



原子力安全部会主催第8回「原子力安全夏期セミナー」

2024年9月2日（月）

いわき産業創造館

（5）炉内状況推定

3D推定図及びdebrisEyeの開発

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

福島廃炉安全工学研究所 廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）

デブリ探査グループ 山下 拓哉

- 3D推定図については、経済産業省資源エネルギー庁「令和5年度開始廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発）」の成果の一部を含むものである。
- debrisEyeについては、東京電力ホールディングス株式会社「1F PCV内部調査結果解析業務委託」の成果の一部を含むものである。

1Fから得られる情報を共有するためには

- 福島第一原子力発電所（1F）の内部調査及び解析・模擬試験等による推定が進むにつれ、1Fの状況についての情報が蓄積される。

➔ 一目で状況が分かる図にまとめ、廃炉検討に活用

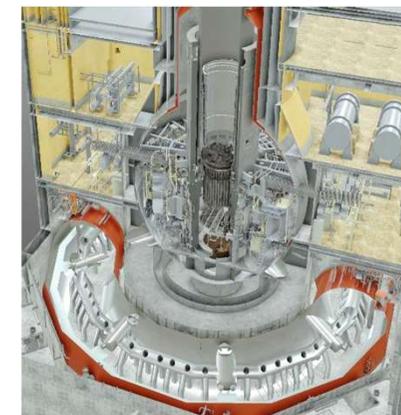
- サンプル分析等の情報が蓄積される。

➔ 扱いやすいデータベースが必要



- 一目で状況が分かる図およびデータベースの情報を統合することで、1Fの状況をより深く理解できる。

➔ 統合するツールが必要

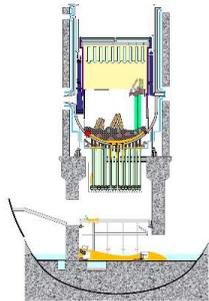


3D推定図[1,2]

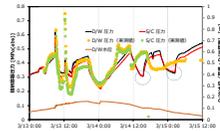
1Fデジタルツインの構築 (3D推定図 × debrisWiki × debrisEye)



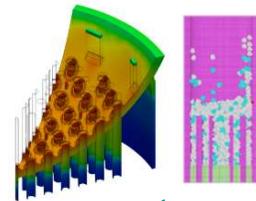
2D推定図[4]



SAコードによる事故進展解析[4]



CFD, FEM, MPS法等による詳細解析結果 [3]



模擬試験 [4,6]



内部調査結果[5]



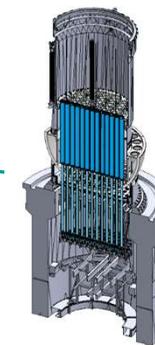
3D推定図[1,2] (debrisEyeに実装)



1F施設データ



設計情報[4]



1Fから採取されたサンプルの分析データ (debrisWiki) [3]

2U-TIP-2-2017 / 分析結果の説明

【内容】
 種類 : 数量の多い
 形状 : 取りまじり
 状態 : 正常
 調査中: 解体

2U-OFFSHE-X-2016 (2U-3)
2U-PCVDEPO-3-2019 (2U-3)
2U-PCVDEPO-1-2017 (2U-3)
2U-PCVDEPO-2-2018 (2U-2)
2U-TIP-X-2017 (2U-2)
2U-TORUS-X-2019 (2U-6)

プロジェクト名: 2U-TIP-2-2017

採取時の試料形状: 2U-TIP-2-2017

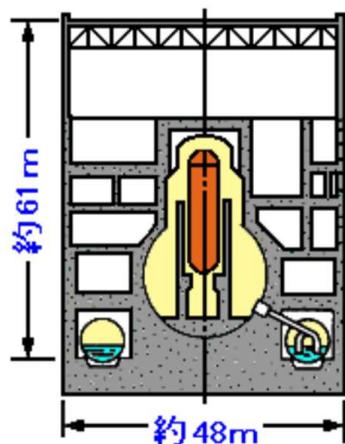
試料番号: 2U-TIP-2-2017-001

分析機関: 2U-TIP-2-2017

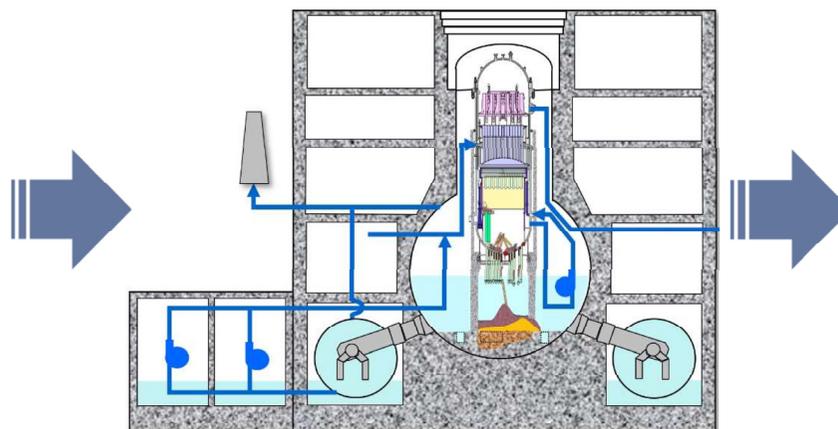
採取時期: 2017年

3D推定図

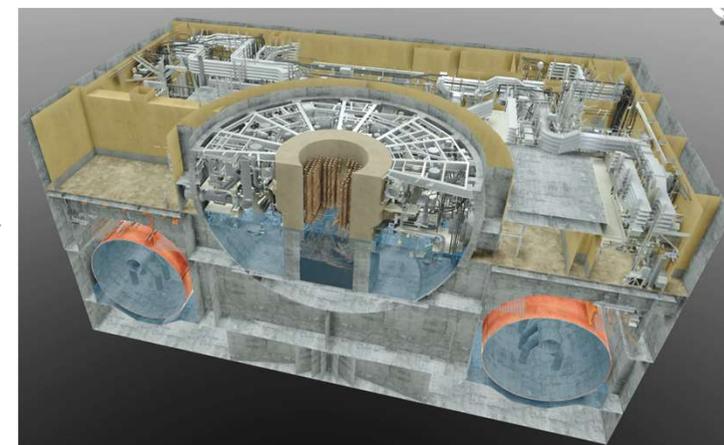
- プラントの構造は複雑なため、公開資料だけでは状況把握は難しい。
- 設計情報や内部調査結果等の情報を組み合わせ、現実に近い状況イメージができれば、事故進展に係る研究や廃炉検討に役立つ。



教科書等で勉強するBWR [7]



各プラントの特徴を踏まえた具体的なイメージ [8]
(2D推定図)



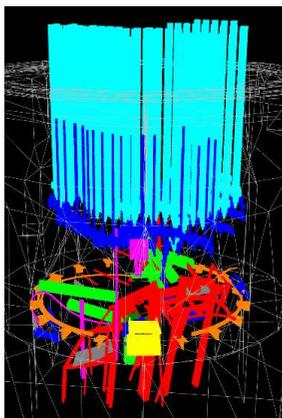
現実に近いイメージ [2]
(3D推定図)

3D推定図の作成の基本方針（1/2）

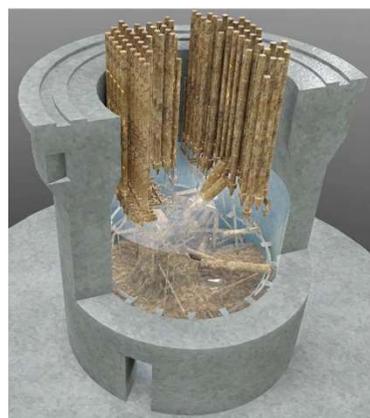
■事故後に調査を実施した箇所

- A) 事故後の内部調査で得られた点群データをCG化
- B) 内部調査結果で得られた写真・動画からCGを作成
- C) 内部調査結果で得られた写真・動画からテクスチャを作成

点群データ [9]



CG [2]



A)

内部調査結果 [5]



B)



C)

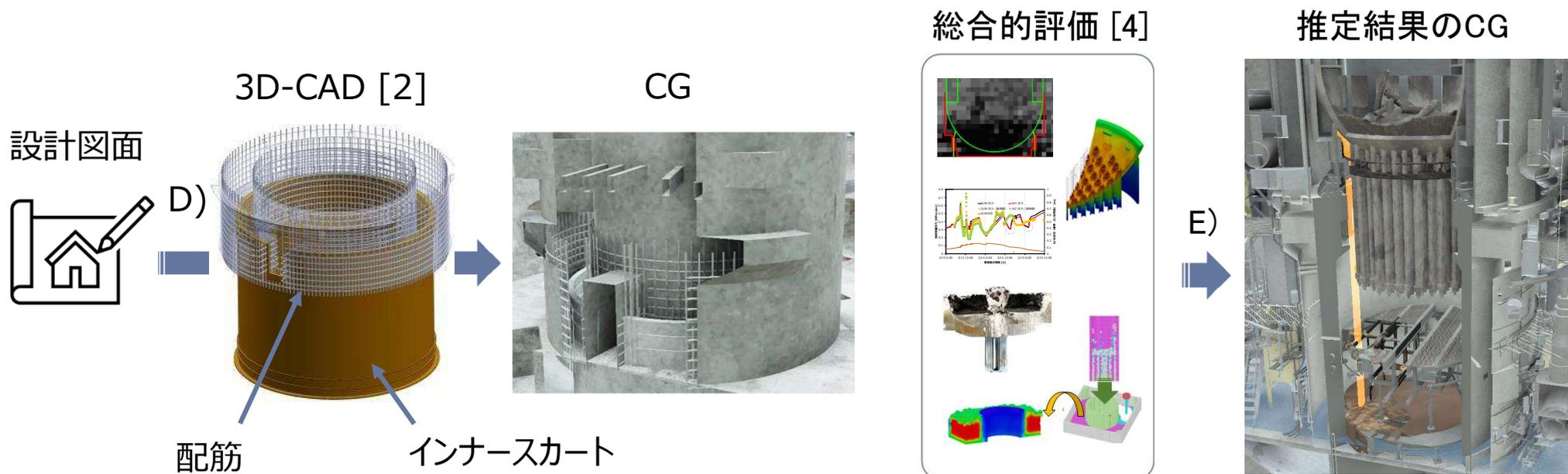


3D推定図の作成の基本方針 (2/2)

