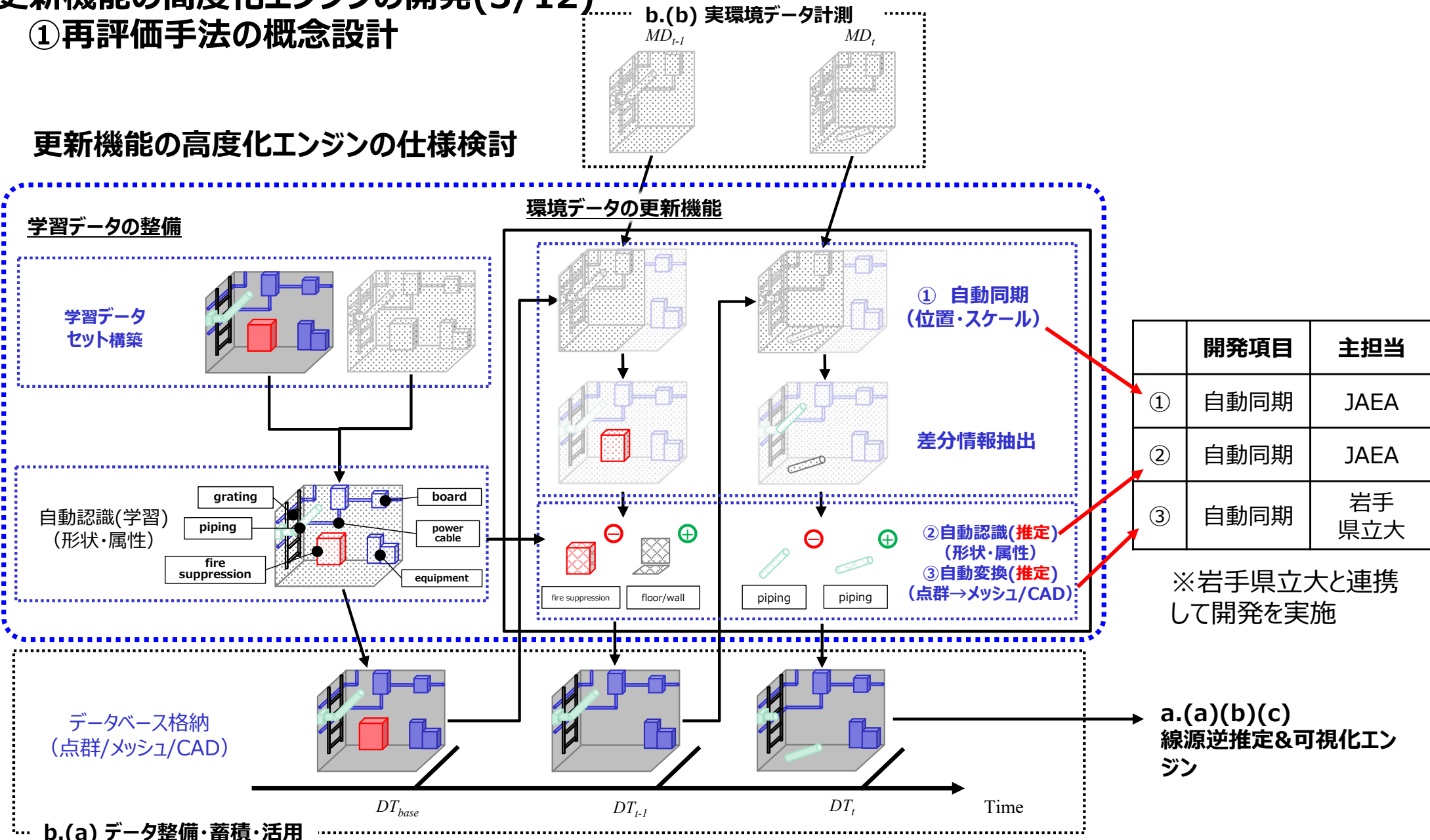


- ①自動同期・差分抽出 : 計測データ(点群)とデータベースに格納されている環境データ(点群/メッシュ/CAD)の**位置・スケールを同期**させ、逐次比較することで**差分情報を抽出**
- ②自動認識 : ①で得られた差分情報から**構造物を推定**することで、空間線量計算に必要な**属性情報(材質等)を付与**
- ③自動変換 : 計測データ(点群)を自動的にメッシュデータ・CADデータに変換することで、**環境データの更新を高速化**

更新機能の高度化エンジンの開発(3/12)

①再評価手法の概念設計

更新機能の高度化エンジンの仕様検討



更新機能の高度化エンジンの開発(4/12)

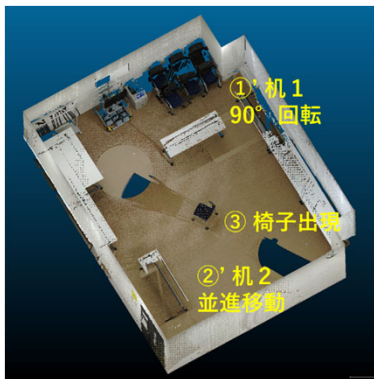
②再評価手法の開発：自動同期・自動認識・自動変換の開発(1/5)

1)自動同期・差分抽出

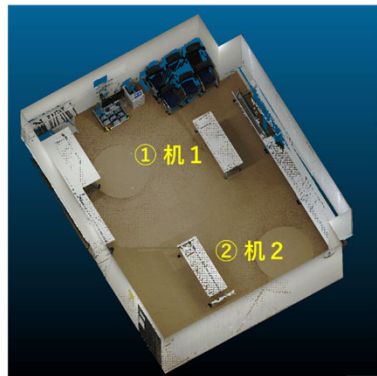
・計測により取得した実環境データ（点群）をデータベースに格納された既知のデータと同期する際、大部分は重複した情報となるため、**差分情報のみを抽出**して処理（自動認識、自動変換）を行い、データベースに追加する手法を開発。

・データ間の差分情報を抽出

3Dレーザースキャナにより、取得した模擬環境の点群データから点群間の対応点を計算し、一致しない点（差分情報）を抽出

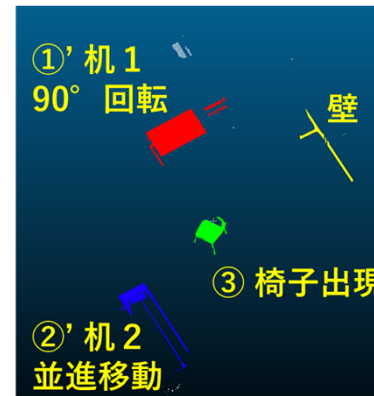


PointCloud1



PointCloud2

差分情報の抽出及び分割

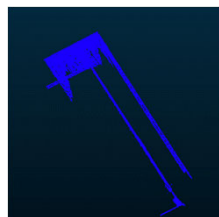


抽出された差分情報を要素ごとに分割（クラスタ化）

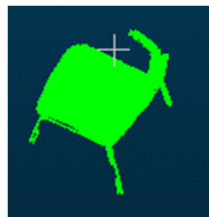
クラスタの判定



①'机1:移動(90°回転)



②'机2:移動(並進)



③椅子:出現

・2時刻間でのそれぞれのクラスタに対して類似度を求め、2時刻間における**物体の移動、出現または消失**かを判定できることを**確認**

・得られたデータを整備した**共通データ構造**のフォーマットで後工程（自動認識・自動変換）に入力

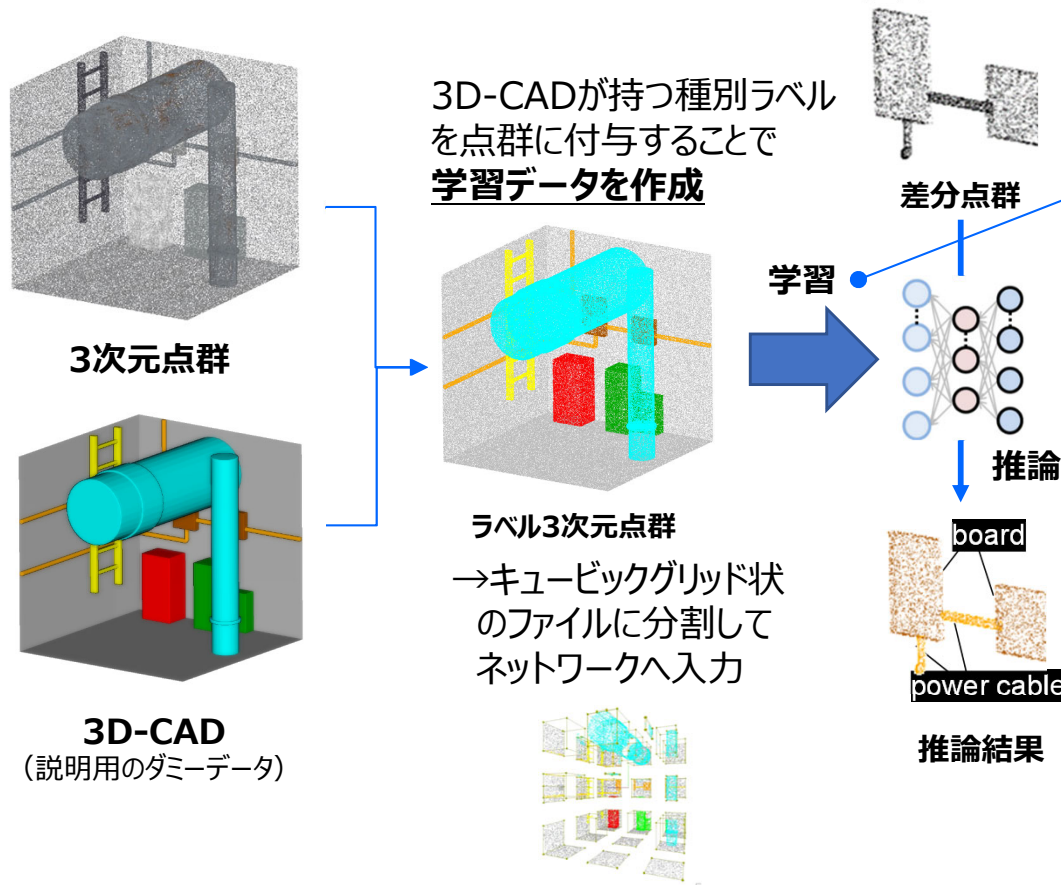
更新機能の高度化エンジンの開発(5/12)

②再評価手法の開発：自動同期・自動認識・自動変換の開発(2/5)

2)自動認識 (1/3)

前工程（自動同期・差分抽出）で得られた差分点群に対して、深層学習により構造物種別毎にわかれた形状領域を推定することで、**空間線量計算に必要な属性情報（材質等）を付与する**手法を開発。

- 原子力施設（1F、JMTR等）の計測データをもとにした学習データ作成
- Pointnet++¹⁾を用いた学習の適用及び学習済ネットワークの識別性能確認



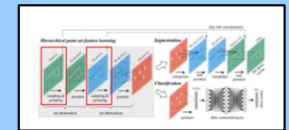
学習セッティング

※NARRECが保有するVRデータ用3D-CADデータ（1F2号機）及び作成の基となった点群データを用いて学習を行った結果

データ※
 点数：58,217,728点
 CAD種別：9クラス（Duct、Pipe、Equipment、Electronical、Pipebox、Power cable、Structure、Frame）

