

令和5年度開始 廃炉・汚染水・処理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開発
(被ばく低減のための環境・線源分布のデジタル化技術の
高機能化開発)に係る補助事業

2025年 11月 最終報告書

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5年度開始廃炉・汚染水・処理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開発(被ばく低減のための環境・線源分布のデジタル化技術の高機能化開発))に係る補助事業」（国の補助事業）として実施した成果です。（本資料内では、「国の補助事業」と記載します。）

	掲載ページ		掲載ページ
0.R3-4年度国の補助事業について	・・2	3.R5-6年度国の補助事業の成果に対する 目標TRL達成度	・・154
1.R5-6年度国の補助事業について	・・3	4.参考資料	・・161
●背景・目的		●当事業からの要求/提供インプット	
●現場のニーズ		●実施体制	
●現場のニーズを解決するための開発		●実施スケジュール(R5-6年度:月ベース)	
●被ばく線量推定評価システムの高機能化		●事業成果の情報発信	
●目標及び実施概要		●用語集	
●目標達成を判断する指標(TRL)		●補足説明	
●実施スケジュール			
2.各実施項目の開発成果	・・11		
●a.システム製作及び現場適用性評価			
・概念検討/システムの維持、保守管理等			
・FrontEnd/Pro/BackEndの開発成果			
・1F2/3号機での最終成果〈詳細説明〉			
●b.現場適用性の向上のための研究開発			
(a)1 F 現場3Dデジタルモデル作成の効率化			
(b)線源・線量推定解析の高速化			
(c)線源・線量推定解析の精度向上			
(d)線源・線量推定解析の高機能化			
●R5-6年度 国の補助事業における成果まとめ			

R3-4年度国の補助事業：「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」における成果について

その詳細については、

「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

https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20240126_JAEA.pdf
(廃炉・汚染水・処理水対策事業事務局ホームページ内)にて報告済みである。

※アクセス方法

廃炉・汚染水・処理水対策事業事務局HP/事業成果/【JAEA】令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業」に関する補助事業（第二次公募、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））の成果の概要【2024年1月31日掲載】

1.R5-6年度国の補助事業について

2022（令和4）年度までに、被ばく線量の推定評価システムとして、逆推定解析技術、可視化技術等の要素技術開発を進め、それを組み込んだ試作として、**環境・線源分布のプロトタイプシステムを開発**した。

本事業では、逆推定解析技術、可視化技術等を組み込んだ被ばく線量推定評価システムについて**現場適用性向上のための高機能化の開発**を行う。

＜具体的には＞

- 現場適用のために必要なシステムの機能を調査、検討、整理し、課題を抽出して、**高機能化したシステムの概念検討**を行う。
- 次に、**システムを製作し、要素試験によって機能の検証**を行うとともに、福島第一原子力発電所での**実測によって有効性を検証**することにより、**現場適用性を評価**する。
- 特に、**デジタルモデル作成の効率化、線源逆推定解析の合理化、システム操作の省力化等**を図って**現場適用性を向上**する。
- さらに、現場の長期にわたる燃料デブリ取り出し期間に随時必要となる環境改善作業を考慮し、構築する**システムの維持、保守管理の課題とそれに対する対策を検討**しつつ開発を行う。

- 今後、燃料デブリ取り出し作業の本格化により原子炉建屋(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。

■: <3mSv/h
 ■: <5mSv/h
 ■: <7 mSv/h
 ■: <10mSv/h
 ■: > 10mSv/h
 ■: > 20mSv/h
 ■: > 50mSv/h



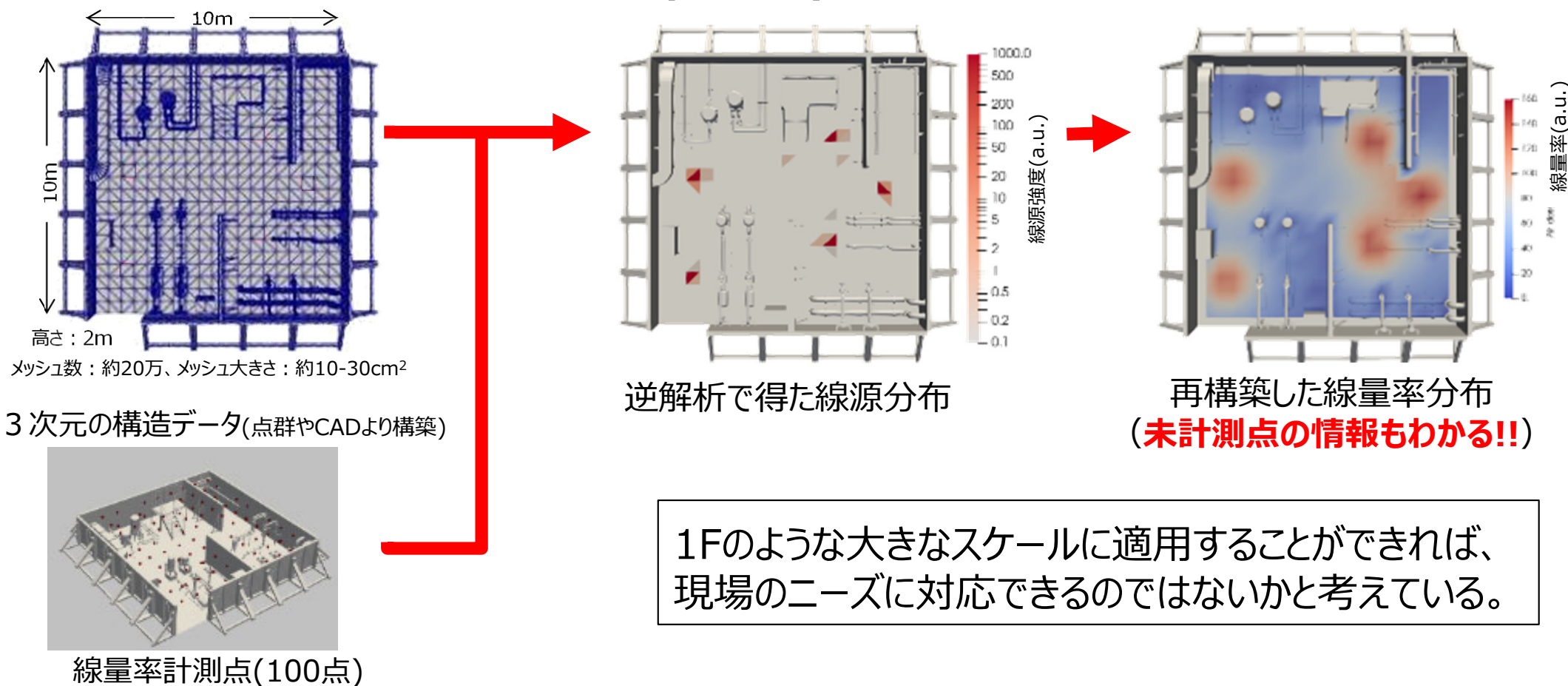
※左図は、1F現場の空間線量率が高いこと、及び各エリアの線量率の平均値を示している。

➡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。

廃炉・汚染水・処理水対策チーム
会合/事務局会議
(第110回) 資料より

【参考図】原子炉建屋1階 各エリアの線量率の平均値(赤数字 単位: mSv/h)

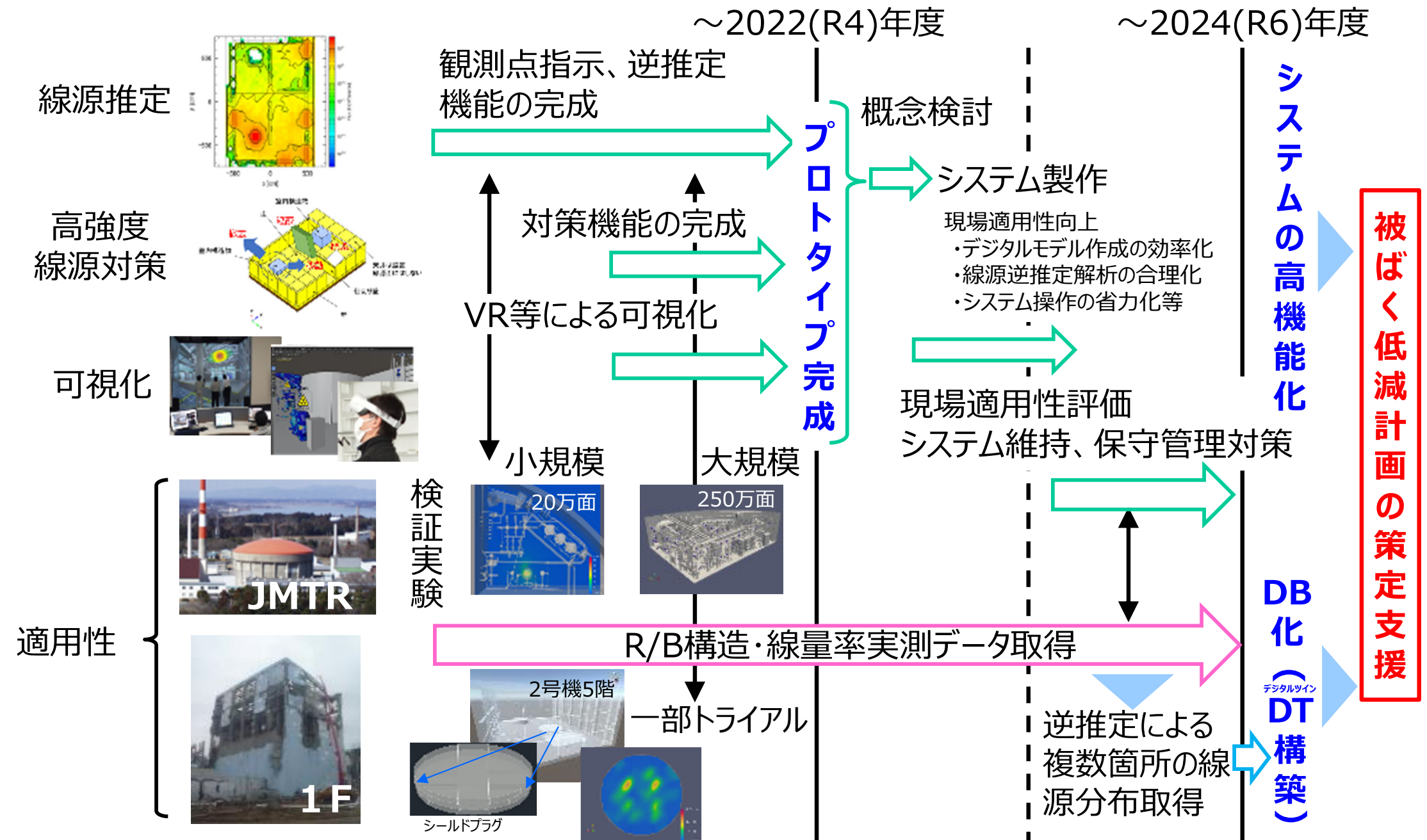
○ JAEAの有するシーズ（逆解析ツール(LASSO)）



○ 開発戦略[2023(R5)～2024(R6)年度]

1. 基礎技術(シーズ)を基に、**実用化に向けたプロトタイプシステムを構築した**[2022(R4)年末:達成]。
2. 1F2号機及び3号機の現場適用性について評価する[2024(R6)年度末:目標]。

被ばく線量推定評価システムの高機能化



2022年度までに開発してきた「線源・線量率推定システム」のプロトタイプシステムである、3D-ADRES-Indoor(可視化技術も含む)の1F現場適用性を向上させ、1F現場にて活用可能とするための研究開発を実施する。

具体的には、1F現場での環境情報(構造・画像・線量等)計測結果を基に、現場にて線源・線量率推定マップを作成し、高強度線源位置や高線量区域を視認可能とするシステムを開発する。

⇒ 現場にて線源・線量推定マップを出力し視認可能とするシステムを開発する。(TRL6※)

a. システム製作及び現場適用性評価

更に、作成する線源・線量率推定マップの高精度化を図るため、必要となる環境情報取得手段の開発整備を行い、システムを支援強化する体制を整備する。

⇒ システムの支援機能の研究開発を行う。(TRL2~4※)

b. 現場適用性の向上のための研究開発

注) TRL : 6→現場での実証を行う段階(フィールド実証)

4→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(実用化研究)

2→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(応用研究)

目標達成を判断する指標(TRL)

目標達成を判断する指標		終了時目標TRL
a. システム製作及び現場適用性評価		
	・システムを製作し、モックアップ試験等に基づきシステム評価を行う。(令和5年度)	4→5
	・1F実測データを用いて有効性を検証し、システムの現場適用性を評価する。(令和6年度)	5→6
b. 現場適用性の向上のための研究開発		
(a) 1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化		
	・BIM技術導入の検討結果と課題を提示する。(令和5年度)	1→2
	・1F等実測データを用いて現場適用性を評価する。(令和6年度)	2→4以上
(b)線源・線量推定解析の高速化		
	・サロゲーションモデルの設計結果と課題を提示する。(令和5年度)	1→2
	・1F等実測データを用いて現場適用性を評価する。(令和6年度)	2→4以上
(c)線源・線量推定解析の精度向上		
	・遠隔操作ロボットや放射線計測機器システムの開発結果と課題を提示する。(令和5年度)	1→2
	・遠隔操作ロボットについて、1F等での検証試験を実施し、現場適用性を評価する。(令和6年度)	2→4
(d)線源・線量推定解析の高機能化		
	・ダスト挙動の計測システムの開発結果と課題を提示する。(令和5年度)	1→2
	・模擬フィールドでの試験結果を提示する。(令和6年度)	4(2※)

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。

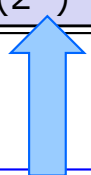
TRLレベル4 (応用研究) : 開発、エンジニアリングのプロセスとして試作レベルの機能試験を実施する段階。

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

※交付申請書の記載ではTRL2としていたが、進捗状況により、TRL4に変更している



実施スケジュール

項目	令和5年度				令和6年度			
a. システム製作及び現場適用性評価	現場適用のために必要なシステムの概念検討				2号機計測		3号機計測	
	1Fモックアップ試験							
	1F現場での詳細環境情報収集技術の開発							
	構造データの迅速処理技術の開発							
	1F現場での迅速解析技術の開発							
	1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発							
	観測点指示ツール高度化技術の開発							
	詳細環境情報による解析技術の開発							
	高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発							
	線源・線量率詳細処理ツールの開発							
b. 現場適用性の向上のための研究開発					データ管理支援ツールの整備作業			
							システム統合及び全体評価	
	(a) 高強度線源対策シミュレーション技術の研究							
	(b) 放射線シミュレーション技術の研究							
	(c)① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発				(c)②【自己位置推定・FRIE】3号機計測			
	(c)② 新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発				(d)【ダスト】3号機計測			
主なマイルストーン	(d)ダスト挙動予測手法の研究開発						(c)①【高所計測】5号機計測	
	専門家会議▽	専門家会議▽	▽HP:概念検討結果の提示 ▽事業レビュー会議	▽HP:モックアップ試験等に基づくシステム評価 年度とりまとめ△ 学会等▽	専門家会議▽	▽HP:現場計測等に基づくシステム評価 中間とりまとめ△ 原子力学会▽	専門家会議▽	▽事業レビュー会議 最終とりまとめ△ 原子力学会▽

2.各実施項目の開発成果

a.システム製作及び現場適用性評価

a.システム製作及び現場適用性評価(1/71)

●目標

2022年度までに開発した線源・線量率分布推定プロトタイプシステムを現場での適用性向上に向け研究開発を行うと共に1F現場での適用性を評価する。1F現場での計測結果を基に、現場にて線源・線量率推定マップを作成し、高強度線源位置や高線量区域を視認可能とするシステムを開発する。

●計画 [2023(令和5)年度：TRL4⇒5] [2024(令和6)年度：TRL5⇒6]

1F実測データを用いて有効性を検証し、システムの現場適用性を評価する。

全体計画(システム)

- システム全体像の策定
- システム全体動作イメージの策定

個別計画(システム)

- システム各機能動作イメージの策定
- システム各機能の仕様の策定
- システム各機能の開発細目の策定
- システム各機能開発の実施

1F現場測定(検証)

- 1F現場測定手法の策定
- 1F現場測定計画の策定
- 1F現場(2・3号機対象)の実施

実施内容	2023（令和5）年度			2024（令和6）年度		
a. システム製作及び現場適用性評価						
①現場適用のために必要なシステムの概念検討	システムの機能の調査、検討等 まとめ			現場計測(2号機) 現場計測(3号機)		
②1F現場測定	モックアップ試験			線源・線量率マップの製作		
③1F現場での詳細環境情報収集技術の開発	開発計画検討	システム開発	システム改良 まとめ			
④構造データの迅速処理技術の開発	開発計画検討	システム開発	システム改良 まとめ			
⑤1F現場での迅速解析技術の開発	開発計画検討	システム開発	システム改良 まとめ			
⑥1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発	開発計画検討	システム開発		システム改良	現場適用性評価 まとめ	
⑦観測点指示ツール高度化技術の開発	開発計画検討	システム開発	システム改良 まとめ			
⑧詳細環境情報による解析技術の開発	開発計画検討	システム開発		システム改良	まとめ	
⑨高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発	開発計画検討	システム開発		システム改良	まとめ	
⑩線源・線量率詳細処理ツールの開発	開発計画検討	システム開発		システム改良	現場適用性評価 まとめ	
⑪データ管理支援ツールの整備作業				システム整備	現場適用性評価 まとめ	
⑫システム全体評価				システム全体評価 まとめ		

a.システム製作及び現場適用性評価(2/71)

●目標

2022年度までに開発した線源・線量率分布推定プロトタイプシステムを現場での適用性向上に向け研究開発を行うと共に1F現場での適用性を評価する。1F現場での計測結果を基に、現場にて線源・線量率推定マップを作成し、高強度線源位置や高線量区域を視認可能とするシステムを開発する。具体的には、1F現場で迅速な解析が行えるFrontEndを開発する。

●計画 [2023(令和5)年度：TRL4⇒5] [2024(令和6)年度：TRL5⇒6]

現場適用のために必要なシステムの概念検討を行い、1F現場計測を踏まえて、迅速解析技術が行えるように実測データを用いて有効性を検証し、システムの現場適用性を評価する。また、精度向上を目指した観測点指示ツールの高度化に関する技術開発を行う。

●スケジュール(FrontEndに対応する部分を抜粋)

実施内容	2023（令和5）年度			2024（令和6）年度		
a. システム製作及び現場適用性評価						
①現場適用のために必要なシステムの概念検討	システムの機能の調査、検討等 まとめ					
②1F現場測定	モックアップ試験			現場計測(2号機) 線源・線量率マップの製作	現場計測(3号機)	
③1F現場での詳細環境情報収集技術の開発	開発計画検討	システム開発	システム改良 まとめ			
④構造データの迅速処理技術の開発	開発計画検討	システム開発	システム改良 まとめ			
⑤1F現場での迅速解析技術の開発	開発計画検討	システム開発	システム改良 まとめ			
⑥1F現場での線源・線量出力 処理ツールの開発	開発計画検討	システム開発	システム改良	現場適用性評価 まとめ		
⑦観測点指示ツール高度化技術の開発	開発計画検討	システム開発	システム改良 まとめ			
⑫システム全体評価				システム全体評価 まとめ		

a.システム製作及び現場適用性評価(3/71)

① 現場適用のために必要なシステムの概念検討(1/4)

● 要求仕様（ユースケース含む）

「FrontEnd現場適用」に関連する事項

① 現場適用のために必要なシステムの概念検討

③ 1F現場での詳細環境情報収集技術の開発

④ 構造データ迅速処理技術の開発

⑤ 1F現場での迅速解析技術の開発

⑥ 1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発

⑦ 観測点指示ツール高度化技術の開発

1.	現場で線源・線量率の推定が可能なシステムを構成すること (現場での再計測と利用時間の限定を想定)	1F現場でデータ取得と共に線源を逆推定し再計測等の現場計測活動に寄与
2.	線源対策効果の推定検証可能なシステムを構成すること (精度の高い推定と除染提案機能を想定)	1F新事務本館で精度の高い推定結果を基に線源対策立案等に寄与
3.	取得及び解析データを蓄積し、一覧できるシステムを構成すること (簡易データベース機能を想定)	1F新事務本館で取得データの整理と解析結果サーベイによる今後の環境改善計画策定に寄与

● システム概要 上記要求仕様を満たすため、3つのシステム（3D-ADRES-Indoor）を構成する

1.	FrontEnd	現場点群から低解像度メッシュを基に迅速線源逆推定機能（分オダで計算）を開発
2.	Pro	詳細解析機能として高精度逆推定（倍半分の精度）と線源対策機能（提案機能）を開発
3.	BackEnd	データ蓄積機能と蓄積状況を一覧機能（ダッシュボード）を開発に寄与、LLM含

● システム要件

1.	FrontEnd	GPU搭載ノートPC上での高速動作（並列処理による高速性能追及）、GUI含む
2.	Pro	ハイエンドPCでの詳細機能の高速動作（最適化処理による提案機能追及）
3.	BackEnd	ストレージ上のデータ一覧構成とプレビュー処理の動作（可視化機能追及）

● データモデル

1.	FrontEnd	点群、線量率⇒STL(メッシュ)、 CSV(線量率)⇒VTK(可視化)
2.	Pro	FrontEndと同等（より高精細）
3.	BackEnd	計測データとFrontEnd、Pro 処理データ

①現場適用のために必要なシステムの概念検討(2/4)

システムの維持、保守管理の課題とそれに対する対策

【3D-ADRES-Indoorの開発方針(国の補助事業開始時に指針を定義)】

- ・メンテナンス性を向上させるため、可能な限り、業界標準且つ共通の言語体系にて開発（Python、Unity、Fortran等）する。
- ・特殊な機能追加に当たっても、可能な限りオープンソースのライブラリを使うことでブラックボックス化を防ぐ。



上記の開発方針に従い、各システム開発を実施

- ・**FrontEnd、Pro**共に、主要部分はPythonにて開発
 - ・逆推定のコア部分は高速性を活かすためFortranにて開発
 - ・ウォークスルーや被ばく評価部分は3Dイメージを用いるためUnityにて開発
- ⇒各開発ツールにて利用しているライブラリ等の多くがオープンソースであり改変が可能である。また、上記プログラム言語で開発したシステムのソースコード一式はJAEAが所有し、その管理（メンテナンスや改良その他）を実施できる状態としている。
- ・**BackEnd**については、オンプレのコンポーネントはPythonにて開発し、クラウドコンポーネントは、クラウドアプリを用いて動作する。なお、クラウドアプリは、アプリのアップデートにあわせて変更が必要となる可能性がある他、ライセンス等の使用条件の変更も想定されるが、代替アプリは豊富にある。
- ⇒継続性を含めてメンテナンス性は高く、改変も可能である。

a.システム製作及び現場適用性評価(5/71)

①現場適用のために必要なシステムの概念検討(3/4)

3D-ADRES-Indoor : システム全体像及びその動作イメージ(1/2)

本事業で開発するシステム (3D-ADRES-Indoor)

FrontEnd (基幹システム)

現場での線源逆推定機能
(分オーダでの推定計算)

GPU搭載ノートPC



1F現場

- データ入力機能(遠隔+マニュアル)
点群+画像+線量
↓
サーフェスマップ(低解像度メッシュ)
- 簡易推定機能
(線源逆推定+線量推定)
- 簡易線源対策機能(線量推定)
- データ転送機能

②1)より詳細な解析結果との比較
2)再々観測指示

①現場データの供給

観測指示点

Pro

(詳細解析支援システム)

ハイエンド
デスクトップPC



詳細解析機能
(倍半分以上の線量率推定精度)
(線源対策立案機能)



1F新事務本館

- 線源対策立案等機能(解析+最適化)
点群+画像+線量
↓
3Dモデリング(3D-CAD)
- 高精度推定機能
(線源逆推定+線量推定)
- 高精度線源対策機能(線量推定)
- FrontEnd支援/制御機能

③データの授受

③データの授受

BackEnd

(データ管理支援システム)



データストレージ ダッシュボード機能
(データ蓄積状況可視化)

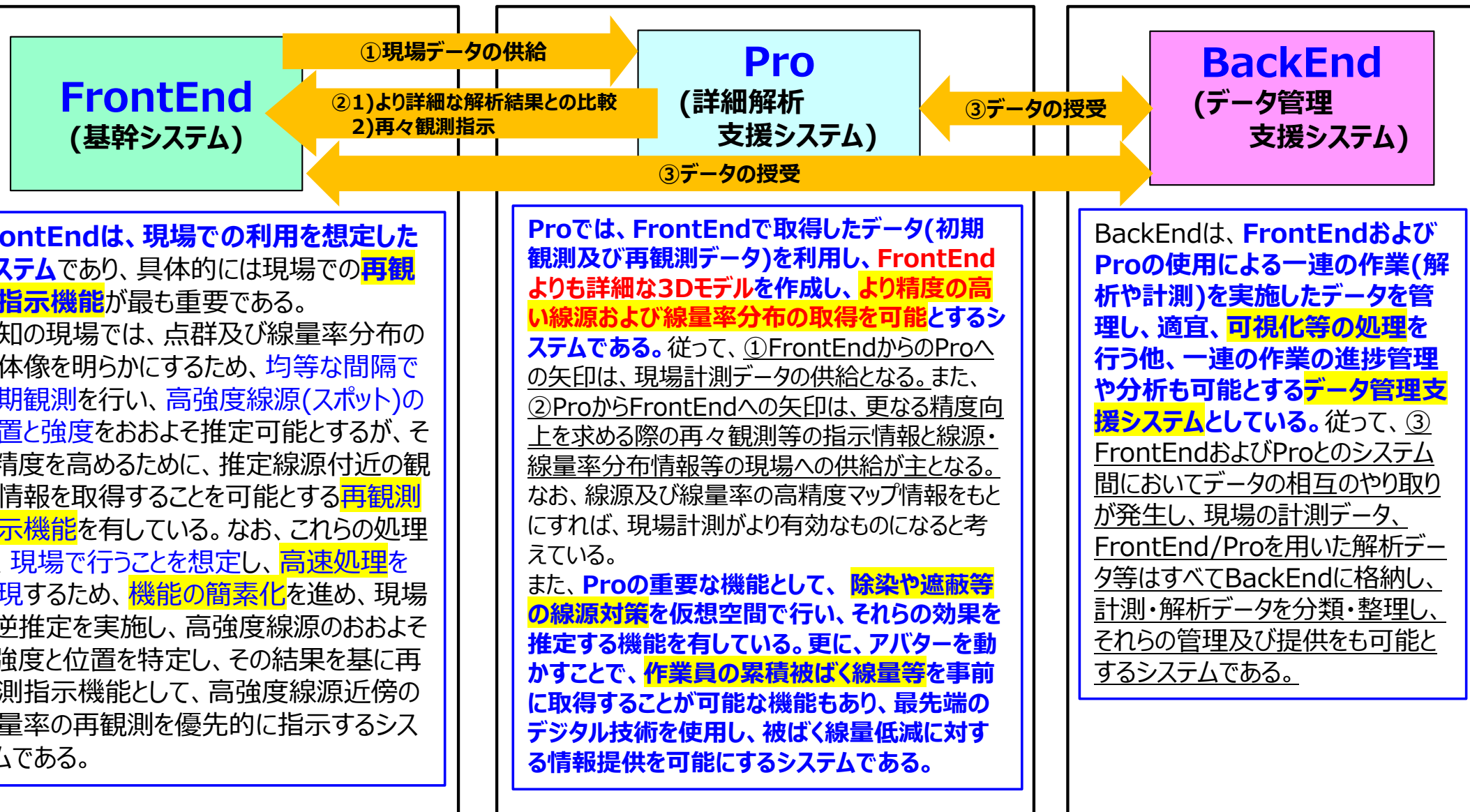
1F新事務本館

- データ集約/アーカイブ機能仕様策定
環境データセットの構成
ダッシュボードでの表示
- データサーバ機能仕様策定

a.システム製作及び現場適用性評価(6/71)

①現場適用のために必要なシステムの概念検討(4/4)

3D-ADRES-Indoor：システム全体像及びその動作イメージ(2/2)



a.システム製作及び現場適用性評価(7/71)

② 1F現場測定(1/6)

● 目標

1F5号機のモックアップ試験を踏まえ、現場計測のスケジュール及び実施内容を策定し、作業に伴う手続き対応及び計画書類等を完備し、2号機、3号機での現場適用性評価を実施する。

● 計画[2023(令和5)年度：TRL4⇒5] [2024(令和6)年度：TRL5⇒6]

環境データ計測を行い、それらを用いてFrontEndによる解析(推定)を行う

環境データ計測

- (1)推定に必要な点群・線量率計測
- (2)推定精度向上のための線量率計測(再観測含む)
- (3)推定結果検証のための線量率計測



FrontEndによる推定

- (1) 構造表面メッシュ作成
- (2) 線源逆推定
- (3) 線量率推定
- (4) 観測点指示(再観測含む)
- (5) 線源対策

● スケジュール(1F現場計測のみ抜粋)

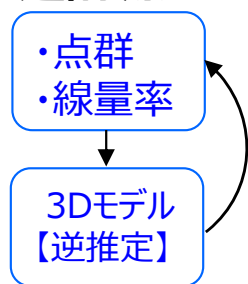
実施内容		2023（令和5）年度		2024（令和6）年度	
a. システム製作及び現場適用性評価					
	②1F現場測定	検討		現場計測 (2号機1階・2階)	
		モックアップ試験 (5号機1階)		現場計測 (3号機1階)	
		手続き対応、計画書類等準備		線源・線量率マップの製作	

② 1F現場測定(2/6)

計測機器構成図



遠隔測定

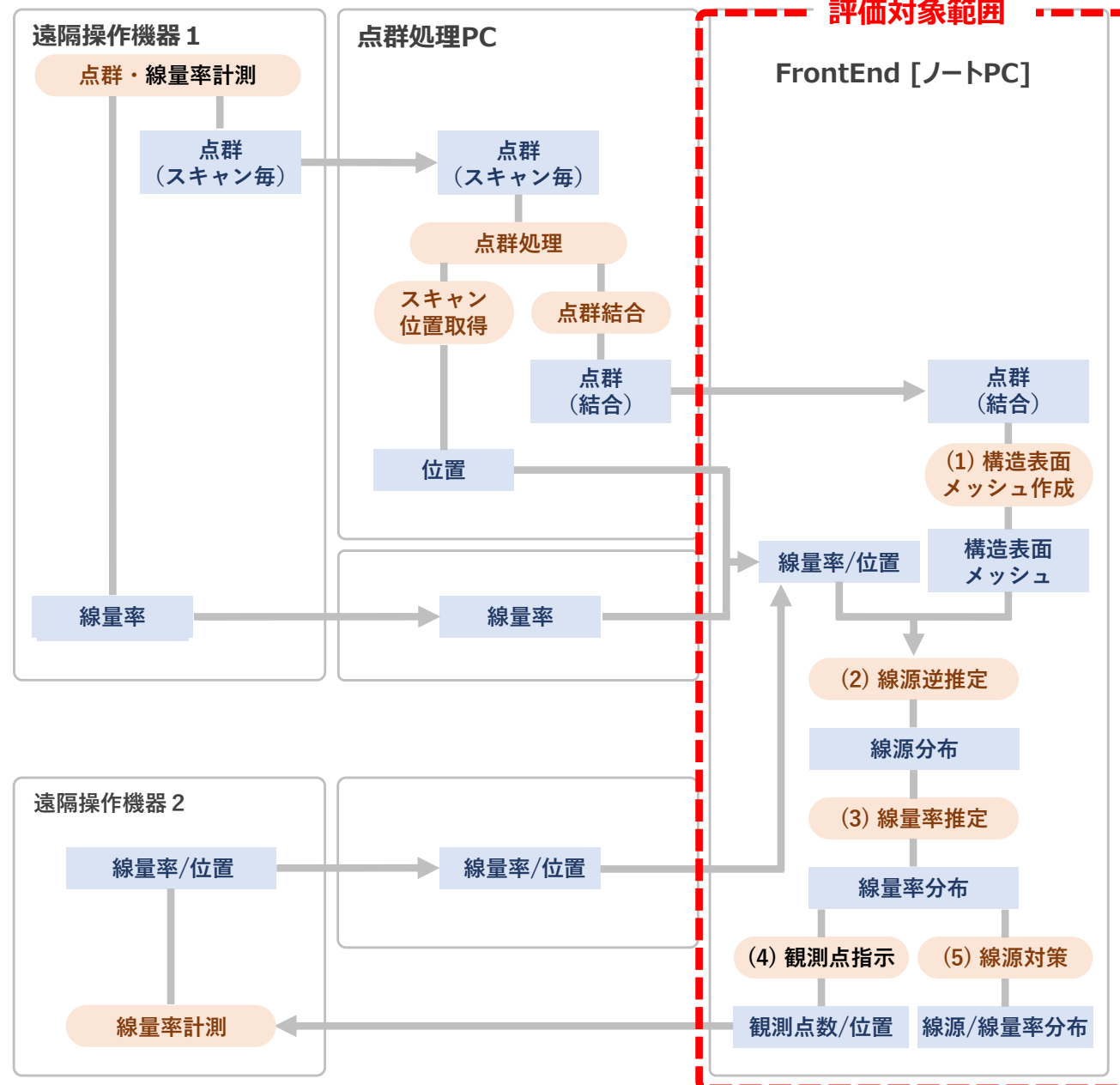


※¹ Boston Dynamics社製
<https://www.reprogeo.be/faro-focus-premium-3d-scanner-met-hybrid-reality-capture>

※² FARO社製
<https://www.fishersci.co.uk/shop/products/radeye-g-ex-series-personal-radiation-detectors/10016389>

※³ Thermo scientific社製

評価作業手順フロー図



a.システム製作及び現場適用性評価(9/71)

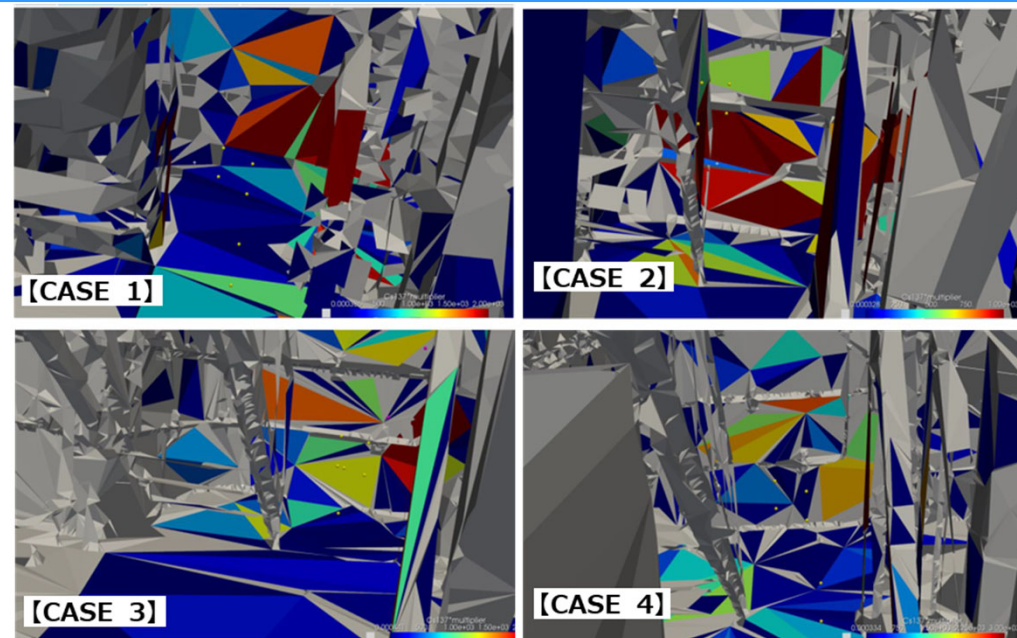
② 1F現場測定(3/6)

5号機モックアップ試験時の評価

	点群数	メッシュ 生成時間	再観測 指示	再現性評価	
				階段	壁配管
case 1	3,233,159点 (共通データ)	29.2秒 (49,998面)	約3分	△	×
case 2		41.7秒 (61,276面)	約5分	△	△
case 3		1分18秒 (112,355面)	約15分	○	○
case 4		2分12秒 (170,573面)	約35分	○	○

【再現性評価】

○：再現できている △：ある程度再現できている ×：再現できていない



【5号機1階南東側現場のメッシュ化処理後の画像】

※上記case1～4のメッシュ化画像は下の点群画像から処理しているもの

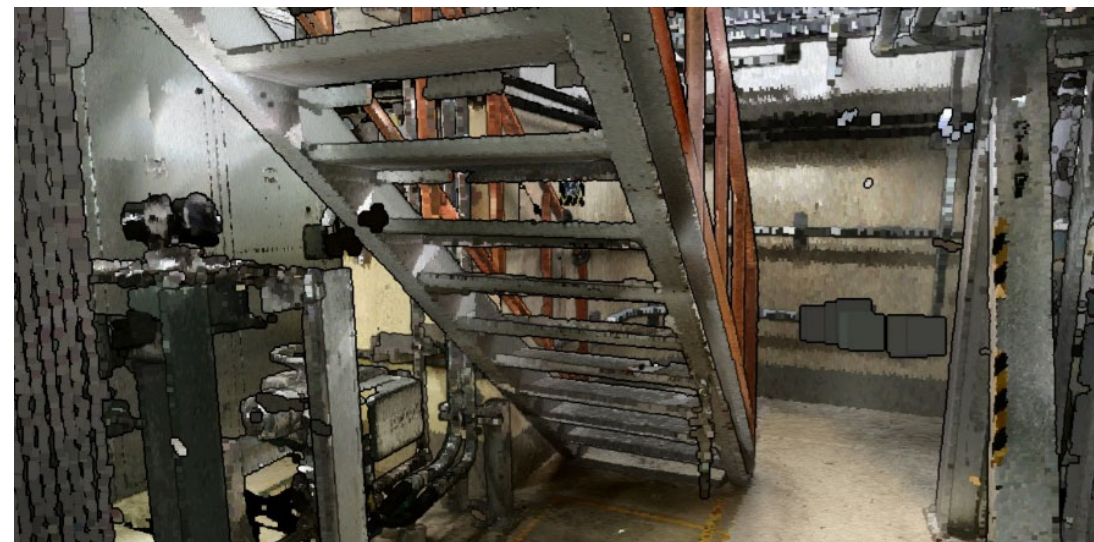
5号機モックアップ試験結果からの改良点及び改良後の成果

【改良点】

- ・線量計自動認識機能の開発、実装
- ・可視化機能の強化等
- ・逆推定から再観測指示にかかる計算時間の短縮(10分程度)

【改良後の成果】

- ・20万面メッシュで、逆推定から再観測指示までの計算時間を目標とする、10分以内を達成



【5号機1階南東側現場の状況】※参考画像：カラー点群データ

② 1F現場測定(4/6)

SPOTを用いた線量率測定方法と位置精度[1F5号機現場での計測の様子]



0m（床上）の測定例

アーム先端に装着したRadEyeを床に対し
水平に配置し測定



1.5m（床上）の測定例

アーム先端を垂直に最大に伸ばした
配置（1.5m）で測定

※1m計測については、SPOTの背中の高さで線量率の計測を実施

位置精度 { 垂直位置精度：～10cm（RadEye計測器の大きさ程度）
水平位置精度：～50cm（1F図面とSPOTのカメラ画像による位置確認）

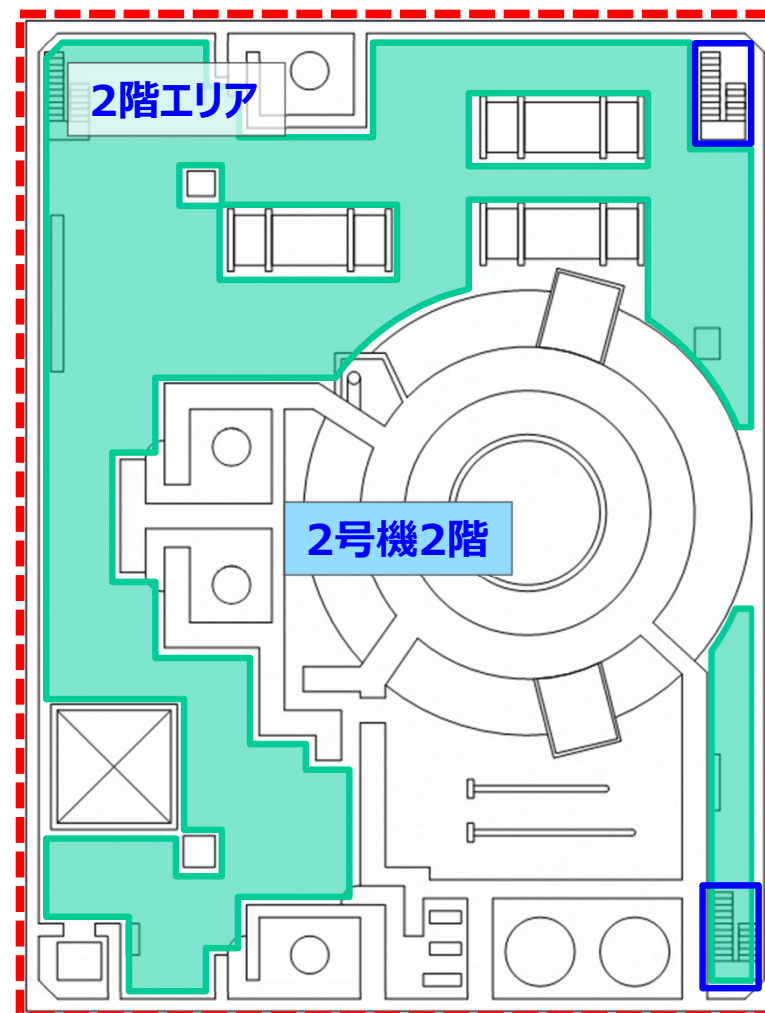
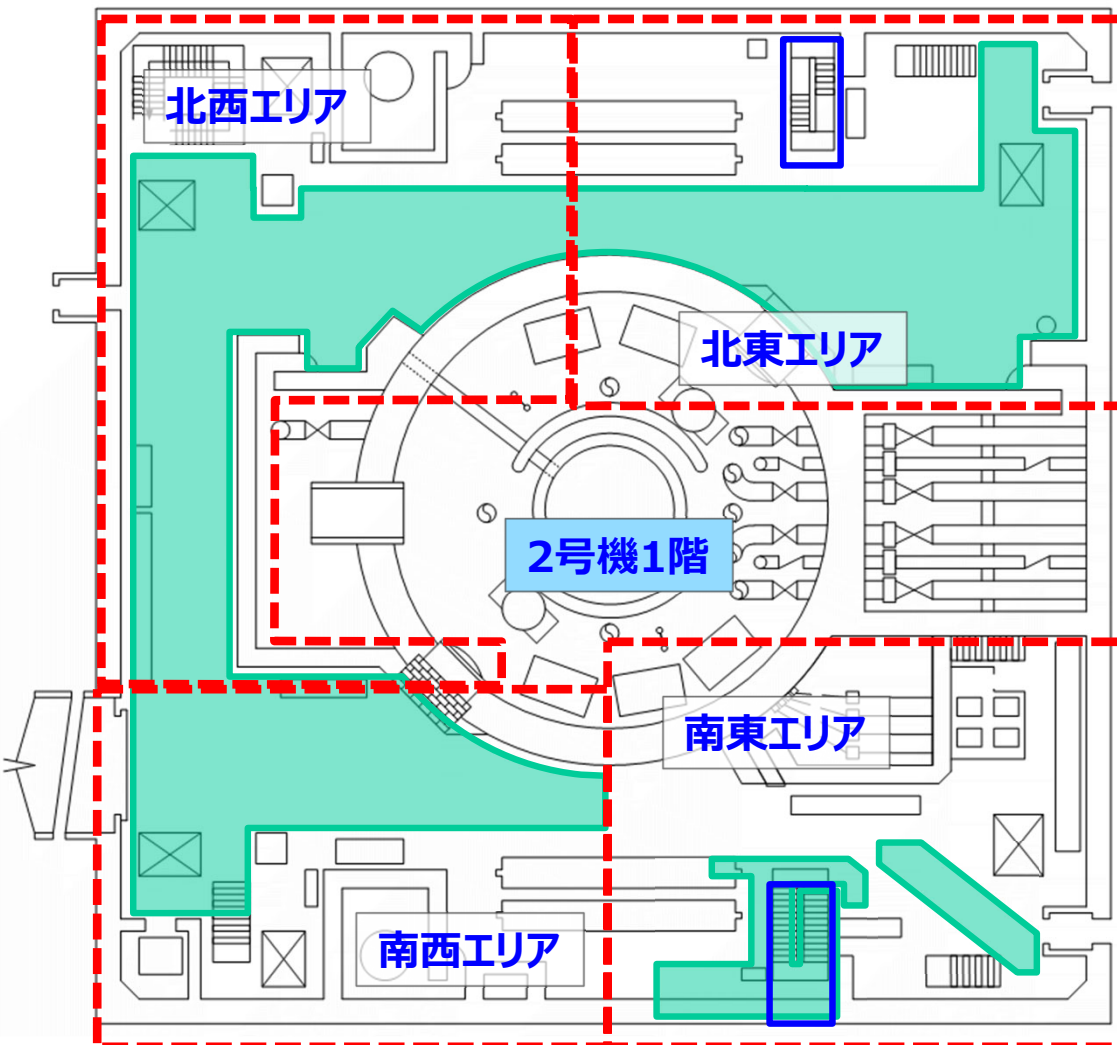
※RadEyeの読み取りは、計測位置に静置した後、数回読み取り平均値とする。

② 1F現場測定(5/6)

- 点群及び線量率の初期及び再観測を実施
- 線源・線量率マップの作成と線量率比較検証を実施

【凡例】

- 1階⇔2階への移動階段
- システムの評価エリア
- 計測対象エリア(SPOT移動が可能な範囲)

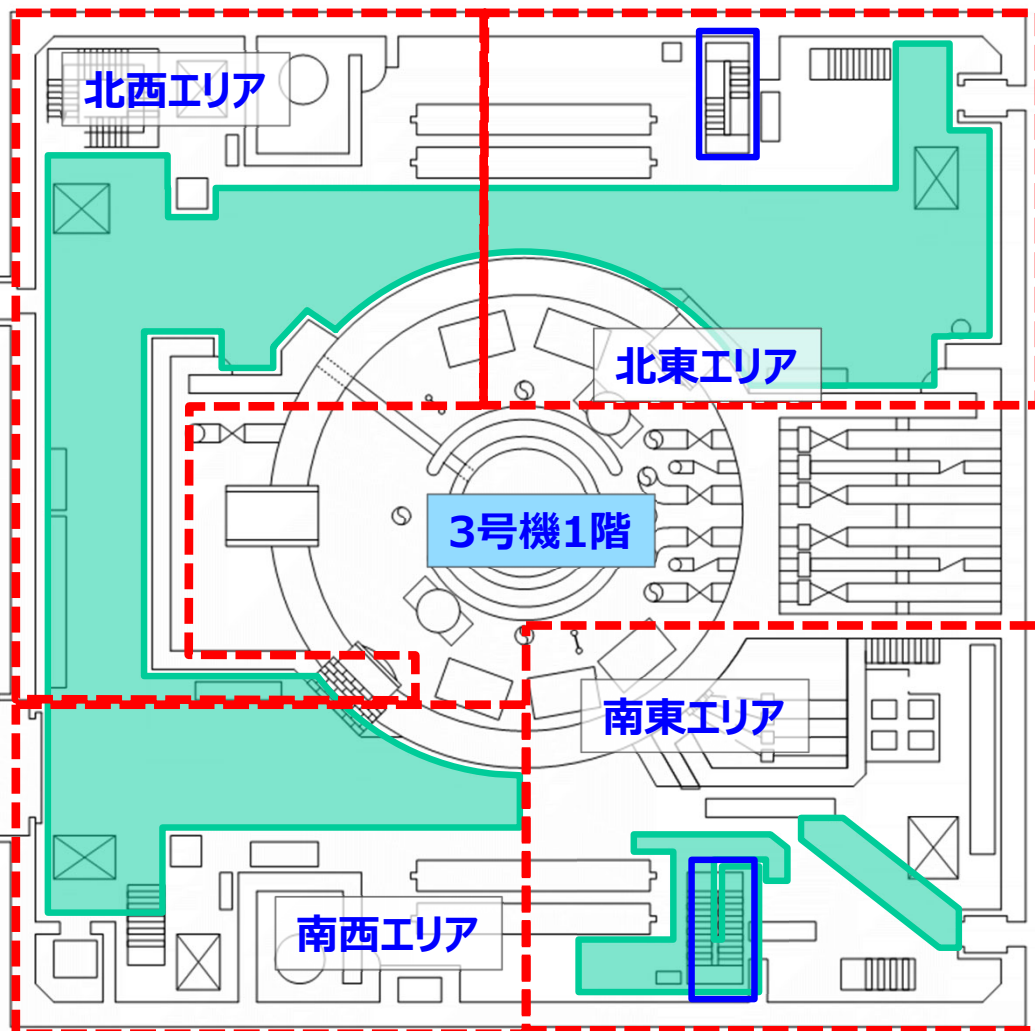


1F2号機1階及び2階 (試験対象：全エリア)

a.システム製作及び現場適用性評価(12/71)

② 1F現場測定(6/6)

- 点群及び線量率の初期及び再観測を実施
- 線源・線量率マップの作成と線量率比較検証を実施



1F3号機1階 (試験対象：全エリア)

【凡例】

- 1階⇔2階への移動階段
- システムの評価エリア
- 計測対象エリア(SPOT移動が可能な範囲)

実施期間における作業員人数と被ばく線量等

1F 2号機計測 (1階・2階)

実施期間	R6.6.17～8.2 (期間中の22日間)
作業員人数	32名 (JAEA・TPT※)
総実効線量	45.39 (人・mSv)
平均実効線量	1.42 (mSv)
最高実効線量	3.89 (mSv)

1F3号機計測 (1階)

実施期間	R6.10.15～11.8 (期間中の14日間)
作業員人数	32名 (JAEA・TPT※)
総実効線量	33.46 (人・mSv)
平均実効線量	1.05 (mSv)
最高実効線量	3.69 (mSv)

※TPT：東京パワーテクノロジー(株)

「平均実効線量」および「最高実効線量」の説明は用語集(p.185)を参照

③ 1F現場での詳細環境情報収集技術の開発(1/2)

1.FrontEnd 現場適用性評価(1/10)

「FrontEnd現場適用」に関連する事項

- ① 現場適用のために必要なシステムの概念検討
- ② 1F現場での迅速解析技術の開発
- ③ 1F現場での詳細環境情報収集技術の開発
- ④ 1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発
- ⑤ 構造データ迅速処理技術の開発
- ⑥ 観測点指示ツール高度化技術の開発

目標：SPOTを使用して1F現場の線量計を自動読み取りするツールの開発

※従来は、作業員が1F現場に入り、測定器の数値を目視し、手書きで記録をとるという方法であったが、これを作業員が現場に行くことなく自動で計測器の数値を読み取り、記録するツールを開発する、というのが目的である。

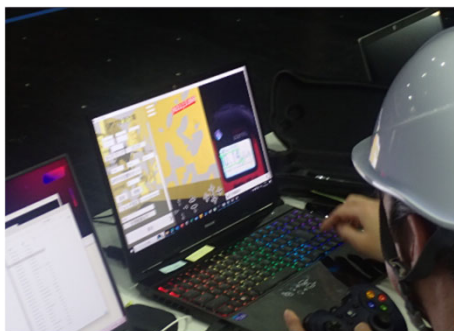
【評価項目】

変動する線量率の時間平均値と、各々の値を現場PCで保存可能か？

【2年間の成果①】

- ・NARREC試験場で環境情報収集手法(線量率表示自動読取)ツール試験を実施⇒動作確認済み
- ・2号機の現場試験からネットワーク環境に強く依存することが判明⇒1F固有ネットワーク対応要

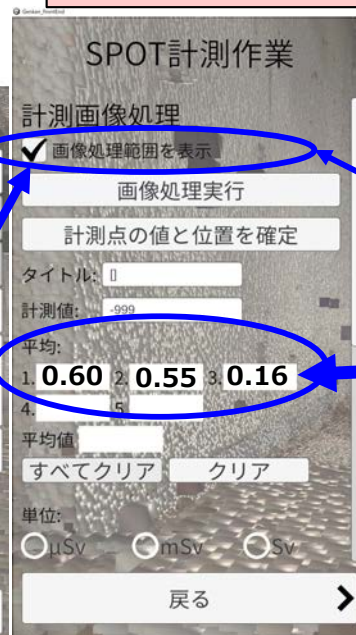
NARREC試験場における試験の様子



FrontEnd メニューバーから
SPOT計測作業を選択



再観測指示点[赤色](自動認識の対象)



画像処理範囲の表示を指定する

数値及び単位を
自動認識

計測器表示をオン

線量計

【結果】
確認済み

a.システム開発及び現場適用性評価(14/71)

③ 1F現場での詳細環境情報収集技術の開発(2/2)

1. FrontEnd 現場適用性評価(2/10)

「FrontEnd現場適用」に関連する事項

- ① 現場適用のために必要なシステムの概念検討
- ③ 1F現場での詳細環境情報収集技術の開発
- ④ 構造データ迅速処理技術の開発

- ⑤ 1F現場での迅速解析技術の開発
- ⑥ 1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発
- ⑦ 観測点指示ツール高度化技術の開発

目標：SPOTを使用して1F現場の線量計を自動読み取りするツールの開発

【2年間の成果②】

- ・3号機の現場試験にて1F固有ネットワークを介し線量率計の画像及びその変動の自動取得に成功
- ・実際に現場で画像を取得すると線量計の位置のズレ・ライトをつけると光ったり、現場での画像の劣化が生じるため、線量率の自動認識に改良の余地がある⇒現場での計測画像を更に取得し学習を進める必要性あり

【評価項目】
変動する線量率の時間平均値と、各々の値を現場PCで保存可能か？

【結果】
確認済み

再観測指示点[赤色](自動認識の対象)

計測点の値と位置を確定

タイトル: Value
計測値: Value
平均: Value
1: Value 2: Value 3: Value
4: Value 5: Value
平均値: Value
すべてクリア クリア
単位:
☐ μSv ☐ mSv ☐ Sv
☒ 自動認識
外部ファイル処理:
連続計測実行 30 秒間
戻る

画像処理範囲の表示を指定する

数値及び単位を自動認識

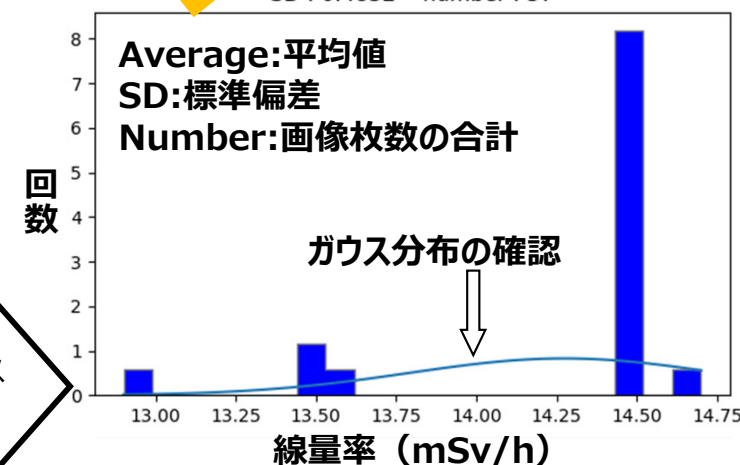
線量計

課題：
現場の劣化画像を用いた場合、
認識に失敗することが判明
⇒現場での画像を更に取得し
学習を進める必要性有り

【補足説明】「連続計測実行」30秒間(ここで設定可)の計測をすると、自動で線量率のヒストグラムが作成され、同時に平均値を算出する。

取得数値の統計性を確認
可能な機能を構築

average : 14.2737
SD : 0.4832 number : 57



a.システム開発及び現場適用性評価(15/71)

④ 構造データ迅速処理技術の開発(1/2)

1. FrontEnd 現場適用性評価(3/10)

「FrontEnd現場適用」に関連する事項

- ① 現場適用のために必要なシステムの概念検討
- ② 1F現場での詳細環境情報収集技術の開発
- ③ 構造データ迅速処理技術の開発
- ④ 1F現場での迅速解析技術の開発
- ⑤ 1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発
- ⑥ 観測点指示ツール高度化技術の開発

【目標】

- 現場で線源逆推定用3Dメッシュを迅速に生成すること
- 短時間でリアルな3Dメッシュ作成を達成できること

【評価項目】

- ① 現場PCでリアルな3Dモデルを構築できるか？
- ② 現場で数分以内でリアルな3D構築モデルを視認できるか？

【2年間の成果①】

- ・2号機の現場計測結果を踏まえ、FrontEndのメッシュ化機能を改良。(ボイドのない3Dモデル作成と法線方向※の整理)

FrontEnd(現場での計測作業支援システム)の試験(2号機)

※法線方向：メッシュ面から線量率観測点への向き
用語集：p.186参照



現場映像のテクスチャマッピング(20万面)

【結果】上記評価項目の ①及び②を確認

- ① 10分程度で3Dモデル構築完了を確認 (リアリティーある現場モデルを構築可能)
- ② ウォークスルーアプリを作成 (30秒程度)し、3D(現場)モデルを視認

a.システム開発及び現場適用性評価(16/71)

④ 構造データ迅速処理技術の開発(2/2)

1. FrontEnd 現場適用性評価(4/10)

「FrontEnd現場適用」に関連する事項

- ① 現場適用のために必要なシステムの概念検討
- ③ 1F現場での詳細環境情報収集技術の開発
- ④ 構造データ迅速処理技術の開発

- ⑤ 1F現場での迅速解析技術の開発
- ⑥ 1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発
- ⑦ 観測点指示ツール高度化技術の開発

【目標】

- 現場で線源逆推定用3Dメッシュを迅速に生成すること
- 短時間でリアルな3Dメッシュ作成を達成できること

【評価項目】

- ① 現場PCでリアルな3Dモデルを構築できるか？
- ② 数分以内でリアルな3D構築モデルを確認できるか？

【2年間の成果②】

・ 3号機の現場計測により、FrontEndのメッシュ化機能の課題を解決。(3Dモデル作成と法線方向(*)の整理)

※法線方向：メッシュ面から線量率観測点への向き
用語集：p.186参照

FrontEnd(現場での計測作業支援システム)の試験(3号機)



現場映像のテクスチャマッピング(20万面)

【課題】ボイドレスメッシュ作成と メッシュ法線方向の整理

- ① 点群密度によりボイドの発生と構造物が膨らんでしまう課題を最適化し解決
- ② メッシュ法線方向を整理(メッシュ面の屋内向き法線方向がミスフィットする課題を解決)

a.システム開発及び現場適用性評価(17/71)

⑤ 1F現場での迅速解析技術の開発

1.FrontEnd 現場適用性評価(5/10)

【目標】1F現場での迅速解析技術の開発

【2年間の成果】

- ・2号機の現場計測結果を踏まえ、高速化実装技術の改良の実施
- ・再観測指示の高速化に着手し、再観測指示ツールの計算コストの低減に成功

【FrontEnd現場適用】に関連する事項

- ① 現場適用のために必要なシステムの概念検討
- ③ 1F現場での詳細環境情報収集技術の開発
- ④ 構造データ迅速処理技術の開発

⑤ 1F現場での迅速解析技術の開発

- ⑥ 1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発
- ⑦ 観測点指示ツール高度化技術の開発

【補足】再観測指示ツールの計算コスト低減
再観測指示ツールは、5号機モックアップ試験(数10分の時間を要した)を踏まえ、システム改良を行い、数分の範囲(2~3分程度)で再観測指示が可能となり、計算コスト低減に成功。

再観測指示ツールの目標

線源予測地点周囲の
観測可能地点を決定する

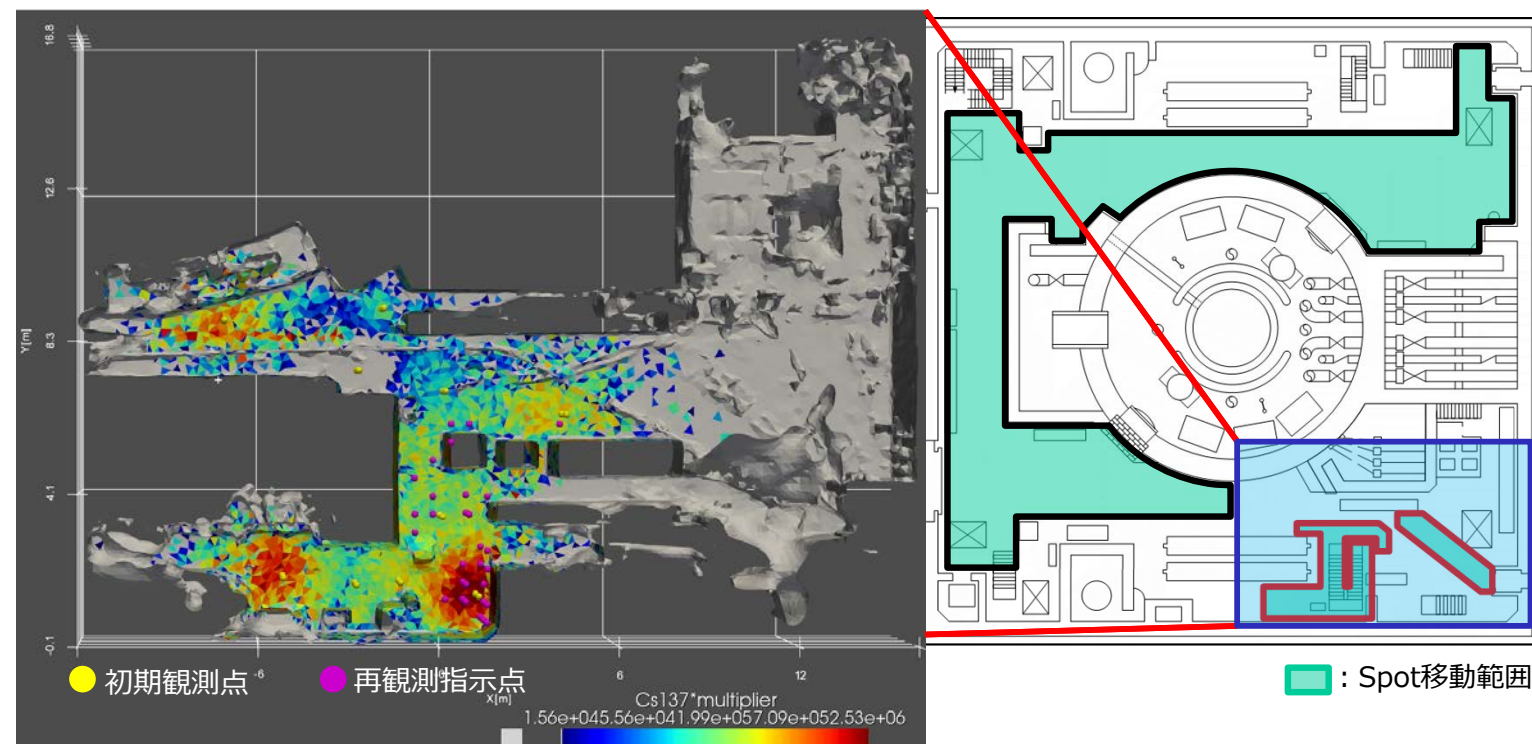
現場での情報収集の最適化

評価項目：

面数(n^2)の計算時間

面数(n)の計算時間に改良

※20万面モデルでも数分程度
で再観測指示点を提案



線源の可視化結果による線源強度図(2号機1階)

a.システム開発及び現場適用性評価(18/71)

⑥ 1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発(1/2)

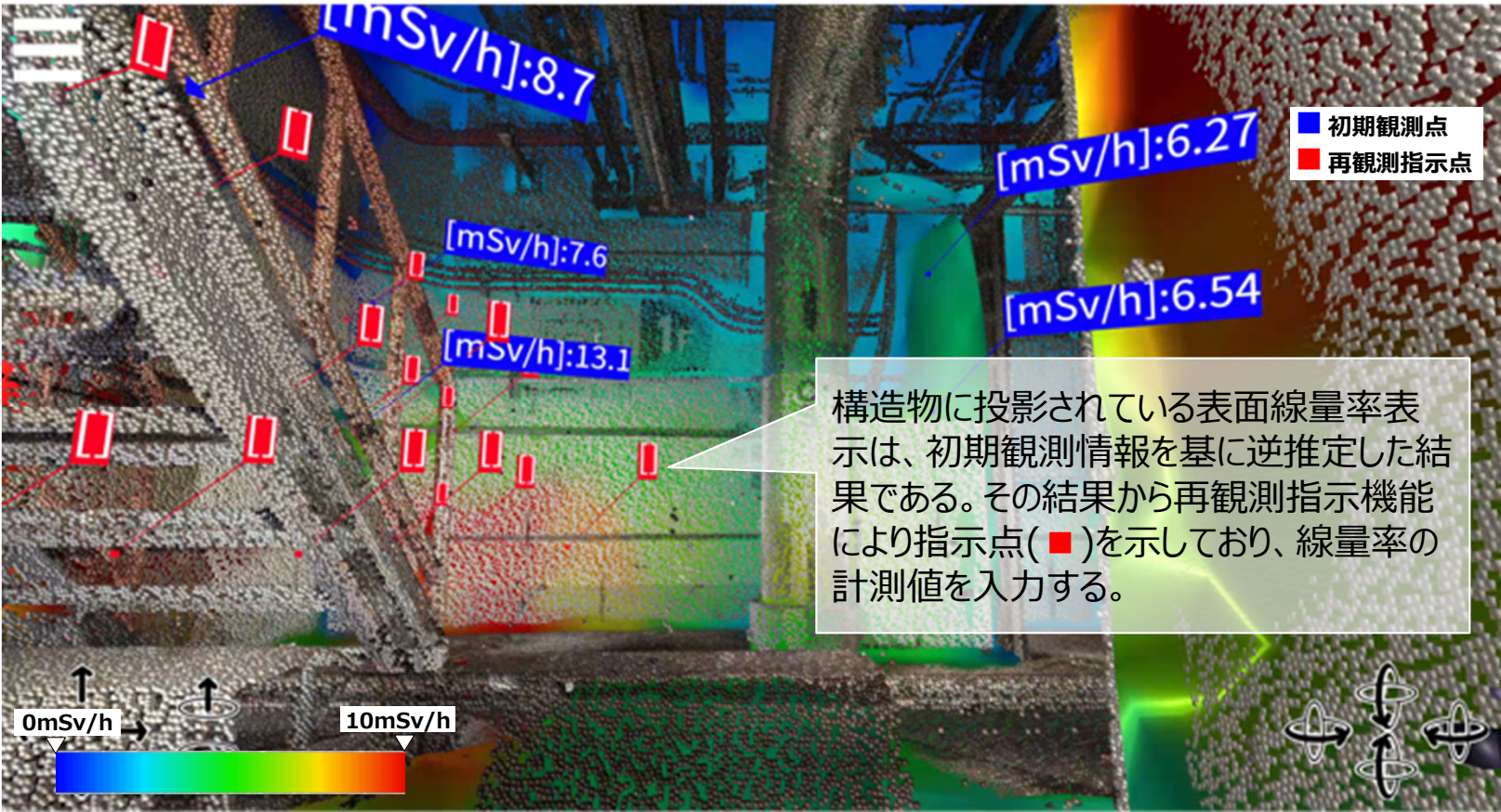
1.FrontEnd 現場適用性評価(6/10)

目標：1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発

「FrontEnd現場適用」に関連する事項

- ① 現場適用のために必要なシステムの概念検討
- ③ 1F現場での詳細環境情報収集技術の開発
- ④ 構造データ迅速処理技術の開発
- ⑤ 1F現場での迅速解析技術の開発
- ⑥ 1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発
- ⑦ 観測点指示ツール高度化技術の開発

【2年間の成果①】 2号機の現場計測結果を踏まえ、可視化技術の改良版をテストし、修正作業を実施



2号機1階南東エリアのウォークスルー機能について

【評価項目】

現場で迅速に線源分布情報を確認可能か？

構造物に表面線量率を投影

【結果】

容易な操作(ゲーム感覚)で線源分布を視認可能

高速可視化3D
ウォークスルーアプリ作成
(現場作成時間:30秒程度)

高速デジタルツイン(※)技術

(※) 現実に瓜二つの仮想空間上の対象用語集(p.184)参照

a.システム開発及び現場適用性評価(19/71)

⑥ 1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発(2/2)

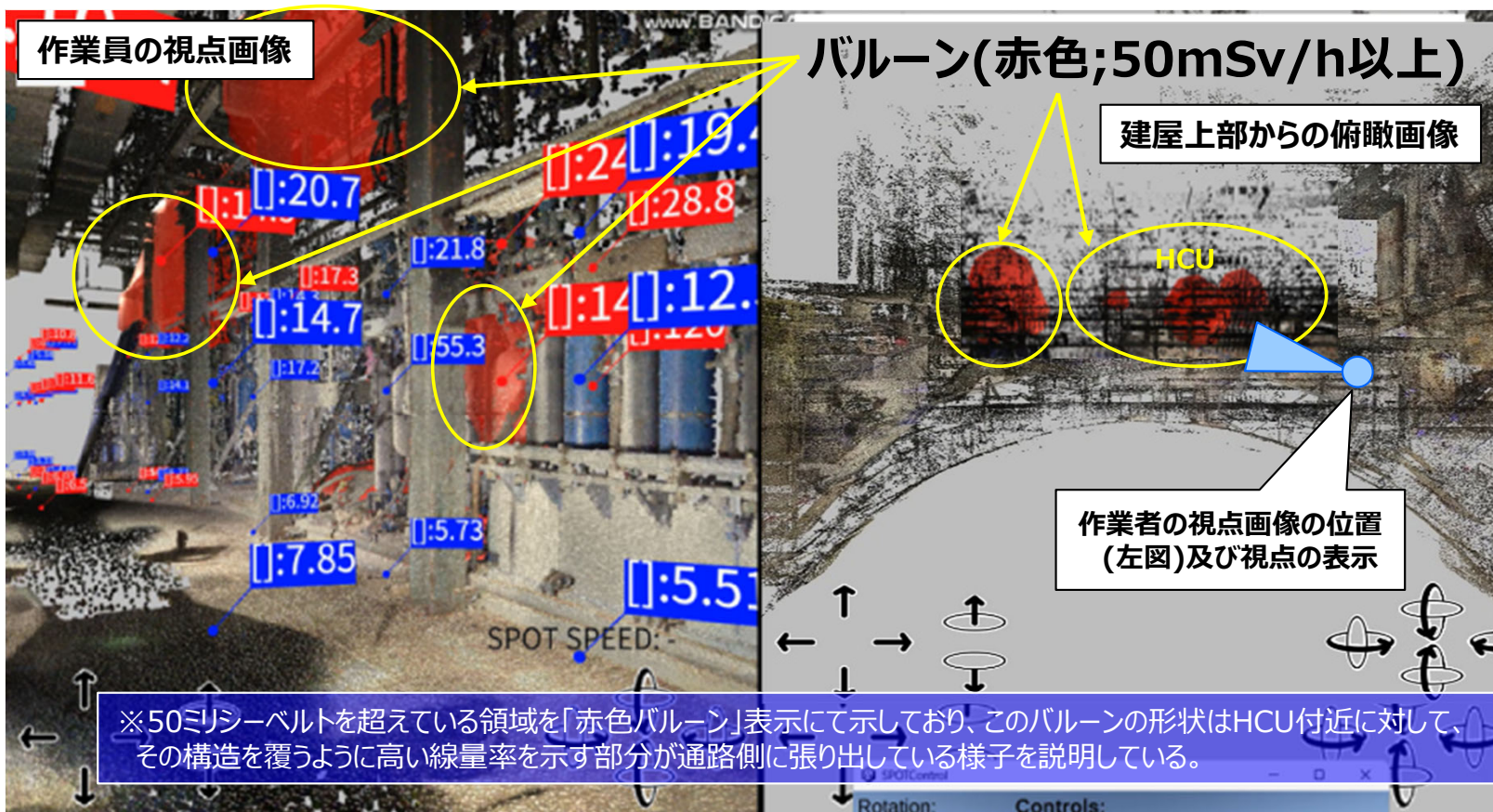
1.FrontEnd 現場適用性評価(7/10)