■まだ内部調査が実施されていない箇所

D) 設計図から3D-CADを作成してCG化

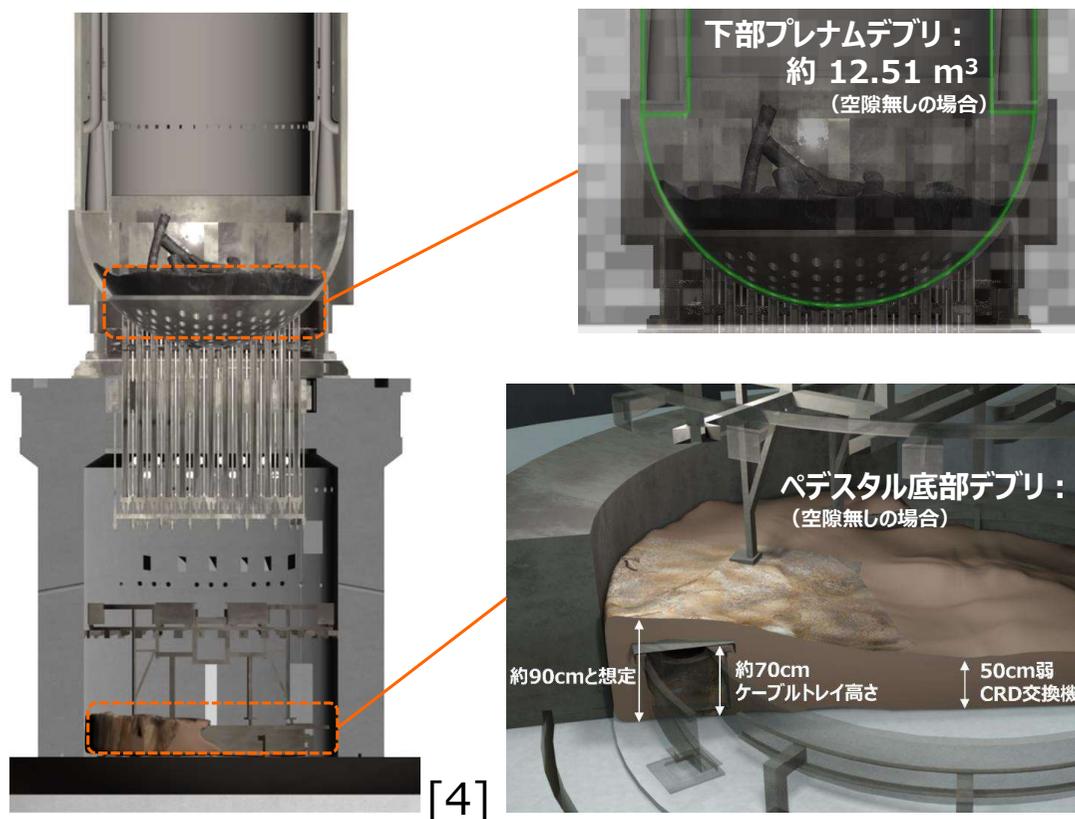
E) 内部調査結果、SA解析、模擬試験、MPS法等の解析結果を総合的に評価した結果から推定される状況をCGで作成し反映



3D推定図を作る過程でこんなことも分かる (1/2)



- 炉心物質移行とその配置について、物量感覚を持つことができる。



燃料デブリが空隙0.4でRPVに充填された場合、1.5 m程度の堆積となる。この情報だけでも、多くの燃料デブリはRPV内に残っていることが分かる。

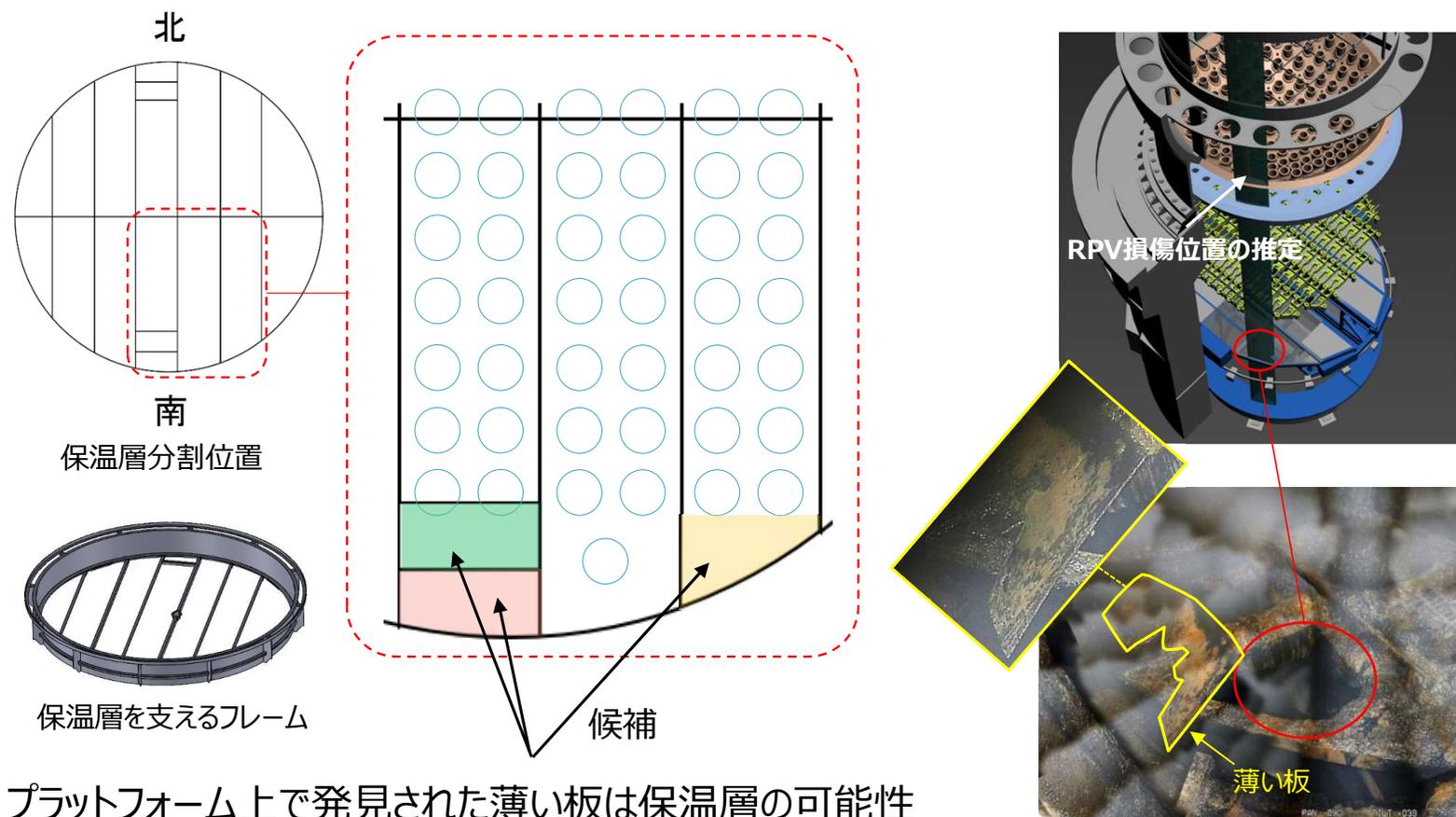


RPV内の炉心以下の構造物の多くが溶融してRPV以下に移行した場合、多くがペDESTAL床に堆積したことが分かる。

3D推定図を作る過程でこんなことも分かる (2/2)



- 実際のスケール感覚がつかみやすくなり、現象理解の深化につながる。



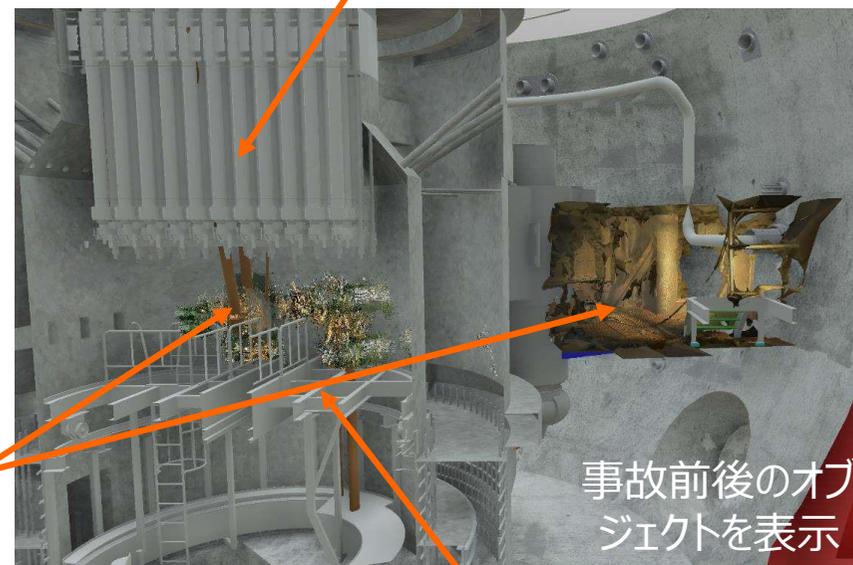
プラットフォーム上で発見された薄い板は保温層の可能性

[4]