パラメータ
 エポック数：500 epoch
 バッチサイズ：14 batch
 最適化関数：Adam

モデル
 PointNet++
 入力サイズ：2048 features



学習の結果、81.77%の学習精度の達成を確認

評価指標：IoU (Intersection over Union)

→本手法では欠損がある差分点群に対応できないため、**部分的な学習データの作成が必要**

得られたデータ（推論した種別及び形状領域）を共通データ構造のフォーマットに追加し、後工程（自動変換）で利用

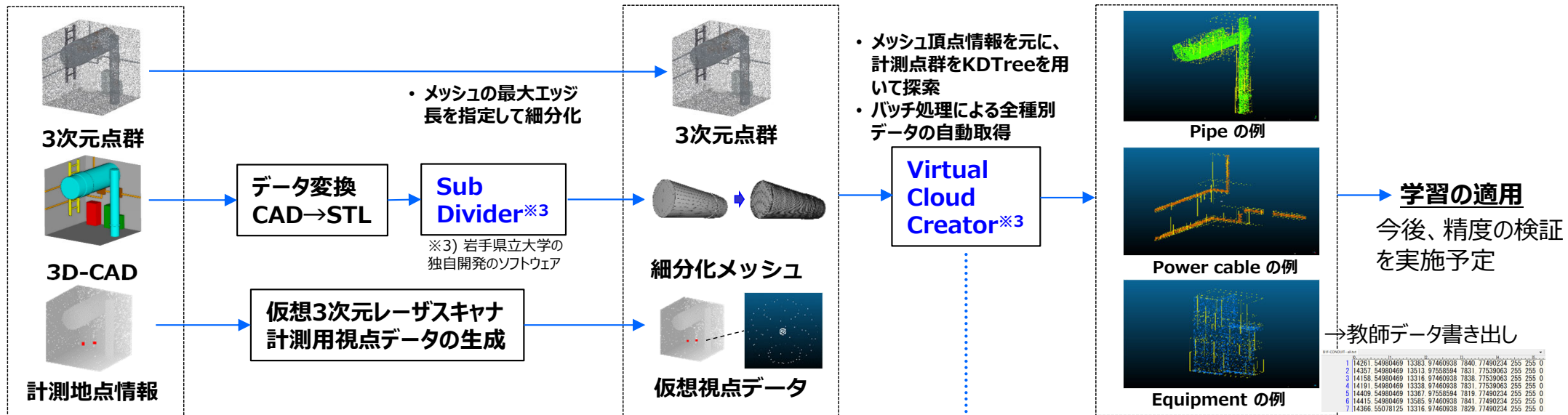
1) CR Qi, L Yi, H Su, LJ Guibas, "Pointnet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space," arXXiv preprint arXXiv:1706.02413, (2017).

更新機能の高度化エンジンの開発(6/12)

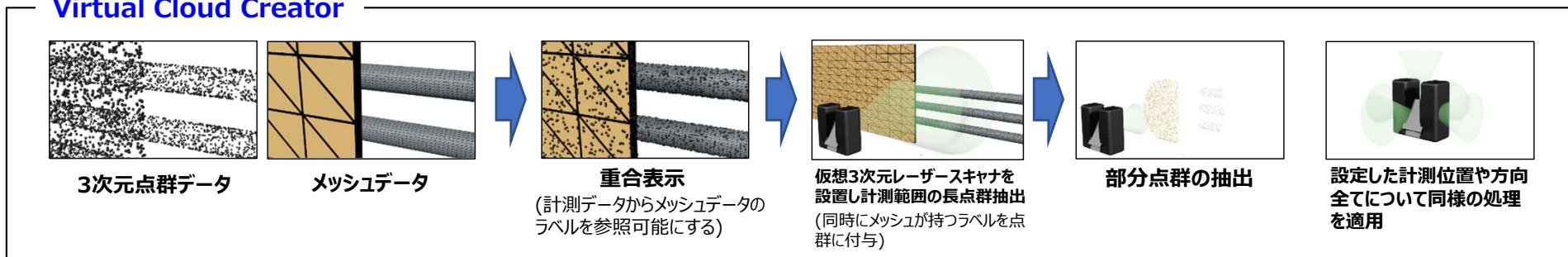
②再評価手法の開発：自動同期・自動認識・自動変換の開発(3/5)

2)自動認識 (2/3)

3次元レーザースキャナが計測するパターンを模擬し、設定した複数の計測地点（仮想視点）から部分点群データを作成して学習に適用することで、欠損した差分点群に対する推論精度を向上



Virtual Cloud Creator

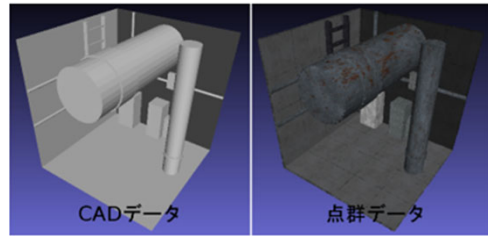
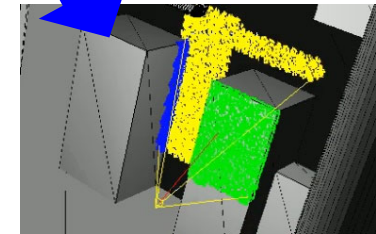
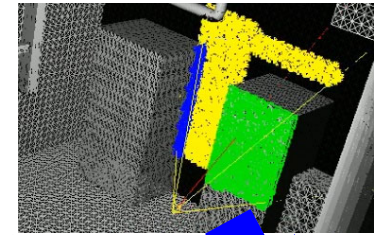


更新機能の高度化エンジンの開発(7/12)

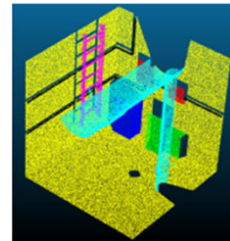
②再評価手法の開発：自動同期・自動認識・自動変換の開発(4/5)

2)自動認識 (3/3)

欠損した差分点群に対する推論精度を向上について、1F2号機を対象にした識別性能を確認 ⇒ 「認識精度」PIPEBOX^(※1)以外で90%以上のIoUを記録



入力



出力

計測点群、CAD、計測位置

Virtual Cloud Creator (VCC)

新規の教師用計測点群

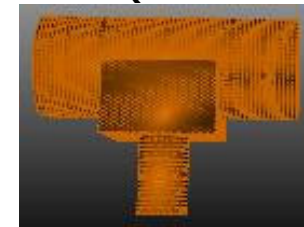
計測点群から新しい教師データを生成
↓
様々な状況の点群データを自動生成

Meshデータ (from CAD)

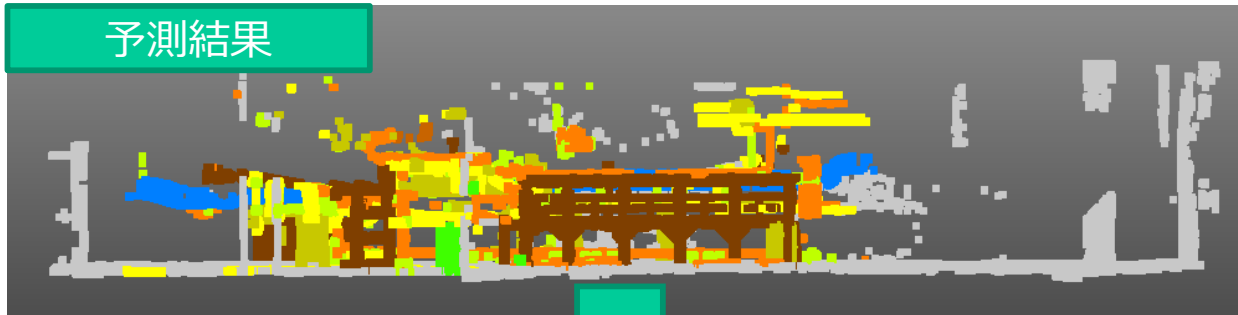
PointCloud (from FARO)

重ねて配置

(※1)PIPEBOX (パイプボックス)



他のモデルと比べて極端にモデル数が少ないため認識精度が低い



予測結果



正解データ

予測結果	
ラベル名	IoU
CONDUIT	0.938
DUCT	0.992
ELECTRICAL	0.973
EQUIPMENT	0.982
PIPE	0.991
PIPEBOX	0.249
STRUCTURE	0.986
SUPPORT	0.934
FRAME	0.994
[AVERAGE]	0.893

～計算環境～

[OS] Ubuntu 18.04.4 LTS

[GPU] Quadro RTX 8000(48GB)

[PointNet++/Framework] python 3.7, pytorch 1.6.0, cuda 10.1

[学習時間] 20時間21分23秒

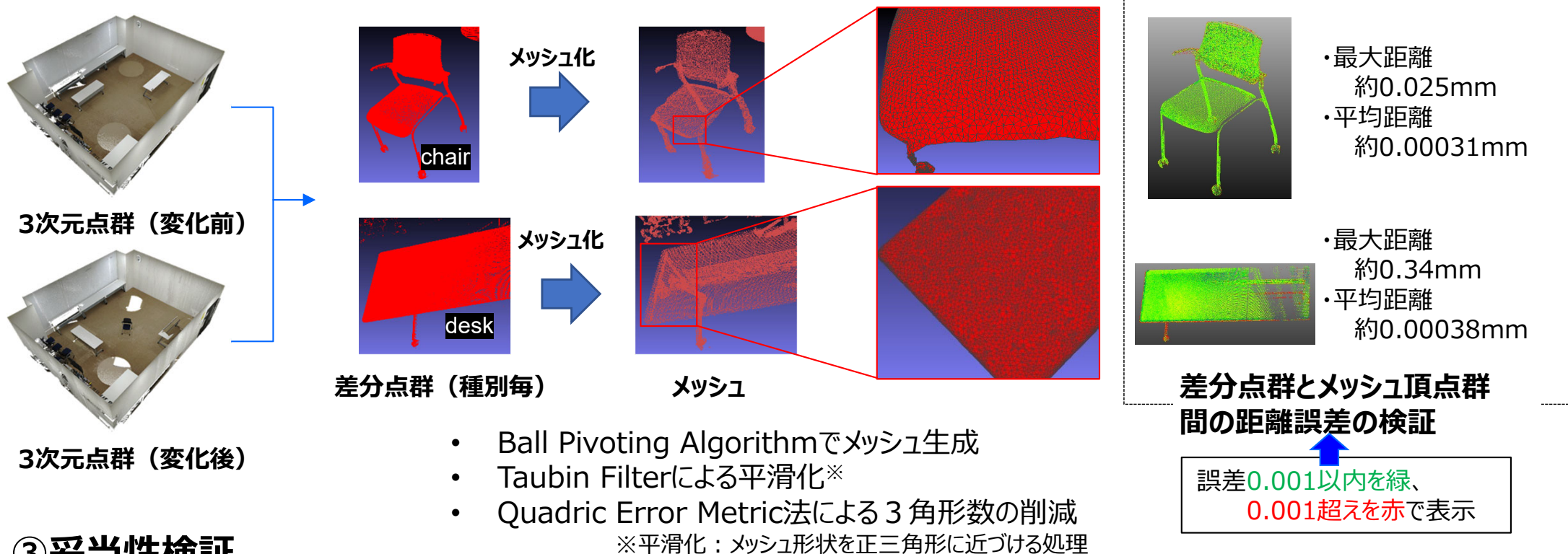
[認識時間] 23分11秒

更新機能の高度化エンジンの開発(8/12)

