



JAEA-Review

2025-050

DOI:10.11484/jaea-review-2025-050

第10回「次世代イニシアティブ廃炉技術 カンファレンス (NDEC-10)」報告集

Proceedings of the 10th “Conference for R&D Initiative on
Nuclear Decommissioning Technology by the Next Generation”

(編) 宇佐美 博士 伊藤 倫太郎 眞田 幸尚
(Eds.) Hiroshi USAMI, Rintaro ITO and Yukihsa SANADA

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

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science
Fukushima Research and Engineering Institute

February 2026

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)
は、下記までお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.
Availability and use of the results of this report, please contact
Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department,
Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

第 10 回「次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス (NDEC-10)」報告集

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
(編) 宇佐美 博士、伊藤 倫太郎、眞田 幸尚

(2025 年 10 月 31 日受理)

東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置は、長期にわたるプロジェクトであり、このようなプロジェクトを遂行していくには、今後の廃止措置を担う若い技術者や研究者の育成が必要かつ喫緊の課題となっている。

この課題に対し、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では、廃炉研究に取り組んでいる学生のための「次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス (Conference for R&D Initiative on Nuclear Decommissioning Technology by the Next Generation : NDEC)」を 2016 年から継続的に開催してきている。

NDEC は、人材育成と若手研究者ネットワーク形成を目的とした学生の研究成果発表の場であり、廃止措置に関係する若者が互いに成果を発表し、切磋琢磨することで研究活動に対するモチベーションを高めることを目的として実施している。

第 10 回目となる NDEC-10 を、2025 年 2 月 26 日(水)-27 日(木)の 2 日間にわたり、福井県敦賀市の文化交流センター「プラザ萬象」で開催した。

本報告集は、これらの発表内容をまとめ、NDEC の活動を広く周知するために公開するものである

**Proceedings of the 10th “Conference for R&D Initiative on Nuclear Decommissioning
Technology by the Next Generation”**

(Eds.) Hiroshi USAMI, Rintaro ITO and Yukihiisa SANADA

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science
Fukushima Research and Engineering Institute
Japan Atomic Energy Agency
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

(Received October 31, 2025)

The decommissioning of the TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station is a long-term project, and the training of young engineers and researchers who will be responsible for future decommissioning is a necessary and urgent task.

Since 2016, Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science has been continuously organizing “Conference for R&D Initiative on Nuclear Decommissioning Technology by the Next Generation (NDEC)” for students who are engaged in research activities for decommissioning.

NDEC is a forum for students to present their research for the purpose of human resource development and networking among young researchers, and to increase their motivation for decommissioning research.

NDEC-10 was held at “Plaza-Bansho” in Tsuruga-City, Fukui Prefecture, from February 26 -27, 2025.

This proceeding compiles the contents of report papers in the conference.

Keywords: Decommissioning, Development of Human Resources, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

目 次

1. はじめに	1
2. NDEC-10 全体プログラム	2
3. 学生発表（オーラル）	3
3.1 セッション 1（燃料デブリ等分析・評価技術部門）	3
3.1.1 模擬燃料デブリ合成による凝固経路図の検証と実デブリ形成条件の推定 秋元 佑介、宇埜 正美（福井大学）	5
3.1.2 生成 AI によるデータ拡張を用いた燃料デブリ識別モデルの作成の検討 木村 朋希、藤本 勝成（福島大学）	6
3.1.3 運転実績データが無い燃料デブリ取り出しシステムに対する致命度分析 杉浦 鉄宰、中島 慎介、安 琪、山下 淳（東京大学）	7
3.1.4 燃料デブリの化学性状分析のためのマルチスケール分光分析の構築 遠藤 瞭 ¹ 、秋山 大輔 ¹ 、横田 優貴 ¹ 、桐島 陽 ¹ 、岡本 芳浩 ² 、熊谷 友多 ² 、蓬田 匠 ² 、 谷田 肇 ² （ ¹ 東北大学、 ² 原子力機構）	8
3.1.5 部分溶出した金属イオンの ICP-MS 分析と線形判別分析 勝又 風雅 ¹ 、十文字 快 ¹ 、丹治 珠緒 ¹ 、高貝 慶隆 ¹ 、藤本 勝成 ¹ 、嘉山 馨菜 ² 、 古川 真 ³ （ ¹ 福島大学、 ² 筑波大学、 ³ PerkinElmer Japan）	9
3.1.6 部分溶出した金属イオンの ICP-MS 分析と密度ベースクラスタリング 十文字 快 ¹ 、勝又 風雅 ¹ 、丹治 珠緒 ¹ 、高貝 慶隆 ¹ 、藤本 勝成 ¹ 、嘉山 馨菜 ² 、 古川 真 ³ （ ¹ 福島大学、 ² 筑波大学、 ³ PerkinElmer Japan）	10
3.1.7 核分裂生成物の有効利用に関する検討 -熱や粗さの影響を考慮した第一原理計算 による白金族合金の触媒機能評価- 杉崎 麻子 ¹ 、森 翔太 ¹ 、奥村 雅彦 ² 、佐藤 勇 ¹ （ ¹ 東京都市大学、 ² 原子力機構）	11
3.2 セッション 2（保全等技術開発部門）	13

3.2.1	地震被害を受けた RC 造建物の層レベルの被災度判定と将来の地震に対する応答推定	
	大竹 菜月、大野 歩美、前田 匡樹（東北大学）	15
3.2.2	限られた加速度計の地震応答観測記録に基づく RC 造建物の層レベルの構造健全性評価手法の提案	
	大野 歩美、前田 匡樹（東北大学）	16
3.2.3	サブテラヘルツ波によるコンクリート内部の鋼材およびその腐食検知に関する基礎的研究（その 1：反射率による腐食鋼材の判別）	
	倉品 吏玖 ¹ 、國生 梨花 ¹ 、西脇 智哉 ¹ 、田中 章夫 ² （ ¹ 東北大学、 ² 日本工業大学）	17
3.2.4	サブテラヘルツ波によるコンクリート内部の鋼材およびその腐食検知に関する基礎的研究（その 2：パワーアンプを用いた探査深度向上の検討）	
	國生 梨花 ¹ 、倉品 吏玖 ¹ 、西脇 智哉 ¹ 、田邊 匡生 ² （ ¹ 東北大学、 ² 芝浦工業大学）	18
3.2.5	原子カプラントの廃止措置に伴う鉛ブロックの切断手法の研究開発	
	五嶋 智久（福井工業大学）	19
3.2.6	低圧コールドスプレー法による配管穴あき損傷部補修技術の確立	
	舟木 大河、嶋原 航大、齋藤 宏輝、市川 裕士、小川 和洋（東北大学）	20
3.2.7	鋼管により開口補強した RC 造耐震壁のせん断抵抗機構と補強効果に関する実験	
	根本 大成、ジョナサン モニカル、前田 匡樹（東北大学）	21
3.3	セッション 3（放射線計測・核種移行評価等技術部門）	23
3.3.1	Cs 汚染コンクリートに対する浸透・溶出挙動の研究 -モルタル構造における水セメント比の影響評価-	
	恵木 仁大、佐藤 勇（東京都市大学）	25
3.3.2	処分場のセメント利用に伴うコロイド状ケイ酸の生成とその核種移行抑制について	
	佐野 嵩、千田 太詩、関 亜美、新堀 雄一（東北大学）	26
3.3.3	福島復興に向けた多機能巡回ロボットシステムの開発と検証	
	北川 琳久、松日楽 信人、鈴木 俊一（東京大学）	27

3.3.4	中性子検出のための ⁶ Li添加 Tl:Cs ₃ (Cu,Li) ₂ I ₅ シンチレータの開発 浦野 雄介、黒澤 俊介、山路 晃広、吉川 彰（東北大学）	28
3.3.5	スクリーン印刷法によるコンバータ膜を用いた太陽電池中性子線量計の開発 小林 歩人 ¹ 、栗本 祐司 ¹ 、岡本 保 ¹ 、上川 由紀子 ² 、奥野 泰希 ³ 、小林 知洋 ³ (¹ 木更津工業高等専門学校、 ² 産業技術総合研究所、 ³ 理化学研究所)	29
3.3.6	モニタリングポスト削減のための LSTM を用いた空間放射線量率推定 菅原 和将（東京大学）	30
3.3.7	軽量遮蔽体による減衰を活用した非指向性検出器による高線量 3次元空間における放射線源分布推定 森田 英嗣、中島 慎介、安 琪、山下 淳（東京大学）	31
4.	学生発表（ポスター）	33
4.1	グループ 1	33
4.1.1	ホウ酸塩共存系における事故廃棄物のセメント固化を想定した Ca-Al-Si 系水和物と Eu の相互作用 市田 正、関 亜美、千田 太詩、新堀 雄一（東北大学）	35
4.1.2	MOX 成分を含む放射性廃棄物の安定固化を目指した中性子吸収剤添加ブラネライトの合成と評価 海老澤 青輝、秋山 大輔、横田 優貴、桐島 陽（東北大学）	36
4.1.3	事故廃棄物のセメント固化を想定した Ca-Al-Si 系水和物とヨウ素の相互作用に及ぼす硫酸イオンの影響 星 雄翔、関 亜美、千田 太詩、新堀 雄一（東北大学）	37
4.1.4	処分環境におけるフライアッシュ混合セメントによる亜セレン酸イオン固定化の予察検討 荒谷 慎人、関 亜美、千田 太詩、新堀 雄一（東北大学）	38
4.1.5	放射性廃棄物処分環境における過飽和ケイ酸の析出によるセシウムの移行抑制効果に関する予察 梶木 稜太、千田 太詩、関 亜美、新堀 雄一（東北大学）	39