「FrontEnd現場適用」に関連する事項

- ① 現場適用のために必要なシステムの概念検討
- ③ 1F現場での詳細環境情報収集技術の開発
- ④ 構造データ迅速処理技術の開発
- ⑤ 1F現場での迅速解析技術の開発
- ⑥ 1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発
- ⑦ 観測点指示ツール高度化技術の開発

目標：1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発

【2年間の成果②】 3号機の現場計測結果より可視化技術の改良を施し修正作業を確認



3号機1階北東エリア (HCU近辺のウォークスルー画像)

【改良項目】

線量率分布情報を現場にて容易に確認可能か？

高線量域をバルーン表示

【結果】

容易な操作(ゲーム感覚)で線量率分布を視認可能

高速可視化3D
ウォークスルーアプリ作成
(現場作成時間:30秒程度)

高速デジタルツイン(※)技術

(※) 現実に瓜二つの仮想空間上の対象用語集(p.184)参照

a.システム開発及び現場適用性評価(20/71)

⑦観測点指示ツール高度化技術の開発(1/2)

1.FrontEnd 現場適用性評価(8/10)

「FrontEnd現場適用」に関連する事項

- ①現場適用のために必要なシステムの概念検討
- ③1F現場での詳細環境情報収集技術の開発
- ④構造データ迅速処理技術の開発
- ⑤1F現場での迅速解析技術の開発
- ⑥1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発
- ⑦観測点指示ツール高度化技術の開発

目標：観測点指示ツール高度化技術の開発

【2年間の成果①】

- ・2号機の現場計測を通して、限定された領域にて適切な再観測指示点を指示する改良を付加し確認済み
- ・2号機の現場計測を通して、再観測指示機能の改良として、ベイズ推定利用再観測指示手法の効率化を検討



再観測指示点(●)の表示[平面図]

【評価項目】的確な指示が必須な現場にて、再観測指示を迅速に提案可能か？

再観測指示

※結果(1)または(2)を「選択可」



再観測指示点の表示(ウォークスルー画面)

結果(1)線源特定に向けた指示ツール

推定線源周囲の観測可能点の指示

- ・限られた時間内での最適観測に有利
- ・無駄な観測を省き、線源同定に寄与

LASSO寄与率行列⇒観測次元拡大⇒精度向上確認

※P.57-59にて説明

結果(2)線量率分布を取得するための指示ツール

線量率分布の「不確かさ」を減少させるための観測点指示

ベイズ推定+LASSO ⇒ ベイジアンLASSO(※)

※自動遠隔計測に向く取り組み

高速化が実用化に向けた鍵⇒更なる検討を実施

※ベイジアンLASSOについては本資料末尾の用語集(p.185)を参照

a.システム開発及び現場適用性評価(21/71)

⑦観測点指示ツール高度化技術の開発(2/2)

1.FrontEnd 現場適用性評価(9/10)

「FrontEnd現場適用」に関連する事項

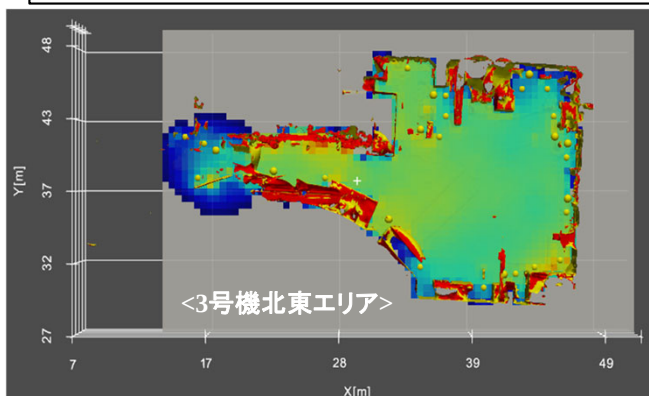
- ①現場適用のために必要なシステムの概念検討
- ③1F現場での詳細環境情報収集技術の開発
- ④構造データ迅速処理技術の開発

- ⑤1F現場での迅速解析技術の開発
- ⑥1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発
- ⑦観測点指示ツール高度化技術の開発

目標：観測点指示ツール高度化技術の開発

【2年間の成果②】

・3号機の現場計測を通して、再観測指示機能の改良として、ベイズ推定利用再観測指示機能を確認

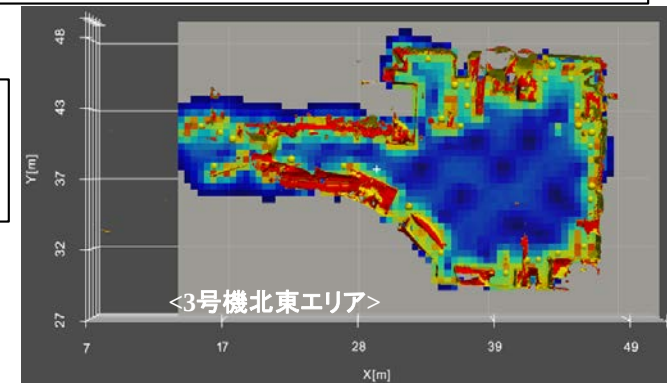


<線量率平均値分布>

【評価項目】ベイズ推定利用により再観測指示機能は適切な指示が可能か？

再観測指示

※結果(1)または(2)を「選択可」



<線量率標準偏差>

結果(1)線源特定に向けた指示ツール

推定線源周囲の観測可能点の指示

- ・限られた時間内での最適観測に有利
- ・無駄な観測を省き、線源同定に寄与

LASSO寄与率行列⇒観測次元拡大⇒精度向上確認

※P.57-59にて説明

結果(2)線量率分布を取得するための指示ツール

線量率分布の「不確かさ」を減少させるための観測点指示

ベイズ推定+LASSO ⇒ ベイジアンLASSO(※)

線量率標準偏差分布より適切な再観測指示が可能であることを確認

※ベイジアンLASSOについては本資料末尾の用語説明(p.185)を参照

a.システム開発及び現場適用性評価(22/71)

1.FrontEnd 現場適用性評価(10/10)

「FrontEnd現場適用」に関連する事項

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| ①現場適用のために必要なシステムの概念検討 | ⑤1F現場での迅速解析技術の開発 |
| ③1F現場での詳細環境情報収集技術の開発 | ⑥1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発 |
| ④構造データ迅速処理技術の開発 | ⑦観測点指示ツール高度化技術の開発 |

[2023(令和5)年度：TRL4⇒5] [2024(令和6)年度：TRL5⇒6]

1F実測データを用いて有効性を検証し、システムの現場適用性を評価する。

【2年間の成果のまとめ】

- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| ①現場適用のために必要なシステムの概念検討 | ⇒ 報告済(p.14参照) |
| ③1F現場での詳細環境情報収集技術の開発 | ⇒ 現場(2,3号機)で全開発機能検証(将来課題発見) |
| ④構造データ迅速処理技術の開発 | ⇒ 現場(2,3号機)で全開発機能検証 |
| ⑤1F現場での迅速解析技術の開発 | ⇒ 現場(2,3号機)で全開発機能検証 |
| ⑥1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発 | ⇒ 現場(2,3号機)で全開発機能検証 |
| ⑦観測点指示ツール高度化技術の開発 | ⇒ 現場(2,3号機)で全開発機能検証 |

※上記③に関する将来の課題については、遠隔データ収集方法の変更(画像認識による数値取得⇒数値データの直接転送)も含めてより有効かつ柔軟な処理を検討していく。



【実用上更なる利便性取得のための改良点】

- | | |
|-------------------------------|-----------------|
| ● 現場での操作性の向上(ツール動作時間等の表示) | ⇒ 操作性及び視認性向上を確認 |
| ● 3Dメッシュの品質向上(欠損部補完/法線ベクトル補正) | ⇒ 誤推定の回避を確認 |
| ● 逆推定パラメータ事前サーチの実現(迅速な逆推定の実現) | ⇒ 高速性能を確認 |
| ● 線量率分布可視化技術の向上(立体的可視化の実現) | ⇒ 現場での線源位置視認を確認 |

a.システム製作及び現場適用性評価(23/71)

●目標

1F現場情報等から詳細でかつ精度の高い推定(線源特定・対策等)が可能となるシステムを開発する。

●計画 [2023(令和5)年度：TRL4⇒5] [2024(令和6)年度：TRL5⇒6]

線源対策効果の推定検証可能なシステム（精度の高い推定と除染提案機能を想定）を構成し、具体的には、**詳細環境情報による解析技術の開発**(100万面メッシュ以上のものをなるべく短時間で逆推定可能なシステムとすること)、**高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発**(遮蔽、最適化の線源対策前後の比較等)、**線源・線量率詳細処理ツールの開発**等(ウォークスルーアプリで現場状況を詳細に、必要な条件による様々な可視化方法にて再現可能)を実施する。

●スケジュール(Proに対応する部分を抜粋)

実施内容		2023（令和5）年度		2024（令和6）年度	
a. システム製作及び現場適用性評価					
⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発		開発計画検討			
		システム開発			
⑨ 高強度線源対策シミュレーション 処理ツールの開発		開発計画検討			
		システム開発			
⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発		開発計画検討			
		システム開発			
⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発				現場計測(2号機1階・2階)	
				現場適用性評価	
⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発			システム改良		
					まとめ

a.システム製作及び現場適用性評価(24/71)

※①現場適用のために必要なシステムの概念検討【再掲(p.16):Proに関する説明】

3D-ADRES-Indoor : システム全体像及びその動作イメージ

本事業で開発するシステム (3D-ADRES-Indoor)



a.システム製作及び現場適用性評価(25/71)

⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発(1/3)

「Pro現場適用」に関連する事項

⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発

⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発

⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発

2.Pro現場適用性(1/9)

目標：詳細環境情報による解析技術の開発

【評価項目】環境情報から解析対象詳細3Dモデルを構築可能か？

⇒ 【結果】構築可能を確認

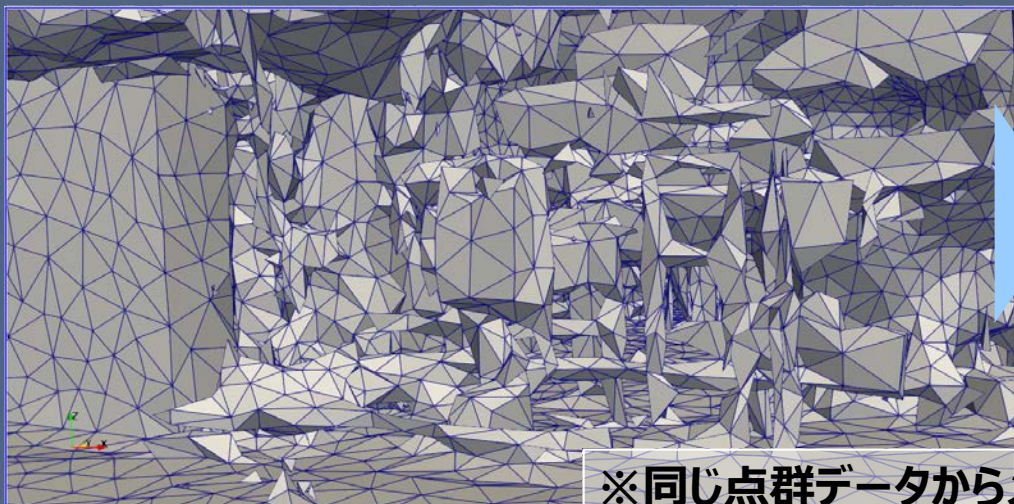
【2年間の成果①】

- ・2号機、3号機で実施した現場計測結果を踏まえ、詳細構造モデル作成技術の改良作業を実施
- ・詳細構造モデル作成に係る自動化の検討を行い、法線処理を自動で行う機能を実装

現場で環境識別ができるメッシュ数下限

※細部まで視認可能だが作成に時間がかかる

ケース1：20万面



ケース2：> 200万面



※同じ点群データからメッシュ作成を行ったもの

FrontEndでの利用上限レベル

Proにて作成⇒1時間程度を要する

a.システム製作及び現場適用性評価(26/71)

⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発(2/3)

2.Pro現場適用性(2/9)

「Pro現場適用」に関連する事項

⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発

⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発

⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発

目標：詳細環境情報による解析技術の開発

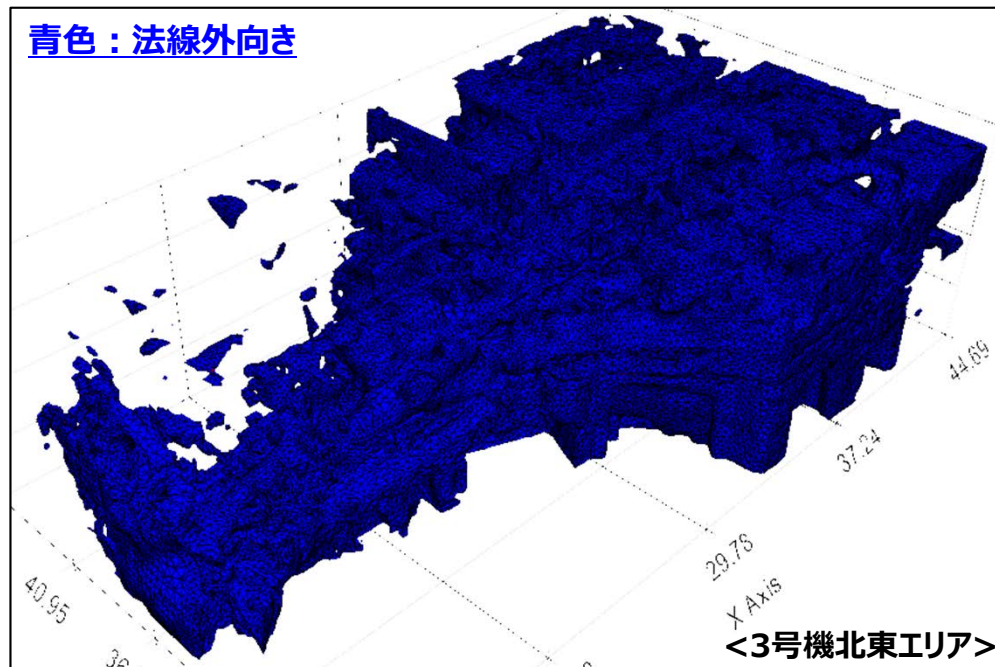
【評価項目】環境情報から解析対象詳細3Dモデルを構築可能か？

⇒ 【結果】構築可能を確認

【2年間の成果②】

・詳細構造モデル作成と同時に簡単な法線処理機能を実装。その処理機能を2、3号機にて確認

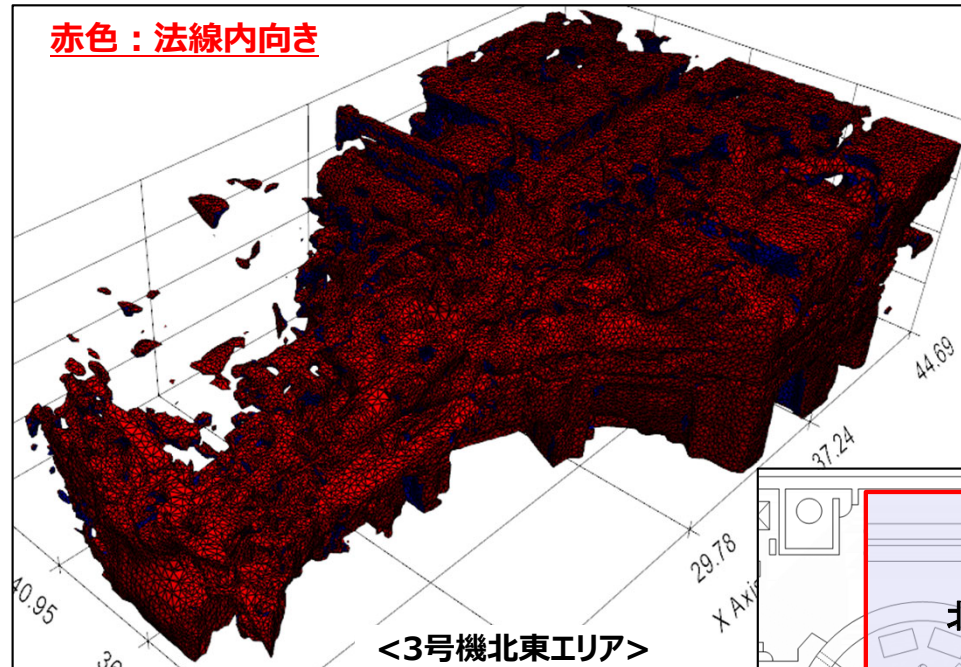
青色：法線外向き



【法線処理前】

※同じメッシュ数での作成を行ったもの

赤色：法線内向き



【法線処理後】



法線ベクトルは、構造物表面から観測点に向けた方向とすることで、放射線の射出方向が判定可能となる。法線処理前には、法線ベクトルが外向きであり、 γ 線放射方向を判定できず、法線処理を行うことで、線量率観測点位置情報から γ 線放射方向を判定可能。

⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発(3/3)

「Pro現場適用」に関連する事項

- ⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発
- ⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発
- ⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発

2.Pro現場適用性(3/9)

目標：詳細環境情報による解析技術の開発

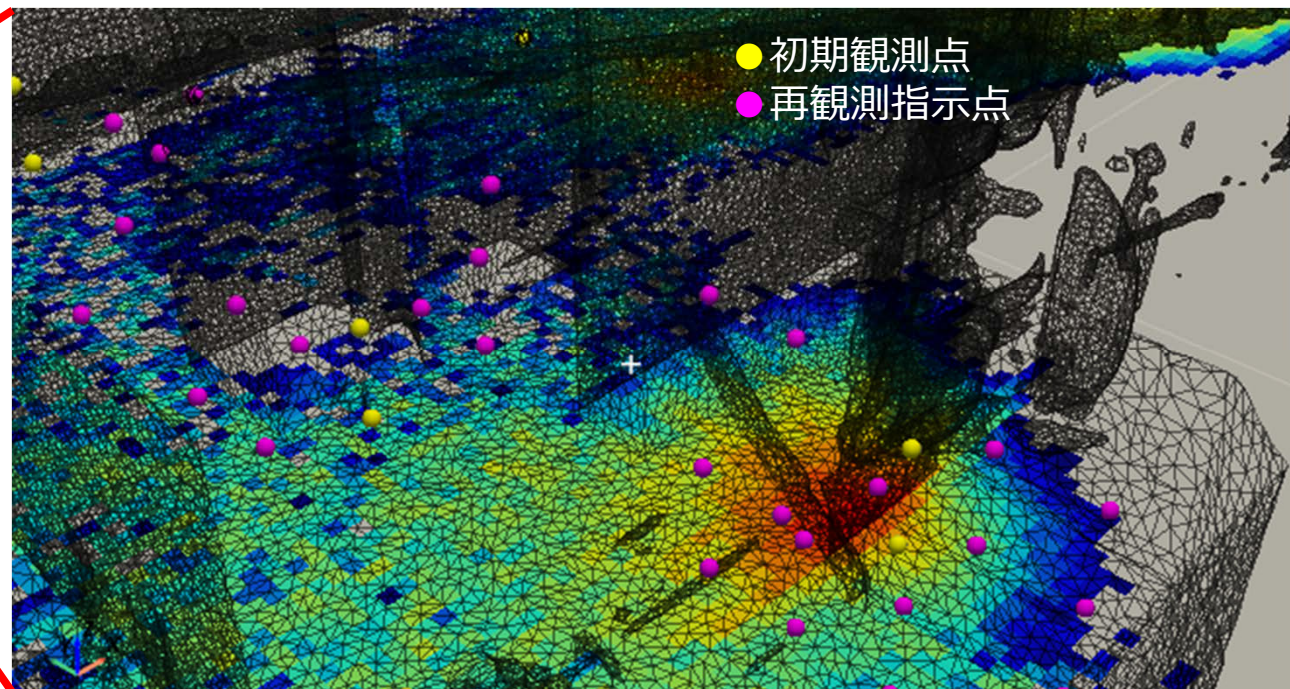
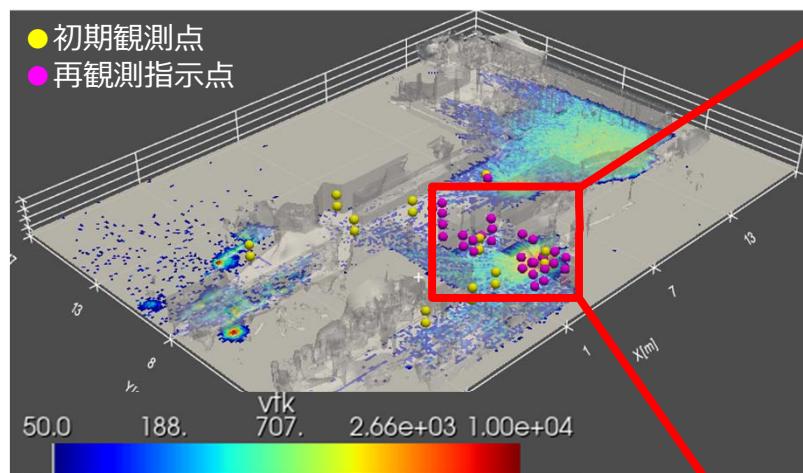
【評価項目】詳細3Dモデルから高精度な線源分布の推定が可能か？

⇒ 【結果】推定可能であることを確認(再観測指示点情報要)

1F2号機1階南東エリア：200万メッシュ数モデルでの逆推定 ⇒ ホットスポット位置の確認

【全体上面図】

【拡大図】



- ・10cm格子レベルでの解像度
- ・交差検証でのチューニング強化

【課題】

更なる精度向上を求める場合は
再々観測が必要となる

【「再観測」及び「再々観測」についての判断基準について】

ベジアンLASSOを用いて、不確かさをどこまで減少させるかという視点で機械的に決められるが、一方、判断基準として、現在のシステムではユーザーの判断に委ねられる。
※ユーザーは、再観測指示点数等の各条件を細かく設定できる。

⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発(1/3)

2.Pro現場適用性(4/9)

「Pro現場適用」に関連する事項

- ⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発
- ⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発
- ⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発

目標：高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発

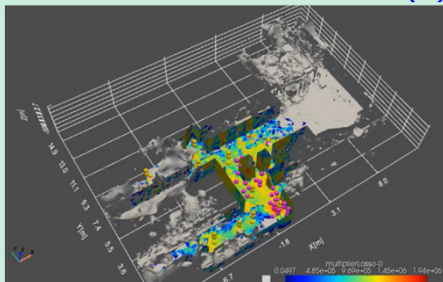
【2年間の成果①】

- ・2号機現場計測結果を踏まえ、高強度線源対策簡易機能の組み込みとそのテストを実施
- ・高強度線源対策最適化手法の改良及びその効果の調査と線源対策最適化手法の更なる改良に着手

【評価項目】
線源対策の最適化が可能か？

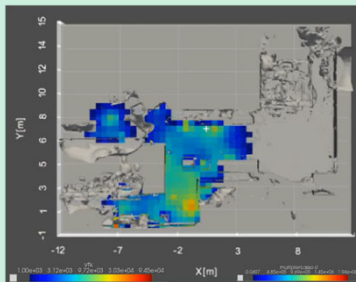
高強度線源対策前の準備～線源対策(除染)※動画をキャプチャしたもの

① 高強度線源対策前の線量率確認(1)



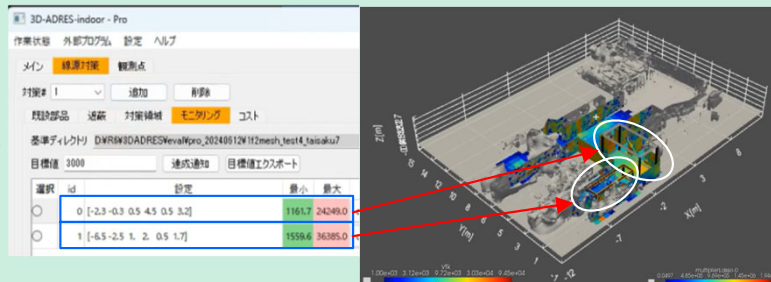
【線源分布図の表示(等角図)】
再観測を完了し、再逆推定～再順推定したもの

② 高強度線源対策前の線量率確認(2)



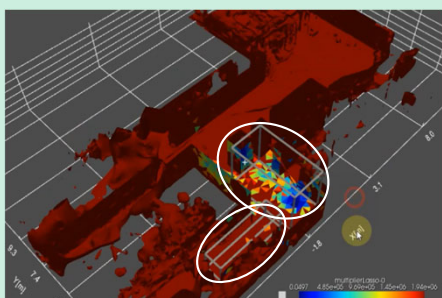
【空間線量率分布図の表示(上面図)】
高さ0.5mでの空間線量率分布を表示

③ 指定対象領域内における線量率分布



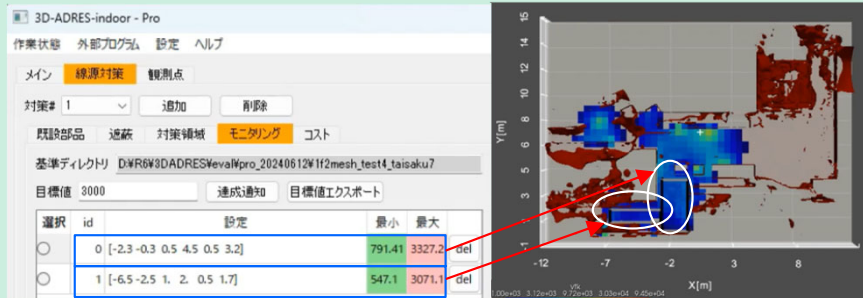
【指定対象領域内】
線量率の最大値・最小値を表示

④ 除染による高強度線源対策最適化中



【指定対象領域を2つ設定し、2領域の除染を実行する】

⑤ 除染による高強度線源対策最適化後



【空間線量率の低減を確認】

【結果】
① 複数の作業空間を指定～4個(上限)

② 指定対象領域毎に上限線量率を指定

③ 上記②を満たす「最適除染率」を提案

④ 上記②を満たす「最適遮蔽材」を提案

⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発(2/3)

2.Pro現場適用性(5/9)

目標：高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発

【2年間の成果②】

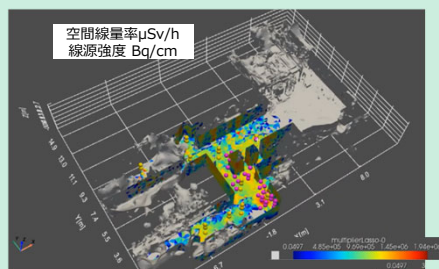
- ・2号機現場計測結果を踏まえ、高強度線源対策簡易機能の組み込みとそのテストを実施
- ・高強度線源対策最適化手法の改良及びその効果についての調査と線源対策最適化手法の更なる改良に着手

【Pro現場適用】に関連する事項

- ⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発
- ⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発
- ⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発

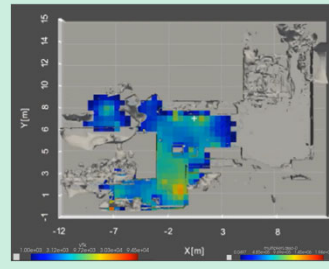
高強度線源対策(鉛遮蔽)※動画をキャプチャしたもの

① 高強度線源対策前の線量率確認(1)



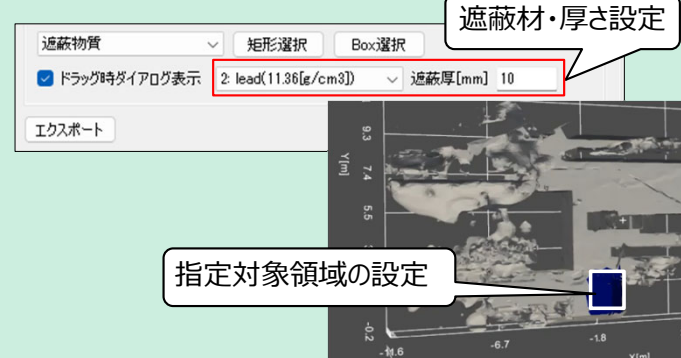
【線源分布図の表示(等角図)】
再観測を完了し、再逆推定～再順推定したもの
※前ページと同じ結果のものを初期条件としている

② 高強度線源対策前の線量率確認(2)



【空間線量率分布図の表示(上面図)】
高さ0.5mでの空間線量率分布を表示

③ 遮蔽材(鉛)の選択と指定対象領域の指定



④ 遮蔽による高強度線源対策中

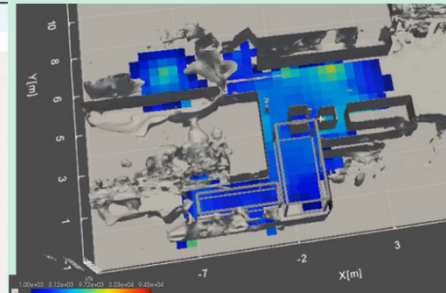
選択	id	設定	最小	最大	
☐	0	[-2.3 -0.3 0.5 4.5 0.5 3.2]	1161.7	24249.0	del
☐	1	[-6.5 -2.5 1.2 0.5 1.7]	1559.6	36385.0	del

【遮蔽前の空間線量率の最大値と最小値】

⑤ 遮蔽による高強度線源対策後

選択	id	設定	最小	最大	
☐	0	[-2.3 -0.3 0.5 4.5 0.5 3.2]	441.61	3207.3	del
☐	1	[-6.5 -2.5 1.2 0.5 1.7]	503.18	3017.4	del

【遮蔽後の空間線量率の最大値と最小値】



【遮蔽後の空間線量率分布】

【評価項目】
線源対策の最適化が可能か？

【結果】
① 複数の作業空間を指定～4個(上限)

② 指定対象領域毎に
上限線量率を指定

③ 上記②を満たす「最適除染率」を提案

④ 上記②を満たす「最適遮蔽材」を提案

⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発(3/3)

2.Pro現場適用性(6/9)

目標：高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発

【2年間の成果③】

- ・2号機の線源対策簡易機能の組み込み(東電ニーズ対応)とそのテストにより機能を確認
- ・線源対策最適化手法の改良機能を確認

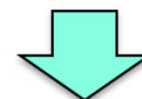
「Pro現場適用」に関連する事項

- ⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発
- ⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発
- ⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発

【評価項目】(東電ニーズ)
高速且つ簡易の線源対策機能を実装

【結果】

簡単に遮蔽材を複数枚設置し線量率分布の変化を可視化する

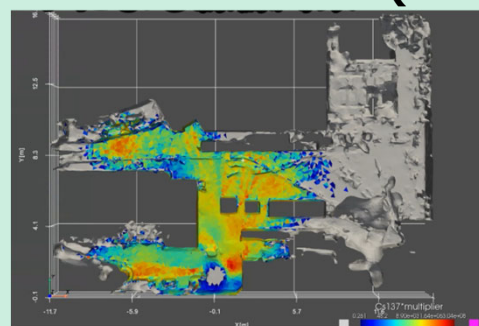


高速計算の実現と可視化に成功

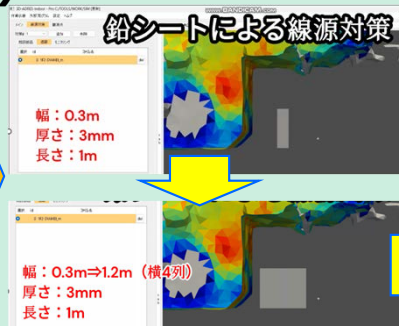
【将来課題】

瞬時に変化を可視化するには、再計算方法を最適化する必要がある/サロゲートモデルでの代替等も考えられる

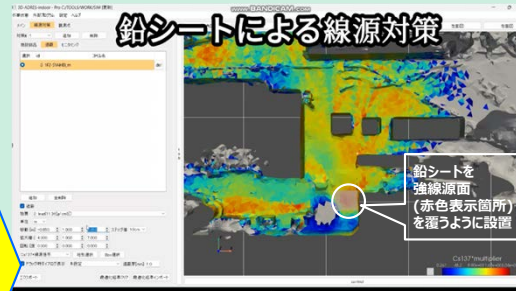
高強度線源対策(鉛遮蔽)



空間線量率分布



鉛シートの設置準備



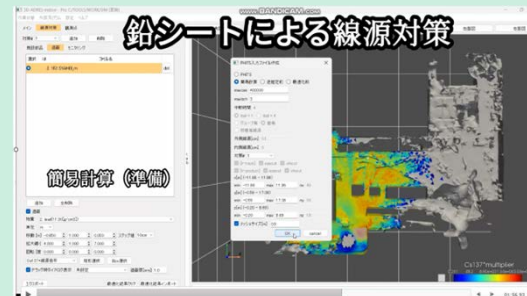
【鉛シートの設置方法】

- ① 高線量部分を4枚シートで横置きに設置
- ② 設置したシートの上に7層分を重層。



線源対策前(ピンク色の部分)

線源対策後(橙色の部分)



簡易計算 (41個)

⑩線源・線量率詳細処理ツールの開発(1/2)

2.Pro現場適用性(7/9)

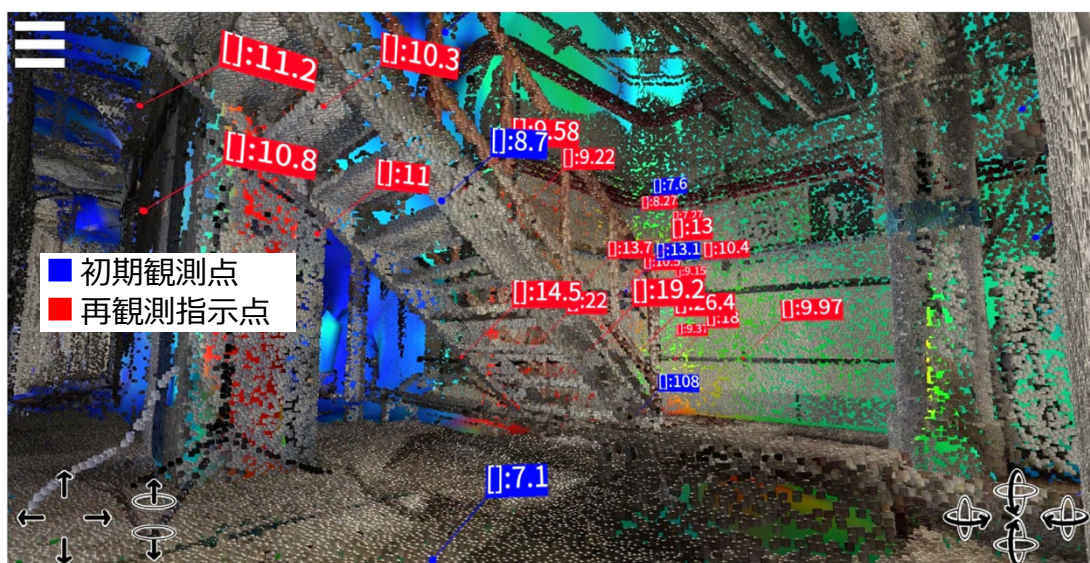
目標：線源・線量率詳細処理ツールの開発

【2年間の成果①】

- ・2号機現場計測結果を踏まえ線源・線量率分布可視化ツールを実装
- ・空間線量率分布の表示や線量率観測点（初期及び再観測）表示の改良に着手

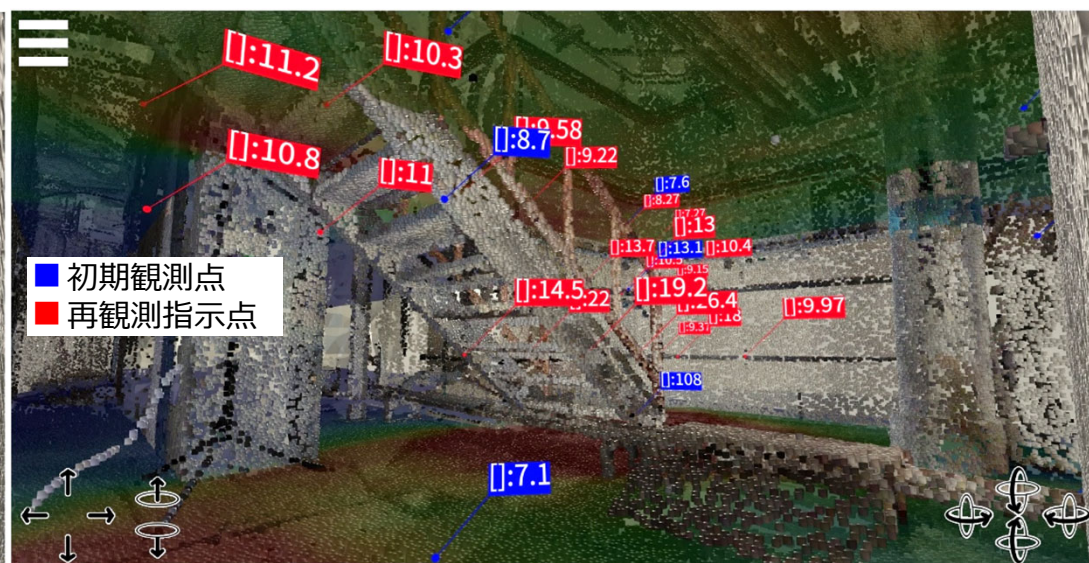
「Pro現場適用」に関連する事項

- ⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発
- ⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発
- ⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発



点群(+表面線量率)の表示

表面線量率(構造物表面上の線量率)を点群にあわせて表示



点群(+断面線量率[高さ0m、1.5m]の表示

高さ0m及び1.5mのみの断面線量率を表示

再逆推定→順推定結果(空間線量率分布)可視化図

【評価項目】線量率3D分布の効果的可視化が可能か ⇒ 【結果】実現済

⑩線源・線量率詳細処理ツールの開発(2/2)

2.Pro現場適用性(8/9)

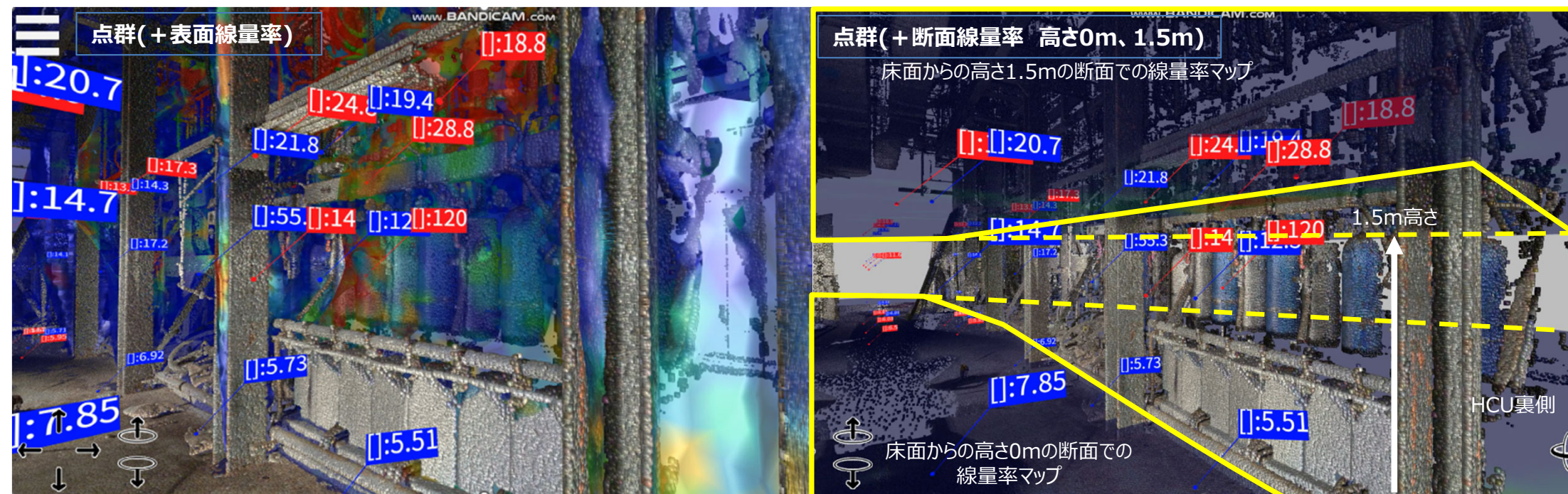
目標：線源・線量率詳細処理ツールの開発

【2年間の成果②】

- ・2,3号機現場計測結果（特に3号機）を踏まえ、線源・線量率分布可視化ツールを検証
- ・空間線量率分布の表示や線量率観測点（初期及び再観測）表示の改良機能を検証

「Pro現場適用」に関連する事項

- ⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発
- ⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発
- ⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発



3号機での再逆推定→順推定結果(空間線量率分布)可視化図

※動画の一部をキャプチャ(断面線量率がわかるように、右画像は、左画像の位置から少し下がった視点になっている)

【評価項目】線量率3D分布の効果的可視化実現を確認 ⇒ 【結果】実現済

2.Pro現場適用性評(9/9)

「Pro現場適用」に関連する事項

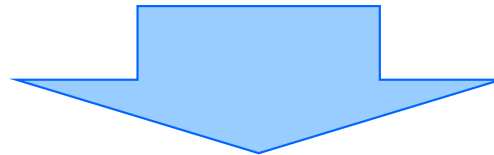
- ⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発
- ⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発
- ⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発

[2023(令和5)年度：TRL4⇒5] [2024(令和6)年度：TRL5⇒6]

1F実測データを用いて有効性を検証し、システムの現場適用性を評価する。

【成果のまとめ】

- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| ⑧ 詳細環境情報による解析技術の開発 | ⇒ 1 Fモデル(2/3号機)で全開発機能検証 |
| ⑨ 高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発 | ⇒ 1 Fモデル(2/3号機)で全開発機能検証 |
| ⑩ 線源・線量率詳細処理ツールの開発 | ⇒ 1 Fモデル(2/3号機)で全開発機能検証 |



【今後の展望】

- ・実用上更なる高機能取得のための改良
 - Proによる詳細線量率推定機能 ⇒ 1Fモデル(2/3号機)によるインベントリー推定への活用
 - 3Dモデル (CAD/BIM) 活用高精度計算の実現 ⇒ 点群及び3D・CAD(BIM)融合によるモデル精度の向上
 - 線量率分布可視化技術の向上 (被ばく評価対応) ⇒ 線源対策評価や被ばく評価等の機能を整理し
利用者の利便性向上

a.システム製作及び現場適用性評価(34/71)

●目標

1F環境情報等に係る取得データの整理と解析結果サーベイによる環境改善計画策定等が可能とする。

●計画 [2023(令和5)年度：TRL4⇒5] [2023(令和6)年度：TRL5⇒6]

取得及び解析データを蓄積し、一覧できるシステムを構成すること。
(簡易データベース機能を想定)

●スケジュール(BackEndに対応する部分を抜粋)

実施内容		2023（令和5）年度		2024（令和6）年度	
a. システム製作及び現場適用性評価					
⑪	データ管理支援ツールの整備作業	R5年度の開発項目はなし		システム整備	
					現場適用性評価
					まとめ

a.システム製作及び現場適用性評価(35/71)

※①現場適用のために必要なシステムの概念検討【再掲(p.16、p.35):BackEndに関する説明】

3D-ADRES-Indoor：システム全体像及びその動作イメージ

本事業で開発するシステム（3D-ADRES-Indoor）

FrontEnd (基幹システム)

現場での線源逆推定機能
(分オーダでの推定計算)

GPU搭載ノートPC



②1より詳細な解析結果との比較
2)再々観測指示

①現場データの供給

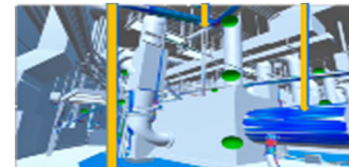
Pro

(詳細解析支援システム)

ハイエンド
デスクトップPC



詳細解析機能
(倍半分以上の線量率推定精度)
(線源対策立案機能)



③データの授受

③データの授受

BackEnd

(データ管理支援システム)



データストレージ ダッシュボード機能
(データ蓄積状況可視化)

1F現場

観測指示点

- データ入力機能(遠隔+マニュアル)
点群+画像+線量
↓
サーフェスマップ(低解像度メッシュ)
- 簡易推定機能
(線源逆推定+線量推定)
- 簡易線源対策機能(線量推定)
- データ転送機能

1F新事務本館

- 線源対策立案等機能(解析+最適化)
点群+画像+線量
↓
3Dモデリング(3D-CAD)
- 高精度推定機能
(線源逆推定+線量推定)
- 高精度線源対策機能(線量推定)
- FrontEnd支援/制御機能

1F新事務本館

- データ集約/アーカイブ機能仕様策定
環境データセットの構成
ダッシュボードでの表示
- データサーバ機能仕様策定

⑪ データ管理支援ツールの整備作業(1/8)

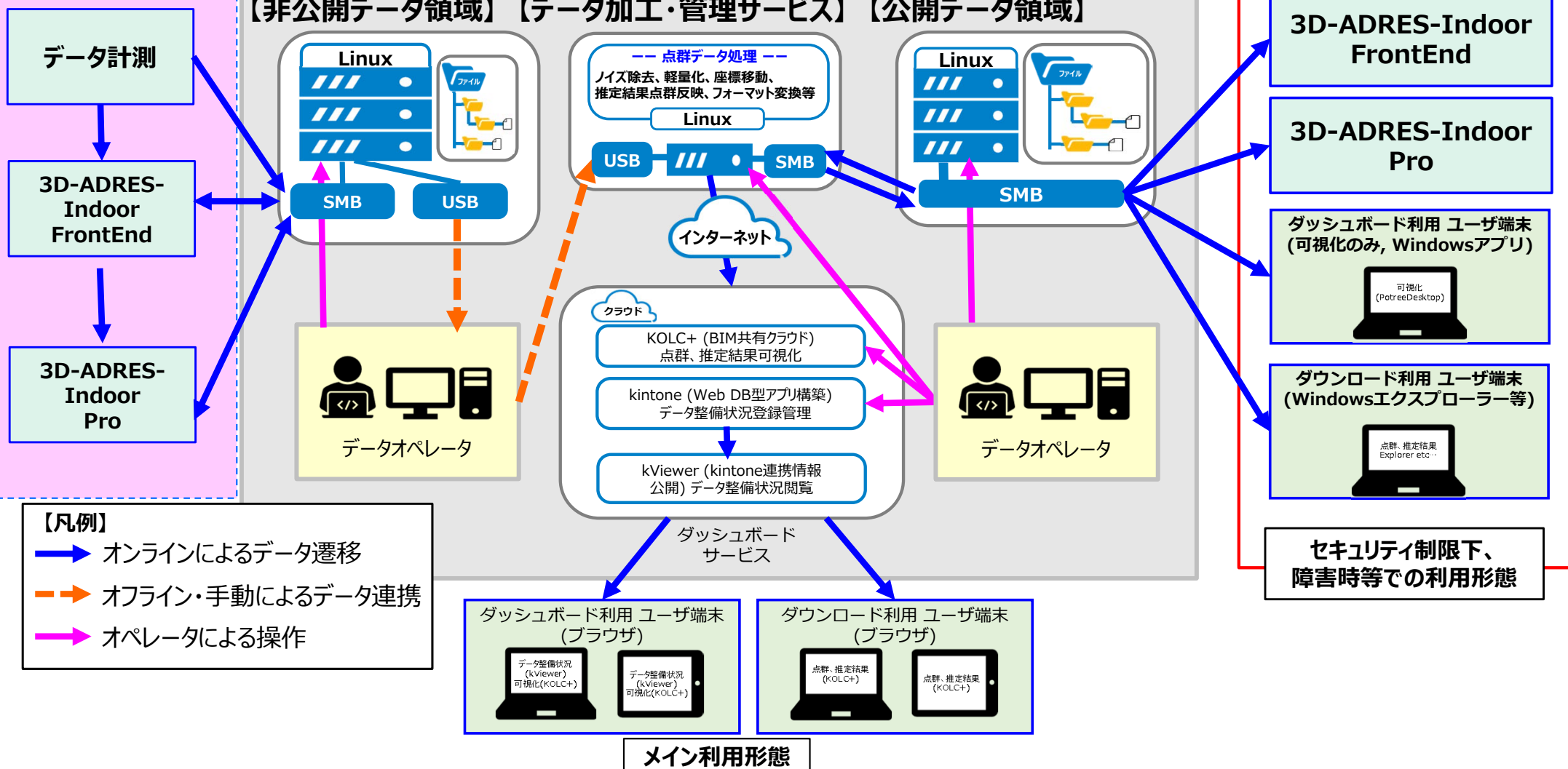
BackEnd(1/8)

BackEndシステムのシステム構成：データフロー詳細図

3D-ADRES-Indoor BackEnd/OnP

3D-ADRES-Indoor BackEnd/Cloud

【非公開データ領域】 【データ加工・管理サービス】 【公開データ領域】



a.システム製作及び現場適用性評価(37/71)

⑪データ管理支援ツールの整備作業(2/8)

BackEnd(2/8)

BackEndシステムのシステム構成：データフロー図の説明

3D-ADRES-Indoor Backendは
 ①非公開データ領域 ②データ加工・管理サービス
 ③公開データ領域 ④ダッシュボードサービス
 の4つに分類される。これら①～④がそれぞれのシステムが連携することで、
 1つの3D-ADRES-Indoor Backendというシステムを構成している。

②データ加工・管理サービス

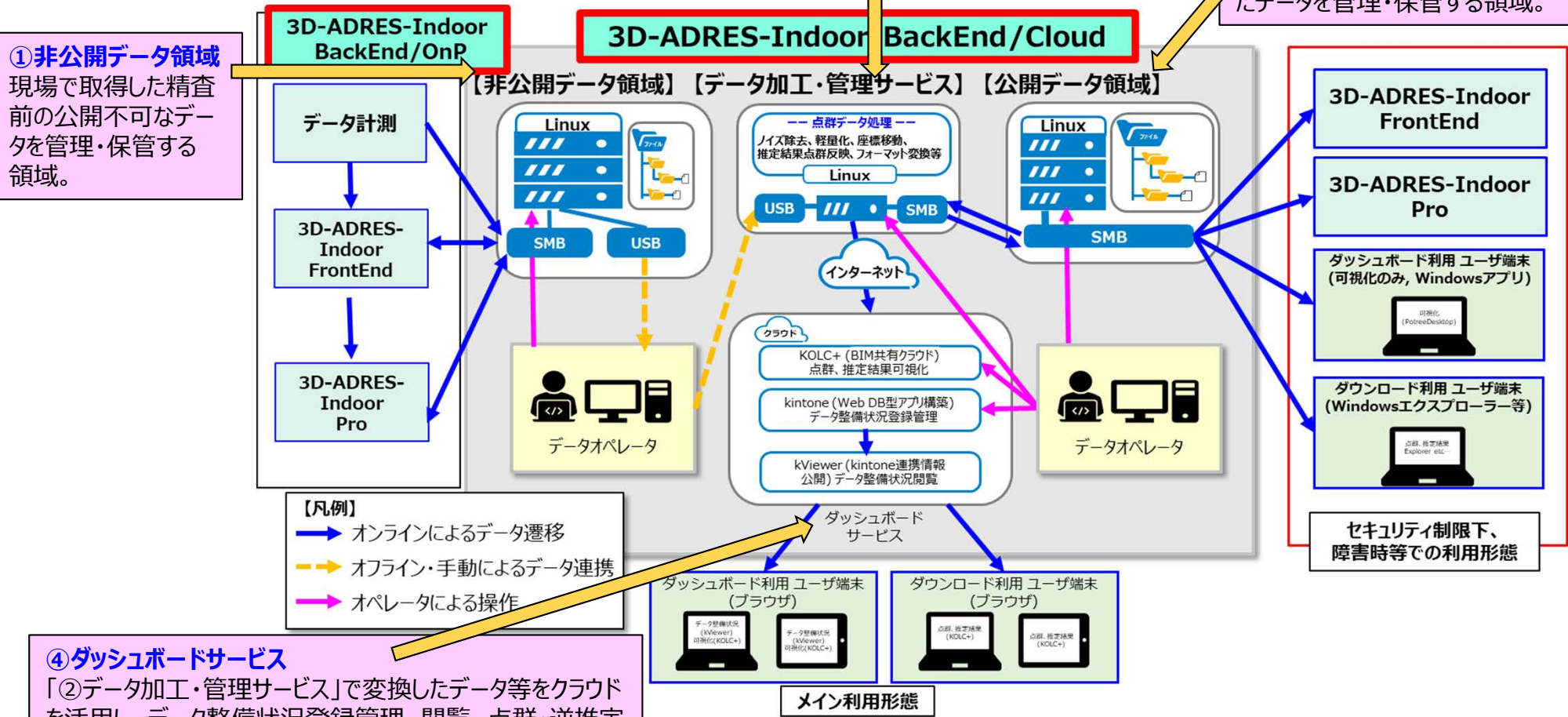
「①非公開データ領域」で精査・加工を行った公開可能なデータにノイズ除去や軽量化等各種処理を行い、ダッシュボードアプリで利用可能な形態への変換や再解析で利用できるデータ処理を行う。

③公開データ領域

「②データ加工・管理サービス」で処理したデータを管理・保管する領域。

①非公開データ領域

現場で取得した精査前の公開不可なデータを管理・保管する領域。



【凡例】
 → オンラインによるデータ遷移
 → オフライン・手動によるデータ連携
 → オペレータによる操作

④ダッシュボードサービス

「②データ加工・管理サービス」で変換したデータ等をクラウドを活用し、データ整備状況登録管理、閲覧、点群・逆推定結果の可視化が可能なサービスを提供する

セキュリティ制限下、
 障害時等での利用形態

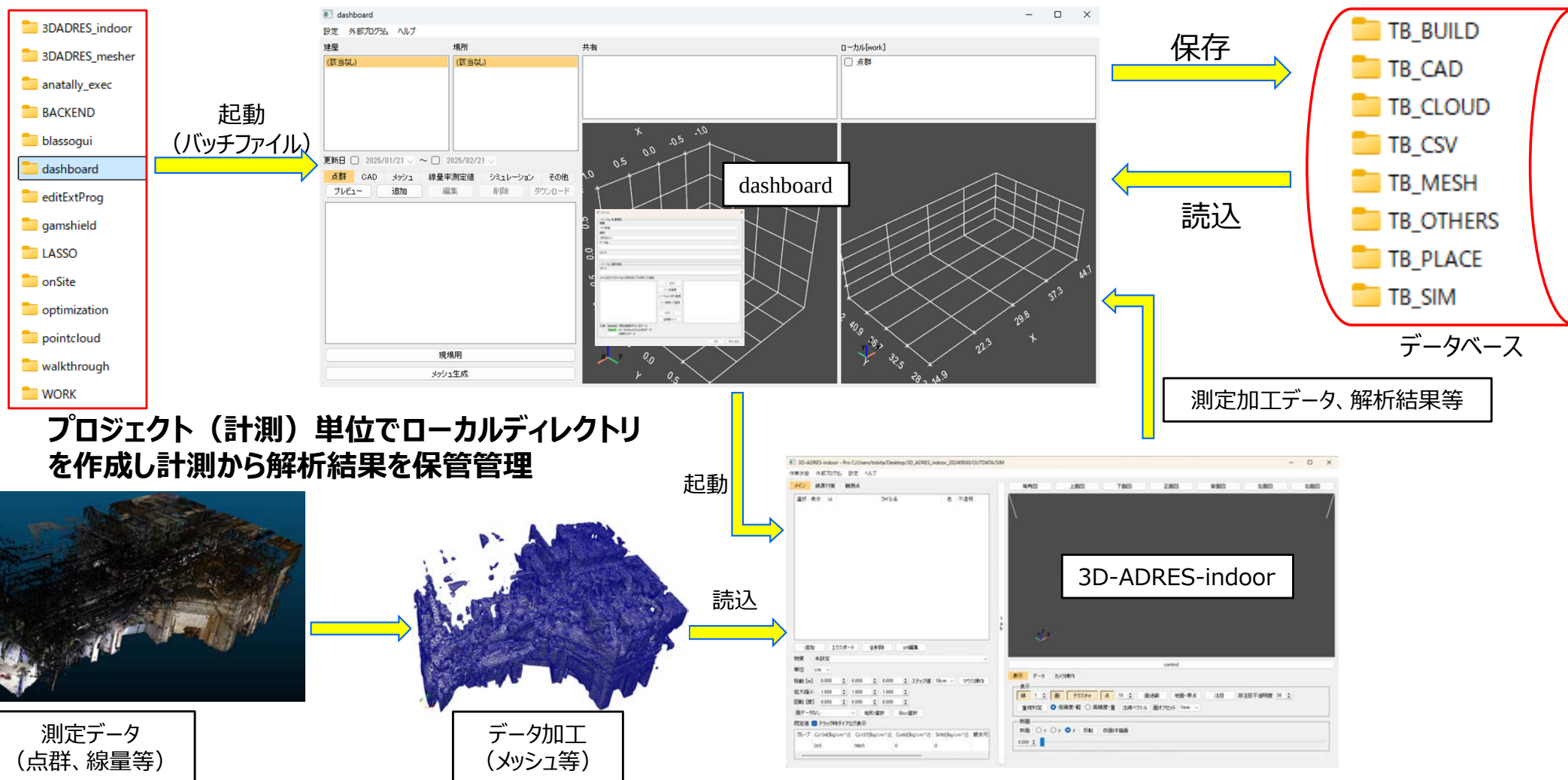
メイン利用形態

⑪データ管理支援ツールの整備作業(3/8)

BackEnd(3/8) : OnP

BackEnd/OnPのデータ管理システム

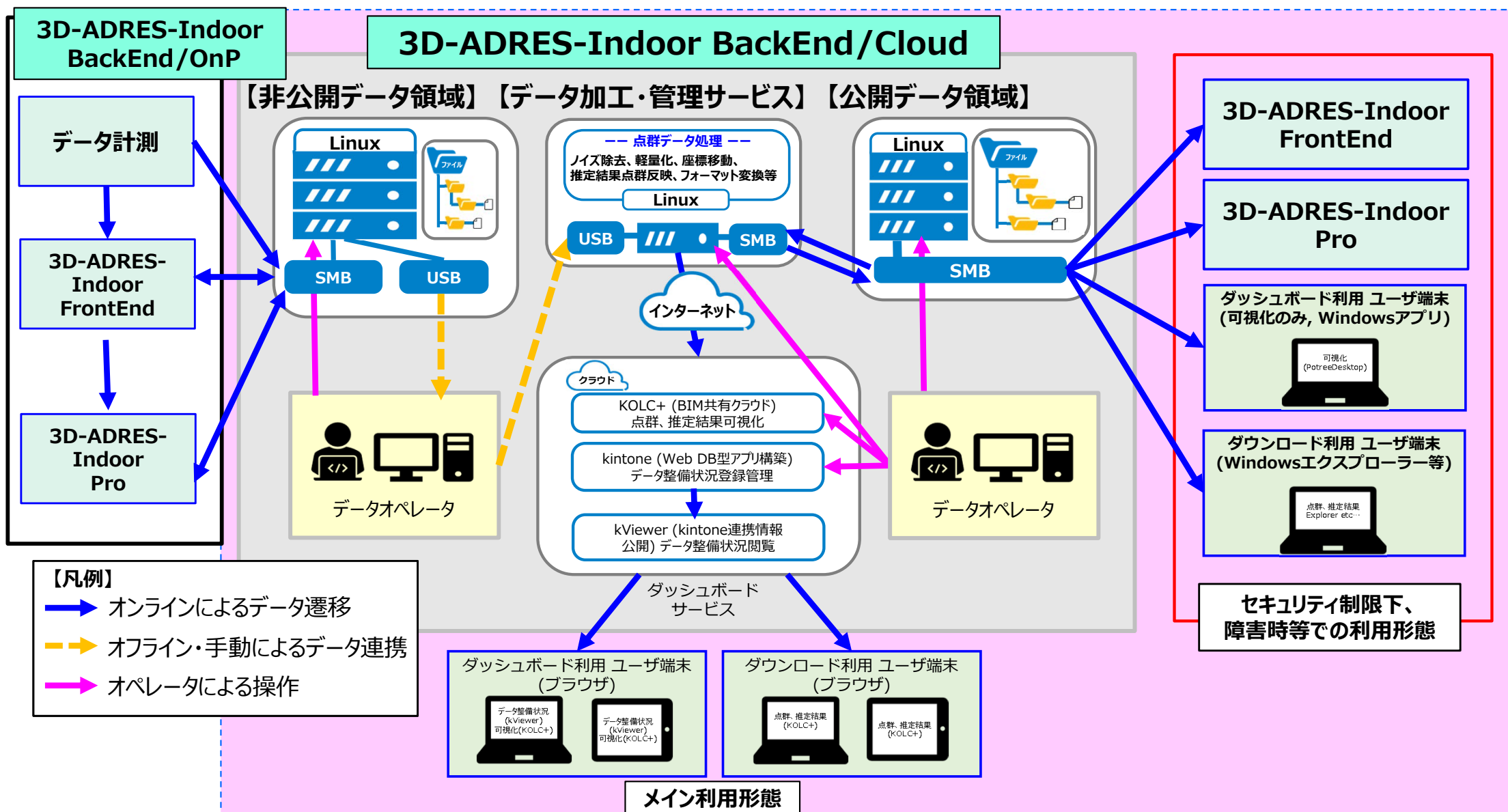
3D-ADRES-indoorのBackEnd/OnPは現場で測定/解析に用いたデータ(点群、メッシュ、線量データ、逆推定結果等)をローカル領域に簡易データベースとして保存/読込するものである。



⑪データ管理支援ツールの整備作業(4/8)

BackEnd(4/8)

BackEndシステム：システム構成：データフロー詳細図



⑪データ管理支援ツールの整備作業(5/8)

BackEnd(5/8) : Cloud

BackEndシステム
(システム構成)



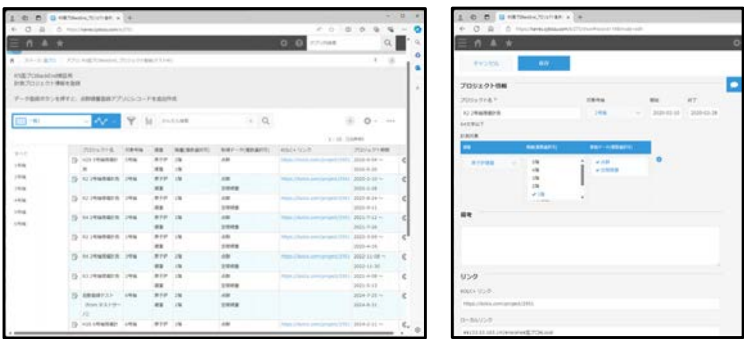
- ・kintone登録～kViewerでの閲覧
- ・Potree [可視化ワークスルー]
- ・kViewerとKOLC+の連携

BackEndシステム : システム構成(1/4) – ダッシュボードサービス

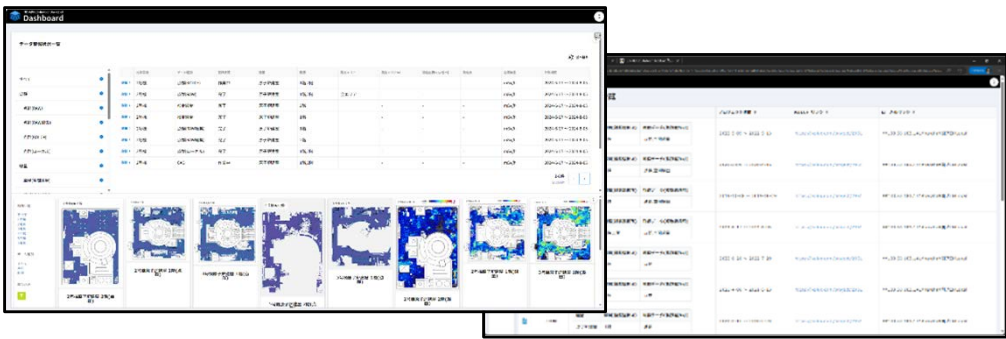
ダッシュボードサービスは、データ整備状況の登録・管理を行う**kintone**とAPI連携で整備状況の閲覧を行う**kViewer**、点群・推定結果を簡易可視化する**Potree**および**KOLC+**の4サービスで構成される。

データ整備状況の管理・閲覧

kintone

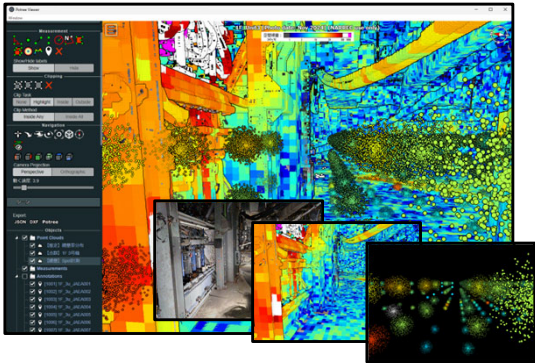


kViewer

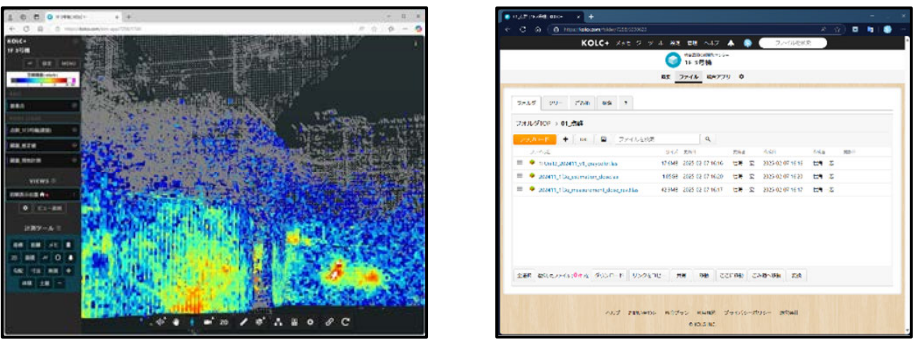


点群・推定結果の簡易可視化

Potree (ローカル)



KOLC+ (クラウド)



⑪データ管理支援ツールの整備作業(6/8)

BackEnd(6/8) : Cloud

BackEndシステム
(システム構成)



- ・kintone登録～kViewerでの閲覧
- ・Potree [可視化ワークスルー]
- ・kViewerとKOLC+の連携

BackEndシステム : システム構成(2/4) – ダッシュボードサービス(整備済み)

〈kintoneでのデータ登録及び登録データのkViewerでのデータ閲覧の様子〉(動画をキャプチャし、要点をまとめて記載)

対象機種	データ種別	登録状況	階層	測定エリア	測定座標(x,y,z)[m]	測定点名	登録日時
すべて							
点群(KOLC+)	点群(KOLC+)	作業中	原子炉	1階			
点群(KOLC+)	点群(KOLC+)	完了	原子炉	2階			
点群(KOLC+)	点群(KOLC+)	作業中	原子炉	1階			
点群(KOLC+)	点群(KOLC+)	完了	原子炉	2階			
線量	点群(RAW編集)	完了	原子炉	2階			
空間線量	点群(RAW編集)	完了	原子炉	2階			
推定線量	点群(RAW編集)	完了	原子炉	2階			

データの整備状況一覧
(kintoneの画面)



データ種別: 360度画像

登録状況: 作業中 (完了)

測定箇所情報

階層: 1階 (2階, 3階, 4階, 5階)

測定エリア: 北西 (北, 北東, 東, 南東)

測定座標(x,y,z)[m]: (32.101, 0.832, 0.835)

測定点名:

備考:

データ整備に係る情報の登録・更新画面
※場所(号機/階/エリア)、進捗(作業中/完了)などを選択



データ登録 (kintone)

プロジェクト情報

データ種別・登録状況

測定箇所情報

測定座標(x,y,z)[m]: (32.101, 0.832, 0.835)

測定点名:

データ登録完了



対象機種	データ種別	登録状況	階層	測定エリア
点群(KOLC+)	点群(KOLC+)	作業中	原子炉建屋	1階, 2階
点群(KOLC+)	点群(KOLC+)	完了	原子炉建屋	1階, 2階
線量	推定線量	完了	原子炉建屋	2階
線量	推定線量	完了	原子炉建屋	1階
CAD	点群(RAW編集)	完了	原子炉建屋	1階
360度画像	点群(RAW編集)	完了	原子炉建屋	2階

kViewerでの閲覧(登録済みデータ一覧)

a.システム製作及び現場適用性評価(42/71)

⑪データ管理支援ツールの整備作業(7/8)

BackEnd(7/8) : Cloud

BackEndシステム
(システム構成)



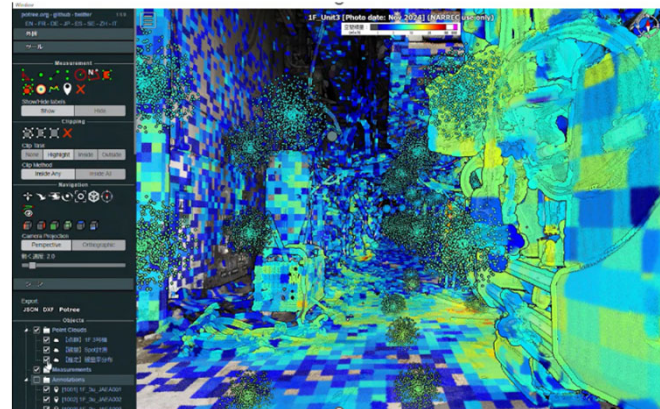
- ・kintone登録～kViewerでの閲覧
- ・Potree [可視化ウォークスルー]
- ・kViewerとKOLC+の連携

BackEndシステム : システム構成(3/4) – ダッシュボードサービス(可視化機能整備済み)

Potree(※)の動作の様子[3号機1階現場]

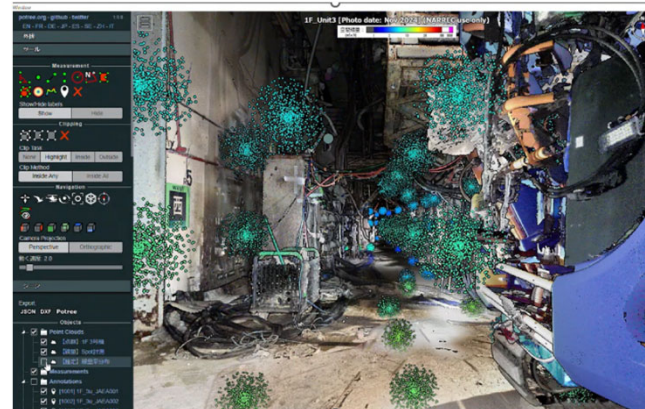
※Potree 点群・推定結果を簡易可視化するWindowsアプリのこと

(左側の各表示項目にチェックを入れ、好みの表示方法を設定する(下図は表示方法の一部を示す))