②再評価手法の開発：自動同期・自動認識・自動変換の開発(5/5)

3)自動変換

前工程（差分抽出・自動認識）で抽出した差分点群から、線源分布の逆推定計算や空間線量計算に必要な構造データ（メッシュデータ等）へ自動で変換することで、**環境データの更新を高速化する手法を開発**



③妥当性検証

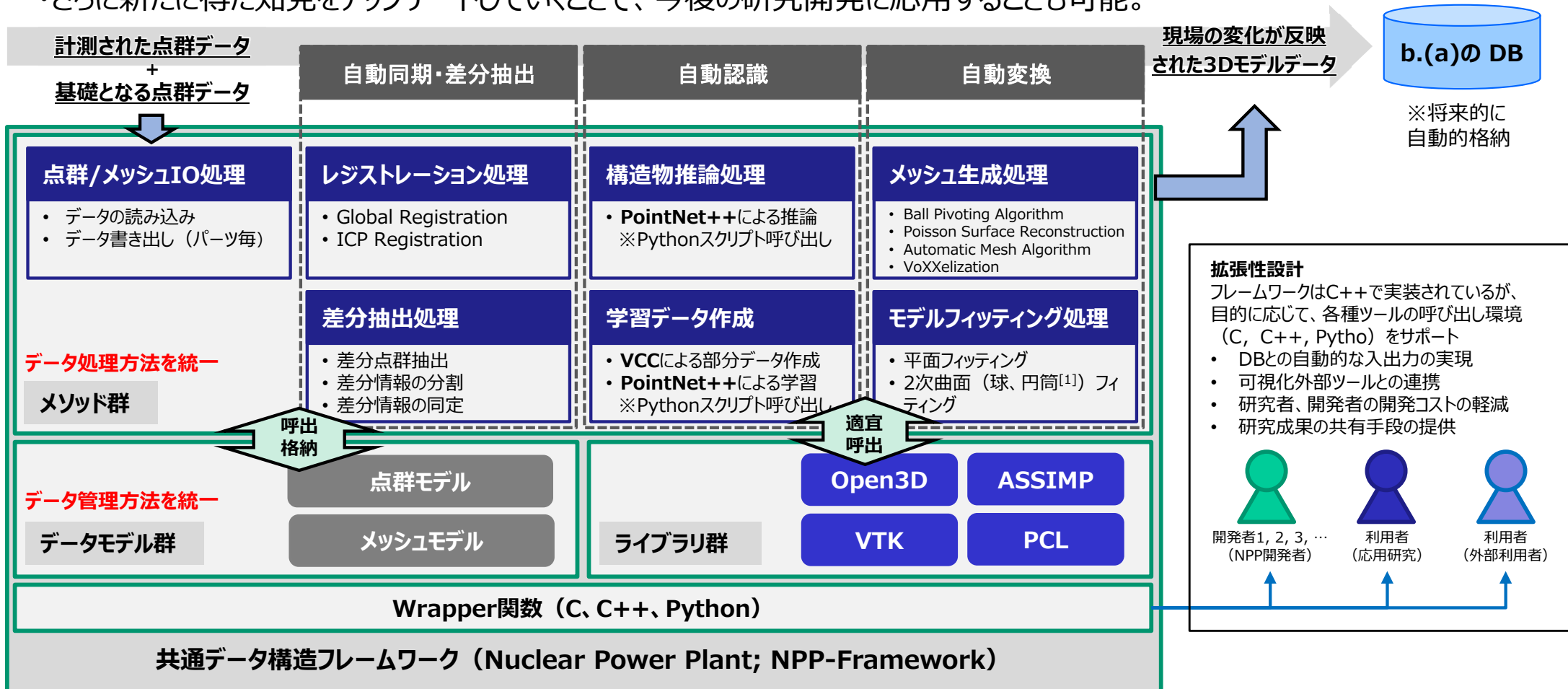
差分点群から頂点座標のズレが少ないメッシュ化が可能であることを確認（誤差平均0.001mm以下）

⇒しかし、点群密度が不均一な場合に欠落箇所が生じる問題があるため、点群密度をあらかじめ均一化する手法が必要

更新機能の高度化エンジンの開発(9/12)

④ 高度化エンジンの試作モデル開発：更新機能の試作モデル設計と各機能の実装

- ・差分点群、構造データ（メッシュデータ等）を共通なデータ構造に保管することで、**環境データを認識・変換**する試作モデルを開発。
- ・共通データ構造フレームワークを構築することで、**統一的な使用方法を提供し、情報共有を容易**にすることを実現。
- ・さらに新たに得た知見をアップデートしていくことで、今後の研究開発に応用することも可能。

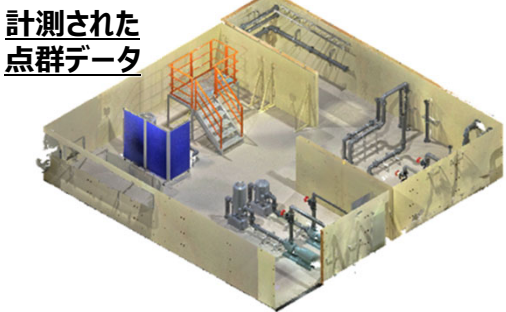
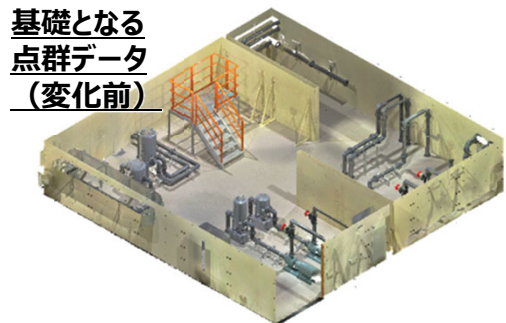


*VCC : Virtual Cloud Creator (岩手県立大学独自開発ツール), *Open3D : A Modern Library for 3D Data Processing, *VTK : Visualization Tool Kit, *ASSIMP : Open Asset Import Library, *PCL : Point Cloud Library
 [1] Torr, P. H. S., and A. Zisserman. "MLESAC: A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry." Computer Vision and Image Understanding. Volume 78, Issue 1, April 2000, pp. 138-156.

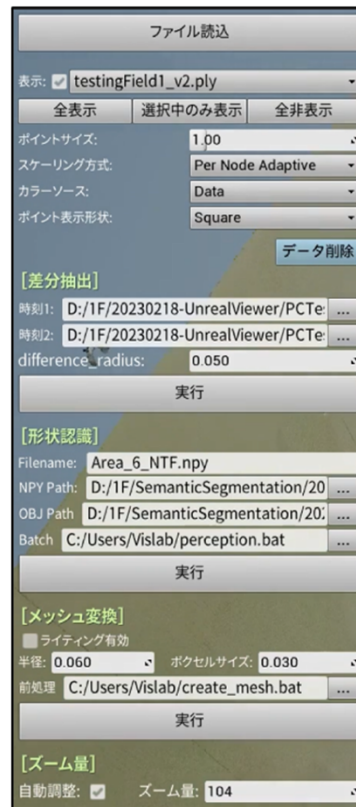
更新機能の高度化エンジンの開発(10/12)

⑤ 評価試験(1/3) : 製作されたコールド試験場による試作モデルの動作検証

- 「時系列データの差分情報抽出」、「原子炉建屋内で取得された点群データを対象にした深層学習を用いた構造物形状の自動認識」及び「3Dモデルへの自動変換および結果の可視化を対話的に行える試作モデル」を Unreal Engine※ 上に開発した。



読み込み



試験場で計測した点群データ

※ Unreal Engine(アンリアルエンジン)は主にゲームを開発するためのゲームエンジンである。提供している会社は「Epic Games」、フォートナイトなどのゲームを開発している。使用料金は無料で、ゲーム以外にもVR、建築、映画、テレビ制作などの様々な用途において高品質な3D仮想世界が制作可能である。 <https://www.unrealengine.com/ja/>

更新機能の高度化エンジンの開発(11/12)

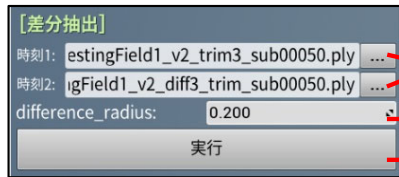
⑤ 評価試験(2/3) : 試験場で計測した点群データを用いた動作検証-1

- ・有効性評価に用いた試験場の点群データ及び3Dモデルデータを用いて試作モデルの動作を検証。
- ・差分計算によって追加・除去された点群を抽出、各差分点群に対して属性ラベルを推定できることを確認。

差分抽出機能

[操作UI]

処理時間 : 215分

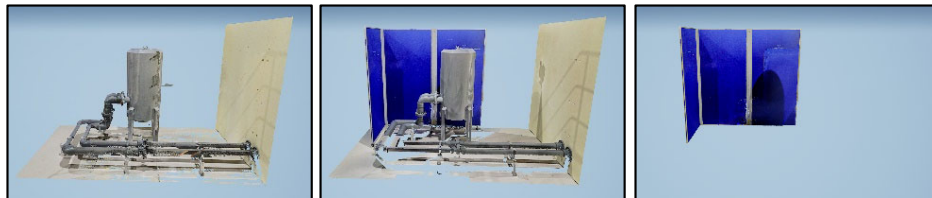


時刻1、時刻2の点群データを指定

誤差のパラメータ指定

指定したデータとパラメータで差分抽出実行
(実行後、自動的に差分抽出結果を表示)

● 追加オブジェクト抽出の例



時刻1の点群データ

時刻2の点群データ

差分抽出結果

● 除去オブジェクト抽出の例



時刻1の点群データ

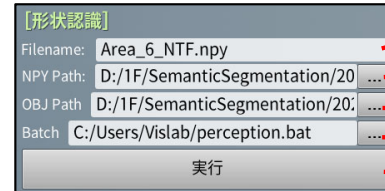
時刻2の点群データ

差分抽出結果

自動認識機能

[操作UI]

処理時間 : 50秒



PointNet++ 認識用変換ファイル名 (.npy)

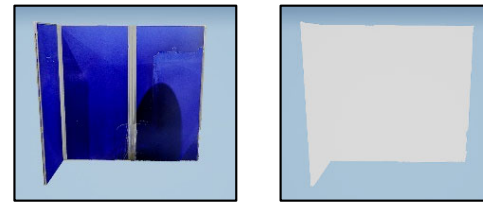
認識結果ファイル出力先の指定 (.npy)

認識結果ファイル出力先の指定 (.obj)

PointNet++による形状認識のバッチファイル指定

選択したデータに対して形状認識を実行
(実行後、自動的に認識結果を表示)