1号機の3D推定図作成状況

- RPV・PCV・S/C・T/B・原子炉建屋の事故前の情報を反映済
- RPV内部については事故前の情報を反映中
- 2024年3月ドローン調査の情報を反映済
- 2023年3月ROV調査結果を反映予定
- RPV破損に関する解析・実験による推定結果を反映予定

多くのCRDハウジングが消失していることが確認されている。



事故後の情報
(ドローン調査)

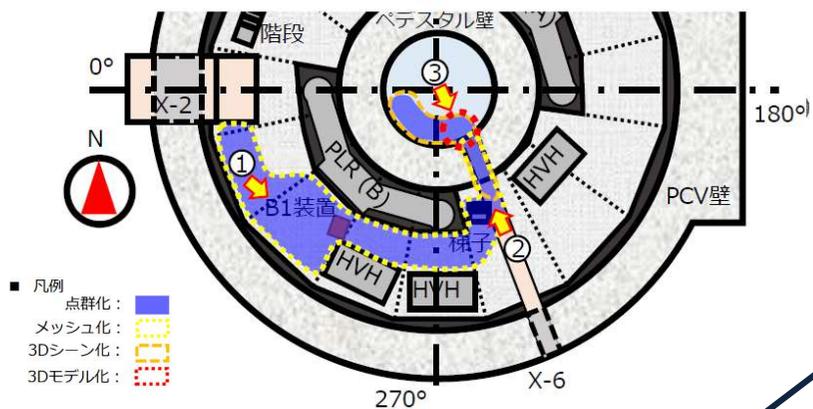
事故前後のオブ
ジェクトを表示

プラットフォームの消失が確認されている。

2024年3月ドローン調査の情報の反映



1号機 PCV内部調査（気中部調査）について [10]



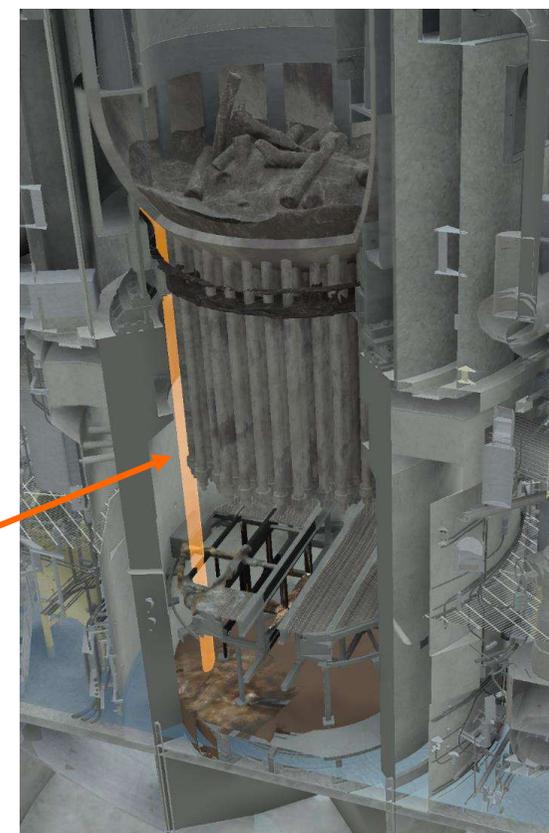
2号機の3D推定図作成状況

- RPV・PCV・S/C・T/B・原子炉建屋の事故前の情報を反映済
- RPV内部については事故前の情報を反映済
- 2018年1月パンチトルカメラで撮影された画像情報反映済
- RPV破損に関する解析・実験による推定結果を反映済

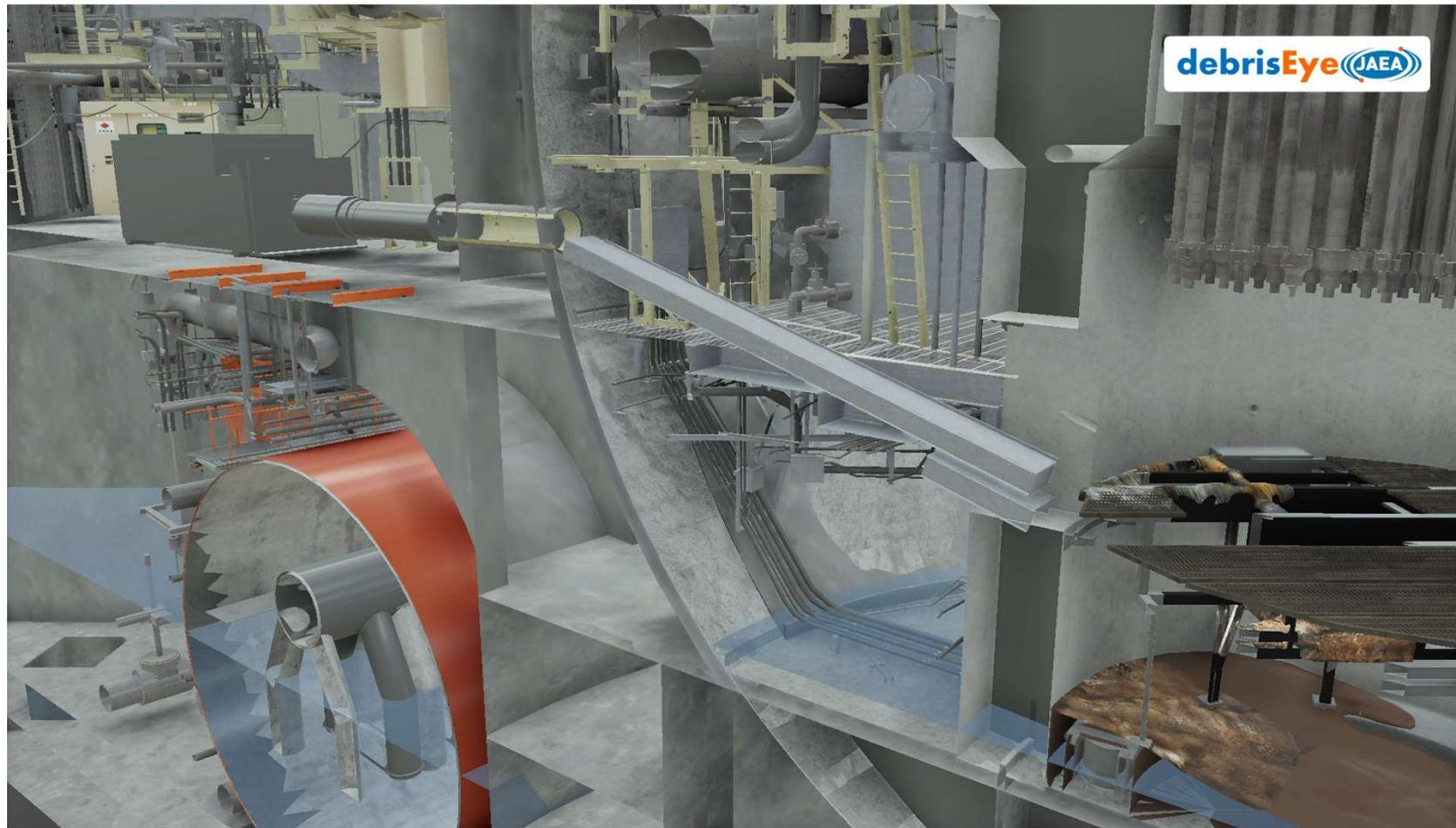
上部タイプレート



炉心物質流出
経路推定



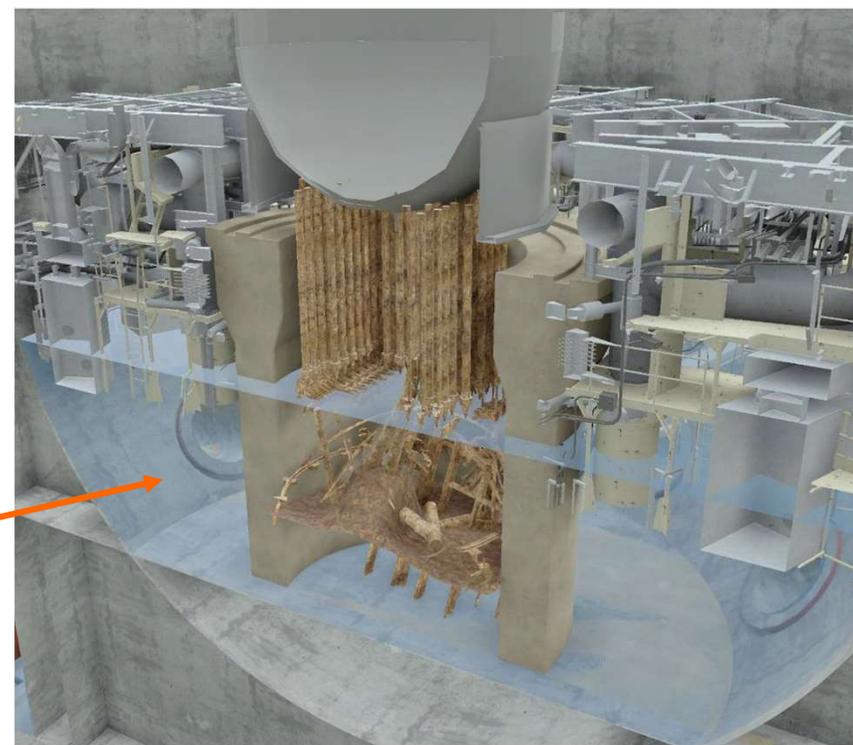
2号機 PCV内部調査・試験的取り出し



3号機の3D推定図作成状況

- RPV・PCV・S/C・T/B・原子炉建屋の事故前の情報を反映済
- RPV内部については事故前の情報を反映中
- 2017年7月ROV調査結果を反映済
- RPV破損に関する解析・実験による推定結果を反映予定