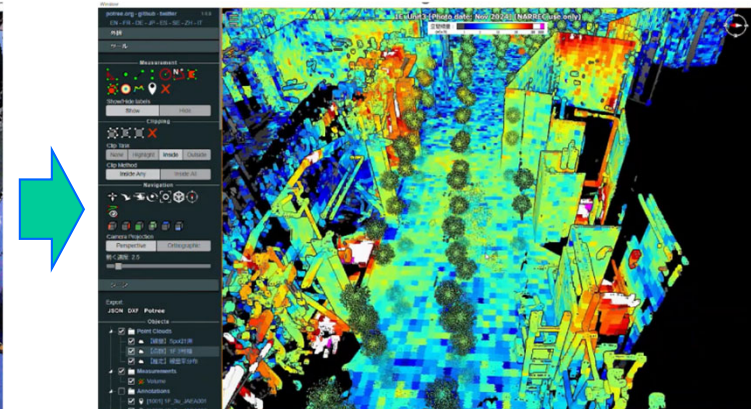


1.[点群]・[線量]・[推定(※)]表示

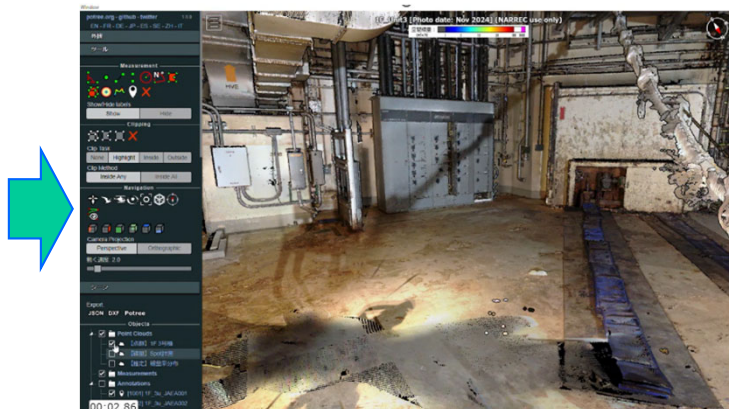
※「推定」は逆推定の結果を示す



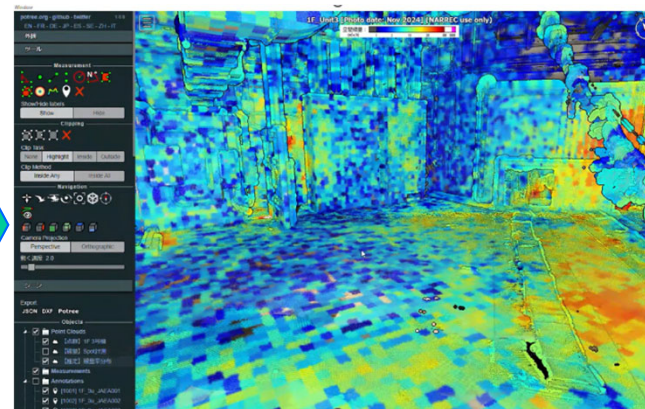
2.[点群]・[線量]データの表示



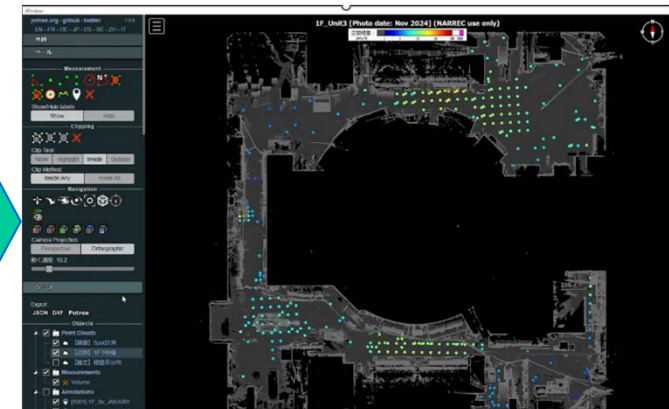
3.[点群]・[線量]・[推定]データの[俯瞰]表示



4.[点群]データのための表示



5.[点群]・[推定]データの表示



6.[点群]・[線量]データの[平行投影]表示

⑪データ管理支援ツールの整備作業(8/8)

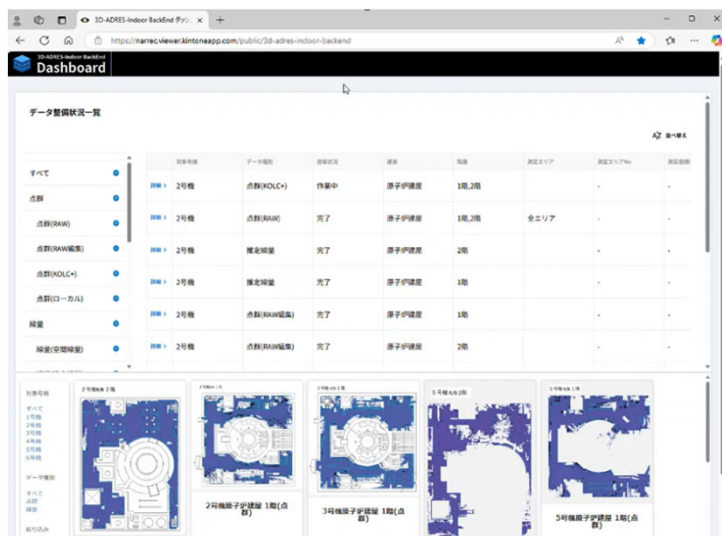
BackEnd(8/8) : Cloud

BackEndシステム
(システム構成)



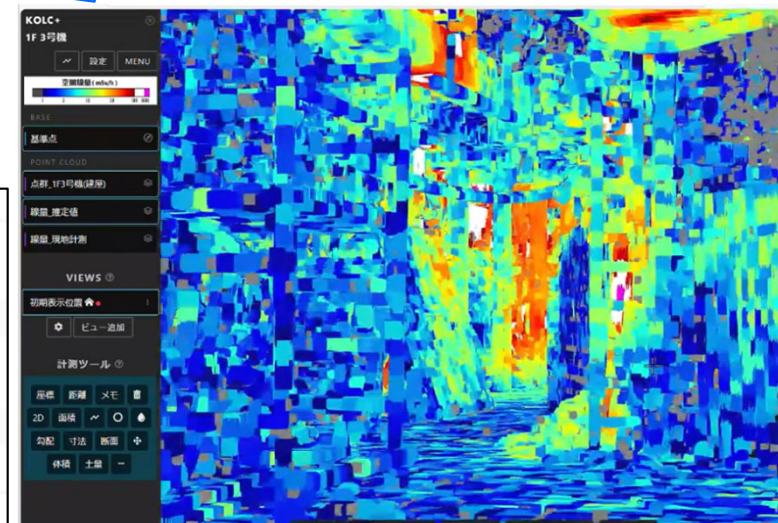
- ・kintone登録～kViewerでの閲覧
- ・Potree [可視化ウォークスルー]
- ・kViewerとKOLC+の連携

BackEndシステム(4/4) : システム構成 – ダッシュボードサービス(連携)



データ整備状況の
一覧表

KOLC+(クラウド)
での閲覧



KOLC+ (クラウド)

kViewer

kViewerとKOLC+の連携動作の様子

1F2/3号機での最終成果〈詳細説明〉

【令和6年度】(交付申請書記載事項を抜粋[一部])

- 前期は、1F現場(2/3号機)での計測実験を行い、取得点群及び線量を基に2/3号機の線源・線量率マップ作成を実施する。一方、マップの精度向上等を目標とし、計測の準備を行う。
- 後期は、1F現場(2/3号機)での計測実験を行い、取得点群及び線量を基に2/3号機の線源・線量マップ精度向上機能を検証し、当該システムの現場適用性を評価する。また、システムのユーザビリティ向上に係る機能検証を行う。

交付申請書の記載事項に基づき、達成目標を下記の通り設定

【達成目標項目】

- 1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度の向上
- 2) システムのユーザビリティ向上

【達成目標項目】

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上

①Proの使用による精度向上の検証

- ・構造物面数と空間の解像度の向上
- ・LASSOパラメータ(3つ)を自動且つ詳細に交差検証

②自己位置推定連続測定器の使用による精度向上の検証

- ・位置精度の向上
- ・連続測定による測定量の向上

③CADモデルを用いた3Dモデル詳細化による精度向上の検証

- ・複雑構造物のCADモデルを用いた3Dモデル詳細化
- ・3Dモデル詳細化に伴う線源・線量率分布の精度向上

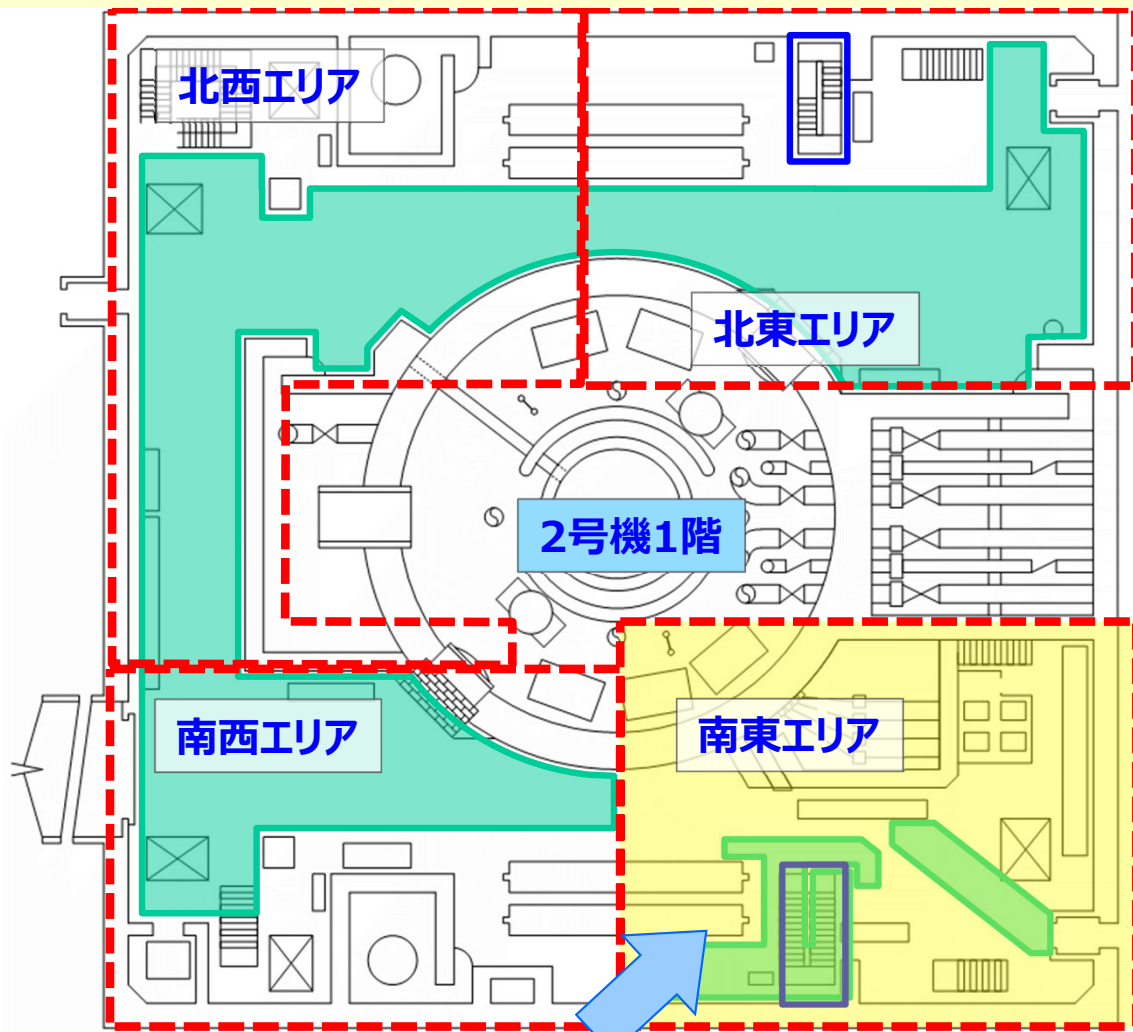
a.システム製作及び現場適用性評価(46/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(1/18)

①Proの使用による精度向上の検証(1/8)

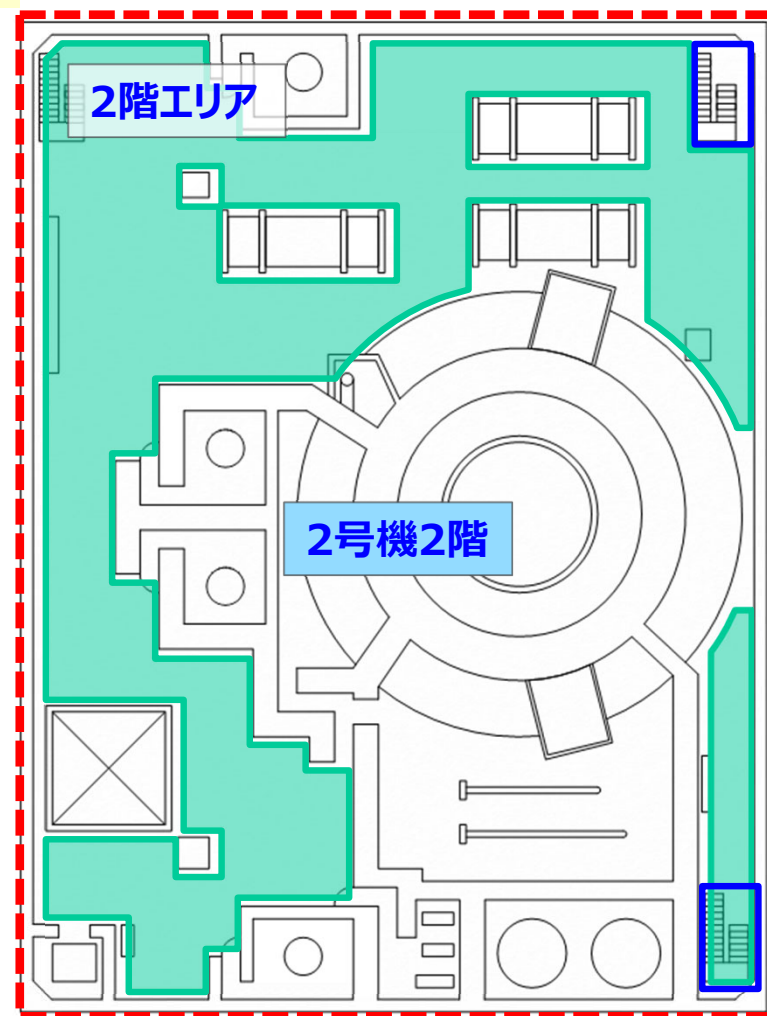
1F2号機の南東エリアに対し、Proによる解析により線源・線量率マップの高精度化が可能となることを検証

【凡例】		1階⇄2階への移動階段
		計測対象エリア (SPOT移動が可能な範囲)
		システムの評価エリア



南東エリアに注目

1F2号機 (試験対象全エリア)

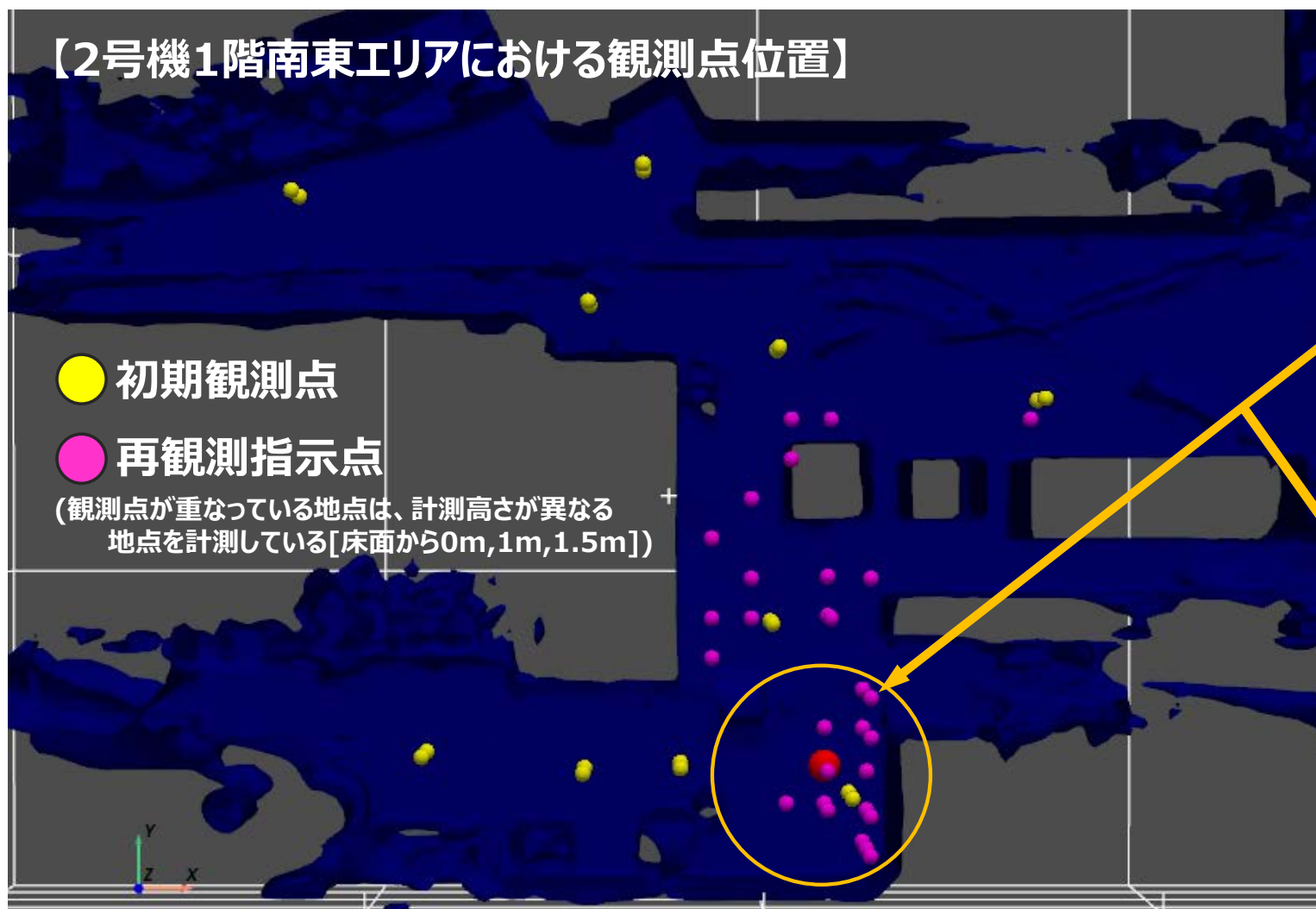


a.システム製作及び現場適用性評価(47/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(2/18)

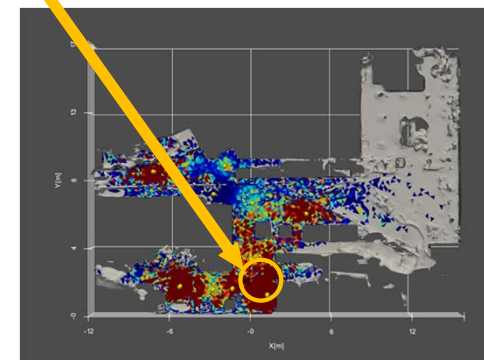
①Proの使用による精度向上の検証(2/8)

「初期観測点」および「再観測指示点」(FrontEnd)にて得られたデータと同じ情報を用い、Proでの処理による線源・線量率マップの高精度化を検証



初期観測により、強い
ホットスポット●を予測

高さ方向にも異なる
再観測指示点あり



a.システム製作及び現場適用性評価(48/71)

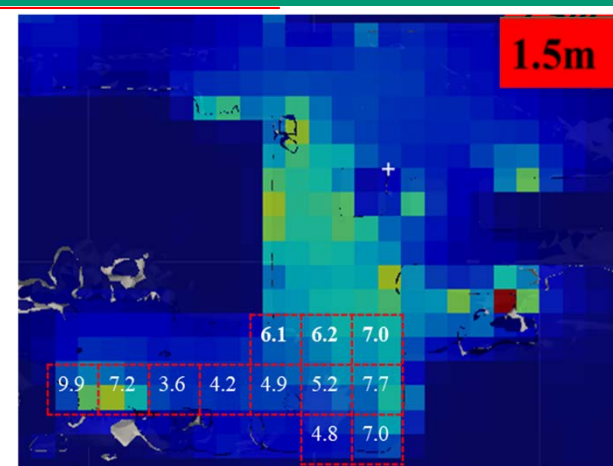
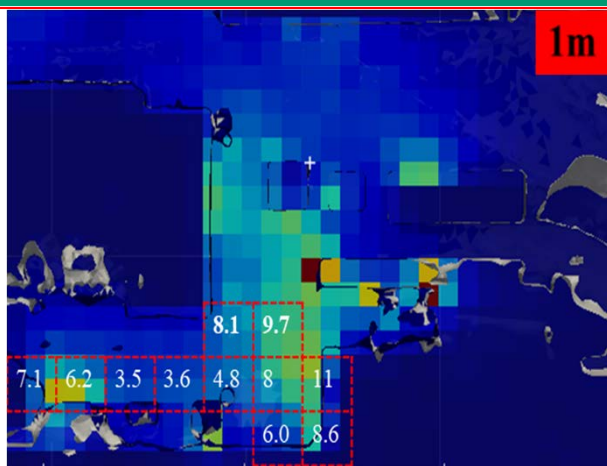
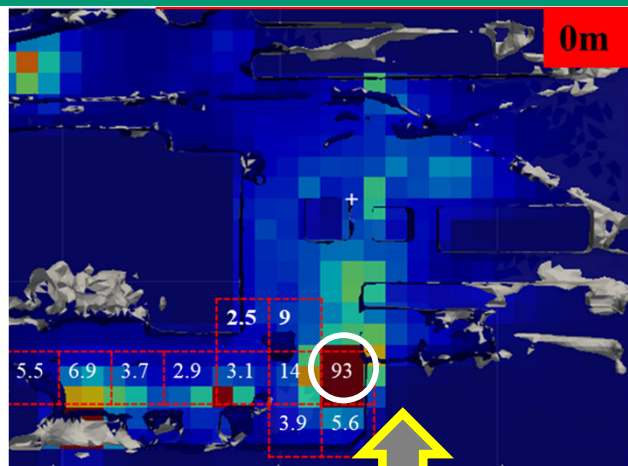
1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(3/18)

①Proの使用による精度向上の検証(3/8)

逆推定・順推定（再観測指示点情報も含めた検証）

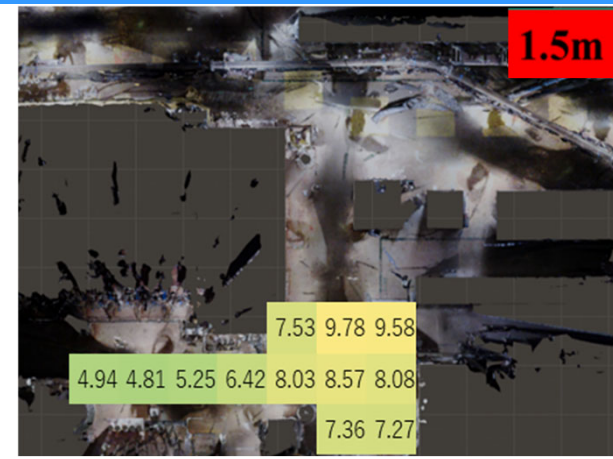
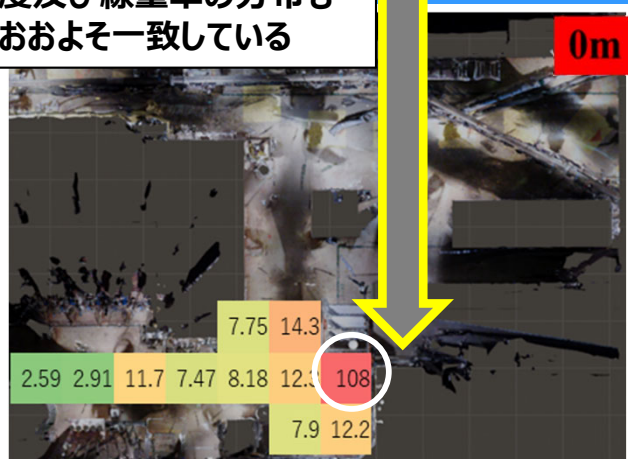


推定値



ホットスポットの位置・強度及び線量率の分布もおおよそ一致している

測定値



FrontEndを用いた結果（20万メッシュ数+50cm空間解像度）

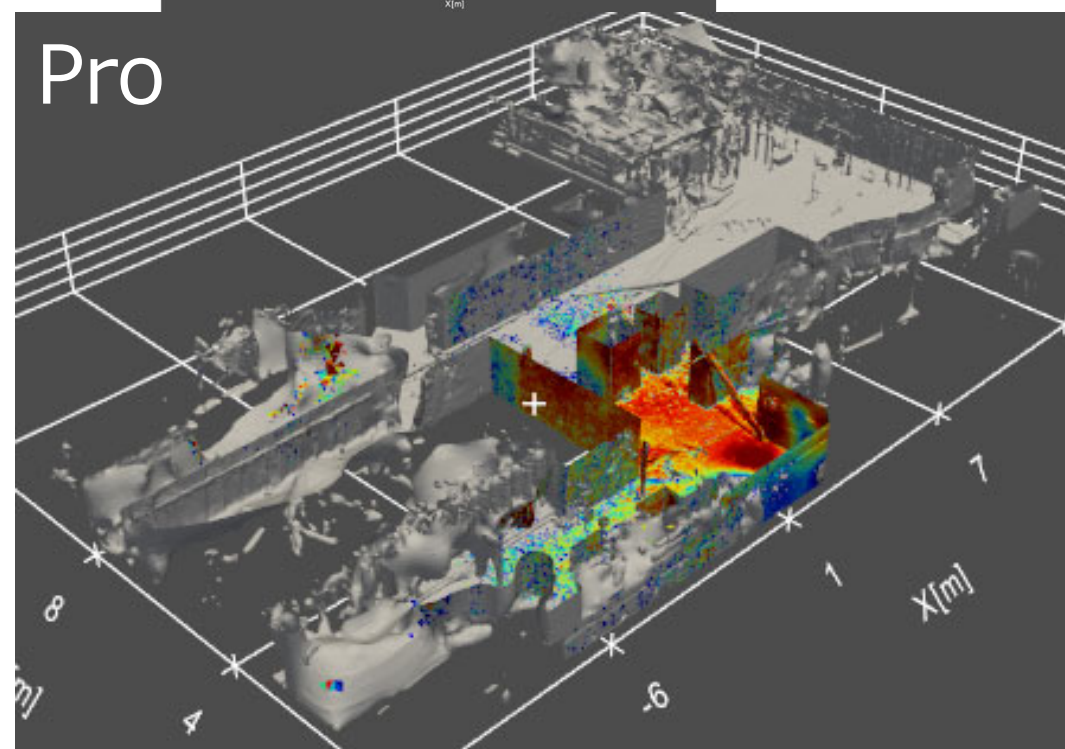
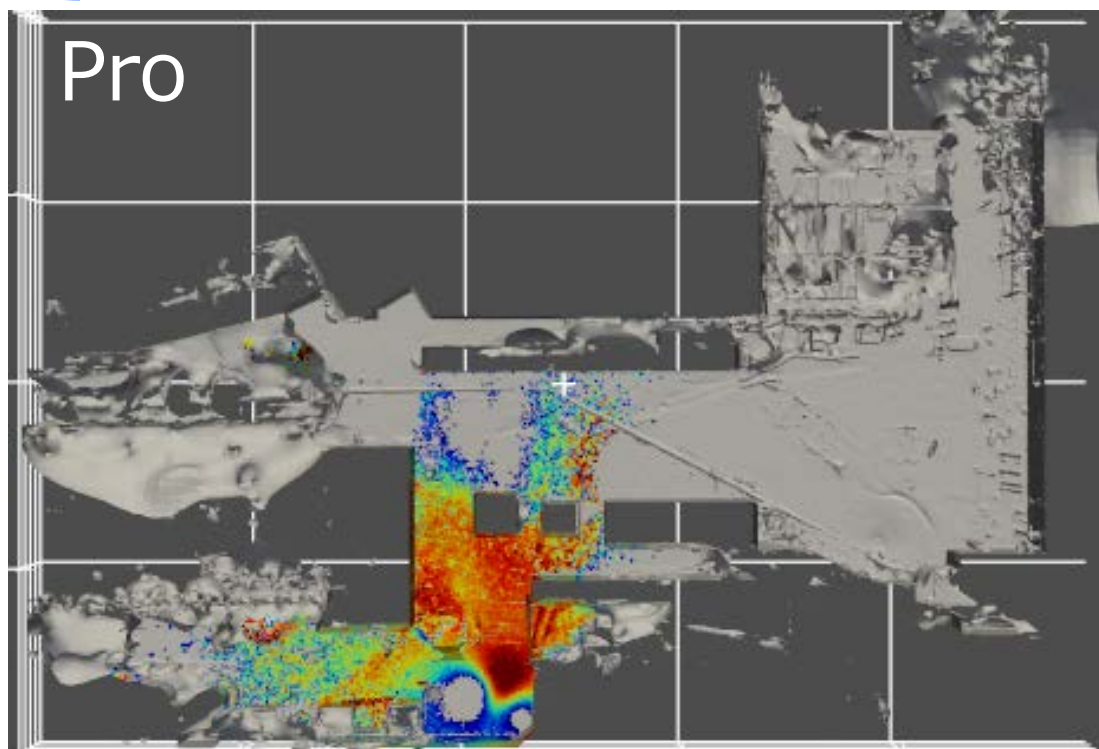
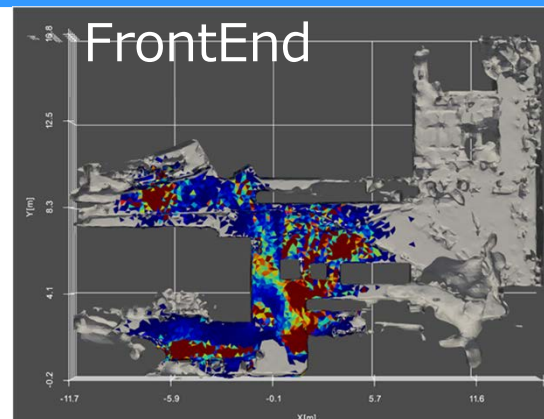
a.システム製作及び現場適用性評価(49/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(4/18)

①Proの使用による精度向上の検証(4/8)

FrontEndと同じエリア(2号機1階南東)に対しProを適用

- FrontEnd(20万面数)⇒Pro(200万面数)
- FrontEnd(50cm解像)⇒Pro(10cm解像)
- Pro : CV※(パラメータ自動最適化チューニング[=交差検証])強化



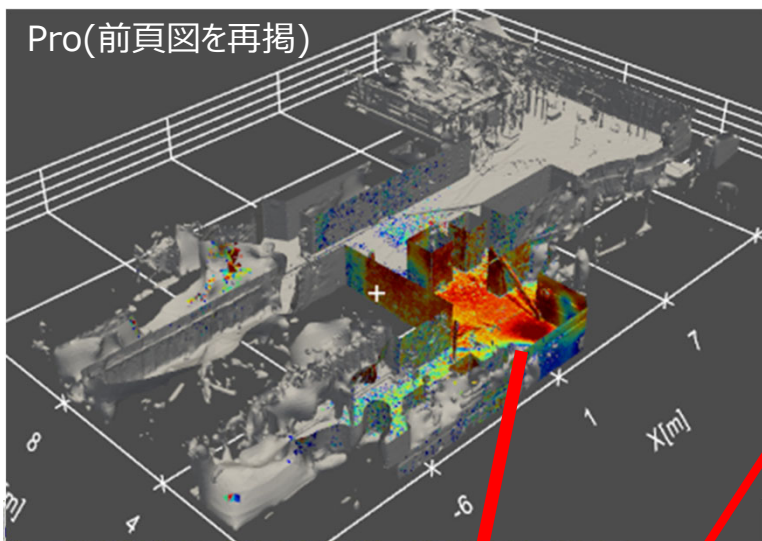
線源強度分布は、より詳細となる他、観測線量率の再現性を向上させるため、LASSOパラメータを詳細に自動最適化チューニング(交差検証)する。

※ CV(Cross Validation):自動最適化チューニング[交差検証]は、自動で最適化パラメータを出力し、それを用いた逆推定結果を示す手法である。

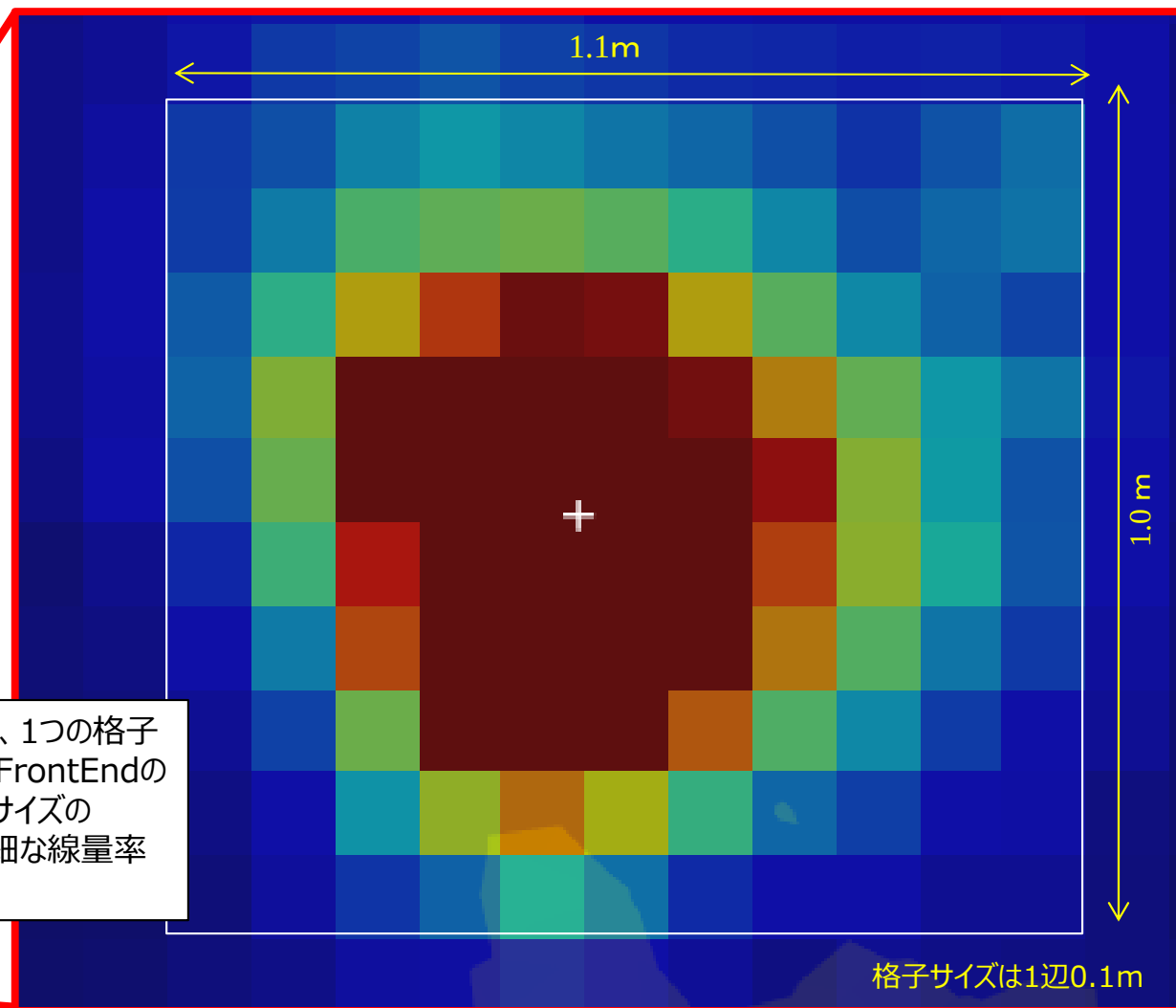
a.システム製作及び現場適用性評価(50/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(5/18)

①Proの使用による精度向上の検証(5/8)



線源（ホットスポット）付近を拡大



200万画素解像度のProでは、1つの格子サイズが10cmとなっており、FrontEndの20万画素解像度である格子サイズの50cmと比較すると、より詳細な線量率分布を表示可能。

10cm解像度で表面線量率分布を取得（Pro）

a.システム製作及び現場適用性評価(51/71)

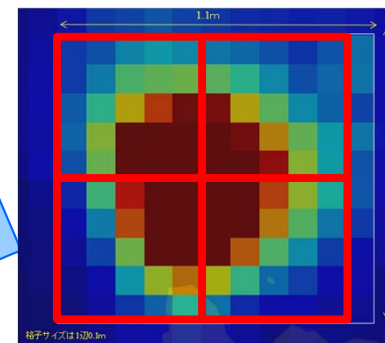
1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(6/18)

①Proの使用による精度向上の検証(6/8)

Pro : 10cm単位での表面線量率分布

14.5	17.3	23.0	25.6	23.5	21.5	19.7	17.1	13.7	17.5	20.8
14.9	22.1	34.9	38.0	39.7	36.7	30.4	23.5	16.8	19.8	21.3
18.2	30.7	49.9	63.1	73.7	72.5	49.9	36.8	23.8	19.1	15.6
19.4	42.8	75.1	97.3	108.8	90.4	72.8	54.1	38.3	25.6	21.6
17.2	39.0	86.8	126.5	137.9	134.4	96.1	70.1	43.2	25.8	17.5
12.3	33.0	67.2	125.5	186.8	157.2	115.2	61.8	44.1	17.7	17.6
8.7	22.2	61.2	118.3	148.1	128.8	95.6	55.3	36.2	21.4	14.5
6.2	15.3	39.7	75.7	106.3	88.5	59.0	35.5	24.0	14.7	9.5
4.7	9.3	25.1	44.9	56.6	48.0	31.9	19.9	15.0	9.3	8.2
3.4	7.2	13.9	19.3	26.1	20.9	12.9	9.0	9.3	5.9	6.0

FrontEnd : 50cm単位での表面線量率分布

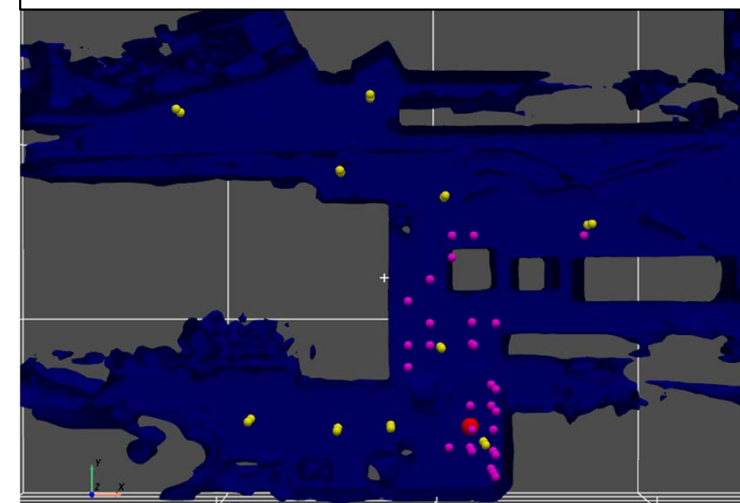


※前ページの図
を再掲

10cm位置ずれで～30%の
線量率変化がある

ホットスポット相当線源

再々観測指示も必要と史料



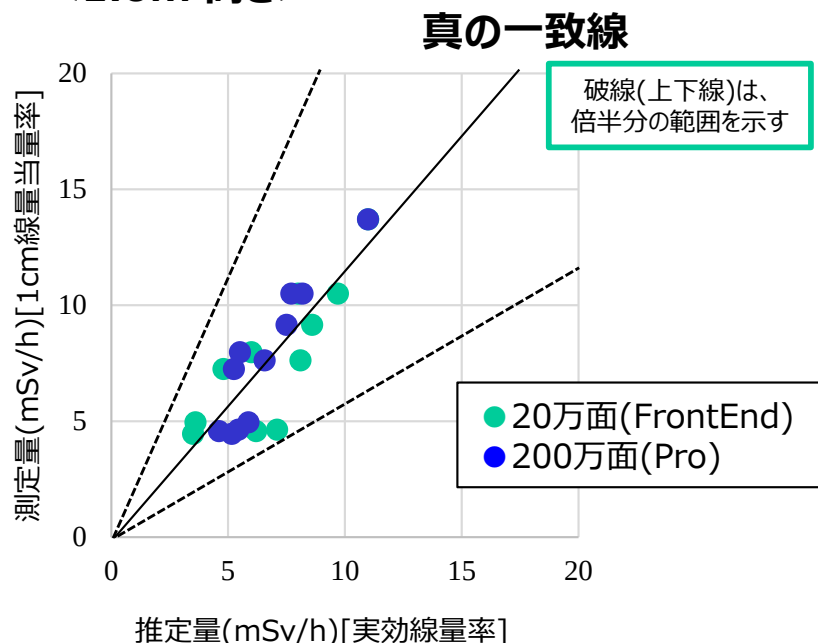
a.システム製作及び現場適用性評価(52/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(7/18)

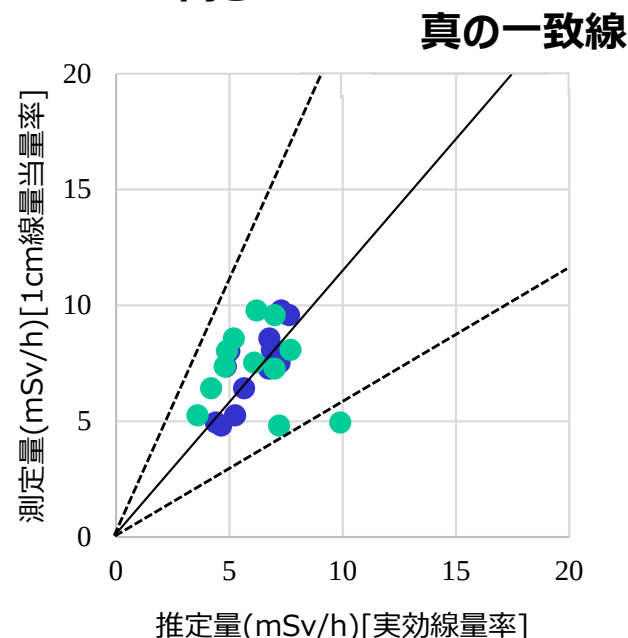
①Proの使用による精度向上の検証(7/8)

2号機1階南東エリアにおける線源の近傍(床面から1mおよび1.5m)での格子状検証用線量率分布の再現性を調査

<1.0m 高さ>



<1.5m 高さ>



Proでの詳細計算

より高い一致度が
得られる

ほぼ±10%程度未満

Proによる
精度向上確認

※真の一致線については、
その根拠となる考え方を
p.187に記載した。

線量定義の違いを換算し、測定量と推定量の一致線を「真の一致線」として実線にて表示
換算値 (R:測定量/推定量)~1.2[アイソトープ手帳12版 (P.67)] 公益財団法人アイソトープ協会(2020)を参考にした

※測定値を真値(=基準値)と見なし、その再現性を問うものとして、システムの妥当性を評価した。
計測値もまた誤差を含むが、その評価も加味することは妥当性評価を複雑化すると考え、計測値の再現性を評価した。

Proにより線源分布の精度が向上し、結果として線量率分布の精度向上を確認

a.システム製作及び現場適用性評価(53/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(8/18)

①Proの使用による精度向上の検証(8/8)

FrontEndとProの計算時間比較

◎各処理時間

種別	FrontEnd(20万)	Pro(200万)
メッシュ生成	約5分	約30分
法線処理	約0.5分	約1.5分
CV逆推定	約7分	約2時間
順推定	約1分	約5分

計

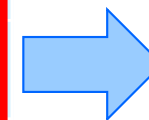
～10分

ノートPC

～3時間

デスクトップPC

<将来の課題>



逆推定処理のサロゲート
モデル構築が高速化の鍵
になると考えられる

Proを使った場合（面数：20万⇒200万、空間解像度：50cm⇒10cm）、
凡そ計算時間は20倍となった（今回の例：2号機南東エリア）。

a.システム製作及び現場適用性評価(54/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(9/18)

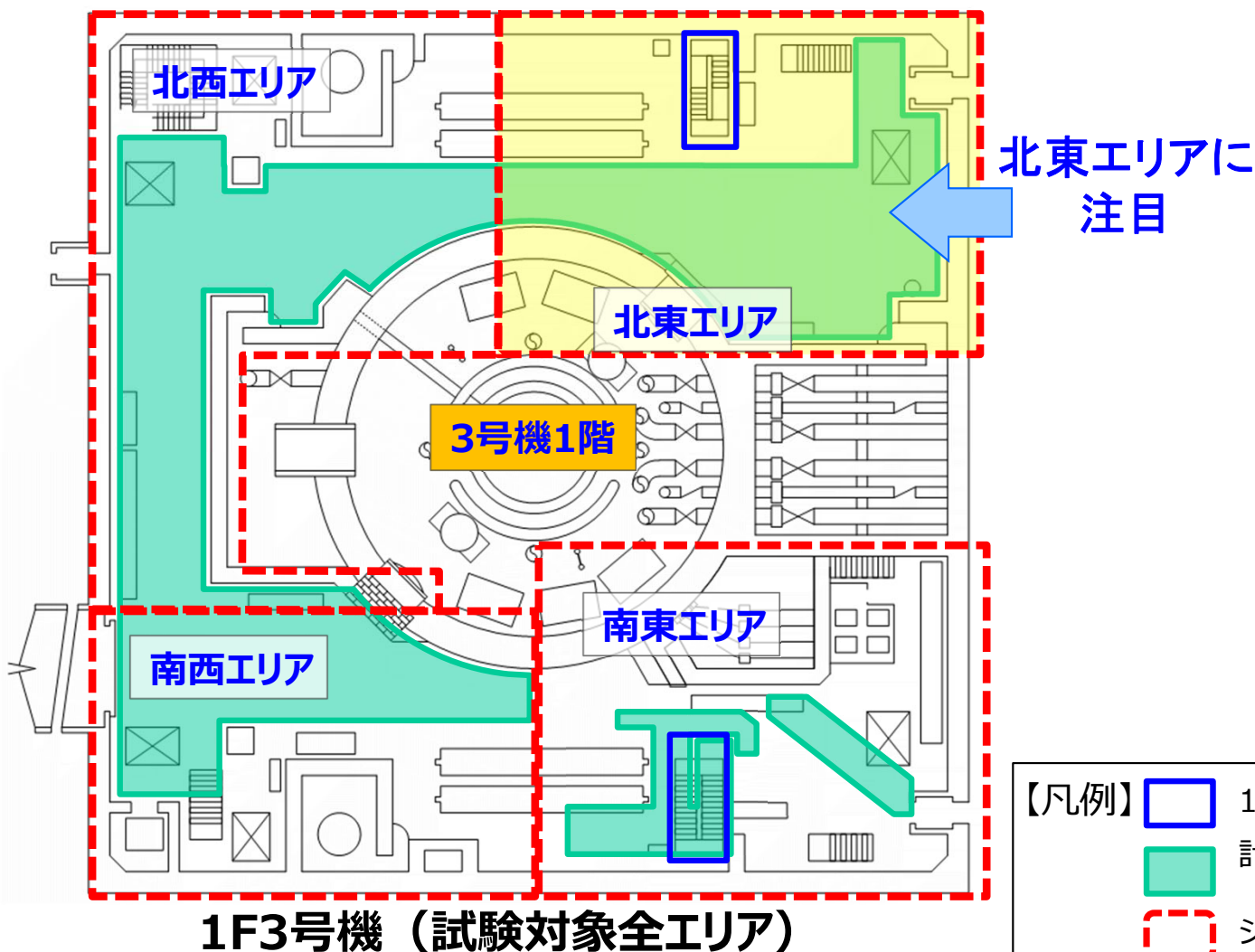
②自己位置推定連続測定器の使用による精度向上の検証(1/5)

- 自己位置推定連続測定器を使用
- 線源・線量率マップの作成と線量率比較検証を実施

実施期間における作業員人数と被ばく線量等(p.23再掲)

1F 2号機計測(1階・2階)	
実施期間	R6.6.17~8.2 (期間中の22日間)
作業員人数	32名 (JAEA・TPT)
総実効線量	45.39 (人・mSv)
平均実効線量	1.42 (mSv)
最高実効線量	3.89 (mSv)

1F3号機計測(1階)	
実施期間	R6.10.15~11.8 (期間中の14日間)
作業員人数	32名 (JAEA・TPT)
総実効線量	33.46 (人・mSv)
平均実効線量	1.05 (mSv)
最高実効線量	3.69 (mSv)



【凡例】	1階⇄2階への移動階段
	計測対象エリア (SPOT移動が可能な範囲)
	システムの評価エリア

a.システム製作及び現場適用性評価(55/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(10/18)

②自己位置推定連続測定器の使用による精度向上の検証(2/5)

【課題】更なる精度向上の取り組み

2号機試験（線量率測定位置）：

- ・点群マップ上でのマニュアル位置推定

3号機試験（線量率測定位置）：

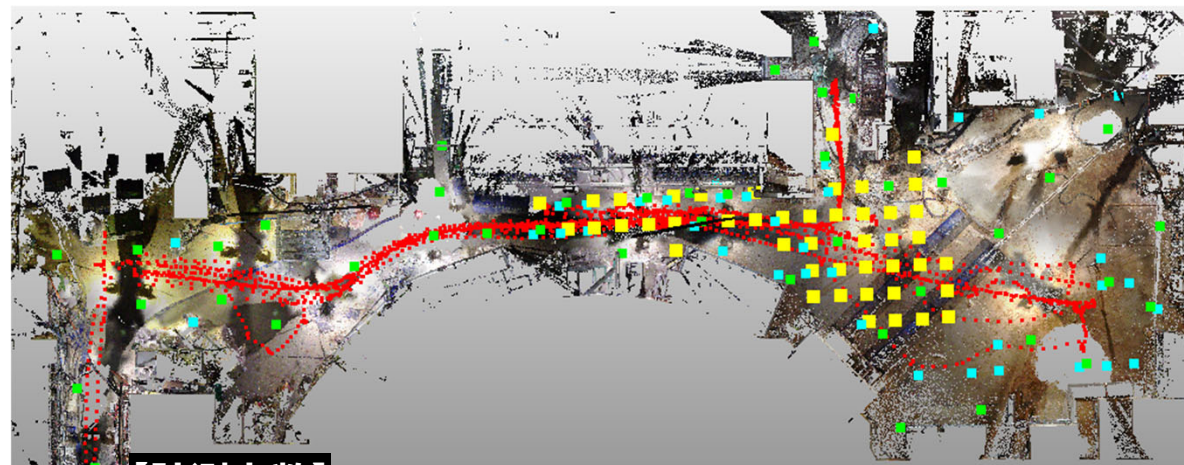
- ・点群マップ上でのマニュアル位置推定(aチーム※¹)
- ・自己位置推定連続測定器（bチーム※²）

【確認試験項目】

上記の試験結果（自己位置推定連続測定器利用の際）から線源・線量率マップの精度向上は可能か？

※1：aチームは、3D-ADRES-Indoorを使った方法による、初期観測点データ、逆推定から得られた再観測点データ、及び検証用として現場計測した格子状観測点データを示す。

※2：bチームは、自己位置推定型サーベイメータを使用した、b(c)②項目[p.123参照]のシステムを用いて取得した計測データを示す。



【計測点数】

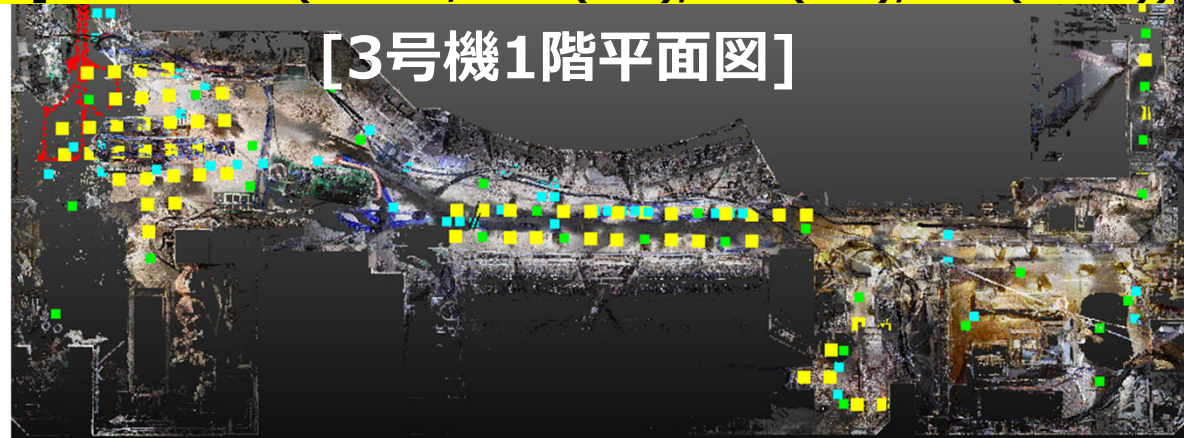
aチーム初期観測点（221点；73点(0m),74点(1m),74点(1.5m)）

aチーム再観測点（123点）

bチーム観測点（3,006点）

【検証用】格子状観測点(225点；75点(0m),75点(1m),75点(1.5m))

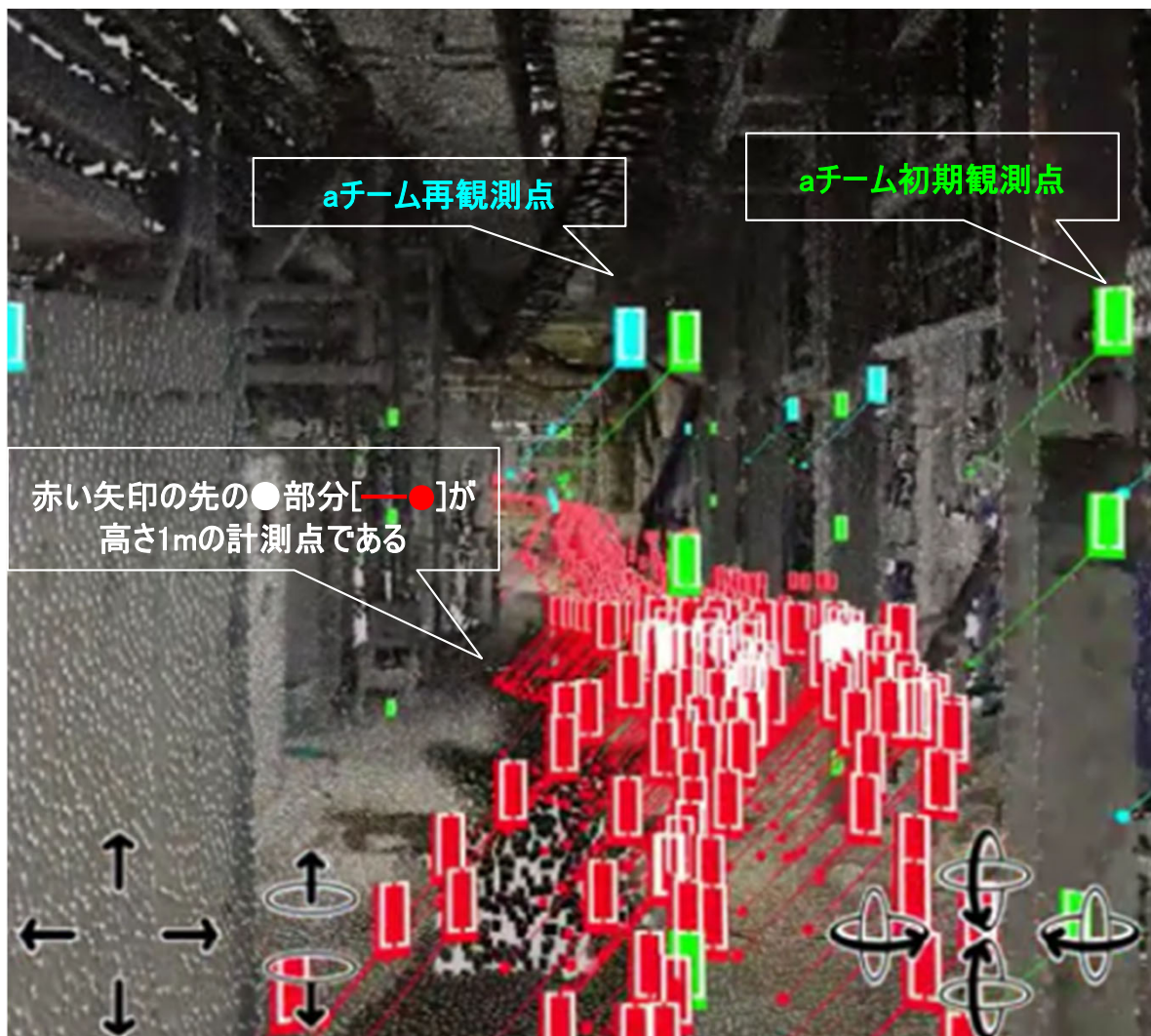
【3号機1階平面図】



a.システム製作及び現場適用性評価(56/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(11/18)

②自己位置推定連続測定器の使用による精度向上の検証(3/5)



〈観測点の分布の比較〉

- aチーム初期観測点 (221点)
- aチーム再観測点 (123点)
- bチーム観測点 [高さ1m] (3,006点)

・計測点が非常に多く、見づらくなってしまうため、線量率(実測値)の表示については「非表示」とした。
⇒見やすさについては改良が必要である。
※動画をキャプチャしたため、画質が粗くなっている。



自己位置推定連続検出器[bチーム]

- ・ aチームと比較すると、およそ10倍の観測情報を1時間程度で取得可能
⇒1点/秒で計測データを所得する
(3,006秒=50分06秒)
- ・ 線量率観測位置情報の精度は高い
- ・ 計測時の高さは1.0mで固定
(SPOTの背中に線量計を設置して移動しているため)

a.システム製作及び現場適用性評価(57/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(12/18)

②自己位置推定連続測定器の使用による精度向上の検証(4/5)

計算対象：3号機1階北東エリア（HCU周囲含む） STL:100万面

● bチーム観測点 [高さ1m] (1,138点) 逆・順推定



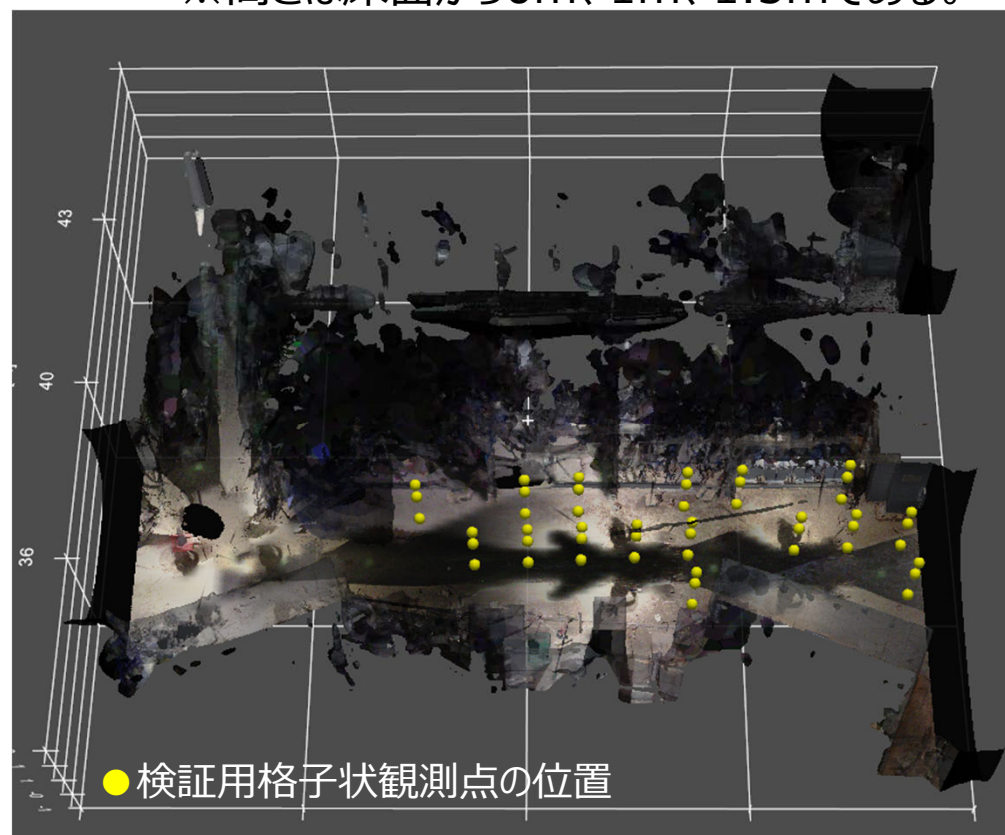
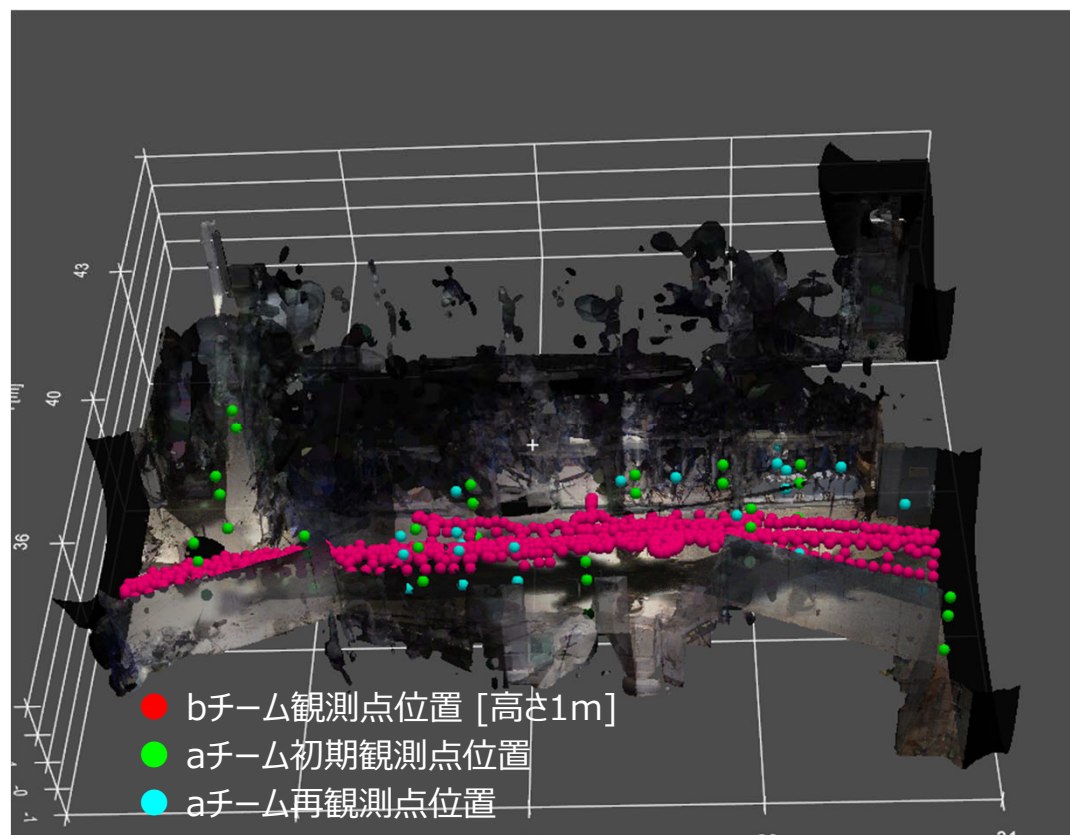
● aチーム初期観測点 (38点)

● aチーム再観測点 (23点)

逆・順推定

● 検証用格子状観測点
(48点：16点×3高さ)

※高さは床面から0m、1m、1.5mである。



a.システム製作及び現場適用性評価(58/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(13/18)

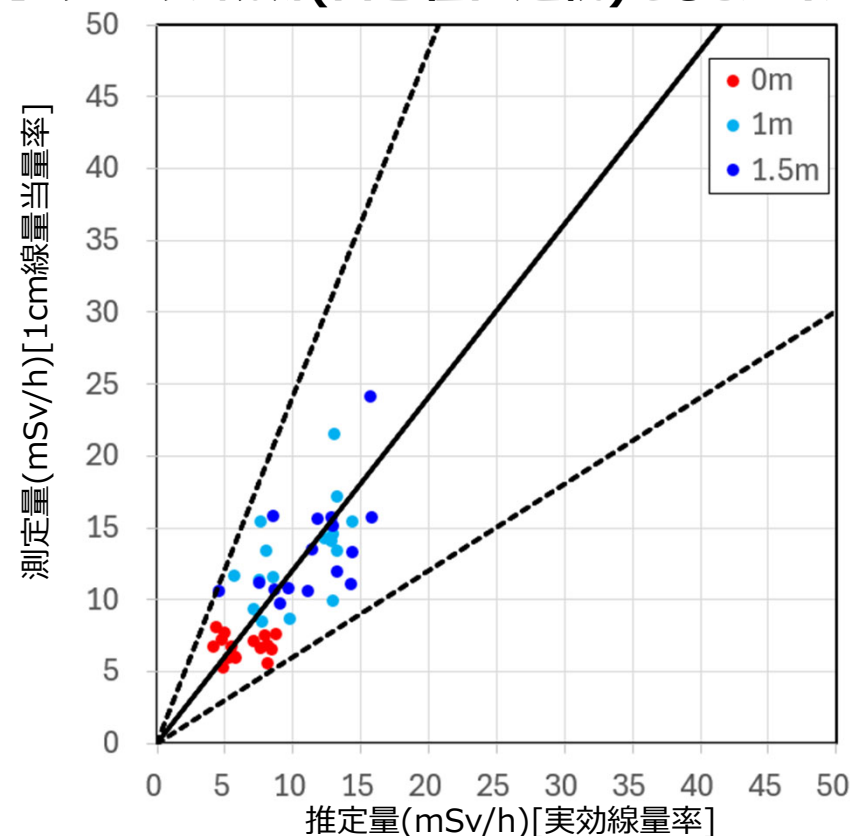
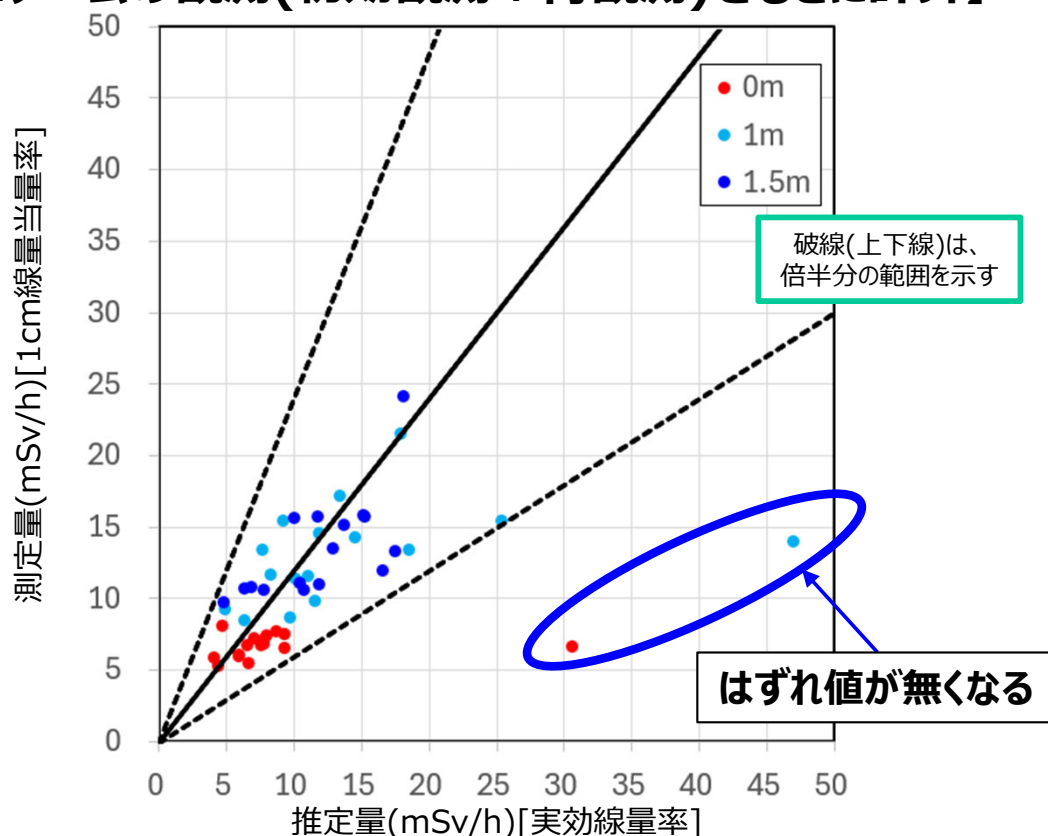
②自己位置推定連続測定器の使用による精度向上の検証(5/5)

3号機1階北東エリアにおける線源の近傍(床面から1mおよび1.5m)での
格子状検証用線量率分布の再現性を調査

※真の一致線については、
その根拠となる考え方を
p.187に記載した。

【aチームの観測(初期観測 + 再観測)をもとに計算】

【bチームの観測(自己位置連続)をもとに計算】



線量定義の違いを換算し、測定量と推定量の一致線を「真の一致線」として実線にて表示

換算値 (R:測定量/推定量)~1.2[アイストープ手帳12版 (P.67)] 公益財団法人アイストープ協会(2020)を参考にした

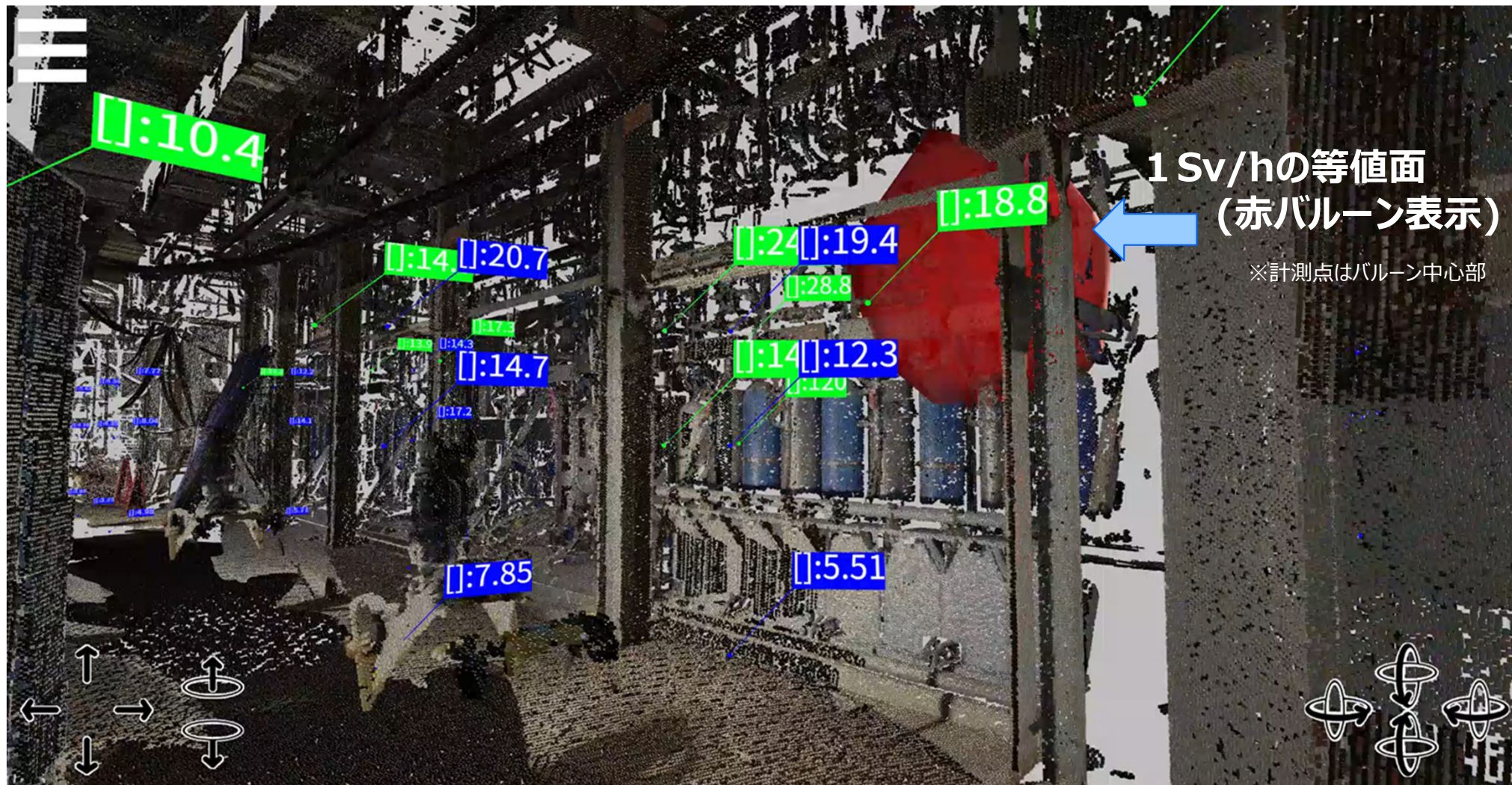
自己位置推定計測器にて凡そ10倍の線量率測定値を取得することで精度の向上を確認

a.システム製作及び現場適用性評価(59/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(14/18)