● 追加オブジェクトに対する属性ラベル付与の例



差分点群データ

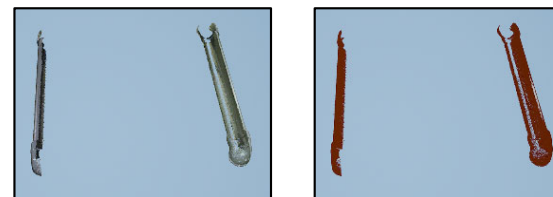
形状認識結果

表示: points_added.pcd

属性ラベル : OTHER

として新規に点群を追加

● 除去オブジェクトに対する属性ラベル付与の例



差分点群データ

形状認識結果

表示: points_erased.pcd

属性ラベル : PIPE

として新規に点群を追加

更新機能の高度化エンジンの開発(12/12)

⑤ 評価試験(3/3) : 試験場で計測した点群データを用いた動作検証-2

- 属性ラベルを付与した差分点群に対して3Dモデル化を行い、予め読み込まれた3Dモデルデータを更新できることを確認 (新規3Dモデル追加、除去オブジェクトの周辺3Dモデルを読み込対象から除外)

現場の変化が反映された3Dモデルデータ

自動変換機能

[操作UI]

[メッシュ変換]

ライティング有効

半径: 0.060 ボクセルサイズ: 0.030

前処理: C:/Users/Vislab/create_mesh.bat

実行

処理時間 : 47秒

- メッシュ化パラメータ指定
- 前処理実行のバッチファイル指定
- 選択したデータに対して自動変換を実行 (実行後、変換結果を表示)

● 追加オブジェクトに対する3Dモデル変換の例

→

差分点群データ

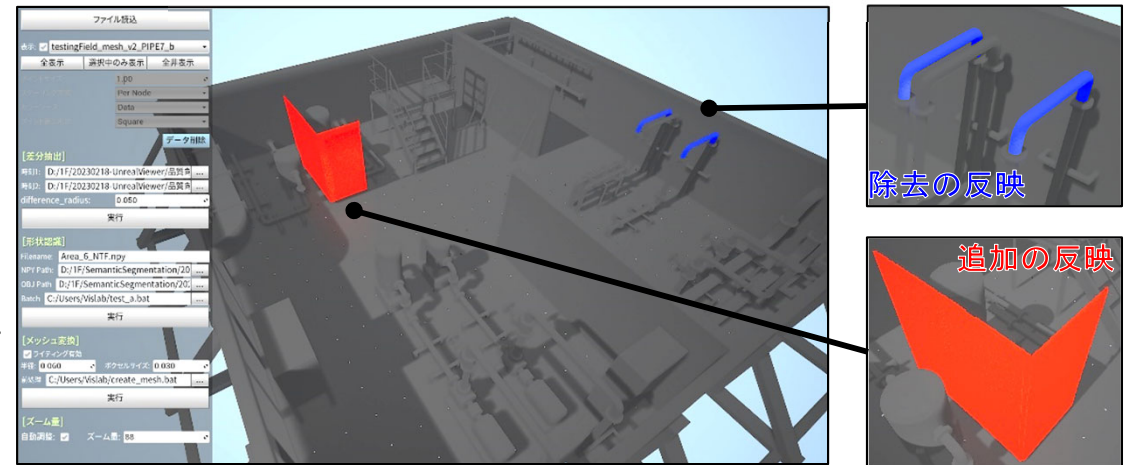
自動変換結果

● 除去オブジェクトの周辺モデルの探索

...

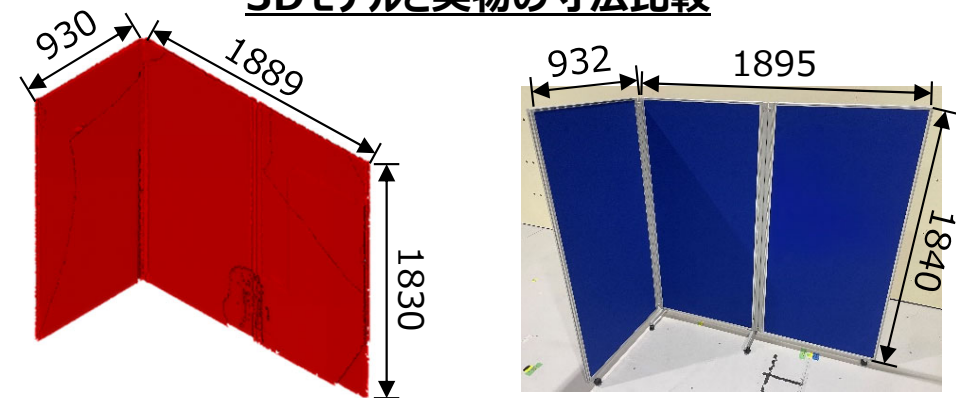
差分点群データ

除去対象の探索結果



課題 : 更新できるパーツの最小単位が3Dモデルの分割割合に依存

3Dモデルと実物の寸法比較



実物と変換後モデルの誤差は10mm以内

c.(b) まとめ

開発した線源・線量率推定システムの検証を実施し、有効性及び課題を整理するとともに、環境データ更新機能の試作モデルを完成・評価した。また、本システムの1F環境における要求事項等を整理した。

- 自動同期、差分抽出、自動認識及び自動変換機能を試験場にて現場変化を想定した有効性評価を実施し、点群データ及び3Dモデルデータを用いた試作モデル動作を検証。
- 差分計算による追加・除去された点群の抽出、各差分点群に対する属性ラベルの推定が可能であることを確認。

● 目的

本プロジェクトで開発するシステムを1F現場適用性のある有効なシステムにするためには、1Fにおける他システムとの接続性や拡張性の検討・整理が必要である。検討材料として、既存システムの情報だけでなく、海外の原子力廃止措置事業で先行して運用されているデジタルシステムの情報も取り入れることで、将来的なシステムを見越した有用なシステムの検討・整理が可能となる。

本件では、海外の先行事例及び1Fの他システム等の調査を行い、本プロジェクトで開発する「線源・線量率推定システム」と1Fの他システム等との接続性や拡張性について必要となる機能、構造等の要求事項の検討、整理を行った。

● 反映先

本プロジェクトで開発する「線源・線量率推定システム」を1Fの他システムと連携させるための要求事項に反映した。

● スケジュール

実施内容	2021(令和3)年度	2022(令和4)年度
c.(c) 1Fにおける他システムとの接続性・拡張性の基礎検討		
①1F他システム及び海外先行事例調査・分析(p.159)	1F他システム・海外先行事例の調査・分析 [進捗バー] 10月 まとめ [進捗バー] 12月	
②接続性や拡張性に関する要求事項の整理・課題抽出(p.163)		接続性や拡張性に関する要求事項の整理・課題抽出 [進捗バー] 10月 まとめ [進捗バー] 12月

① 1F他システム及び海外先行事例調査・分析(1/4)

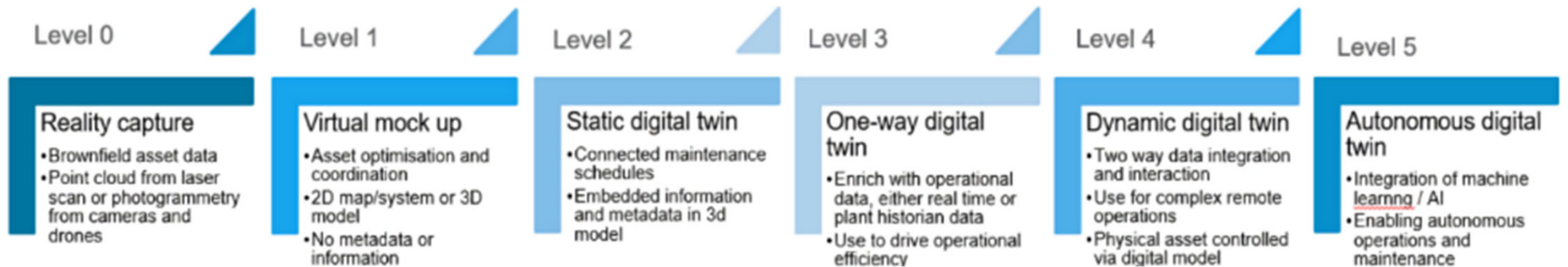
1. 国際的な原子力産業における3Dデジタル技術の導入について

原子力産業は、事故のリスクをALARP (As Low As Reasonably Practicable:合理的に実行可能な限り低く) まで低減するという、信頼できるコンセプトの上に成り立っている。3Dデジタル技術のような新しい技術導入には、ALARPの原則に従っていること証明し、実証する必要がある。これは**原子力業界が新技術の導入においてハードルが高いことを示しており、他業界に比べ遅れている**と言える。

2. 先行事例において導入している技術

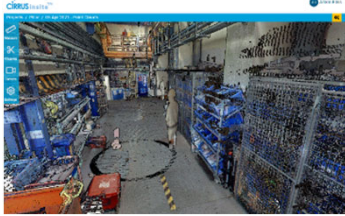


先行事例では、**デジタルツイン (バーチャルな領域に物理的な機能を再現) 技術**を導入している。デジタルツインは施設のレーザースキャンによる点群という基本的なものから、複雑な3Dモデル、最終的にはライブセンサデータ、建物情報、その他データソースをモデル内に可視化した完全なデジタルレプリカまで、**様々な形態と成熟度を持ち得る**。

下図はデジタルツインの成熟度レベルを示しており、各レベルに属するデータの種類を説明している。一般的な原子力業界で運用中のサイト、特に**廃炉段階に入っているか間もなく入る古いサイトでは、デジタルインフラのほとんどがレベル0と1、たまにレベル2が使われることがある**。



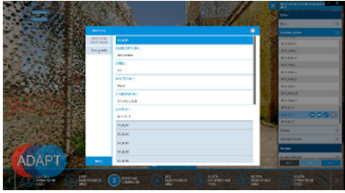
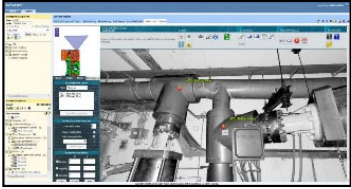
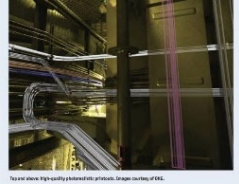
① 1F他システム及び海外先行事例調査・分析(2/4)

3. ケーススタディ(1/2)