現状の水位情報も反映

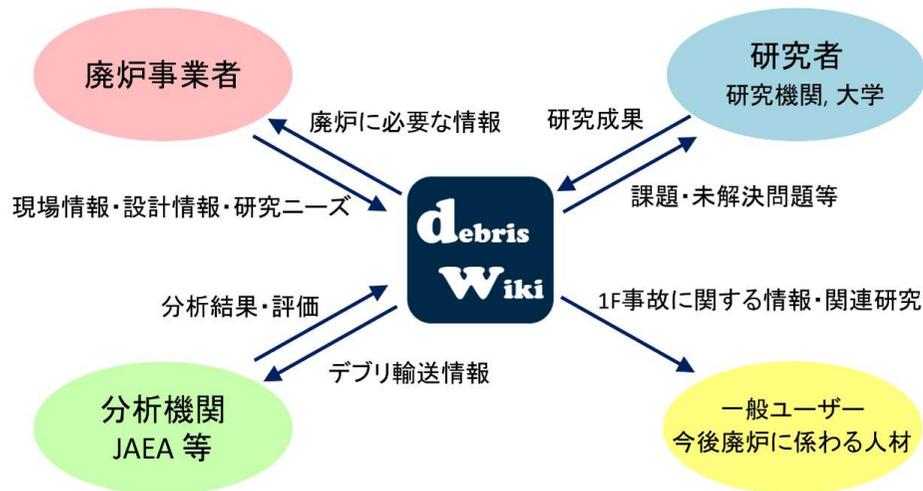
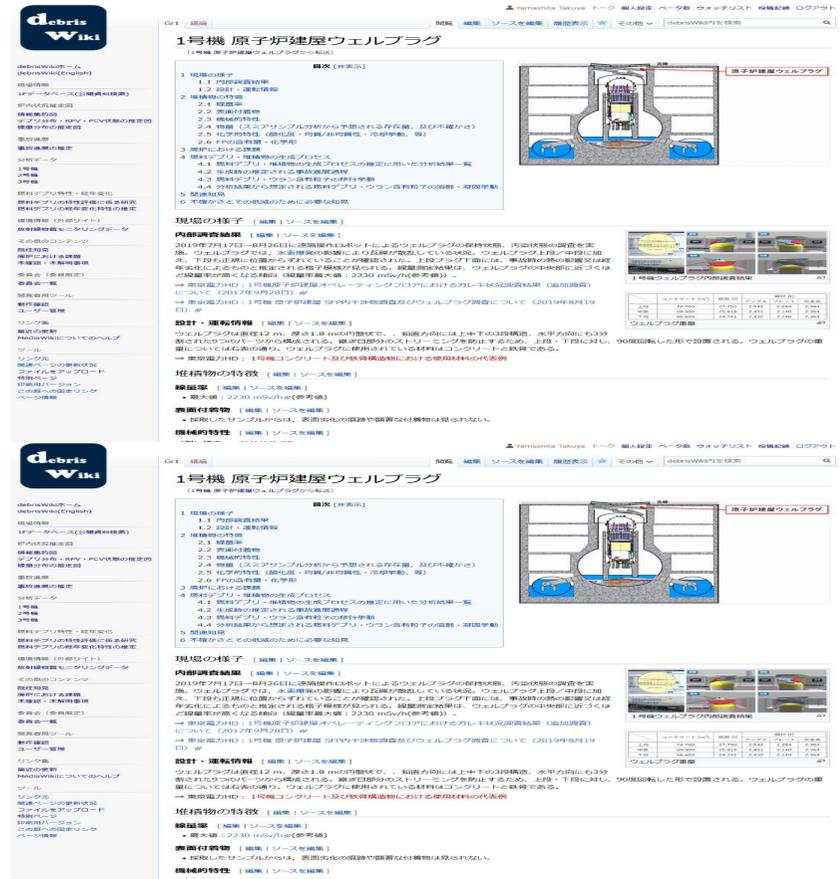


debrisWiki (デブリウィキ)

廃炉基盤研究データベース

【コンセプト】

- 1F廃炉に関わるユーザーの情報のハブとなる
- 常に最新で技術レビューを受けた正しい情報を提供
- 1F廃炉の百科事典を協働作業で創り上げる



debrisWikiのコンテンツ (抜粋) [3]

debrisWikiの主なコンテンツ (2/2)



分析データのページ [3]



- debrisWikiホーム
- debrisWiki(English)
- 現場情報
- 1Fデータベース(公開資料検索)
- 炉内状況推定図
- debrisEye
- 情報集約図
- デブリ分布・RPV・PCV状態の推定図
- 線量分布の推定図
- 事故進展
- 事故進展の推定
- 分析データ
- 1号機
- 2号機
- 3号機
- 燃料デブリ特性・経年変化
- 燃料デブリの特性と分類のまとめ
- 燃料デブリの特性評価に係る研究
- 燃料デブリの経年変化特性の推定
- 環境情報(外部サイト)
- 放射線物質モニタリングデータ
- その他のコンテンツ
- 既往知見
- 廃炉における課題
- 未確認・未説明事項
- 委員会(委員限定)
- 委員会一覧
- OECD/NEA FACE
- 開発者用ツール
- 動作確認
- ユーザー管理
- リンク集

ページ 議論 閲覧 編集 ソース

分析データ

- 目次 [非表示]
- 1 輸送前サンプル (アクセス制限有)
 - 2 分析結果一覧
 - 2.1 1号機
 - 2.2 1/2号機
 - 2.3 2号機
 - 2.4 3号機
 - 3 総合的な分析結果の解釈

輸送前サンプル (アクセス制限有) [編集] [ソースを編集]

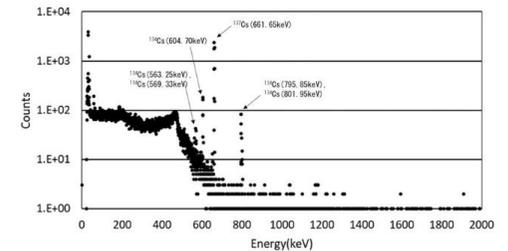
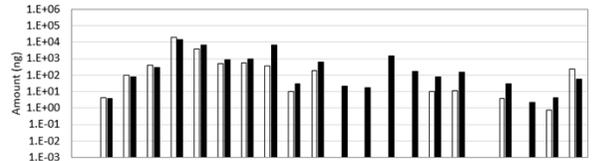
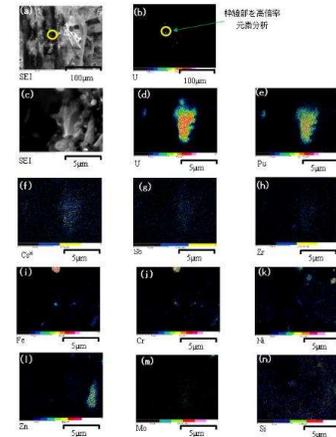
福島第一原子力発電所から輸送・分析するサンプルの一覧を以下のリンクに示す。輸送・分析するサンプルの一覧については、輸送、分析及びそれに関係する担当者に限定して公開することとする。

- 輸送前サンプル一覧

分析結果一覧 [編集] [ソースを編集]

1号機 [編集] [ソースを編集]

採取位置	試料番号			分析機関	採取時期	分析時期	分析結果の説明	分析結果							PJ名等	備考
	debrisWiki	TEPCO	各分析機関					外観	IP	SEM	TEM	ICP	放射線分析			
ウェルブラグ	1u-WELLP-1-2019	1u-4,②2-2	XM1916	JAEA	2019/7~8	2020/1~2	スミア紙	●	●	●	●	●	●	●	IRID_R1	
ウェルブラグ	1u-WELLP-2-2019	1u-4,④7-1	XM1917	JAEA	2019/7~8	2020/1~2	スミア紙	●	●	●	●	●	●	●	IRID_R1	U粒子未確認
ウェルブラグ	1u-WELLP-3-2019	1u-4,①2-1	1uプラグ2	NFD	2019/7~8	2020/1~2	スミア紙	●	●	●	●	●	●	●	IRID_R1	
ウェルブラグ	1u-WELLP-4-2019	1u-4,③4-1	1uプラグ4	NFD	2019/7~8	2020/1~2	スミア紙	●	●	●	●	●	●	●	IRID_R1	



