Oral presentation | V. Nuclear Fuel Cycle and Nuclear Materials：505-3 Decommissioning Technology of Nuclear Facilities

Thu. Sep 12, 2024 2:45 PM - 4:20 PM JST | Thu. Sep 12, 2024 5:45 AM - 7:20 AM UTC Room L(Recture RoomsB 2F B201)

[2L08-13] Decommissioning of 1F

Chair:Norikazu Kinoshita(Shimizu)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[2L08]

Considering the analysis of important nuclear species using SNMS and FIB-TOF-SIMS

*Riku Tokunaga[1], Tamaki Matsumura[1], Masato Morita[1], Tetsuo Sakamoto[1], Hideki Tomita[3], Masabumi Miyabe[2], Yoshihiro Iwata[2] (1. Kogakuin University, 2. JAEA, 3. Nagoya University)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[2L09]

Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit 1 Reactor Containment Vessel Internal Investigation

(1) Video recording by drone

*Yoichi Tomiki[1], Hiroshi Itikawa[1], Haruo Amari[1], Satoru Nakashima[1] (1. TEPCO HD)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[2L10]

Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit 1 Reactor Containment Vessel Internal Investigation

(2) Video Processing

*YOICHI SAKURAGI[1], Takamasa Tamura[2], Yoichi Tomiki[1], Satoru Nakashima[1] (1. TEPCO, 2. DENPO-ZI)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[2L11]

Design of a Monitoring System for Fuel Debris Retrieval Operations at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: Proposal of Physical Quantities to be Measured on Worksite

*Tessai Sugiura[1], Hajime Asama[1], Qi An[1], Atsushi Yamashita[1] (1. UTokyo)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[2L12]

Development of filling stabilization technology and fall prevention technology for the fuel debris retrieval at Fukushima Daiichi NPS

*Tomoya Shiga[1], Takashi Mitsui[1], Tsutomu Hayakawa[1], Masaki Jimba[1], Takashi Ito[1], Masanori Hatori[1], Itaru Suzuki[1] (1. Tousou Mirai Technology Co.)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[2L13]

Assessment of dust dispersion data for future safety analysis of Fukushima Daiichi fuel debris retrieval

(16)Simulation of dust dispersion in the core boring cutting experiment

*Kenta Kato[1], Kenta Inagaki[1], Tadafumi Koyama[1], Koichi Uozumi[1], Taizo Kanai[1], Kinya Nakamura[1], Shun Kanagawa[1], Takatoshi Hijikata[1], Tetsuya Kato[1], Daisuke Yamauchi[2] (1. CRIEPI, 2. TEPCO HD)

©Atomic Energy Society of Japan

4:15 PM - 4:20 PM JST | 7:15 AM - 7:20 AM UTC

Time reserved for Chair

©Atomic Energy Society of Japan

SNMS/FIB-TOF-SIMSによる重要核種の分析検討

Considering the analysis of important nuclear species using SNMS and FIB-TOF-SIMS

*徳永 陸[1]，松村 珠希[1]，森田 真人[1]，坂本 哲夫[1]，
富田 英生[2]，宮部 昌文[3]，岩田 圭弘[3]
[1]工学院大学，[2]名古屋大学，[3]原子力機構(JAEA)

福島第一原子力発電所の廃炉に必要な重要核種の性状把握手法について、元素イメージングと同位体比分析を同時に行うR-SNMS分析法の開発を行っている。本研究では、重要核種の一つであるNdについて、R-SNMSにおける共鳴イオン化スキームの検討を行った。

キーワード：質量分析，波長可変レーザー，廃炉措置

1. 背景

福島第一原子力発電所の廃炉作業において燃料デブリの性状把握はきわめて重要である。発表者らが開発したレーザー共鳴イオン化スパッタ中性子質量分析法（R-SNMS）では、共鳴イオン化現象を用いることで質量スペクトルにおける同重体干渉を抑制しつつ、微小粒子の元素イメージングと同位体比分析を同時に行うことができる[1][2]。しかしながら、効率のよいイオン化スキームの探索が必要である。そこで本研究では、重要核種の1つであるNdについて共鳴イオン化スキームの検討を行った。