③CADモデルを用いた3Dモデル詳細化による精度向上の検証(1/5)

FrontEnd/Pro による解析[3号機] (点群・線量率は通路側のみにて取得) ⇒ **1Sv/h超の線量率が分布あり**



⇒ より精度の高い推定手段を用いた解析が求められる。

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(15/18)

③CADモデルを用いた3Dモデル詳細化による精度向上の検証(2/5)

北側HCU側から通路側を見た場合の3Dモデル(点群メッシュは通路側からの視界の範囲のモデルに留まる)



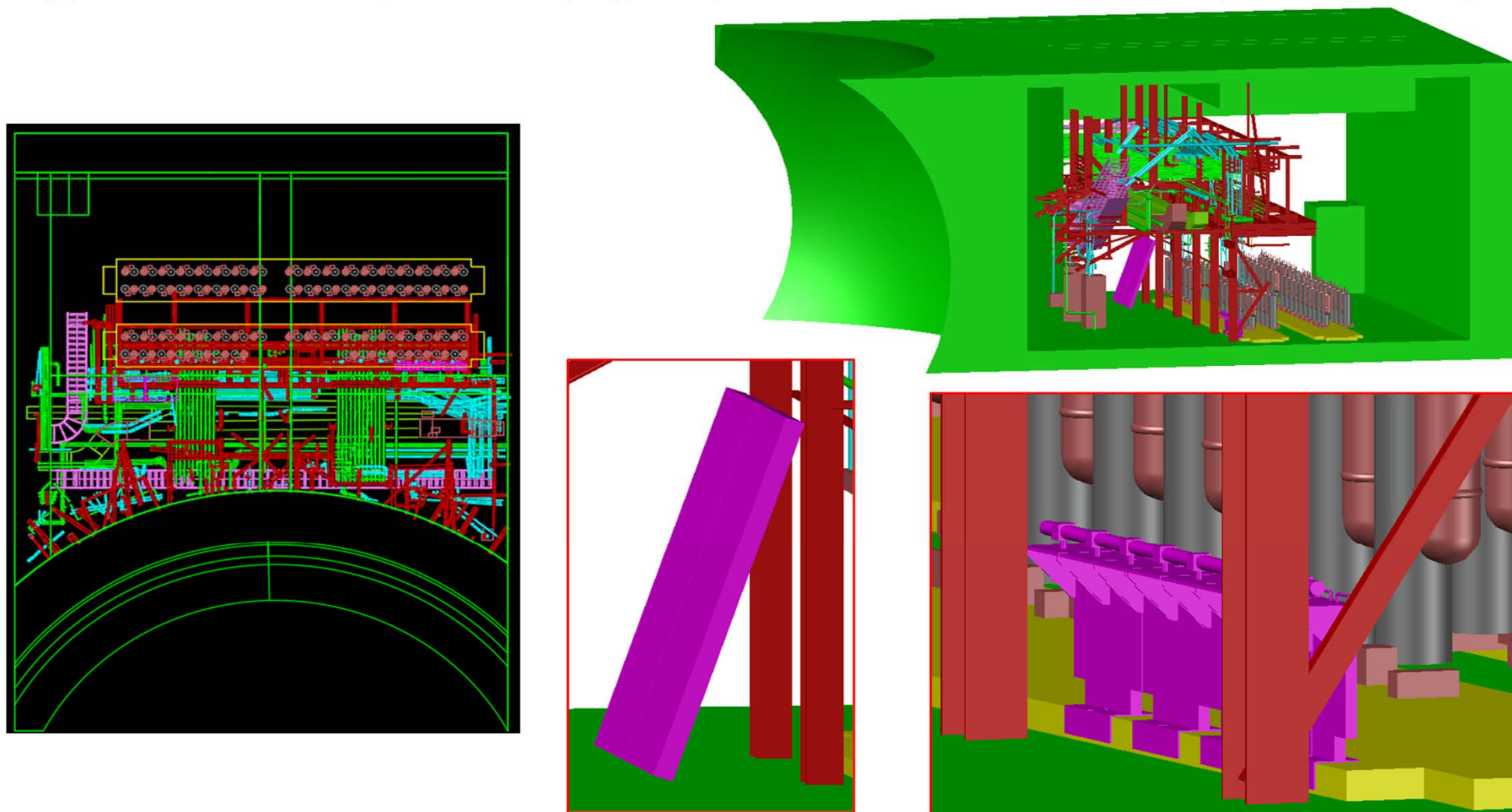
⇒ CADモデルを用いて詳細構造物(3Dモデル)を補強し、再度解析を行う。

a.システム製作及び現場適用性評価(61/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(16/18)

③CADモデルを用いた3Dモデル詳細化による精度向上の検証(3/5)

東電提供のHCU・CADモデルと遮蔽構造物モデルを用いてHCUの詳細を再現するモデルを構築



HCU通路側及び内側の解析のための計測線量率データも東電より入手

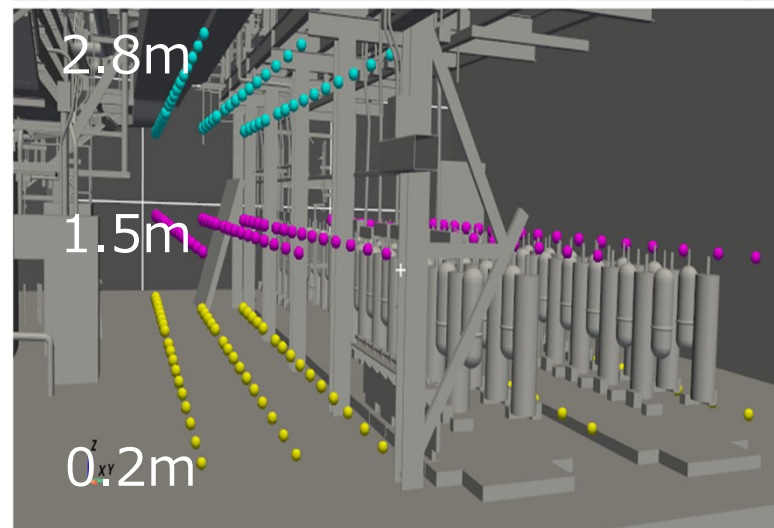
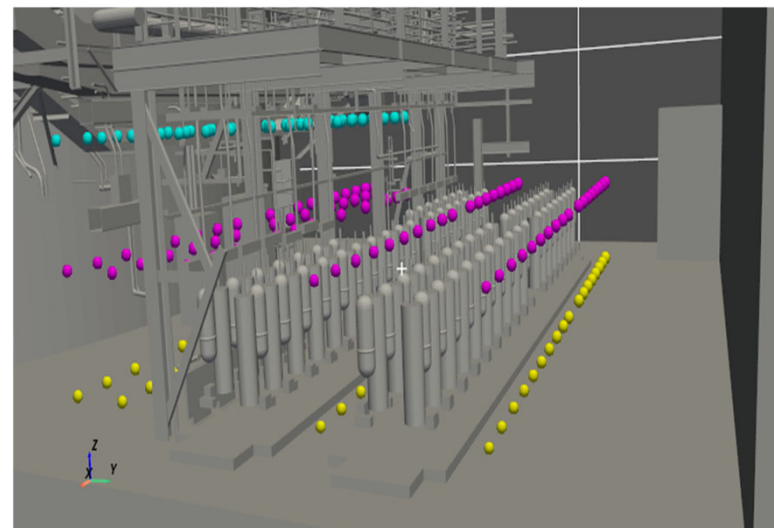
a.システム製作及び現場適用性評価(62/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(17/18)

③CADモデルを用いた3Dモデル詳細化による

精度向上の検証(4/5)

東電より入手した、HCUを対象に測定された
線量率分布データを用いた解析を実施



各図における●●●は
線量率観測点の位置を示す

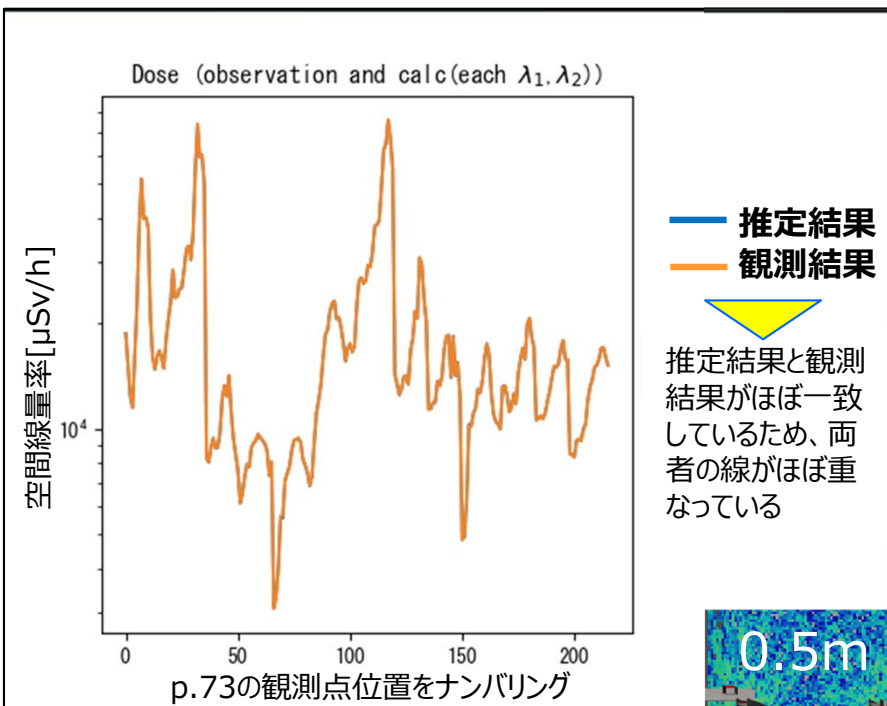
⇒ HCU・CADモデルと詳細線量率分布データを基に逆推定実施

a.システム製作及び現場適用性評価(63/71)

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上(18/18)

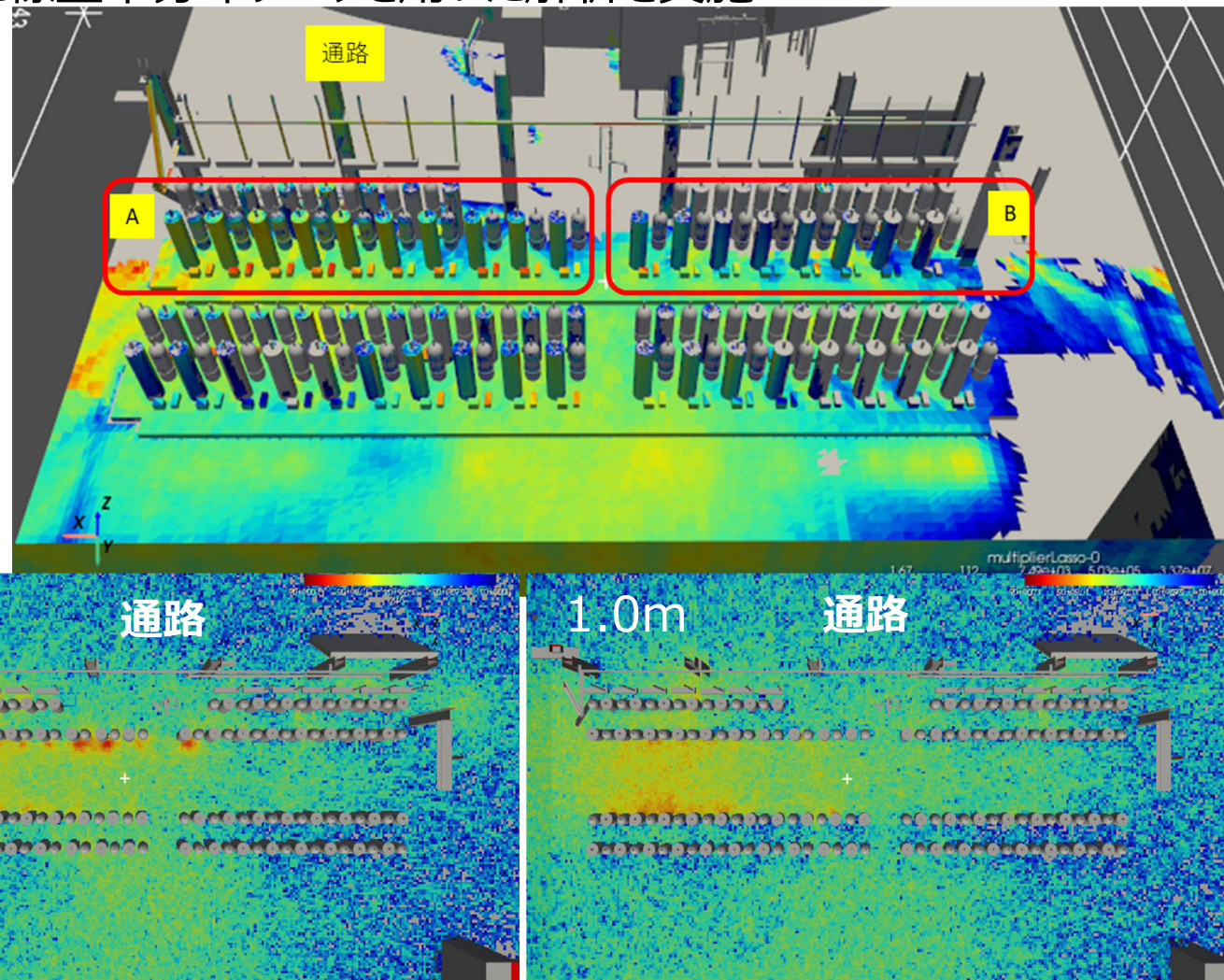
③CADモデルを用いた3Dモデル詳細化による精度向上の検証(5/5)

東電より入手したHCUを対象に測定された線量率分布データを用いた解析を実施



観測結果をほぼ完全に再現可能な解を求めることが可能

2列目の裏側が高線量



HCU・CADモデルを利用することで、更に詳細な線量率分布の取得に成功

2) システムのユーザビリティ向上

①高リアリティーな可視化の実現

- ・汚染状況の俯瞰的理解
- ・可視化視点位置の俯瞰的理解

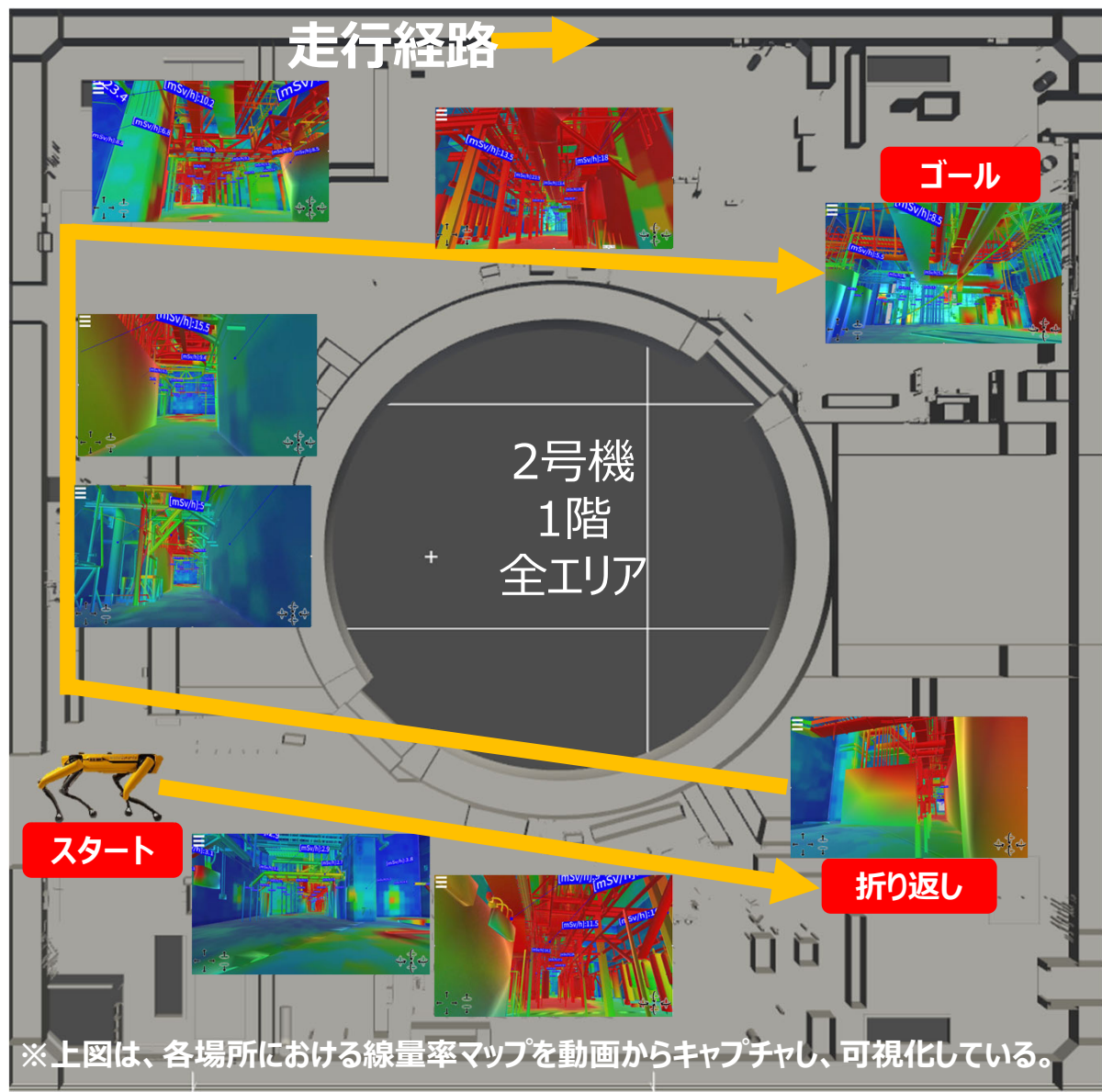
②アバターを活用する仮想空間での被ばく評価の実現

- ・仮想空間での経路選択による被ばく量確認
- ・仮想空間での線源対策による被ばく量変化の確認

a.システム製作及び現場適用性評価(65/71)

2) システムのユーザビリティ向上(1/5)

① 高リアリティーな可視化の実現(1/2)



結果詳細はb(c)②
(p.124～125、129～131参照)

高い現実感を有する
可視化技術の開発

SPOTをアバターとする
3D可視化

CAD化構造データの
活用

将来

様々な用途に活用が可能

構造物の移動・撤去
のシミュレーション

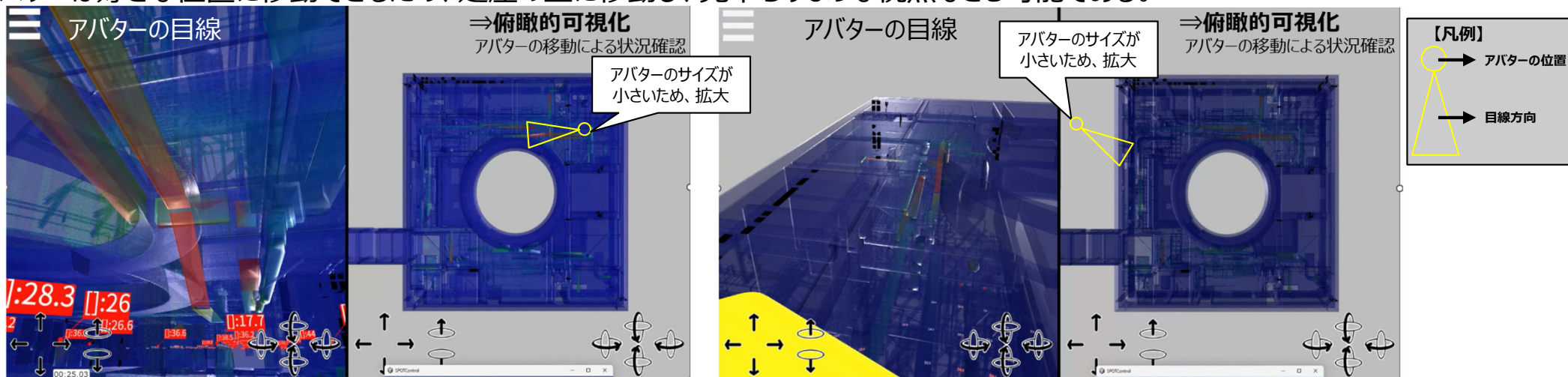
測定結果
(mSv/h)



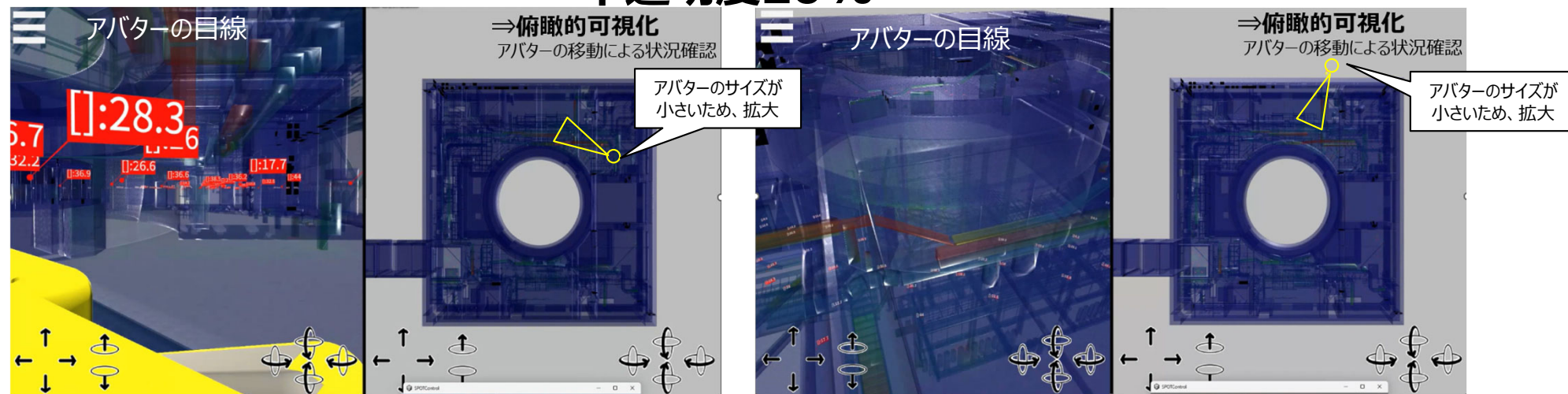
2) システムのユーザビリティ向上(2/5)

①高リアリティーな可視化の実現(2/2)

画面上で視点を選択できる。ここでは左半分をアバターの目線、右半分は(建屋の真上から見下ろした)俯瞰位置を示している。アバターは好きな位置に移動できるため、建屋の上に移動し、見下ろすような視点なども可能である。



不透明度20% ↑ SPOTの背中



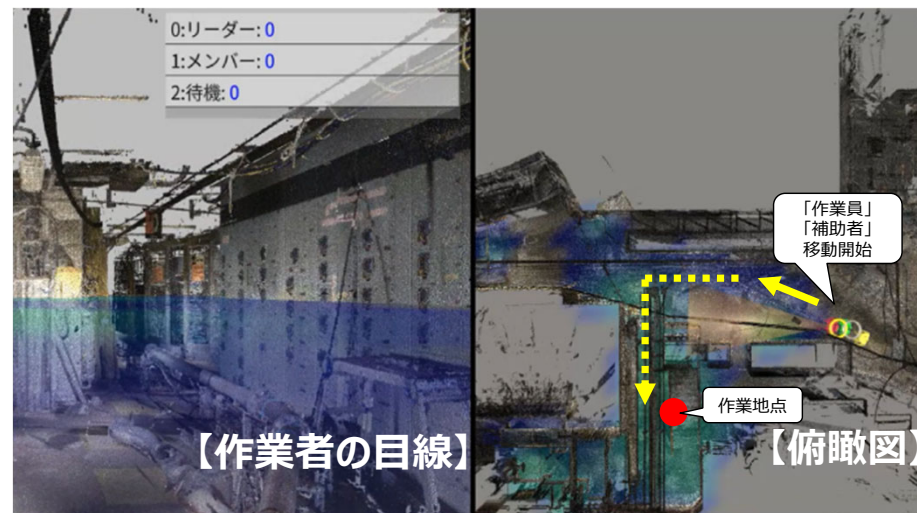
不透明度10%

※設定により、不透明度などを設定可能

2) システムのユーザビリティ向上(3/5)

②アバターを活用する仮想空間での被ばく評価の実現(1/3)

被ばく線量シミュレーション結果

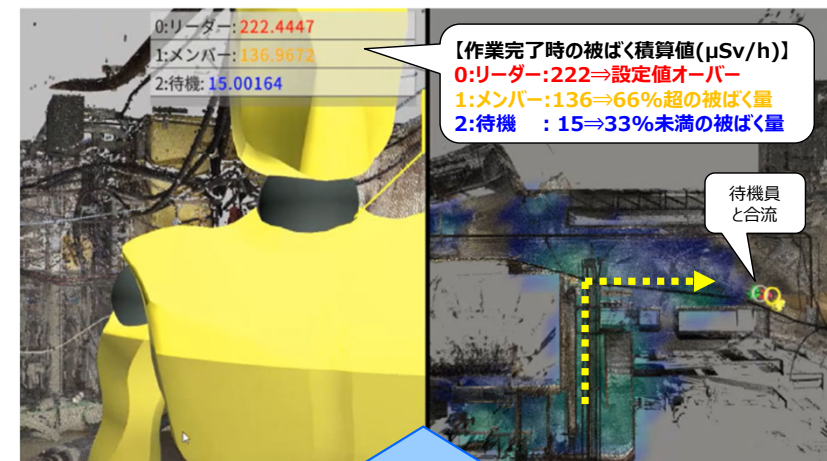


【累積被ばく量を 200 μ Sv/hに設定】

- 初期(0 μ Sv/h)
33%未満は青色表示
- 33%(66 μ Sv/h)
超で黄色表示
- 66%(132 μ Sv/h)
超で橙表示
- 100%(200 μ Sv/h)
超で赤表示

【行動スケジュール】

- ①待機地点より作業員(リーダー)及び補助者(メンバー)は作業員を先頭に移動開始。待機者はその場にて待機
- ②2分間かけて作業地点に到着
- ③作業員は2分間の現場作業を実施
- ④2分間かけて待機地点に到着

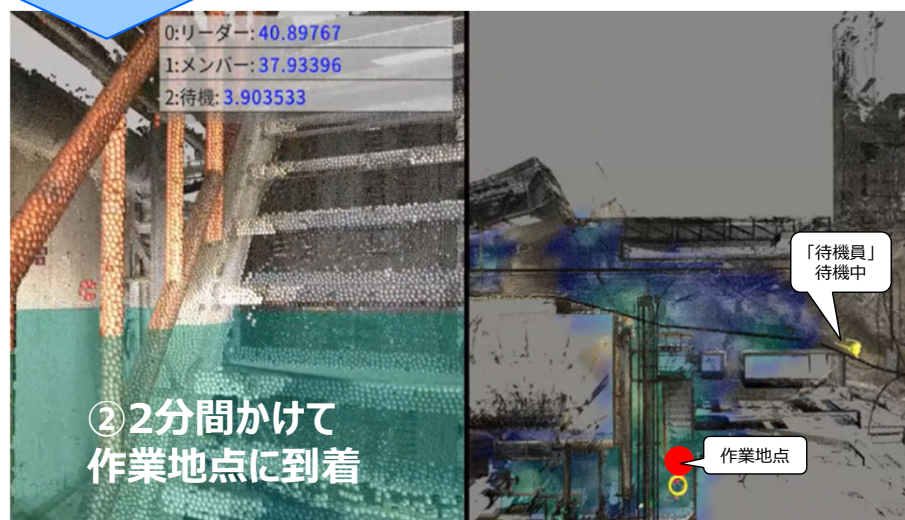
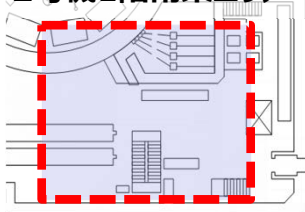


④2分間かけて待機地点に到着

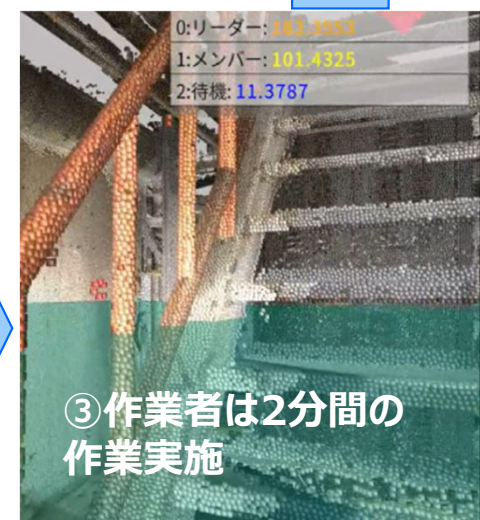
- ①待機地点より作業員(リーダー)及び補助者(メンバー)は作業員を先頭に移動開始。

※当該作業での累積被ばく量を200 μ Sv/hに設定

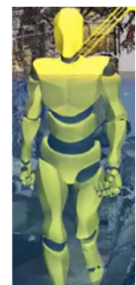
2号機1階南東エリア



②2分間かけて 作業地点に到着



③作業員は2分間の 作業実施



アバター

設定により、身長を変更できる(目線の位置は身長マイナス10cm)。

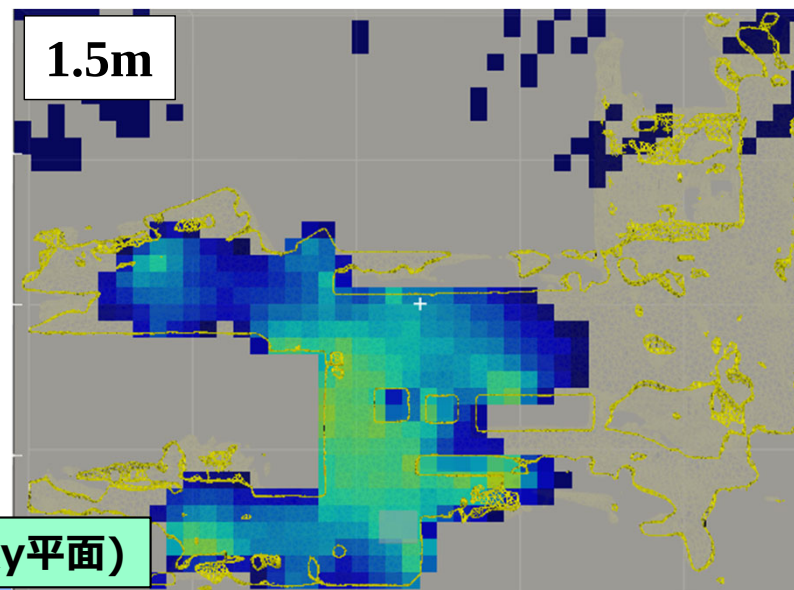
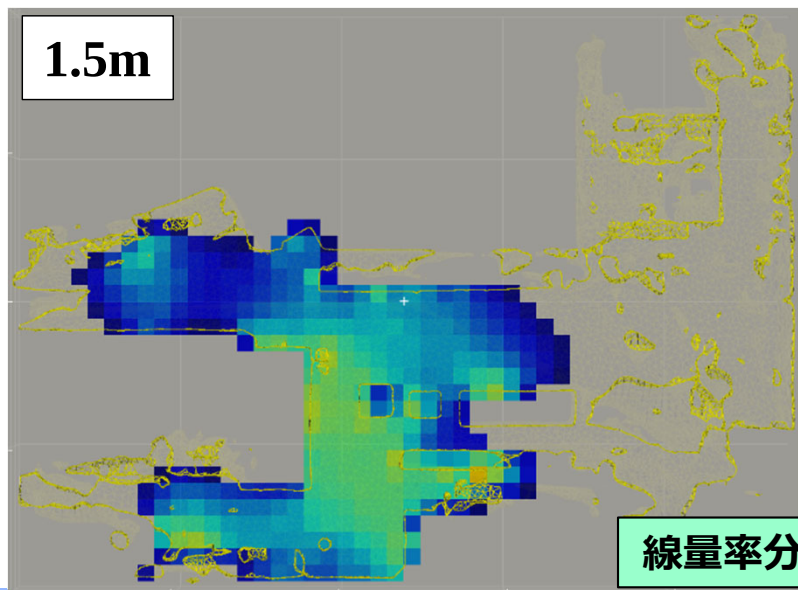
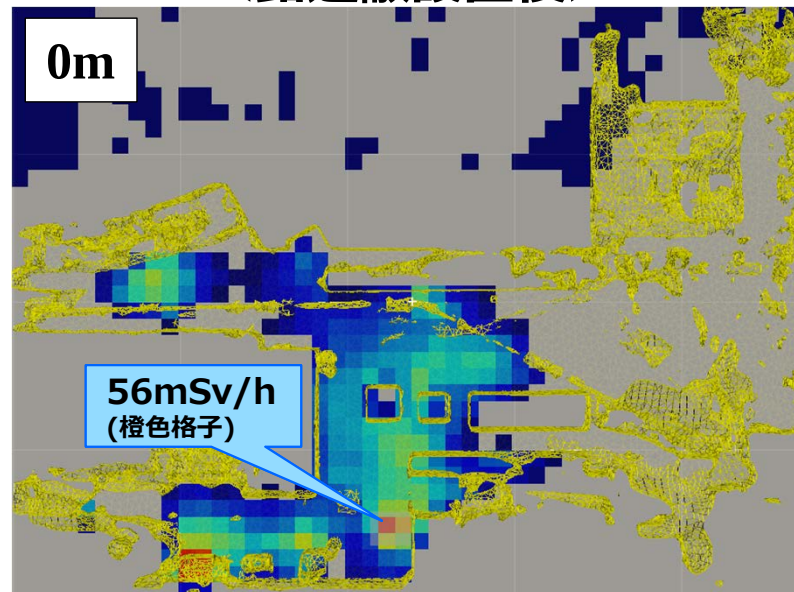
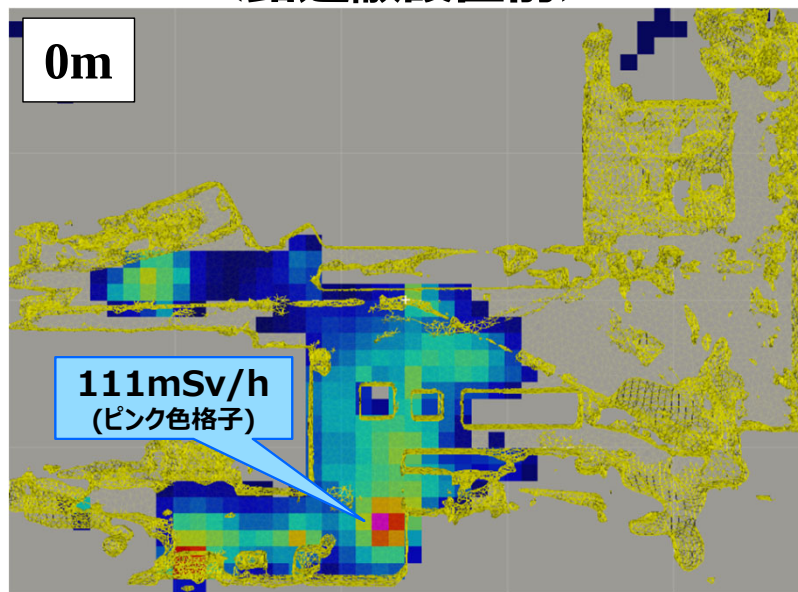
a.システム製作及び現場適用性評価(68/71)

2) システムのユーザビリティ向上(4/5)

② アバターを活用する仮想空間での被ばく評価の実現(2/3)

＜鉛遮蔽設置前＞

＜鉛遮蔽設置後＞



線量率分布(xy平面)

線源対策前後の
被ばく線量評価



アバターを活用



経路上の被ばく
線量を計算



各アバターへの限界
被ばく線量の通知

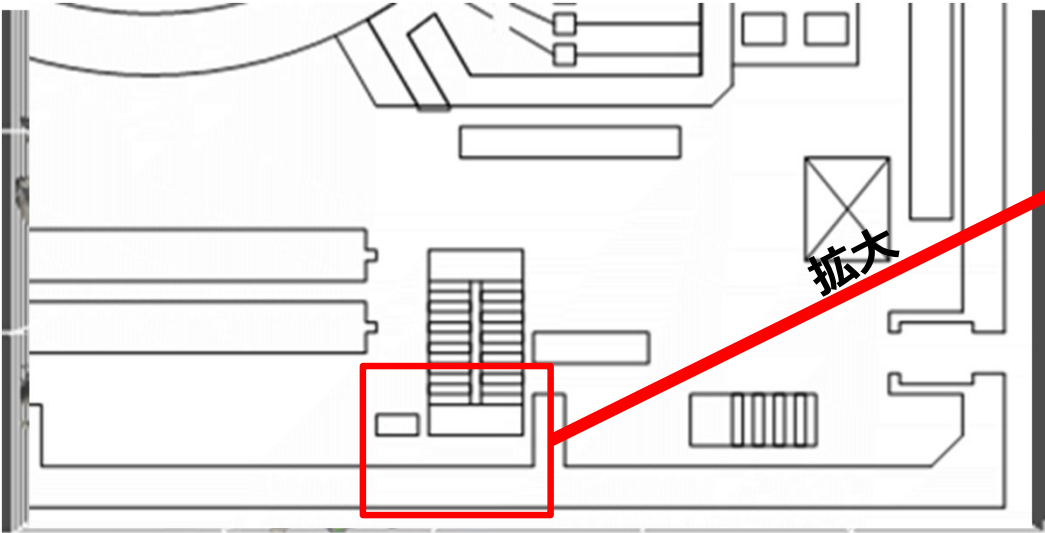
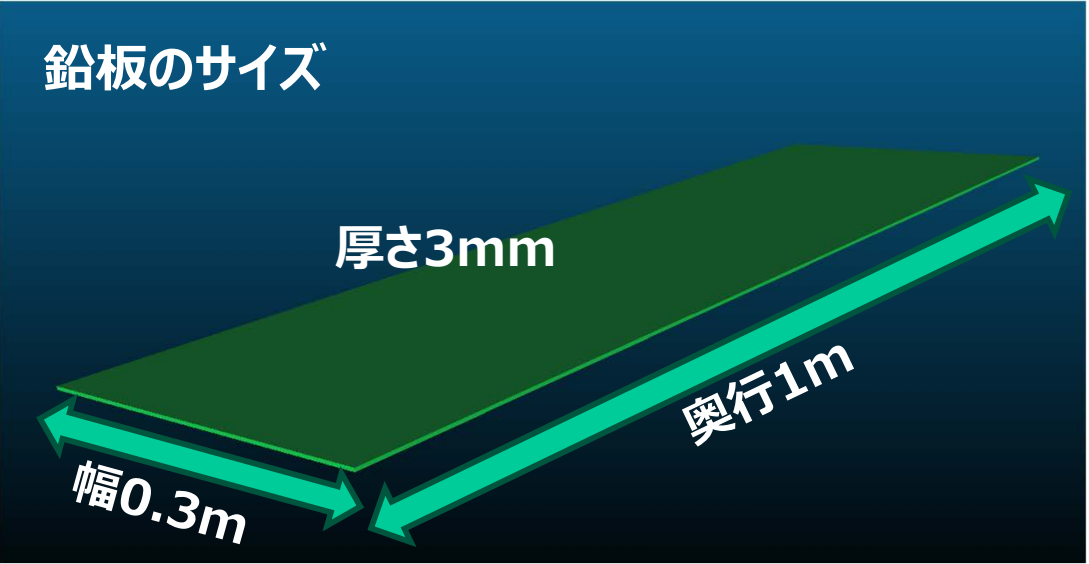
a.システム製作及び現場適用性評価(69/71)

2) システムのユーザビリティ向上(5/5)

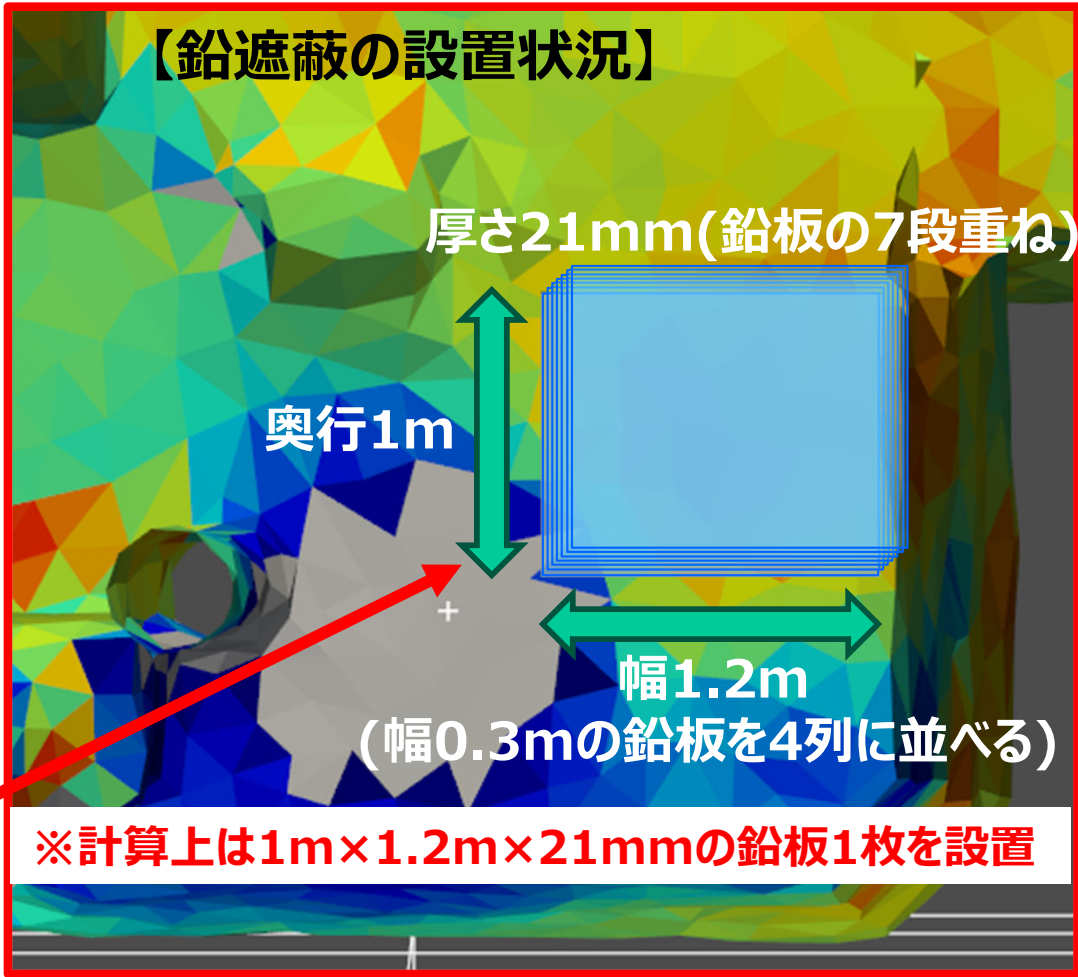
②アバターを活用する仮想空間での被ばく評価の実現(3/3)

鉛遮蔽を階段付近に設置し、遮蔽効果の確認

鉛板のサイズ

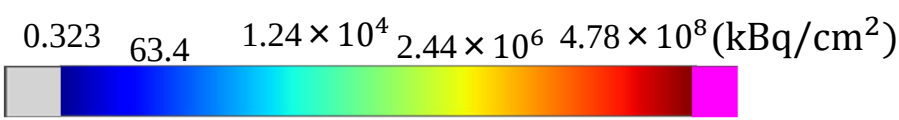


2号機南東エリアの階段付近



※計算上は1m×1.2m×21mmの鉛板1枚を設置

線源分布(Cs137)



【1F2/3号機での最終成果〈詳細説明〉】

1) 2/3号機の線源・線量率マップ精度向上の取り組み

- ・Pro詳細計算(空間解像度向上)により(検証用)格子点観測情報の再現精度向上を確認
- ・連続計測器(観測情報量向上)により(検証用)格子点観測情報の再現精度向上を確認

【結果】空間線量率分布に対し、当初予定の倍半分の精度を超え、十分な精度で達成可能であることが判明

＜現場での実証は終了し、TRL6を確認した。一部は実用に供する達成度(TRL6以上)を有すると判断＞

【課題】高所及び狭隘部にて点群計測等の死角となり、3Dモデル作成が困難となる地点での逆推定

2) ユーザビリティの向上の取り組み

①高リアリティな可視化の実現

【結果】構造物透明度付加によりリアリティ強化を確認

【課題】(1)VR表示により高没入感の獲得
(2)Full Visual Odometryの実現

②アバターを活用する被ばく線量評価シミュレーションの実現

【結果】累積被ばく線量の評価の実現を確認

【課題】(1)アバターの改良が要(現実の作業者模擬)
(2)最適経路の提案

●成果のまとめ

a.システム製作及び現場適用性評価 (TRL 5→6)

- 現場適用に向けたシステム概念検討結果を基に、線源・線量率評価システム(3D-ADRES-Indoor)として、FrontEnd(基幹システム)、Pro(詳細解析支援システム)及びBackEnd(データ管理支援システム)を開発し、1Fの2号機および3号機にて現場適用性を確認評価した。その結果は下記の通り。
- **FrontEnd** では、
 - ー 1F2号機および3号機において、現場で得られたデータ(点群・線量率)を用い、線源逆推定を行い、再観測指示までの**一連の動作が正常であることを確認**した。
 - ー **再観測により精度は大きく向上**し、特に**高強度線源付近の精度は十分であることが確認**できた。更には、現場点群上に構造物表面線量率をマッピングし、**ウォークスルー機能で作業者の視点から高強度な線源箇所を視認可能**であることを確認した。以上、現場で高い実用性を確認し**TRL6達成**。
 - ー 線量率計の自動読み取り機能については、現場利用による学習データの更なる蓄積が鍵であることが判明。当該機能の必要性も含め開発方針を定める必要がある。
 - ー ユーザビリティの向上も、今後の対応が必要な部分は、今後の開発計画を定める必要がある。
- **Pro**では、対象空間内で**高解像度での計算を通して、線源・線量率マップの精度向上を確認**した他、**高リアリティの可視化機能**、作業エリアの設定と最適除染率や遮蔽厚さの提案機能、被ばく評価に係るツール群も開発し**実用上の高い有用性を確認しTRL6達成**。
- **BackEnd**については、オンプレ/クラウド版を開発し、観測データおよびFrontEnd/Proの解析データのデータ管理機能を確認した他、データの蓄積状況を可視化するダッシュボード機能も開発し、2号機および3号機データにより、**実用に供するシステムであることを確認しTRL6達成**。今後はAI活用によるデータ検索機能等を拡充することが有効である。

2.各実施項目の開発成果

b. 現場適用性の向上のための研究開発

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

b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(1/13)

①高強度線源対策シミュレーション技術の研究(1/13)

●目標

1F現場で取得された点群データからの3Dモデル作成を効率化する。具体的には、既存の入手点群と新規点群データから差分を抽出し、構造物判別を行う。その構造部に材料情報を付与し、そこから3Dモデルの更新をし、BIM化を行うためのソフトウェアの開発を行う。

●計画 [令和5年度：TRL1➡2] [令和6年度：TRL2➡4以上]

1F等実測データを用いて現場適用性を評価する。

- (1) 3D-CADモデルの部品構成レベルの決定と学習モデルの構築
- (2) 点群データから3D-CADモデルを自動更新する手法の開発
- (3) 高強度線源対策シミュレーションへのBIM形式データへの変換

●スケジュール

実施内容	2023（令和5）年度	2024（令和6）年度
b. 現場適用性の向上のための研究開発		
(a) 1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化		
①高強度線源対策シミュレーション技術の研究	開発計画検討	
	BIMデータ整備のためのソフトウェア開発	現場適用性評価
		まとめ

b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(2/13)

① 高強度線源対策シミュレーション技術の研究(2/13)

先行国の補助事業課題

→データの取得、変換、整備がボトルネック

構造情報：点群 ⇒ CAD ⇒ STL

- 点群は提供データのみ取り扱い可
- CAD化に際して人手作業要
- STL化に際して人手整備要

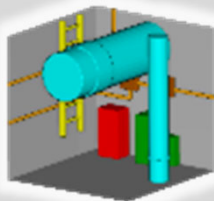
課題 ①膨大な時間を要するデータ整備
②人手に依存する作業が存在

原子力発電所内構造物の学習

1F2号機の点群/CADデータを活用



3D point cloud

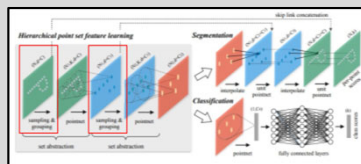


3D-CAD



Labeled
3D point cloud

90%を超える
識別性能を確認



Network Training
by PointNet++

目標

- ・点群データのAI等活用による3D-CADモデル
- ・BIM（構造物材質・材厚情報を有する）化の自動化

○構造情報(点群)の遠隔取得とBIMデータ化

粗STL⇒ 粗STL面での即時逆推定をFrontEndにて実施

迅速測定

点群取得

※1F現場で点群計測
(位置合わせ済み)

精密測定

3D-ADRES-Indoor
FrontEnd

現場計測後に
即時逆推定

CAD
(既存ソフトウェア)

対話処理による整備、
自動化機能は限定的

CAD
(開発ソフトウェア)

既存ソフトウェアで
判別不可な構造物
を識する機能(AI)
の開発

BIMデータ

3D-ADRES-Indoor
Pro

詳細線源逆推定及
び線源対策最適化。
材質・材厚情報を持
つソリッドモデルが必要

3D-ADRES-Indoor
BackEnd

データベースとして
管理し事後の有効
活用(様々な活用
に対応)

b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(3/13)

①高強度線源対策シミュレーション技術の研究(3/13)

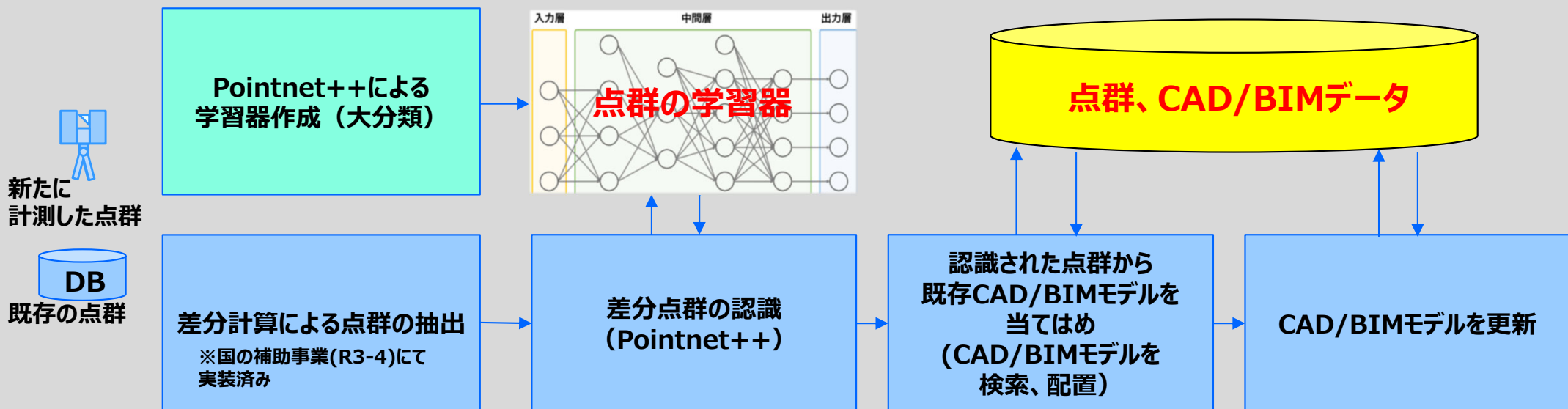
【開発計画】

- (1) 3D-CADモデルの部品構成レベルの決定と学習モデルの構築
- (2) 点群データから3D-CADモデルを自動更新する手法の開発
- (3) 高強度線源対策シミュレーションへのBIM形式データへの変換

【2年間の成果①】

- ・「パイプ」以外の構造物種別を対象としたCAD/BIM化手法を開発
- ・楢葉試験場の点群・3次元モデルデータを用いた手法の動作検証を実施

点群、CAD/BIMデータの自動更新の流れ

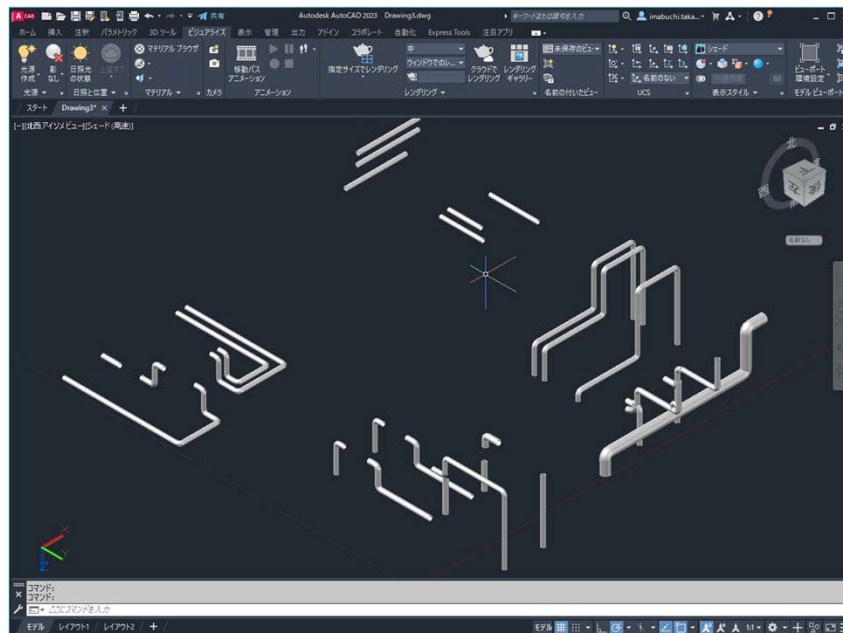
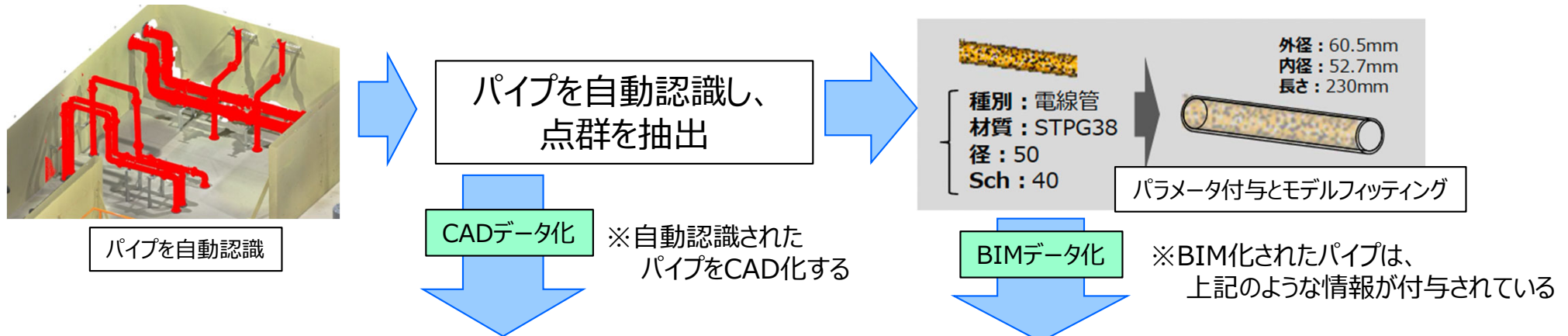


b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(4/13)

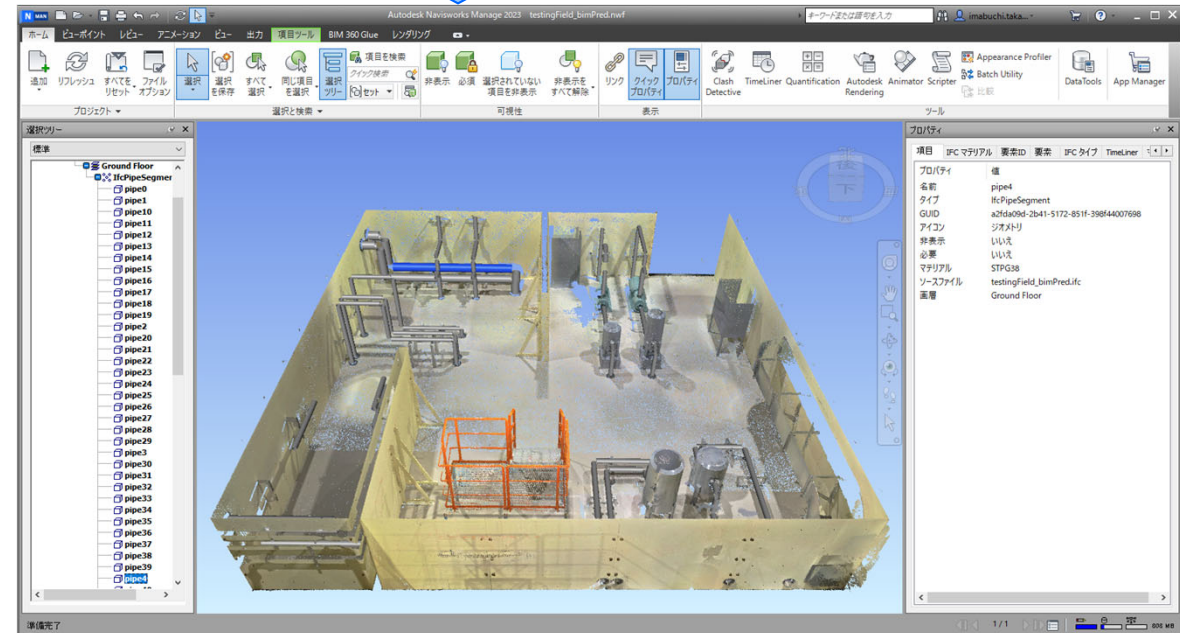
① 高強度線源対策シミュレーション技術の研究(4/13) 点群から自動CAD/BIM化

- パイプ : OpenCascadeを用いて点群からCADを自動作成

※OpenCascade
3D-CADのためのオープンソースの開発プラットフォームおよびC++/Python等から呼び出して用いるライブラリ



自動作成により、CADデータ化されたパイプ



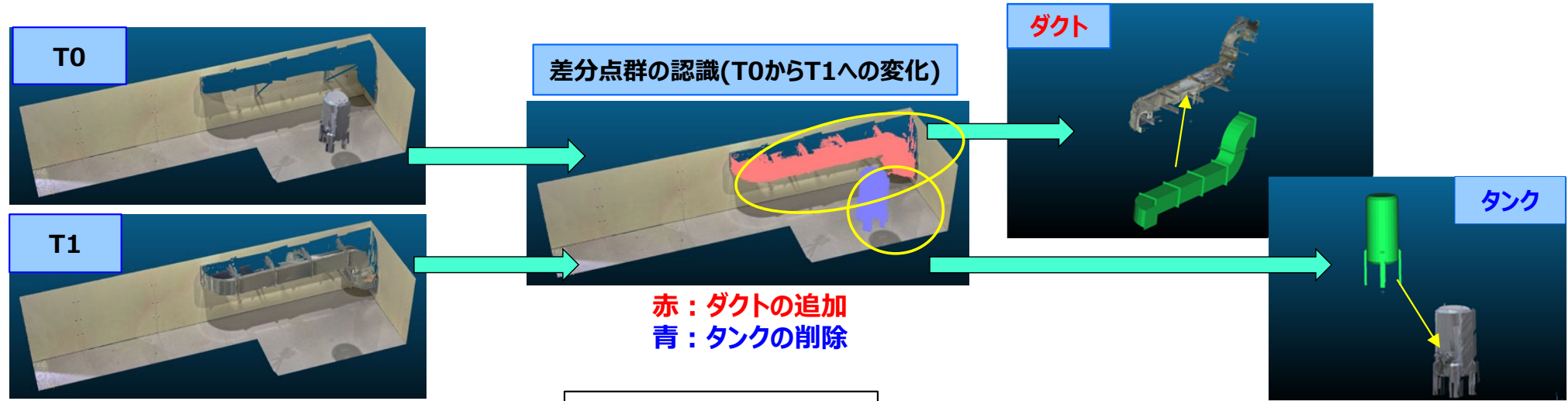
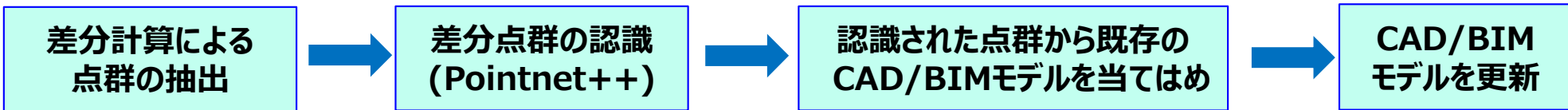
自動作成により、BIMデータ化されたパイプ

b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(5/13)

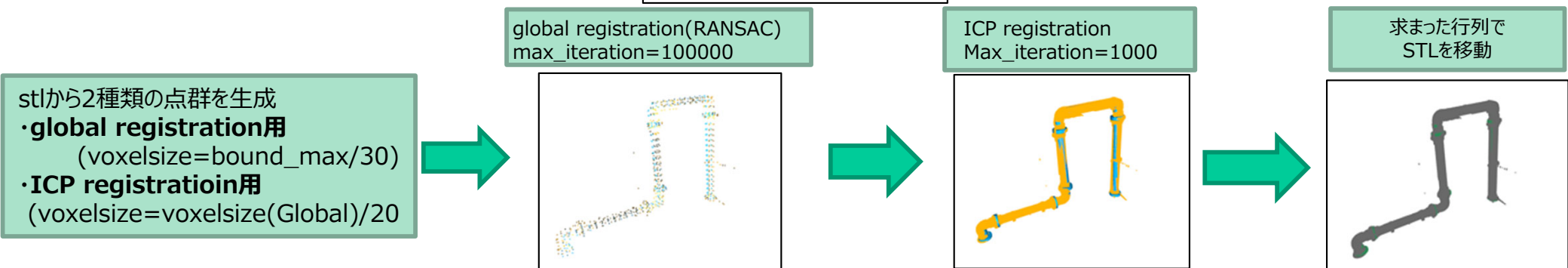
① 高強度線源対策シミュレーション技術の研究(5/13) 点群から自動CAD/BIM化

ICP registration : 繰り返し計算によって点群間の位置合わせを行う手法
Global registration : 初期化のためのアライメントを必要としない点群間の位置合わせ手法
RANSAC : 観測データから外れ値を検出するための反復手法

- パイプ以外の構造物 : 点群の差分計算による部品抽出、抽出された点群からCAD/BIMモデルを検索、レジストレーションを用いた位置合わせによるCADモデルを当てはめ



レジストレーション実行手順



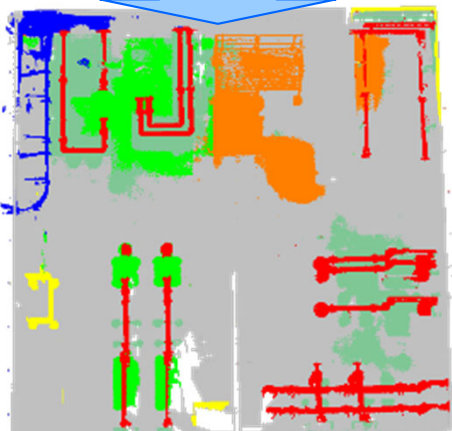
b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(6/13)

① 高強度線源対策シミュレーション技術の研究(6/13)

点群から自動CAD/BIM化(樫葉試験場データを用いた性能評価)

【構造物の自動認識結果】

点群数：3717万0729点
(0.03mでボクセルダウンサンプリング)



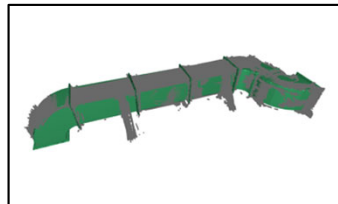
パイプの認識精度：98.3%
(全カテゴリ平均精度：90.4%)

■ DUCT ■ ELECTRICAL ■ EQUIPMENT
■ FRAME ■ PIPE ■ STRUCTURE ■ SUPPORT

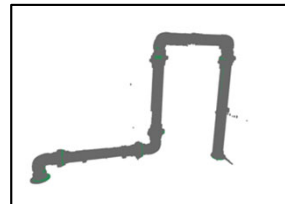
パイプの自動CADモデル化

開発ソフトウェアによるCAD化結果	既存ソフトウェアによるCAD化結果
90.2%変換 ※1 処理時間173秒	38.9%変換 ※1 処理時間1047秒
※1) 正解CADデータの頂点に対して10cm以内の距離に面を生成した割合	

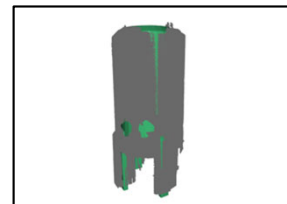
パイプ以外の構造物のCADモデル当てはめ



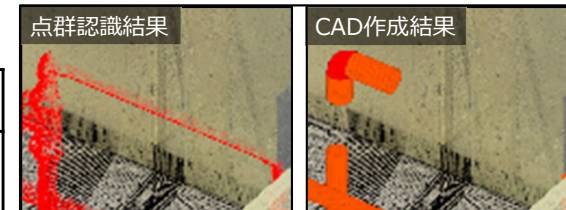
【ダクト実行結果の例】



【パイプ実行結果の例】



【タンク実行結果の例】



予めパイプの種別を認識しているため
誤ったモデルフィッティングを回避可能



点群計測が不十分な箇所に対しては
パイプのモデルフィッティングが不可能



- ・パイプ、タンクなど、元の形状を保っている点群の場合→ICPによるレジストレーションまで実行すれば比較的良好な結果を得られる
- ・ダクト等計測できなかった面がある点群の場合→ ICPによるレジストレーションまで実行してもフィットネスの値が低い
- ・**形状を正確に計測できた部品については本手法が有効**

部品種別	開発ソフトウェア			既存ソフトウェア		
	フィットネス	inlier_rmse	実行時間	フィットネス	inlier_rmse	実行時間
ダクト	0.57	0.0075	23秒	0.34	0.0092	0.12秒
パイプ	0.93	0.0066	3.7秒	0.71	0.0092	0.11秒
タンク	0.87	0.0059	51秒	0.72	0.0090	0.17秒

実行環境
Hardware:
Core i7 13700H, 64GB RAM,
2TB SSD
Geforce RTX 4060 Laptop
8GB
Software:
Windows11 Pro
Python3.9
Open3D 0.15.1

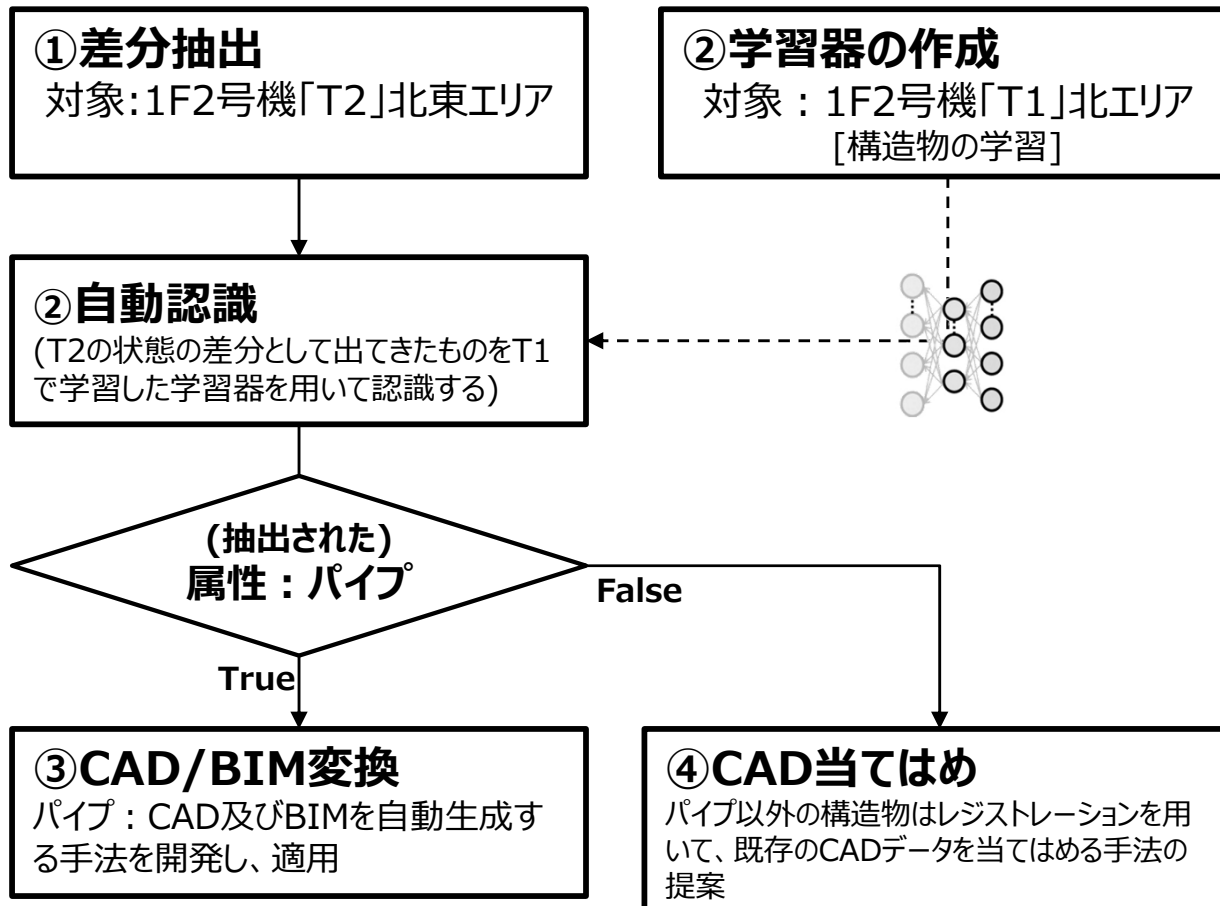
b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(7/13)

①高強度線源対策シミュレーション技術の研究(7/13)

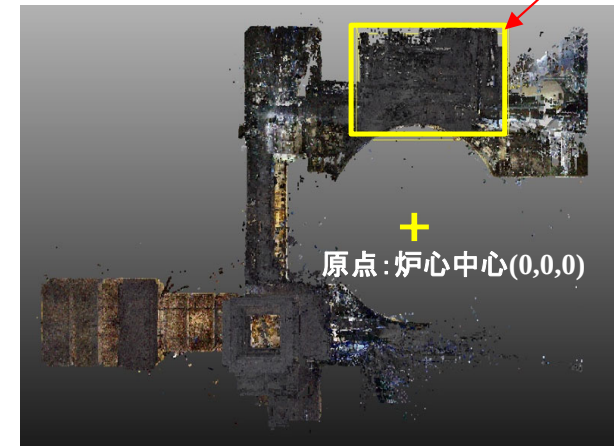
【2年間の成果②】

- ・ 1Fで計測された点群を用いて開発手法の動作確認により現場適用性評価を実施
- ・ 1-3号機の点群/CADデータを用いて学習器を作成(平均精度：75~98%)
- ・ 各開発手法について3D-ADRES-Indoorへの実装