4.1.6	福島第一原子力発電所における固体廃棄物貯蔵庫収納容器内の放射能インベントリの推定手法の開発 石橋 賢人（福井大学）	40
4.1.7	原子炉内部での無線通信を可能にするための高放射線耐性受信機 成清 泰斗、谷中 瑚太郎、白根 篤史（東京科学大学）	41
4.1.8	SEEM 学構築に向けた 1F 廃炉エスノグラフィシステム 吉田 佳乃子 ¹ 、中尾 虹海 ¹ 、安田 仲宏 ¹ 、高橋 信 ² 、渡邊 豊 ² 、小山 智加 ³ 、 米山 照彦 ³ 、小野 晋太郎 ³ (¹ 福井大学、 ² 東北大学、 ³ 株式会社構造計画研究所)	42
4.1.9	充電/通信回路を分離したハーモニックセンサノード 濱田 清空、村田 翔、芹澤 伊織、久我 宣裕（横浜国立大学）	43
4.1.10	センサ電圧をアナログ変調するハーモニックセンサノード 村田 翔、芹澤 伊織、濱田 清空、久我 宣裕（横浜国立大学）	44
4.2	グループ 2	45
4.2.1	ハイパースペクトルイメージングによる 1F 炉内物質の把握 佐藤 亨哉 ¹ 、牟田 浩明 ¹ 、沖田 隆文 ¹ 、坂口 知聡 ² 、坂本 寛 ² 、大場 弘則 ³ 、 若井田 育夫 ³ 、Paul Murray ⁴ (¹ 大阪大学、 ² NFD、 ³ 原子力機構、 ⁴ University of Strathclyde)	47
4.2.2	原子炉内無線通信に向けた 2.4GHz 帯電力増幅器の高放射線耐性化 谷中 瑚太郎、成清 泰斗、白根 篤史（東京科学大学）	48
4.2.3	サブストレート型 CdTe 太陽電池線量計の開発 森野 達也、高椋 勇士朗、栗本 祐司、岡本 保（木更津工業高等専門学校）	49
4.2.4	CsI(Tl)シンチレータと MPPC を用いた放射線検出回路に関する研究 大谷 治輝、米田 知晃（福井工業高等専門学校）	50
4.2.5	個人被ばく線量計応用を企図した Eu 添加ホウ酸ナトリウムガラスの放射線誘起蛍光特性に関する研究 竹下 朔也 ¹ 、福嶋 宏之 ¹ 、米田 知晃 ¹ 、遠藤 優介 ² 、坪内 廉 ² 、中内 大介 ² 、 柳田 健之 ² (¹ 福井工業高等専門学校、 ² 奈良先端科学技術大学院大学)	51

4.2.6 PIN フォトダイオードを用いた X 線検出器の作製 前枝 遼夜、米田 知晃（福井工業高等専門学校）	52
4.2.7 金属粉末を添加した FRP 遮蔽材の高性能化 大内 紘斗、鈴木 茂和、赤尾 尚洋（福島工業高等専門学校）	53
4.2.8 核分裂生成物の有効利用に関する検討 第一原理計算を用いた白金族合金の熱力学的諸量評価 森 翔太（東京都市大学）	54
4.2.9 福島第一原子力発電所廃炉について学ぶ 橋本 拓真、平 晃伎、望月 陽向、山根 勝、鈴木 茂和、赤尾 尚洋 （福島工業高等専門学校）	55
4.2.10 1F3 デブリ - 構造物相互作用の推定に向けた高精度 FSI 計算手法の開発に関する研究 益子 智成、横山 諒（東京大学）	56
5. NDEC-10 実行委員会名簿	57

Contents

1. Introduction	1
2. Program of NDEC-10.....	2
3. Presented at Oral Sessions.....	3
3.1 Session 1 (Fuel Debris Analysis and Evaluation Technologies)	3
3.1.1 Verification of Solidification Path Diagram by Synthesizing Simulated Fuel Debris and Estimation of Actual Debris Formation Conditions Yusuke AKIMOTO, Masayoshi UNO (University of Fukui)	5
3.1.2 Study on the Creation of Fuel Debris Identification Model Using Data Augmentation by Generative AI Tomoki KIMURA, Katsushige FUJIMOTO (Fukushima University)	6
3.1.3 Fatality Analysis for Fuel Debris Retrieval System Without Operational Data Tessai SUGIURA, Shinsuke NAKASHIMA, Qi AN, Atsushi YAMASHITA (University of Tokyo)	7
3.1.4 Construction of Multiscale Spectroscopic Analysis for Chemical Property Analysis of Fuel Debris Ryo ENDO ¹ , Daisuke AKIYAMA ¹ , Yuki YOKOTA ¹ , Akira KIRISHIMA ¹ , Yoshihiro OKAMOTO ² , Yuta KUMAGAI ² , Takumi YOMOGIDA ² , Hajime TANIDA ² (¹ Tohoku University, ² JAEA)	8
3.1.5 ICP-MS Analysis and Linear Discriminant Analysis of Partially Eluted Metal Ions Fuga KATSUMATA ¹ , Kai JUMONJI ¹ , Tamao TANJI ¹ , Yoshitaka TAKAGAI ¹ , Katsushige FUJIMOTO ¹ , Kana KAYAMA ² , Makoto FURUKAWA ³ (¹ Fukushima University, ² University of Tsukuba, ³ PerkinElmer Japan)	9
3.1.6 ICP-MS Analysis and Density-Based Clustering of Partially Eluted Metal Ions Kai JUMONJI ¹ , Fuga KATSUMATA ¹ , Tamao TANJI ¹ , Yoshitaka TAKAGAI ¹ , Katsushige FUJIMOTO ¹ , Kana KAYAMA ² , Makoto FURUKAWA ³ (¹ Fukushima University, ² University of Tsukuba, ³ PerkinElmer Japan)	10

3.1.7	Study on Effective Utilization of Fission Products – Evaluation of Catalytic Function of Platinum Group Alloys by First-Principles Calculation Considering Effects of Heat and Roughness	Asako SUGIZAKI ¹ , Shota MORI ¹ , Masahiko OKUMURA ² , Isamu SATO ¹ (¹ Tokyo City University, ² JAEA)	11
3.2	Session 2 (Maintenance Technology Development)		13
3.2.1	Damage Assessment at Floor Level and Response Estimation for Future Earthquakes in RC Buildings Damaged by Earthquakes	Natsuki OTAKE, Ayumi OONO, Masaki MAEDA (Tohoku University)	15
3.2.2	Proposal of Structural Integrity Evaluation Method at Floor Level for RC Buildings Based on Limited Accelerometer Earthquake Response Records	Ayumi OONO, Masaki MAEDA (Tohoku University)	16
3.2.3	Fundamental Study on Detection of Steel Reinforcement and Its Corrosion Inside Concrete Using Sub-Terahertz Waves (Part 1: Corroded Steel Identification by Reflectivity)	Riku KURASHINA ¹ , Rika KOKUSHO ¹ , Tomoya NISHIWAKI ¹ , Akio TANAKA ² (¹ Tohoku University, ² Nihon Institute of Technology)	17
3.2.4	Fundamental Study on Detection of Steel Reinforcement and Its Corrosion Inside Concrete Using Sub-Terahertz Waves (Part 2: Improvement of Exploration Depth Using Power Amplifier)	Rika KOKUSHO ¹ , Riku KURASHINA ¹ , Tomoya NISHIWAKI ¹ , Tadao TANABE ² (¹ Tohoku University, ² Shibaura Institute of Technology)	18
3.2.5	Research and Development of Cutting Method for Lead Blocks in Decommissioning of Nuclear Power Plants	Tomohisa GOTO (Fukui University of Technology)	19
3.2.6	Establishment of Repair Technology for Pipe Perforation Damage Using Low-Pressure Cold Spray Method	Taiga FUNAKI, Kodai SHIGIHARA, Hiroki SAITO, Yuji ICHIKAWA, Kazuhiro OGAWA (Tohoku University)	20
3.2.7	Experimental Study on Shear Resistance Mechanism and Reinforcement Effect of RC Seismic Walls Strengthened with Steel Pipe Openings	Taisei NEMOTO, Jonathan MONICAL, Masaki MAEDA (Tohoku University)	21

3.3 Session 3

(Radiation Measurement and Radionuclide Migration Evaluation Technologies) -----	23
3.3.1 Study on Penetration and Elution Behavior of Cs-Contaminated Concrete – Evaluation of Water-Cement Ratio Effects in Mortar Structures Norimasa EGI, Isamu SATO (Tokyo City University) -----	25
3.3.2 Generation of Colloidal Silica Due to Cement Use in Disposal Sites and Its Suppression of Radionuclide Migration Takashi SANO, Taiji CHIDA, Tsugumi SEKI, Yuichi NIIBORI (Tohoku University) -----	26
3.3.3 Development and Verification of a Multifunctional Patrol Robot System for Fukushima Reconstruction Riku KITAGAWA, Nobuto MATSUHIRA, Shunichi SUZUKI (University of Tokyo) -----	27
3.3.4 Development of ${}^6\text{Li}$ -Doped $\text{Tl}:\text{Cs}_3(\text{Cu},\text{Li})_2\text{I}_5$ Scintillator for Neutron Detection Yusuke URANO, Shunsuke KUROSAWA, Akihiro YAMAJI, Akira YOSHIKAWA (Tohoku University) -----	28
3.3.5 Development of Solar Cell Neutron Dosimeter Using Converter Film by Screen Printing Method Ayuto KOBAYASHI ¹ , Yuji KURIMOTO ¹ , Tamotsu OKAMOTO ¹ , Yukiko KAMIKAWA ² , Yasuki OKUNO ³ , Tomohiro KOBAYASHI ³ (¹ National Institute of Technology, Kisarazu College, ² National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ³ RIKEN) -----	29
3.3.6 Estimation of Spatial Radiation Dose Rate Using LSTM for Monitoring Post Reduction Kazumasa SUGAWARA (University of Tokyo) -----	30
3.3.7 Estimation of Radiation Source Distribution in High-Dose 3D Space Using Non-Directional Detector with Attenuation by Lightweight Shielding Eiji MORITA, Shinsuke NAKASHIMA, Qi AN, Atsushi YAMASHITA (University of Tokyo) -----	31