No.	成熟度	対象施設	概要	導入・提供された概念・技術	利益
1	0	イギリス セラフィールド全体 	1950年代に建設された複数の施設の2次元記録が古く、実際のプラント構成を正確に表現できていない。 新しいプロジェクトのために正確な情報を把握する必要があるため、最小の労力で最大の効果が得られるデジタル改善を実施。	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>デジタルツイン情報管理基準の策定</u> ● レガシー資産把握のためのハードウェア導入(レーザースキャン、SLAMスキャナ、360°映像装置等) ● <u>アプリやダッシュボードを活用したライブ進捗報告</u> ● 360°映像と点群の<u>後処理による機密データ除去</u> ● <u>クラウドに測量データを保管</u> ● 調査データ共有のためのクラウドとリンクしたPDFマップの開発 	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>クラウドベースで場所問わず現場データにアクセス</u> ● サプライパートナーのための現場へのバーチャルアクセス ● 効率的な在宅勤務やハイブリッド勤務を可能に ● <u>設備の正確な構成ベースライン</u> ● <u>情報共有によるタスクオーダーの価格設定が正確に</u> ● <u>クラウドのダウンロード機能により施設データの共有、展開</u>
2	0	イギリス ダンジネス原子力発電所 	放射性物質減衰待ちが必要な大型ボイラーセルの解体について、安全性確保のため状態調査が必要。 注目すべき箇所のメモ・写真撮影への時間コスト、後からの追加調査コスト、目視調査のために現場へ人を派遣したときのコストと安全性の考慮から、3Dモデルを利用。	<ul style="list-style-type: none"> ● 現場でのレーザースキャン ● <u>点群出力からのビジュアライゼーションの作成(高品質画像、フライスルー、ナビゲーション可能なモデル)</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ● サプライパートナーに対する状況調査へのバーチャルアクセスが可能に ● 設備の正確なベースライン ● 屋根やパイプ等、<u>通路や足場が無いとアクセスできない箇所含め3Dモデル上で正確な計測が可能に</u>
3	1	カナダ 原子力研究所(CNL) NRX 	カナダ原子力研究所(CNL)所有地内のレガシー資産の廃止するための戦略として、効果的なプロジェクト遂行とステークホルダーとの連携を可能にするため、資産のデジタルツインとVRプラットフォームの開発を実施。	<ul style="list-style-type: none"> ● CNL自身で取得した点群データのリアリティキャプチャ処理と登録(追加スキャン指示含む) ● <u>スキャンからBIMへの変換による施設全体の3Dモデル作成</u> ● <u>自動品質チェック含む3Dモデルの完全なQAプロセス</u> ● <u>点群、3Dモデル、360°写真を可視化するためのUnrealアプリの開発(VR機能を含む)</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 設備の正確なベースライン ● クラウドベースで場所問わず現場データにアクセス ● <u>シミュレーション計画のためのローカルでホストされたデジタルツインソリューション</u> ● 全てのデジタルツインコンテンツを含むVRアプリ

① 1F他システム及び海外先行事例調査・分析(3/4)

3. ケーススタディ(2/2)

No.	成熟度	対象施設	概要	導入・提供された概念・技術	利益
4	2	イギリス セラフィールド RAHF 	廃炉や解体作業に備え資産を把握するため、建物内で利用可能なバラ物の目録を含むデジタルツインの開発	<ul style="list-style-type: none"> ● レーザースキャンと360°写真を含むリアリティキャプチャ調査 ● <u>スキャンデータのBIM変換、施設のLOD(詳細度レベル)200モデルの作成</u> ● <u>資産データベースの開発</u> ● Atkins ICONプラットフォームを使用した没入型(VR)アプリの導入 	<ul style="list-style-type: none"> ● 設備の正確なベースライン ● <u>統合されたデータへのユーザーフレンドリーなアクセス</u> ● <u>ISO19650の原則との整合性</u> ● サプライを含め効果的にプロジェクトを遂行するための最新情報の取得
5	2	ハンガリー パックス原子力発電所 	統合されたプラント情報への迅速かつ容易なアクセスを実現する。全ての情報をWebポータルを利用して素早くナビゲートできるシステムを導入	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>既存情報(レーザースキャン、データベース、2D図面、3Dモデル、画等)をまとめて管理可能で追加二重があっても拡張可能なシステム</u> ● 情報集約後、データの一貫性や完全性のチェック、レポートの出力が可能なシステム ● <u>Webブラウジングスキル程度でプラント情報へアクセス</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 迅速で効率的なエンジニアリングと設計、プラント情報への効果的で容易なアクセスが可能に ● <u>情報管理システムに約50万のタグ付けされたアイテムのデータが何千ものドキュメント(12万以上のレーザースキャン含む)と相互にリンク</u>
6	1	スウェーデン OKG社オスカーシュハムン原子力発電所 	近代化プログラムとして、格納容器間の電気ケーブルの交換及び貫通部のアセンブリ。ケーブル長の公差数センチ以内という非常に高い品質・精度の要求、貫通部36箇所・ケーブル1800本(総延長3万m)、2000アイテムへの接続と複雑なオペレーションが要求	<ul style="list-style-type: none"> ● 高解像度の3Dレーザースキャン ● AVEVA E3D Designを使用したケーブル・コネクタの高精度での設計 ● <u>3Dモデルから直接製図化</u> ● <u>格納容器内に設置した臨時無線ネットワークとタブレット端末を利用した設置作業</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 従来の設計だとケーブルや電気部品の設置に120~150日掛かっていた作業が、<u>新技術と過去のプロジェクトで得たナレッジを組み合わせることで58日に短縮</u>

先行事例では実際の建屋の各種データを統合的にバーチャル環境で管理提供する仕組みを構築している。本プロジェクトにおいても**線源・線量率推定に現場の各種データが必要**なこと、1F他システム等の接続性や拡張性を考慮すると**このような仕組みを参考にし、取り込むことで1F現場適用性のある有効なシステムとなる**ものとする。

① 1F他システム及び海外先行事例調査・分析(4/4)

4. 分析・提言

a) 情報マネジメント

情報マネジメントにおいて業界のベストプラクティスであるBIMという概念及びISO19650の採用は、新たなアプローチや基準を開発するよりも費用対効果が高いと考えられる。

b) データ収集

データ収集戦略は資産の規模や重要性に応じて拡張可能であるべきである。例えば優先度の低い資産にはビデオ調査、高い資産には完全なレーザースキャンによる点群データ等。また、使用目的に応じて適切なソフトウェアを選択することも重要である。設計には設計に特化したソフトウェアを、モデル連携にはモデル連携に特化したソフトウェアを使用すべきである。

c) データマネジメント

データマネジメントでは共通データ環境（CDE）の採用が重要である。CDEはプロジェクトに関する全ての技術的な情報（モデル・非モデル情報、ドキュメント）を単一のバージョンで提供するものである。CDEの中心となるのはプロジェクトやアセットの3D統合モデルであり、他のデータセットと統合することでより大きな価値を引き出すことができる。

d) 外部との連携

ソフトウェアの統合に関しては、異なるソフトウェア製品間ではAPI連携が最も一般的な方法である。また、データはプラットフォームに依存しないことが推奨される。

e) セキュリティ

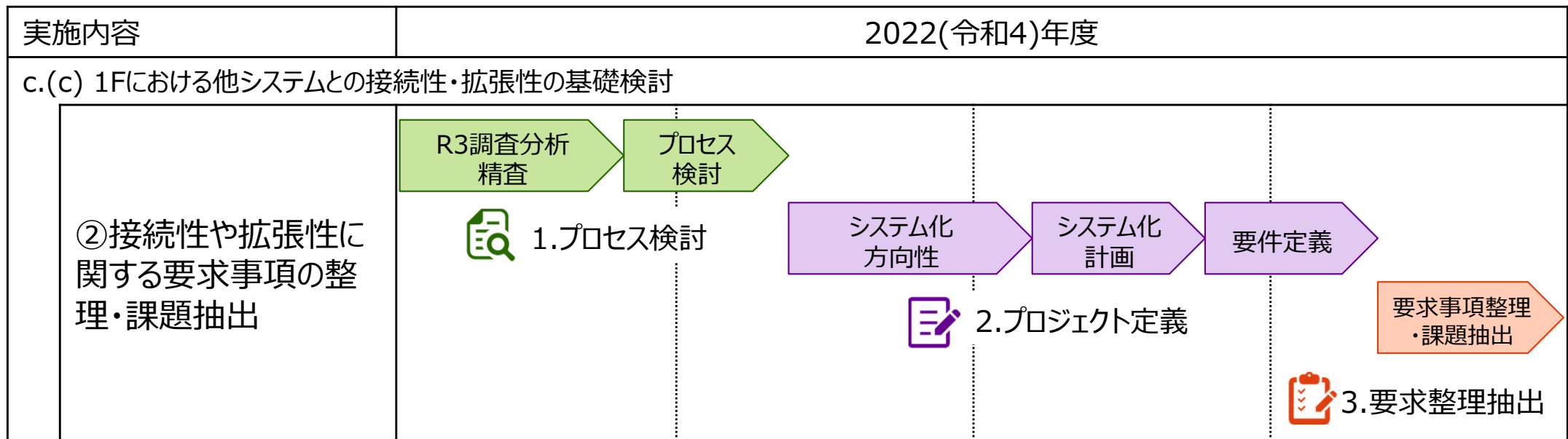
セキュリティは常にサイトの特定要件に合わせて調整が必要である。クラウドベースのシステムやネットワークの増加に伴い、これらを利用する際のセキュリティリスクの脅威は常に存在する。

②接続性や拡張性に関する要求事項の整理・課題抽出(1/5)

「接続性や拡張性に関する要求事項の整理・課題抽出」では、[2021\(令和3\)年度に実施した「1F他システム及び海外先行事例調査・分析」](#)を基に、[現場適用性のあるデジタルシステムの構造、特に接続性や拡張性に関する要求事項を整理し課題の抽出を行った。](#)

要求事項の整理・課題の抽出を行うため、「**1.全体をプロセス検討**」、「**2.プロジェクト定義**」及び「**3.要求整理抽出**」の3つのフェーズに整理した(下表)。本プロジェクトで開発する概念実証段階のシステムを現場適用性のあるシステムへと昇華するため、[超上流プロセス](#)※に沿って必要なシステムの要素・定義を具体化・詳細化した。この結果を基に、他システムとの接続性・拡張性に係る要求事項の整理・課題の抽出を実施した。