2. 実験装置・結論

粉末状Ndの試薬をFIB-TOF-SIMS装置に導入し、R-SNMSモードで分析した。ここでは、先行研究にて報告された共鳴イオン化スキームを用いた。測定した各*m/z*のイオン計数の比より同位体比の測定値を得た。図１は測定値（緑線）と天然同位体比（赤）の比較図である。特に奇数質量数の同位体で比較的大きな差異が確認できた。今後、既知のイオン化スキーム[3]を用いて同様の測定を行い、イオン化の飽和と同位体比の差異より共鳴イオン化効率について考察する予定である。

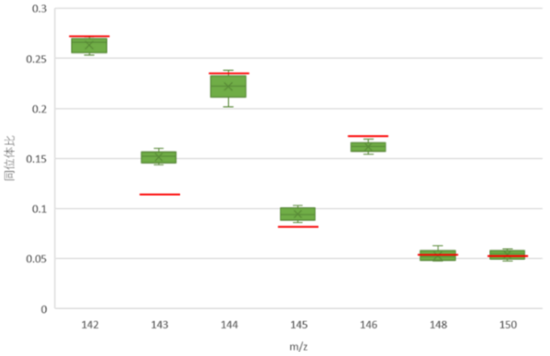

図１ 天然同位体比と測定値

参考文献

[1] T. Sakamoto, *et al*., Anal. Sci. **34**, 1265 (2018).

[2] H. Tomita, *et al*., Progress in Nuclear Science and Technology, **5**, 97 (2018).

[3] N. Liu *et al.,* 43rd Lunar and Planetary Science Conference (2012).

謝辞 本研究は、JAEA英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業JPJA21P21465814の助成を受けたものです。

*Riku Tokunaga[1], Tamaki Matsumura[1], Masato Morita[1], Tetsuo Sakamoto[1], Hideki Tomita[2], Masabumi Miyabe[3], Yoshihiro Iwata[3]

[1]Kogakuin Univ, [2]Nagoya Univ, [3]JAEA

福島第一原子力発電所 1 号機　原子炉格納容器内部調査
（1）ドローンによる映像取得

Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit 1 Reactor Containment Vessel Internal Investigation

(1) Video recording by drone

*富木 洋一 [1]，市川 裕士 [1]，甘利 治雄 [1]，中島 悟 [1]
[1] 東京電力ホールディングス

高線量下、暗所、狭所で映像撮影が可能なドローンシステムを開発した。ドローンシステムによる福島第一原子力発電所 1 号機 原子炉格納容器内部調査を行い、未到達エリアの映像撮影に成功した。

キーワード：PCV 内部調査，ドローン

1. 緒言

福島第一原子力発電所では、今後の廃炉作業に向け、格納容器内部の状況、堆積物へのアクセスルートの確認が求められており、特に 1 号機ではこれらの情報が不足している。高線量、暗所、狭所を飛行し映像撮影が可能な小型ドローンおよび小型ドローンを遠隔操作できるシステムを開発した。開発したドローンシステムにより、今後の廃炉作業立案に有用な、1 号機の格納容器内部の未到達エリアを含む映像撮影に成功した。

2. ドローンシステム概要

開発したドローンシステムは、図 1 に示すように、小型ドローン、通信中継器、コントロールシステムから構成される。小型ドローンは、格納容器内と建屋をつなぐ管路から挿入するため、20 ㎝角で、重量はバッテリー含め 200 g 以下である。防塵防水性能は IP52 相当、高感度カメラと LED 照明により暗所での撮影が可能である。通信中継器は、有線で接続されたコントロールシステムと無線で接続された小型ドローン間の通信を中継する。コントロールシステムは、小型ドローンから伝送されるリアルタイム映像を表示し、操作者はその映像を見ながらコントロールシステムを介して小型ドローンを操作する。また、ドローン内部に保存される高画質映像は、被ばく量を低減するためにコントロールシステムから遠隔でダウンロード可能とした。