4. Presented at Poster Session	33
4.1 Group 1	33
4.1.1 Interaction Between Ca-Al-Si Hydrates and Eu in Borate Coexisting System Assuming Cement Solidification of Accident Waste Tadashi ICHIDA, Tsugumi SEKI, Taiji CHIDA, Yuichi NIIBORI (Tohoku University)	35
4.1.2 Synthesis and Evaluation of Neutron Absorber-Added Brannerite for Stable Solidification of Radioactive Waste Containing MOX Components Aoki EBISAWA, Daisuke AKIYAMA, Yuki YOKOTA, Akira KIRISHIMA (Tohoku University)	36
4.1.3 Effect of Sulfate Ions on Interaction Between Ca-Al-Si Hydrates and Iodine Assuming Cement Solidification of Accident Waste Yuto HOSHI, Tsugumi SEKI, Taiji CHIDA, Yuichi NIIBORI (Tohoku University)	37
4.1.4 Preliminary Study on Fixation of Selenite Ions by Fly Ash Mixed Cement in Disposal Environment Makito ARATANI, Tsugumi SEKI, Taiji CHIDA, Yuichi NIIBORI (Tohoku University)	38
4.1.5 Preliminary Study on Suppression Effect of Cesium Migration by Precipitation of Supersaturated Silica in Radioactive Waste Disposal Environment Ryota SUGIKI, Taiji CHIDA, Tsugumi SEKI, Yuichi NIIBORI (Tohoku University)	39
4.1.6 Development of Estimation Method for Radioactivity Inventory Inside Solid Waste Storage Containers at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Kento ISHIBASHI (University of Fukui)	40
4.1.7 High Radiation Tolerant Receiver for Wireless Communication Inside Reactor Yasuto NARUKIYO, Kotaro YANAKA, Atsushi SHIRANE (Institute of Science Tokyo)	41
4.1.8 1F Decommissioning Ethnography System for SEEM Construction Kanoko YOSHIDA ¹ , Nanami NAKAO ¹ , Nakahiro YASUDA ¹ , Makoto TAKAHASHI ² , Yutaka WATANABE ² , Tomoka KOYAMA ³ , Teruhiko YONEYAMA ³ , Shintaro ONO ³ (¹ University of Fukui, ² Tohoku University, ³ Kozo Keikaku Engineering Inc.) ---	42

4.1.9	Harmonic Sensor Node with Separated Charging/Communication Circuit Kiyoku HAMADA, Sho MURATA, Iori SERIZAWA, Nobuhiro KUGA (Yokohama National University)	43
4.1.10	Harmonic Sensor Node with Analog Modulation of Sensor Voltage Sho MURATA, Iori SERIZAWA, Kiyoku HAMADA, Nobuhiro KUGA (Yokohama National University)	44
4.2	Group 2	45
4.2.1	Understanding of In-Reactor Materials at 1F Using Hyperspectral Imaging Yukiya SATO ¹ , Hiroaki MUTA ¹ , Takafumi OKITA ¹ , Chisato SAKAGUCHI ² , Kan SAKAMOTO ² , Hironori OHBA ³ , Ikuo WAKAIDA ³ , Paul MURRAY ⁴ (¹ Osaka University, ² NFD, ³ JAEA, ⁴ University of Strathclyde)	47
4.2.2	Radiation Hardening of 2.4GHz Band Power Amplifier for In-Reactor Wireless Communication Kotaro YANAKA, Yasuto NARUKIYO, Atsushi SHIRANE (Institute of Science Tokyo)	48
4.2.3	Development of Substrate-Type CdTe Solar Cell Dosimeter Tatsuya MORINO, Yushiro TAKAMUKU, Yuji KURIMOTO, Tamotsu OKAMOTO (National Institute of Technology, Kisarazu College)	49
4.2.4	Study on Radiation Detection Circuit Using CsI(Tl) Scintillator and MPPC Haruki OTANI, Tomoaki YONEDA (National Institute of Technology, Fukui College)	50
4.2.5	Study on Radiation-Induced Fluorescence Characteristics of Eu-Doped Sodium Borate Glass for Personal Dosimeter Application Sakuya TAKESHITA ¹ , Hiroyuki FUKUSHIMA ¹ , Tomoaki YONEDA ¹ , Yusuke ENDO ² , Ren TSUBOUCHI ² , Daisuke NAKAUCHI ² , Takayuki YANAGIDA ² (¹ National Institute of Technology, Fukui College, ² NAIST)	51
4.2.6	Fabrication of X-Ray Detector Using PIN Photodiode Haruya MAEEDA, Tomoaki YONEDA (National Institute of Technology, Fukui College)	52

4.2.7	Performance Enhancement of FRP Shielding Material with Added Metal Powder Hiroto OUCHI, Shigekazu SUZUKI, Takahiro AKAO (National Institute of Technology, Fukushima College)	53
4.2.8	Study on Effective Utilization of Fission Products – Thermodynamic Property Evaluation of Platinum Group Alloys Using First-Principles Calculation Shota MORI (Tokyo City University)	54
4.2.9	Learning About the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Takuma HASHIMOTO, Koki TAIRA, Hinata MOCHIZUKI, Masaru YAMANE, Shigekazu SUZUKI, Takahiro AKAO (National Institute of Technology, Fukushima College)	55
4.2.10	Study on Development of High-Precision FSI Calculation Method for Estimating 1F3 Debris–Structure Interaction Tomonari MASHIKO, Ryo YOKOYAMA (University of Tokyo)	56
5.	List of NDEC-10 Executive Committee Members	57

This is a blank page.

1. はじめに

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）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は、政府の「東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏まえ、福島第一原子力発電所廃炉に係る研究開発を一体的に進める研究体として 2015 年に原子力機構福島研究開発部門に廃炉国際共同研究センター（Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science : CLADS クラッズ）として組織された。

CLADS の使命は、国内外の英知を結集し、福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた研究開発・人材育成を加速させるため、CLADS を中核とし、廃炉現場のニーズを一層踏まえた国内外の研究機関等との研究開発・人材育成の取組を推進することである。

本報告集で取りまとめた次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス（NDEC）は、文部科学省からの補助事業として CLADS が実施している「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」における第一期の人材育成プログラム採択校（東京大学、東北大学、東京工業大学、福島大学、福島工業高等専門学校、早稲田大学）が自ら実行委員会を組織し、福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究開発に打ち込む学生同士の交流の場として、また実際に現場で活動している方々との意見交換を通して、学生の廃炉研究に対するモチベーションを高めるためのイベントとして、2016 年度に企画・組織した会議体であり、以降毎年度継続して開催してきている※。

本報告集は、2024 年度に開催した NDEC-10 における発表内容をまとめたものである。

※ 本会議体は当初は大学・高専等による自主運営であったが、2020 年度より原子力機構 CLADS が共催として加わり、本会議体を通じた廃炉人材育成事業をサポートしている。

2. NDEC-10 全体プログラム

全体プログラム（2025年2月26日）

			会場 (部屋名)	司会・座長
12:30 - 13:00	受付		小ホール前	
13:00 - 13:05	開会挨拶	宇壁 正美 (実行委員会委員長・福井大学・教授)	小ホール	実行委員会事務局
13:05 - 13:10	来賓挨拶	鈴木 顕 (文部科学省 研究開発局 原子力課 放射性廃棄物企画室長)		
13:20 - 15:30	研究発表：オール (発表10分、質疑5分)	セッション1 発表7件：燃料デブリ等分析・評価技術部門	会議室1	佐藤先生 (京都市大)
		セッション2 発表7件：保全等技術開発部門	会議室2	小原先生 (東京科学大)
		セッション3 発表7件：放射線計測・核種移行評価等技術部門	会議室3	渡邊先生 (東北大)
15:40 - 16:40	研究発表：ポスター		小ホール	
16:40 - 17:45	企業ブース	企業ブースは学生セッションと並列で終日 (12:30-17:45) 実施します。 ※ 16:40-17:45は企業ブースのみ実施。	小ホール前	
17:45 - 18:00	休憩			
18:00 - 19:30	表彰式 (懇親会)	鈴木 俊一 (表彰委員会委員長・東京大学・特任教授) ※ 受賞者から一言	小ホール	実行委員会事務局

全体プログラム（2025年2月27日）

			会場 (部屋名)	司会・座長
9:30 - 10:20	招待講演	石川 真澄 (東双みらいテクノロジー株式会社・代表取締役社長)	小ホール	実行委員会事務局
10:20 - 10:35	会場準備・休憩		小ホール	
10:35 - 11:45	パネルディスカッション	紀室 辰伍 (資源エネルギー庁)、高橋 純平 (福井大学06)、 中森 文博 (電中研)、樽見 直樹 (電中研)	小ホール	宇壁先生 (福井大)
11:45 - 11:50	閉会挨拶	渡邊 豊 (実行委員会副委員長・東北大・教授)	小ホール	実行委員会事務局

3. 学生発表（オーラル）

3.1 セッション1

（燃料デブリ等分析・評価技術部門）

This is a blank page.