【作業フロー】

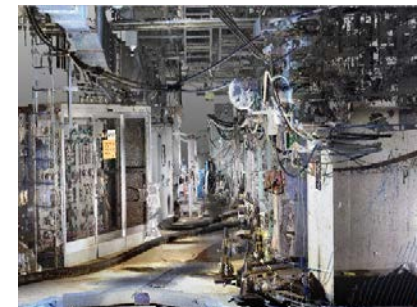


1F現場適用使用データ ⇒1F2号機T2北東エリア



T2:aチームの計測データ
T1:東電設計から受領した計測データ

T2 (2024年計測) 北東エリア



T1 (2022年計測) 北東エリア



b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(8/13)

① 高強度線源対策シミュレーション技術の研究(8/13) 1F現場で取得されたデータを用いた適用性評価(1/5)

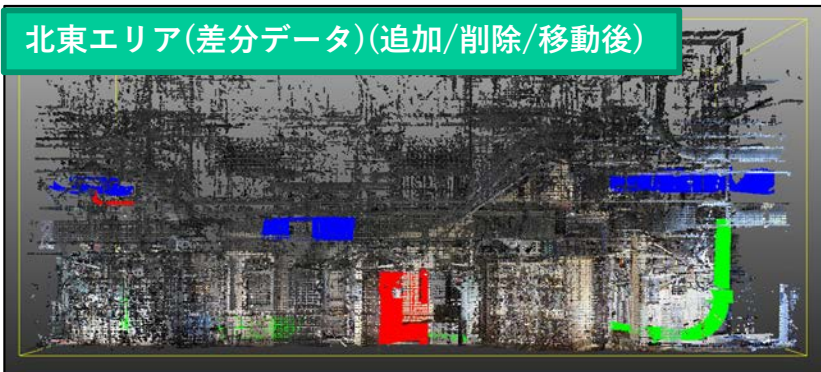
① 差分抽出(※)

- 1F2号機1階北東エリアを対象に追加/削除/移動した部品点群を抽出、クラスタリングによるグループ分けを実施。

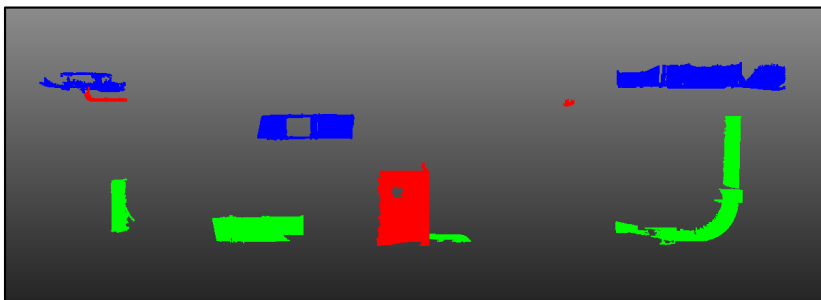
【差分抽出について】

実際に1F2号機北東エリアに適用した際、非常に多くの差分を検出したが、今回、学習の対象としたパイプや配電盤といった構造物等についてはこの2年間では差分として現れなかったため、模擬的に点群から抽出してコピーしたり移動して作成した、疑似的なものである

北東エリア(差分データ)(追加/削除/移動後)



追加/削除/移動後で色分けした差分データ(確認用)



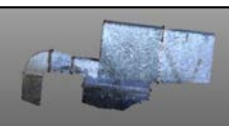
※今回は精度評価のために正解データを用意
(本来はこの時点で部品種類がわからないため、点群の形状認識を行う必要がある)

<抽出結果:「追加」、「削除」、「移動」についての判定>

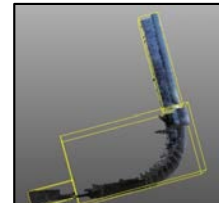
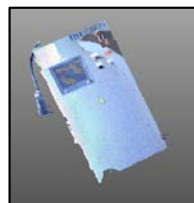
【追加】
配電盤×1
パイプ×2



【削除】
配電盤×1
ダクト×2
ケーブルトレイ×1



【移動】
配電盤×2
ダクト×1
パイプ×2



計測点が離れて3グループに分かれているが1つのパイプ

<処理時間>

ダウンサンプリング : 24秒
差分抽出 : 35秒
クラスタリング : 5秒
変化種類特定 : 390秒

*「移動」、「追加」、「除去」の特定

【実行環境】

Windows 11,
Core i9-13900KF 3.00GHz,
RAM 128GB,
NVIDIA GeForce RTX 4090

b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(9/13)

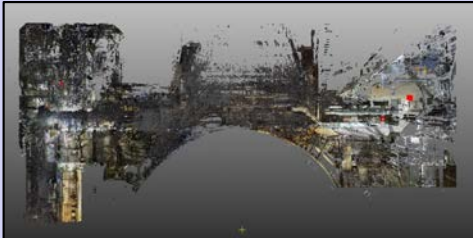
① 高強度線源対策シミュレーション技術の研究(9/13) 1F現場で取得されたデータを用いた適用性評価(2/5)

② 学習器の作成・自動認識

・1F2号機「T1」北エリア(北西+北東)データを用いて学習器を作成
 ➡「T2」北東エリアにおける抽出した差分点群を対象に構造物の自動認識を実施

【認識結果について】IoUは76%～98%ほどの精度が出ているが、これは点のレベルで精度を計算した結果で、構造物1つあたり何割ほどが、種別、正解を当てられたかという割合になる。図を見ると、推定した種別の色が着色されているが、ほとんどの1つのオブジェクトに対して正解のラベルが割り当てられている結果がわかる。精度自体は76%といった数値は出ているが、すべての構造物において正解を割り当てられている、という結果となった。

<学習器の作成>



T1北エリア点群データを用いて学習し、学習器を作成



学習した結果をCADデータで示したもの

※岩手県立大学開発のVCCでデータ取得

位置	データ名	頂点数
北東	Area_1	3,767,591
北東	Area_2	4,498,073
北東	Area_3	5,759,429
北東	Area_4	11,385,133
北東	Area_5	6,584,786
北東	Area_6	2,994,546
北東	Area_7	3,250,650
北西	Area_8	57,167,086
北西	Area_9	70,995,986
北西	Area_10	77,066,726
北西	Area_11	68,287,764
北西	Area_12	21,210,488
北西	Area_13	2,585,422
北西	Area_14	57,276,943

<処理時間>

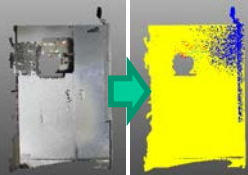
学習：約13時間
 推論：36秒(約3秒/データ)

<認識結果(学習器を用いて差分情報を識別した結果)>

■ 配電盤
 ■ ケーブルトレイ
 ■ 導管
 ■ ダクト
 ■ パイプ
 ■ 梁
 □ 壁/床/柱

追加

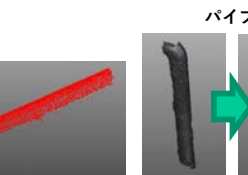
配電盤 1



パイプ 1

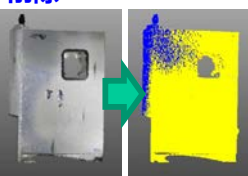


パイプ 2

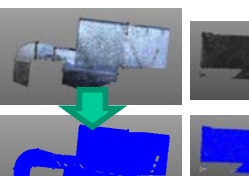


削除

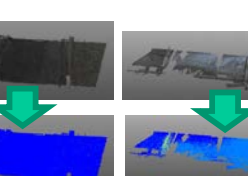
配電盤 2



ダクト 1



ダクト 2



ケーブルトレイ



移動

配電盤 1



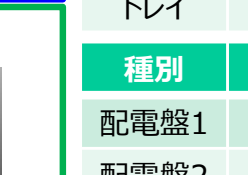
配電盤 2



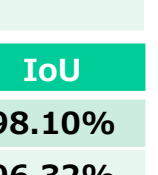
ダクト



パイプ 1



パイプ 2



種別	IoU
配電盤1	84.38%
パイプ1	90.10%
パイプ2	97.52%

種別	IoU
配電盤2	88.69%
ダクト1	98.99%
ダクト2	97.84%
ケーブルトレイ	75.72%

種別	IoU
配電盤1	98.10%
配電盤2	96.32%
ダクト1	98.73%
パイプ1	91.69%
パイプ2	76.32%

学習/推論環境 (PointNeXt-s: <https://github.com/guochengqian/PointNeXt>)
 [Hardware] DeepLearning Box II [OS] Ubuntu 20.04 LTS
 [GPU] Quadro RTX A6000(48GB) × 3 [Library] pytorch1.12.1 cuda11.3

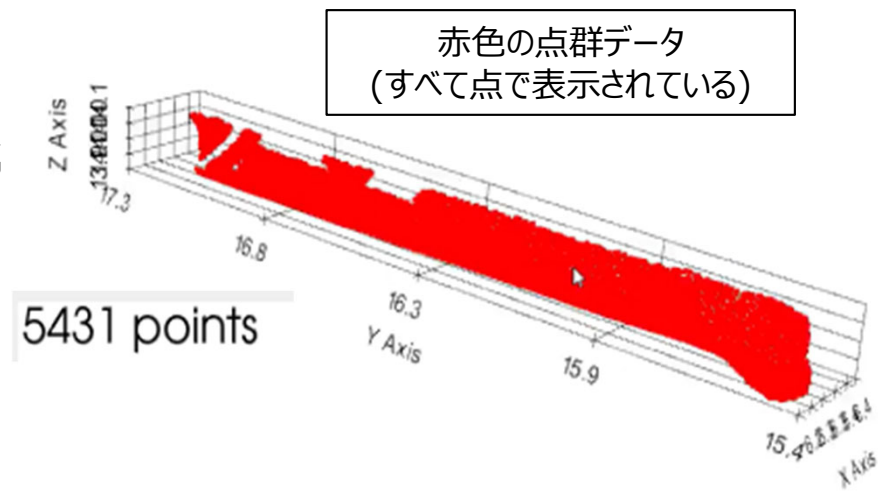
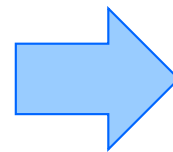
b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(10/13)

① 高強度線源対策シミュレーション技術の研究(10/13)

1F現場で取得されたデータを用いた適用性評価(3/5)

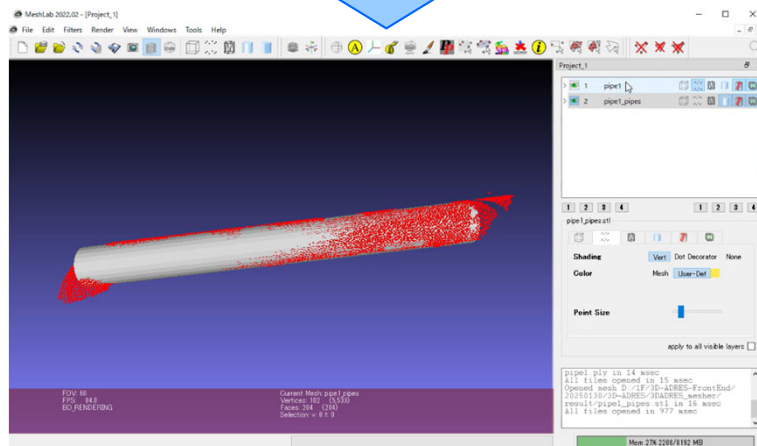
③ CAD/BIM変換<3D-ADRES-Indoorへの実装>

1F2号機1階現場での取得データを用いたパイプのBIM/CAD化

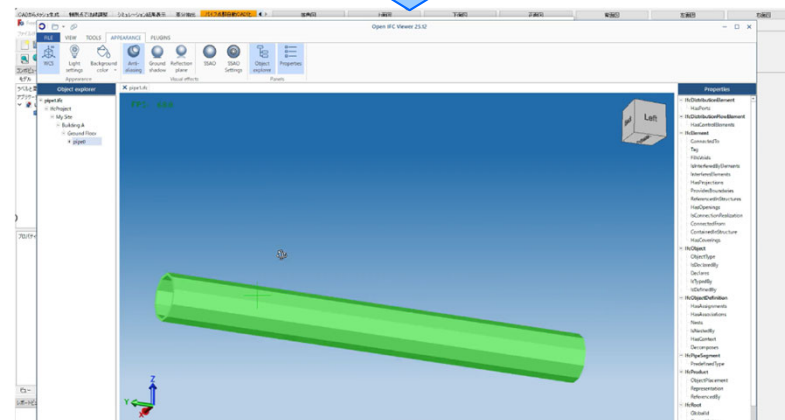


[点群読込]ボタンを押下し、ファイルを選択、データを読み込む(plyファイル)

点群データが表示されたら、[CAD化]ボタンを押下すると、すぐに「CAD/BIM化が完了しました」というメッセージが表示され、CAD化/BIM化が完了。同時に「**stlファイル**」、「**igesファイル**」、「**ifcファイル**」が作成される



CAD化されたデータをビューワで確認



BIM化されたデータをビューワで確認

※CAD化されたデータ及びBIM化されたデータはファイル形式が異なるので、別のアプリケーションでそれぞれデータを読み込む

b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(11/13)

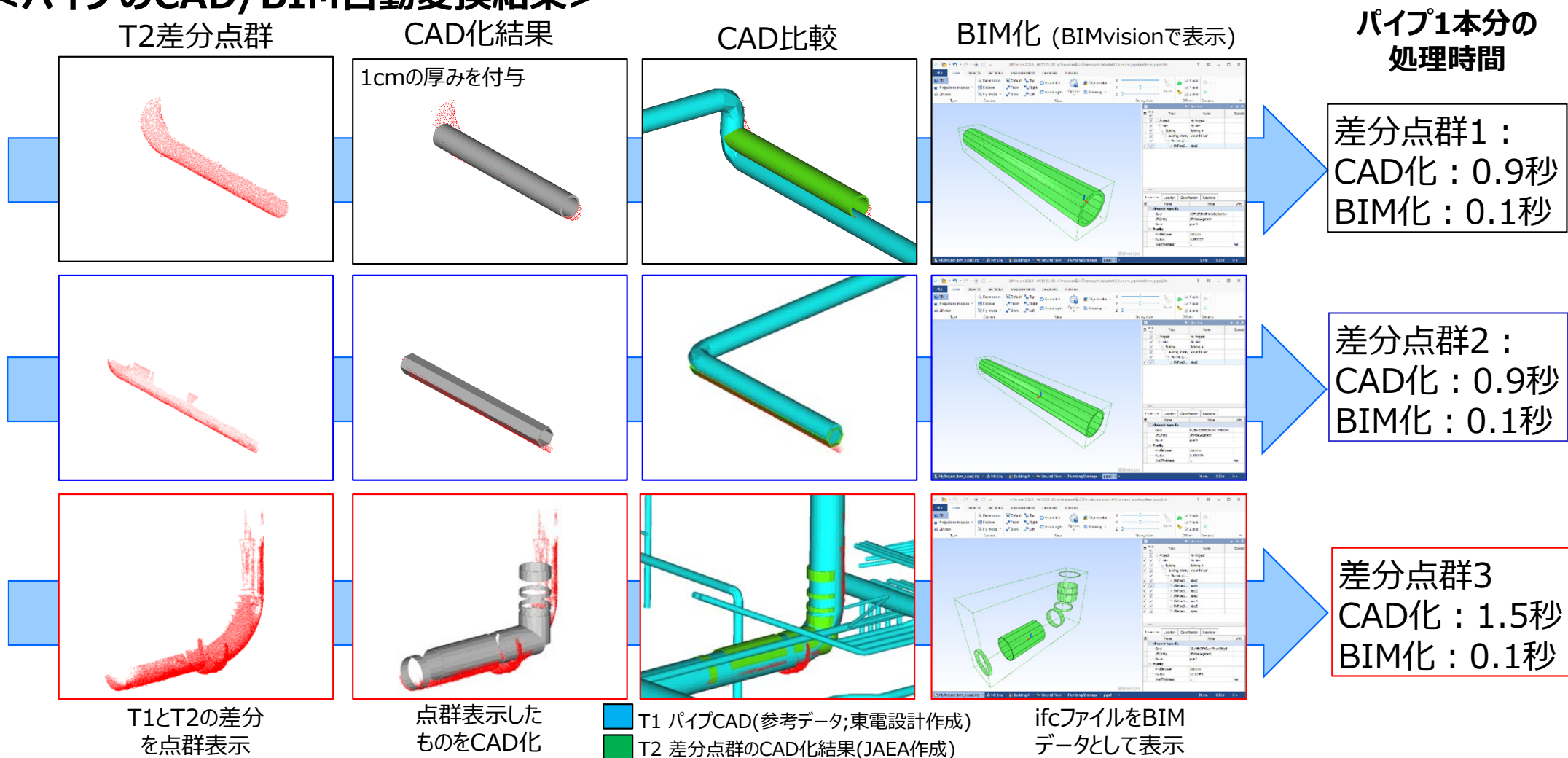
① 高強度線源対策シミュレーション技術の研究(11/13)

1F現場で取得されたデータを用いた適用性評価(4/5)

③ CAD/BIM変換

1F2号機1階、T2北東の差分点群のうち、パイプと認識できたものを対象にCAD/BIM自動変換を実施

<パイプのCAD/BIM自動変換結果>

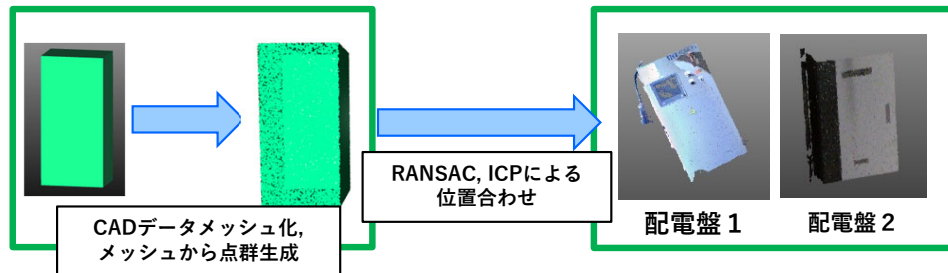


b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(12/13)

① 高強度線源対策シミュレーション技術の研究(12/13) 1F現場で取得されたデータを用いた適用性評価(5/5)

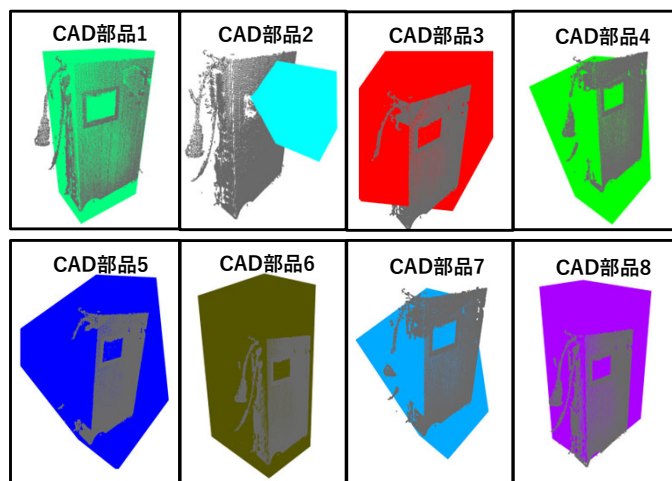
④ CAD当てはめ(用語説明はp.179参照)

1F2号機1階、T2北東の差分点群を対象にCAD当てはめを実施



位置合わせ終了後のフィットネス値が最大
⇒該当部品に決定

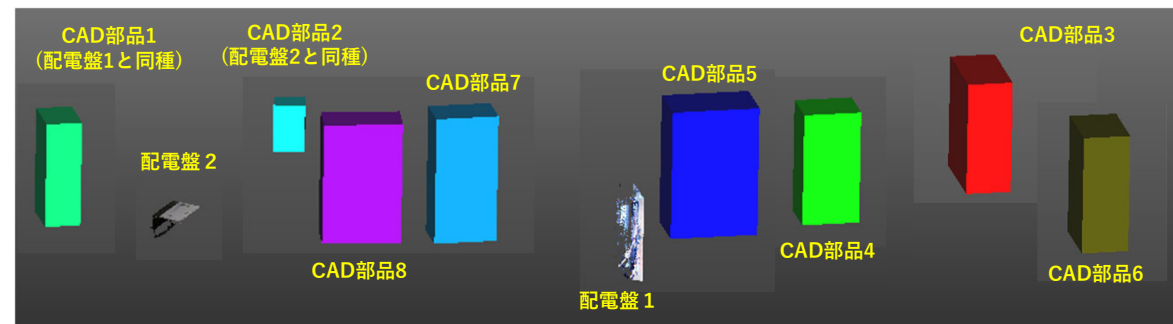
<配電盤1の結果>



種別	フィットネス値	実行時間[秒]
CAD1	0.2606	3.56
CAD2	0.1916	2.11
CAD3	0.0864	0.84
CAD4	0.1339	17.15
CAD5	0.0851	1.08
CAD6	0.1187	17.58
CAD7	0.1466	6.54
CAD8	0.1763	4.55

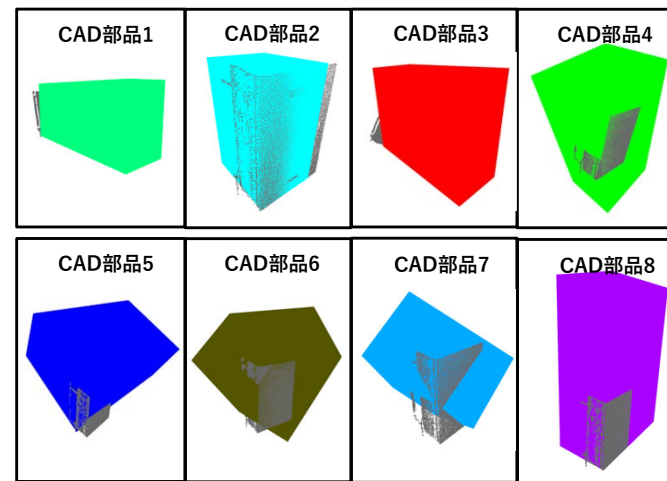
CAD部品1のフィットネス値が最大→配電盤1はCAD部品1に決定

ICP registration : 繰り返し計算によって点群間の位置合わせを行う手法
Global registration : 初期化のためのアライメントを必要としない点群間の位置合わせ手法
RANSAC : 観察データから外れ値を検出するための反復手法



認識点群およびCAD部品の初期配置(斜め上視点)

<配電盤2の結果>



種別	フィットネス値	実行時間[秒]
CAD1	0.0683	8.34
CAD2	0.3252	1.07
CAD3	0.0253	14.79
CAD4	0.0455	5.57
CAD5	0.0174	2.96
CAD6	0.0316	0.56
CAD7	0.0134	0.51
CAD8	0.0716	2.01

CAD部品2のフィットネス値が最大→配電盤2はCAD部品2に決定

b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化(13/13)

①高強度線源対策シミュレーション技術の研究(13/13)

<成果>

- ①1F2号機1階の北エリアで取得した点群データに対して、変化前/変化後の点群データを整備した。
合計12種 [配電盤4種、パイプ4種、ダクト3種、ケーブルトレイ1種]
- ②この時系列点群データに対して差分抽出を行い、各種別の形状認識においてIoU: 75~98%を達成した。
- ③パイプと認識された点群に対する自動CAD/BIMモデル化を達成した。
- ④CADモデルの当てはめでは、移動された2種の配電盤点群に対し登録済みの配電盤CADモデル当てはめ(位置合わせ)を実施し、正解部品とのフィットネス値(一致度)が最大となった。

上記の手法群を3D-ADRES-Indoorへ実装を行なったことから、TRL4以上を達成した。しかしながら、時系列点群の計測に関しては、いくつかの課題を残している。

開発項目	課題
差分抽出	- 同じ物体(機材、部品の交換など)が同じ場所で置き換えられた場合、認識できない - 点群密度が不均一な場合、一つの物体として検出できない - 時系列データのどちらか一方で未計測の区画があると、差分として抽出される
自動認識・学習	計測点群が不十分だと認識率が著しく低下する(途切れた箇所など誤認識の要因)
CAD/BIM変換	認識したパイプ点群が不十分な(途切れている、もしくは少ない)場合、CAD化が困難
CAD当てはめ	認識したモデルの点群が不十分な場合、CAD当てはめの正解度が低下する
時系列点群計測に関する問題	- 時系列点群データ間の計測設定(密度や計測箇所等)の違い - 時系列点群データ間の位置/原点ずれ ➡ 精度の高い位置合わせが必要 - 未計測箇所、計測の不十分さ ➡ 十分な計測または点群の補完手法が必要

b.(b) 線源・線量推定解析の高速化(1/10)

①放射線シミュレーション技術の研究(1/10)

● 目標

線源・線量の予測は、1F廃炉作業における作業員の安全確保、被ばく低減に重要な役割を果たすが、高い精度を得るためには、放射線の物理シミュレーションを繰り返し行うことが不可欠となり、長時間の計算が必要となる。

本プロジェクトでは、1F廃炉作業現場での安全性向上を目的に、現場で用いられる業務用PCでも上記シミュレーションを高速に動作させるため、高計算負荷のシミュレーションをより計算負荷が低い近似モデルに置き換えるAIサロゲーションモデルの開発を目標とする。

● 計画 [令和5年度：TRL1⇒2] [令和6年度：TRL2⇒4以上]

1F実測データを用いて現場適用性を評価する。

- ・モンテカルロ放射線計算データの収集と前処理
- ・AIサロゲートモデルの設計とトレーニング
- ・計算精度の評価と改善
- ・システム実装と現場適用性評価、まとめ

● スケジュール

実施内容	2023（令和5）年度	2024（令和6）年度
b. 現場適用性の向上のための研究開発		
(b) 線源・線量推定解析の高速化		
①放射線シミュレーション技術の研究	開発計画検討	サロゲートモデルの開発 現場適用性評価 まとめ

b.(b) 線源・線量推定解析の高速化(2/10)

① 放射線シミュレーション技術の研究(2/10)

国の補助事業での課題(評価者用プロトタイプアプリのみ:高速化要)

超高速評価版の開発整備

- 逆推定(準備も含む)
- 線量率計算(線源対策計算)の高速化要

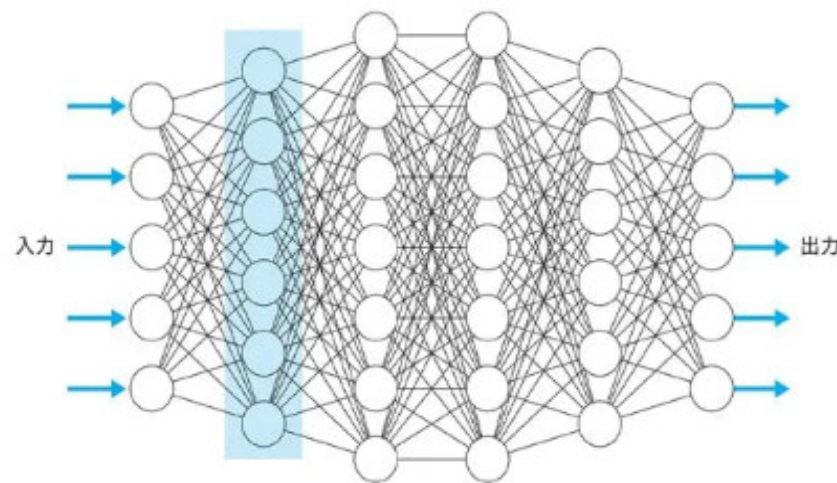
評価者視点でのアプリの高速応答性が未整備

放射線順計算/逆推定計算/線源対策推定計算

AIモデル提示⇒学習データ準備⇒学習⇒試験
⇒組み込み(Pro)⇒検証(楢葉試験場/JMTR/1F)

[入力]線量率情報、構造物情報 ⇒ [出力]線源情報

教師データ

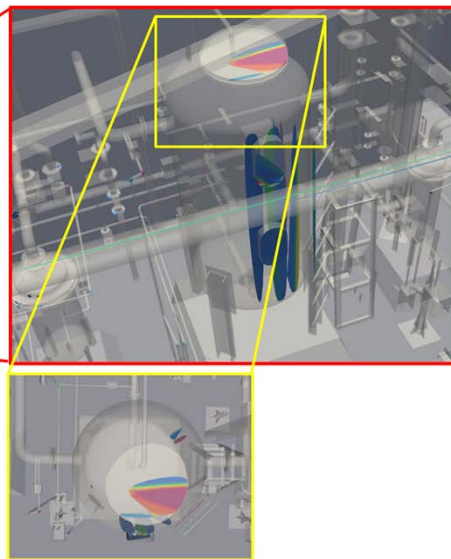


AI(1F建屋内用)を構築

逆推定/順推定をサロゲート

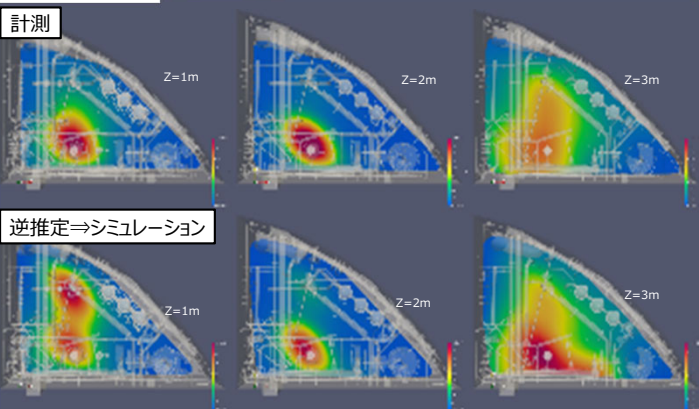
目標：AIが迅速に線源/線量率分布を逆推定

線源マップ (プールカナル循環系機器室)



モンテカルロ放射線計算
簡易放射線計算

AIが高速代替

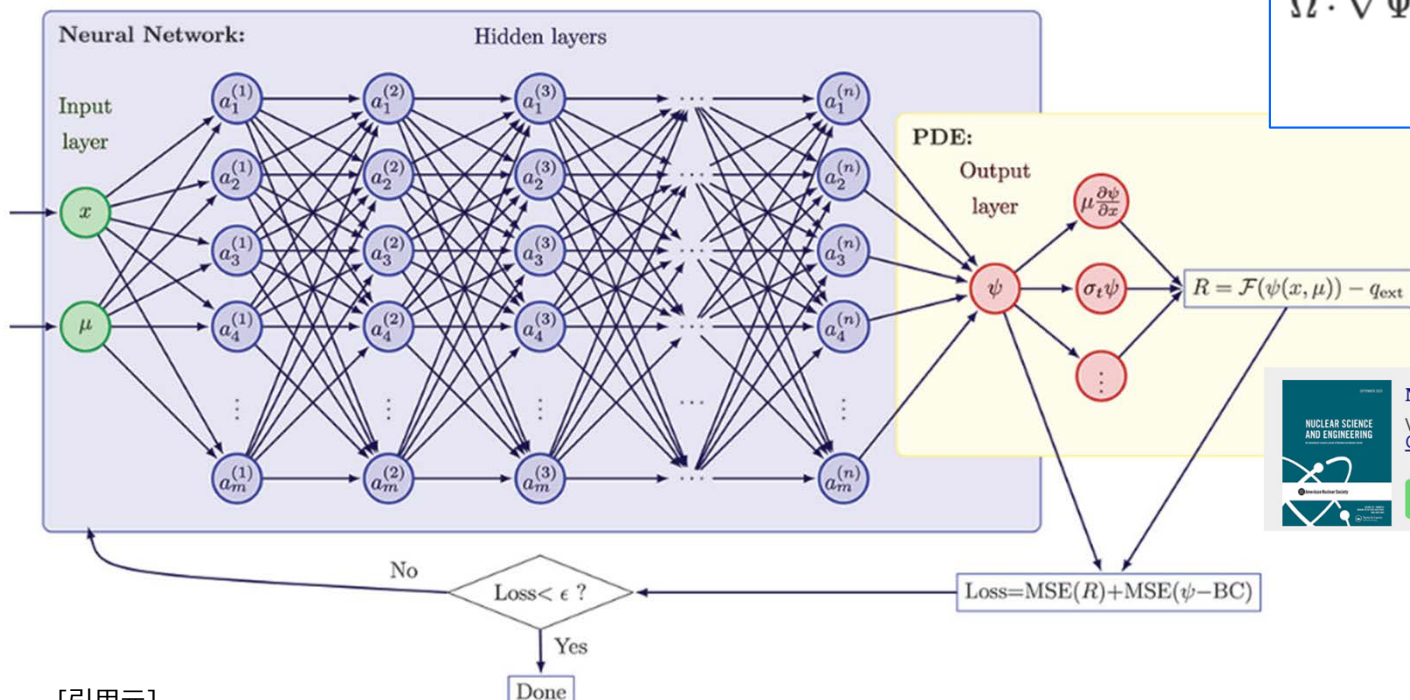


b.(b) 線源・線量推定解析の高速化(3/10)

①放射線シミュレーション技術の研究(3/10)

2年間の成果①：物理モデル(支配方程式等)に基づくニューラルネットワーク(PINNs)も採用することをWSにて決定
⇒ 物理モデルや教師データ作成法を検討し実施手順を作成した。

物理モデル（放射線輸送モデル）を基にした ニューラルネットワーク（PINNs）



支配方程式

$$\vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} \Psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \sigma_t(\vec{r}) \Psi(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \frac{\sigma_s(\vec{r})}{4\pi} \Phi(\vec{r}) + \frac{Q(\vec{r})}{4\pi}$$

$$\forall \vec{r} \in \mathcal{D} \text{ and } \vec{\Omega} \in \mathcal{S}^2$$

散乱項(γ線)

先行研究：1次元の中性子輸送 (Sep.2023)



Nuclear Science and Engineering >

Volume 197, 2023 - Issue 9: Selected papers from the 27th International Conference on Transport Theory (ICTT27)

Submit an article

Journal homepage

Research Articles

Physics-Informed Neural Network with Fourier Features for Radiation Transport in Heterogeneous Media

Quincy A. Huhn, Mauricio E. Tano & Jean C. Ragusa

Pages 2484-2497 | Received 30 Nov 2022, Accepted 20 Feb 2023, Published online: 06 Apr 2023

本研究：教師データを必要としないγ線輸送サロゲーション(初挑戦)

最大の特徴：教師データを必要としない

欠点：学習や計算に時間がかかる⇒解決策は？

※局所性が要と判明

⇒β線サロゲートモデル構築で代用(p102、104)

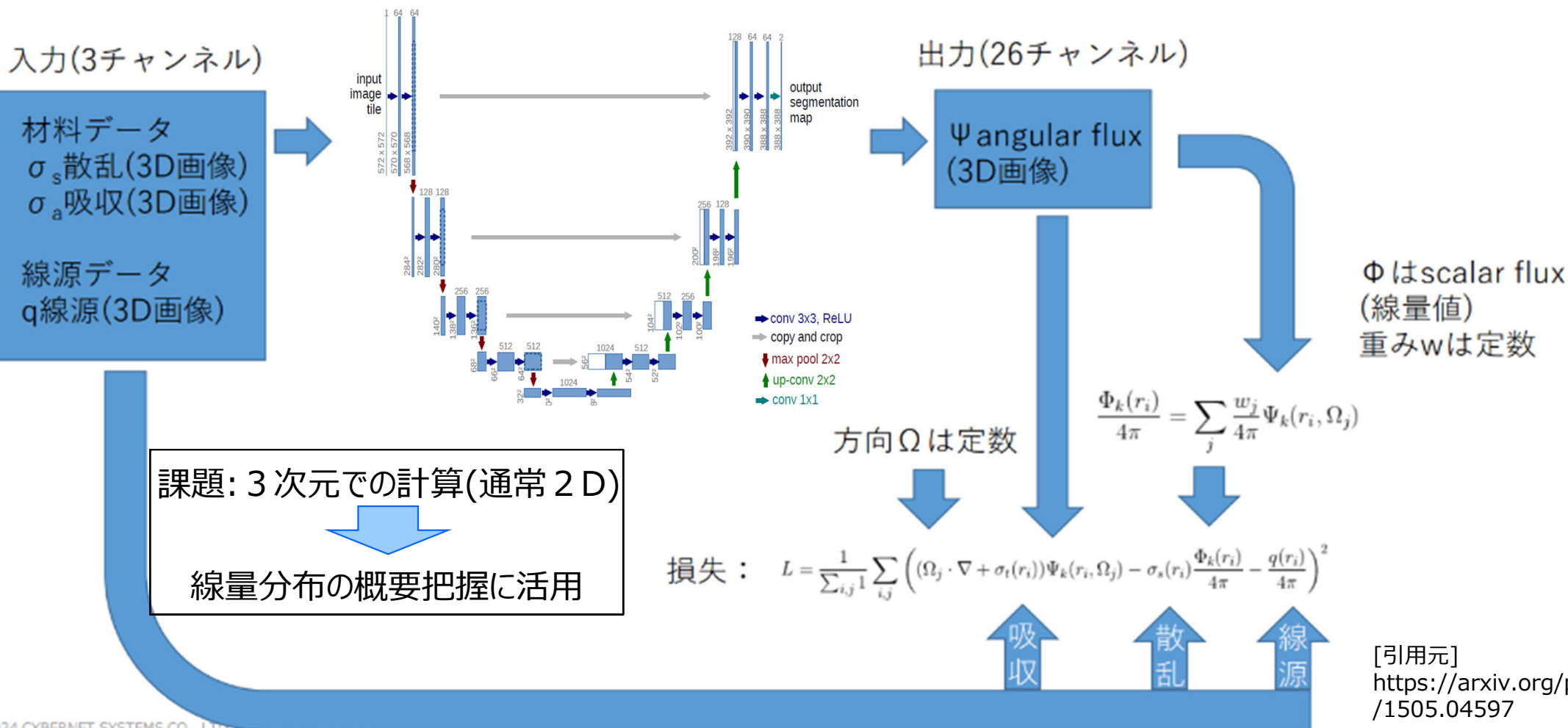
b.(b) 線源・線量推定解析の高速化(4/10)

①放射線シミュレーション技術の研究(4/10)

2年間の成果②：画像認識を高速に実施する際に用いるニューラルネットワークも採用し相補的に研究開発を進める。

U-Net & PINNのニューラルネットワーク
【全体フロー】

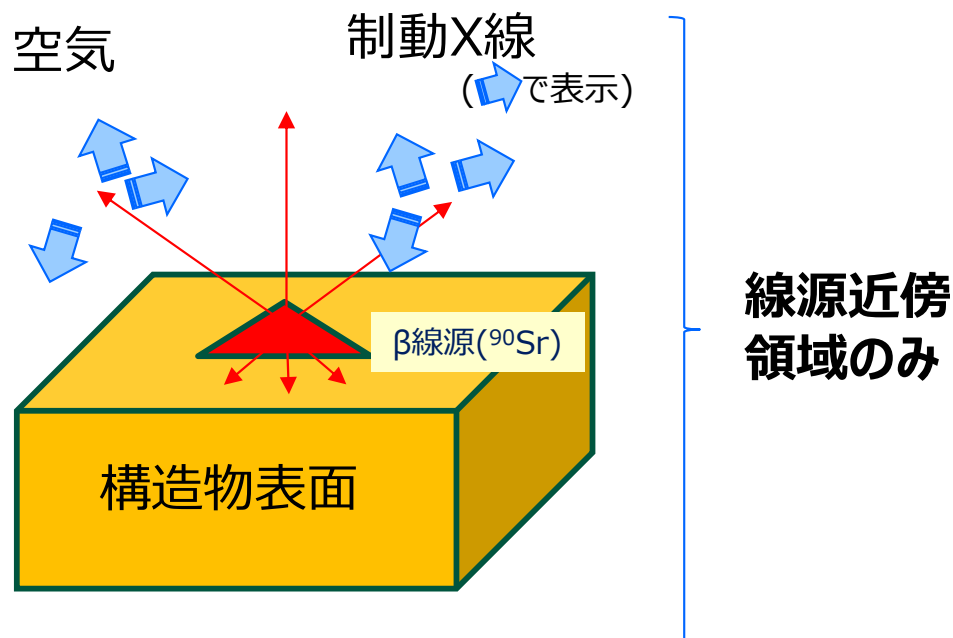
特徴：長い距離を飛ぶγ線環境に最適
計算パフォーマンスも高い



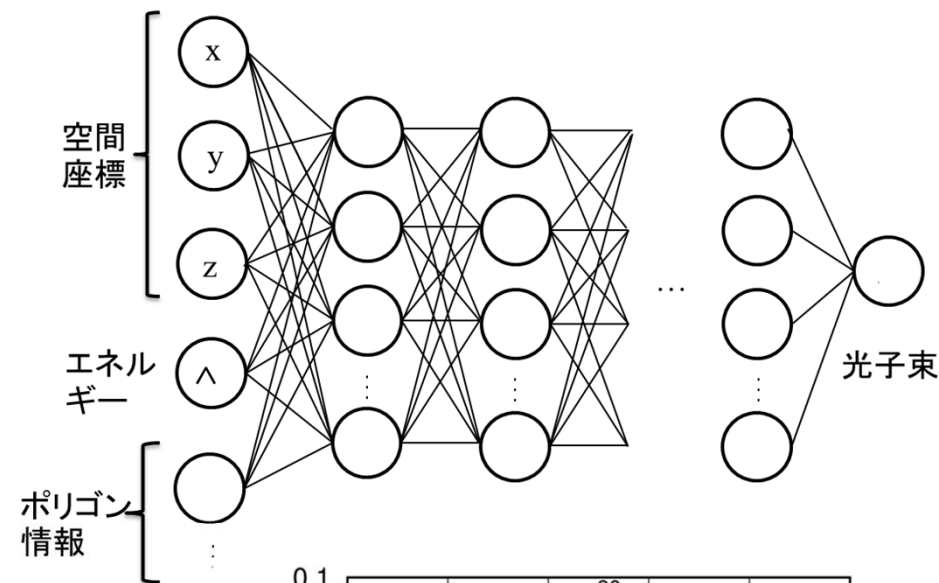
b.(b) 線源・線量推定解析の高速化(5/10)

①放射線シミュレーション技術の研究(5/10)

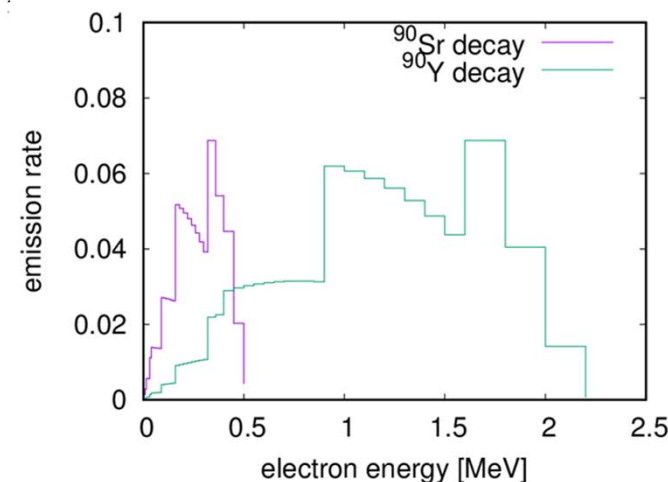
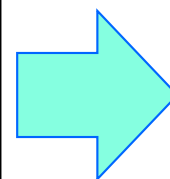
2年間の成果③： 複雑な過程が**局所的**に生起するβ線源等に対し通常のニューラルネットワーク (FCNN)も採用



学習には全結合型ニューラルネットワーク



ある構造物のポリゴン面にβ線源が存在すると想定した線源を設定し、**PHITS**で3次元空間における放射線エネルギー分布を計算して学習データとし、通常の深層学習を行いサロゲートする。



^{90}Sr 壊変に起因するβ線のエネルギー分布

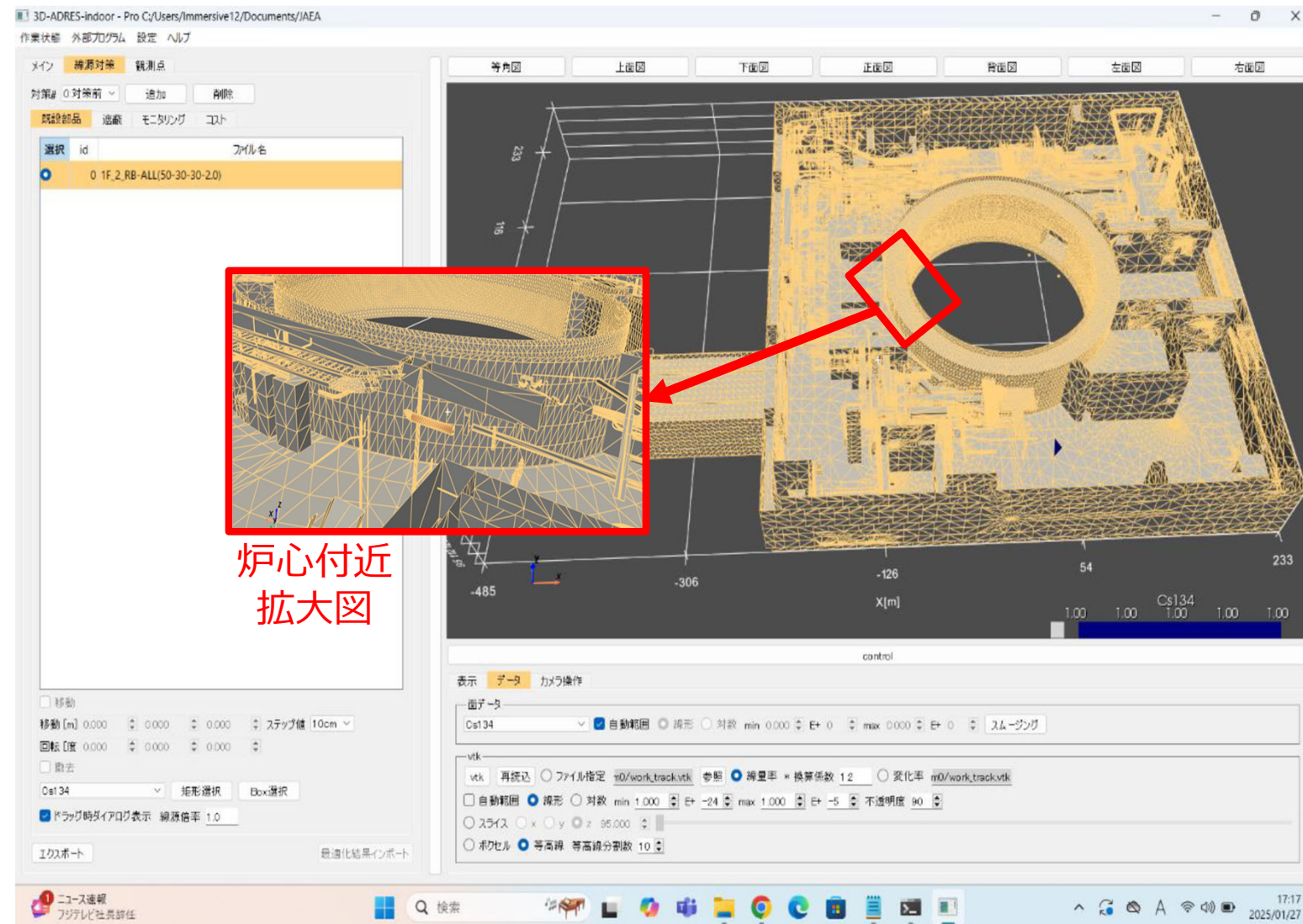
- 1 F現場の情報を基にサロゲートモデル構築を目指す。
- 3D-ADRES-Indoor Proへ実装する。

b.(b) 線源・線量推定解析の高速化(6/10)

① 放射線シミュレーション技術の研究(6/10)

※2号機CADモデルを共通モデルとして採用

学習データ：3D-ADRES-Indoorを利用し共通の学習データを作成



1F2号機CADモデル
(東電提供)

↓ 変換

145万面メッシュモデル
(Pro計算レベル)

↓

2つのNNに共通に適用

- ① U-Net
 - ・1F2号機1階
- ② FCNN
 - ・1F2号機1階
 - ・局所β線源

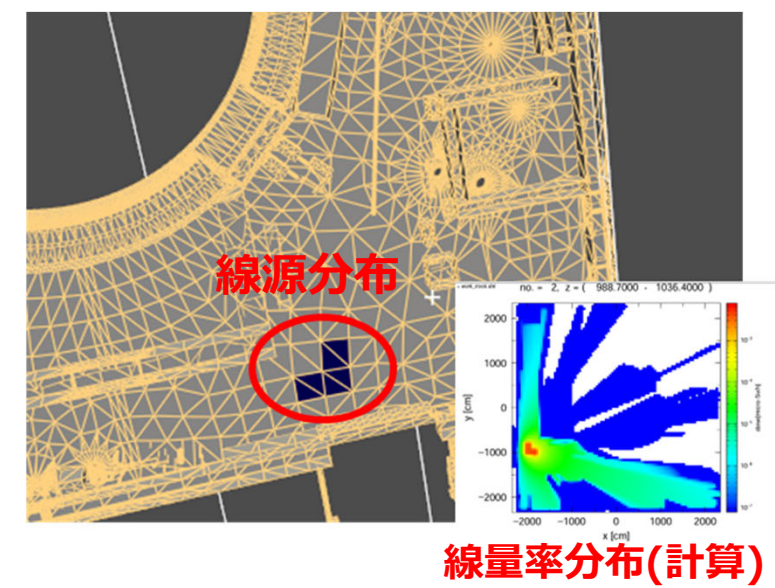
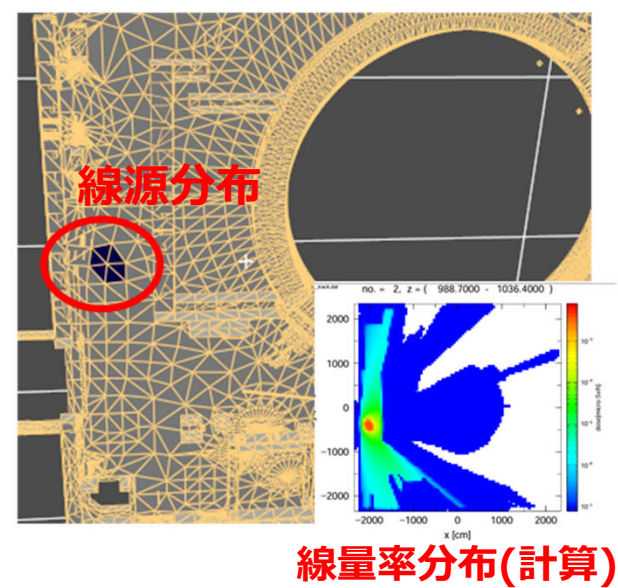
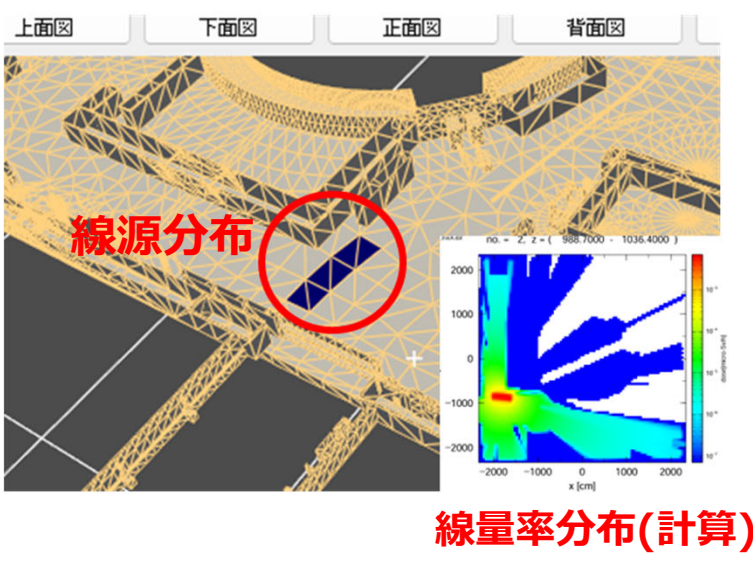
↓

推定性能(特徴)の確認

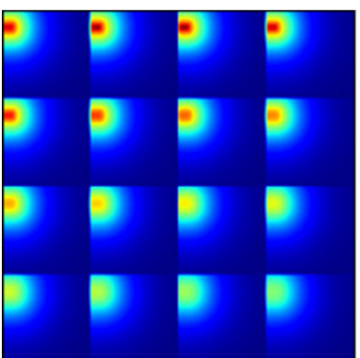
b.(b) 線源・線量推定解析の高速化(7/10)

①放射線シミュレーション技術の研究(7/10)：サロゲートモデル（U-net/FCNN）

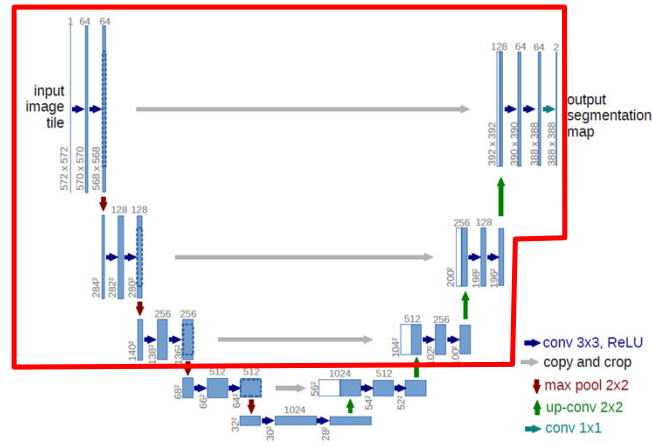
様々な分布線源（単位線源に限定）と線量率分布を計算し、教師データを作成



構造物プロフィール
線源分布



3D-Unet(深さ=2)[p.100図を再掲]



2つの推定能力を調査
順推定（線源分布⇒線量率分布）
逆推定（線量率分布⇒線源分布）

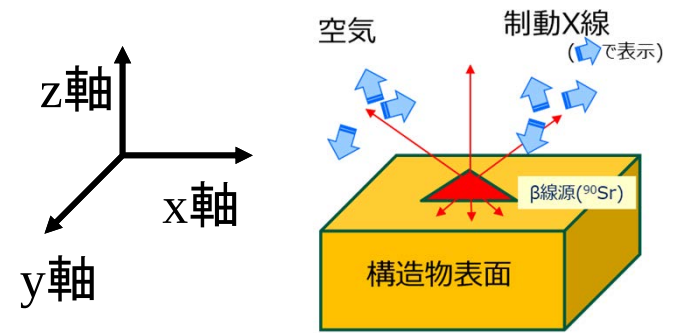
	順推定モデル	逆推定モデル
損失関数	MSE(平均二乗誤差)	BCE(Binary交差エントロピー) +L1(LASSO)
学習時間	4.2時間	5.5時間
精度	0.95165	0.999998

※FCNNは同様の成績（学習時間は短い）

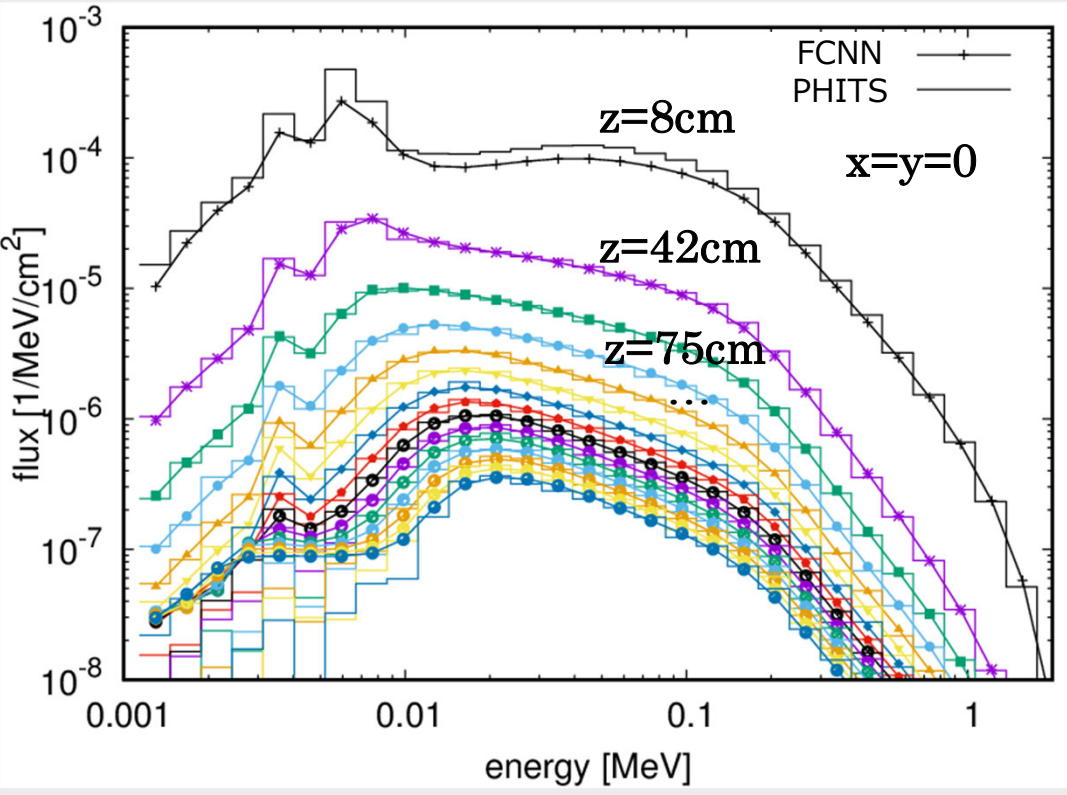
b.(b) 線源・線量推定解析の高速化(8/10)

①放射線シミュレーション技術の研究 (8/10) :サロゲートモデル (U-net/[FCNN](#)[[β線源局所域への適用](#)])

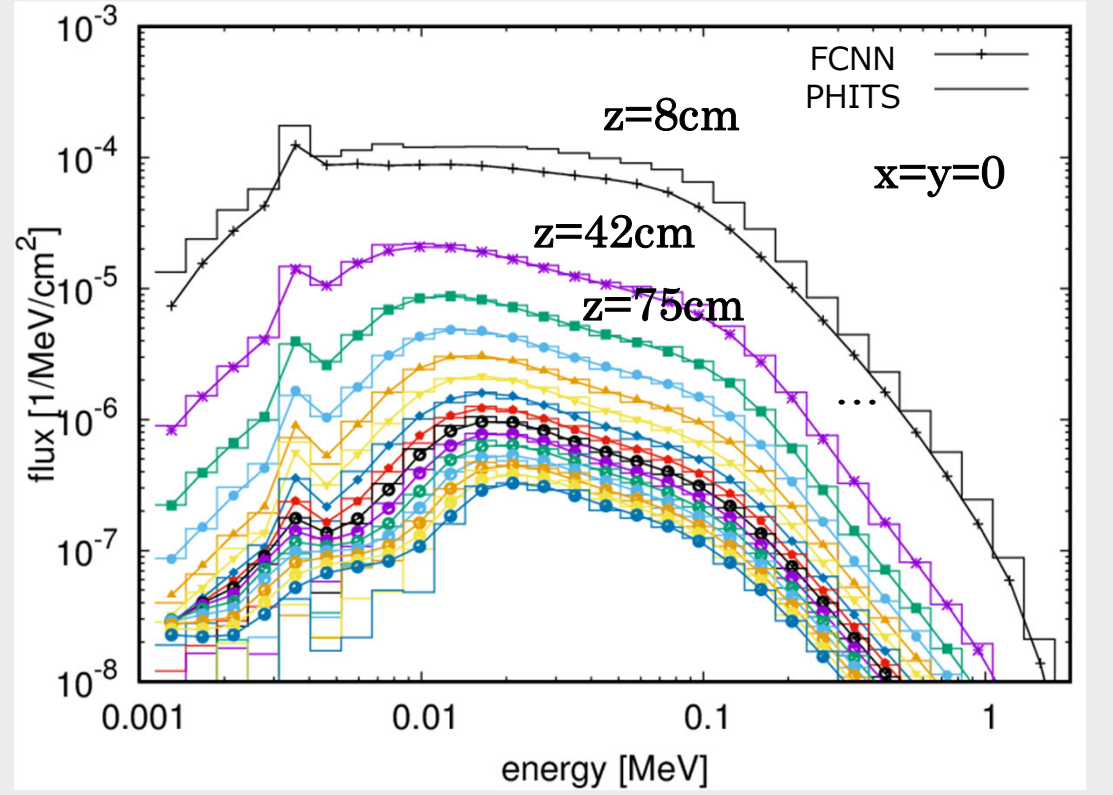
- ・モンテカルロ計算 (PHITS) 結果を学習に使用
β線⇒制動X線 (計算コストの高い複雑な計算) 過程を学習
- ・データを対数化し、絶対値の小さなフルエンスの再現も確認
β線シミュレーションのサロゲートモデルにより複雑な1F屋内環境でのβ線と制動X線の評価が可能



制動X線スペクトル、構造物 = **SUS304**の場合



制動X線スペクトル、構造物 = **コンクリート**の場合



b.(b) 線源・線量推定解析の高速化(9/10)

①放射線シミュレーション技術の研究(9/10)

【2年間の成果】サロゲーションモデル（全域と局所域での活用）

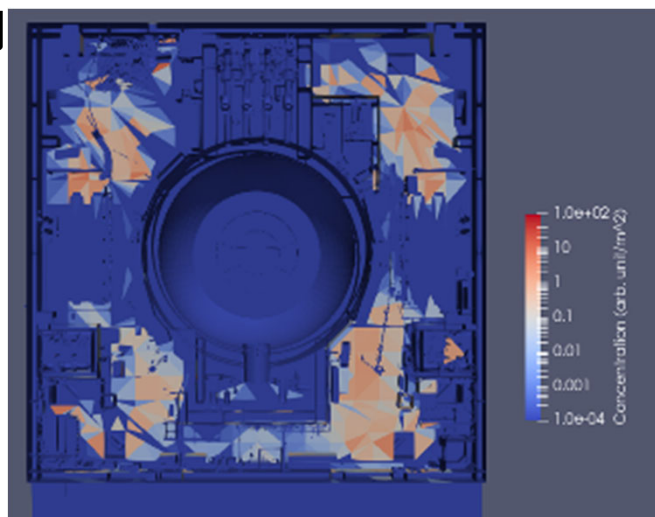
U-net/FCNNを採用し、1F2号機モデル(1階エリア)にて順推定及び逆推定を超高速にサロゲート可能であることを確認

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1)1F：FCNN/U-netの比較とPINNSの適用 | ⇒ FCNNの学習：特に優れた学習効率確認 |
| 2)1F：U-netによる放射線順推定/逆推定を計算 | ⇒ 逆推定にて特に優れた性能確認 |
| 3)1F：局所的な詳細線量率分布を高速計算 | ⇒ FCNNを用い、β線源近傍の複雑な線量率分布のサロゲートが可能であることを確認 |

※FCNNを用いて、γ線源に対するPINNs適用性を調査(微分係数調査)し、正常動作を確認
⇒**U-netとFCNNを3D-ADRES(Pro)内に実装し、動作を確認**



活用例
(1)

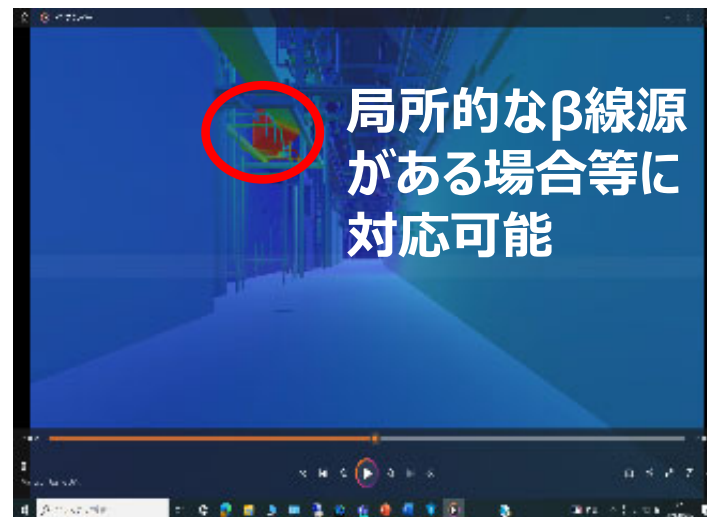


線量率概要分布の取得

複数のサロゲーションモデル
開発と検証を完了

※1F現場での実用化を目指す

活用例
(2)



β線源が支配的な場合⇒線量率（スペクトル）分布取得

①放射線シミュレーション技術の研究(10/10)

1F3Dモデルを用いて現場適用性を評価する。

[令和5年度：TRL1⇒2][令和6年度：TRL2⇒4以上]

【2年間の成果まとめ】

高速処理が可能なサロゲートモデルを実現するため、**東電1Fモデル(2号機1階)**が有する複雑な状況にも対応可能である当該モデル構築を目指し、**FCNN**と**U-net**を用いて、順推定と逆推定のサロゲートモデルの学習効率や推定性能を調査した。その結果、**FCNNの学習効率は高く、U-netは逆推定性能が極めて高い**こと等が判明。また、**β線源近傍では、局所的に複雑な計算(β線減衰と制動X線放射)が必要となるが、FCNNを用いることでβ線源の逆推定も可能であることを確認**した。一方、PINNsについては、学習コストが高く、 γ 線の非局所性に対応するのが難しいことが判明した。

【今後の展望】

- 高速応答可能なサロゲートモデルを用いた順/逆推定の1F現場での試験と活用
- β線源及び γ 線源の両者の逆推定を用いた1F現場での試験と活用

b.(c)線源・線量推定解析の精度向上(1/29)

①1F-R/B内情報収集装置の研究開発(1/13)

● 目標

作成する線源・線量率推定マップの高精度化を図るため、必要となる環境情報取得手段の開発整備を行い、システムを支援強化する体制を整備する。

● 計画 [令和5年度：TRL1→2] [令和6年度：TRL2→4]

遠隔操作ロボットについて、1F等について検証試験を実施し、現場適用性を評価する

①1F-R/B内情報収集装置の研究開発

● スケジュール

実施内容	2023（令和5）年度	2024（令和6）年度
b. 現場適用性の向上のための研究開発		
(c) 線源・線量推定解析の精度向上		
①1F-R/B内情報収集装置の研究開発	開発計画検討 全体システム検討 システム製作	モックアップ試験1 システム改良 モックアップ試験2 現場適用性試験 まとめ
②新たな放射線計測装置の 現場適用性研究開発	開発計画検討 全体システム検討 システム製作・モックアップ試験 まとめ	

① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発(2/13)

目標：高所及び狭隘部も含めた屋内情報の網羅的取得

国の補助事業課題⇒クローラ-型及び作業員可搬型による限定的測定

ロボットによる点群、線量計測

- 段差及び階段へのアクセス不可
- 高所へのアクセス不可
- 狭隘部や構造物裏へのアクセス不可

【課題】高所や狭隘部でのデータ取得が不可

【課題に対する基本方針】

1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築

解析精度向上のためには、1F現場状況に変化があるたびに変化後の計測を現場で行う必要があり、普段使いできるロボットシステムとする必要がある。ロボットシステム全体を複数ユニットに分割可能とし、各ユニットは作業員1～2名が、1F現場の狭く足場が悪い通路を通過して運び込める大きさおよび重量とする。

2.高所調査用伸縮機構の実装化開発

高所調査のための安定した計測システムを開発する。最小限の計測機器を、高さ最大6mに運搬可能な高所調査用伸縮機構の実装化開発を行う。

3.狭隘部調査用多関節アームの実装化開発

作業員が容易に小型クローラ型標準モジュールに設置・組立や転倒等のトラブルを起こすことのない動作及び最小限の計測機器の運搬が可能な多関節アーム機構の実装化開発を行う。

高所及び狭隘部も含めた屋内情報(点群/線量率)の網羅的取得が可能となる有効なロボットシステムを製作して、モックアップ試験を経て1F等での現場適用を目指す。

【開発項目】

- 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築
- 2.高所調査用伸縮機構の実装化開発
- 3.狭隘部調査用多関節アームの実装化開発



【高所・狭隘部の調査用ロボットの性能確認予備試験】
野外の砂利上の走行(不安定な路面走行を想定)及び先導ロボットへの追従走行確認試験の様子

① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発(3/13)

開発項目 1 : 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築

【開発項目】

- 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築
- 2.高所調査用伸縮機構の実装化開発
- 3.狭隘部調査用多関節アームの実装化開発



狭隘部用
多関節アーム搭載
台車ロボット

互換性

【概念構築：ハード面】

- ・「**先導ロボット**」、「**台車ロボット**」、「**中継ロボット**」及び「**ベースステーション**」からなる**システム構成**とし、台車ロボットには搭載ユニットを交換することで**高所及び狭隘部の計測を可能とする**。
- ・台車ロボット以外は20kg以下、台車ロボットも40kg以下の重量とし、**最少人数(1～2名)での搬出入**ができるようにする。
- ・高所計測時のジッパーマストの昇降及び狭隘部計測時のアームの伸長時において、伸縮操作時も含め、**最大伸長時の先端部及び機器計測中の安定性**を保持する。

ロボットシステム構成



先導ロボット



高所用ジッパーマスト
搭載台車ロボット



中継ロボット①



中継ロボット②



ベースステーション

1F現場での複雑な形状の構造物等により、データの送受信が途絶しないように、無線中継用ロボット(ベースステーション)を設置

① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発(4/13)

開発項目 1 : 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築

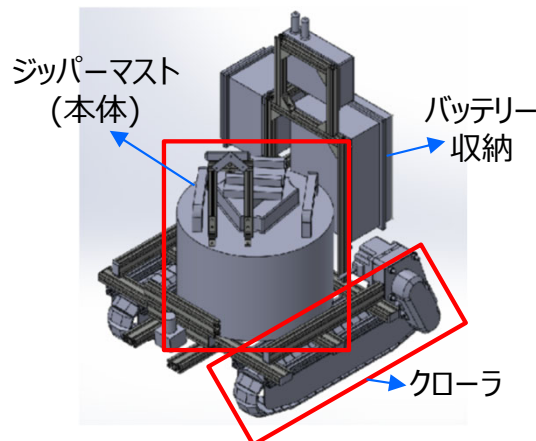
【開発項目】

- 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築
- 2.高所調査用伸縮機構の実装化開発
- 3.狭隘部調査用多関節アームの実装化開発

高所計測用 ジッパーマスト搭載 台車ロボット

ジッパーマストの改良

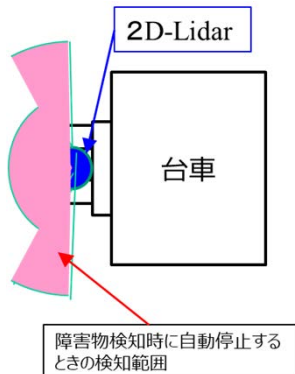
- ・ジッパーマスト購入時の重量が50kg超
⇒作業員2人で運搬可能な45kgまで
軽量化
- ・高所エリアでのFARO及びRADEye
設置のために専用プレートを設置
- ・1F現場内が暗いことを想定し、照明
(リボン照明)の取り付けの実施



【概念:高所計測用】



【実機:高所計測用台車ロボット】

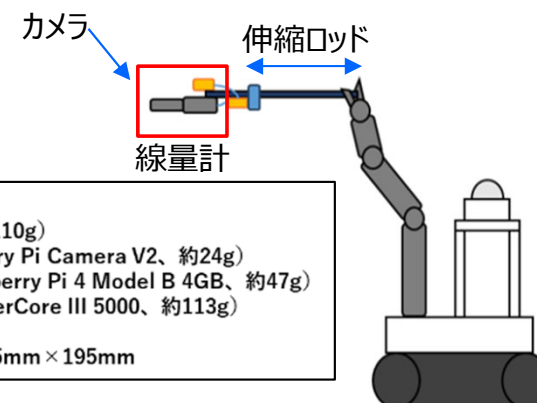


- ・カメラは前方及び
側方に設置
- ・2D-Lidarにて
障害物を検知し、
構造物に接近
すると自動停止
可能

障害物検知時に自動停止する
ときの検知範囲

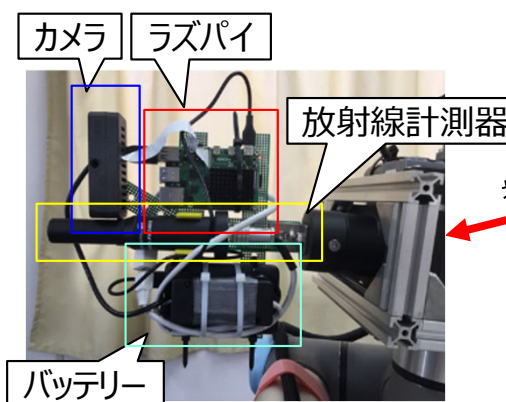
先導ロボット及び中継ロボットは同一のものを使用可能
で、高所・狭隘部計測用ロボットは互換可能である