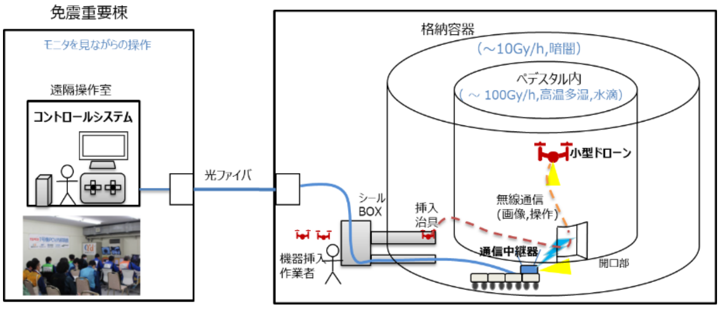

図 1　ドローンシステムによる調査概要

3. オペレーションおよび撮影結果

撮影は、複数回のモックアップ訓練の後、図 2 のように 2 日に分けて 4 機で実施した。1 日目は、格納容器気中部のペデスタルの外側を調査した。1 機目はペデスタル内へ続く開口部の状況および X-6 ペネ付近の状況を撮影した。2 機目は X-1 ペネ周辺および 2 階部分へのルートを主に撮影した。2 日目は中継器をロボットにより開口部に移動し、ペデスタルの中側（圧力容器直下）を調査した。3 機目ではペデスタル内側に垂れ下がる CRD ハウジングと付着物を主に撮影した。4 機目ではペデスタル内部の壁面や壁面に設置されているケーブル等を撮影した。

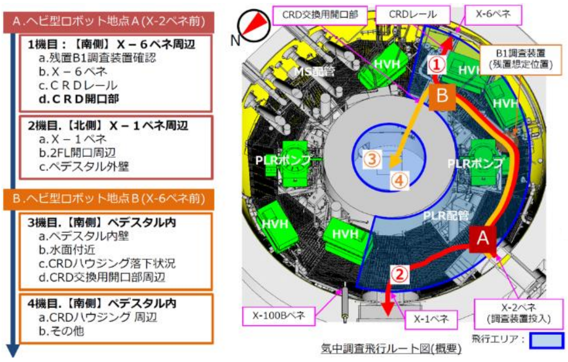

図 2 格納容器気中部 飛行ルート

*Yoichi Tomiki[1], Hiroshi Ichikawa[1], Haruo Amari[1], Satoru Nakashima[1]

[1]Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

福島第一原子力発電所 1 号機　原子炉格納容器内部調査
（２）映像処理

Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit 1 Reactor Containment Vessel Internal Investigation

(2) Video Processing

*桜木 洋一[1]，田村 隆匡[2]，富木 洋一[1]，中島 悟[1]

[1]東京電力ホールディングス（株） [2]（株）電報児

福島第一原子力発電所では事故後の原子炉格納容器(PCV)内部の状況を把握するため、小型ドローンによる調査を行った。取得した映像を基に Structure from Motion (SfM)により対象物の 3D データを生成し、点群、３D イメージを制作した。また、映像に映り込む放射線ノイズを基に線量率の推定を行った。

キーワード：Structure from Motion, 点群, 3D Gaussian Splatting, 放射線ノイズ

1. 緒言

福島第一原子力発電所では事故後の PCV 内部の状況を把握するため、小型ドローンによる調査を行った。点群データ等の３D 情報は、今後の燃料デブリ取り出しや PCV 内部調査の干渉確認、装置検討等に役立つものである。今回は活用取得した映像から３D 情報への変換を試みた。また、PCV 内部の線量の情報は今後、現場に投入するカメラやセンサの選定に役立つ情報である。今回は映像に映り込む放射線ノイズを基に線量率の推定にも試みた。

2. 映像の３D 情報への変換

SfM は複数の視点から撮影された画像を基に、①特徴点の検出とマッチング、②各画像の撮影位置の推定、③3D 点群の生成プロセスを経て、④3D シーンの描写や⑤3D モデルを再構築する技術である。今回の取り組みでは上記①、②にコンピュータビジョンの分野で広く使用されるオープンソースの Colmap、③、④に仏・情報自動制御研究所（Inria）と独・マックスプランク研究所（MPI）が開発している 3D Gaussian Splatting を使用した。（図１）