3.1.1 模擬燃料デブリ合成による凝固経路図の検証と 実デブリ形成条件の推定

福井大学
福井大学

秋元 佑介
宇埜 正美

Yusuke Akimoto
Masayoshi Uno

1. 緒言

福島第一原子力発電所のPCV内部調査で採取されたU含有粒子デブリサンプルの状態は、号機・領域で異なり、その形成条件は定かでない。組成等のデブリサンプル分析データを参照した模擬試験によって、その形成条件を見出すことができれば事故進展シナリオの精緻化や炉内から取り出されたデブリの分析において有用な知見となる。JAEAでは事故時に予想される凝固経路を推定するために、デブリサンプルの金属元素比を固定(U:Zr:Fe=25.7:41.2:33.1)し、酸化度(Mole of Fraction, MFO)をパラメータにした熱力学計算を行うことで、デブリサンプルの凝固経路図(Fig. 1)¹⁾がMFO毎に作成された。本研究ではその凝固経路図を参照した模擬試験を、最高温度・冷却速度・酸素濃度等をパラメータとして試験することでデブリの化学状態に影響を与える形成条件を評価した。

結果で見られる10%程度のFe固溶度を持ったZrO₂は作成できなかったため、酸化雰囲気での熱処理試験を行った。二つ目は、事故初期フェーズの実機燃料のようにUO₂ペレットとZryおよびSUSの熔融金属が接触した状態から出発する反応対試験であり、反応層の厚さや反応生成物の組成等の情報、凝固経路図との比較を目的とした試験である。

3. 結果と考察

Table1に示すように、酸化雰囲気では、不活性雰囲気試料のような相分離を起こさず、Fe固溶度が高いTetragonal-ZrO₂固溶体が析出した。雰囲気中の酸素濃度は酸化物相の組成や相分離に影響を及ぼす条件であると考えられる。

UO₂とZry・SUSの反応対試験では、最高温度2000℃で15分保持した試料の反応層の厚さは約0.1mmであったが、2000℃15分の熱処理を4回繰り返した試料では高さ1cmのUO₂ペレット全体で反応物が見られ、UO₂との酸化還元によるZrO₂の生成とFe₂U・Fe₂Zrといった金属間化合物の生成が確認された。

本研究は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」の支援を受けた研究成果の一部である

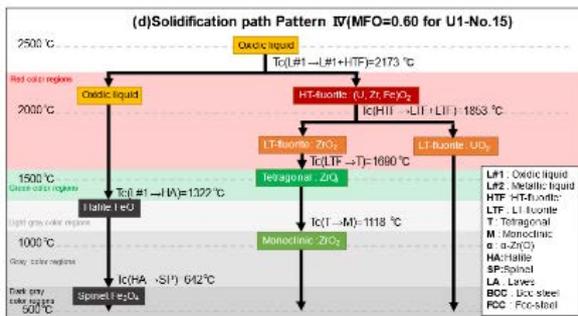


Fig. 1 Solidification path diagram of Unit1-No.15 debris sample¹⁾

2. 実験方法

UO₂を溶かしてデブリを直接合成することは困難であるため二種類の加熱方法による実験を行った。一つ目はMFOが調整された混合粉末ペレットの熱処理試験である。この模擬試験は最高温度・冷却速度を設定した熱処理を行うことで凝固経路図の検証を行う。これまで行ってきた不活性雰囲気での試験では、U1-No. 15 サンプルの分析

Table 1 Products from pellet heat treatment test

1500°C Ar gas	1500°C Ar+O ₂ (2%) gas
Fluorite- (U _{0.92} Zr _{0.04} Fe _{0.04})O _{2±x}	-
Tetra- (Zr _{0.92} U _{0.05} Fe _{0.03})O _{2±x}	Tetra- (Zr _{0.51} U _{0.30} Fe _{0.19})O _{2±x}
Fe	

参考文献

[1] Hiroshi Ohgi, Yuji Nagae, Masaki Kurata
“Thermodynamic Evaluation on Solidification Path for U-Zr-Fe-O corium”, FDR2022-1066

3.1.2 生成 AI によるデータ拡張を用いた燃料デブリ識別モデルの作成の検討

福島大学
福島大学

木村 朋希
藤本 勝成

Tomoki KIMURA
Katsushige FUJIMOTO

1. 緒言

本研究の目的は、福島第一原子力発電所 2 号機の内部調査によって得られた映像[1]をもとに、燃料デブリ・構造部材の識別をするモデルの作成を検討することである。

本研究では、先行研究[2]との比較を実施した。比較の目的は、生成 AI によるデータ拡張の活用による燃料デブリ識別モデルの精度が向上するかを検討するためである。

2. モデル作成

2.1 先行研究

先行研究[2]では、[3]を参考に視覚的に識別可能であると考えられる 9 種類の燃料デブリ (Table1) に分類する識別モデル作成に YOLO を用いた。また、YOLO に用いた燃料デブリの画像はそれぞれ学習用 1551 枚、検証用 383 枚とし、Table1 に倣っている。なお、画像は内部調査によって得られた映像[1]より抽出している。

Table1 9 fuel debris classifications

Pebble-like, smooth surface	Pebble-like, surface rough
Semi-molten metal	Large debris
Plate-like, surface smooth	Plate-like, surface rough
Steel frame in PCV	Grating in PCV
Plate-like debris adhered to steel frame	

2.2 生成 AI を用いた研究

生成 AI の入出力画像の例を Fig.1 に示す。生成 AI の入力画像は 9 種類の燃料デブリ (Table1) に分類される燃料デブリの画像の一部を切り抜いて使用した (Fig.1(1))。切り抜いた画像に生成 AI を用いた画像生成により、各燃料デブリそれぞれ 1000 枚にデータ拡張した (Fig.1(2))。先行研究同様、識別モデルに YOLO を用い、YOLO に用いたデータはそれぞれ学習用 10551 枚、検証用 383 枚とし、各種パラメータは先行研究[2]と同じものを使用した。

3. 比較

本研究と先行研究[2]で得られた結果を比較する。

YOLO の訓練時の損失関数を用いて比較を行った結果を示す。なお、各指標は次のように定義するものとする。

train : 訓練時

obj_loss : 燃料デブリと燃料デブリでないものが区別できているかの数値

Fig.2 は本研究と先行研究[2]のそれぞれの train/obj_loss を比較したものを表す。学習回数 100 回で train/obj_loss の数値が約 1/2.3 倍になった。したがって、訓練時に損失関数が減少傾向にあることが示された。以上の結果より、生成 AI を用いたデータ拡張により、燃料デブリ識別モデルの精度向上の可能性が確認された。



Fig.1 Example of image generation using generative AI ((1): input image, (2): output image)

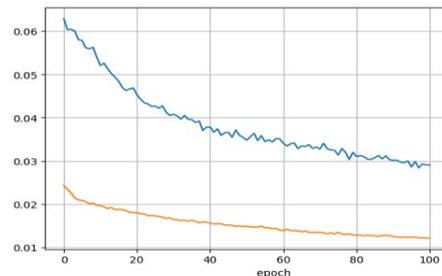


Fig.2 Loss function (blue line: previous study, orange line: study using generative AI)

参考文献

- [1] 東京電力ホールディングス株式会社: 福島第一原子力発電所 2 号機 原子炉格納容器内部調査 実施結果(速報), https://www.tepco.co.jp/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2019/1h/1f_20190213_1.pdf (2019).
- [2] 木村ら: PCV 内部調査動画の活用支援システムの開発に向けた予備的研究, NDEC-9 予稿集, p.32 (2024).
- [3] 永江: 燃料デブリはどのようにして形成されたか?, JAEA 令和 2 年度 福島研究開発部門成果報告会(2020).

3.1.3 運転実績データが無い燃料デブリ取り出しシステムに対する致命度分析

東京大学
東京大学
東京大学
東京大学

杉浦 鉄幸
中島 慎介
安 琪
山下 淳

Tessai SUGIURA
Shinsuke NAKASHIMA
Qi AN
Atsushi YAMASHITA

1. 緒言

福島第一原子力発電所のデブリ取り出しシステム設計ではリスク分析が必要である。しかし、デブリ取り出しシステムは運転実績データが無く、Fault Tree Analysis のような頻度データを用いたリスク分析は困難である。そこで、IAEA が提唱する Objective Tree (OT) と、機械設計で用いられている Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) を組み合わせた手法を開発する。なお、OT は機能分析、FMEA は機器分析を行うため、双方の分析結果の表現方法は異なる。即ち、双方が独立してリスク分析した結果の単純な足し合わせは不可能である。この難しさから OT と FMEA を組み合わせたリスク分析手法は無い。よってデブリ取り出しの特徴を考慮しつつ、OT と FMEA の分析手順を適切に組み合わせることが研究チャレンジとなる。

2. 開発したリスク分析手法

開発したリスク分析手法を Fig 1 に示す。

【デブリ取り出しの特徴考慮】 燃料デブリの加工や搬出は、暗闇・水蒸気・放射線など様々な外乱が及ぶ中で行う。よって、どの外乱がどの作業に影響を及ぼすかの考慮を含めてリスク分析できるように、FMEA に「作業工程」と「機器への外乱」を入力する仕組みを独自に設けた。