各分析機関の試料名の対応表有り 1クリックで目的の分析データへアクセス

debrisWikiへのアクセス方法



debrisWikiアカウント申請



データによってはアカウントの権限設定が必要になります。
新規[アカウントの申請](#)をお願いします。

debrisWikiアカウント申請手続き

debrisWiki編集作業について [編集 | ソースを編集]

debrisWikiは福島第一原子力発電所の炉内・格納容器内の状態推定やデブリ性状把握、及び、事故進展の解明についての研究成果を集約したサイトです。上記の分野の研究を行っており、且つ、その研究成果をdebrisWikiへ反映していただける研究者を募集しています。参加いただける研究者の専門を考慮して、編集していただくページについて相談いたします。debrisWikiには、閲覧・編集の権限を制限しているページがありますが、その範囲は研究者の所属を基に決定いたします。また、debrisWikiへ参加することで得た情報については、**免責事項**をご確認ください。

参加申込書方法 [編集 | ソースを編集]

debrisWikiの編集作業に参加を希望される方は氏名、所属、E-mailアドレスを記入の上、以下のE-mailアドレスまでお申し込みください。

E-mail : support[at]mail.fdada-plus.info

※ [at] は@に変換をお願いします。

送付されるE-mailの件名を「debrisWiki参加希望」とし、本文に以下の申し込みフォームを利用して登録情報を記入してください。debrisWikiへのログイン方法は登録いただいたE-mailアドレスへ送付いたします。debrisWikiにおける個人情報の取り扱いについて、**プライバシー・ポリシー**をご確認ください。

申し込みフォーム

氏名	:
氏名 (フリガナ)	:
氏名 (アルファベット)	:
所属	:
IRID組合員	: 組合員/非組合員/不明
E-mail	:

The image shows a Bing search for 'debrisWiki' with approximately 41,600 results. The top result is 'debrisWiki' with the URL 'https://fdada-plus.info'. Below the search results, there are several links to specific articles on the site, such as '事故進展の推定 - debrisWiki' and '炉内状況推定図 - debrisWiki'. An orange arrow points from the search results to the debrisWiki website interface shown below. The website interface includes a navigation menu, a search bar, and a list of content items like 'FACE members only', '分析データ IRID', and '事故進展の推定'. The JAEA and TEPCO logos are visible at the bottom of the page.

debriEye (デブリアイ)

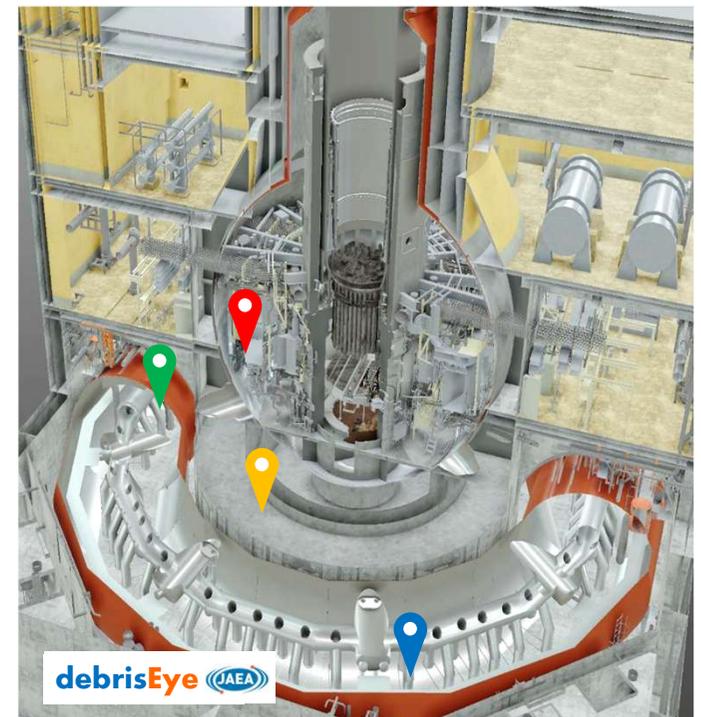


廃炉研究基盤情報集約アプリケーションソフト

－ 1F廃炉に関わる技術者・研究者のための共通1Fデジタルツインの構築に向けて－

【コンセプト】

- 1Fから得られた情報を取りこぼしなく「見える化」
- 導入の敷居は低く、簡単に操作
- ナレッジ共有



debrisEye開発環境



- debrisEye開発のためには以下のソフトウェアを使用

ソフトウェア名	用途
Unity	ゲーム開発エンジン。CGや点群データをインタラクティブに表示することが可能。また、ゲーム開発エンジンであるため、様々な拡張性がある。
SIMUNIMA	粒子（ポイント）データ及びサーフェスポリゴンを削減する機能や、必要な変換範囲を指定する機能により変換データを軽量化
Autodesk 3dsmax	3D モデリングおよびレンダリングのためのCGソフトウェア
Adobe Photoshop & Illustrator	写真や画像の加工・色の調整、複数画像の合成等
RealityCapture	写真から立体的なモデルを生成することのできるフォトグラメトリソフトウェア
DB Browser for SQLite	データベースを管理

debrisEye動作環境



- 導入の敷居を低くするため、20万円程度のWindows OSのゲーミングPCであれば快適に動作

CPU

- Intel Core i7/i9 series released after 2021
(Core i7/i9 11xxx/12xxx/13xxxx)

GPU

- Intel UHD 7xx series / intel iris Xe Graphics or higher
- NVIDIA RTX 3xxxx series is better for more comfortable use



debrisEye機能紹介・実演

基本的な操作方法

- 3Dモデルの回転・拡大・縮小により、360°任意の位置で表示可能
- 方位の情報についても表示

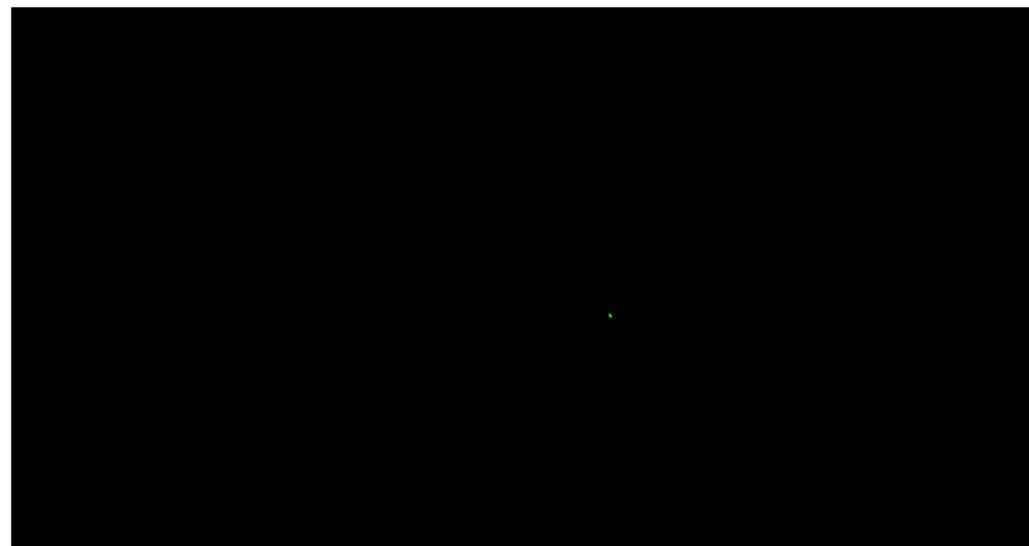
debrisEye 操作マニュアル

■ 長押し ■ ダブルクリック □ クリック

 + Alt モデルの回転	Alt + Enter フルスクリーンモード ON/OFF
 + Alt モデルの拡大・縮小	Alt + H 操作マニュアルパネルの表示 / 非表示
 モデルの拡大・縮小	Alt + I 設定・オブジェクトパネルの表示 / 非表示
 + ドラッグ カメラの回転	Alt + P ビンパネルの表示 / 非表示
 + ドラッグ モデルの平行移動	 + C クリッピングボックスの伸縮
 ウォークスルーモード前進	 オブジェクトのダブルクリック 視線方向の変更、ターゲットモデルの変更
 +  ウォークスルーモード前進・後退切り替え	

memo の削除

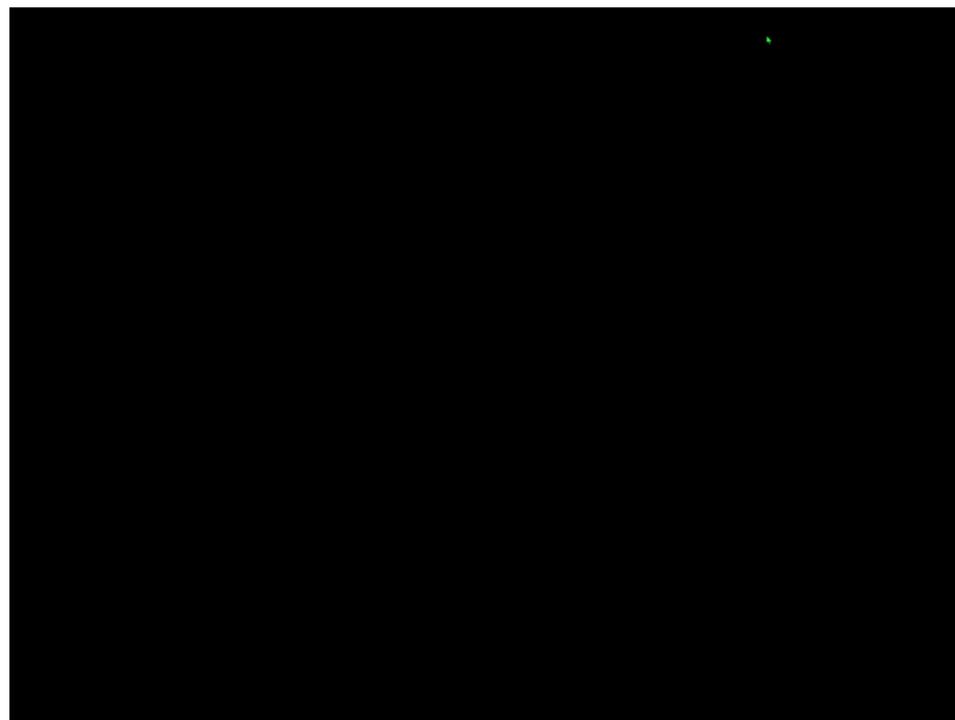
memo を削除する場合は、右クリックして表示された Delete ボタンを押します。