図１ ペデスタル（圧力容器直下）入口の３D シーン

3. 放射線ノイズを基に線量率の推定

映像に映り込む放射線ノイズは放射線がイメージセンサーの画素のフォトダイオードに衝突し、発生した二次電子が画素のフォトダイオードに感光と同じ状況を作り出すことによって生じると考えられる。よって、イメージセンサーに突入する放射線の量（線量率）と放射線ノイズの量には比例関係があると考えられる。この仮定の下、ドローンで飛行しながら撮影した映像に映り込んだ放射線ノイズの量を計測し、その量から飛行ルート上の線量率を推定した。（図２）

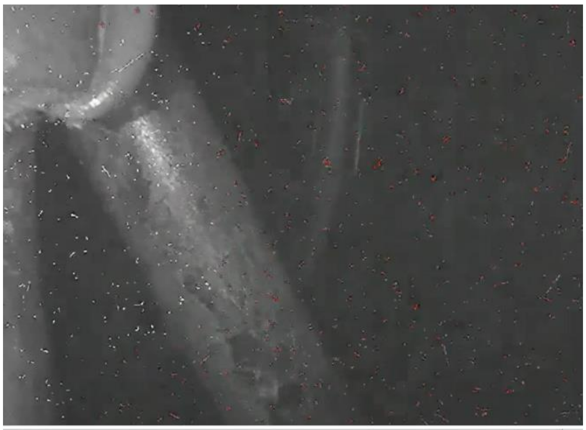

図２ 比例計算に用いた放射線ノイズ（赤点）

*Yoichi Sakuragi[1], Takamasa Tamura[2], Yoichi Tomiki[1], Satoru Nakashima[1]

[1]Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

[2]DENPO-ZI, Inc.

福島第一原子力発電所における燃料デブリ取り出し作業向け監視システム設計：作業現場で計測する物理量の提案

Design of a Monitoring System for Fuel Debris Retrieval Operations at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: Proposal of Physical Quantities to be Measured on Worksite

*杉浦 鉄宰[1]，淺間 一[1]，安 琪[1]，山下 淳[1]
[1]東京大学

福島第一原子力発電所（1F）における溶融した燃料（デブリ）の取り出しを対象に、Objective Tree（OT）と Failure mode and effect analysis（FMEA）を組み合わせたリスク分析を行い、デブリ取り出し時の機能劣化メカニズムとその原因を抽出し、作業現場で計測する物理量を監視システム設計の要求仕様として提案する。

キーワード：福島第一原子力発電所，廃炉，リスク分析，Objective tree，Failure mode and effect analysis

1. 緒言 1F の遠隔操作によるデブリ取り出しでは、原子炉格納容器（PCV）内での安全状態維持機能（安全機能）と取り出し作業機能（作業機能）の維持が求められる。よって各機能に影響を与えるメカニズム発生の認知性を高めるため、監視システム設計の要求仕様として作業現場で計測する物理量（計測物理量）の提案は重要だが十分になされていない。一方、機械設計における要求仕様の策定方法として、Fault tree analysis（FTA）と FMEA を組み合せたリスク分析手法がある。しかしデブリの取り出しは操業実績が無く、メカニズム発生の頻度データが必要な FTA の活用は難しい。そこで本研究では定性的なリスク分析を前提に、OT と FMEA を組み合せた機能劣化メカニズムの発生原因を認知する計測物理量の決定方法を検討する。本方法を気中取り出し工法へ適用し、監視システム設計の要求仕様となる計測物理量を新たに提案する。

2. リスク分析手法 リスク分析手順を図 1 に示す。OT は、FMEA が導出した機器劣化メカニズムの発生原因に基づき計測物理量を決定する。この計測物理量は監視システム設計の要求仕様となる。FMEA は決定した計測物理量を踏まえて、燃料デブリ取り出し作業において達成されるべき目的に対する機能劣化メカニズムの致命度を分析する。この分析結果は、要求仕様の実現優先度を設計者が判断する指標となる。