【分析情報の統合】 OT と FMEA が分析途中で出力する機能・機器劣化メカニズムを「通常作業逸脱メカニズム」として統合する仕組みを独自に設けた。

【致命度計算】 FMEA の式(1)にて、致命度 C を算出する。ここで、 E は影響度 (1~5 点)、 P は事象出現頻度 (1~3 点)、 d は探索難易度 (1~3 点)、 m (1~3 点) は対策難易度である。なお E, P, d, m は定性的な指標で決定する。

$$C = E \cdot P \cdot (d + m) \quad (1)$$

上記の定性的な指標により、 C はリスク分析者ごとに分散する。分散の影響を小さくするため、 C の点数帯域ごとに次に記す 5 段階の致命度ランクに分類する。5 (致命的) : $51 \leq C$, 4 (影響大) : $31 \leq C \leq 50$, 3 (影響あり) : $21 \leq C \leq 30$, 2 (影響小) : $11 \leq C \leq 20$, 1 (無視可能) : $C \leq 10$ 。

3. 検証実験

開発したリスク分析手法を IRID のデブリ気中取り出し工法[1]へ適用する。デブリ取り出し装置において、致命度ランクが最も高いリスク分析結果を Table 1 に示す。

【作業空間の認知不良 (Table 1, ID 1, 2)】

作業現場への移動時および燃料デブリの加工時に、水蒸気による外乱でカメラ映像の視界不良を起こす。

【燃料デブリの性質による機能劣化 (Table 1, ID 3)】

燃料デブリの加工時に、圧縮強度の高い燃料デブリが外乱となり、損耗した加工ツールの交換が頻発する。

これらリスク分析結果はプラント設計専門家へアンケートし、設計に活用できると判断された。従って、提案する OT と FMEA の組み合わせは適切であると考えられる。

4. 結言

デブリ取り出しシステムの通常作業逸脱メカニズムに対する致命度を明らかにするリスク分析手法を開発した。検証実験を通じて開発した手法の適切性を確認した。

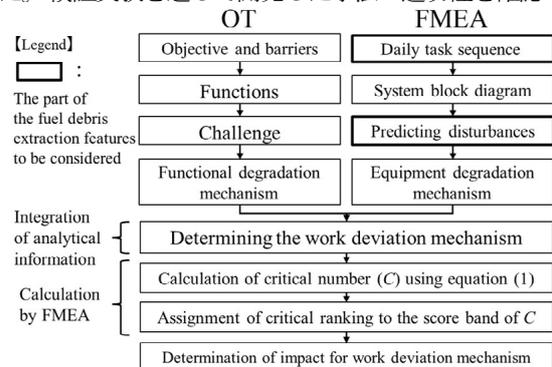


Fig.1 Risk analysis procedures combining OT and FMEA

Table 1 Results of risk analysis for working system

ID	Work deviation mechanism:		E	P	d	m	C	Critical ranking
	Functions	Equipment						
1	Moving within PCV	Self-location of the PCV interior movement eqpt. is unknown	4	3	3	1	48	4
2	FD process	Improper positioning of the FD processing eqpt. (robot arm)	4	3	2	1	36	4
3	FD process	Frequent replacement work due to an increased wear rate of the FD processing tool (cutters, etc.)	4	3	2	1	36	4

PCV: Primary containment vessel FD: Fuel debris eqpt.: Equipment

謝辞 本研究は METI 補助事業として文献[1]の開発を担った IRID と東芝エネルギーシステムズの協力を得た。本研究の一部は JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JPJA24H24020026 の助成を受けた。

参考文献

[1] IRID 公開資料, “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)”, (2023)

3. 1. 4 燃料デブリの化学性状分析のためのマルチスケール分光分析の構築

東北大学

JAEA

遠藤 瞭
秋山 大輔
横田 優貴
桐島 陽
岡本 芳浩
熊谷 友多
蓬田 匠
谷田 肇

Ryo ENDO
Daisuke AKIYAMA
Yuki YOKOTA
Akira KIRISHIMA
Yoshihiro OKAMOTO
Yuta KUMAGAI
Takumi YOMOGIDA
Hajime TANIDA

1. 緒言

東京電力福島第一原子力発電所事故では燃料が溶融し、原子炉構造材と反応して燃料デブリが発生した。現在は2号機から試験的に取り出されたサンプルに対して、組成比、結晶構造、酸化状態を主要な分析項目として、非破壊分析、固体分析、溶液分析が行われている。本研究では固体分析に着目し、溶融した核燃料(UO₂)と被覆管成分の酸化物(ZrO₂)が反応して炉内で生成していると推測される(U,Zr)O₂固溶体を模擬燃料デブリとして用いて、複数の分光分析を併用し多角的に化学性状を把握出来るマルチスケール分光分析フローを構築した。

2. 実験

UO₂とZrO₂とを1:9, 5:5, 9:1 (モル比)で混合した後、Ar-10% H₂(還元雰囲気)、Ar-2% O₂(酸化雰囲気)、Ar(不活性雰囲気)の3通りの雰囲気中で1600℃、4時間の加熱を行い、9種類の模擬燃料デブリを合成した。まず、粉末X線回折(PXRD)を行い、バルク領域における主要な結晶構造を把握した。次に、走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型X線分光法(SEM-EDX)と顕微ラマン分光法(μ-ラマン)の同一点分析によってマイクロ領域における組成比と結晶構造との関係を分析した。さらに、μ-XRD, μ-XRF, μ-XAFSの同時分析やイメージングXAFS(Img.-XAFS)を行い、模擬燃料デブリ中のUの原子価や結晶相を評価した。これらの分析において、カーボンテープ上に試料粉末とともにCu-Rh製のグリッドを乗せることで、同一の分析点を特定する目印とした。

3. 結果と考察

PXRDではcubic, tetragonal, orthorhombic, monoclinic構造の(U,Zr)O₂固溶体相及びU₃O₈相が確認され、UO₂とZrO₂の混合比率が同じでも加熱雰囲気により形成される結晶相は異なることが分かった。PXRDとμ-ラマンによる相同定の結果は概ね一致したが、異なる結果も一部得られており、要因として使用する光源の違いにより分析深度が異なっている可能性、局所分析であるμ-ラマンにおいてマイナーな結晶相を検出した可能性などが考えられる。さらに、μ-XRF, μ-XRD, μ-XAFS同時分析を用いてμ-ラマンの分析点における透過領域を分析すると、表面と透過領域で異なる結晶相が存在する例も確認された。また、U原子価の評価においては、2次元分布を取得出来るImg.-XAFSとμ-XAFSとを組み合わせることで、より効率的に評価できると考える。以上の検討結果から、図1に示したマルチスケール分光分析フローを考案した。

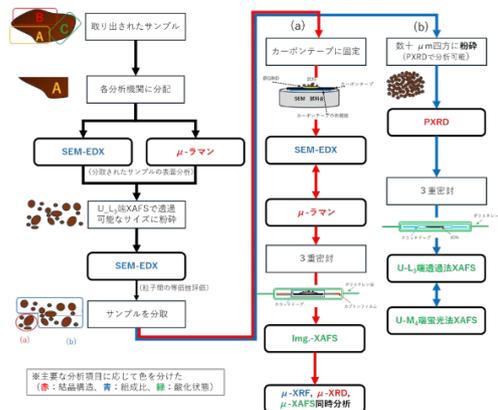


図1 考案したマルチスケール分光分析フロー

3.1.5 部分溶出した金属イオンの ICP-MS 分析と線形判別分析

¹福島大学 勝又風雅¹, 十文字快¹, Fuga KATSUMATA, Kai JUMONJI,
丹治珠緒¹, 高貝慶隆¹, Tamao TANJI, Yoshitaka TAKAGAI,
藤本勝成¹ Katsushige FUJIMOTO
²筑波大学 嘉山馨菜² Kana KAYAMA
³PerkinElmer Japan 古川真^{1,3} Makoto FURUKAWA

1. はじめに

本研究は、燃料デブリが部分溶出している溶液の質量分析を通じた新たな燃料デブリの材料推定手法の開発を目指す基礎的研究である。

2. 準備

2.1 試料

本研究では、模擬燃料デブリとして 13 系統 38 種からなる標準材料を使用した。系統は、W・ステンレス・Al・インコネル・Cu・Fe-Cr・アドバンス・Au・インバー・ペレット・Ga-Ge・セラミックス・炭素鋼の 13 系統である。

2.2 データ

前処理をした標準材料に対して、ICP-MS を用いて 60 元素を定量した。取得データは、標準材料の系統・液性 (pH の情報)・60 元素の定量結果を持つ。60 元素の定量結果の中から、ICP-MS での測定が難しい La139~Ta181 と検出下限値を下回ったデータを除いた 39 元素を使用した。前処理として 39 元素の定量値データを百分率に置き換え、標準化した。また、同一系統内に試料が 1 種しかない場合、そのデータは破棄した (pH10:6 系統, pH10 以外:8 系統)。

3. 実験

3.1 次元削減

本研究では、次元削減手法に線形判別分析 (LDA) [1] を使用した。溶出成分は液性に依存すると考えられるため、2.2 節で示した使用データを液性ごとに分別し、それぞれ LDA による次元削減を行った。今回は、次元数に pH10 のとき 5 次元, pH10 以外のとき 7 次元 (系統数-1) を指定している。

3.2 系統の推定

本研究では、推定手法に LDA を通じた階層型クラスタリングと k 近傍法を使用した。階層型クラスタリングでは、距離の定義にユークリッド距離, 併合方法に群平均法