※：操作マニュアルパネルの表示/非表示：Alt+H

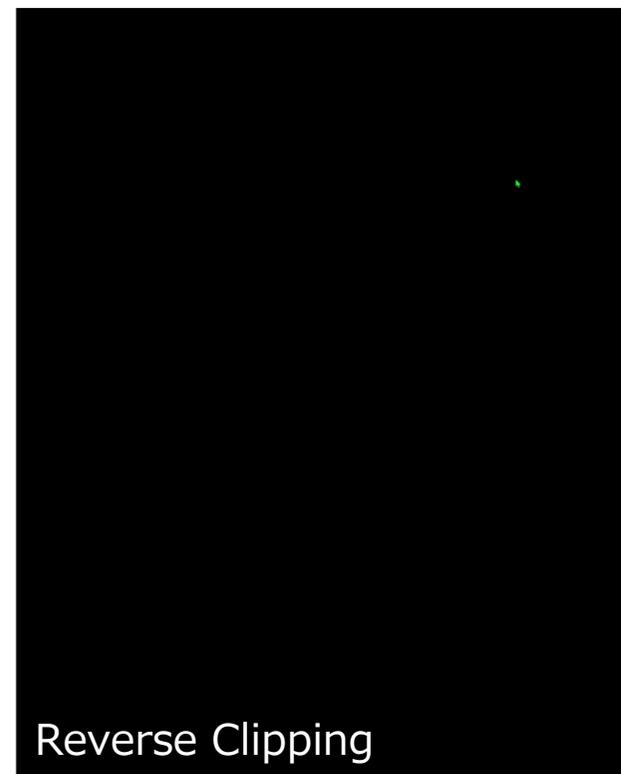
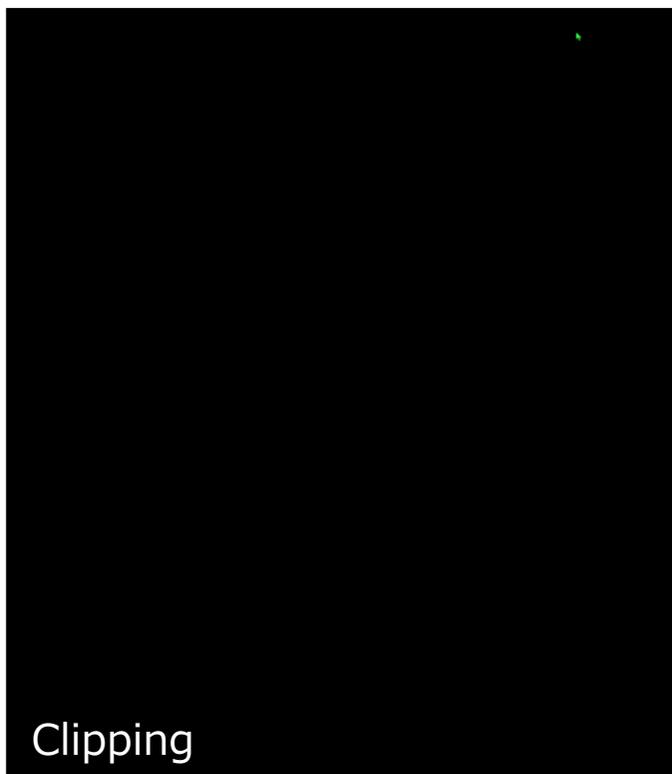
モデルの表示/非表示

- 3Dモデル毎に表示・非表示
- 一括表示のON/OFF機能も実装



クリッピング

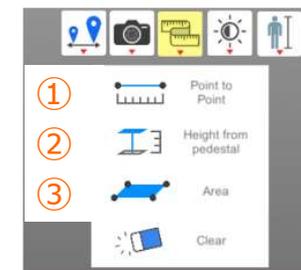
- クリッピングボックス領域内外の3Dモデルを非表示（クリッピング）
- Reverse Clippingを使用することで非表示範囲を逆転させることが可能



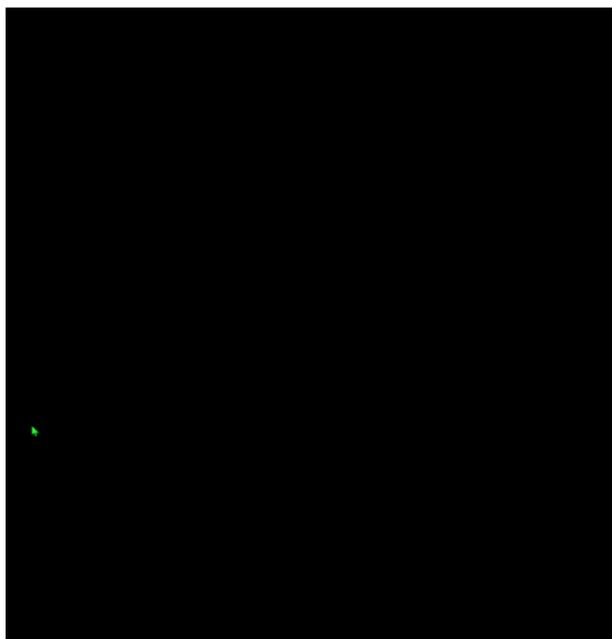
計測



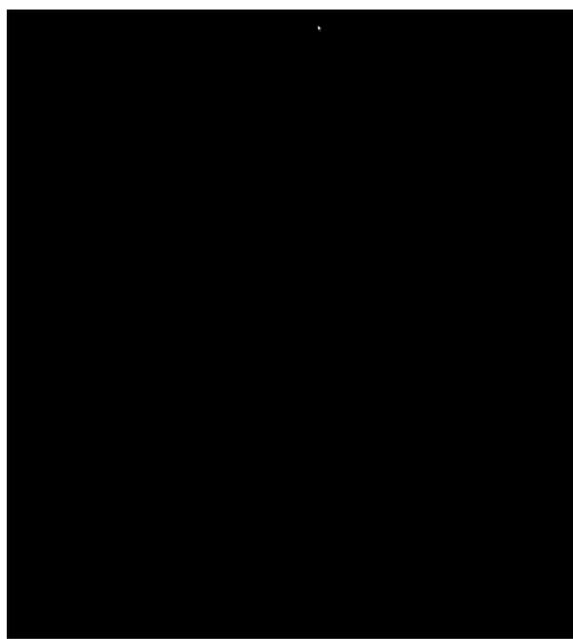
- ① 2点間距離、② ペDESTALからの高さ、
③ 面積を計測する機能を実装



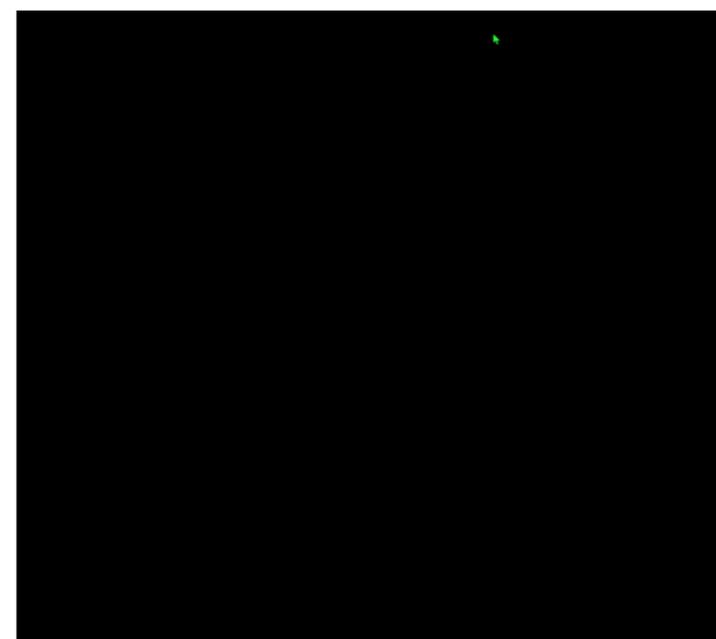
① 2点間距離



② ペDESTALからの高さ



③ 面積



ウォークスルー

- 3Dモデル内を歩き回ることが可能

1号機内部調査時のドローン映像
(ノイズリダクション有)



(3倍速で表示)