3. 計測物理量の検討結果 開発中の気中取り出し工法[1]の通常の運用状態に対して計測物理量を検討した。作業機能は「自機と構造物の距離［m］、デブリ加工範囲［m］」など空間認知要求が多くを占めた。安全機能（気相閉じ込め）は「デブリ加工時に発生するアブレシブとダストの配管内流入量［kg/m^3］」など設備系統内へ流入する異物の認知要求が多くを占めた。また異物の発生元となる「アブレシブ使用量［kg/day］」や、機能劣化の直接原因を認知する「系統内ガス流量［L/s］」も挙げられた。

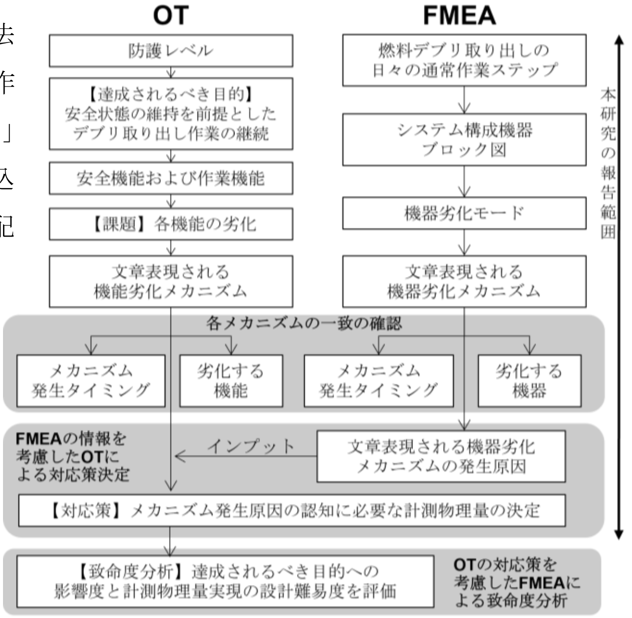

図 1 OT と FMEA を組合せたリスク分析手順

4. 結言 監視システム設計の要求仕様として通常の運用状態での計測物理量を提案した。

謝辞 本研究は、経済産業省「廃炉・汚染水対策事業」として参考文献[1]の開発を担った IRID および東芝エネルギーシステムズ（株）関係者の助言を賜った。深く感謝申し上げる。

参考文献 [1] IRID, 原子炉格納容器内の連続的な監視システムの開発（2022 年度最終報告）, https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2023/06/2022011renzokukanshi202306F.pdf

*Tessai Sugiura[1], Hajime Asama[1], Qi An[1] and Atsushi Yamashita[1]
[1]The University of Tokyo

福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出し工法における充填安定化技術、加工時落下対策技術の開発

Development of filling stabilization technology and fall prevention technology for the fuel debris retrieval at Fukushima Daiichi NPS

*志賀 倫哉[1]、三井 崇[1]、早川 努[1]、神馬 正樹[1]、伊東 敬[1]、羽鳥 正訓[1]、鈴木 格[1]
[1]東双みらいテクノロジー株式会社

燃料デブリ取り出しを実施する上で、炉心部や炉底部の解体加工時の安全や効率を向上する対策が必要と考えられている。上記対策の一環として、東双みらいテクノロジー㈱では、充填安定化技術、加工時落下対策技術の開発に取り組んでいる。本書では、上記各開発の進捗と今後の計画について紹介する。

キーワード：福島第一原子力発電所、燃料デブリ取り出し工法、充填安定化技術、加工時落下対策技術

1. 緒言

充填安定化技術とは、燃料デブリや炉内構造物等を充填材で固化安定化することで脱落防止等を図るとともに切断・撤去をより効率的に行う技術である。落下対策技術とは、燃料デブリや炉内構造物の落下による再臨界防止およびダスト飛散を抑制する工法である。それぞれの工法について、炉内損傷状況等の前提条件を設定し、設定した前提条件に基づき要求事項を整理した。この要求事項を満足し得る充填施工方法と加工時落下対策案を検討し、実環境を模した試験によりそれらの妥当性を検証する計画である。