を使用した。例として、Fig.1 に pH2 液性下における階層型クラスタリングの結果を示す。Fig.1 から系統内のデータの凝集が見られた。

系統内のデータが凝集していることから、k 近傍法による系統分類を試みた。ここでは、液性別データをそれぞれ学習用データ 67%, 検証用データ 33%に分け、精度の検証を行った (Table 1)。

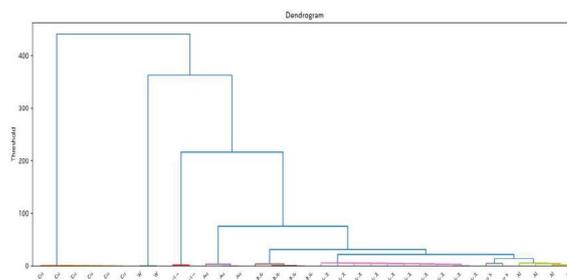


Fig.1 hierarchical clustering (pH2)

Table 1 accuracy of classification

k-NN	pH2	pH4	pH6	pH8	pH10	pH12
Accuracy (%)	100	91	91	100	100	100

4. まとめ

今回、液性別データに対して系統の推定を行い、良好な結果が得られた。このことから、成分が溶出した時点の液性が既知であれば、系統の推定が可能であるといえる。また、液性の推定では、弱酸性・中性・弱アルカリ性の液性の推定には改善の余地が残されることが分かった。

今後の課題として、さらなる系統の推定精度の向上や中性周りの液性の推定精度の向上が挙げられる。

参考文献

- [1] C.M. ビショップ (著), 元田浩・栗田多喜夫・樋口知之・松本裕治・村田昇 (訳), パターン認識と機械学習 上 ベイズ理論による統計的予測, シュプリンガー・ジャパン, pp. 185-190, 2008

3.1.6 部分溶出した金属イオンの ICP-MS 分析と密度ベースクラスタリング

¹ 福島大学 十文字快¹, 勝又風雅¹, Kai JUMONJI, Fuga KATSUMATA,
丹治珠緒¹, 高貝慶隆¹, Tamao TANJI, Yoshitaka TAKAGAI,
藤本勝成¹ Katsushige FUJIMOTO
² 筑波大学 嘉山馨菜² Kana KAYAMA
³ PerkinElmer Japan 古川真^{1,3} Makoto FURUKAWA

1. はじめに

金属系燃料デブリの解明が遅れており、材料推定手法の開発が求められている。そのため、本研究では、元素分析とクラスタリングによる模擬のデブリの材料推定を通して、燃料デブリの材料推定手法の開発を目指している。

そこで、模擬のデブリとして、以下のような合金材料や無機材料を用いて、検証を行った：10 種類の材料ジャンルでラベル付けされた 31 種類の標準材料 (Table.1)

2. データ分析

2.1 計測データ

標準材料に対して、pH10 の 2 種類の混酸 (0.08M, 0.2M) による浸漬試験を実施し、部分溶解させた。さらに、ICP-MS を用いて、47 元素 (Li, Be, Mg, Al, K, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Tl, Pb, Bi, Th, U) の濃度情報から構成される計測データを得た。

計測データの中から、ICP-MS による高精度の測定が難しい元素と検出下限値以下になる元素、相関が強い元素を除いた。このとき、0.08M 混酸データは 18 元素、0.2M 混酸データは 30 元素の濃度情報によって構成されている。これらの計測データを標準化 (平均を 0、分散を 1 に変換) した 18 次元データ (0.08M 混酸) と 30 次元データ (0.2M 混酸) をデータ分析に使用した。

2.2 データの次元削減

本研究で用いるデータは、18 次元、30 次元と高次元のため、線形判別分析[1]を用いて次元削減を行った。線形判別分析は、教師あり手法であり、クラス内変動・クラス間変動比を最大にする軸にデータを射影する。また、次元削減後の軸の数 (次元数) はクラス数-1 となる。本研究では、材料ジャンル数-1 である 9 次元にそれぞれ次元削減した。

2.3 データのクラスタリング

次元削減後のデータに対して、HDBSCAN[2]によるクラスタリングを行った。HDBSCAN は密度ベースクラスタリング手法であり、複雑な形状のクラスタの抽出が見込める。また、クラスタ数を指定する必要がない。

0.08M 混酸データのクラスタリング結果を Table1 に示す。Table1は、各試料の材料名、材料ジャンル、クラスタ番号で構成されている。ステンレスの分類はできなかったが、ステンレス以外の材料の分類は良好だった。このことから、材料ジャンルごとに凝集していることがわかった。今後は、燃料デブリから取得した計測データが、どの材料ジャンル付近に分布するかによって材料推定を行いたい。

Table1 A list of clustering result by HDBSCAN

SUS301	stainless	7	アルミ・マグネシウム	Al	3
SUS302	stainless	7	アル・マグ・シリコン	Al	3
SUS304	stainless	-1	アルミ・シリコン	Al	3
SUS310S	stainless	-1	金モリブデン	Au	2
SUS316L	stainless	7	金・パラジウム	Au	2
SUS321	stainless	7	金アンチモン	Au	2
SUS347	stainless	6	ベリリウム銅	Cu	4
SUS430	stainless	-1	セラマワイヤ No36(27%ニッケル被覆鋼線)	Ni	4
SUS631	stainless	-1	キューロニッケル(白銅)	Cu	4
SUS17-7PH	stainless	8	デュメット	Cu	4
インコネル600	inconel	5	真鍮	Cu	4
インコネル601	inconel	5	ガリウム・ゲルマニウム	Ga-Ge	-1
インコネル625	inconel	5	1%トリア・タングステン	W	0
インコネルX-750	inconel	8	DENSIMET#176	W	0
ピアノ	car_ste	6	ABS樹脂ベレット8103-a	polymer	1
			ABS樹脂ベレット8102-a	polymer	1

参考文献

- [1] 石井健一郎 他: わかりやすいパターン認識, オーム社 (1998)
- [2] Campello R. J. G. B. et al.: Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates, Advances in Knowledge Discovery and Data Mining, PAKDD 2013. Lecture Notes in Computer Science, vol 7819, Springer, pp. 160-172 (2013)

3.1.7 核分裂生成物の有効利用に関する検討 -熱や粗さの影響を考慮した第一原理計算による白金族合金の触媒機能評価-

東京都市大学
東京都市大学
日本原子力研究開発機構
東京都市大学

杉崎 麻子
森 翔太
奥村 雅彦
佐藤 勇

Asako SUGIZAKI
Shota MORI
Masahiko OKUMURA
Isamu SATO

1. 背景・目的

核燃料サイクルの活性化と、福島第一原子力発電所における事故で発生した燃料デブリからの水素抑制という二つの観点から、水素酸素再結合触媒として白金族合金を燃料デブリに添加して用いることが検討されている。先行研究[1]では白金族合金を模した合金が水素低減機能を示すことやその際の冶金学的な変化が観察されており、本研究はその触媒メカニズムを明らかにすることを目的としている。

2. 方法

Fig.1 に、考案されている水素酸素再結合の素反応を示す。総括反応は式 (1) の通りで、素反応としては下記の式 (2~6) のような反応[2]が考案されている。なお、(ad)は触媒表面のサイトに吸着している状態を示す。

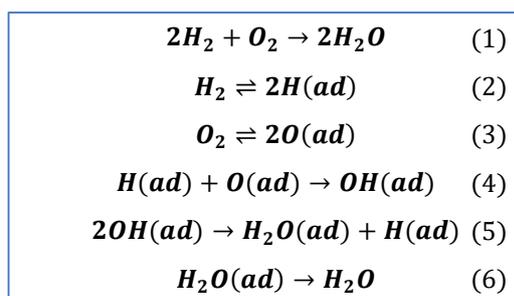


Fig. 1 Elementary reactions of hydrogen-oxygen recombination[2]

上記の素反応式それぞれで反応前後の構造を作り、密度汎関数法による構造最適化を行って反応エネルギーを求め、絶対零度下での安定構造を評価した。

また、実際に使用する環境に近い条件下での評価を行うため、疑似的に熱による体積膨張や表面の粗さなどを再現し、絶対零度下でフラットな表面との比較を行った。

3. 結果・考察

3.1 絶対零度下でのフラットな表面

フラットな Pd 表面(絶対零度下)において、エネルギーを評価した結果、式 (2~4) までは構造最適化によって反応後の方が安定、つまり反応が右に進むという結果が得られたが、式 (5) は自発的に起こらず、触媒反応の素反応として適さないことがわかった。

3.2 熱と粗さの影響

熱については、phonon 振動を考慮した計算を行うことで 300K での体積を求め、その体積を固定することで疑似的に 300K での反応を再現した。式 (5) において絶対零度下での反応エネルギーと比較すると、むしろ 300K の方が反応しにくい結果になり、熱による影響はあまりないことがわかった。

粗さについては、まず合金の結晶構造と同じ hcp をとる Ru の表面において、原子を 1 つまたは 4 つ取り除いて疑似的に粗い表面を再現した。次に、表面に空隙ができている場合の吸着前後のエネルギーについて、フラットな表面と比較することによって評価した。結果として、原子 1 個分の欠損(約 20 \AA^2)ではフラットな表面の方が吸着しやすいが、原子 4 個分の欠損(約 40 \AA^2)ではフラットな表面よりも吸着しやすいということがわかった。これによって、欠損の大きさが反応エネルギーに影響を及ぼすため、フラットな表面では起こりえない反応でも、実際のさまざまな大きさの欠損がある表面上では起こりえる可能性が示唆された。

今後は合金による評価を行っていきたい。

参考文献

- [1] 樽見直樹, 東京都市大学 令和 5 年度修士論文
[2] 上松敬禧 et al, “応用化学シリーズ 6 触媒化学”, 朝倉書店, 2008 年 3 月 10 日初版第 5 刷

This is a blank page.