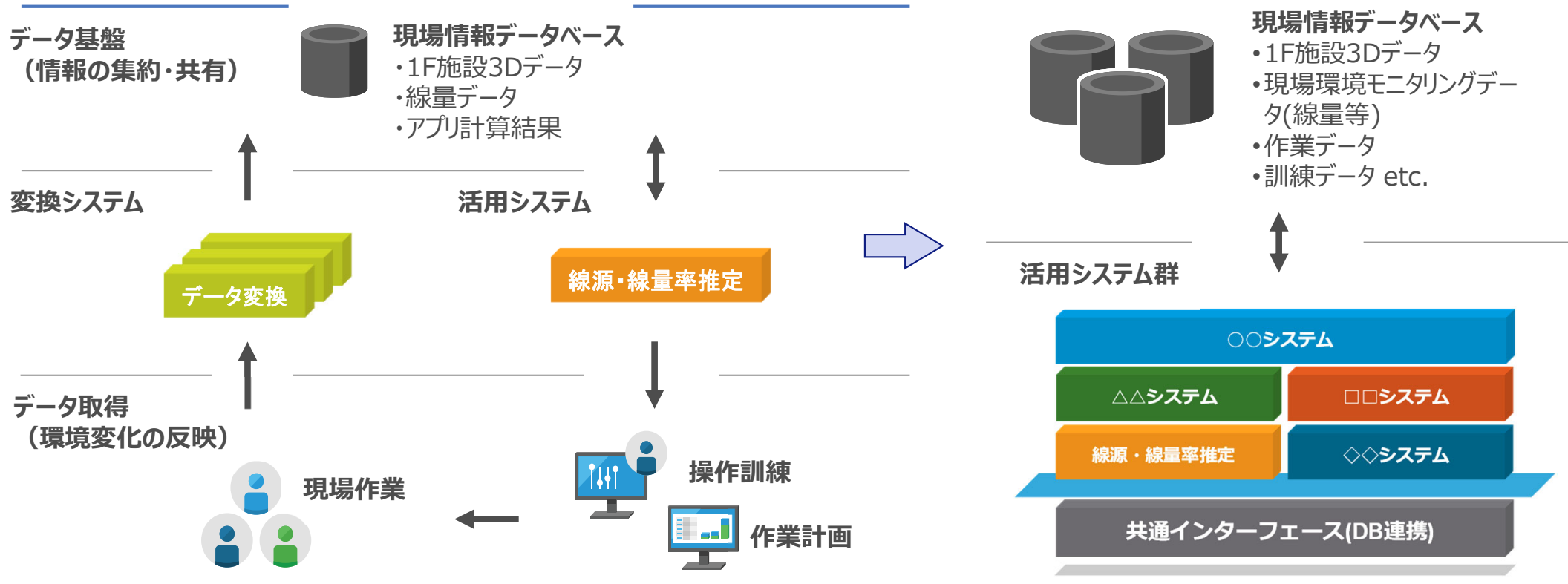
※情報処理推進機構/ソフトウェア高信頼化センター発行の「経営者が参画する要求品質の確保」内で提唱



② 接続性や拡張性に関する要求事項の整理・課題抽出(2/5)

1. プロセス検討

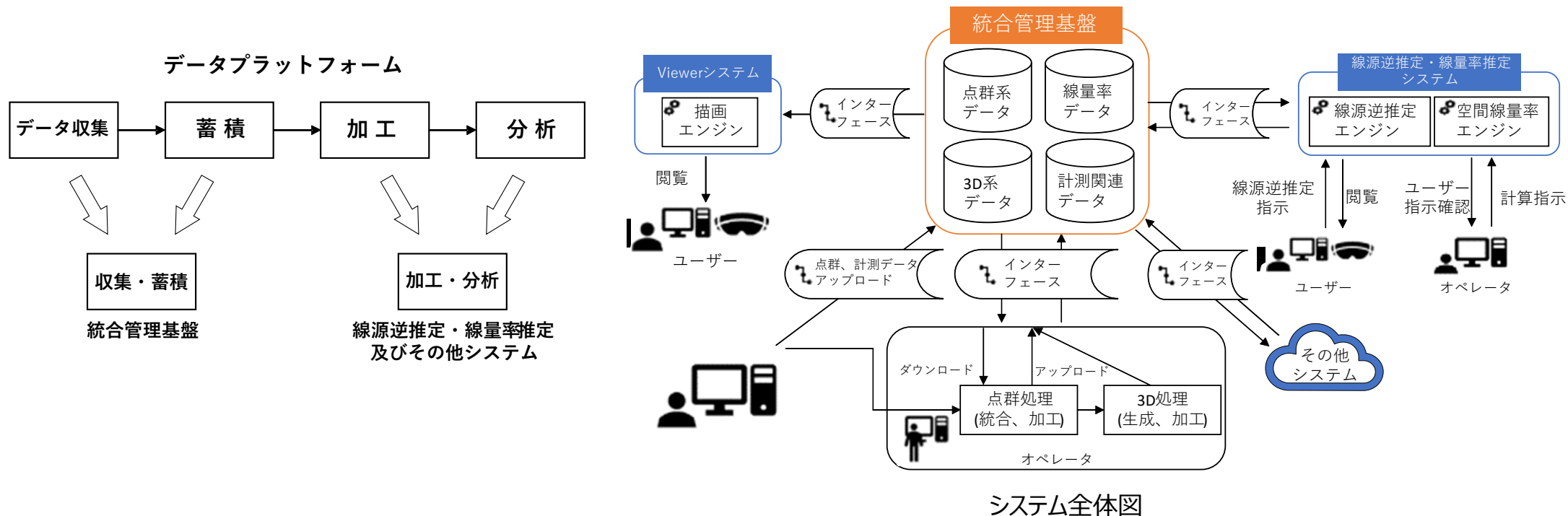
2021(令和3)年度の調査分析結果から、1Fの廃止措置に必要なデジタルシステム像を具体化した(下図参照)。これをベースに本プロジェクトで開発する概念実証段階のシステムを、現場適用性のあるシステムに昇華するため、「超上流プロセス」をITシステムに対する要件を定義する手法のリファレンスにし、検討項目を「システム化方向性」、「システム化計画」、及び「要件定義」としてそれぞれ定めた(p.163参照)。



②接続性や拡張性に関する要求事項の整理・課題抽出(3/5)

2. プロジェクト定義

・1Fの廃止措置に必要なデジタルシステムとしては、**3Dデータ(点群・3D-CAD等)及び関連データ(現場画像、空間線量率等)の収集・蓄積を行い、それを利活用(加工・分析)**するという構図となる。**前者を統合管理基盤、後者を線源逆推定・線量率推定システム及びその他システム**とし、そこから実現するために必要なシステム化機能を検討した結果、データプラットフォームとしては下図のシステム全体図のような構成が最適と結論付けた。さらにはシステム構成に対して機能要件・非機能要件として定義し、実現方法や機能を明確にした。



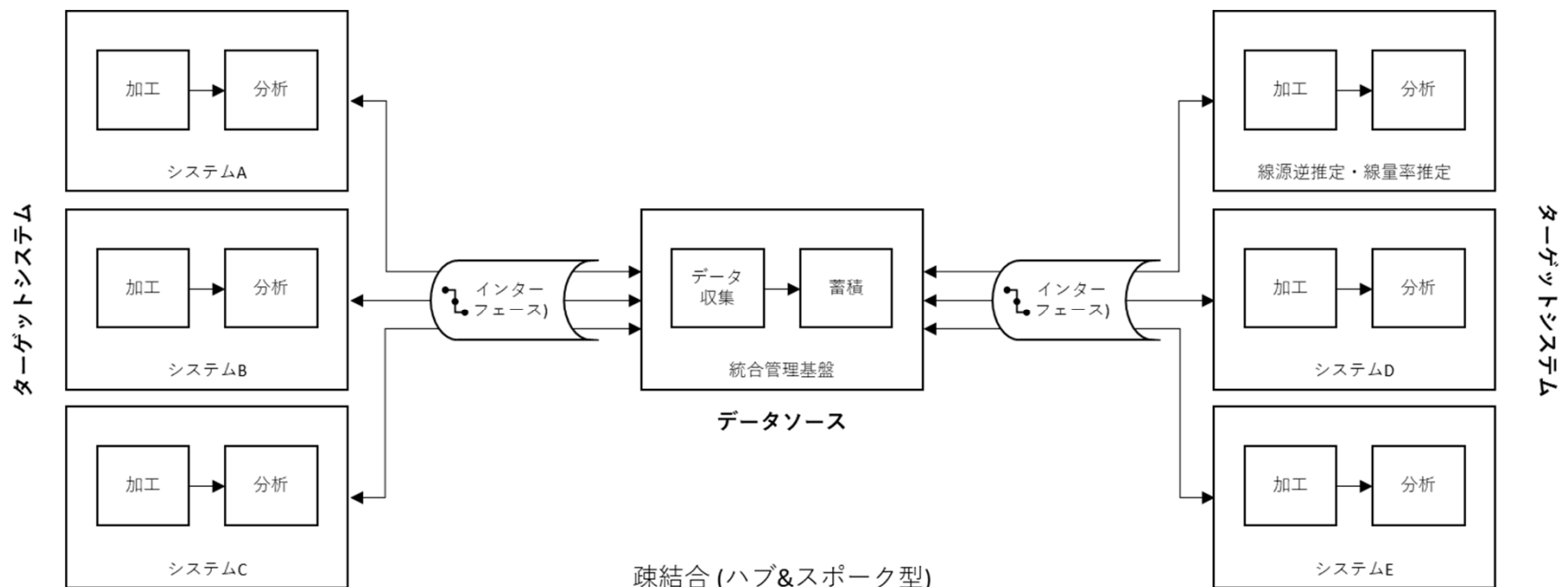
②接続性や拡張性に関する要求事項の整理・課題抽出(4/5)

3.要求整理抽出(1/2)

・2021(令和3)年度に実施した、海外先行事例調査(Atkins)の報告書及び今回プロセス検討・プロジェクト定義を実施してきた過程から、要求事項の整理・課題抽出として接続性や拡張性に必要な事項を3つに整理した。

①システムアーキテクチャ

・1Fの廃止措置というプロセスは中長期的な取り組みとなる。このため将来開発されるシステムも念頭においた中長期に渡る接続性や拡張性を担保する必要がある。これに必要なのは変化に強く柔軟性の高いシステムアーキテクチャとなるため、これを実現するために**ハブ&スポーク型の疎結合モデルを採用し、システム間の疎結合化によるデータ運用管理の一元化**を行い、容易なデータ連携を図ることが重要になる。



②接続性や拡張性に関する要求事項の整理・課題抽出(5/5)

3.要求整理抽出(2/2)

②原子力産業におけるALARPの概念

・原子力産業ではALARP(原子力事故のリスクを合理的に実行可能な限り低くする)という

概念に基づいて構築されているため、デジタルシステムもその方針に準ずる必要がある。

原子力産業におけるシステムは、ALARPを考慮したセキュリティの観点からインフラをオンプレミスとした展開がほとんどだが、データプラットフォームや建築分野におけるBIM(3D)の試みでは接続・拡張性の観点からクラウドを活用したサービス展開が主流で成長傾向にある。ALARPに沿いつつ接続・拡張性を担保するには、クラウドで展開実績のあるサービスに原子力特有のセキュリティ対策を実装する形態が望ましい。

③システムのブラックボックス化、データの陳腐化

・接続性や拡張性の維持には、進歩するIT技術に対応可能なシステムへの更新が必須となる。

オンプレミスやクラウド問わずシステムのブラックボックス化(システムの肥大・複雑化による仕様の不明確化、属人化等)は更新に対する足枷となる。これを回避するため、システム可視化、ドキュメント整備、ナレッジ蓄積、IT人材のリソース強化等の対策が求められる。

また、保存されるデータ(ファイルフォーマット)自体の陳腐化も考慮する必要がある。オープンフォーマットやデファクトスタンダード規格の採用による長期的なサポート維持やその時代のIT技術に適応可能なフォーマットにデータをコンバージョンしていくことが必要になる。

c.(c)まとめ

本システムの1F環境における要求事項等を整理した。

- 海外の原子力業界におけるデジタルシステムの活用実績及び課題を整理した。また、1Fにおける他システムとの接続性や拡張性について、要求事項及び課題を整理した。
- 運用内容や事例、業界の最良慣行、国際的推奨事項等の調査・整理・分析を実施し、海外原子力業界のデジタルシステム活用実績及び課題の整理を行った。
- プロセス検討、プロジェクト定義、要求事項抽出についての整理及びシステムの接続性・拡張性に関する要素・定義を具体化し、課題抽出した。