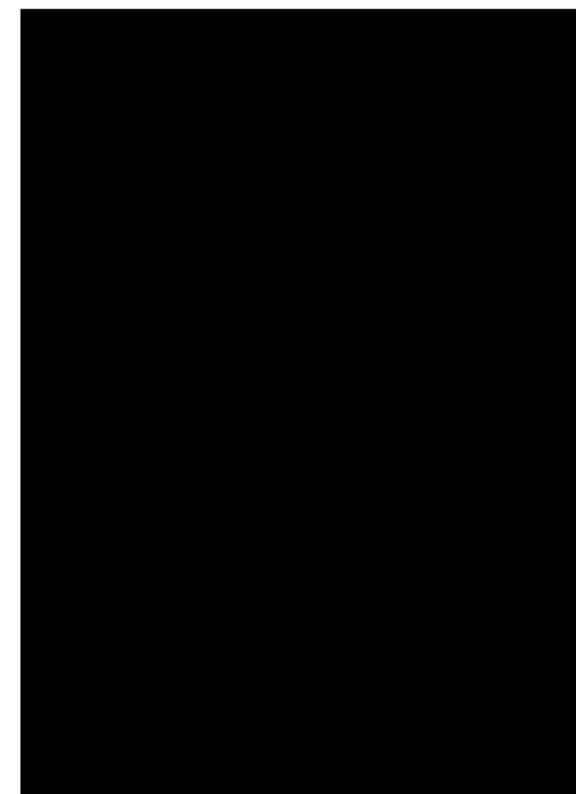
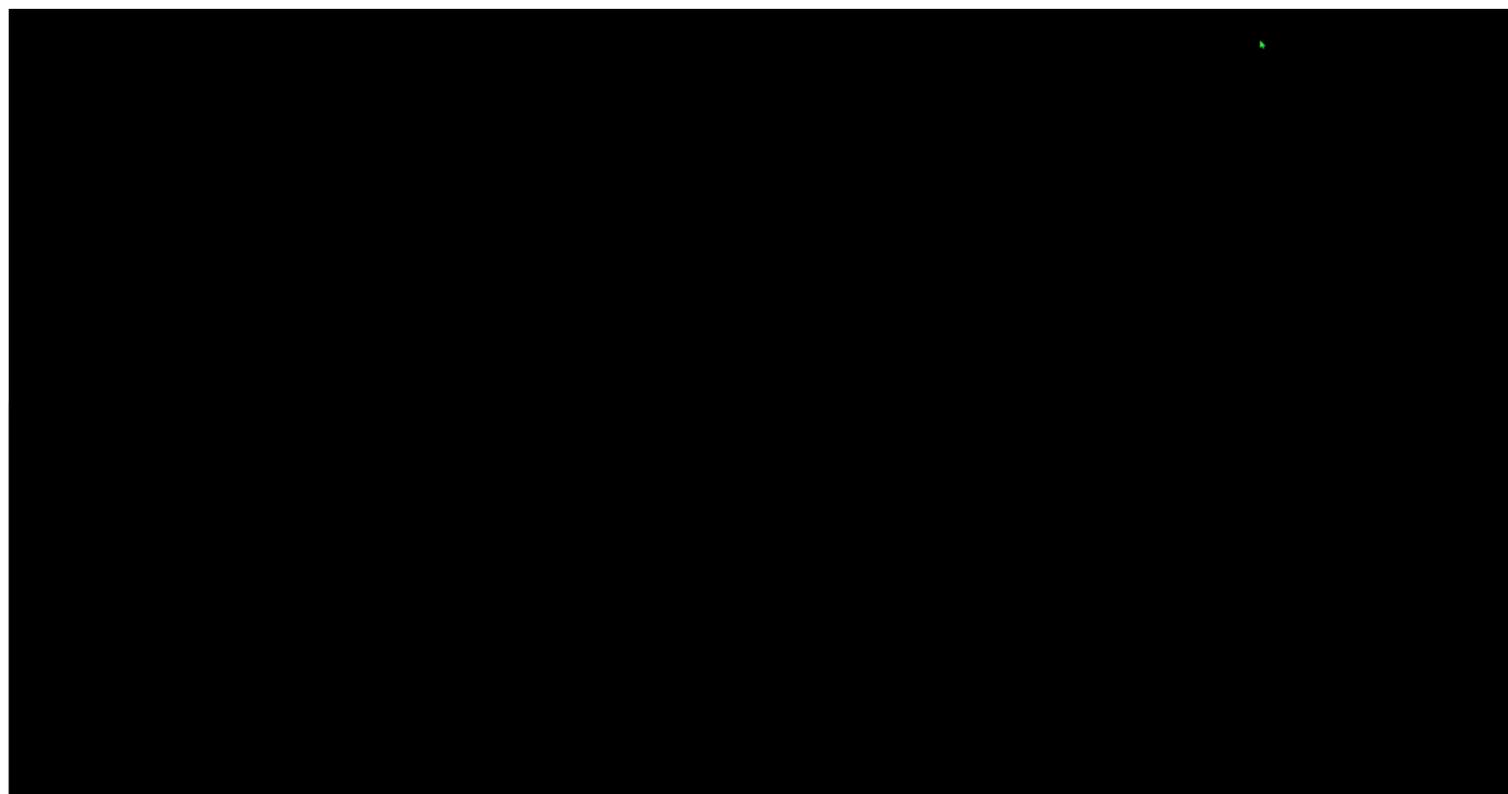
PIN（情報）の登録（1/2）



- 3Dモデル上の任意の地点にPINを設置し、情報を記録（debrisWikiとも連携）

PINの設置（**debrisWiki**との連携）

線量PINの設置



PIN (情報) の登録 (2/2)



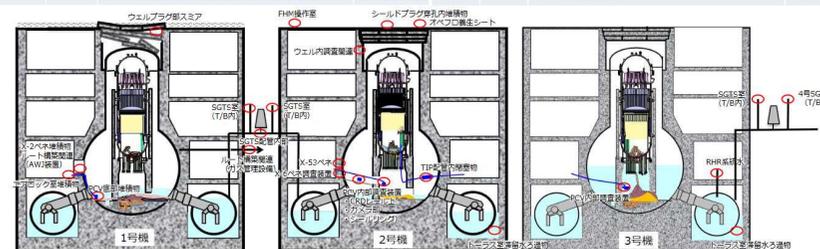
- 作成したPIN情報はDBに格納され、DBを共有することで、ユーザー同士でPIN情報を共有可能

事故分析関連で取得したサンプルについて [12]

事故分析関連で取得したサンプルの一覧



No.	号機	取得試料	採取時期	No.	号機	取得試料	採取時期
1	1	R/Bエアロック室堆積物	2015年度	13	2	R/Bトラス室滞留水	2018年度
2	1	PCV底部堆積物	2017年度	14	2	PCV貫通部 (X-6ベネ) 調査装置付着物	2020年度
3	1	ウェルプラグ部スミア	2019年度	15	2	SGTS室調査試料	2020年度
4	1	PCV貫通部 (X-2ベネ) 堆積物	2019年度	16	2	ウェル内調査関連試料	2021年度
5	1	PCV内部調査アクセスルート構築関連試料	2019年度	17	2	PCV貫通部 (X-53ベネ) 試料	2021年度
6	1	SGTS室調査試料	2020年度	18	2	シールドプラグ穿孔内堆積物	2021年度
7	1・2	1・2号機SGTS配管内部スミア	2020年度	19	2	FHM操作室スミア	2022年度
8	2	R/Bオペフロ養生シート	2013年度	20	3	PCV内部調査装置付着物	2017年度
9	2	TIP配管内閉塞物	2013年度	21	3	R/Bトラス室滞留水	2018年度
10	2	PCV内部調査装置付着物 (CRDレール上)	2016年度	22	3	RHR系統水	2021年度
11	2	PCV内部調査装置付着物 (カメラ部)	2017年度	23	3	SGTS室調査試料	2020年度
12	2	PCV内部調査装置付着物 (シールリング)	2018年度	24	4	SGTS室調査試料	2020年度



サンプル取得位置の概要

2

2D推定図へサンプルデータを書き込むのは、サンプルデータが増えると難しくなる。
 ➔ 3Dの位置情報で管理する必要性有り。

PINに登録した情報及び添付ファイルはDBに保存される。

名前	更新日時	種類
AttachFile	2024/08/06 16:56	ファイル フォルダ
pins.bytes	2024/08/06 16:57	BYTES ファイル

PINに登録された情報

DB Browser for SQLite

ファイル(F) 編集(E) ビュー(V) ツール(T) ヘルプ(H)