3. 学生発表（オーラル）

3.2 セッション 2

（保全等技術開発部門）

This is a blank page.

3.2.1 地震被害を受けた RC 造建物の層レベルの被災度判定と将来の地震に対する応答推定

所属 東北大学 工学研究科
所属 東北大学 工学研究科
所属 東北大学 工学研究科

大竹 菜月
大野 歩美
前田 匡樹

Natsuki OTAKE
Ayumi OONO
Masaki MAEDA

1. はじめに

被災した建物の安全性を迅速に判断することは震災復旧において極めて重要である。現在、技術者が一棟ずつ目視で調査を行い、安全性を評価しており、それには時間や労力がかかり、立ち入ることが難しい建物が存在するなどの課題が考えられる。大野ら¹⁾は建物を 1 質点系に縮約したモデルでの構造性能の評価・応答推定を行った。本研究では、既往の手法を層レベルに適用するため、目視での調査を行わずに各層の被災状況を評価することを目的とする。既往の実験結果²⁾に適用し、その妥当性を検討する。実験は、神戸波の倍率を変化させ Run.1~9 の 9 つの加振を行い、本研究では Run.1~5, 9 の 6 つの結果を用いた。

2. 復元力特性の補正方法

本研究では、大野ら¹⁾の研究で提案された図 1 に示すような 2 種類の、補正係数 α と β を用いた性能曲線の補正方法を多層建物に適用する。文献 1) から弾性範囲のみの観測記録で補正する場合には平均補正法、降伏以降の観測記録も用いて補正する場合には最適補正法を採用することで、比較的精度よく性能曲線を補正することができると示された。よって、本研究では Run.1~3 の範囲の補正では平均補正法を、Run.4 以降の観測記録も使用する場合は最適補正法を用いて性能曲線の補正を行うこととする。

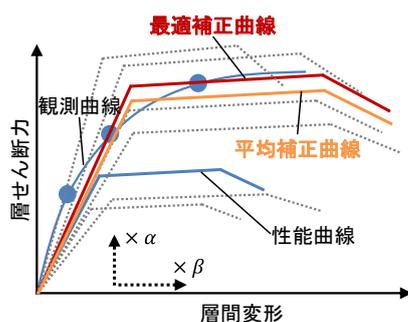


図 1 性能曲線の補正方法

3. 各層の被災度区分判定

観測値の最大層間変形と補正曲線上の変位が一致する点を見つけ、その点での部材の塑性率を算出する。ここで、部材塑性率と損傷度の関係は、振動台実験の結果を参考に終局時塑性率を 10 と仮定し、塑性率 1~3 を損傷度 ii、塑性率 3~5 を iii、塑性率 5~10 を iv とした。さらに、各部材の損傷度をもとに各層の耐震性能残存率を算出し、各層の被災度を判定する。

Run.1~3 では全層で軽微と精度よく推定できた。Run.4 以降では全体的に良好な結果を示し、一部の誤差が生じた箇所においても安全側に被災度を判定することができた。

4. 将来の地震に対する応答推定

補正した解析モデルの応答解析を行い、補正に用いた観測記録以降の解析結果と実験結果を比較して応答推定を行う。2 章で算出した補正係数 α 、 β を用いて解析モデルの各部材の復元力特性を耐力方向に α 倍、剛性を $\alpha\beta$ 倍することで補正する。

Run.9 の推定には一部課題が残るものの、補正に用いた観測記録に近い加振については精度よく推定することができた。

日本コンクリート工学会年次大会 (7 月 16 日~18 日) で同一内容を発表予定

参考文献

- [1] 大野歩美、ほか: “RC 造建物の構造健全性評価のための観測記録に基づく性能曲線の補正法と性能曲線を用いた被災度区分判定法の検討”, コンクリート工学会年次論文集, 第 45 巻第 2 号, pp.223-228, 2023
- [2] Alex Shegay, ほか: “連層耐震壁を有する RC 造 4 層建物縮小試験体の振動台実験による被災度評価と応答予測その 2 実験結果概要”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, 構造 4, pp.443-444, 2020.9

3.2.2 限られた加速度計の地震応答観測記録に基づくRC 建造物の層レベルの構造健全性評価手法の提案

所属 東北大学 工学研究科
所属 東北大学 工学研究科

大野 歩美
前田 匡樹

Ayumi Oono
Masaki Maeda

1. はじめに

廃炉作業が完了するまでの期間、継続的に建屋の健全性を評価するとともに、必要に応じて補修などを実施することによって安全機能を確保することが求められることから、地震発生前後での建屋の構造特性の変化や地震発生時の建屋の応答を正しく推定することは極めて重要である。本研究では、多層RC建造物の限られた層に設置した加速度計の地震応答観測記録に基づき、建物の固有周期や各層の剛性の推移を推定し、推定した剛性に基づき各層の応答推定と損傷程度の評価を行う手法について提案する。

2. 各層の応答推定手法

提案する推定手法¹⁾の概要を図1に示す。ここでは、多層建物において設置できる加速度計は1階床（基礎）、中間階床、最上階床の3個に限られている場合を想定する。以下、提案手法の手順について述べる。

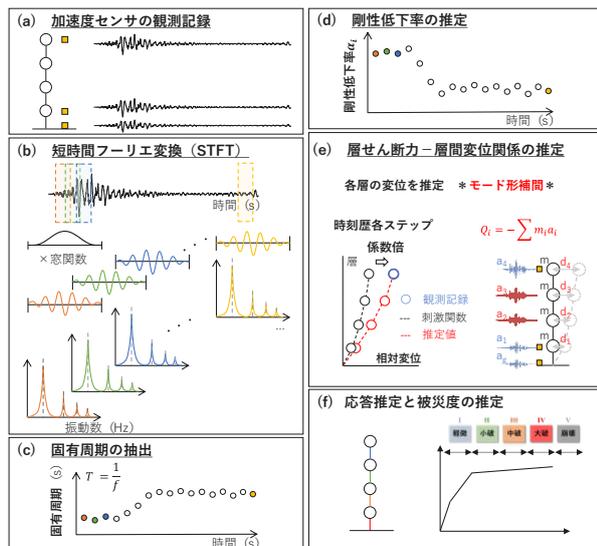


図1 応答観測記録に基づく各層の被災度推定フロー

2.1 固有周期の抽出

地震発生時の1階床と中間階床で観測した加速度記録に対して短時間フーリエ変換（STFT）を行い、高次を含めた固有振動数を抽出する。加速度記録を適切な時間（窓）に区切り、各窓に対して1階床と中間階床のフーリエスペクトル比のピークを抽出することで、各時刻に対する固有振動数、及び、固有周期を求める。

2.2 建物各層の剛性の推定

各時刻の固有周期に対して、各層の剛性を推定する。建物の設計時の剛性に対する現状の各層の剛性の比を α_i （以降、 α_i を剛性低下率と呼ぶ）とし、2.1で推定した固有周期と剛性低下率 α_i を用いて計算する固有周期の誤差の2乗和の合計が最小となるような剛性低下率の組み合わせを求めることで、各層の剛性を推定することとする。

2.3 建物各層の応答推定と損傷程度の評価

推定した各層の剛性と加速度記録から層せん断力-層間変位関係を求め、地震時の各層の損傷程度の評価を行う。時刻歴中の各ステップについて、層せん断力 Q_i と剛性 K_i から最上層の層間変位 δ_i を求める。続いて、2.2で推定した剛性分布から算出したモード形（刺激関数）を、最上層の層間変位が δ_i となるように係数倍（モード形補間）することで、非観測層を含む各層の変位を推定する。また、求めた層間変位に剛性を乗じることで、各層の層せん断力を推定する。以上より推定した層せん断力-層間変位関係により建物各層の損傷程度を評価する。

日本コンクリート工学年次大会 2025（7月）で同一内容を発表予定

参考文献

- [1] 大野歩美, 易卓然, Richard Godfrey, 三浦耕太, Jonathan Monical, 前田匡樹, 関松太郎: 限られた加速度計の地震応答観測記録に基づく建物各階の剛性低下率の推定手法の検討, 日本地震工学会・大会 2024, Paper No.TS_20240093, 2024年12月

3.2.3 サブテラヘルツ波によるコンクリート内部の鋼材 およびその腐食検知に関する基礎的研究 (その1:反射率による腐食鋼材の判別)

東北大学大学院工学研究科
東北大学工学部
東北大学大学院工学研究科 准教授 博士(工学)
日本工業大学建築学部 准教授 博士(工学)

倉品 吏玖 Riku KURASHINA
國生 梨花 Rika KOKUSHO
西脇 智哉 Tomoya NISHIWAKI
田中 章夫 Akio TANAKA

1. はじめに

原子力発電所の建屋の解体を安全に進めるには、建屋の健全性を正しく把握する必要がある。RC造である建屋の健全性には内部鉄筋の性状が大きく影響するため、円滑な廃炉措置に向けて、内部鉄筋の腐食を簡易的に把握する検査手法の開発が求められている。

本研究では、接近が困難な発電所内部での適用を視野に入れ、遠隔測定に実績を持つ^[1]サブテラヘルツ波と呼ばれる約 0.03~0.3 THz の電磁波を用いた非破壊検査手法を提案する。ここでは基礎的な検討として、腐食鋼板を埋設したコンクリート試験体 (以下、内部鋼材試験体) を非接触で測定した結果をその 1 として報告する。