開発した線源・線量率推定システムの検証を実施し、有効性及び課題を整理するとともに、環境データ更新機能の試作モデルを完成・評価した。また、本システムの1F環境における要求事項等を整理した。

c.(a)検証試験

- 線源逆推定・線量率推定システムの検証試験及び有効性評価により、一連のデータフローに基づき各エンジンが動作し、線源位置及び線量率分布の推定等が可能であることを確認するとともに課題を整理した。

c.(b)環境データの更新機能の高度化に関する研究開発

- 環境データ自動更新機能の試作モデルを完成・動作確認を実施し、高い確度で推定・更新できることを確認した。

c.(c)1Fにおける他システムとの接続性・拡張性の基礎検討

- 海外の原子力業界におけるデジタルシステムの活用実績及び課題を整理した。また、1Fにおける他システムとの接続性や拡張性について、要求事項及び課題を整理した。

3. 全体総括

- 共同事業実施者の東京電力と連携を図るとともに、外部有識者からのコメント等を踏まえ、本事業の目標である「線源・線量率推定システム」のプロトタイプを開発し、検証試験等により基本的な動作確認を行い、目的達成を判断する指標(TRL)を満足する成果を得ることが出来た。
- プロトタイプシステムの現場実装については、本事業で確認した課題並びに東京電力のニーズを踏まえ、一層の高度化（現場適用性の評価、現場適用性の向上のためのさらなる研究開発：線源・線量率推定解析の高度化・精度向上及び高機能化）を図ることが望ましい。

4. 参考資料

- 実施スケジュール
- 当事業からの要求/提供インプット
- 実施体制
- 事業成果の情報発信

[2021(令和3)年6月から2023(令和5)年3月末まで]



実施スケジュール(1/2)

実施内容	2021(令和3)年度		2022(令和4)年度	
a.線源逆推定・線量率推定技術開発				
a.(a)線源逆推定エンジンの開発				
逆推定に最適な観測点数と観測点位置を指示するツールの開発作業	詳細計画立案	ツール開発	まとめ	
寄与率行列作成のためのモンテカルロ輸送計算の超並列化及びその高速化・最適化作業	詳細計画立案	エンジン開発	まとめ	
逆推定ソルバーの高速化・最適化とエンジン実装に係る作業	詳細計画立案	エンジン開発	まとめ	
逆推定線源分布情報を基にしたモンテカルロ輸送計算の超並列化及びその高速化・最適化作業	詳細計画立案	エンジン開発	まとめ	
逆推定計算のエンジン化及び検証作業		詳細計画立案	エンジン開発	まとめ
逆推定ツール群のエンジン化及び検証作業			詳細計画立案	エンジン開発
逆推定遠隔共有WEBアプリの開発作業			詳細計画立案	アプリ開発
推定線量率分布の精度向上に向けたベイズ統計手法活用ツールの開発作業	詳細計画立案	エンジン開発	まとめ	
a.(b)空間線量率推定エンジンの開発				
高強度線源への対策のデジタル化に係るツール開発作業	詳細計画立案	ツール開発	まとめ	
CAD等による線源対策に係る入出インターフェース開発作業	詳細計画立案	ツール開発	まとめ	
対策効果推定のためのモンテカルロ輸送計算の超並列化及び高速化・最適化作業	詳細計画立案	エンジン開発	まとめ	
対策効果推定に係る計算簡略化ツールの開発作業	詳細計画立案	ツール開発	まとめ	
対策効果推定計算のエンジン化及び検証作業		詳細計画立案	エンジン開発	まとめ
対策効果推定ツール群のエンジン化及び検証作業			詳細計画立案	エンジン開発
対策効果推定遠隔共有WEBアプリの開発作業			詳細計画立案	アプリ開発
a.(c)インタラクティブ可視化エンジンの開発				
高速インタラクティブVR/AR可視化実現機能開発作業	詳細計画立案	エンジン開発	まとめ	
線量率低減対策効果のインタラクティブ可視化ツールの開発作業		詳細計画立案	ツール開発	まとめ
VRによる没入感実現及びモックアップ施設でのAR化作業			詳細計画立案	AR化作業



実施スケジュール(2/2)

実施内容	2021(令和3)年度		2022(令和4)年度	
b.実環境データのデジタル化基盤技術の開発				
(a)線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発				
データ形式の分析及び整備仕様抽出		計算に用いるデータ形式の分析		
データベース構造設計	概念設計	論理構造の設計	まとめ	
指定データ抽出・データ変換機能の設計		概念設計		動作検証実験
データベース及びデータ入出力機能の開発		実装のための要求仕様確定	試作モデルの開発	まとめ
(b)実環境データ計測に関する基盤技術の研究開発				
①放射線計測技術の研究開発				
線源逆推定に寄与する放射線データ計測手法の試作モデルの仕様検討		仕様検討、設計		
放射線計測手法の試作モデルの開発及び成立性評価		試作モデルの開発		成立性評価実験 まとめ
②データ収集効率化技術の研究開発				
	データ収集効率化のための実装機能等の仕様抽出			
データ計測ユニットの基本設計		データ計測ユニットの試作モデルの設計・開発	まとめ	
データ計測手法の研究開発		計測・収集手法等の研究		
作業員搬送型及び遠隔操作型データ計測手法の試作モデルの開発	検証実験用試作モデルの開発		開発した試作モデルの動作検証実験	まとめ
③高所データ計測及び核種弁別に関する技術開発				
1F現場適用における課題抽出	調査・分析	課題抽出整理		
高所等計測手法の試作モデルの開発	概念設計	基本設計	詳細設計 実験準備・予備試験	試作モデルの開発 成立性評価・課題抽出 本試験 まとめ
核種弁別手法の試作モデルの開発	センサの基本設計	センサの試作・特性試験	試作モデルの開発	性能評価 まとめ
c.現場適用のための技術開発				
(a)検証試験				
①線源逆推定計算手法の検証試験				
	検証データの整備			
JMTRにおける検証			検証試験	
1Fにおける検証	検証エリアの選定、必要データの抽出	一次まとめ	中間まとめ	最終まとめ
1Fにおける比較検証		検証に必要なデータの取得方法の検討	検証データ整備	1Fにおける比較検証 まとめ
②線源・線量率推定システムの有効性評価				
試験場における評価	評価要素の抽出	試験場の概念検討、設計仕様の具体化	試験場の製作	評価試験 まとめ
JMTRにおける評価			試験データ整備	評価試験 まとめ
(b)環境データの更新機能の高度化に関する研究開発				
更新機能の高度化エンジンの開発	再評価手法の概念設計	再評価手法の開発	高度化エンジンの試作モデルの開発	妥当性評価 評価試験 まとめ
(c)1Fにおける他システムとの接続性・拡張性の基礎検討				
1F他システム及び海外先行事例調査・分析	1F他システム・海外先行事例の調査・分析			まとめ
接続性や拡張性に関する要求事項の整理・課題抽出			要求事項の整理	課題抽出 まとめ

○当事業からの要求インプット

ID	要求側事業	提供側事業	内容（概要）	必要となる時期	情報の用途	備考
I-1	(本事業)	東京電力	1F現場の線量率、測定位置情報、線量率計の測定精度、現場の構造データ、等	適宜	a.で開発するエンジンのインプットとして使用	速やかに提供されない場合は、事業の一部が実施できない。
I-2	(本事業)	「廃炉・汚染水対策事業費補助金（燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発（環境改善・干渉物撤去のための遠隔技術の開発））」に係る補助事業	1F現場の線量率、測定位置情報、線量率計の測定精度、現場の構造データ、等	適宜	a.で開発するエンジンのインプットとして使用	事業者と適宜情報交換を実施。
I-3	(本事業)	東京電力	現場作業で想定される「線源・線量率推定システム」の利用方法、等	適宜	「線源・線量率推定システム」の構築	速やかに提供されない場合は、事業の一部が実施できない。
I-4	(本事業)	東京電力 関連する事業の事業主体	プラント監視、作業管理等のシステムの機能、構造等	適宜	c.で検討を行う他システムとの接続性・拡張性の検討条件	速やかに提供されない場合は、事業の一部が実施できない。

※ I-1（「線源・線量率推定システム」の入力データ）、I-3（東京電力における「線源・線量率推定システム」の利用形態）、I-4（「線源・線量率推定システム」の拡張性検討のための情報）については、東京電力から適宜情報の提供を受けている。

※ I-2（「線源・線量率推定システム」の入力データ）については、関連補助事業の進捗を踏まえてNDF（原子力損害賠償・廃炉等支援機構）殿等から情報の提供を受ける予定。

○当事業からの提供インプット

ID	要求側事業	提供側事業	内容（概要）	必要となる時期	情報の用途	備考
O-1	東京電力	(本事業)	a.で開発するエンジンのインプットとして必要な情報	適宜	環境データの測定	速やかに提供されない場合は、事業の一部が実施できない。
O-2	東京電力	(本事業)	成果全般	適宜	1F廃止措置の作業計画の策定	
O-3	NDF 東京電力	(本事業)	成果全般	適宜	1F廃止措置に向けたデジタル化技術開発の検討	
O-4	関連する事業の 事業主体	(本事業)	成果全般	適宜	作業計画の策定、工法検討等	各PJ及び事業者と適宜情報交換を実施。