2. 開発進捗

2-1. 充填安定化技術（適用例：図 1 参照）

炉内の損傷状況・炉底部開口等の前提条件を設定し、充填材の抽出、有効な充填安定化方法、装置構成および充填手順等の現場適用性に関する要求事項を整理した。

要求事項の整理の結果、現場適用性に優れる充填材の主要な候補としてジオポリマーを選定した。

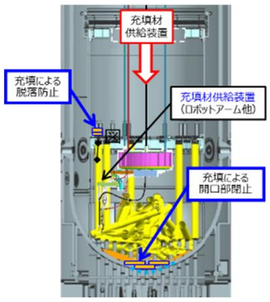

図 1　充填安定化技術

2-2. 加工時落下対策技術（適用例：図 2 参照）

落下エネルギーの大きい CRD ハウジングを想定落下物として設定し、複数の落下対策案を比較評価した。開発優先度の高い案として、落下防止シート、緩衝体等を抽出した。

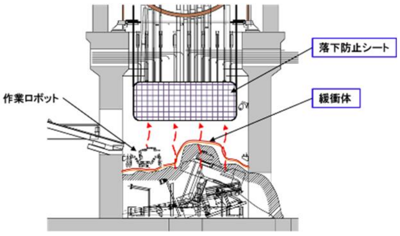

図 2　落下対策案
（落下防止シート、緩衝体）

3. 今後の計画

選定された充填材を使用して、現場環境を模擬した充填試験および規模を拡大した要素試験により充填安定化技術の現場適用の可否を検証する。

また、抽出した落下対策について要素試験を実施し、衝撃吸収性、ダスト飛散防止、遠隔施工性等を検証する。

4. 結論

燃料デブリ取り出し工法のうち、充填安定化技術および、加工時落下対策技術に関する開発の進捗と今後の計画を紹介した。本開発成果を通じて、東京電力ホールディングス株式会社殿と協力し、燃料デブリ取り出しの早期実現を目指していく。

5. 謝辞

本研究は、経済産業省／令和 5 年度開始「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（燃料デブリ取り出し工法の開発（気中上取り出し工法における充填安定化技術、加工時落下対策技術の開発））」として実施したものであり、東京電力ホールディングス株式会社をはじめ、日立ＧＥニュークリア・エナジー株式会社、株式会社 IHI の各社ご協力により得られた成果である。

参考文献

[1] 令和 3 年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金」「燃料デブリの取り出し工法の開発」2022 年度最終報告　技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

*Tomoya Shiga[1]、 Takashi Mitsui[1]、 Tsutomu Hayakawa[1]、 Masaki Jimba[1]、 Takashi Ito[1]、 Masanori Hatori[1]、 Itaru Suzuki[1]
[1]Tousou Mirai Technology Co. Ltd.

福島第一原子力発電所の燃料デブリ取出しに向けたダスト飛散率データの整備
（16）コアボーリング切削における飛散ダスト挙動の解析

Assessment of dust dispersion data for future safety analysis of Fukushima Daiichi fuel debris retrieval
(16) Simulation of dust dispersion in the core boring cutting experiment

*加藤健太 [1]、稲垣健太 [1]、小山正史 [1]、魚住浩一 [1]、金井大造 [1]、中村勤也 [1]、金川俊 [1]、
土方孝敏 [1]、加藤徹也 [1]、山内大典 [2]、戸塚文夫 [2]、茂木一貴 [2]、岩田裕一 [2]
[1]電中研，[2]東電 HD

切削試験と数値解析を用いたダスト飛散率データ整備を行っている。本発表では、コアボーリングを用いた切削試験の再現解析を行い、本試験におけるダスト飛散特性を明らかにする。