新しいデータベース(N) データベースを開く(O) 変更を書き込む

データベース構造 データ閲覧 プラガマ編集 SQL実行

テーブル(T): pin

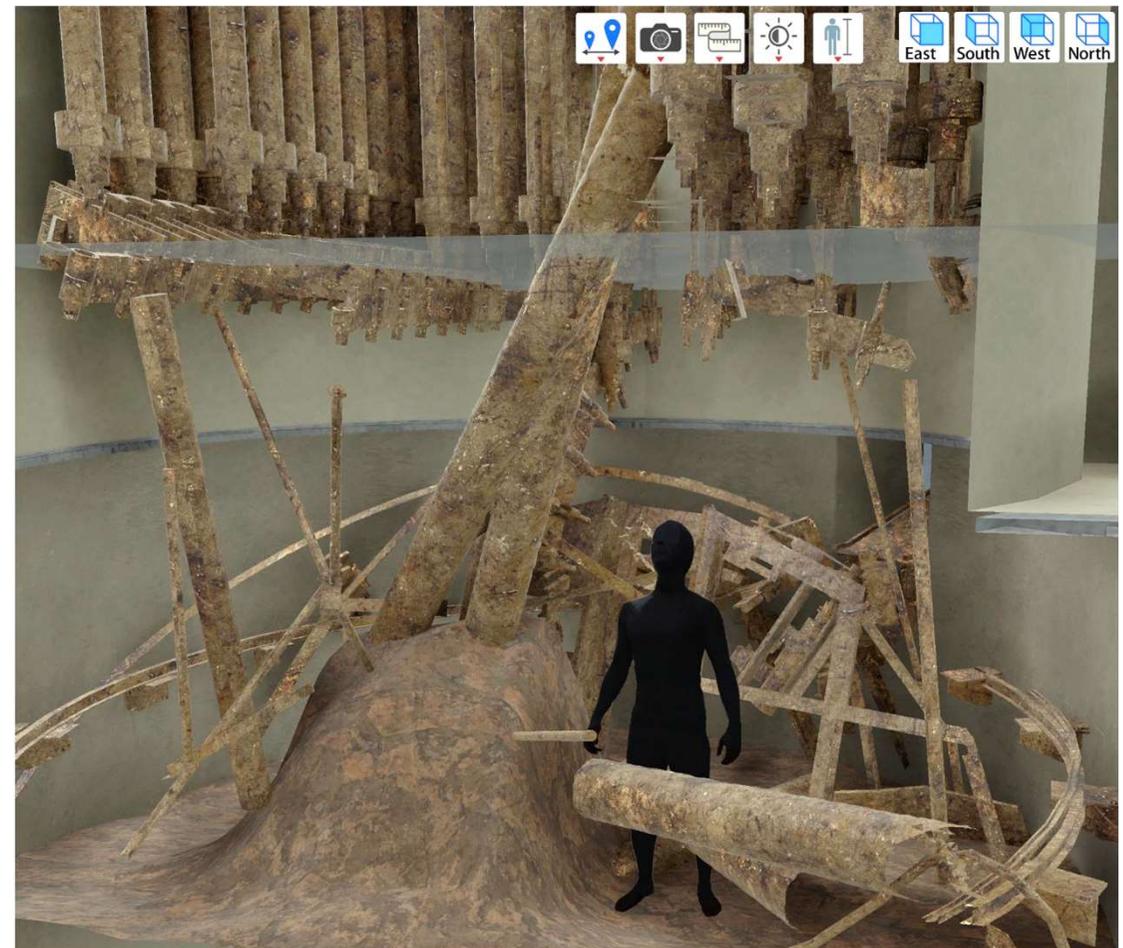
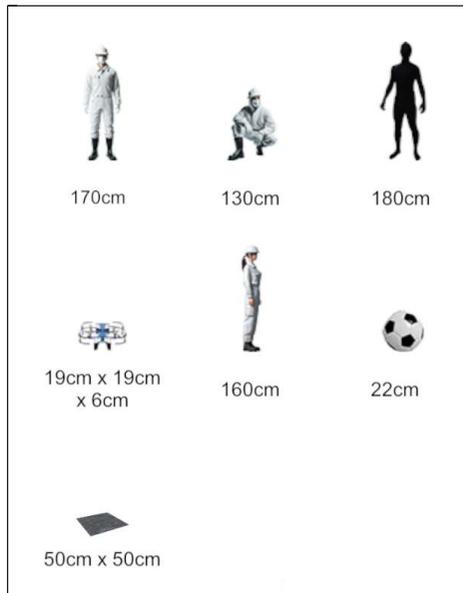
pin_id	x	y	z	ox	oy	oz	name	color	pinscale
1	1.231374	10.30632	0.09833445	0.0	0.0	0.0	Test1	1	1.0
2	1.87997	4.958023	21.04606	0.0	0.0	0.0	Test2	2	1.0
3	-1.573687	0.3322471	5.019947	0.0	0.0	0.0	Tsst3	4	1.0

ペDESTAL床中心を原点とした位置座標でデータが保存されている。

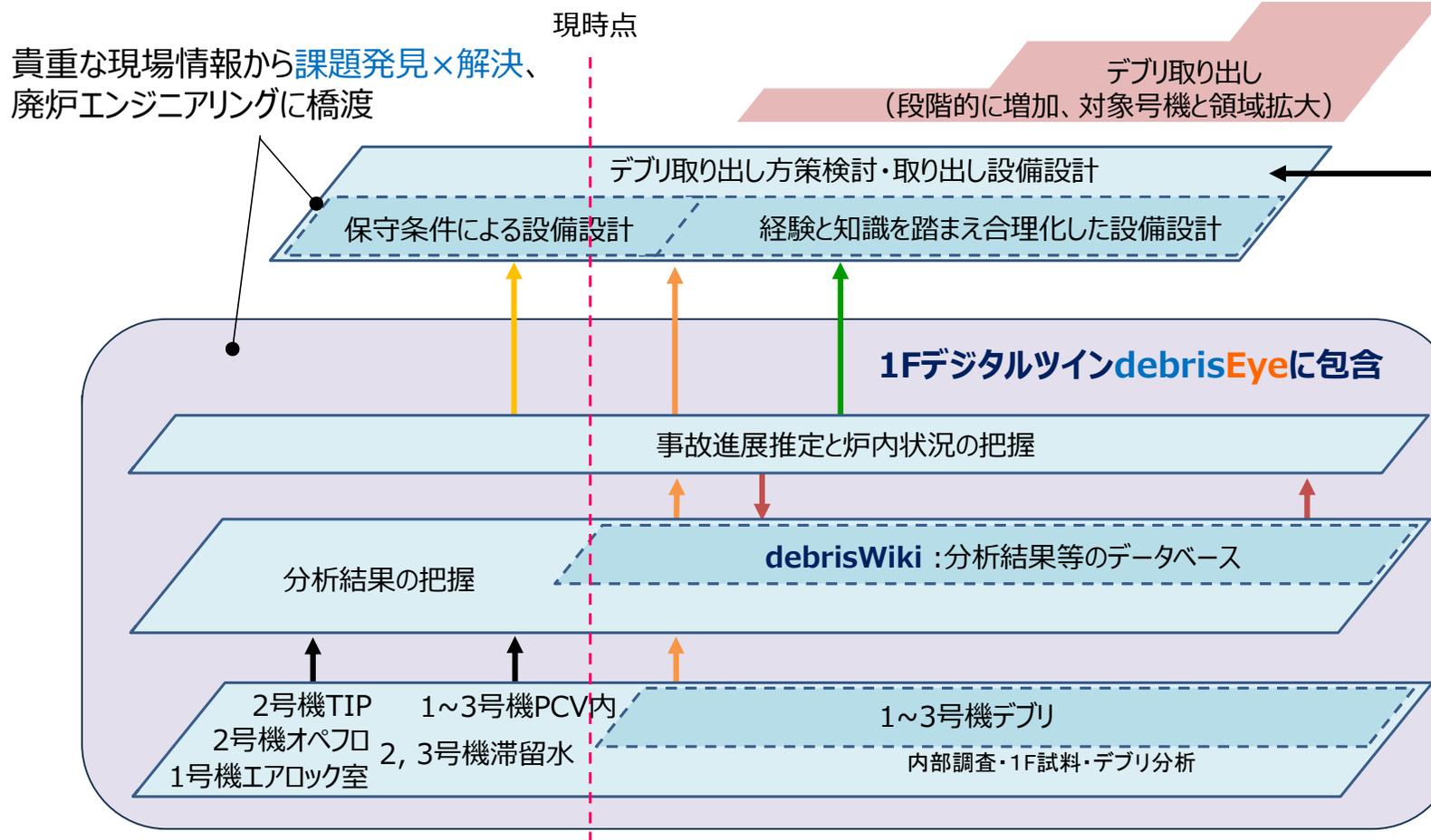
比較オブジェクトの配置



- 比較オブジェクトを配置可能
- 比較オブジェクトにより、1F内部のスケール感を直感的に把握



今後のdebrisEyeの開発について



Gameがベースとなっている debrisEyeは、ドローン等の調査やデブリ取り出しのシュミレーターとしても利用可能



参考文献



- [1]山下 他, “福島第一原子力発電所RPV損傷状況及び燃料デブリのPCV内移行挙動等の推定,1; 3D炉内状況推定図及びdebrisEyeの開発,”日本原子力学会2024年春の年会@近畿大学
- [2] Yamashita et al., “Development of 3D view application debrisEye for decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant,” Proceedings of ERMSAE2024, Sweden.
- [3] debrisWiki : <https://fdada-plus.info>
- [4] 令和4年度開始「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（原子炉圧力容器の損傷状況等の推定のための技術開発））」2022年度最終報告, https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20231019_JAEA.pdf
- [5] TEPCO : 2号機原子炉格納容器内部調査について（2018年2月6日）
https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/local_reconciliation/pdf/2018/1180206_05-j.pdf
- [6] Yamashita et al., “Post-Test Analyses of the CMMR-4 Test,” Nuclear Technology, <https://doi.org/10.1115/1.4051443>
- [7] ATOMICA:沸騰水型原子炉（BWR）, https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_02-01-01-01.html
- [8] Takuya Yamashita et al., “Comprehensive Analysis and Evaluation of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 3,” Nuclear Technology, <https://doi.org/10.1080/00295450.2022.2157663>
- [9] TEPCO: 3-D Rendering of Images obtained during the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 3 Primary Containment Vessel (PCV) Internal Investigation（2018年4月26日）https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2018/images/handouts_180426_03-e.pdf
- [10] TEPCO: 1号機 PCV内部調査（気中部調査）について（2024年6月27日）
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2024/06/06/3-3-4.pdf>
- [11] TEPCO:福島第一原子力発電所 1号機原子炉格納容器内部気中部調査の実施状況（2日目）について
https://tepco.webcdn.stream.ne.jp/www11/tepco/download/240321_j.zip
- [12] TEPCO: 事故分析関連で取得したサンプルについて（2023年5月22日）<https://www.nra.go.jp/data/000432015.pdf>