※ O-1（「線源・線量率推定システム」の入力情報）については、必要な情報を東京電力にインプットし、適宜情報の提供を受けている。

※ O-2~4（本事業で得られた成果）については、今後東京電力を始めとした関係機関への提供を通じて、更なるシステムの改善や、将来の高度化検討等に繋げていく。

技術開発の開始にあたっては、東京電力のニーズを踏まえ、関係者（経済産業省、東京電力、NDF）との協議を行った上で技術開発を進める。

令和5年3月31日現在

日本原子力研究開発機構



東京電力ホールディングス株式会社

○プロジェクト管理

岡本 孝司 実施責任者（正）

○研究開発管理の実施責任者

鈴木 政浩 実施責任者（副）

○研究開発管理の実施責任者の補助

○技術開発統括

○研究開発運営等

6名

町田 昌彦 テーマリーダー

○開発実施

a.線源逆推定・線量率推定技術開発

(a) 線源逆推定エンジンの開発

(b) 空間線量率推定エンジンの開発

(c) インタラクティブ可視化エンジンの開発

12名

川端 邦明 テーマリーダー

○開発実施

b.実環境データのデジタル化基盤技術の開発

(a) 線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発

(b) 実環境データ計測に関する基盤技術の研究開発

① 放射線計測技術の研究開発

② データ収集効率化技術の研究開発

③ 高所データ計測および核種弁別に関する技術開発

6名

伊藤 倫太郎 テーマリーダー

○開発実施

c.現場適用のための技術開発

(a) 検証試験

① 線源逆推定計算手法の検証試験

② 線源・線量率推定システムの有効性評価

(b) 環境データの更新機能の高度化に関する研究開発

(c) 1Fにおける他システムとの接続性・拡張性の基礎検討

9名

委託先①

独立行政法人全国高等専門学校機構
福島工業高等専門学校

○開発実施

b.実環境データのデジタル化基盤技術の開発

(b) 実環境データ計測に関する基盤技術の研究開発

③ 高所データ計測および核種弁別に関する技術開発

再委託先①：国立大学法人福島大学

再委託先②：公立大学法人会津大学

委託先②

公立大学法人岩手県立大学

○開発実施

c.現場適用のための技術開発

(b) 環境データの更新機能の高度化に関する研究開発

請負先①

一般財団法人高度情報科学技術研究機構

○開発実施

a.線源逆推定・線量率推定技術開発

(a) 線源逆推定エンジンの開発

(b) 空間線量率推定エンジンの開発

請負先②

株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター

○開発実施

b.実環境データのデジタル化基盤技術の開発

(b) 実環境データ計測に関する基盤技術の研究開発

① 放射線計測技術の研究開発

請負先③

サイバネットシステム株式会社

○開発実施

a.線源逆推定・線量率推定技術開発

(a) 線源逆推定エンジンの開発

(c) インタラクティブ可視化エンジンの開発

請負先④

日本建設工業株式会社

○開発実施

c.現場適用のための技術開発

(a) 検証試験

① 線源逆推定計算手法の検証試験

請負先⑤

みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社

○開発実施

a.線源逆推定・線量率推定技術開発

(b) 空間線量率推定エンジンの開発

請負先⑥

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

○開発実施

a.線源逆推定・線量率推定技術開発

(c) インタラクティブ可視化エンジンの開発

b.実環境データのデジタル化基盤技術の開発

(a) 線源逆推定のためのデータ整備・蓄積・活用環境構築のための技術開発

請負先⑦

Atkins Energy Global Solutions LLC

○開発実施

c.現場適用のための技術開発

関する研究開発

(c) 1Fにおける他システムとの接続性・拡張性の基礎検討

請負先⑧

東電設計株式会社

○開発実施

c.現場適用のための技術開発

(a) 検証試験

① 線源逆推定計算手法の検証試験

請負先⑨

株式会社千代田テクノル

○開発実施

a.線源逆推定・線量率推定技術開発

(a) 線源逆推定エンジンの開発

請負先⑩

ESRIジャパン株式会社

○開発実施

a.線源逆推定・線量率推定技術開発

(c) インタラクティブ可視化エンジンの開発

請負先⑪

天糸瓜ネット合同会社

○開発実施

b.実環境データのデジタル化基盤技術の開発

(b) 実環境データ計測に関する基盤技術の研究開発

② データ収集効率化技術の研究開発

請負先⑫

株式会社鈴倉プラント建設

○開発実施

c.現場適用のための技術開発

(a) 検証試験

① 線源逆推定計算手法の検証試験

名称	分類	タイトル	著者
第14回放射線計測 フォーラム福島	口頭	原子炉建屋内での機械学習技術を用いた放射線源逆推定技術の研究開発(R&D on inversely estimating techniques for radiation sources using machine learning inside reactor buildings)	<u>町田 昌彦</u>
富士通SS研5G可視 化技術研究WG	口頭	原子炉建屋内での機械学習技術を用いた放射線源逆推定技術の研究開発と推定線源及び線量率可視化への期待(R&D on inversely estimating radiation sources by using machine learning inside reactor buildings and expectation for visualization of estimated source and air dose rate)	<u>町田 昌彦</u>
第2回点群データ分 析・可視化ワークショ ップ	口頭	原子炉建屋内における放射線源逆推定技術の研究開発計画; 機械学習及びXR技術の活用(R&D plan on inversely estimating radiation sources inside reactor buildings; Application of machine learning and XR techniques)	<u>町田 昌彦</u>

特許番号	名称	発明者
申請中	線源推定装置及び線源推定方法線源推定装置及び線源推定方法	町田 昌彦
申請中	観測点決定装置及び観測点決定方法	町田 昌彦

名称	分類	タイトル	著者
第6回 福島第一原子力発電所の廃止措置に関する国際フォーラム	口頭	Development of exposure reduction technologies by digitalization of environment and radioactive source distribution; Current status of development project(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; 現在までの開発状況)	<u>鈴木 政浩</u> 、山口 隆司、町田 昌彦、川端 邦明、伊藤 倫太郎
2022(令和4)年度福島研究開発部門成果報告会	口頭ポスター	建屋高所におけるデータ計測及び核種弁別に関する研究	<u>福原匠流</u> 、鈴木茂和、川妻伸二、成瀬継太郎、鳥居建男
第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2022)	口頭	空間線量率測定のためのデータ計測ユニット搭載型遠隔操作移動システムの開発	<u>鈴木壮一郎</u> 、川端邦明、白崎令人、伊藤倫太郎
日本原子力学会 2022年春の年会	ポスター	LASSO回帰を用いた放射線源分布の推定(Estimation of radiation source distribution using LASSO)	<u>山田 進</u> 、町田 昌彦
日本原子力学会 論文誌(英文誌)	論文(査読中)	Waveform discrimination by fitting derivative of synchronized ideal normalized curves, dSINC fit	<u>Martin Andersson</u> , Tatsuo Torii , Susumu Ryufukua, Ryohei Kurosawaa, Hiroko Kidoa

[日本原子力学会2022年秋の大会]

シリーズ発表：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

Development of Exposure Reduction Technologies by Digitalization of Environment and Radioactive Source Distribution

名称	分類	タイトル	著者
日本 原子力 学会 2022 年 秋の 大会	口頭	1.全体計画	岡本孝司、 <u>鈴木政浩</u> 、山口隆司
		2.線源逆推定・線量率推定・可視化エンジンの研究開発:計画及び進捗	<u>町田昌彦</u> 、Wei SHI、山田進、宮村浩子、沼田良明、佐藤朋樹、飛田康弘、吉田亨、長谷川幸弘、岡本孝司
		3.LASSO Theory and Demonstration for Inverses Estimation on Radioactive Source Distributions	<u>Wei Shi</u> , Masahiko Machida, Susumu Yamada, Toru Yoshida, Yukihiko Hasegawa, Koji Okamoto
		4.線源逆推定エンジンの研究開発：建屋内での大規模解析	<u>山田進</u> 、沼田良明、佐藤朋樹、飛田康弘、町田昌彦、Wei Shi
		5.インタラクティブ可視化エンジンの研究開発：MRデバイスの活用	<u>宮村(中村)浩子</u> 、佐藤朋樹、沼田良明、飛田康弘、町田昌彦
		6.線源・線量率推定システムの計算手法検証と有効性評価	<u>青木 勇斗</u> 、伊藤 倫太郎、北村 哲浩、大森 崇純、谷口 達郎、井手 広史
		7. 空間線量率データ収集効率化のための基盤技術・システム開発	<u>川端邦明</u> 、今瀧貴志、白崎令人、伊藤倫太郎、鈴木壮一郎
		8.原子炉建屋高所におけるデータ計測及び核種弁別	<u>鈴木茂和</u> 、川妻伸二、成瀬継太郎、鳥居建男
		9.自動同期による環境データ更新の効率化	<u>羽成敏秀</u> 、今瀧貴志、谷藤祐太、伊藤倫太郎
		10.深層学習による環境データの認識と3Dモデル化	<u>土井章男</u> 、山下圈、高橋弘毅、加藤徹、今瀧貴志、羽成敏秀、谷藤祐太、伊藤倫太郎

名称	分類	タイトル	著者
日本原子力学会部会 連絡会ウィークリーウェビ ナー(第21回); 計算科 学技術部会1	口頭	原子炉建屋内での放射線源の逆推定手法の開発(国プロ の研究開発進捗報告)(Research and development of inverse estimation scheme on radioactive sources inside nuclear reactor buildings; Report on plan and progress of the national project)	<u>町田 昌彦</u>
2022年電気学会電 子・情報・システム部門 大会	口頭	測定位置データとともに空間線量率を取得する計測ユニッ トの開発(Development of a measurement unit that acquires dose rate data along with estimated measurement position data)	<u>川端 邦明</u> 、今瀨 貴、白崎 令人、鈴木 壮一郎、 伊藤 倫太郎
日本機械学会ロボティク ス・メカトロニクス講演会 2022 in Sapporo	口頭	空間線量率および計測位置の同期収集センサユニットの 開発(Development of a sensor unit for simultaneous collection of dose rate and measurement position)	<u>川端 邦明</u> 、白崎 令人、阿部 浩之、羽成 敏秀、 伊藤 倫太郎、今瀨 貴志、山田 大地
精密工学会大規模環 境の3次元計測と認識・ モデル化技術専門委員 会; 第48回定例研究 会(2022年度第3回)	口頭	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; 深層学習による環境データの認識と3Dモデル化 (Development of exposure reduction technologies by digitalization of environment and radioactive source distribution; Understanding and 3D modeling of working environmental data by using deep learning)	<u>土井 章男</u> 、山下 圏、高橋 弘毅、加藤 徹、 今瀨 貴志、羽成 敏秀、谷藤 祐太、伊藤倫太郎

名称	分類	タイトル	著者
日本原子力学会 2023年 春の年会	口頭	XRにおけるアバタ動作履歴を用いた被ばく評価(Evaluation of Exposure Dose using Recordings of Avatar Movement in XR)	<u>宮村(中村)浩子</u> 、佐藤 朋樹、沼田 良明、飛田 康弘、岩田 亜矢子、町田 昌彦
	口頭	線源分布の逆推定に対するFused Lasso(Fused LASSO for radiation sources estimation)	<u>山田 進</u> 、町田 昌彦
Waste Management 2023 (WM 2023)	口頭	LASSO reconstruction scheme to predict radioactive source distributions inside reactor building rooms; Evaluation activities	<u>青木 勇斗</u> 、伊藤 倫太郎、北村 哲浩、山田 進、町田 昌彦、鈴木 政浩、大森 崇純、谷口 達郎、井手 広史
	ポスター	LASSO reconstruction scheme to predict radioactive source distributions inside reactor building rooms; Outline of R&D project	<u>鈴木 政浩</u> 、青木 勇斗、町田 昌彦、伊藤 倫太郎、川端 邦明、山口 隆司、岡本 孝司
	ポスター	LASSO reconstruction scheme to predict radioactive source distributions inside reactor building rooms; Practical applications	<u>町田 昌彦</u> 、Shi W、山田 進、吉田 亨、長谷川 幸弘、宮村 浩子、岡本 孝司、青木 勇斗、伊藤 倫太郎、山口 隆司、鈴木 政浩
	ポスター	LASSO reconstruction scheme to predict radioactive source distributions inside reactor building rooms; Theory & Demonstration	<u>Shi W</u> 、町田 昌彦、山田 進、吉田 亨、長谷川 幸弘、岡本 孝司
	パネル	R&D project of digital techniques to reduce radiation exposure for Fukushima Daiichi decommissioning; Overview and key results(福島第一原子力発電所の廃炉に向けたデジタル技術による被ばく低減の研究開発; プロジェクト概要と主な成果)	<u>鈴木 政浩</u> 、町田 昌彦、伊藤 倫太郎、川端 邦明、山口 隆司、岡本 孝司