狭隘部用 多関節アーム搭載 台車ロボット



機器構成 (メーカー/型番、重量)

- ・線量計 (radmetron/BDG2、約110g)
 - ・カメラ (Raspberry Pi/Raspberry Pi Camera V2、約24g)
 - ・ラズパイ (Raspberry Pi/Raspberry Pi 4 Model B 4GB、約47g)
 - ・バッテリー (Anker/Anker PowerCore III 5000、約113g)
- 計測器総重量: 約535g
サイズ (W×D×H) : 75mm×215mm×195mm



【多関節アーム先端部の計測機器の搭載】

【概念:狭隘部計測用】



【実機:狭隘部計測用台車ロボット】

① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発(5/13)

開発項目 1 : 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築

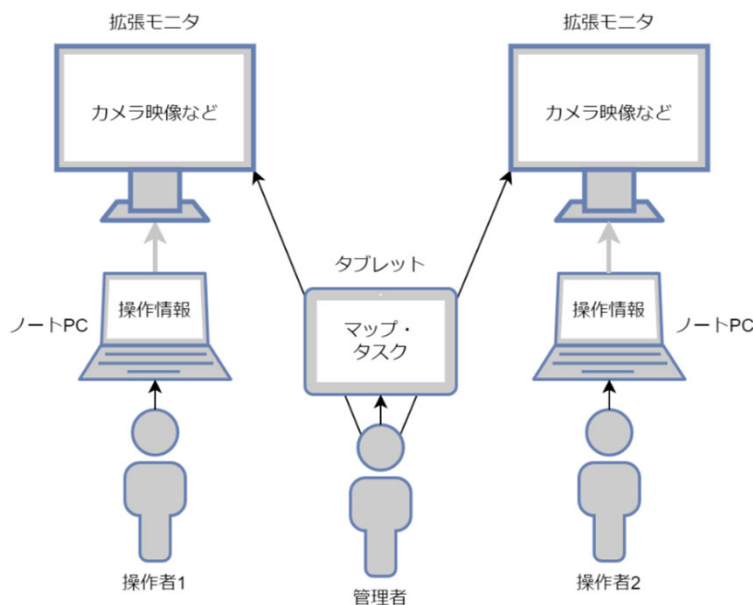
【開発項目】

- 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築
- 2.高所調査用伸縮機構の実装化開発
- 3.狭隘部調査用多関節アームの実装化開発

【概念構築：ソフト面】

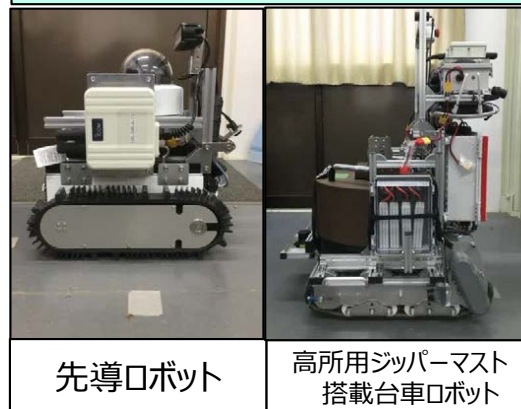
- ・複数ロボットを同じ環境で運用展開するために、当該システムをロボット操作員(2名)及び管理員(1名)にて、**全操作を可能とする使いやすいインターフェース**の開発
- ・複数ロボットの運用において、個別のロボットの操作以外に**協調制御**(=連携する機能)の構築
- ・**自己位置情報**の取得については、複数カメラを用いたVisual SLAMを用いた開発
- ・本システムで機器操作をタブレットで行う。その際に、ディスプレイに表示される画面、人間工学に基づいた**MMI**(=マンマシンインターフェース※¹)を用い、その操作性等の確認

※MMI(マンマシンインターフェース)：人間と機械の間の伝達を行う、機器やコンピュータプログラム等といったインタフェースの総称



MMI：操作者と管理者の構成

操作者1の担当



操作者2の担当



進行方向



① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発(6/13)

開発項目2：高所調査用伸縮機構の実装化開発

【開発項目】

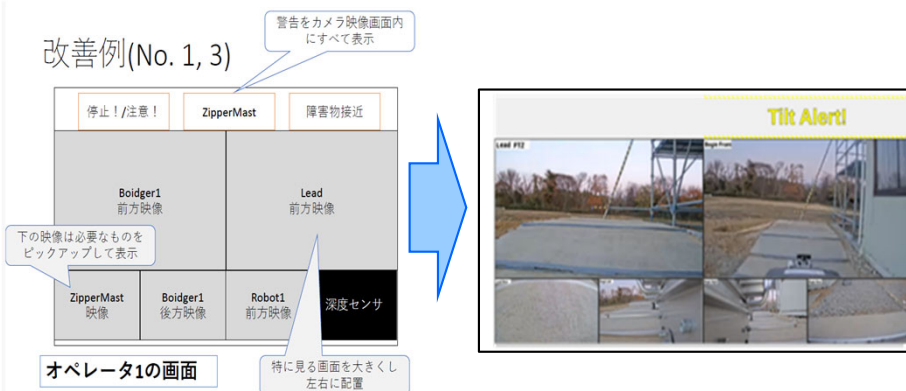
- 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築
- 2.高所調査用伸縮機構の実装化開発
- 3.狭隘部調査用多関節アームの実装化開発

高所計測のためのロボット群の連携機能および運用のための要求事項

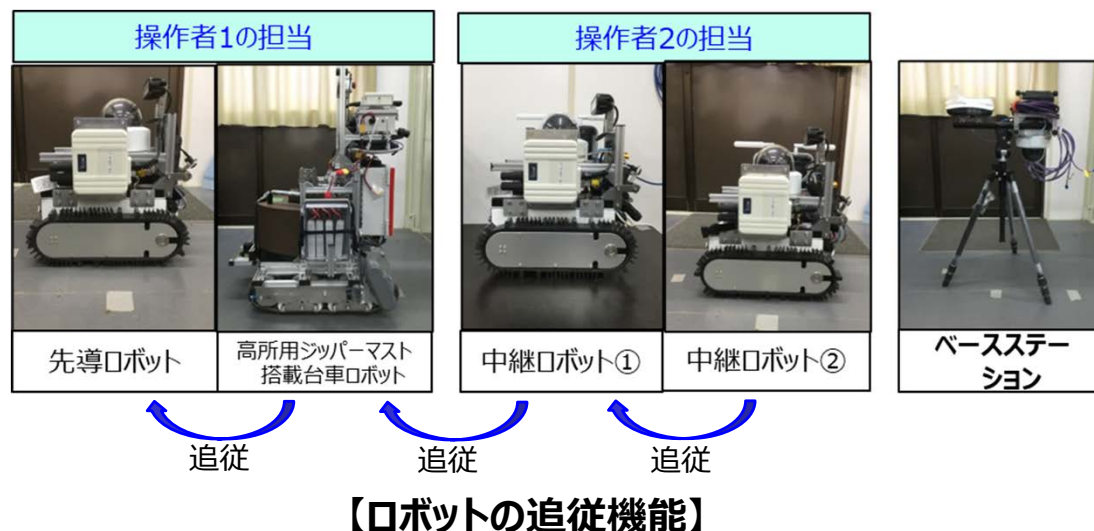
⇒1F現場への適用における実際の運用を想定した楯葉モックアップ試験

- ①高所調査に使用する伸縮マストを台車ロボットに搭載し、1F現場内の目標地点(=計測地点)まで免震重要棟からの遠隔操作にて問題なく移動できること。
- ②ロボットシステムの稼働時にWi-Fi通信を確保すること。
- ③高所調査する際のリアルタイムの俯瞰画像を確保すること。
- ④操作者のロボットの操作ミスや操作員の人数を減らすために、上記①に関連して、先導ロボットの動きにあわせて中継ロボットが追従する機能を持たせること。
- ⑤操作員の複数のロボット操作時のミスを極力なくすために、ロボット操作用タブレットについてはMMI(マンマシンインターフェース)を反映した配置となっていること。※操作員を監督する管理者を配置し、その管理者の指示により各操作をミスなく確実に実行すること。

改善例(No. 1, 3)



【マンマシンインターフェース】



【ロボットの追従機能】

① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発(7/13)

開発項目2：高所調査用伸縮機構の実装化開発

【開発項目】

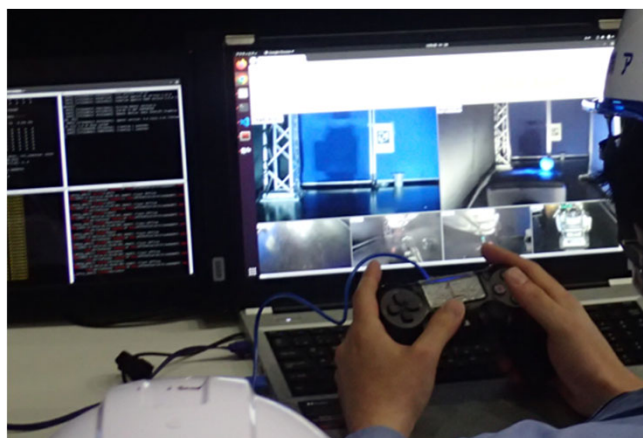
1. 高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築
2. 高所調査用伸縮機構の実装化開発
3. 狭隘部調査用多関節アームの実装化開発

高所調査のための運用ステップ(複数のロボットによる調査システムの運用)⇒1F現場への適用における実際の運用を想定した桧葉モックアップ試験

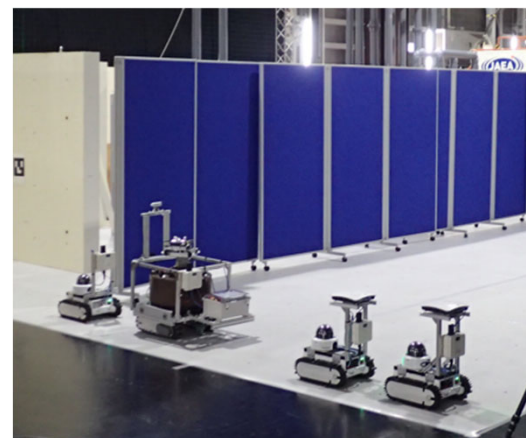
- 1) 上記の調査用ロボットシステムを1F現場に運搬し、セッティングをする。
- 2) 操作者1は、先導ロボットのカメラ映像を確認し、目標とする計測地点まで免震重要棟から遠隔操作にて移動させる。
- 3) 台車ロボットカメラの映像(俯瞰画像)を確認し、先導ロボットに追従するように操作員1が台車ロボットを遠隔操作にて移動させる
- 4) 操作者2は無線通信を確保するために中継ロボット①及び中継ロボット②を台車ロボットの後方から追従させながら、適切な位置に移動する。
- 5) 高所計測の場合は、目標の計測地点へ到着後、その場でジッパーマストを伸ばし、所定の高さにて点群及び空間線量率を計測する。
- 6) 上記3) の計測後、ジッパーマストを縮めて台車ロボットに収納する。
- 7) 調査用ロボットシステムをスタート位置又は次の計測地点に移動する(上記1)～4)と同様に連携運用する)。



操作者①②と管理者



操作者の操作画面



ロボットの移動



高所計測

【桧葉モックアップ試験の様子】

① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発(8/13)

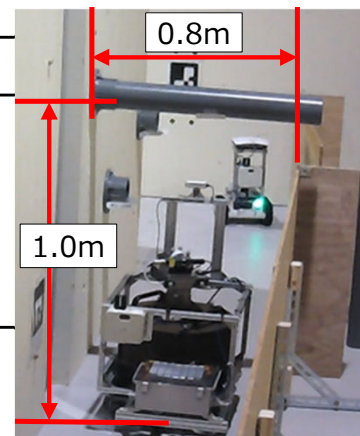
開発項目2：高所調査用伸縮機構の実装化開発

【桧葉モックアップ試験】→動作確認試験(※画像参照)

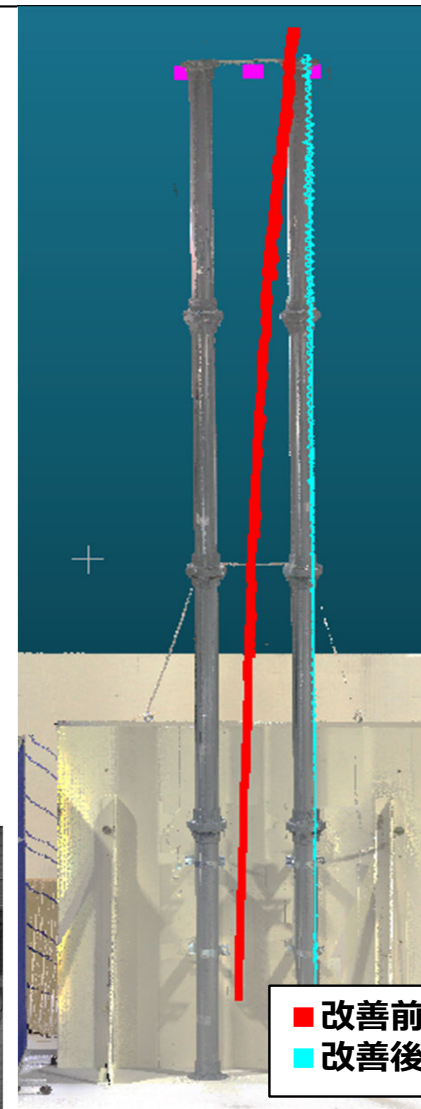
【開発項目】

- 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築
- 2.高所調査用伸縮機構の実装化開発
- 3.狭隘部調査用多関節アームの実装化開発

対象	確認項目	試験結果
台車部	走行性能	・平坦部は問題なく走行可能(暗所環境含む)。 ※具体的には、以下の走行性能を確認(右下画像参照) 「走行可能な狭隘空間:0.8m幅×1.0m高さ」 「最大斜度:15度」、「段差:2cmまで」 「最小回転半径:80cm×80cm」
ジッパーマスト	6m最大伸縮時の安定性能	・水平方向最大237mmたわみ(※右画像の赤色) ⇒[改善後]64mm(上昇時)、90mm(下降時) (※右画像の水色) ・位置精度:±50mm以内[モーションキャプチャによる計測]
高所アクセス	アクセス性+到達時間	・床面を0.0mとし、既定の高さへの到達時間は、「2.3m:52秒」、「3.5m:85秒」、「5.3m:142秒」、「6.0m:182秒」を確認 ・最大伸長時における点群計測、線量測定は問題なく実施可能(点群データ取得時は、僅かなたわみ等が生じるが、点群取得データには影響がないことを確認)

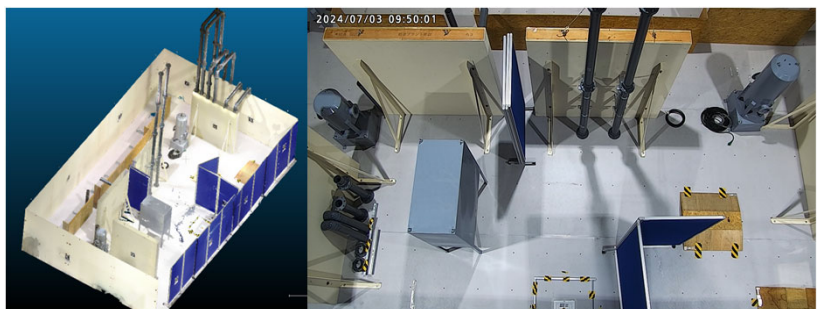


走行試験(狭隘空間)



■ 改善前
■ 改善後

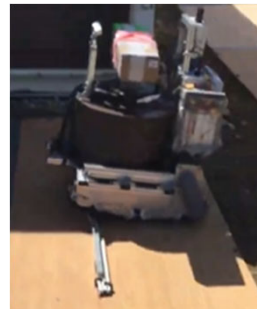
高所アクセス試験



桧葉モックアップ試験場



走行試験(斜度)



走行試験(段差)



試験場に暗所環境を作製

b.(c)線源・線量推定解析の精度向上(9/29)

① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発(9/13)

開発項目2：高所調査用伸縮機構の実装化開発

【楢葉モックアップ試験】⇒1F適用のための確認試験(性能確認を含む)

【実負荷試験】ジッパーマストに計測機器を搭載し、暗所環境にて遠隔操作を実施し、実際の1F環境に近い条件下を模擬した試験

対象	確認項目	試験結果
自己位置計測	計測精度	・デプスカメラによるVisual SLAMに2D-Lidarデータを加味し、±100～150mmの位置精度を達成 (事前のモックアップ試験にて126mmを確認済み) ・当初計画していた機能（SLAM等での自己位置取得）等、目標精度は達成
MMI (マンマシンインターフェイス)	操作画面	・MMI導入前後での操作性については、操作者への指示や注意喚起を促すことが可能となり、操作上の安全性向上等、一定の性能を確認 ・複数台による協調制御についても、動作を確認

【開発項目】

- 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築
- 2.高所調査用伸縮機構の実装化開発
- 3.狭隘部調査用多関節アームの実装化開発

【自己位置計測試験方法】

室内及び野外にてVisual SLAMを用いた自己位置計測試験を実施

【試験結果】

・デプスカメラの画像によるVisual SLAMでは、一定程度の同一点の抽出ができ、マップ生成と位置計測は可能であったものの、屋内で10m程度の距離での位置計測精度も±220～370mmと最低目標以内ではあったが、理想的目標にはまだ届かない状態であった。

・Visual SLAMでの結果を踏まえ、**デプスカメラによる2D-Lidarの計測にて補正することとし、再度試験を実施した。**
 ・この再試験では位置精度が±130～170mmという結果を得られた。

	試験結果		単位[mm]
	RGB-D	RGB	
2D Lidar補正前	215	3309	
2D Lidar補正後	126	200	

※目標精度：100mm～250mm **【自己位置計測結果】**

まとめ：試験結果より、1F5号機に向けた適用性試験は実施可能であることを確認

b.(c)線源・線量推定解析の精度向上(10/29)

① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発(10/13)

開発項目2：高所調査用伸縮機構の実装化開発

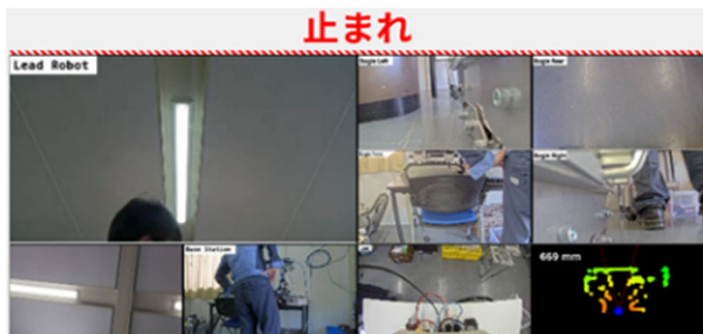
【櫛葉モックアップ試験】⇒1F適用のための確認試験(性能確認を含む)

【開発項目】

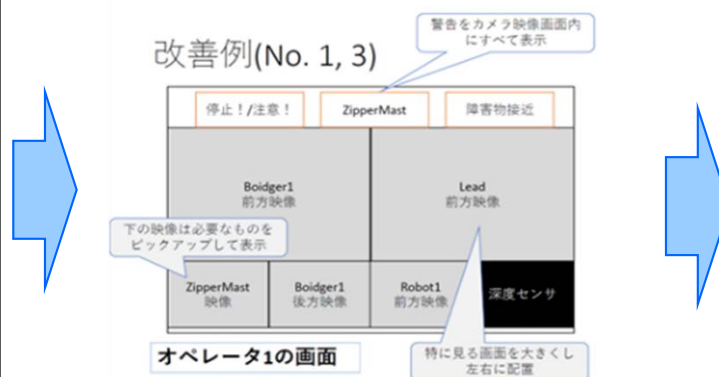
- 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築
- 2.高所調査用伸縮機構の実装化開発
- 3.狭隘部調査用多関節アームの実装化開発

対象	確認項目	試験結果
MMI (マンマシンインターフェース)	操作画面	・MMI導入前後での操作性については、操作者への指示や注意喚起を促すことが可能となり、 操作上の安全性向上等、一定の性能を確認し 、複数台による協調制御についても、動作を確認

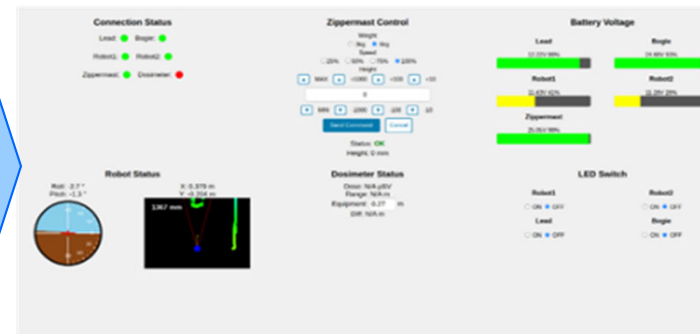
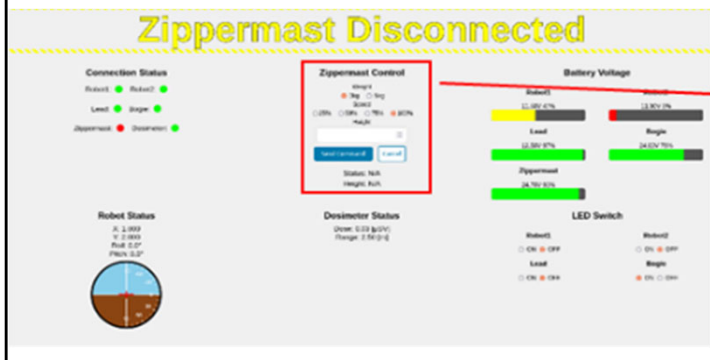
当初の操作画面



MMIに基づいた操作画面



最終的な操作画面



MMIに基づく作業員の操作画面(5号機の試験時)

① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発(11/13)

開発項目3：狭隘部調査用多関節アームの実装化開発

【狭隘部計測の簡易モックアップ試験】→狭隘部を模した室内での簡易試験

※RS社製:Robo Sapiens社

【開発項目】

- 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築
- 2.高所調査用伸縮機構の実装化開発
- 3.狭隘部調査用多関節アームの実装化開発

項目	内容	試験結果
台車部	走行性能	高所計測用の台車との互換性があること、及び走行性については問題ないことを確認
計測器	計測器の選定	軽量(計測機器の総重量は約535g)で運搬・計測可能なものを選定 なお、線量計の指示値に対するRadEyeへの補正が必要
伸縮ロッド	安定性能	バンブーシュート(RS社製※)を選定し、500g重量では1.5mでは安定性を確認 なお、2.0mを超える場合には改善の余地あり https://rb-sapiens.com/service/bambooshoot-actuator/
狭隘部計測	狭隘部へのアクセス	100mm幅×300mm高さのターゲットへのアクセスは可能であることを確認

操作員の遠隔操作



移動(走行)
[黄色線]



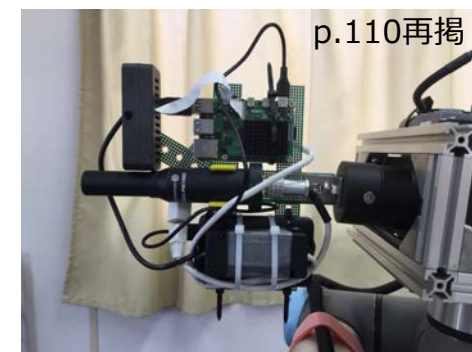
アームの展伸
[ターゲット:赤枠内]



計測ユニットの伸縮動作
による安定性確認



p.110再掲



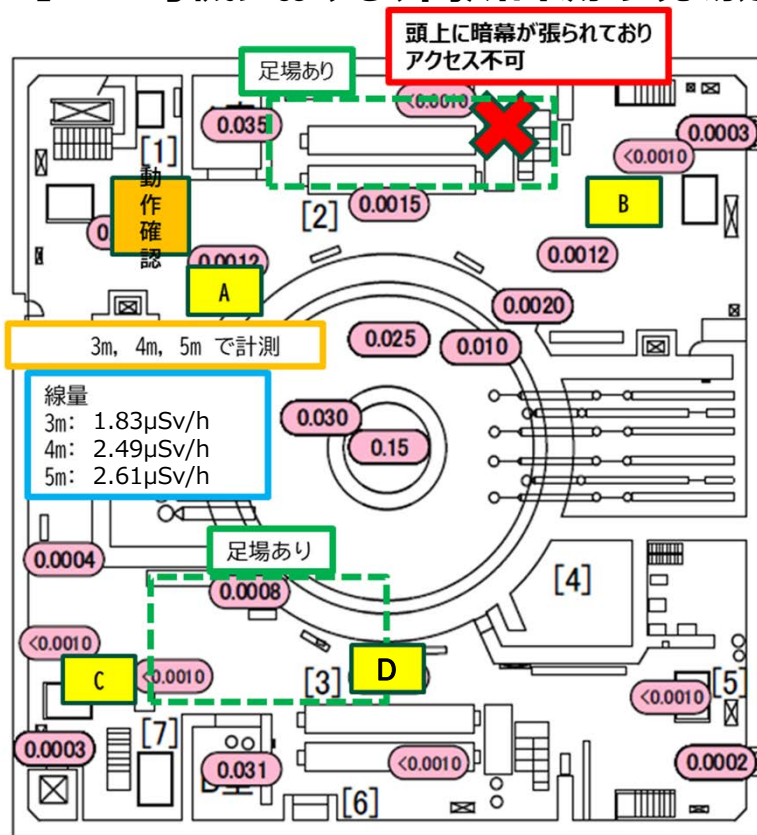
【計測器総重量：約535g】の内訳
 ・線量計(約110g) ・カメラ(約5g)
 ・ラズパイ(約47g) ・バッテリー(約113g)
 ・他付属品等
 (サイズ:5mmW×215mmD×195mmH)

【狭隘部：簡易モックアップ試験の様子】

簡易的な試験は完了。今後は東電の要請に応じて1F現場適用に向けた、より現場に即した開発をさらに推し進める。

① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発(12/13)

【1F5号機における、高所計測の現場適用性確認試験】



1F5号機1階(平面図)と計測場所(A,B,C,D)

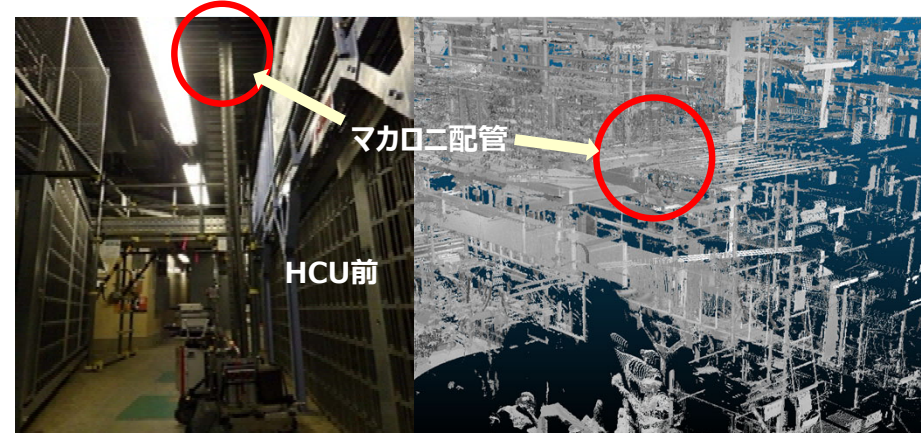
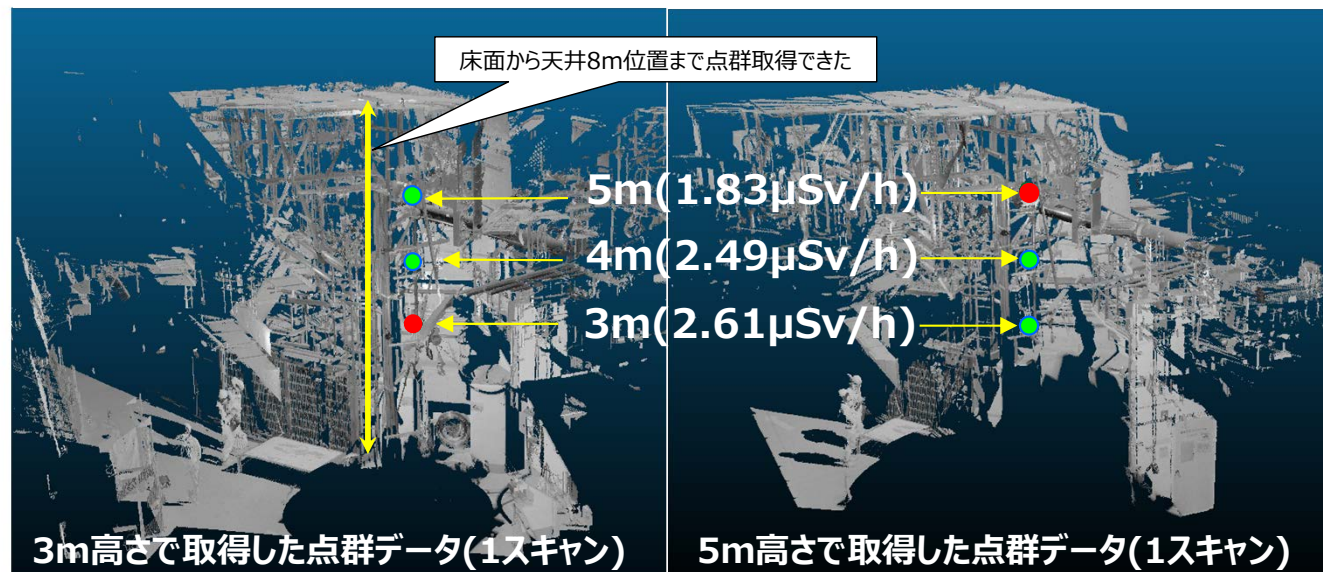
試験結果

- ・高所調査用ロボットシステムを用いて、1F5号機内の高所(最大5m)でも点群及び線量率を計測できることを確認
- ・5号機建屋内の構造物による電波の遮蔽・反射等によりロボット間の通信が不安定となったことから、中継器の配置・台数の最適化が重要

【開発項目】

- 1.高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築
- 2.高所調査用伸縮機構の実装化開発
- 3.狭隘部調査用多関節アームの実装化開発

【A地点で取得した点群データ】



【HCU付近での高所計測(マカロニ配管付近へアクセス)の様子】

① 1F-R/B内情報収集装置の研究開発(13/13)

【成果のまとめ】

遠隔操作ロボットについて、1F等について検証試験を実施し、現場適用性を評価する
[令和6年度：TRL2→4]

【開発項目】

1. 高所および狭隘部調査用ロボットシステム概念構築
2. 高所調査用伸縮機構の実装化開発
3. 狭隘部調査用多関節アームの実装化開発

【楯葉等のモックアップ試験】

(高所計測)

1. 先導ロボット、高所調査用ジッパーマストを搭載した台車ロボット、中継ロボット等から構成されるロボットシステムを開発し、**本ロボットシステムの操作を2名の作業員で操作できることを確認**
2. **ジッパーマストの伸縮機構・最大伸長時における安定性を確認**
3. **高所部での点群計測及び線量計測が確実にできることを確認**
4. 自己位置計測において、当初目標±250～500mmに対して±100～150mmの精度を達成
5. マンマシンインターフェースとして、本ロボットシステムと操作者(管理者を含む)の連携を図り、操作上の安全性向上を確認

(狭隘部計測)

1. 多関節アーム及び伸縮ロッド(バンブーシュート)を搭載した狭隘部調査装置を開発
2. 簡易的なモックアップ試験で、100mm(幅)×300mm(高さ)の狭隘部への進入できることを確認
3. 高所調査用台車ロボットとの互換性を確認
4. 1F現場(HCU等の狭隘部)適用時には装置上の改善が重要

【1F5号機の検証試験】

- ・上記の楯葉等のモックアップ試験を踏まえ、**1F5号機での検証試験を実施**
- ・5号機1階で、**高所部における点群データ及び線量率の計測が可能であることを確認**(動作安定性及び点群計測の品質)
- ・ロボット同士の通信性を確認(中継器の配置・台数の最適化が必要)

※今後、東電の要請に応じて1F現場(2・3号機)での適用を検討する。なお、**1F現場(2・3号機)適用するためには汚染防止策や除染方法等を考慮した改良が必要**である。また、3号機の場合は、床面の凹凸が想定されることから、遠隔操作にて台車の計測点までの移動、ジッパーマストの昇降、データ取得(点群・線量率等)を行う際には遠隔操作の習熟が重要である。

②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(1/15)

● 目標

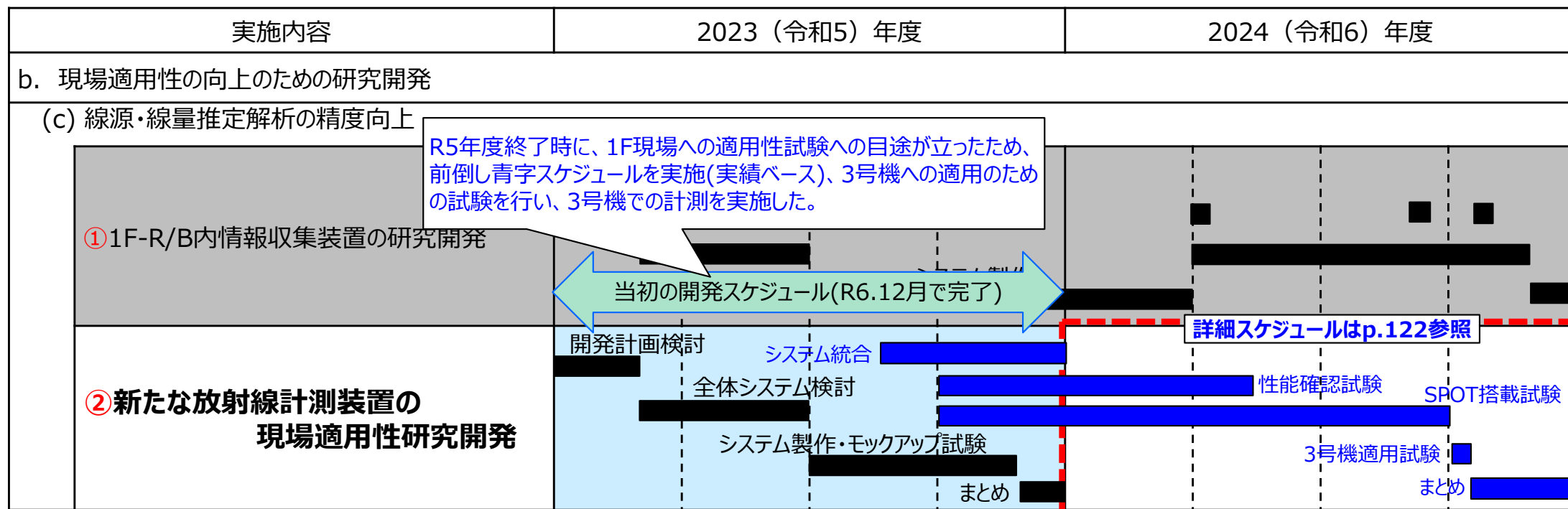
作成する線源・線量率推定マップの高精度化を図るため、必要となる環境情報取得手段の開発整備を行い、システムを支援強化する体制を整備する。

● 計画 [令和5年度：TRL1→2] [令和6年度：TRL2→4]

遠隔操作ロボットについて、1F等について検証試験を実施し、現場適用性を評価する

② 新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発

● スケジュール



②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(2/15)

●進捗状況

国の補助事業課題→線源情報の取得

計測 ⇒ 非連続、一方向

- 高線量下での応答性、計測性要

【課題】高線量下での高性能検出器不在

○現場計測の高度化として、高線量環境下での**時間的・空間的計測**を可能とする高性能の検出器の開発を行い、線源・線量推定解析の精度向上を図る。

目標：高線量下で高速応答性等を有する高性能化計測システム開発

①自己位置推定型スクリーニング用検出器の開発 (自己位置を推定しながら計測可能)

[ニーズ]

施設内の自己位置を自動で推定し、線量率の測定情報を点でマップ化したい

[設計要件]

- ・線量率を測定できること ($0.1\mu\text{Sv/h} \sim 10\text{Sv/h}$)
- ・GPSは受信できない屋内
- ・ロボットでの遠隔操縦を想定
- ・ $<1\text{kg}$

[開発イメージ]

ワイドレンジ検出器

(Polimaster社製BDG2)

GM検出器

- ・エネルギー補償 ($0.03\sim 3\text{MeV}$)
- ・重さ110 g
- $0.1\mu\text{Sv/h} \sim 10\text{Sv/h}$

デプスカメラ

(X visio社製 SeerSense DS80)

ロボットとのマッチング



②マルチクリスタルを用いた3Dイメージング検出器開発 (全方位の計測可能)

[ニーズ]

検出器位置だけでなく、部屋全体の放射線分布を可視化したい

[設計要件]

- ・線量率を測定できること ($0.1\mu\text{Sv/h} \sim 0.5\text{Sv/h}$)
- ・GPSは受信できない屋内
- ・ロボットでの遠隔操縦を想定
- ・ $<1\text{kg}$
- ・施設全体の可視化

[開発イメージ]

高線量用マルチクリスタル検出器

ロボットとのマッチング



方位角ごとに
飛来する放射線
を分別可能な検
出器



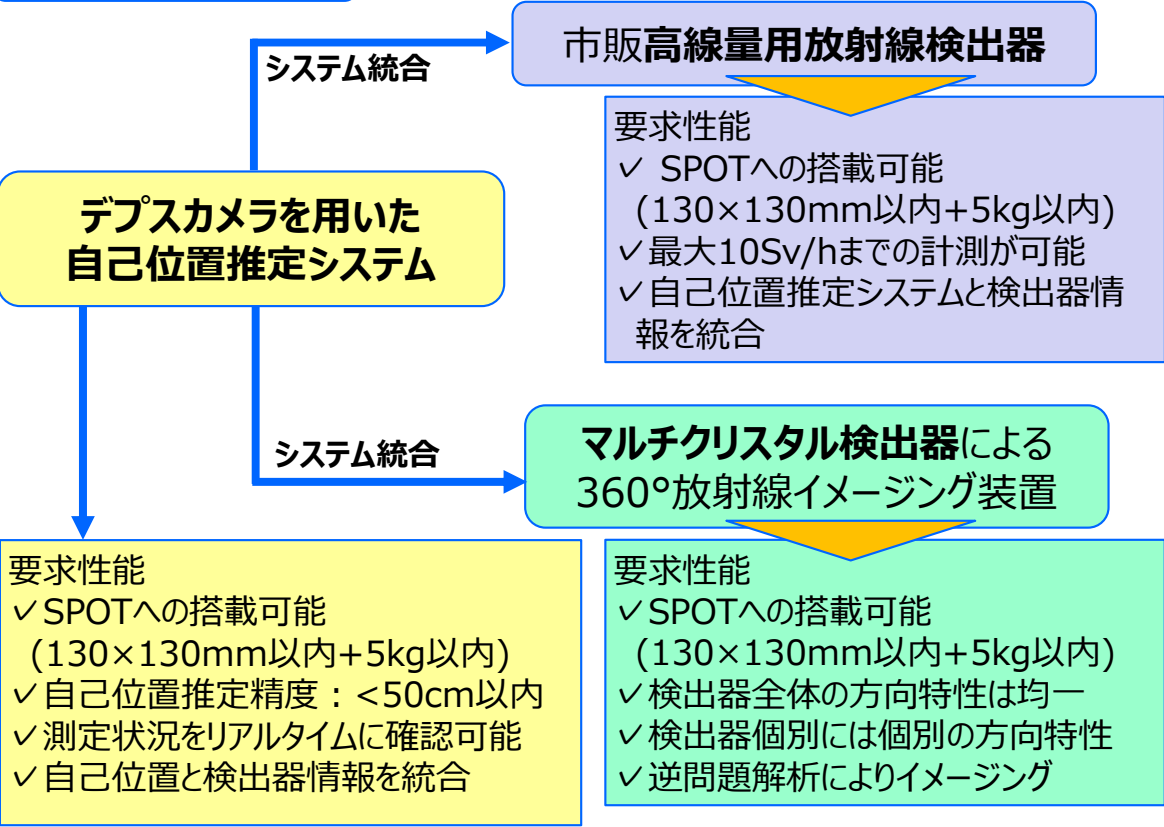
②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(3/15)

課題設定

- ・3D-ADRES-indoorには、高密度での現場放射線測定データが必要
- ・さらに放射線の方角を特定できると精度向上が見込める

- ➡
- ①SPOTに搭載可能な、自動で測定の位置情報を記録できるガンマ線サーベイメータの開発
 - ②SPOTに搭載可能な、360°方向の放射線飛来方向の特定が可能なイメージング装置の開発

仕様とデザイン



項目	R5年度	R6年度
デプスカメラを用いた自己位置推定システム	カメラ選定/設計 自己位置推定システム開発	
自己位置推定型サーベイメータ	検出器の選定	システム統合 SPOT搭載試験 1 F 試験
全方向ガンマ線イメージング装置 (FRIE)	検出器開発	基礎性能確認試験 SPOT搭載試験 1 F 試験

②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(4/15)

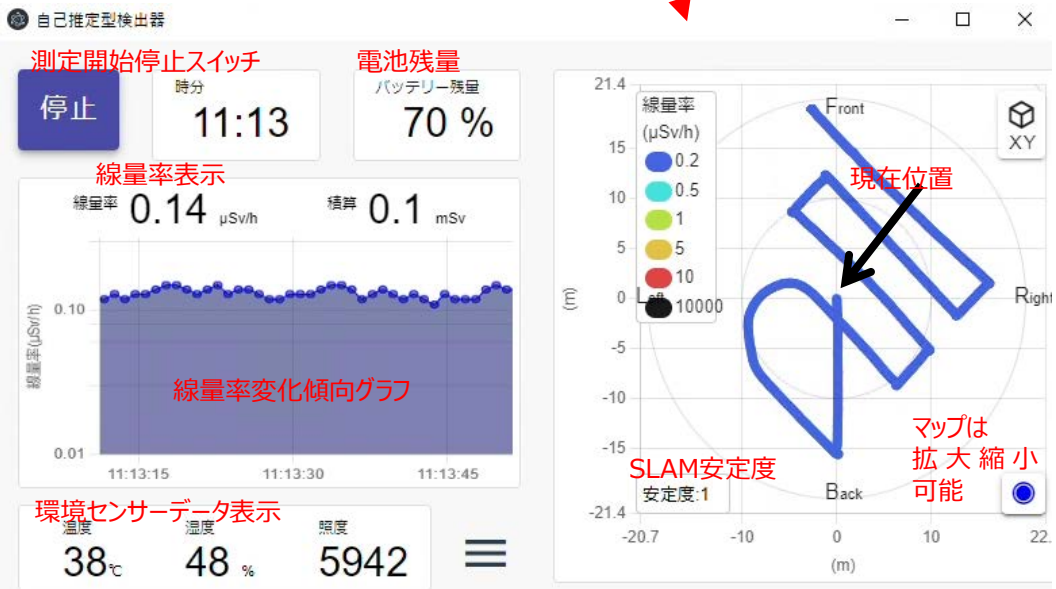
自己位置推定型サーベイメータ

- ①フォトグラメトリによる自己位置推定 + 3Dモデル作成機能
⇒GPSの届かない屋内・森林等での測定データ自動記録可能
- ②軽量 (2.3 kg)で安価 (小売価格300万円以下)
- ③SPOTへの搭載可能
- ④Wi-Fiによる相互通信による遠隔操作機能



項目	スペック
デプスカメラ	Xvisio SeerSense™ DS80 Module
検出器	Polimaster: BDG2 (高線量用)
測定範囲	0.1 $\mu\text{Sv/h}$ ~ 10 Sv/h (実用的には50 $\mu\text{Sv/h}$ 以上*) * 低線量は時定数が自動で長くなる設定 (低線量用検出器タイプ有)
大きさ	140mm×168mm×233mm
重さ	2.3 kg
データ記録	位置情報0.1秒間隔、放射線データ1秒間隔

自己位置推定型サーベイメータ表示画面



*安定度 > 0のとき自己位置を取得可能

②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(5/15)

自己位置推定型サーベイメータ位置精度確認試験

【目的】

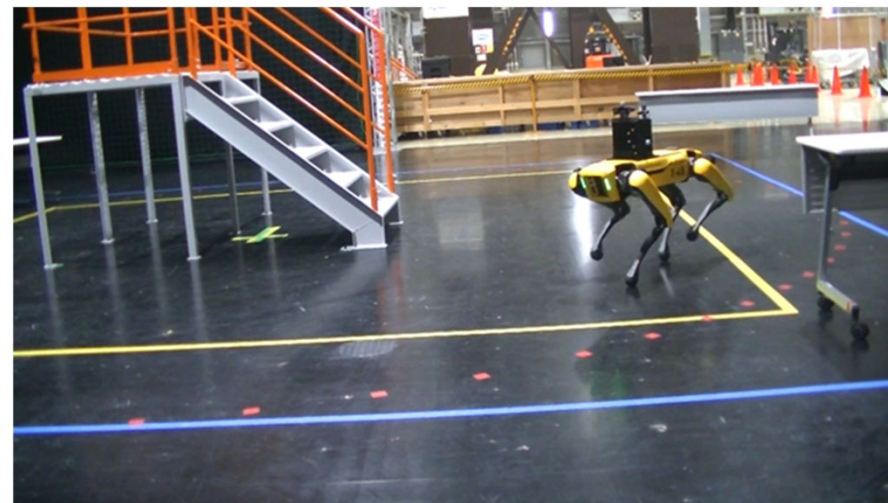
- ・SPOT搭載時の動作の健全性確認
- ・取得した位置情報の正確性

【方法】

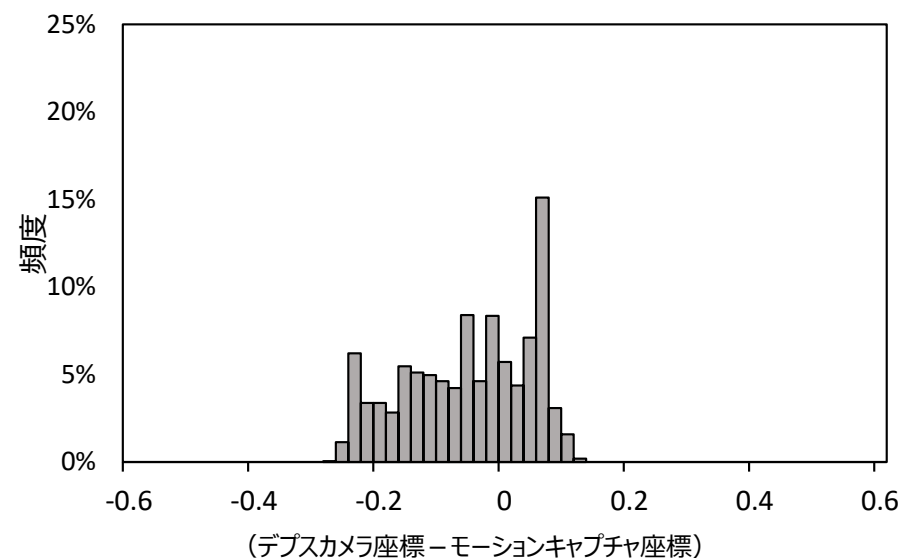
- ・SPOTにより手動で運用し、モーションキャプチャで取得した位置情報と比較する。

【特記事項】

- ・自己位置推定型検出器は相互Wi-Fiで接続したPCからリモートデスクトップでデータ通信



NARRECでのSPOT搭載試験



【試験結果】概ね20cm以内の誤差に収まっていることを確認

②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(6/15)

全方向ガンマ線イメージング装置(FRIE)



フラクタル形状を模擬した設計とすることで、あらゆる方向から入射した放射線を効率的に検出することができる構造になっている。
各検出感度の違いにより、放射線の入射方向を特定することが可能。

【特徴】

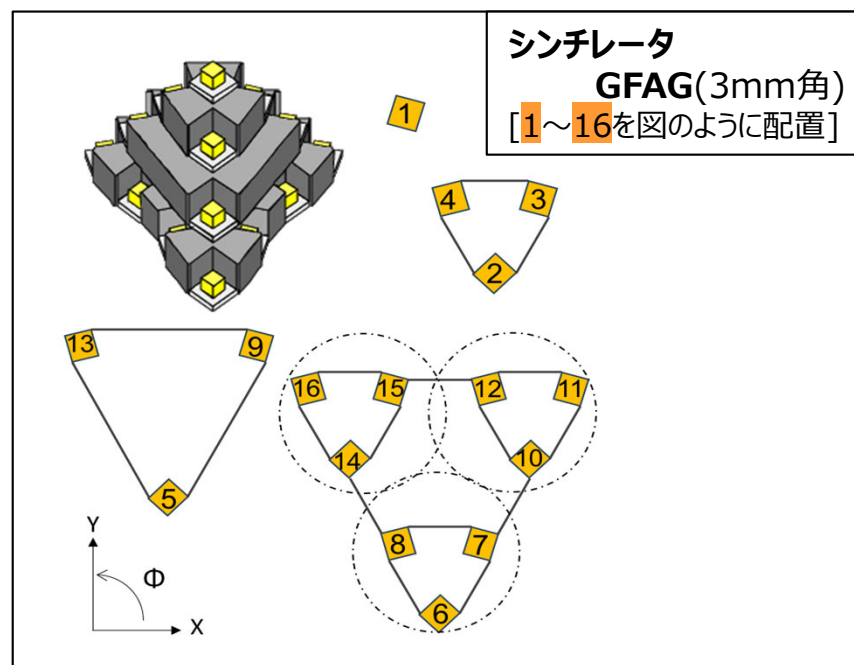
- 全方位検知型のため、高バックグラウンド環境測定において、コリメートのための遮蔽体等が必要なく、計測状況(シーン)に応じて小型軽量化が可能。
- 検出器の測定データと、測定エリアの3次元点群情報を組み合わせることで、放射線源の三次元分布を取得することが可能。
- ガンマ線の他にもベータ線も測定可能であり、検出部および形状を変化させることで、今後、中性子線の計測等への適用も目指す予定。
- 四足歩行ロボット等に搭載して使用可能。自己位置推定装置と組み合わせることで、ロボットで測定したエリアの放射線源分布の取得が可能。



FRIE用自己位置推定ユニット
(デプスカメラ+PC+バッテリー)

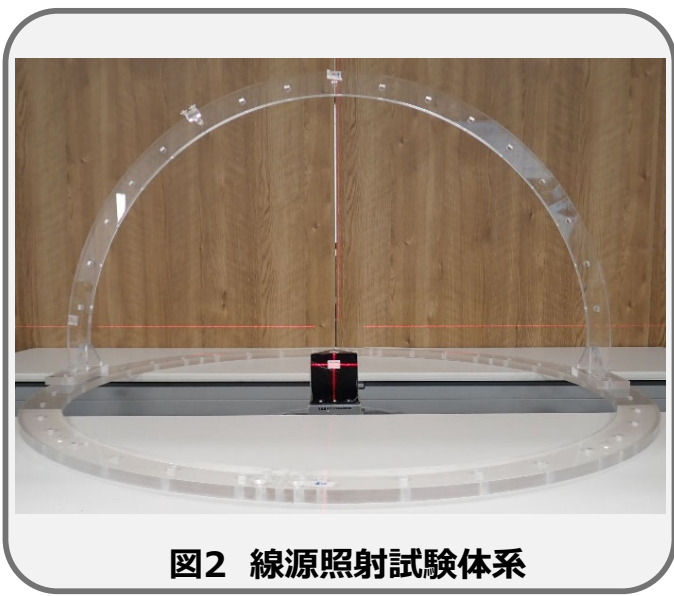
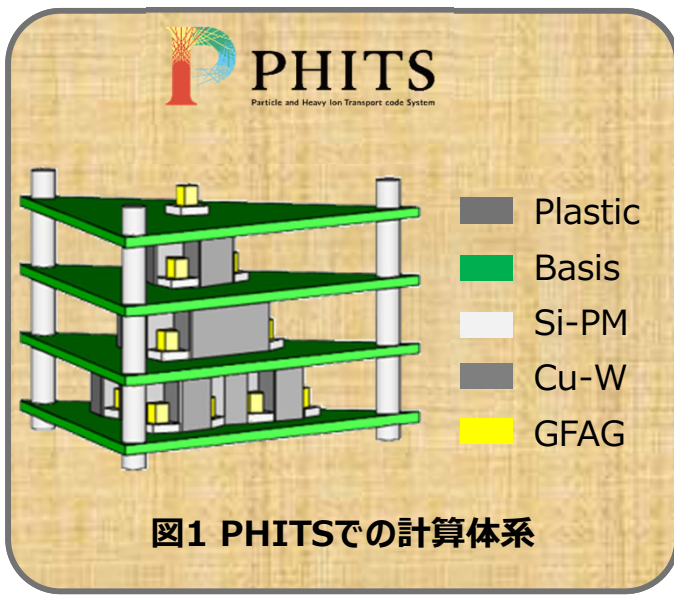


放射線検出器
(FRIE 3号機 高ガンマ用)



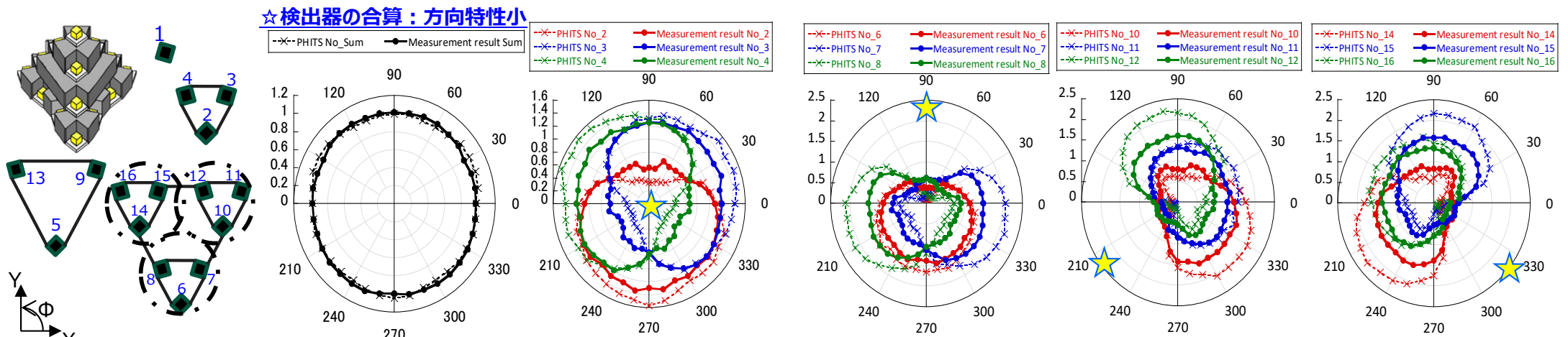
②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(7/15)

全方向ガンマ線イメージング装置(FRIE)



Model name	Sphere model	Flat model (Angle conversion)
線源検知位置	0°	0.06 m (3.4°)
全吸収ピーク分解能 (Cs-137)	22°	0.50 m (27°)
推定放射能精度	79 %	80 %
要求測定密度精度	2-3 m ⁻²	2-3 m ⁻²
複数線源分解能	-	0.60 m (31°)

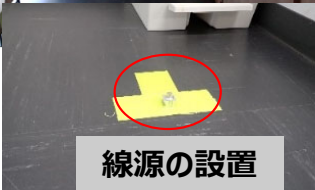
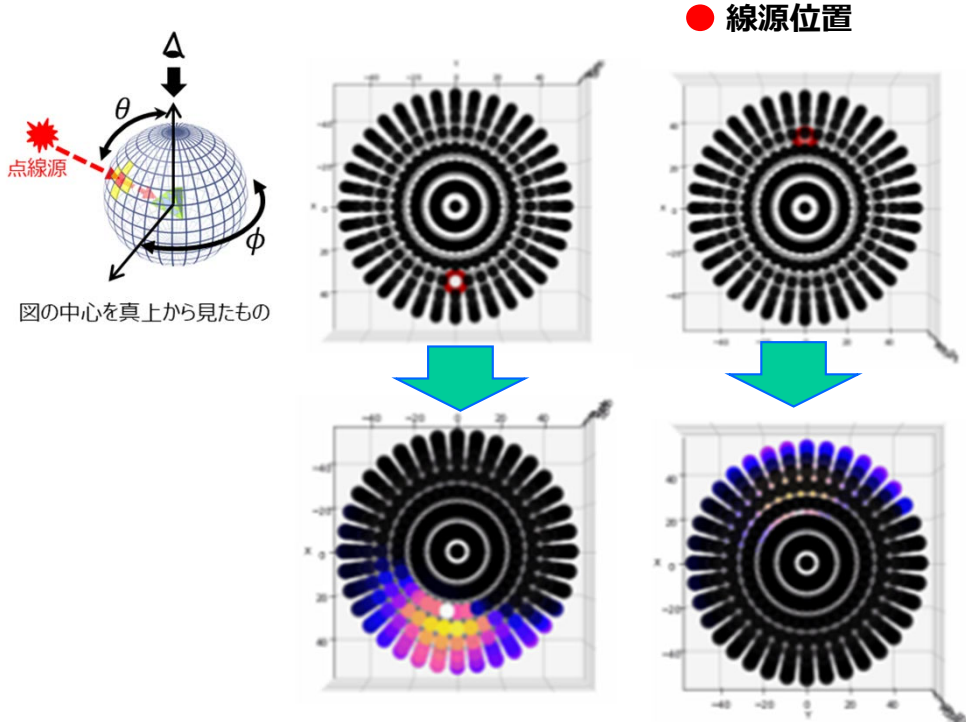
表3 マルチクリスタル検出器の計算による性能確認



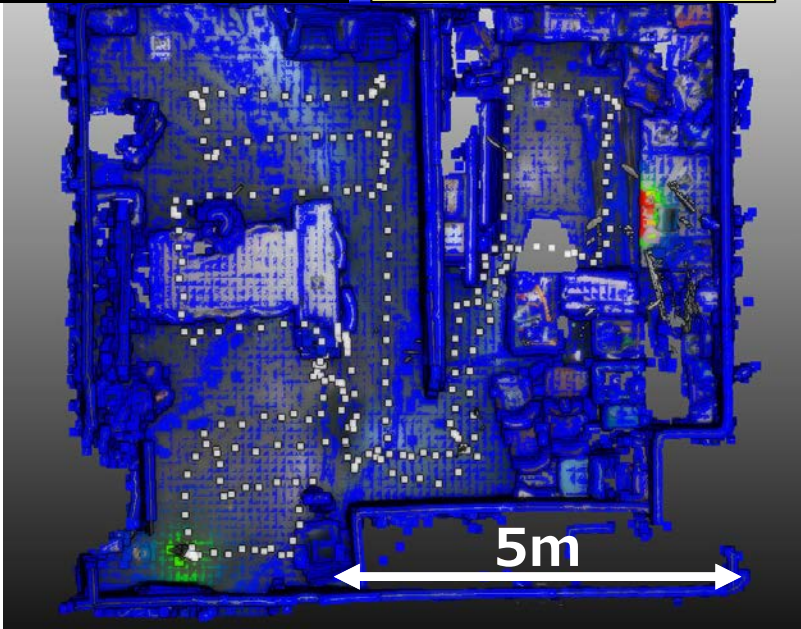
②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(8/15)

全方向ガンマ線イメージング装置(FRIE)
線源イメージング試験

【点線源試験】



ガンマ線イメージング結果



逆問題解析結果

上の線源位置に対応した範囲で再現できることを確認

②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(9/15)

1F3号機1階の現場適用性試験(1/7)

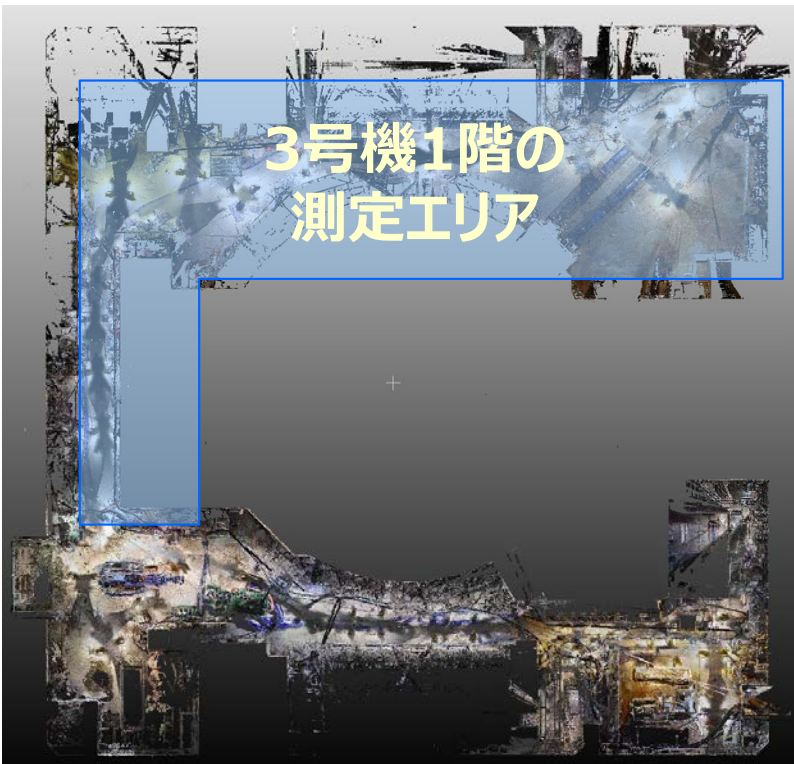
【計測の目的】

- ・1F3号機1階の北側にあるHCU高線量エリア付近での連続データ取得
- ・データ計測時における連続データ取得の確認及び計測精度の確認
- ・計測対象エリアを1回だけ計測した場合と、周回(複数回計測)した場合の計測精度の比較

※SPOTでの移動になるため、床面からの高さは一定(今回は1m)に制限される
(SPOTのアームを動かすことによる計測器落下防止のため)

使用機器

- ・ 四足歩行ロボット(Spot)+無線機(Rajant)
- ・ GM管検出器 (BDG2、Polimaster)
- ・ FRIE検出器
- ・ 自己位置推定装置



3号機1階での現場計測の様子



SPOTへの機器搭載と養生



SPOTの現場計測の様子

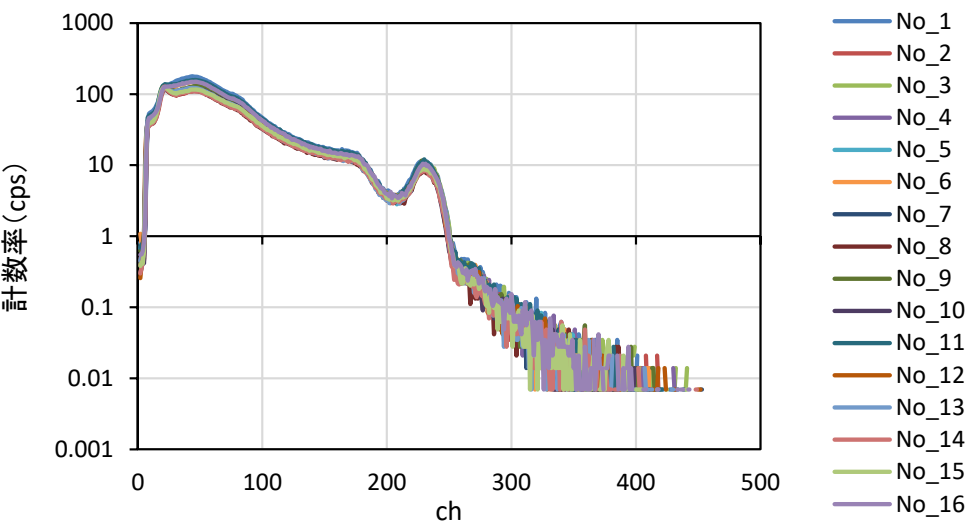


免震重要棟でのSPOT遠隔操作

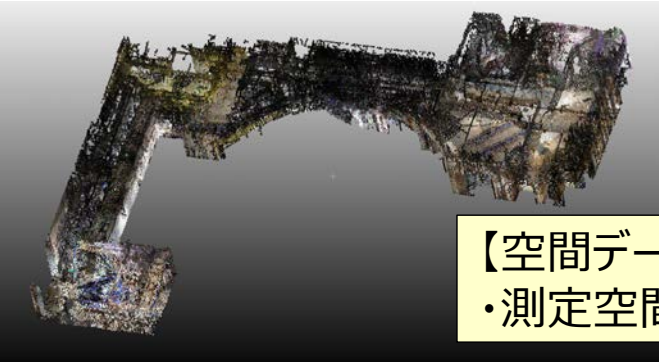
②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(10/15)

1F3号機1階における現場適用性試験(2/7)

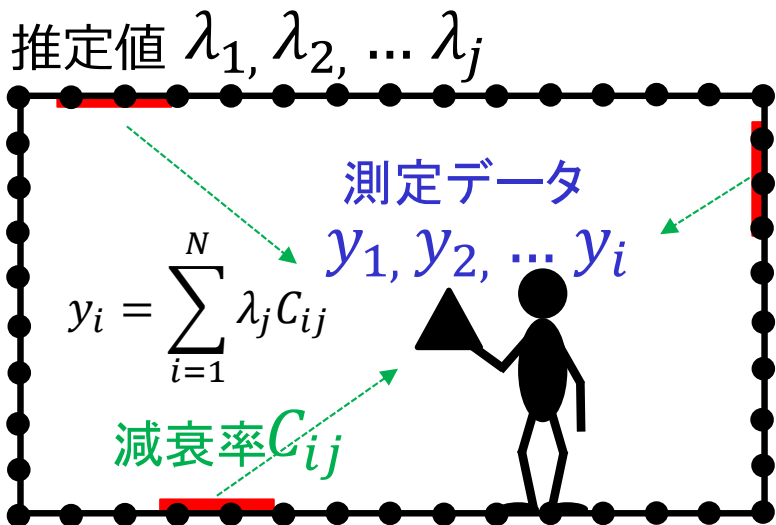
逆問題解析



【測定データ】*1秒毎
 ・位置情報 (X,Y,Z)
 ・線量率or計数率情報



【空間データ】
 ・測定空間情報 (X,Y,Z)



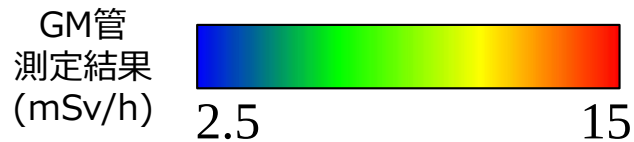
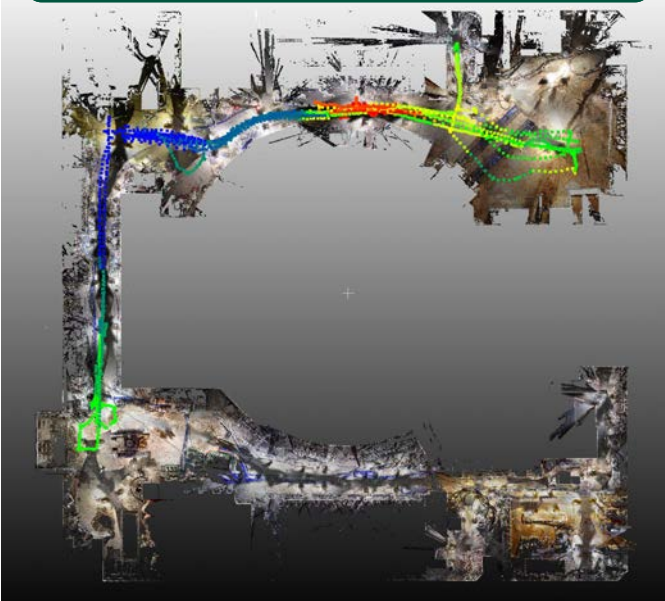
$$\text{MLEM: } \lambda_j^{(k+1)} = \frac{\lambda_j^{(k)}}{\sum_{i=1}^N C_{ij}} \sum_{i=1}^N \frac{y_i C_{ij}}{\sum_{j=1}^B C_{ij} \lambda_j^{(k)}}$$

**逆問題解析 (MLEM※) を
使用して分布を推定**

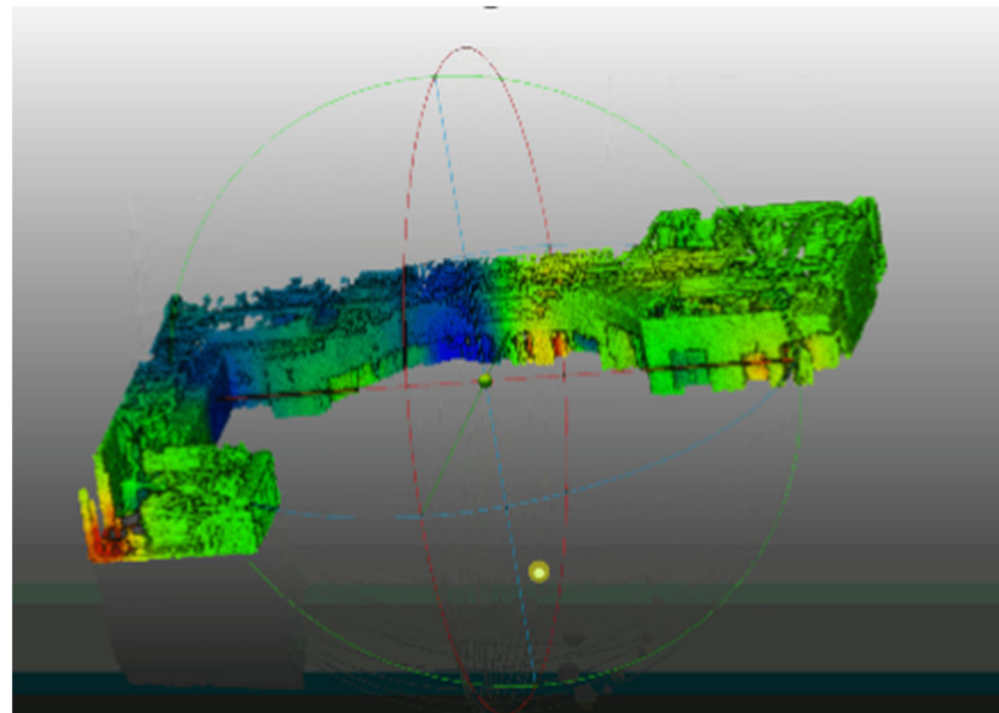
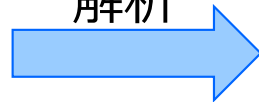
※MLEM法は、実測の投影データをもとに再構成した画像から、再び投影データを作り、それができるだけ実測値に近づくように逐次更新していくアルゴリズムのこと。

②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(11/15)
 1F3号機1階の現場適用性試験(3/7)