キーワード： ダスト、飛散挙動、粒子追跡法

1. 緒言

燃料デブリ取り出しには、切削によるダストの発生・移行挙動を考慮した安全評価技術が必要である[1]。これまで我々は、様々な切削工法を用いて模擬材を切削することで飛散率データの整備を行ってきた。また、CFD と粒子追跡法に基づいたダスト飛散挙動の解析手法を構築し、ダストの性状やケーシングの形状の違いによるダスト飛散特性への影響を明らかにした。本発表では、電中研で実施されたドライ環境でのコアボーリング試験[2]の再現解析を行い、ダスト飛散特性を明らかにする。

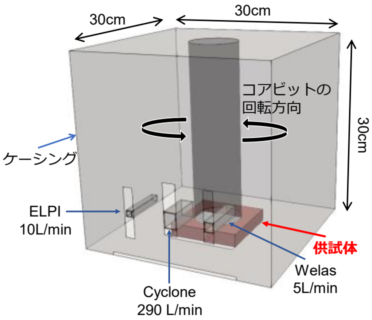

図 1解析モデル

2. 再現解析

解析モデルとして、試験体系と同様な、図 1に示す 30cm 角の小型ケーシングにコアビットと 3 本のサンプリング管（ELPI/Cyclone/Welas）からなる系を想定する。小型ケーシングを用いたためサンプリング管とダスト発生個所は物理的に近く、また、Cyclone は他の 2 つに比べ 290 L/min と 1 桁以上大きな体積流量でダストのサンプリングを行っている。

はじめに、サンプリング管の位置や流量がダスト回収率（回収された粒子数/初期粒子数）に与える影響を評価するため、それぞれのダスト回収率の比較を行った。その結果、回収された粒子の絶対数は体積流量の大きい Cyclone が最も大きくなるが、体積流量で除した回収濃度に換算すると、それぞれサンプリング管の回収濃度は同程度となった。これは異なる位置で実施したサンプリングによる回収率の評価値が位置や流量に依存せず、各サンプリング管で得られた飛散率が十分な代表性を有していることを示している。

一方で、コアボーリングでは切削によって発生した多くのダストが供試体表面近傍を飛散する。そのため、飛散挙動は供試体表面等の壁面近傍における流速の減衰の影響を強く受ける。そこで、壁面流速とセル流速の間を補完することで供試体表面やケーシングの壁の効果を組み込み、再現解析を行った。壁の効果を考慮していない場合では、直径 10μm 以下のほぼ全てのダストが回収されるが、壁の効果を考慮した場合、ダストは飛散せずにビット周りに堆積する結果となった。試験で得られた飛散率は典型的には 1%程度であり、そのほとんどが飛散せずコアビット周囲に堆積することが明らかになっており、解析結果と試験結果が一致することで本解析手法の妥当性が確認された。

3. 結論

本解析では、試験で測定したダスト回収率がサンプリング管の位置や流量に依存していないことを示すと共に、壁近傍の流速分布を精緻化することでコアボーリングによる低い飛散率の再現を可能とした。今後、試験で得られた飛散率データから実機の評価に適用可能な参照データを得るために数値解析による試験データの外挿などが重要な役割を果たすと考えられる。そのため、さらなる大規模計算や実環境を模擬する湿式条件などの解析に向けた解析手法の高度化を継続する。

参考文献

[1] 小山正史、他、日本原子力学会 2022 年秋の大会 2B20 (本シリーズ(1))
[2] 魚住浩一、他、日本原子力学会 2023 年秋の大会 1F13 (本シリーズ(8))

＊本研究は、令和 5 年度開始「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（安全システム（ダスト飛散率データ取得））」によって実施したものです。

* Kenta Kato[1], Kenta Inagaki[1], Tadafumi Koyama[1], Koichi Uozumi[1], Taizo Kanai[1], Kinya Nakamura[1], Shun Kanagawa[1], Takatoshi Hijikata[1], Tetsuya Kato[1], Daisuke Yamauchi[2], Fumio Totsuka[2], Kazutaka Mogi[2], Yuichi Iwata[2] [1]CRIEPI, [2]TEPCO