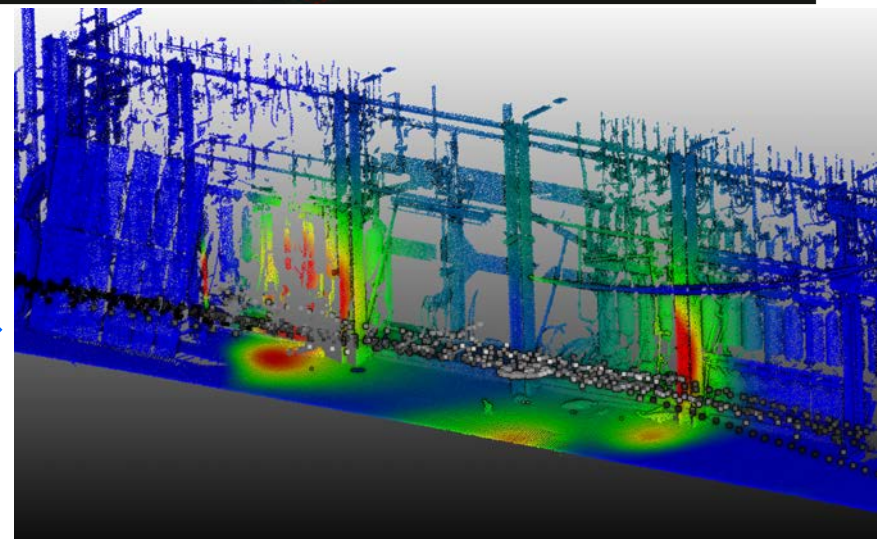
自己位置推定型サーベイメータ



逆問題
解析

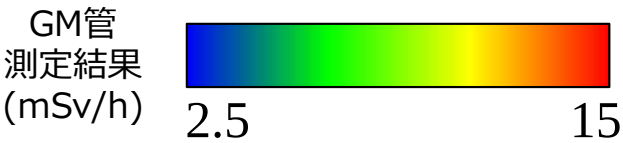


HCU周辺の拡大

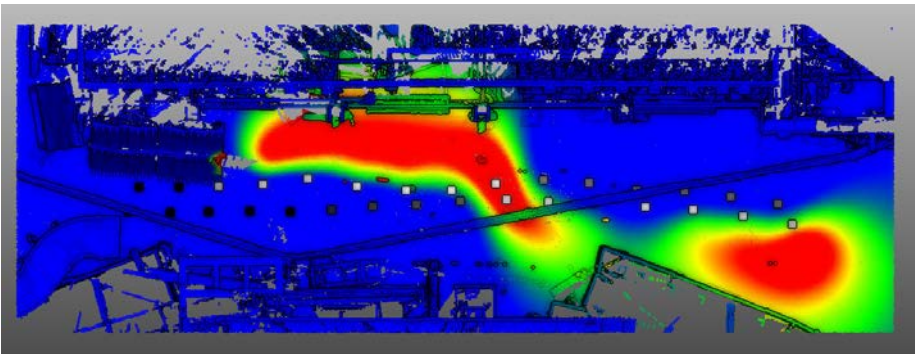


②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(12/15)
1F3号機1階の現場適用性試験(4/7)

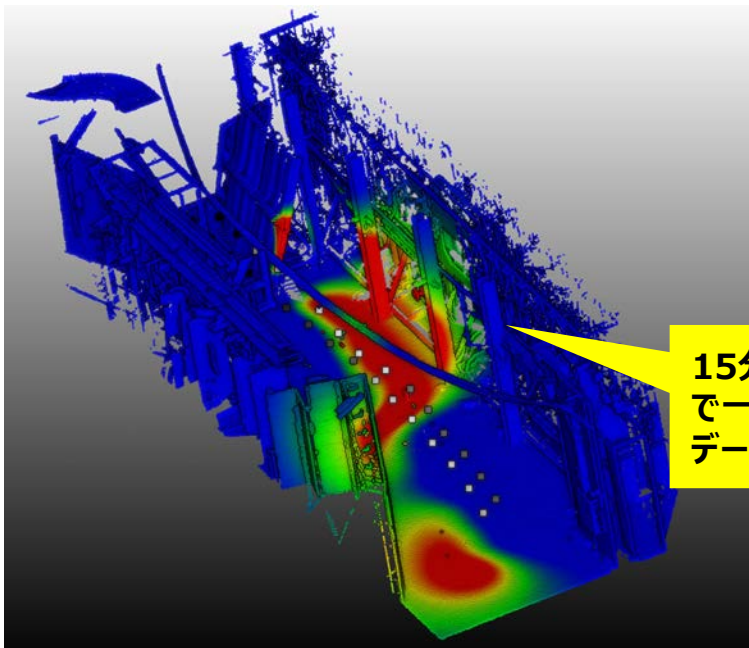
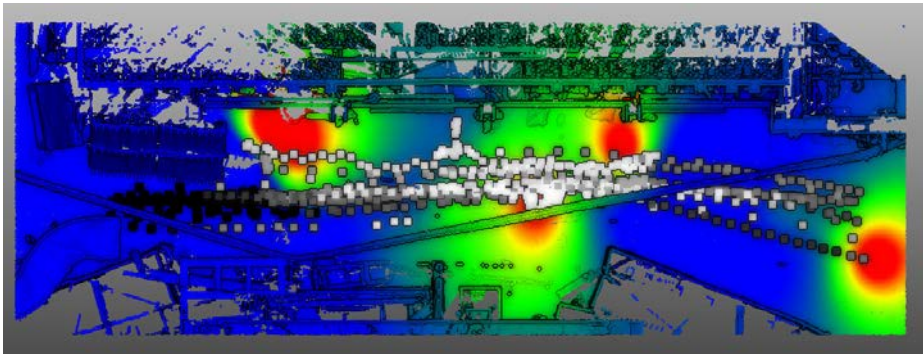
自己位置推定型サーベイメータ



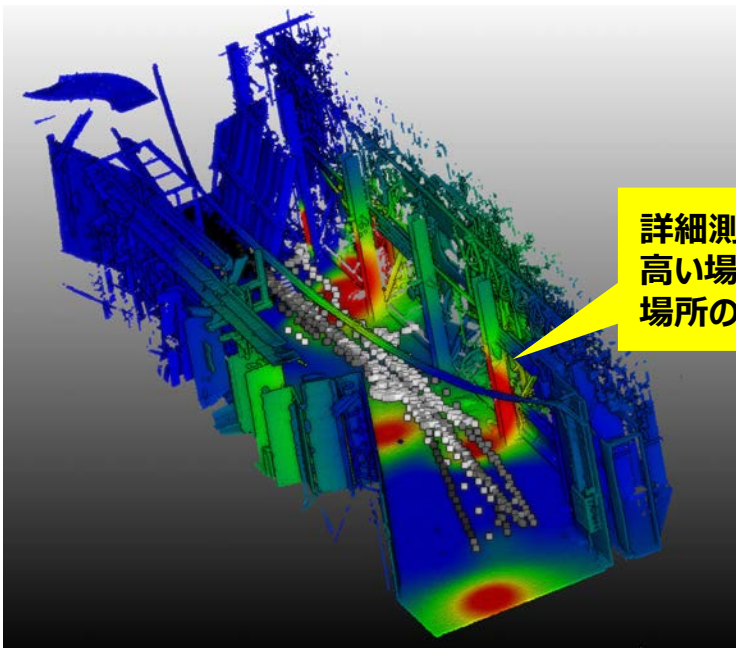
スルーデータ (15分の簡易測定) での3次元像



全データ (60分の精密測定) での3次元像



15分程度の測定
で一定程度の分布
データ取得可能

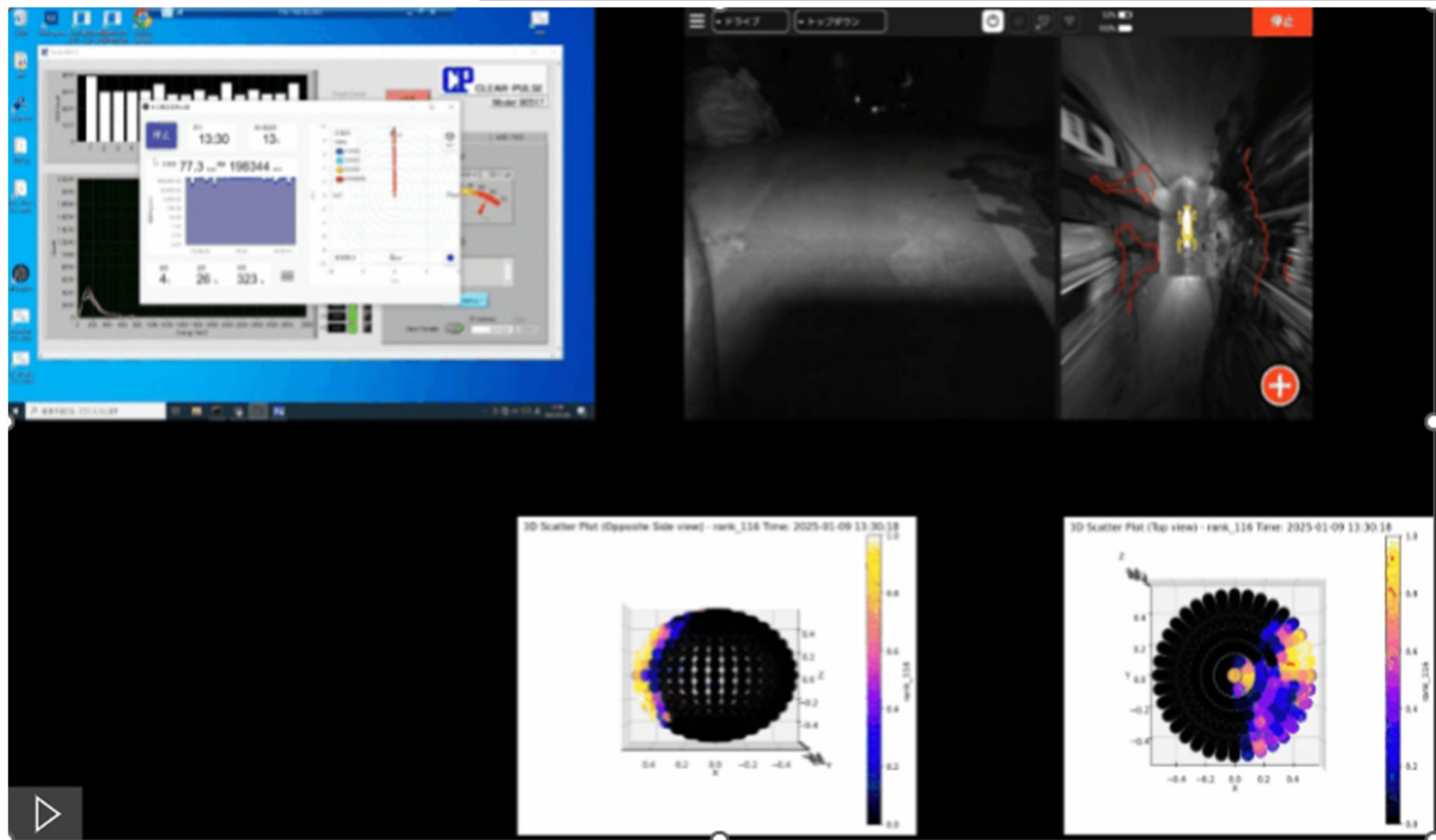


詳細測定だと線量の
高い場所の詳細な
場所の特定可能

②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(13/15) 1F3号機1階の現場適用性試験(5/7)

全方向ガンマ線イメージング装置(FRIE)

FRIEから得られた計数率から検出傾向から寄与方向を推定（各方向からの点線源を照射したときの検出傾向と比較し、最も相関関係のスコア等が高いポイント200に色付け）



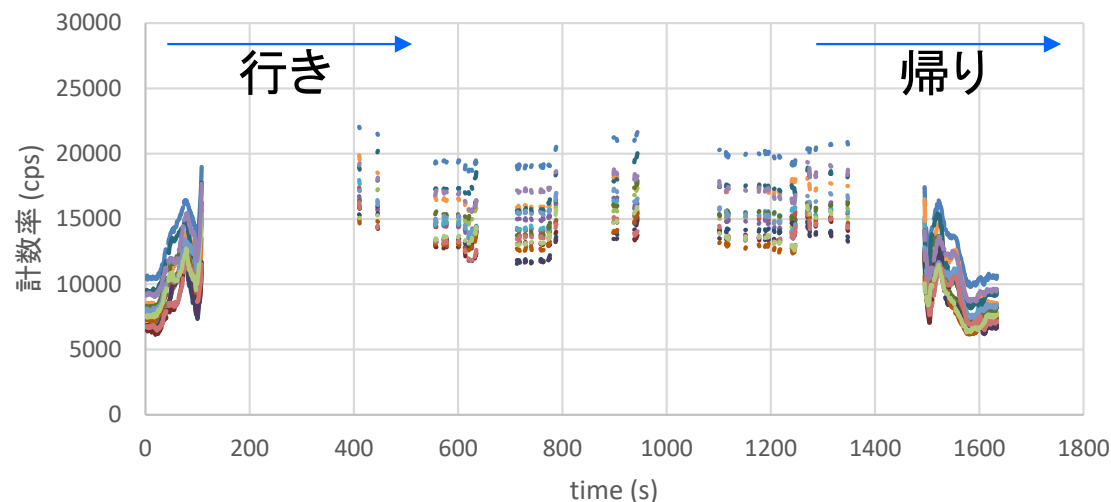
↑横から見た寄与方向推定結果
(Spotの前方向が球の手前側)

↑上から見た寄与方向推定結果
(Spotの前方向が球の上側)

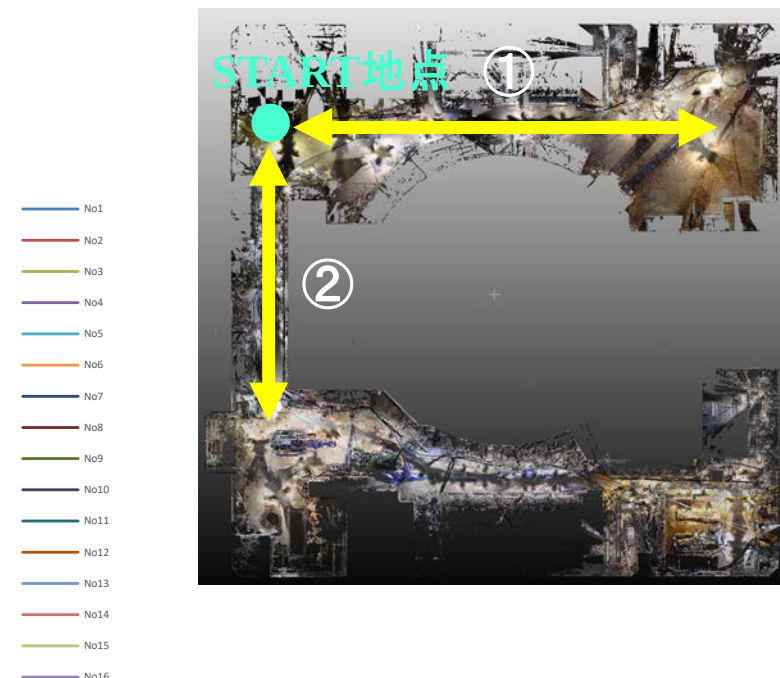
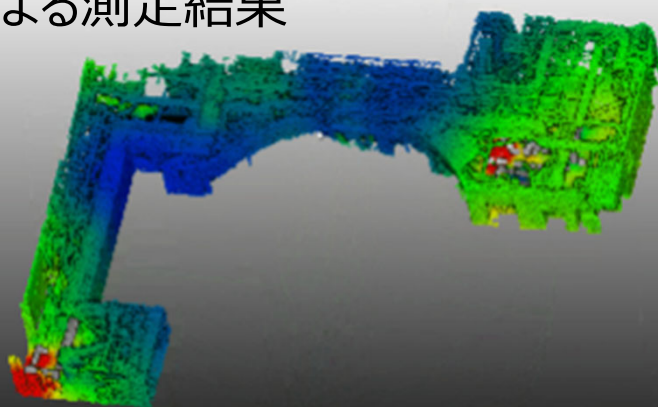
② 新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(14/15)
1F3号機1階の現場適用性試験(6/7)

全方向ガンマ線イメージング装置(FRIE)

➤ FRIEによる測定 1回目：①のラインを測定



FRIEによる測定結果



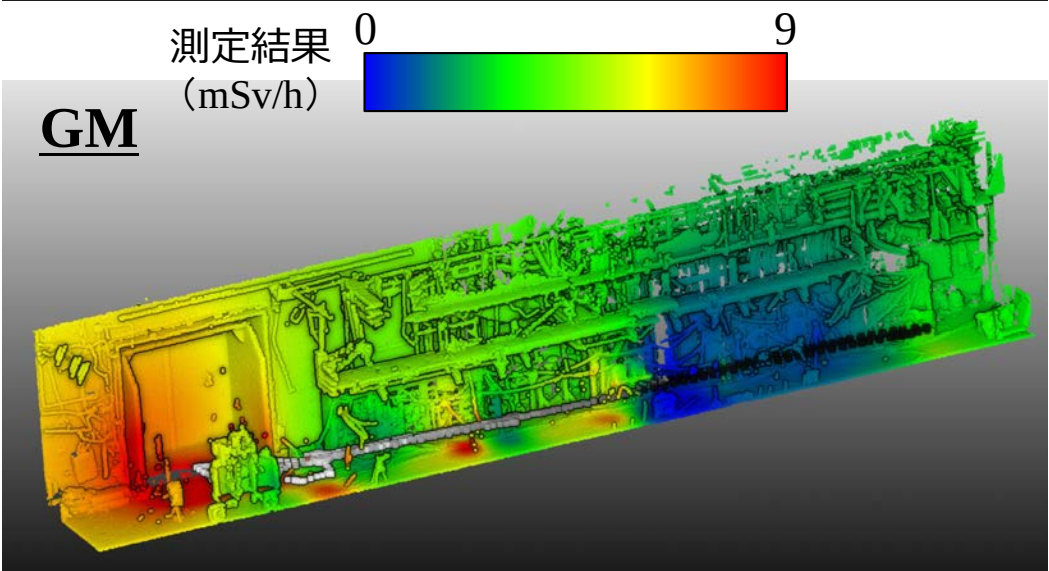
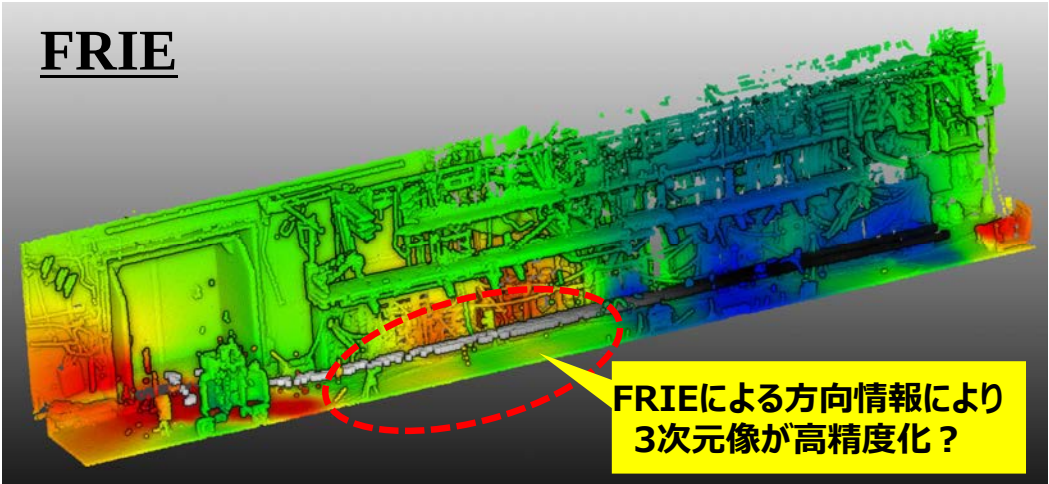
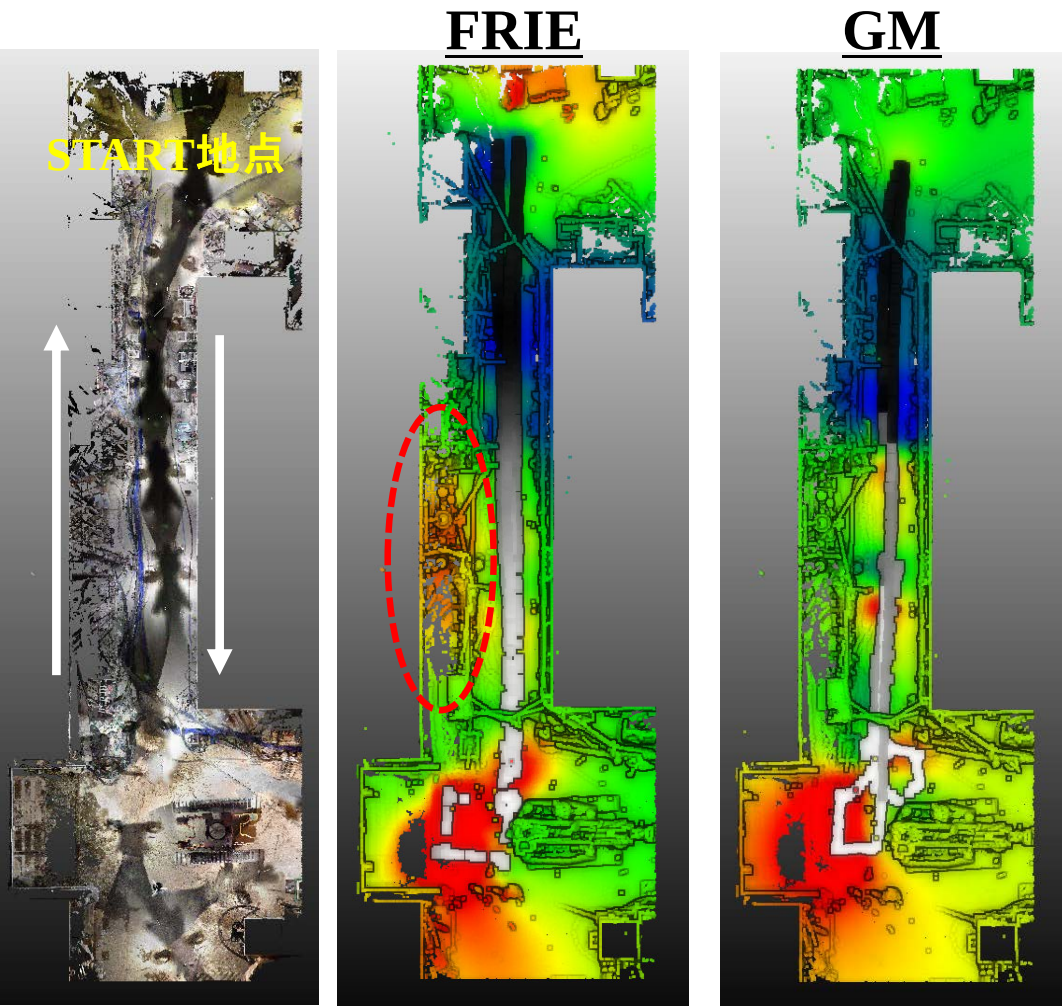
**FRIEによる測定では
15mSv/h付近でデータ途切れあり**

※デッドタイムは20%ほど。他の機種で、
デッドタイム50%以上でも計測できており、
今回の事象はスペクトルデータが出力され
ていないことから、FPGA内のバッファの
オーバーフローが原因と考えられる。

②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発(15/15) 1F3号機1階の現場適用性試験(7/7)

全方向ガンマ線イメージング装置(FRIE)

- FRIEによる測定 2回目:②のラインを測定
※FRIEでデータ保存できたデータをサーベイメータと比較



【FRIEの特徴】
FRIEの特徴としては測定点における放射線のベクトル情報が得られるという点にある。3号機での試験結果において、ベクトル情報を計算に含めることで出来上がる分布図が異なることがわかっている。

②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発まとめ

【2年間の成果まとめ】

自己位置推定型サーベイメータ

- ・非GPS環境における位置情報を自動で取得するためのデプスカメラを用いた**“自己位置推定システム”を開発 [TRL2⇒5を達成]**
- ・本システムに市販の高線量対応 (～10Sv)検出器と統合し、自動でデータを保存できる**“自己位置推定型サーベイメータ”を開発**
- ・櫛葉試験場や森林などでSPOTとの搭載モックアップ試験を実施して基礎性能を確認
- ・**1F3号機1階**でSPOTに本装置を搭載し、**連続データの取得に成功**

FRIE(三次元放射線イメージング装置)

- ・独自に考案した360°方向放射線イメージングが可能な**「全方向ガンマ線イメージング装置 (FRIE)」を開発 [TRL2⇒4を達成]**
- ・櫛葉モックアップ試験や森林等でSPOTに搭載した試験を実施して基礎性能を確認
- ・**1F3号機1階**でSPOTに本装置を搭載し、**全方位からのデータの取得に成功**
- ・得られたデータについて簡易的な逆問題解析を実施し、**線量率の3次元可視化に成功**
- ・全方向ガンマ線イメージング装置(FRIE)について、設計では50mSv/hまで測定可能としていたが、実際には15mSV/hでデータの欠測が見られた。解析によると、欠測時のDead timeは20%程度であり、データ保存時に何らかの異常が発生したと考察。**原因の可能性の高かった計数率の保存時間 (メモリへの書き込み時間1秒ごと→5秒ごと)について設定を変更し、照射試験で100mSv/hまで計数できることを確認。**

b.(d)線源・線量推定解析の高機能化 (1/15)

①ダスト挙動予測手法の研究開発(1/15)

● 目標

1F現場での複雑環境の一つの課題である、作業等の攪乱による屋内ダスト濃度上昇による被ばく評価・低減のためにダスト情報収集と挙動予測に関する研究開発を行う。

● 計画：

- (1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発 **[令和6年度：TRL2→4]**
- (2)風速・ダスト情報を用いたダスト挙動予測のためのCFD※¹解析の試行 **[令和6年度：TRL2]**

(※ 1 CFD：数値流体力学(Computed Fluid Dynamics)。コンピュータによる流れ解析)

● スケジュール

R5年度終了時に、1F現場への適用性試験への目途が立ったため、目標TRLを上方修正し、3号機への適用性試験を実施

実施内容	2023（令和5）年度	2024（令和6）年度
b. 現場適用性の向上のための研究開発		
(d) 線源・線量推定解析の高機能化		
①ダスト挙動予測手法の研究開発		
(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発	開発計画検討 計測システム開発 まとめ	模擬フィールド試験 3号機適用試験 まとめ
(2)風速・ダスト情報を用いたダスト挙動予測のためのCFD解析の試行	CFD解析試行(模擬フィールド) まとめ	CFD解析 まとめ

当初の開発スケジュール(R6.9月で完了)

b.(d)線源・線量推定解析の高機能化 (2/15)

①ダスト挙動予測手法の研究開発(2/15)

(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発(1/9)

国の補助事業課題（静的放射線環境情報の取得のみ）

動的環境情報（ダスト挙動等）は不明

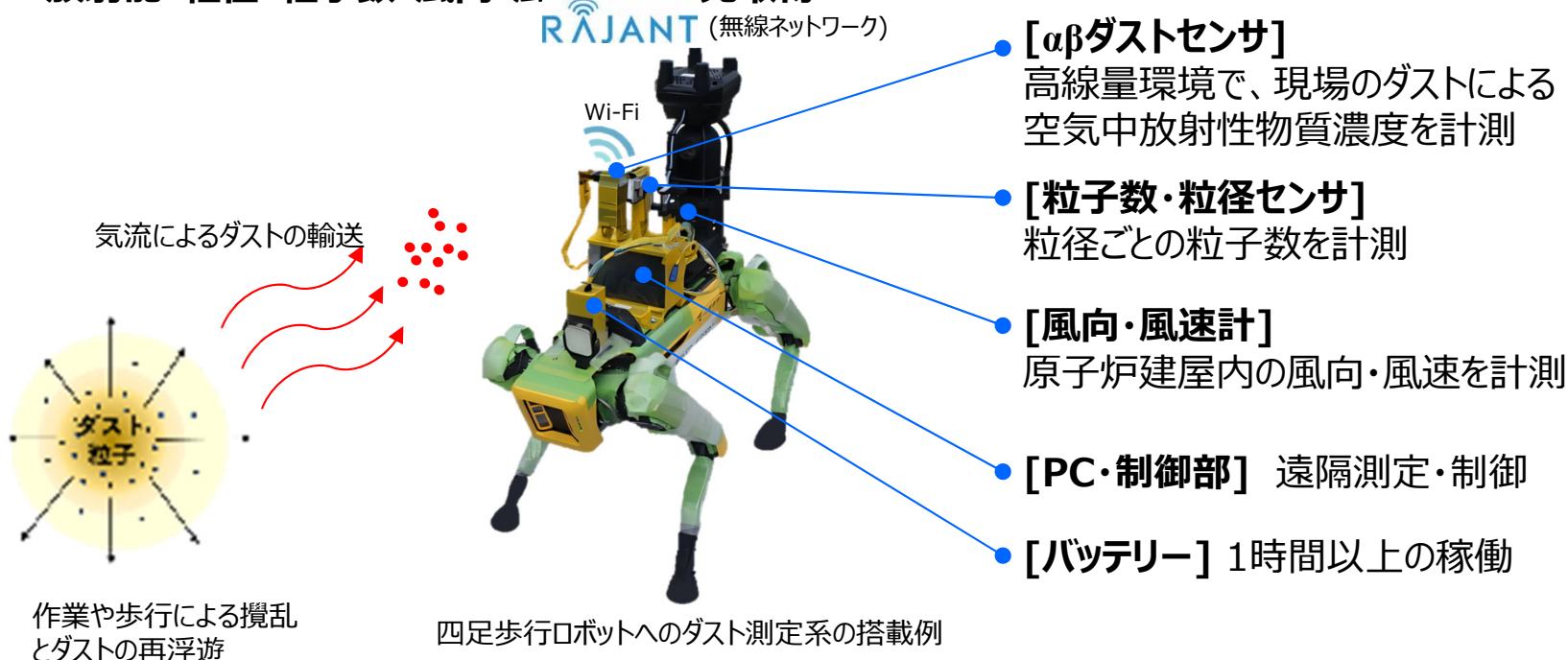
- 複数種ダスト（ダスト濃度/線量）の測定要
 - ダスト線源の分別（ α 、 β 、 γ ）要
- 【課題】ダストは機器汚染の原因となる他、内部被ばく評価において必須となる

遠隔でダスト情報(放射能・粒径・粒子数・風向・風速)を一元取得するシステムを開発

➡模擬フィールドでの性能検証。CFD解析との突合せで、実空間のデータをコンピュータ上にも再現する

【ダスト測定系の概念】

～放射能・粒径・粒子数・風向・風速等を一元取得～

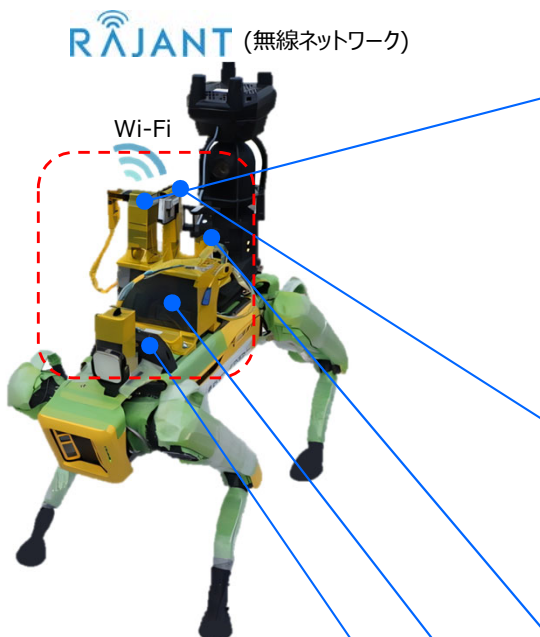


【目的】
CFDのインプットやデータ同化による飛散予測を試行

①ダスト挙動予測手法の研究開発(3/15)

(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発(2/9)

【計測機器の選定とシステム開発】…**ロボット搭載に適した軽量なダスト測定システム(約3kg)を開発**



RAJANT (無線ネットワーク)

Wi-Fi

αβダストセンサ

最終選定：位置検出シリコン半導体センサー(MiniPIX)

- センサー＋集塵部で約300gと軽量。
- 機械学習との組み合わせにより、遮蔽フリーで動作

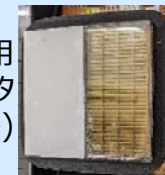


検討した候補：IAAM測定器(4分割フotonカウンティング装置)

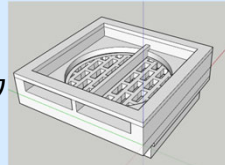
△ センサー＋集塵部で約1kg

△ αβ弁別は容易だが、γ線環境だと追加遮蔽が必要(数kg)

α線用
ZnSシンチレータ
(6.0mg/cm²)



β線用
プラスチックシンチレータ
(1090μm)



※選定と性能評価概要を補足資料に記載

粒子数・粒径センサ



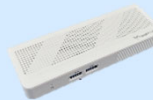
M5Stack(マイコン) + PMSA003(光散乱式PMセンサー)
・0.3～10μmの粒径ごとの粒子数を計測可能。約70g。

風向・風速計



Trisonica Mini(超音波式風向風速計)
・可動部なし。約50gの風向風速センサー

PC・制御部



Intel N100スティックPC + 8インチ液晶パネルを光造形3Dプリンタ製筐体内に組み込み。
本体・接続部は養生し、ケーブル類はマグネット着脱式を選定。

バッテリー



Anker Prime Power Bank (20000mAh、200W)
システムを約2時間稼働(現場試験においては余裕をもって1時間を作業時間目安とした)

：開発したシステム
・重量：約3kg
・稼働時間：>1時間

①ダスト挙動予測手法の研究開発(4/15)

(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発(3/9)

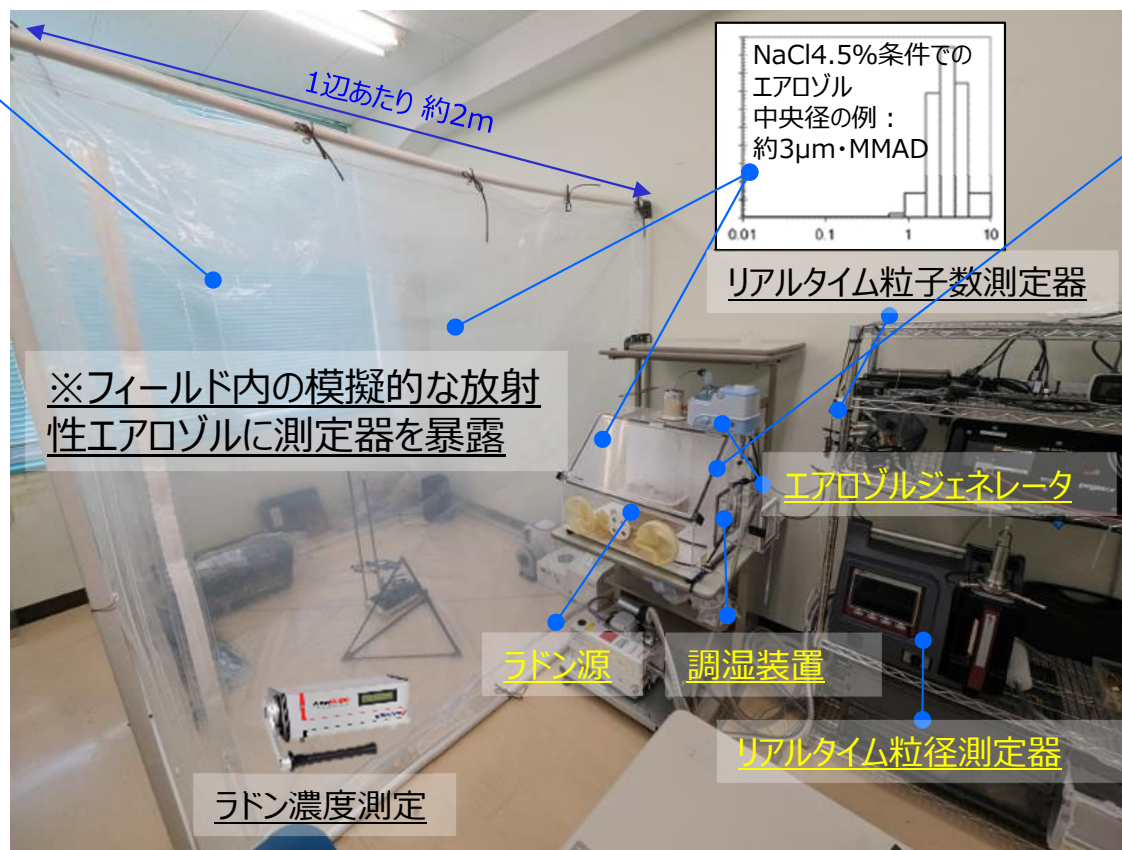
【模擬フィールド(ラドン・グリーンハウス)でのダスト情報取得】

- ⇒ ダスト情報の一元取得のために製作した測定系を配備し、センサー類の性能を試験。
- ⇒ 模擬フィールド内（単純環境）でのダスト情報の取得を実施。

測定器暴露試験用 模擬フィールド

→実空間を模擬した 暴露試験に特化

- ・HEPA吸気ファン等で
風況を調節可能
- ・数 μm ・MMADの放射性
エアロゾル導入に成功
- ・ラドン・グリーンハウス内濃度
 $>5 \times 10^{-6} \text{ Bq/cm}^3$
の調整可*2



混合槽

→高濃度の放射性ダスト 暴露試験に特化

- ・数 μm ・MMADの放射性
エアロゾル導入に成功
- ・混合槽内
 $>5 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^3$
の濃度まで調整可能

※ ^{220}Rn または ^{222}Rn で模擬。
仮に ^{238}Pu が同様の濃度存在する場合、
空气中濃度限度(法令値)の7倍程度に
相当

模擬フィールド(ラドン・グリーンハウス)

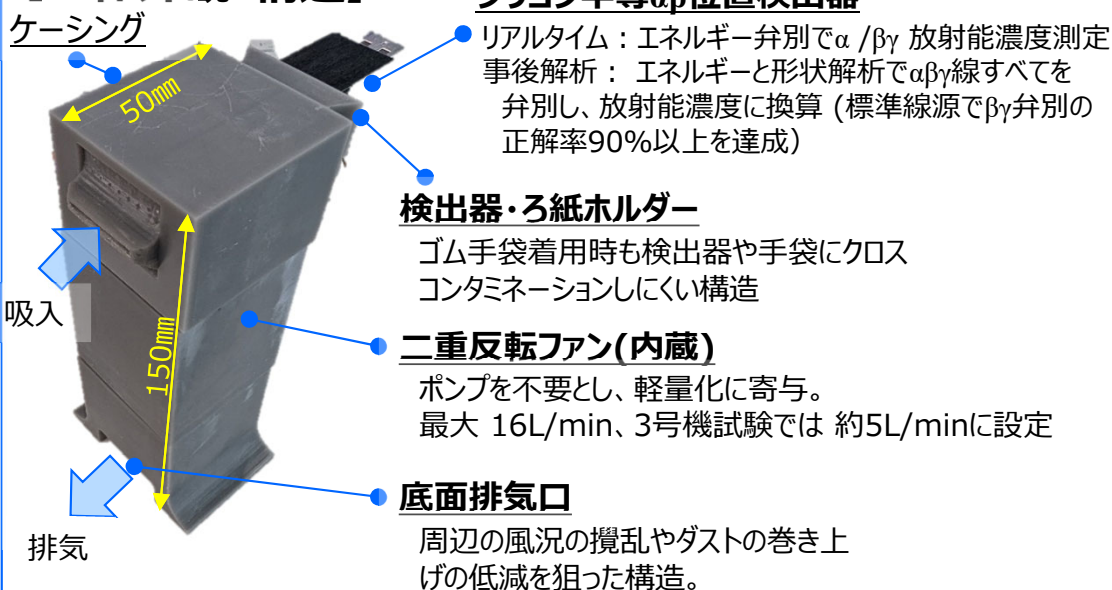
b.(d)線源・線量推定解析の高機能化 (5/15)

①ダスト挙動予測手法の研究開発(5/15)

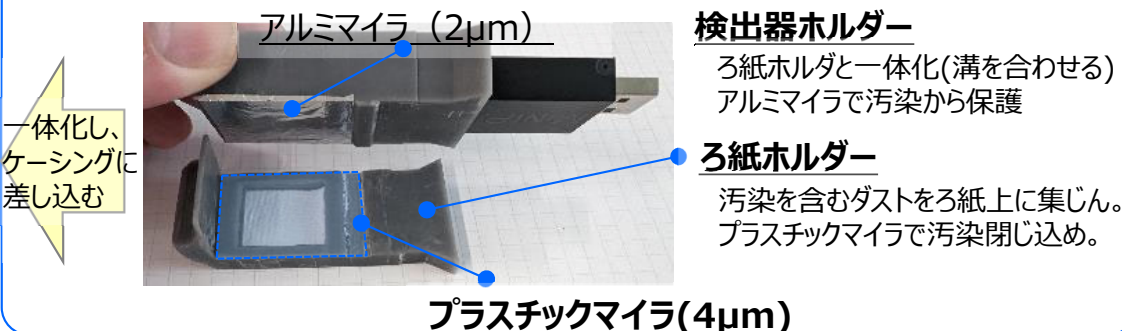
(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発(4/9)

機械学習を活用した $\alpha\beta$ ダストモニタの概要と性能検証

【全体外観・構造】

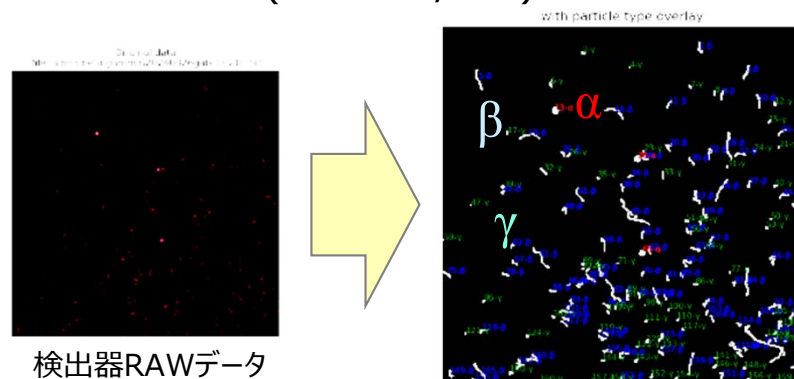


【検出器・ろ紙ホルダー部】



【模擬フィールド・放射線校正施設での検証】

- 空間線量率 10mSv/h以上(^{137}Cs)の環境での動作及び $\alpha\beta\gamma$ 線の弁別を達成 (最大100mSv/hまで実施)
- 標準 α 線源、 β 線源、 γ 線源を用いた検出器への照射を実施し、放射線線種弁別の機械学習パラメータを取得。
- ラドン子孫核種(模擬 $\alpha\cdot\beta$ 核種)を付着したNaClエアロゾル(MMAD $\sim$ 3 μ m)の連続測定動作(1時間)を確認。検出器の露出時間を決定(0.081秒/1秒)。



⇒ センサーの計数効率・データ取得間隔及び機械学習処理を考慮した総合的な計数効率：

α ダスト：>0.8% (素の計数効率 (>10%) $\times$ データ取得時間)
 β ダスト：>1.2% (素の計数効率 (>15%) $\times$ データ取得時間)

b.(d)線源・線量推定解析の高機能化 (6/15)

①ダスト挙動予測手法の研究開発(6/15)

(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発(5/9)

【3号機現場適用試験(1/2)】

- ・本件では限られた観測条件(1Fのような現場を想定)からダスト飛散を予測可能とするようなシステムの開発を目指す。ダストの飛散を予測するには、まず風況場を予測する必要がある、これはデータ同化手法を用いて観測点の風況情報をもとにシミュレーションを適合させることで、おおよその風況場を再現する。
- ・次に、ダスト濃度の観測が可能となった場合を想定し、その観測結果からダスト源を逆推定する必要があるが、観測は限られていることを踏まえ、LASSOを活用することで、おおよそのダスト源の予測を行う。
- ・模擬フィールドを用い、数値シミュレーションを実行し、そこから得られる観測値を用いて、本システムによるダスト飛散予測を行う。

【目的】

- ・1F建屋の実環境(高線量・遠隔操作のみ可能)において、ダスト情報の一元取得システムの性能実証をし、さらに現場のダスト情報(放射能・粒径・粒子数・風向・風速)を取得する。

【方法】

- ・ダスト測定機器類をロボットに搭載し、3号機原子炉建屋内北東・北西・南西までのエリアのダスト情報をストップ(データ取得)&ゴー(ロボット移動)方式で取得。



1F3号機計測時のSPOTの様子(カメラ画像)と自動計測

b.(d)線源・線量推定解析の高機能化 (7/15)

①ダスト挙動予測手法の研究開発(7/15)

(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発(6/9)

【3号機現場試験(2/2)】

【現場試験の要求事項への対策】

・遠隔対応：

機器の電源ケーブルを接続し、スイッチを一度押すと機器の立ち上げからデータ取得までを自動で実施。(重装備の作業者の手間を極力排除)

・軽量化：

ロボットのペイロード(14kg)に対して、十分軽い設計(約3kg)とした。

線量対策：高線量でも動作するセンサー及びデータ処理手法を採用した。

・汚染対策：

$\alpha\beta$ ダストセンサーはケース及びフィルムで保護。筐体はポリエチレンフィルム及び養生テープで保護。主なケーブルはマグネット着脱とし、汚染状況に応じて容易に交換・廃棄可能。

・安全対策：

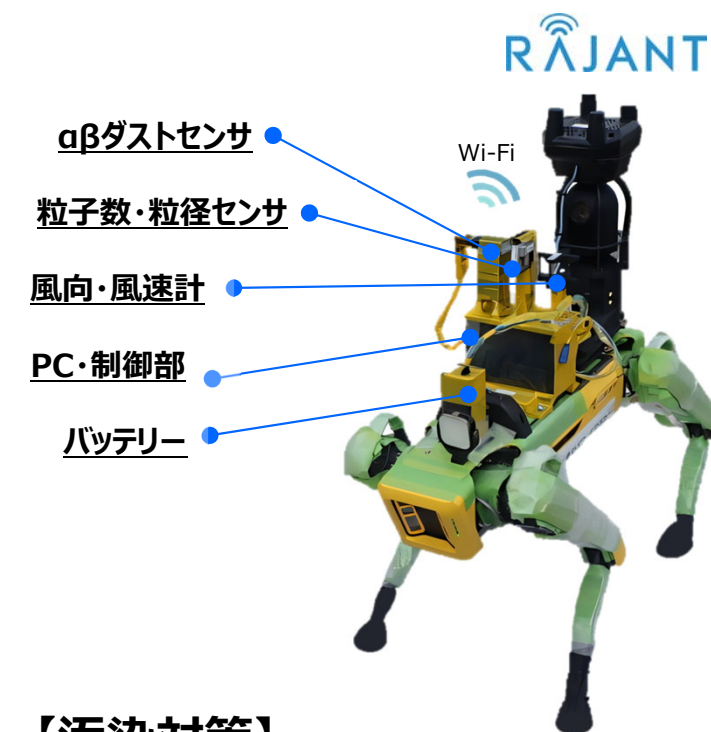
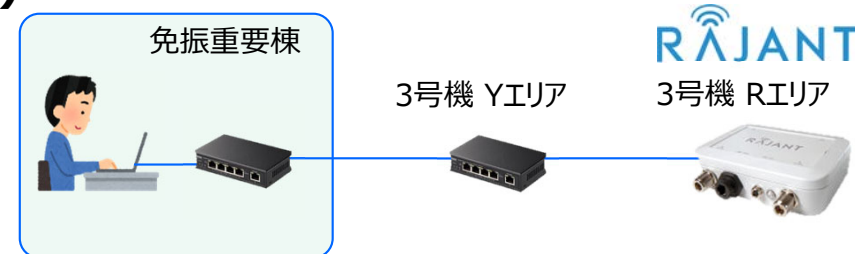
・バッテリーは3Dプリントしたケースに格納し、PC・制御部とはマグネット着脱式ケーブルで接続。(使用後に建屋内にバッテリーを残置しないための対策)



バッテリーは筐体内に入れ、ケーブルは赤丸部分にてマグネット脱着。



粒子数・粒径センサのマグネット脱着(赤丸部)



【汚染対策】

3号機入場時におけるSPOTの養生

①ダスト挙動予測手法の研究開発(8/15)

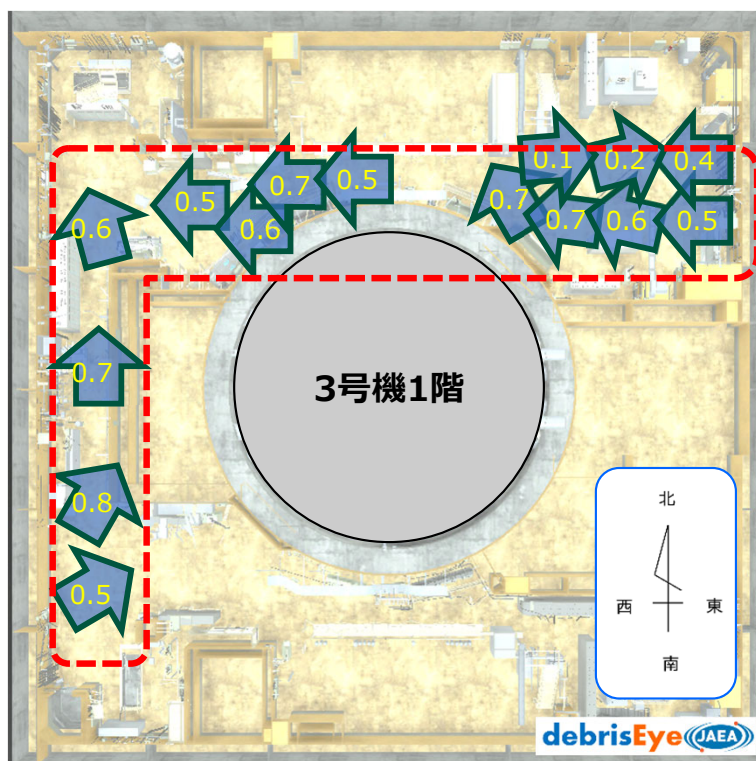
(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発(7/9)

3号機試験・風向風速の測定結果(各測定点での、約3～5分間の平均値)

- ・水平方向： 東⇒西、南⇒北の風向トレンドを確認。
- ・垂直方向： 上から下に吹きおろす微弱な流れを確認。

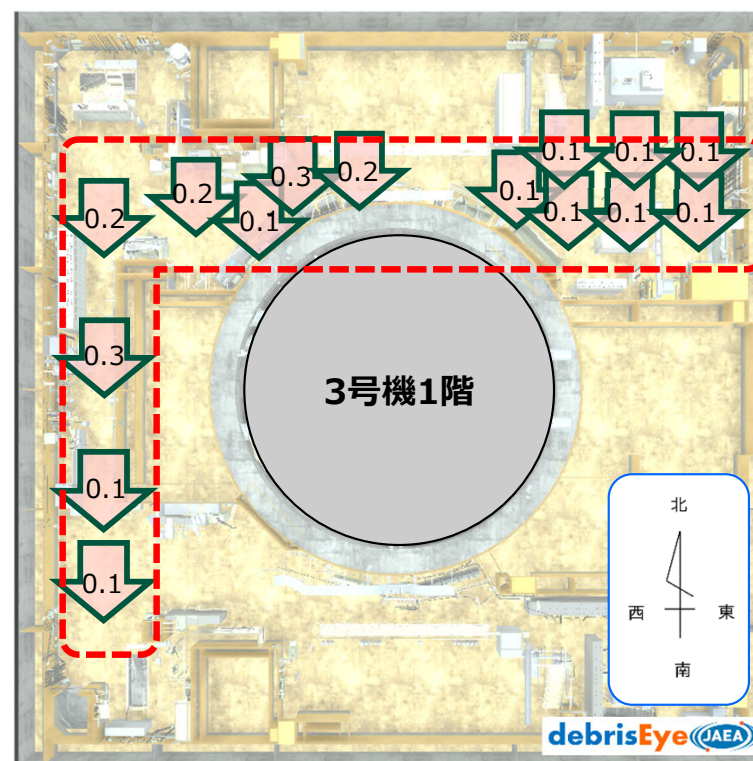
測定日：2025/1/14-16
 温度：約 12℃
 湿度：約 54%
 []：測定エリア

【水平方向の風向風速】



[記載例] 南から北向きに0.5m/sの水平風速

【垂直方向の風向風速】



[記載例] 上から下向きに0.5m/sの垂直風速

①ダスト挙動予測手法の研究開発(9/15)

(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発(8/9)

3号機試験【ダスト情報一元取得システム】によるデータ取得について

1F3号機にて機器の動作実証とダスト情報データの一元取得(時刻・放射能・粒径・粒子数・風向・風速)を確認

【測定結果の大局的な解釈】

放射能 (放射線)	空間線量率の影響を受けており、エネルギー弁別だけでは不十分。コールド試験での放射線弁別学習データでは不十分であったため、現場試験のデータの一部を教師データとし、再度の機械学習を実施。
風向風速	SPOT静止時は、比較的安定した1方向への風向風速を確認（前ページ平面図を参照）
粒径・粒子数	SPOT静止時は、比較的安定した1方向への風向風速を確認（前ページ平面図を参照）
風況場の予測	風況場の予測はデータ同化手法を用いて観測点の風況情報をもとにシミュレーションを適合させることで、凡その風況場を再現できただけでなく、風の流入口や流出口の予測も原理的に可能であることを見出した。
ダスト飛散予測	ダスト濃度の観測が可能となった場合を想定し、その観測結果からダスト源を逆推定する必要があるが、1F3号機内での観測点数は限られているため、LASSOを活用し、およそのダスト源の予測が可能であることも確認できた。

※試験後のダスト機器に関する情報

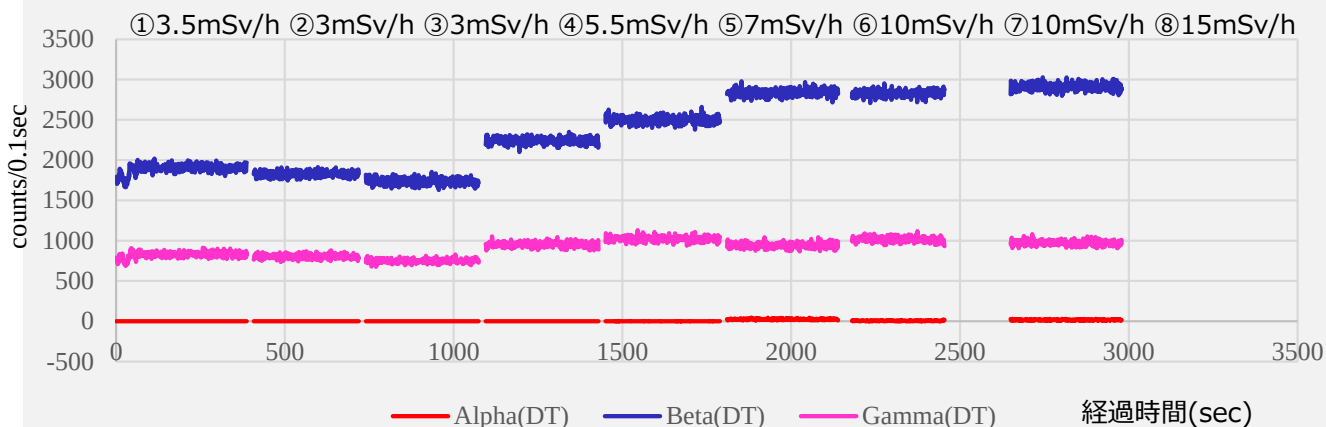
バッテリー残量	約40～60%(1時間～1.2時間測定) ⇒各日、試験終了後に交換・充電。
データの持出し	遠隔でのデータ吸出しを実施(無線LAN⇒Rajant⇒有線Ethernet経由。Windowsリモートデスクトップを利用)

①ダスト挙動予測手法の研究開発(10/15)

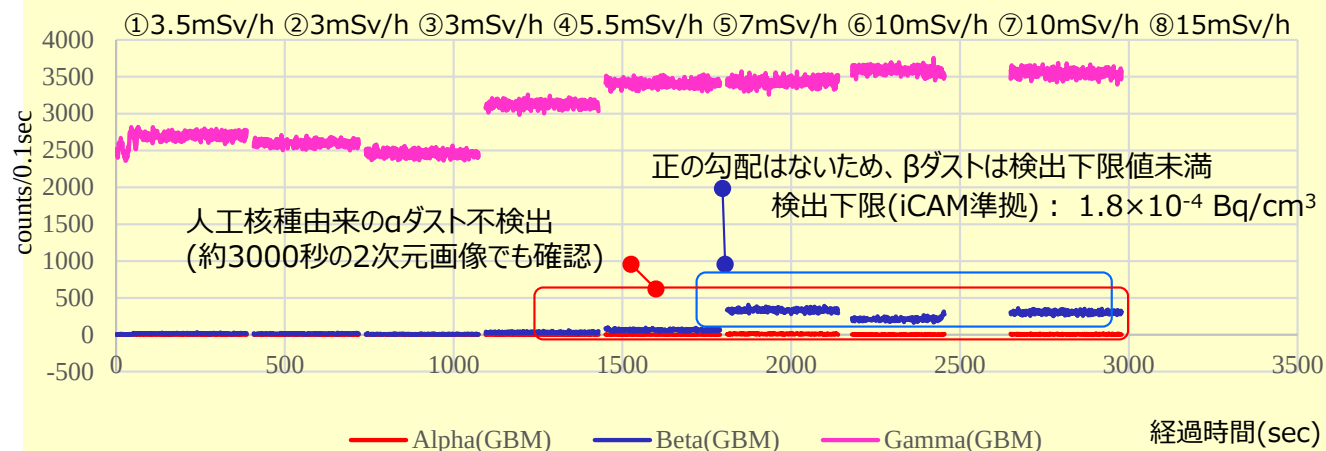
(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発(9/9)

3号機試験 αβダストモニタリングの結果のポストプロセッシング手法による違い

αβダストモニタ指示値 (決定木, γ教師: 照射データ)



αβダストモニタ指示値 (勾配ブースティング, γ教師: 現場データ)



【当初のポストプロセッシング】

- ・飛跡の特徴量に対し、決定木による分類。
- ・学習データは、
α線: 標準線源 (^{241}Am)
β線: 標準線源 ($^{90}\text{Sr-Y}$)
γ線: 照射装置 (^{137}Cs [主に直接線])

- ・学習データを80 (教師データ) : 20 (検証データ) に分け、検証データに対する弁別の正解率は95%
- ・3号機データに対して線種弁別を実施したところ、空間線量のγ線をβ線と誤認識。



【改良したポストプロセッシング】

- ・飛跡の特徴量に対し、勾配ブースティング(GBM、Gradient Boosting Method)による分類。
- ・学習データは、
α線: 標準線源 (^{241}Am)
β線: 標準線源 ($^{90}\text{Sr-Y}$)
γ線: 3号機試験の、ダスト集塵がほぼない時間帯のデータ (初期の90秒。)

- ・検証データに対する弁別の正解率は95%
- ・空間線量のγ線は、正しくγ線と認識。
- ・モバイルCPU(Ryzen9)で「実時間」で解析可能

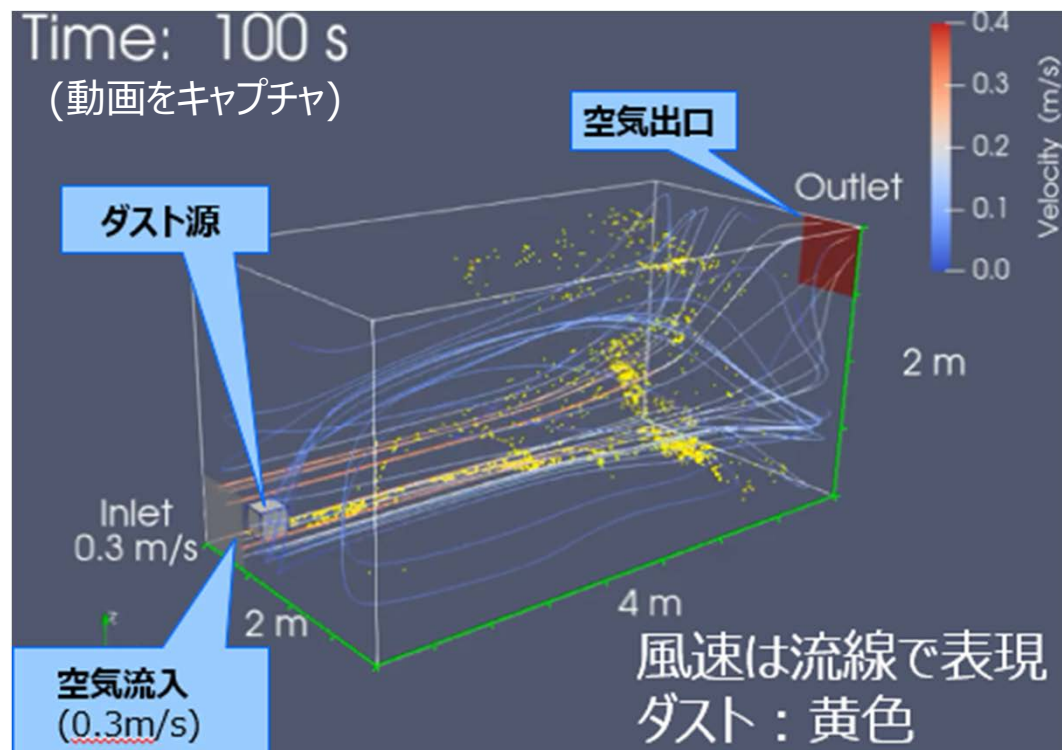
①ダスト挙動予測手法の研究開発(11/15)

(2)風速・ダスト情報を用いたダスト挙動予測のためのCFD解析の試行(1/3)

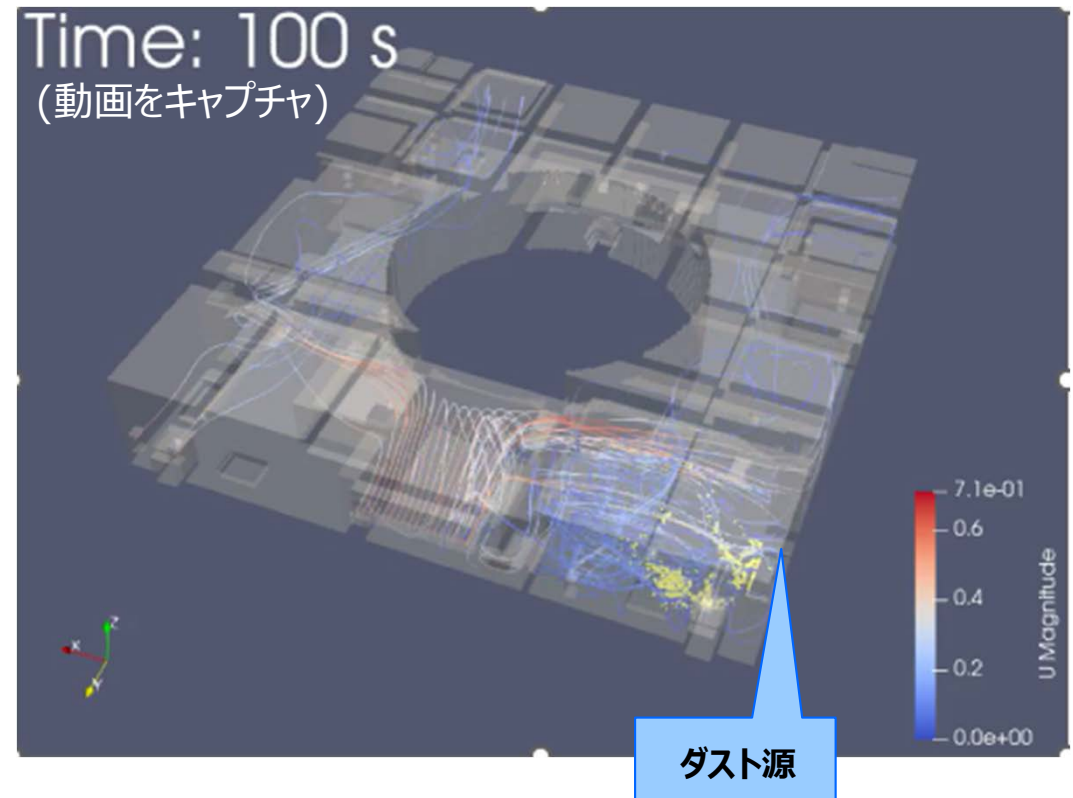
ダスト挙動予測のためのCFD手法の確立

- 1F建屋を想定したCFDシミュレーション
 - ラグランジュ法によるダスト拡散評価
 - 模擬フィールド(グリーンハウス)及び1F建屋でのダスト拡散シミュレーションを実施(結果は下図参照)

【グリーンハウス内の風況・ダスト拡散シミュレーション結果】



【1F建屋の風況・ダスト拡散シミュレーション結果】



①ダスト挙動予測手法の研究開発(12/15)

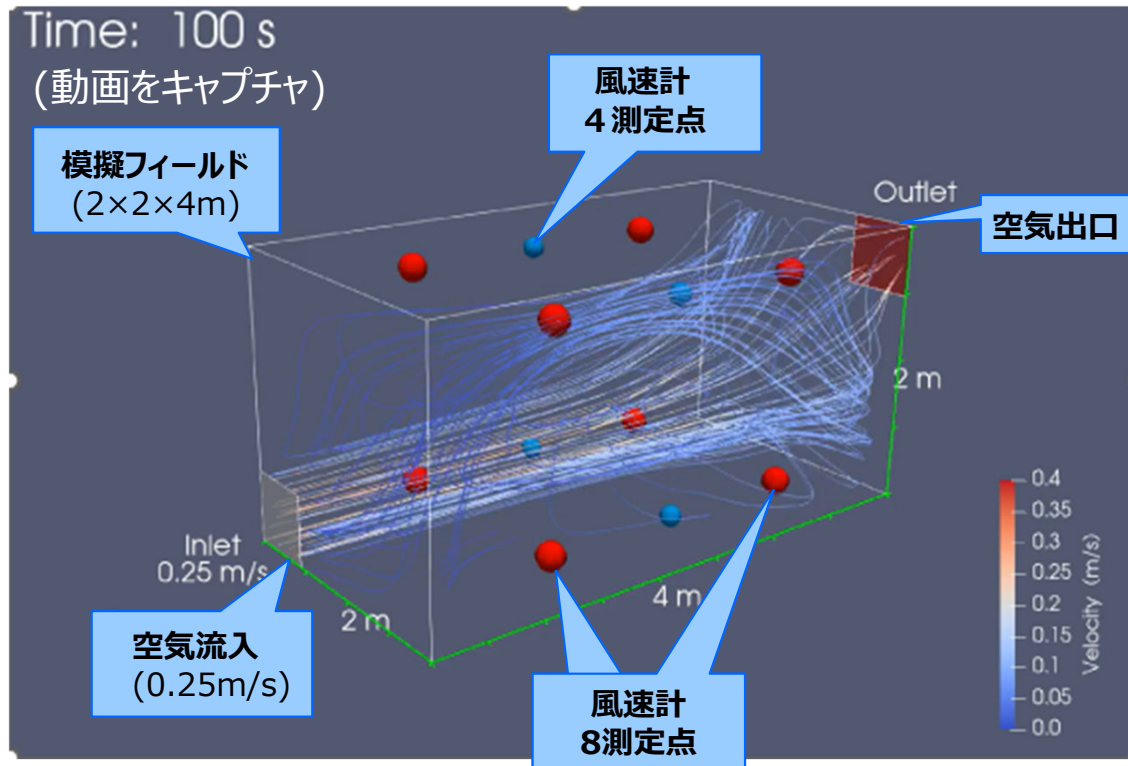
(2)風速・ダスト情報を用いたダスト挙動予測のためのCFD解析の試行(2/3)

風況場のデータ同化システム開発

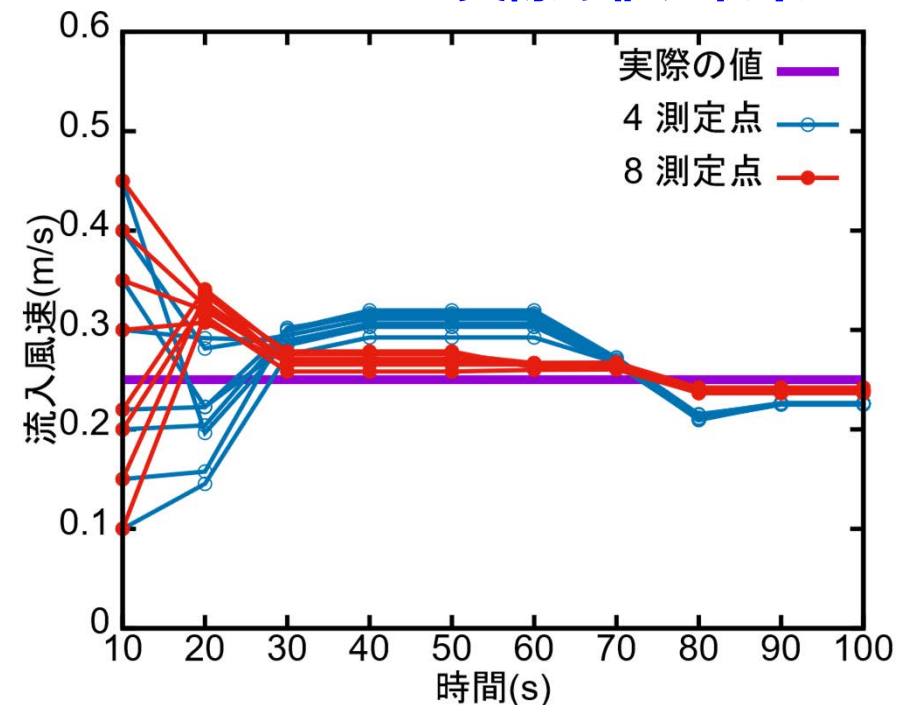
- 風速測定値から風況場をデータ同化(アンサンブル・カルマンフィルター)により同定
- 流入風速を推定可能
- 模擬フィールド(グリーンハウス)を想定したCFDシミュレーションに対してデータ同化を実施

【グリーンハウス内の風況シミュレーション】

CFDシミュレーション結果をデータ同化で再現可能か確認



データ同化による推定流入速度が 実際の値に収束

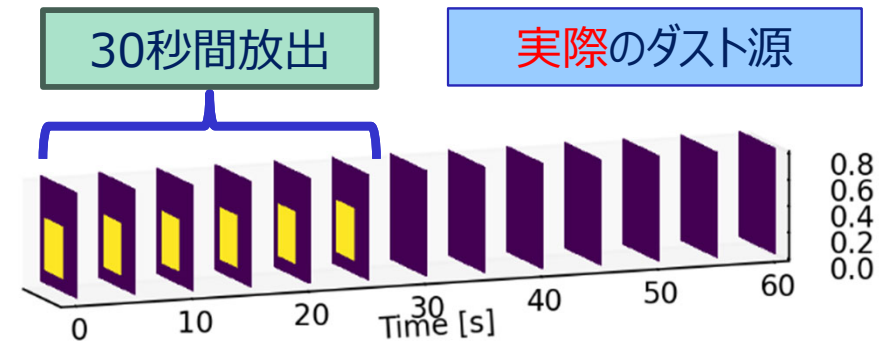
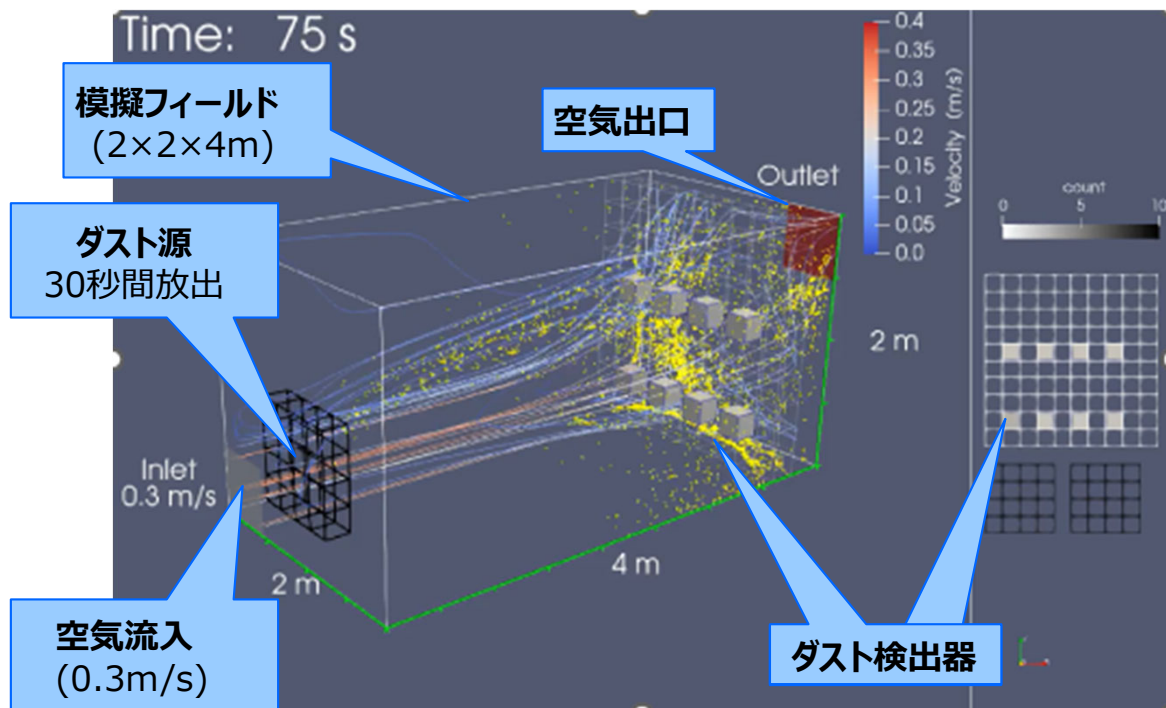


- ①ダスト挙動予測手法の研究開発(13/15)
- (2)風速・ダスト情報を用いたダスト挙動予測のためのCFD解析の試行(3/3)

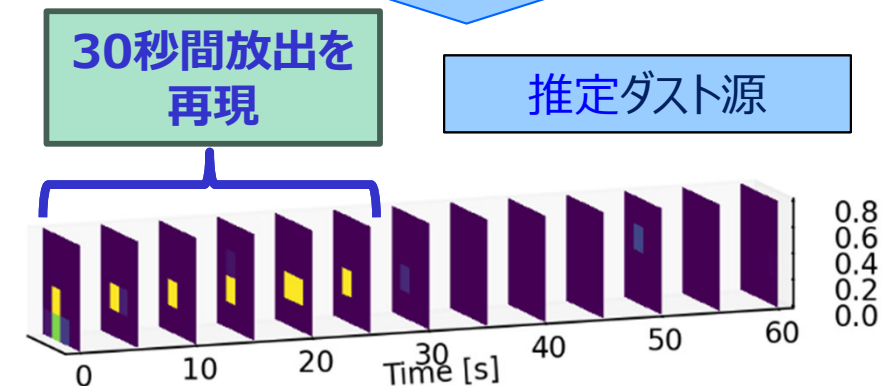
ダスト発生源・放出時間推定システムを開発

- ダスト測定値から**ダスト源の位置及び放出時間を逆推定** (ソース・レセプター関係法)
- LASSO**の採用により、少ない測定値でもダスト源推定可能
- ダスト源を推定することにより、ダスト飛散予測も可能に

【グリーンハウス内のダスト拡散のシミュレーション結果】



測定結果から
逆推定



b.(d)線源・線量推定解析の高機能化 (14/15)

①ダスト挙動予測手法の研究開発(14/15)

【3号機現場適用性確認まとめ】

1F現場のような限られた観測条件からダスト飛散を予測可能とするシステムの開発

(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発

ダストの飛散を予測するためにはまず、風況場を予測する必要あり

1F3号機1階の現場にて、風況データ取得
⇒p.143に示す風況場を確認



1F3号機1階にて現地計測～ダストデータ取得
⇒p.145に示すようなダストデータを取得

データ同化手法を用いて観測点の風況情報をもとにシミュレーションを適合させることで、
おおよその風況場を再現

おおよその風況場を再現でき、さらに風の流入口や流出口の予測も原理的に可能であることを見出した

【補足】SPOT搭載のために、風況場の予測のための風向風速計・ダスト計測器等の小型軽量化を実施(特許申請中)

(2)風速・ダスト情報を用いたダスト挙動予測のためのCFD解析の試行

模擬フィールド(タテ2m×ヨコ4m×高さ2m)を用い、数値シミュレーションを実行し、そこから得られる観測値を用いて、本システムによるダスト飛散予測を実施。その結果、データ同化やLASSOの理論に従い、適切な観測さえ可能であれば、精度の高いダスト飛散予測が可能であることを確認

ダスト濃度の観測が可能となった場合を想定し、その観測結果から**ダスト源を逆推定**する。
観測点数が限られていることから、LASSOを活用することで、
おおよそのダスト源の予測が可能となることを確認

二つの機械学習技術(データ同化とLASSO)をシミュレーションに適用し、観測が十分に実施できない場合でも、それらの理論の限界の範囲内であれば、**ダスト源を観測結果から予測できることを示すことができた。**

今後は、この結果を1F等の現場に適用し、現場適用性を検証すると共に検証試験を様々な状況にて検証試験を繰り返し、
実用化を目指す。

※試験的なレベルではあるが、1F2号機のモデルに対してもシミュレーションを実行し、現場への適用性を一部確認

①ダスト挙動予測手法の研究開発(15/15)

(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発[令和6年度：TRL2→4]

【成果まとめ】

- ・遠隔でダスト情報(放射能・粒径・粒子数・風向・風速)を一元取得するシステムを開発し、模擬フィールドおよび1F3号機建屋内の実環境においてデータの取得を実施した。
- ・3号機建屋内は水平方向：東⇒西、南⇒北、垂直方向：上⇒下の風速トレンドが観測され、静止した風況ではないことが明らかになった。(測定中の風向、風速は安定)
- ・ロボットの歩行程度の攪乱ではダストの巻き上げ(再浮遊)は限定的であった。

【今後の展望】

- ・検出器露出の自動調整や機械学習手法の最適化による、高線量環境(1号機、2号機等)での信頼性の高いダスト情報取得
- ・ロボットの位置情報の利用による、ダストデータのマッピング精度向上。

(2)風速・ダスト情報を用いたダスト挙動予測のためのCFD解析の試行[令和6年度：TRL2]

【成果まとめ】

- ・ダスト拡散をシミュレーションするためのCFD手法の確立
- ・風況場に対してアンサンブルカルマンフィルターを用いたデータ同化システムの開発
- ・ダスト測定値からダスト源を逆推定し、飛散予測を行うシステムの開発

【今後の展望】

- ・実測データを用いたシステムの検証
- ・現場適用性を向上するためのシステムの改良

2.各実施項目の開発成果

R5-6年度 国の補助事業における成果まとめ

Oa.システム製作及び現場適用性評価（TRL4⇒6達成）

- 線源・線量率評価システム（3D-ADRES-Indoor）として、FrontEnd(基幹システム)、Pro(詳細解析支援システム)及びBackEnd(データ管理支援システム)の構成で開発した。本システムについて、1F5号機モックアップ試験、2号機および3号機での検証試験を通して、機能向上、操作性等の改善を図り、現場適用性を評価した。
- 現場で得られたデータ（点群・線量率）から線源逆推定を行い、再観測指示までの一連の動作が正常であり、再観測により線量率推定の精度は大きく向上することを確認した。ウォークスルー機能で高強度な線源箇所を視認可能（楢葉VRシステム等の活用）となり、高い実用性を有することを確認した。
- 対象空間内で高解像度での計算を通して、線源・線量率マップの精度向上を確認した他、作業エリアの設定と最適除染率や遮蔽厚さの提案機能の他、被ばく評価に係るツール群も開発し、実用上の高い有用性を確認した。ついては、現場作業における事前検討、計画策定やアクセスルート評価等、作業者の被ばく低減効果へ大いに貢献できることを示せた。

Ob.現場適用性の向上のための研究開発（TRL1⇒4等を達成）

- 点群データから差分抽出後、1F等データを対象に自動CAD/BIM化への見通しを得ると共に、高速処理を目指したサロゲートモデル構築では一部実用に供するレベルを確認した。
- 高所計測ロボットシステムでは、1F5号機で動作試験を行い、実用性を見込みを確認した。また、連続計測を可能とする検出器やダスト計測システムについては、1F3号機現場での動作試験を行い、その実用性を確認し、現場適用が十分可能であることを実証した。

【国の補助事業：R5-6年度における成果②】

【成果レビューの実施(R7年2/20および2/28開催 15:00-17:00)】

➤ 開催主旨

国の補助事業で開発した線源・線量率推定システム(3D-ADRES-Indoor)を1F廃炉作業に活用して頂くため、本システムを利用・活用するユーザーの視点から評価・ご意見を頂く。

➤ 場所：楡葉センター2階 VRシステム室

➤ 対象機関：東京電力・デコミテック[東双みらいテクノロジー(株)]・TPT[東京パワーテクノロジー(株)福島原子力事業所]

【R7.2/20実施時評価・ご意見・コメント等】

【東電】：1F廃炉作業では**線源位置の事前把握が重要**。まずは実際に使って、有効性を判断・評価したい。改良点の反映はJAEAの協力をお願いする。新たな線量計や測定方法等、他の技術との組合せも考慮したい。⇒R7年度東電受託予定/東電他Grから検討依頼(SGTS配管)あり。

【デコミテック】：1F廃炉作業の環境評価では**現場調査が重要**。本システム活用は、**被ばく量の具体的な評価に有効と考える**。国の補助事業を開始した4年前の理想が現実になった実感。本システムが立派なシステムで、操作、改良、メンテナンスを考慮した対応が必要。東電だけでなく、TPTやアトックスでも**操作できる人材育成が重要**。⇒R7年度デコミテック(国の補助事業)受託契約済

【TPT】：**今後実施する除染作業の計画検討に活用したい**。一昨年の12月の5号機で使用した時と比較し、FrontEndシステム操作の**使い勝手は向上しているが、現状版でも難しい印象**。インターフェース機能の更なる向上を希望。

【R7.2/28実施時評価・ご意見・コメント等】

【東電】：線量率を下げるための作業手順(遮蔽、除染)も含めた**最適化検討**もできれば理想。物理的構造や現象(Fact情報)を加味した上で、推定結果の検証やそのためのデータ取得が必要。**良いシステムになっている。このエリアは線量が高いというイメージが事前に把握できるのは非常に有効**。特に、入域前の**新人作業者が、現場の現状(線量率が高い場所、物理的な危険源)を理解する手段として最適**。現場状況を理解していれば、作業時間の短縮やリスク低減につながる。他に、更なるユーザーフレンドリーなインターフェースの整備、推定精度の高精度化が求められた他、現場サイドからの課題・改善点への継続的な対応に対する方針へコメントがあった。



成果レビュー実施状況



1F3号機点群データ表示 (VRシステム)



1F3号機の線量率マップ表示 (VRシステム)

3.R5-6年度 国の補助事業における成果に対する 目標TRL達成度

各実施項目の開発成果(1/6)

本国の補助事業における成果に対する目標TRL達成度への判断項目と達成基準について(1/6)

a.システム製作及び現場適用性評価

R6年度TRL 達成目標 (交付申請書 記載事項)	これまでの成果	TRL達成度	
		TRL目標値達成のための 判断項目	TRL目標値 達成の可否
・1F実測データを用いて有効性を検証し、システムの現場適用性を評価する。 (終了時目標：TRL5⇒6) ※システムを製作し、モックアップ試験等に基づきシステム評価を行う(R5年度)。 終了時目標：TRL4⇒5	【FrontEnd】 ・1F2号機及び3号機において、現場で得られたデータ(点群・線量率)を用い、線源逆推定を行い、再観測指示までの一連の動作が正常であることを確認済。 ・再観測による計測精度の向上、高強度線源付近の精度に対しても十分であることを確認済。 ・現場点群上に構造物表面線量率をマッピングし、ウォークスルー機能で作業者の視点から高強度な線源箇所を視認可能であることを確認済。	・1F2号機及び3号機現場データで実証を実施した段階 ※3号機現場で左記の記載事項に対して、実用上の高い有用性を確認した。	TRL6達成
	【Pro】 ・対象空間内で高解像度での計算を通して、線源・線量率マップの精度向上を確認済。 ・作業エリアの設定と最適除染率や遮蔽厚さの提案機能等、被ばく評価に係るツール群の開発を完了。	・1F2号機及び3号機現場データで実証を実施した段階 ※2号機および3号機データを用いた左記の記載事項に対して、実用上の高い有用性を確認した。	TRL6達成
	【BackEnd】 ・オンプレ/クラウド版を開発し、観測データおよびFrontEnd/Proの解析データのデータ管理機能を確認済。 ・データの蓄積状況を可視化するダッシュボード機能を開発済。	・1F2号機及び3号機現場データで実証を実施段階 ※2号機および3号機データを用いた左記の記載事項に対して、実用上の高い有用性を確認した。	TRL6達成

各実施項目の開発成果(2/6)

本国の補助事業における成果に対する目標TRL達成度への判断項目と達成基準について(2/6)

b.(a)1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化

R6年度TRL 達成目標 (交付申請書 記載事項)	これまでの成果	TRL達成度	
		TRL目標値達成のための 判断項目	TRL目標値達 成の可否
1F等実測データを用いた現場適用性の評価 (TRL2⇒4以上) ※BIM技術導入の検討結果と課題を提示する(令和5年度)終了時目標：TRL1⇒2	・1F等実測データによる 差分計算、抽出した部品の分離処理の開発 を実施及び同データによる 点群認識、学習データ整備、認識精度向上 を実施	・1F2号機データを用いて試作レベルの機能試験を実施した段階 ※3D-ADRES-INDOOR FrontEnd/Pro上に実装、正常に動作することを確認した。 ※高い精度の認識 (IoU: 75～98%) を達成した。	TRL4以上達成
	・1F等実測データによる パイプCAD/BIM化手法の開発 を実施及び同データによる CAD部品の自動更新、ソリッド化(4面体化)手法の開発 を実施	・1F2号機データを用いて試作レベルの機能試験を実施した段階 ※模擬環境で90%以上の変換率を達成、3D-ADRES-INDOOR FrontEnd/Pro上に実装、正常に動作することを確認した。 ※1F2号機1階、3D-ADRES-INDOOR FrontEnd/Pro上に実装、正常に動作することを確認した。	TRL4以上達成

各実施項目の開発成果(3/6)

本国の補助事業における成果に対する目標TRL達成度への判断項目と達成基準について(3/6)

b.(b)線源・線量推定解析の高速化

R6年度TRL 達成目標 (交付申請書 記載事項)	これまでの成果	TRL達成度	
		TRL目標値達成の ための判断項目	TRL目標値達成 の可否
1F等実測データを用いた現場適用性の評価： (終了時目標： TRL2⇒4以上) ※サロゲーションモデルの設計結果と課題を提示する(令和5年度)。 終了時目標： TRL1⇒2	・二つのニューラルネットワーク（FCNN、U-net）を用いて放射線シミュレーションのサロゲートモデル構築を実施。 ・1 F2号機CADモデル（STLへ変換）を用いて、両ネットワークの推定を実施。	<u>・1F2号機データを用いて試作レベルの機能試験を実施した段階</u> ※二つのニューラルネットワーク(FCNN、U-net)を用いて放射線シミュレーションのサロゲートモデル構築が可能であることを確認した。 ※ 1 F2号機CADモデル（STLへ変換）を用いて両ネットワークの推定精度は十分（90%以上の精度）であり、実用に供するレベルであることを確認した。	TRL4以上 達成
	・β線源の複雑な計算コストの非常に高い制動X線の放射過程もサロゲートを実施。	<u>・1F2号機データを用いて試作レベルの機能試験を実施した段階</u> ※β線源の複雑な計算コストの非常に高い制動X線の放射過程もサロゲート可能であることを確認した（学術的には初の成果）。なお、上記過程は局所的に生起することからモデルに依らず実用に供するレベルであることも確認した。	TRL4以上 達成

各実施項目の開発成果(4/6)

本国の補助事業における成果に対する目標TRL達成度への判断項目と達成基準について(4/6)

b.(c)①線源・線量推定解析の精度向上

R6年度TRL 達成目標 (交付申請書 記載事項)	これまでの成果	TRL達成度	
		TRL目標値達成の ための判断項目	TRL目標値 達成の可否
1F等実測データを用いた現場適用性の評価 (TRL2⇒4) ※放射線計測機器システムの開発結果と課題を提示する(R5年度): 終了時目標: TRL1⇒2	【高所計測】 ・計測場所までのロボットシステムの 移動走行性 や作業員のロボット 遠隔操作性 など、問題なく操作できることを確認済。 ・ ジッパーマストの伸縮操作 及び 高所(5m近傍) での点群計測や線量値の計測に関して、問題なくデータ取得が可能であることを確認済。 ・ロボットシステムの計測場所(自己位置)に係る位置精度は、当初目標(±250~500mm)を上回る精度(±100~150mm)を確認済。 ・上記のモックアップ試験結果により、1F5号機での現場適用性確認試験が可能であると判断し、5号機への現場適用性試験を実施。 ・諸手続きを踏まえ、 1F5号機で高所計測の適用試験 を実施。	・1F5号機現場で実証を実施した段階(3号機の模擬環境) ※1F5号機に実機を用いた適用試験を実施し、高所(5m近傍)での環境データ(点群・線量率)計測が可能であり、その有効性を確認した。	TRL4達成
	【狭隘部計測】 ・ロボットシステムは、計測器搭載台車の高所計測用との 互換性 (乗せ換え)を可能とした。 ・HCU前面の塔槽類配管の 狭隘部へのアクセス を想定した 簡易モックアップ試験 を実施。100mmW×300mmHの狭隘部に500gの計測器のアクセスが可能であることを確認。	・開発のプロセスとして、試作レベルの機能試験を実施した段階 ※1F現場を想定した簡易モックアップ試験を実施し、所定の範囲で狭隘部へのアクセスが行えることを確認した。	TRL4達成

各実施項目の開発成果(5/6)

本国の補助事業における成果に対する目標TRL達成度への判断項目と達成基準について(5/6)

b.(c)②新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発

R6年度TRL 達成目標 (交付申請書 記載事項)	これまでの成果	TRL達成度	
		TRL目標値達成のための 判断項目	TRL目標値達成 の可否
遠隔操作ロボットについて、1F等で検証試験を実施し、現場適用性を評価する (TRL2⇒4以上) ※放射線計測機器システムの開発結果と課題を提示する(R5年度)終了時目標： TRL1⇒2	・非GPS環境における位置情報を自動で取得するためのデプスカメラを用いた「自己位置推定システム」を開発し、本システムに市販の高線量対応(～10Sv)検出器と統合して、自動でデータを保存できる「自己位置推定型サーベイメータ」を開発し、1F3号機の現場にて検証試験の実施	・1F3号機現場で実証を実施した段階 現場実証では、本検出器で60分以上のデータ取得に成功し、取得データには欠損等の不具合はなく、適正に動作を確認済。 ※本データをaチームの3D-ADRESシステムに取り込んで解析を行い、精度向上に寄与出来た。	TRL5達成
	・JAEA独自に考案した360°方向放射線イメージングが可能な「全方向ガンマ線イメージング装置(FRIE)」を開発し、1F3号機の現場にて検証試験の実施	・1F3号機現場で実証を一部実施した段階 ・1F3号機現場での試験を実施したもの、高線量箇所での欠損を確認。データ保存方法の再検討が必要。	TRL4達成

各実施項目の開発成果(6/6)

本国の補助事業における成果に対する目標TRL達成度への判断項目と達成基準について(6/6)

b.(d)ダスト挙動予測手法の研究開発

R6年度TRL 達成目標 (交付申請書 記載事項)	これまでの成果		TRL達成度	
			TRL目標値達成のための 判断項目	TRL目標値 達成の可否
模擬フィールドでの試験結果を提示する。 終了時目標：TRL2 ※ダスト挙動の計測システムの開発結果と課題を提示する。 (令和5年度) 終了時目標：TRL1⇒2	(1)風速やダスト情報を一元的に取得するための測定系開発⇒ 開発したダスト測定システムの性能実証	・機器開発に関して、R5年度終了時に、1F現場への適用性試験への目途が立ったため、当初の開発予定をさらに推し進め、3号機への適用性試験のため、「ダスト情報一元取得システム」開発を実施（性能実証を3号機建屋内の実環境で実施） ※約10mSv/hの実環境で、遠隔動作でのダストデータのセンシングを実現。 ※検出器の露出過剰による線種弁別性能低下に関しては、露出自動調整機能の検討が必要。現状、（やや場当たりの）機械学習手法の最適化で対処した。	・開発のプロセスとして、試作レベルの機能試験を実施した段階 ※1F3号機現場試験で、60分以上欠損なく、ダスト情報データの一元取得を実証	TRL4達成
	(2)風速・ダスト情報を用いたダスト挙動予測のためのCFD解析の試行⇒CFDを用いたダスト挙動予測	・ダスト拡散をシミュレーションするためのCFD手法の確立 ※模擬フィールドや1F建屋でのダスト拡散シミュレーションを実施し、挙動予測を確認済。 ・風況場に対するデータ同化システムの開発 ※アンサンブルカルマンフィルタを用いたデータ同化システムを開発し、1F現場のモデルにて仮想試験にて挙動を確認済。 ・ダスト測定値からダスト源を逆推定し、飛散予測を行うシステムの開発 ※ソース・レセプター関係法に基づくダスト源逆推定システムを開発し、飛散予測を可能としたことを確認済。	・従来経験のほとんどない領域で基礎データに基づき、開発を進めている段階 ※ダスト拡散シミュレーション解析を実施し、挙動予測を確認	TRL2達成

4.参考資料

- 当事業からの要求/提供インプット
- 実施体制
- 実施スケジュール(R5-6年度:月ベース)
- 事業成果の情報発信
- 用語集
- 補足説明

○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	本事業で開発するシステム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)	「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	本事業で開発するシステム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 東双みらいテクノロジー	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-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）については、東京電力から適宜情報の提供を受けた。

※ 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殿等から情報の提供を受けた。

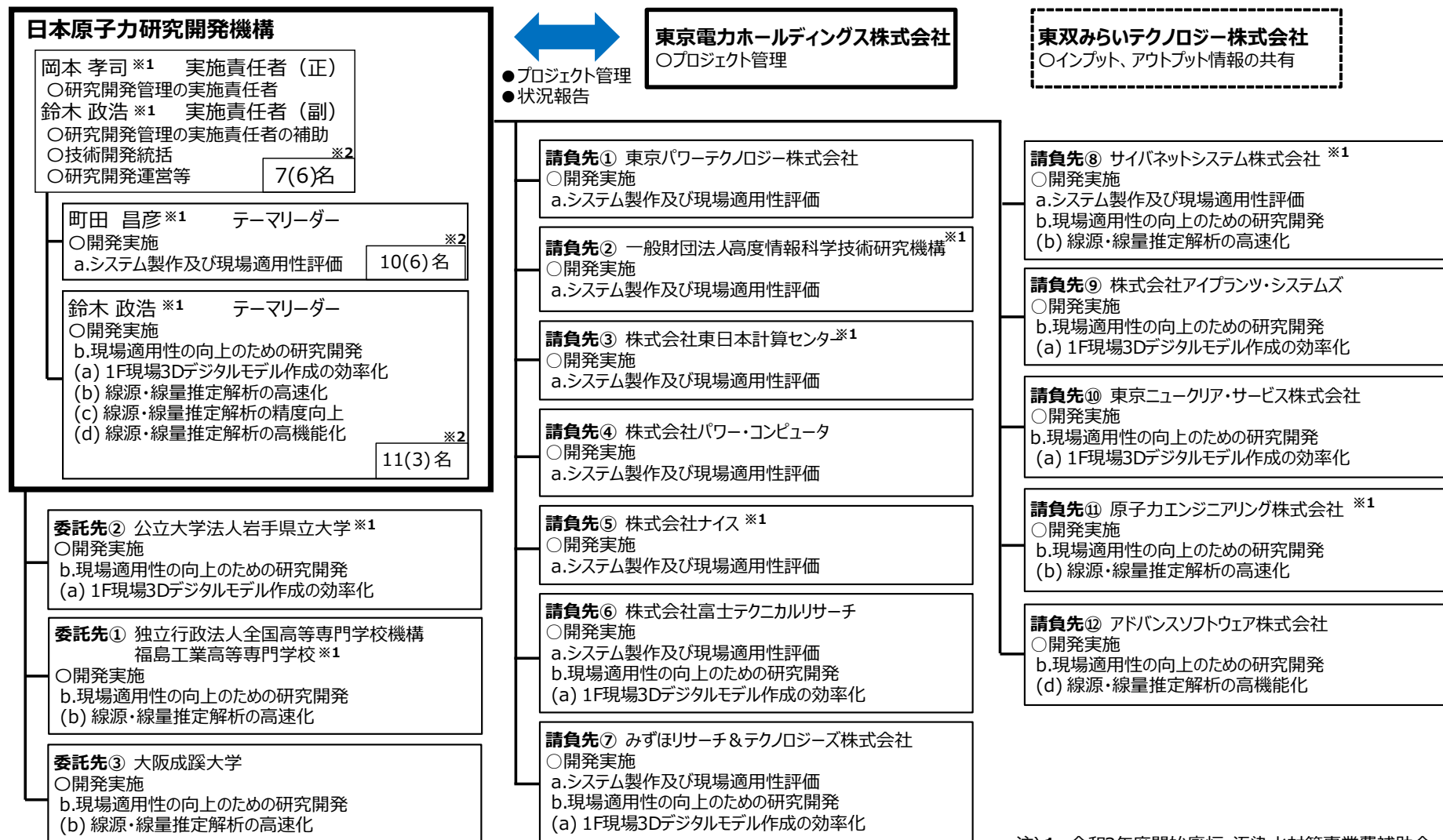
○当事業からの提供インプット

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）	本事業で開発するシステム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廃炉の作業計画の策定	
O-3	NDF 東京電力 東双みらいテクノロジー	（本事業）	成果全般	適宜	1F廃炉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た。

※ 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た。

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、廃炉・汚染水・処理水対策事業事務局）との協議を行った上で技術開発を進めた。



注) 1: 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）に係る補助事業実施担当者（機関））
2: カッコ内の数字は上記補助事業担当者数



実施スケジュール (R5-6年度:月ベース[実績ベース])

実 施 内 容		令 和 5 年 度												令 和 6 年 度																																							
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3																												
a.システム製作及び現場適用性評価																																																					
	現場適用のために必要なシステムの概念検討	システムの機能の調査、検討等												まとめ																																							
	1F現場測定													モックアップ試験			現場計測										現場計測			線源・線量率マップの製作																							
	1F現場での詳細環境情報収集技術の開発	開発計画検討				システム開発										システム改良		まとめ																																			
	構造データの迅速処理技術の開発	開発計画検討				システム開発										システム改良		まとめ																																			
	1F現場での迅速解析技術の開発	開発計画検討				システム開発										システム改良		まとめ																																			
	1F現場での線源・線量出力処理ツールの開発	開発計画検討				システム開発																						システム改良														現場適用性評価		まとめ									
	観測点指示ツール高度化技術の開発	開発計画検討				システム開発										システム改良		まとめ																																			
	詳細環境情報による解析技術の開発	開発計画検討				システム開発																						システム改良		まとめ																							
	高強度線源対策シミュレーション処理ツールの開発	開発計画検討				システム開発																						システム改良		まとめ																							
	線源・線量率詳細処理ツールの開発	開発計画検討				システム開発																						システム改良				現場適用性評価												まとめ									
	データ管理支援ツールの整備作業																									システム整備																								現場適用性評価		まとめ	
	システム統合及び全体評価																																					システム全体評価												まとめ			
b. 現場適用性の向上のための研究開発																																																					
	(a) 1F現場3Dデジタルモデル作成の効率化													BIMデータ整備																								現場適用性評価		まとめ													
	高強度線源対策シミュレーション技術の研究	開発計画検討														BIMデータ整備																								現場適用性評価		まとめ											
	(b) 線源・線量推定解析の高速化													サロゲートモデルの開発																								現場適用性評価		まとめ													
	放射線シミュレーション技術の研究	開発計画検討														サロゲートモデルの開発																								現場適用性評価		まとめ											
	(c) 線源・線量推定解析の精度向上													システム製作																								システム改良		まとめ													
	1F-R/B内情報収集装置の研究開発	開発計画検討				全体システム検討										システム製作																								システム改良		まとめ											
	新たな放射線計測装置の現場適用性研究開発	開発計画検討				全体システム検討										システム試作・モックアップ試験												まとめ		モックアップ試験												現場検証実験											
	(d) 線源・線量推定解析の高機能化																									模擬フィールド試験																								まとめ			
	ダスト挙動予測手法の研究開発	開発計画検討				計測システム開発										まとめ		CFD解析																																			

No.	名称(開催年など)	分類	タイトル	著者
1	日本原子力学会2023年春の年会 (2023.3.12-14) ※2023(R3-4年度) 国プロの成果	口頭	全方位指向性検出器(FRIE)の開発 1. 検出器の設計とその特性 (1. Detector design and its characteristics)	阿部 裕稀 、佐々木 美雪、鳥居 建男、床次 眞司、眞田 幸尚
2		口頭	全方位指向性検出器(FRIE)の開発 2. 逆問題解析を用いたイメージングアルゴリズム (2. Imaging algorithms using inverse problem analysis)	阿部 裕稀 、佐々木 美雪、鳥居 建男、床次 眞司、眞田 幸尚
3		口頭	全方位指向性検出器(FRIE)の開発 3. 環境中でのフィールド試験 (3. Field trials in the environment)	阿部 裕稀 、佐々木 美雪、鳥居 建男、床次 眞司、眞田 幸尚
4	日本原子力学会2023年秋の大会 (2023.9.6-8)	口頭	全方位指向性検出器(FRIE)の開発 3. ベータ・ガンマ線源を用いた特性試験とフィールド測定 (Development of omni-directional directional detectors (FRIE), 3; The Characteristic test using beta- and gamma-ray source and the field measurement of the FRIE detector)	鳥居 建男 、阿部 裕稀、佐々木 美雪、眞田 幸尚
5	令和5年度「放射線科学とその応用」 第4回研究会 (2023.12月)	口頭	New developments in 3D radiation imaging with fractal shape detectors (フラクタル形状検出器による3次元放射線イメージングの新展開)	Sasaki Miyuki , Abe Yuki, Sanada Yukihiisa, Torii Tatsuo

No.	名称(開催年など)	分類	タイトル	著者
6	International Conference on Nuclear Decommissioning: Addressing the Past and Ensuring the Future(2023.5.15-19,Vienna, Austria)	口頭	R&D Project to Estimate Radioactive Source Distributions Inside Reactor Building Rooms	Masahiro Suzuki
7	日刊工業新聞の連載企画 「原子力機構の価値」(2023.07.25 全国.13版【科技1】)	記事掲載	原子力の社会実装に向けて 放射線源の逆推定法	町田 昌彦
8	第7回 福島第一廃炉国際フォーラム2023 (2023.08.28)	口頭 ポスター	Research and Development of Digital Technologies to Explore Radiation Source Distributions for Exposure Reduction ~ Current Research and Development Progress~	Masahiro Suzuki , Yuto Aoki, Takashi Yamaguchi, Masahiko Machida, Hiroko Miyamura, Koji Okamoto
9	RISTニュース (No.69) 2023	雑誌掲載	1F廃炉に向けた放射線源逆推定及び線源対策に係るデジタル技術の研究開発 ー3D-ADRES Indoor : デジタル技術を集約するプラットフォームの現状紹介ー (R&D of Digital Technology on Inverse Estimation of Radioactive Source Distribution and Related Source Countermeasures –R&D Status of Digital Platform including 3D-ADRES-Indoor–)	町田 昌彦 、山田 進、金 敏植、奥村 雅彦、宮村(中村)浩子、志風 義明、佐藤 朋樹、沼田 良明、飛田 康弘、山口 隆司、鈴木 政浩、岡本 孝司、Wei SHI、吉田 亨

No.	名称(開催年など)	分類	タイトル	著者
10	FACE 4th (2024.1.11)	口頭	Aerosol measurement and evaluation study at JAEA	<u>Youichi Tsubota</u>
11	第8回 福島第一廃炉国際フォーラム2024 (2024.08.25-26)	口頭 ポスター	Research and Development of Digital Technologies to Explore Radiation Source Distributions for Exposure Reduction ~ Development status based on evaluation tests inside 1F Unit 5 ~	<u>Masahiro Suzuki</u> , Yuto Aoki, Kazuhisa Aoki, Susumu Yamada, Minsik Kim, Takashi Yamaguchi, Masahiko Machida, Koji Okamoto
12	第6回 R-CCS国際シンポジウム (2024.1.29-30)	口頭	Inverse estimation of radiation source distribution from air dose rates: Introduction of Digital Platform 3D-ADRES-Indoor	<u>Susumu YAMADA</u> and Masahiko MACHIDA
13	WM2024 Conference (2024.03.10-14)	論文	Effectiveness of Fused LASSO for Prediction of Distribution of Radiation Materials in Reactor Buildings	<u>Susumu YAMADA</u>

No.	名称(開催年など)	分類	タイトル	著者
14	国際会議ARBO2024 (2023.10.18) ※R3-4国プロ成果	口頭	Development of a Virtual Scanner for Data Augmentation in Point Cloud Shape Recognition (点群の形状認識を目的としたデータ拡張のための仮想スキャナの開発)	Hiroki Takahashi , Toru Kato, Meguru Yamashita, Akio Doi, Takashi Imabuchi
15	国際会議ARBO2024 (2023.10.18) ※R3-4国プロ成果	口頭	Development of time-series point cloud data changes and automatic structure recognition system using Unreal Engine (Unreal Engineを用いた時系列点群データの変化および構造物自動認識システムの開発)	Toru Kato , Hiroki Takahashi, Meguru Yamashita, Akio Doi, Takashi Imabuchi
16	IPRA16 60TH HPS ANNUAL MEETING 2024 (2024.07.07-12)	口頭 ポスター	Environmental radiation measurement after the nuclear power plant accident iv) New Radiological Imaging with Fractal Shaped Detectors	Yuki Abe , Miyuki Sasaki, Tatsuo Torii, Shinji Tokonami, Yukihisa Sanada
17	第18回 放射線計測フォーラム福島 (2024.11.15)	口頭	観測した空間線量値から放射線源を逆推定する機械学習技術の研究開発	山田 進

No.	名称(開催年など)	分類	タイトル	著者
18	Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo [SNA +MC 2024] (2024.10.20-24)	口頭	Selection method for observation points using Bayesian LASSO at estimating radiation source distribution from air dose rates (空間線量値から放射線源分布の推定する際のベイジアンLASSOを用いた観測点の選択方法)	Susumu Yamada , and Masahiko Machida, Naoki Tanimura
19	日本VR学会 第52回 テレイマージョン技術研究会 (2024.2.22)	口頭	NeRF技術を用いた静止画像からの3Dモデリングと可視化- ドローンで取得した静止画像からの3Dモデル再現 -	高志毅(GAO ZHIYI) , 高橋 弘毅, 土井 章男, 加藤 徹, 山下 圏
20	Decommissioning Environmental Sciences and Remote Technology 2024 (2024.11.17-21)	口頭	Concept of high Area Surveillance Robot System for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants	Shinji Kawatsuma , Shigekazu Suzuki, Yusuke Inoue
21	令和6年度環境創造センター成果報告会 (2024.6.25)	口頭	フラクタル形状検出器による3次元放射線イメージングの新展開 (New developments in 3D radiation imaging with fractal shape detectors)	佐々木 美雪 、阿部 裕稀、眞田 幸尚、鳥居 建男

No.	名称(開催年など)	分類	タイトル	著者
22	2024年原子力学会_秋の大会 (2024.9.11-13)	□頭	機械学習技術により推定された放射線源に対する線源対策最適化手法の開発	<u>古立 直也</u> 、柳 秀明、吉田 亨、山田 進、長谷川 幸弘、町田 昌彦
23	RISTニュース (No.70) 2024 (2024.9.20)	雑誌 掲載	1F 廃炉に向けた放射線源逆推定及び線源対策に係るデジタル技術の研究開発 －3D-ADRES-Indoor FrontEnd：廃炉現場で用いるファストデジタルツイン技術－ (R&D of Digital Technology on Inverse Estimation of Radioactive Source Distributions and Related Source Countermeasures – Fast Digital Twin Tech. in Decommissioning Field: 3D-ADRES-Indoor FrontEnd -)	<u>町田 昌彦</u> 、山田 進、金 敏植、田中 伶詞、飛田 康弘、岩田 亜矢子、青木 勇斗、青木 和久、柳澤 憲一、山口 隆司、鈴木 政浩、岡本 孝司、高橋 弘毅、加藤 徹、山下 圏、土井 章男、松本 陽司、吉田 亨、古立 直也、柳 秀明、長谷川 幸弘
24	11th Educational Symposium on Radiation And Health by young scientists (ESRAH2024) (2024.9.21-22)	□頭	Development on an omni-directional radiation detector for high dose gamma-ray (高線量ガンマ線用全方向放射線検出器の開発)	<u>Abe Yuki</u> , Sasaki Miyuki, Torii Tatsuo, Tokonami Shinji, Sanada Yukihiisa
25	7th Bilateral Workshop on Radiation Research and its Related Issues 2024 (IREM2024) (2024.12.11)	□頭	Development of a fractal-shaped radiation detector suitable for use in high-dose environments (高線量環境用のフラクタル形状の放射線検出器の開発)	<u>Abe Yuki</u> , Sasaki Miyuki, Torii Tatsuo, Tokonami Shinji, Sanada Yukihiisa

No.	名称(開催年など)	分類	タイトル	著者
26	第25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 (2024.12.18-20) https://sice-si.org/si2024/	口頭	点群データを用いた3D-CADモデルの自動更新システムの開発と評価	<u>土井 章男</u> 、山下 圏、高橋 弘毅、加藤 徹、今瀧 貴志
27		口頭	深層学習による時系列点群データのセグメンテーション手法の比較	<u>加藤 徹</u> 、高橋 弘毅、山下 圏、土井 章男、今瀧 貴志
28		口頭	RANSACとICPを用いた点群データとCADデータのレジストレーションに関する基礎検討	<u>山下 圏</u> 、高橋 弘毅、加藤 徹、土井 章男、今瀧 貴志
29	日本原子力学会東北支部第15回 南東北原子力シンポジウム (2024.12.18-20)	口頭	全方位検知型放射線検出器によるイメージング技術開発について (Development of imaging technology using an omnidirectional radiation detector)	<u>佐々木 美雪</u>

No.	名称(開催年など)	分類	タイトル	著者
30	30th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB2025) 2025.01.24-26	口頭	Development and evaluation of an automatic update system for 3D-CAD models using point cloud data	Akio Doi , Meguru Yamashita, Toru Kato, Hiroki Takahashi, Takashi Imabuchi
31			CAD-based labeling of point cloud data using deep learning and its evaluation	Toru Kato , Hiroki Takahashi, Meguru Yamashita, Akio Doi, Takashi Imabuchi
32			Study on 360-Degree Texture Mapping for Meshes of Building Interiors	Meguru Yamashita , Hiroki Takahashi, Toru Kato, Akio Doi, Takashi Imabuchi
33	Artif Life Robotics, Vol.30, pp.184-195, 2025 ※R3-4国プロ成果	論文	Development of time-series point cloud data changes and automatic structure recognition system using Unreal Engine	Toru Kato , Hiroki Takahashi, Meguru Yamashita, Akio Doi, Takashi Imabuchi
34	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A(p.170207_1 - 170207_12) 2025.3月掲載 https://jopss.jaea.go.jp/	論文	Evaluation of the distribution accuracy of radioactivity from a gamma-ray source using an omnidirectional detector for radiation imaging with fractal geometry (フラクタルジオメトリを用いた全方向検出型放射線イメージング装置を用いたガンマ線源放射能分布推定精度の評価)	Sasaki Miyuki , Abe Yuki, Sanada Yukihiro, Torii Tatsuo

No.	名称(開催年など)	分類	タイトル	著者
35	Waste Management Symposia 2024 (2024.3.10-14)	口頭	Human Resources Development Related to Robot Technology for Decommissioning at Fukushima KOSEN (福島高専における廃炉ロボット関連人材育成)	Nanami TAKAHASHI , Shinji KAWATSUMA, Shigekazu SUZUKI
36	ANIMMA2025conference 2025/6/9-13, Valencia, Spain ※ トラックは「07 Decommissioning, Dismantling and Remote Handling」 フルペーパーはIEEE TNS special ANIMMA 2025 issueに掲載予定	口頭 雑誌 掲載	Shield-free and lightweight alpha-beta radiation dust monitor for high-dose environments	Youichi Tsubota , Laffolley Hugo, Tomoya Tsuji, Fumiya Honda, Naoki Sagawa, Shinji Tokonami, Masahiro Suzuki
37	第9回 福島第一廃炉国際国際フォーラム (2025.8.3-4)	口頭 ポスター	Decommissioning research conducted by JAEA (5)3D Visualization of air-dose rate of working spaces by Digital Twin	Kenji Koizumi , Masahiro Suzuki, Kazuhisa Aoki, Susumu Yamada, Minsik Kim, Kenta Suzuki, Fumiaki Abe, Masahiko Machida, Koji Okamoto
38	日本保健物理学会 第58回研究会 (2025.12.18-20)	口頭	飛跡情報の機械学習をもとにした高線量環境用の軽量αβ線ダストモニタの開発と現場実証 (Development of a Lightweight α/β Dust Monitor for High-Radiation Environments Based on Machine-Learning Analysis of Particle Tracks, and On-Site Demonstration)	坪田陽一 、ラフォレ ユーゴ、辻 智也、本田 文也、中村 博樹、鈴木 政浩

No.	名称(開催年など)	分類	タイトル	著者
39	日本原子力学会 2025年秋の大会 (2025.9.10-12)	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高機能化開発 (1)全体概要	秋山 陽一、鈴木 政浩、 町田 昌彦
40		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高機能化開発 (2)開発システムの概念と1Fでの検証	町田 昌彦、山田 進、金 敏 植、宮村 浩子、鈴木 政浩
41		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高機能化開発 (3)CFDを活用したダスト拡散予測	中村 博樹、坪田 陽一、 町田 昌彦、鈴木 政浩
42		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高機能化開発 (4)線源逆推定及び線量率マップ推定のための放射線計算ツールの開発	古立直也、吉田亨、 柳秀明、山田進、 長谷川幸弘、町田昌彦
43		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高機能化開発 (5)LASSOを用いた放射線源推定における観測点の追加方法	山田 進、町田 昌彦
44		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高機能化開発 (6)データ管理・可視化システム	古川原峻、七海一宏、 迎田俊二、井嶋繁、 青木和久

【特許出願】

No.	名称	特許情報	発明者	要約	備考
45	線源推定装置及び線源推定方法	【公開番号】 特開2023-171062 (P2023-171062A) 【公開日】 2023.12.1	町田 昌彦	線源推定装置 1 は、対象区域を分割して得られた複数の領域のそれぞれに存在すると仮定された放射線源を示す線源ベクトルωを作成する線源ベクトル作成部 1 3 と、測定点における測定値を示す線量ベクトルyを作成する線量ベクトル作成部 1 5 と、線源ベクトルωが示す放射線源の数と測定点の数とに対応する行列Xを計算する行列計算部 1 6 と、対象区域における放射線源の分布を推定する線源推定部 1 7 と、を備える。線源推定部 1 7 は、線源ベクトルωと行列Xとの積を線量ベクトルyの擬似ベクトルと見做し、線源ベクトルωをスパースベクトルとして、擬似ベクトルから線源ベクトルωを復元する逆解析を行うことにより、放射線源の分布を推定する。	R3-4年度成果
46	観測点決定装置及び観測点決定方法	【公開番号】 特開2023-171063 (P2023-171063A) 【公開日】 2023.12.1	町田 昌彦	観測点決定装置 1 は、対象区域の構造物の表面を分割して複数の格子面を作成する格子面作成部 1 3 と、対象区域内の空間を分割して複数の空間格子点を作成する空間格子点作成部 1 6 と、を備える。観測点決定装置 1 は、観測点における観測結果から観測対象を推定する逆推定が成功する観測点の最少点数を、観測対象の数と格子面の数とに基づいて決定する最少点数決定部 1 5 を備える。観測点決定装置 1 は、各格子面の任意の点と空間格子点とを結ぶ直線が当該空間格子点に直接到達するか否かを、空間格子点毎に判定する直達判定部 1 7 と、観測点の最少点数と直達判定部 1 7 の判定結果とに基づいて観測点を決定する観測点決定部 1 9 と、を備える。	R3-4年度成果

【特許出願】

No.	名称	特許情報	発明者	要約	備考
47	放射線測定装置及び放射線測定方法 （「汚染環境用」の手のひらサイズのα/βダストモニタ）	出願済 現在の状況確認	坪田 陽一、 ラフォレ ユーゴ ミCHELLレイモン、 佐川 直貴、 中村 博樹、 鈴木 政浩	発明等の概要：1 台の放射線測定器を用いたα線、β線とγ線の測定において、特定のパラメータに注目し、弁別を行うことで、遮蔽フリーでα、β、γの高精度な弁別を行うことを可能とする。本測定手法は被ばくや作業管理用の放射性ダストモニタによるα線やβ線放出核種の空気中放射性物質濃度の測定や表面汚染測定に適用可能であり、それらの測定を高いγ線による空間線量率環境で実現することができる。	出願 2024.10月

用語	意味	掲載ページ
AIサロゲーションモデル	サロゲートモデルとは、数値シミュレーションの代替として機械学習を活用し、計算コストや時間を大幅に削減するための解析手法である。入力と出力のデータを学習して予測モデルを構築し、一度モデルが完成すれば、新たな入力データに対して高速に予測結果を得ることができる。従来のシミュレーションを逐次実行する場合と比較して、計算速度が100～1000倍に達することもある。モデルの精度は教師データの品質に強く依存する。また、過学習（特定のデータに過度に適合し、汎用性を失う現象）など、機械学習特有の課題が存在する。そのため、モデル構築や検証の段階では、十分な試行錯誤と検証が不可欠である。	p.97
API連携	API（Application Programming Interface）は、ソフトウェアやサービスが外部とデータや機能をやり取りするための仕組みである。代表的な例として、ネットショップやWebサイトのログインに利用されるWeb APIがある。Web APIは、HTTP/HTTPS通信を用いてインターネット経由でリクエストとレスポンスを交換する方式である。APIには複数の種類が存在するが、ここでは詳細を割愛する。API連携とは、異なるアプリケーションやシステム間でデータや機能を共有し、相互に利用可能にすることを指す。これにより、システム間の統合や業務効率化が容易になる。	p.51
BIM (3D-CADの説明も一部含む)	BIM(Building Information Modeling:ビルディング・インフォメーション・モデリング、ビム) は、建物の設計・施工・維持管理において、3次元モデルと関連情報を統合的に管理する手法である。3D-CADは形状や寸法を表現することに特化しており、線や面を組み合わせることでモデルを作成する。一方、BIMは、建築部材（柱、梁、床など）をオブジェクトとして認識し、それぞれに属性情報（材質、コスト、施工スケジュールなど）を付与できる。これにより、設計情報と施工・運用情報を一元管理できる点が大きな特徴である。BIMでは、単なる線や面ではなく、意味を持つ要素としてモデルを扱うため、条件設定や情報連携が容易になる。これにより、設計精度の向上、施工計画の効率化、ライフサイクル全体での情報活用が可能となる。	p.84-96
CV(クロスバリデーション)	Cross Validation（交差検証）とは、機械学習モデルの信頼性を向上させるための手法の一つです。データセットを複数に分割し、一部をモデルの訓練、残りをそのモデルの評価に使い、訓練・評価を訓練及び評価用データを取り変え、複数回繰り返します。これにより、限られたデータでもモデルが未知のデータにどれだけ適合するかを推定し、過学習を抑えてモデルの精度を高めることが可能となります。	p.60、p.64

用語	意味	掲載ページ
CAD当てはめ	「CAD当てはめ」とは、例えば配電盤の差分点群に対して、東電殿が保有するCADデータの中から配電盤に該当するすべてのCADパーツを用いて照合を行い、最も適合する形状を選定・フィッティングした上で、その差分点群の位置にCADパーツを配置(=設置)する処理を指す。	p.89,p.90
GPU	GPU(Graphics Processing Unit)とは、3Dグラフィックスなどの画像描画処理に特化した計算を行う半導体チップ（プロセッサ）である。主に並列処理性能に優れており、画像処理だけでなく、AI・機械学習・科学技術計算などの分野でも広く活用されている。	p.14,p.16,p.35 p.46
GUI	GUI(Graphical User Interface)とは、コンピュータの表示および操作体系(ユーザーインターフェース)の一種であり、情報の提示に画像や図形を多用し、基本的な操作の多くをマウスやタッチスクリーンなどによる画面上の位置指定によって行うことができるインターフェースを指す。	同上
kintone	kintone(キントーン)とは、業務アプリケーションをノーコードまたはローコードで作成できるクラウド型の業務改善プラットフォームである。プログラミングの知識がなくても、直感的な操作により業務のシステム化や効率化を図るアプリケーションを構築可能である。[参考URL] https://kintone.cybozu.co.jp/	p.51
KOLC+	KOLC+(コルク プラス)とは、BIM/CIMモデルや点群データをクラウド上で統合・共有・活用できるBIM/CIM対応のクラウド型情報共有プラットフォームである。複数の関係者間でのモデル情報の可視化や連携を円滑にし、インフラ分野におけるデジタル施工や維持管理の高度化を支援する。[参考URL] https://kolcx.com/feature/overview/	p.51
kViewer	kViewer(ケイビューワー)とは、kintoneライセンスを持たないユーザーに対しても、kintone上の情報を共有可能にする連携型クラウドサービスである。これにより、関係者間でリアルタイムに情報を共有できる利点がある。また、kViewerを利用することで、kintoneのレコード情報をWebページとして公開することが可能となり、「閲覧」のみを目的とする場合には、kintoneアカウントを持たないユーザーでも容易にリアルタイムのデータを参照できる。	p.51

用語	意味	掲載ページ
ICP	ICP (I terative C losest P oint) とは、VTK (V isualization T oolkit) などを用いて、2つの形状（点群やサーフェス）間の剛体位置・姿勢を推定するための代表的なアルゴリズムである。主に、2つの形状の位置・姿勢変換行列を求める目的で使用され、点群の位置合わせに広く利用されている。非常にシンプルなアルゴリズムである一方、初期位置の誤差やノイズ、外れ値に対して脆弱であるという課題があり、これらを克服するための多くの改良手法が提案されている。利用例としては、経時的に取得された物体形状から並進および回転運動を推定し、断片的に計測された形状データに対して3Dモデルを位置合わせする、といった応用が挙げられる。	p.88,p.89, p.95
IoU	IoU (Intersection over Union) とは、物体検出モデルにおいて、予測された物体の バウンディングボックス ※と正解（教師データ）として与えられたバウンディングボックスとの重なり具合を評価する指標である。具体的には、両ボックスの交差領域（Intersection）の面積を、両ボックスの和集合領域（Union）の面積で割った比率として算出される。重なり具合を定量的に評価できることから、物体検出の精度評価に広く用いられている。 ※ バウンディングボックス (Bounding Box) とは、対象物の領域を最小の長方形で囲み、外部領域から区別するための矩形領域を指す。	p.92,p.96
LASSO	LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) とは、広大な領域（格子メッシュ）において、限られた観測点情報から線源を推定するための統計的手法である。例えば、未知の格子点数が1万（100×100）ある状況で、観測点が2～3点しか存在しない場合でも、Candes-Taoの理論に基づけば、ほとんどの格子点が一樣またはゼロ（空虚）であると仮定することで、原理的には逆推定が可能であることが示されている。実際に日本原子力研究開発機構（JAEA）では、室内検証用として簡易的な室内モデル（151面）を構築し、テスト線源を設置。計測点として9地点（各地点で高さ違いの2点、計18ポイント）を指定し、LASSOによる逆推定を実施した結果、約95%の精度で線源位置を再現することができたという事前検証が行われている。	p.31,p.32
Linux	Linux（リナックス）とは、オペレーティングシステム（OS）の一種であり、最大の特徴はオープンソースであることと、無料で利用可能である点にある。Windows OSがMicrosoft社、macOSがApple社によって開発・販売されているのに対し、Linuxは世界中の開発者による協働（ボランティア）によって開発されており、ソースコードが完全に公開されている。そのため、誰でも自由に利用・改良・再配布することが可能である。	p.47,p.50

用語	意味	掲載ページ
LLM	LLM（Large Language Model；大規模言語モデル）とは、膨大な「計算量」「データ量」「パラメータ数」に基づいて構築された自然言語処理モデルである。明確な定義は存在しないが、一般的には数十億以上のパラメータを持つ言語モデルを指す。大規模言語モデルの文章生成原理は、ある単語の次に出現する可能性が最も高い単語を確率的に予測し、順次出力するという仕組みに基づいている。なお、LLM（例：GPT、Claude、Geminiなど）は、大量のテキストデータを事前に学習し、その知識をもとに応答を生成するため、「学習時点までの知識」しか保持していない点に留意が必要である。 [参考URL] https://qiita.com/skillup_ai/items/ddeaa9190c2f6447ad09	p.14
Open-Cascade	Open CASCADE（オープンカスケード）とは、Open CASCADE SASによって開発・サポートされているオープンソースのソフトウェアであり、商用利用も可能である。Open CASCADE テクノロジーは、三次元形状の表現・演算・計算を行うためのC++ベースのライブラリ群であり、幾何学のおよびトポロジカルな操作を多岐にわたって提供する。また、OpenGLやVTKなどの他のライブラリと連携することで、高品質な3Dビジュアライゼーションやデータ変換処理も可能となっている。	p.87
Potree	Potreeとは、3次元点群データをWebブラウザ上で表示・操作できるポイントクラウドビューアシステムである。WebGLを活用することで、大規模な点群データの高速描画やインタラクティブな可視化が可能となっており、土木・建築・文化財分野などでの点群データの共有・閲覧に広く利用されている。	p.51
PHITS	PHITS（Particle and Hheavy Ion Transport code System、フィッツと読む）とは、あらゆる物質中における多様な放射線の挙動を、核反応モデルや核データを用いて模擬するモンテカルロ輸送計算コードである。原子力分野で培われた多数の基盤技術を集約し、原子力分野に限らず、医療、宇宙、放射線防護など、放射線に関連する幅広い研究分野への応用を目的として、日本原子力研究開発機構（JAEA）を中心に開発が進められている。	p.101

用語	意味	掲載ページ
STL	STLファイル形式とは、3D形状を三角形ポリゴンの集合で表現する、3D-CADや3Dプリンタで広く使用されているフォーマットである。STL形式では曲面を表現できないため、本来曲面になる部分ではモデルを形成する三角形を細くして曲面を生成している。各三角形には外向きを示す法線ベクトル（単位ベクトル）が含まれており、形状の向きや表面の定義に利用される。STL形式は形状情報のみを扱い、色や材質などの情報は含まれない。	p.14
TRL	TRL(Technology Readiness Level)は、技術の成熟度を体系的に評価するための指標であり、1974年に米国航空宇宙局(NASA)によって考案された。現在では、宇宙開発分野に限らず、幅広い分野の技術開発プロジェクトにおいて活用されている。この指標は、技術が研究段階から実用化・商用化に至るまでの進捗を定量的に評価するものであり、技術開発のリスク管理や資源配分の判断材料としても有効である。 [参照： https://outsense.jp/rd6/] 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	p.6,p.9 など随所
VTK	VTK(The V isualization T oolkit)は、科学技術計算、医療画像処理、工学シミュレーションなどの分野で広く利用されている、オープンソースの可視化ライブラリである。1990年代にKitware社によって開発され、現在も活発にメンテナンス・拡張が行われている。VTKは、C++で実装されており、Python、Java、Tclなどの言語バインディングも提供されているため、多様な開発環境で利用可能であり、商用・非商用問わず自由に利用・改変ができる。主な機能としては、3次元グラフィックスの描画、ボリュームレンダリング、等値面抽出、ベクトル場の可視化、メッシュデータの表示、画像処理、インタラクティブな操作(回転・ズーム・スライス)などが挙げられる。VTKは、単体での利用だけでなく、Paraviewや3D Slicerなどの高度な可視化ツールの基盤ライブラリとしても採用されており、研究機関や企業、教育現場などで広く活用されている。	p.14

用語	意味	掲載ページ
3D-ADRES-Indoor	3D-ADRES(3D Air Dose Rate Evaluation System ; 三次元空間線量率分布評価システム)の略称。「3D-ADRES-Indoor」の開発に先立ち、福島県内の市街地や森林等の複雑な環境中の地形・樹木・建物等の3次元のリアルな構造物モデルを構築し、更に不均質な放射性セシウムの線源分布を取り込むことを可能とすることで空間線量率の3次元分布が計算可能なシステムである「3D-ADRES」を開発しており、前補助事業(R3-4年度)から本補助事業(R5-6年度)にかけて、1F現場で適用可能なシステムとして「3D-ADRES-Indoor」を開発した。	p.8他
ウォークスルー機能	ウォークスルー機能とは、PC画面上や建築物などの映像を投影したVR（仮想現実）環境において、ユーザーがコントローラー等の操作デバイスを用いて、まるで自身が映像内の空間を実際に歩いているかのような没入体験を得られる機能、またはそのような体験を提供するアプリケーションの総称である。例えば、楡葉遠隔技術開発センターに設置されたVR設備では、大人数での同時視聴が可能な環境を実現している。このシステムでは、カラー点群データや空間線量率分布などの情報をVR空間内に可視化することで、作業員が実際に福島第一原子力発電所（1F）の現場に入ることなく、現場にいるかのような状況を再現できる。これにより、作業手順の事前検討や新人研修など、安全性と効率性を両立した教育・訓練用途に活用されている。	p.15,p.26, p.29,p.34, p.82,p.152, p.155
オンプレ (OnP)	オンプレは、オンプレミス(on-premises)の略称で、企業や組織が自社内にサーバーやネットワーク機器、ソフトウェアなどのITインフラを設置・運用する形態を指す。クラウドサービスとは対照的に、設備やデータを自社で直接管理するため、セキュリティやカスタマイズ性に優れる一方で、初期投資や運用コストが高くなる傾向がある。オンプレ環境では、ハードウェアの調達、ソフトウェアのインストール、保守・運用までを自社で行う必要があり、IT部門の技術力やリソースが求められる。金融、医療、製造業など、高いセキュリティや安定性が求められる業界で多く採用されている。近年はクラウドとのハイブリッド運用も増えており、オンプレの強みを活かしつつ、柔軟性や拡張性をクラウドで補うケースも多い。	p.15,p.47, p.49,p.50, p.82
逆問題解析 (MLEM法)	MLEM法は、実測の投影データをもとに再構成した画像から、再び投影データを作り、それができるだけ実測値に近づくように逐次更新していくアルゴリズムのこと。計測対象を1回の計測結果でもある程度の解析結果を出すことはできるが、同じルートでの複数回計測や、計測位置を変えて計測することにより、計測精度が向上する。逆問題解析とは、観測されたデータから、その原因や内部構造などの「見えない情報」を推定する手法である。医療画像処理、地球物理学、放射線計測、工学シミュレーションなど、さまざまな分野で活用されている。その中でもMLEM法は、逆問題を解くための反復的なアルゴリズムの一つであり、特に放射線画像再構成や線源分布の推定において広く用いられている。MLEM法は、以下のような特徴を持つ：観測データがポアソン分布に従うと仮定し、最尤推定に基づいて解を求める。反復計算により徐々に解を収束させるため、ノイズに強く、安定した推定が可能。医療分野ではPETやSPECT画像の再構成、原子力分野では線源分布の推定などに応用されている。	p.129

用語	意味	掲載ページ
高強度線源対策	1F現場において、ホットスポットなどの高強度線源に対する低減措置を行うための方法のこと。主に「除染」、「移動」、「遮蔽」、「撤去」の4つが挙げられる。3D-ADRES-IndoorではFrontEndおよびProにて線源対策が可能である。また、ウォークスルーではアバターを使って、床面からの任意の高さにおける累積被ばく線量の見積もりを行うことも可能である。	p.39,p.40
テクスチャー	テクスチャー(Texture)とは、物体の表面における質感や模様、凹凸、色の変化などの視覚的・触覚的特徴を指す言葉である。分野によって意味が異なるが、主に以下のように使われる。CG・3Dモデリング分野では主に3Dモデルの表面に貼り付ける画像やパターンのことを指す。これにより、モデルにリアルな外観(木目、金属、布など)を与えることができる。テクスチャーは、画像ファイル(JPEG、PNGなど)として用意され、UVマッピングによってモデルに適用される。画像処理・コンピュータビジョン分野では主に画像内の繰り返しパターンや局所的な構造を指し、物体認識や分類、セグメンテーションなどに利用される。統計的特徴量(GLCMなど)を用いて定量的に解析されることもある。	p.26,p.27
デジタルツイン	デジタルツイン(DT)とは、現実世界のモノやシステムを仮想空間に再現したデジタルモデルのことである。センサーなどから取得したリアルタイムデータをもとに、物理的な対象の状態や動作を忠実に再現し、シミュレーションや予測、最適化を可能にする。これにより、故障の予測や効率的な運用が実現できるほか、デジタル空間で得た知見を現実世界にフィードバックすることで、制御や改善も行える。製造業では設備の稼働状況の監視、自動車分野ではメンテナンス予測、都市開発では交通やエネルギー管理、医療では治療シミュレーションなど、幅広い分野で活用されている。IoT、AI、クラウド、ビッグデータ解析などの技術と密接に関連しており、次世代のスマート社会を支える重要な概念である。	p.29,p.30
楢葉VRシステム	福島県楢葉町にある、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA)が設置する「福島廃炉安全工学研究所 楢葉遠隔技術開発センター(略称：NARREC/ナレック)」には、廃炉作業支援を目的とした高度なVR(仮想現実)システムが導入されている。このVRシステムは、福島第一原子力発電所の廃炉作業に関連する施設や環境を仮想空間上に再現し、作業計画の立案、リスク評価、遠隔操作技術の検証などに活用されている。特に、放射線環境下での作業を安全かつ効率的に行うための遠隔操作訓練やシミュレーションに有効である。希望者は事前に問い合わせを行うことで、見学が可能となっており、廃炉技術や遠隔操作技術に関心のある研究者・技術者・学生などにとって貴重な学習・体験の場となっている。 詳細は公式サイト： https://naraha.jaea.go.jp/index.html	ウォークスルーの項目にも関連情報を記載

用語	意味	掲載ページ
倍半分 (の精度)	倍半分とは、ある値に対し実測データなどで得られた結果が「基準値の半分」以上かつ「基準値の2倍」以下になる範囲のことで、「測定精度を倍半分以上にしたい」という東電のニーズに沿った方針による。例えば100という基準値があった場合の倍半分は下限値が50から上限値が200の範囲内に収まる範囲のことを指す。	p.14,p.63
不確かさ (線量率分布の 不確かさ)	線源逆推定より得られた線源分布から再観測指示の観測候補点を決定する際に、以下の2点にホットスポット付近の線量率をより詳細にし、線源位置を特定するために選ばれる観測点がある一方で、ある場所は初期観測点の観測点の密集度がなないため、その領域における逆推定の推定値の精度がほかの場所よりも低い場所が出てくる。その領域周囲は不確かさの度合いが高いため、それを解消するためにその領域付近に再観測指示点を設定し、線量率情報を取得することで不確かさを解消する。	p.31,p.32, p38
平均実効線 量・最高実効 線量	【平均実効線量(Average Effective Dose)】 定義：ある集団や期間における個人の実効線量の平均値。 用途：放射線被ばくの統計的評価に使われる。 【最高実効線量(Maximum Effective Dose)】 定義：ある集団や期間において、個人が受けた実効線量の最大値。 用途：最も高い被ばくを受けた人の状況の把握や、リスク評価や安全対策の検討に使われる。	p.23,p.65
ベイズアン LASSO	ベイズアンLASSOとは、LASSO回帰とベイズ推定を組み合わせた手法であり、観測データをもとに線源分布などの推定を行う際に、その推定結果の「不確かさ」も同時に扱うことができる。ベイズ推定では、観測や再観測によって確率分布関数を更新し、より信頼性を高めていく。観測点では不確かさはゼロであるが、その他の場所では推定に基づくため、推定誤差を含んだ不確かさが生じる。LASSOは、観測された線量率から一意に線源分布を逆推定する方法であるが、ベイズアンLASSOではこの逆推定結果を確率分布として扱い、その不確かさを再観測を繰り返すことで徐々に減らしていくことができる。すなわち、1回の観測でも分布の推定は可能であるが、繰り返し観測する(=再観測、再々観測などを実施する)ことで、より精度の高い分布が得られるという利点がある。このように、ベイズアンLASSOは、LASSOによる一意な推定に加えて、ベイズ推定の枠組みを使って不確かさを定量的に扱い、それを観測の積み重ねによって改善していくことができる手法である。	p.31,p.32

用語	意味	掲載ページ
ボイド	点群計測におけるボイドとは、対象物の形状や構造を測定する際に、点群データが取得されていない領域を指す。これは、「センサーの死角」、「反射率の低い素材」、「遮蔽物の存在」、「測定距離の限界」や、「測定条件の不備」などによって生じる。ボイドは、構造物の欠損や測定の不完全性を示す重要な指標であり、精度の高い解析を行うためには、その検出と評価が不可欠である。ボイドの検出には、点群の空間密度を解析する方法が有効である。具体的には、空間をボクセル（立方体の格子）に分割し、各ボクセル内に点群が存在するかどうかを調べることで、点が欠落している領域を特定する。この手法により、ボイドの位置、形状、体積などを定量的に評価することが可能となる。また、点群の取得には必ず誤差が伴うため、ボイドの検出においても、誤差の影響を考慮する必要がある。特に、点群の密度が低い領域では、ボイドと誤認される可能性があるため、解析には慎重な判断が求められる。複数回の観測や異なる角度からの測定を組み合わせることで、ボイドの存在をより確実に確認することができる。3D-ADRES-Indoorでの線源逆推定をする場合、ボイドが存在すると、そこに線源が存在するという誤推定をしてしまうことがあるため、ボイドを極力なくすることが課題である。	p.26
法線方向 (法線調整)	3D-ADRES-Indoorでの操作時に発生する作業である。1F現場で取得した点群データを基にメッシュ化を行い、同時に線量率情報を読み込む。次の作業として法線方向の調整作業がある。観測点は作成メッシュの内側に作成され、そのメッシュの内側を表面として定義する。1つ1つのメッシュの表面からの法線方向を矢印の向きで示し、法線の向きで色分けをするが、この時点で作成したメッシュは法線の向きが表面と裏面が混在している。これを3D-ADRES-Indoorのシステムにて自動で法線の向きを内側を表面とするように調整することができる。この操作を行わないと、観測点の位置がメッシュの上下に配置されていると認識され、うまく線源逆推定ができなくなる。	p.27,p.37
ラグランジュ 未定乗数法	ラグランジュの未定乗数法（Lagrange Multiplier Method）は、制約条件のもとで関数の極値（最大値または最小値）を求めるための数学的手法である。経済学、物理学、工学などの分野で広く使われており、特に最適化問題において重要な役割を果たす。具体的には、 目的関数 $f(x,y,\dots)$ を 制約条件 $g(x,y,\dots)$ のもとで最大化または最小化したいとする。このとき、ラグランジュ関数 $L(x,y,\dots,\lambda) = f(x,y,\dots) - \lambda g(x,y,\dots)$ を定義し、すべての変数とラグランジュ乗数について偏微分して、連立方程式を解くことで解を求める。	p.146

推定線量率から測定線量率を予測する精度を評価する際、両者が一致する線の傾きが「1.2」となる理由について

「真の一致線の傾き～1.2」となる理由は、測定と推定の両者にて異なる**線量率（下記詳述）**を利用していることに起因する。

測定量(測定線量率)：通常は「**1cm線量当量率**」を出力する。これは人体を模擬した球体ファントムの表面から1cm深さでの線量当量率であり、下記推定値「実効線量率」より大きい値となる。

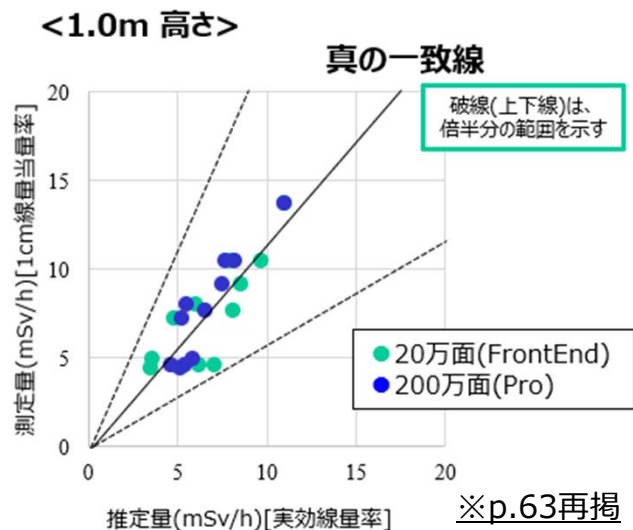
推定量(推定線量率)：「**実効線量率**」を出力する。これは人体の臓器ごとの吸収線量に組織加重係数を掛けて合計した値であり、当該システムは人の被ばく評価に対し貢献することを目標としたため、当該量を出力する。

<以上、出力量の違いから比率を1.2とすることで、推定量と測定量の一致度が評価可能となる。>

・ICRPのデータによると、中性子やガンマ線の外部被ばくにおける実効線量率への換算定数は、1cm線量当量率に比べて10～20%程度大きい場合がある。特に、前方入射(AP[Anterior-Posterior]照射)条件で、10MeV以下の光子や20MeV以下の中性子に対して、1cm線量当量率は実効線量率の約1.2倍になることが報告されている。

すなわち、「1.2」という傾きは、**実効線量率と1cm線量当量率の比率を反映した値**である。

**¹³⁷Csにおける
1cm線量当量率/実効線量率
=0.0927/0.0779≒1.1899…→1.2**



指標名	特徴	主な用途
1cm線量当量率	人体組織モデルの表面1cmの線量当量率	放射線防護、放射線管理
実効線量率	人体への総合的な影響評価の指標	被ばく評価

核種	半減期	壊変形式	おもなβ線(またはα線)のエネルギー[MeV]と放出割合	おもな光子のエネルギー[MeV]と放出割合	内部転換電子の放出割合[%]	実効線量率定数 (空気衝突カーマ率定数) 1cm線量当量率定数	おもな生成反応
^{134m} Cs	2.912h 娘 ¹³⁴ Cs	IT	100%	0.0112 - 1.1% 0.128 - 12.6% 他 0.0309 - 25.5% 0.0351 - 5.7% Cs-K _α Cs-K _β	L⇒ 98.6 87.4	0.00518 (0.00960) 0.00979	¹³³ Cs (n, γ) ^{134m} Cs
¹³⁴ Cs	2.0652y	β ⁻	0.0886 - 27.3% 0.415 - 2.5% 0.658 - 70.2% 他	0.563 - 8.4% 0.569 - 15.4% 0.605 - 97.6% 0.796 - 85.5% 0.802 - 8.7% 1.365 - 3.0% 他 0.0321 - 0.69% 0.0365 - 0.16% Ba-K _α Ba-K _β	0.061 0.15 0.58 0.26 0.026	0.211 (0.208) 0.249	¹³³ Cs (n, γ) ¹³⁴ Cs
¹³⁵ Cs	1.33×10 ⁶ y	β ⁻	0.269 - 100%				U (n, f) ¹³⁵ Cs β ⁻ 9.14h ¹³⁵ Xe → ¹³⁵ Cs
¹³⁷ Cs	30.08y 娘 * ^{137m} Ba	β ⁻	0.514 - 94.4% 1.176 - 5.6%	0.662 - 85.1% 0.0321 - 5.8% 0.0365 - 1.3% ^{137m} Ba Ba-K _α Ba-K _β	9.7	*0.0779 *(0.0771) *0.0927	U (n, f) ¹³⁷ Cs

[アイストープ手帳12版 (P.67)] 公益財団法人アイストープ協会(2020) より一部抜粋