2. 測定概要

本研究で用いた測定系を Fig. 1 に示す。試験体に向けて斜め方向にサブテラヘルツ波を発振し、反射成分を検出した。使用する周波数は 30~50GHz とし、0.2GHz ずつ変化させながら測定を行った。Fig. 2 に内部鋼材試験体を示す。内部鋼材には、大きさ 100×50mm、厚さ 1mm の平鋼板を使用し、測定面を覆うように普通コンクリートを打ち込み作製した。なお、平鋼板は打設前に 0、3、6 週の塩水噴霧と乾湿繰り返しによる、腐食処理を行った。試験体の大きさは 100×100mm、かぶり厚さは 10、20、30mm に調節し、90℃・1 日間の条件での乾燥後に測定した。

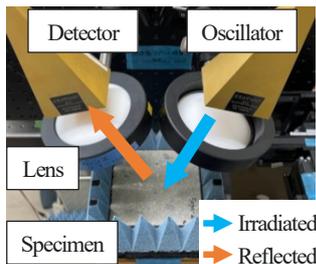


Fig. 1 Measurement system

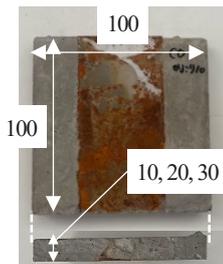
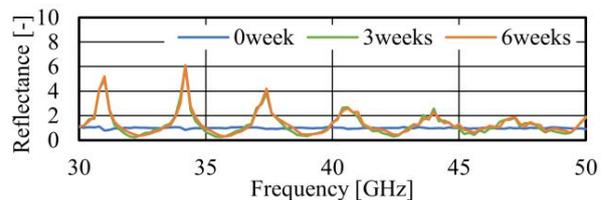


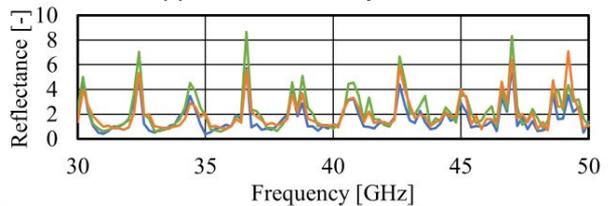
Fig. 2 Specimen

3. 結果と考察

Fig.3(a)にかぶり厚さ 20mm の内部鋼材試験体の測定結果を示す。反射率は、各試験体の反射強度を、腐食期間 0 週の試験体の反射強度で除して求めた。その結果、腐食鋼材を埋設した試験体では、腐食期間 0 週の試験体には見られなかったスペクトルのピークが検出された。これは、鋼材表面の腐食生成物により電磁波の光路長が変化し、位相がずれることが要因と想定される。この傾向はかぶり厚さ 10mm においても同様に見られたが、Fig.3(b)に示すかぶり厚さ 30mm では、腐食期間 0 週の試験体においてもピークが発生した。これは、サブテラヘルツ波の透過量が不十分であり、基準となる腐食期間 0 週の試験体の反射強度が非常に小さくなったためと考えられる。



(a) Covered 20 mm specimens



(b) Covered 30 mm specimens

Fig. 3 Result of Sub-Terahertz measurement

2024 年度 JSNDI 秋季講演大会 (2024 年 11 月 7 日)
で同内容の一部を発表済

参考文献

- [1] 有田剛士ほか: コンクリート工学年次論文集, 45(1), 1450-1455, 2023

3.2.4 サブテラヘルツ波によるコンクリート内部の鋼材 およびその腐食検知に関する基礎的研究 (その2: パワーアンプを用いた探査深度向上の検討)

東北大学工学部
東北大学大学院工学研究科
東北大学大学院工学研究科 准教授 博士(工学)
芝浦工業大学デザイン工学部 教授 博士(工学)

國生 梨花 Rika KOKUSHO
倉品 吏玖 Riku KURASHINA
西脇 智哉 Tomoya NISHIWAKI
田邊 匡生 Tadao TANABE

1. はじめに

接近が困難な原子力発電所内部で、非接触・非破壊検査を適用するために、サブテラヘルツ波を用いた検査手法の開発が進められている。本研究では、その1で行った内部鋼材の腐食検出における、測定可能なかぶり厚さを拡張するため、パワーアンプ(以下、アンプ)を用いた探査深度向上の検討を行った。

2. 測定概要

本研究では、その1で用いた測定系の発振器にアンプを接続して使用した。使用する周波数はその1と同条件であり、測定距離は内部鋼材を基準に250mmとした。得られた反射スペクトルの変化を確認した。試験体の概要をFig.1に示す。内部鋼材として大きさ100×50mm、厚さ1mmのSPCC相当の健全な鋼板を使用した。鋼板を角柱試験体内部に配置してコンクリートを打込み、作製し、養生後、90℃、1日の条件で乾燥させて測定した。

3. 結果と考察

Fig.2(a)にかぶり厚さ30,40mmの試験体の測定結果を示す。アンプを用いない場合、かぶり厚さ30,40mmで

は、鋼材の有無による反射強度の差は確認できず、内部の鋼板まで波が到達していないと考えられる。一方、アンプを用いた場合、鋼材の有無による反射強度の差を確認した。これは内部の鋼板まで波が到達したためと考えられる。このことから、アンプの使用によって、これまで探査が困難であったかぶり厚さ30,40mmを対象としたコンクリート内部の鋼材検知が可能になったと考えられる。

また、アンプの使用だけでは、かぶり厚さ50mmの測定は困難であった。そこで、サブテラヘルツ波の入射角を調整して測定を行った。結果をFig.2(b)に示す。入射角の調整により、かぶり厚さ30,40mmと同様に鋼材の有無による反射強度の差を確認することができた。したがって、入射角の調整とアンプの使用によって、かぶり厚さ50mmまでの鋼材の検知を行うことが可能となった。今後は、既往研究¹⁾で測定が困難であったかぶり厚さ30mm以上の内部鋼材の腐食の検出の検討を行う。

コンクリート工学年次大会 2025 (盛岡) (2025年7月16-18日) で同一内容を発表予定

参考文献

[1] 倉品吏玖ほか: コンクリート工学年次論文集, 46(1), 1663-1668, 2024

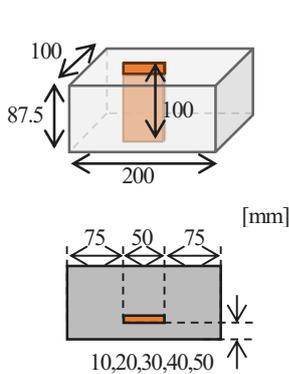
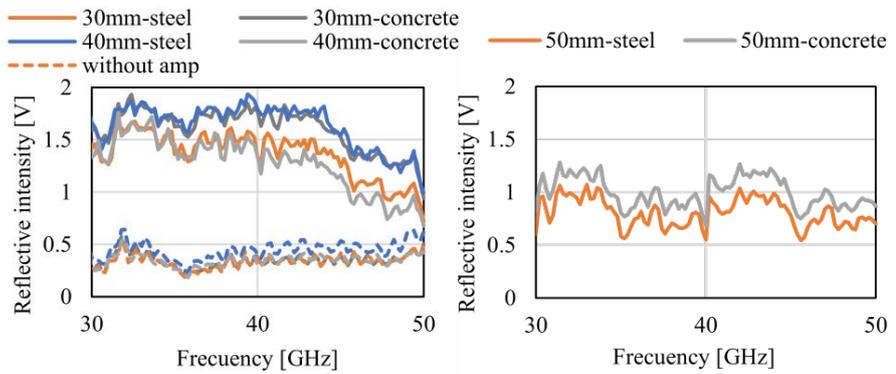


Fig. 1 Specimen



(a) Covered 30, 40 mm specimens (b) Covered 50 mm specimens
Fig. 2 Results of Sub-Terahertz measurement

3.2.5 原子力プラントの廃止措置に伴う鉛ブロックの切断手法の研究開発

所属 福井工業大学

五嶋 智久

Tomohisa GOTO

1. 背景

現在、わが国の実用発電用原子炉 57 基の内、2025 年 1 月の時点で 18 基が廃止措置中である[1]。実用発電用原子炉施設の廃止措置に伴って発生する解体廃棄物は、110 万 kW 級の原子力発電所 (BWR) の場合、約 53.6 万トンと推計されている。この解体廃棄物の約 98% は放射性廃棄物でない廃棄物及び放射能レベルが非常に低く、放射性廃棄物として扱う必要のない、クリアランス対象物である。残りの約 2% 約 1.3 万トンは、低レベル放射性廃棄物 (LLW) と呼ばれる放射性廃棄物である[2]。この LLW は、放射能レベルによって L1, L2, L3 に区分されている。ここで、L3 が最も放射能レベルが低く、LLW の廃棄物量の約 82% を占める[3]。本研究は、L3 に区分される金属廃棄物を対象としている。LLW の処理処分に関して、青森県にある六ヶ所村低レベル放射性廃棄物埋設センターが、運転中に出る LLW を対象として受け入れている[4]。一方、廃止措置で発生した LLW は、発生者責任となっているため、電力事業者が処分場を確保しなければならない[5]。これらの事から、電力事業者はクリアランス制度により L3 廃棄物を除染することによりクリアランスレベル以下に処理し、L3 廃棄物の減容を最も重要な課題と位置付けている。

本研究は、L3 区分の金属廃棄物の廃止措置の現場において、廃棄物として出る鉛材が従来廃止措置に使用する工具を用いて切断することが困難であるとの報告があり、鉛材を容易に切断する手法の開発を目標にスタートさせた。しかし、国及び電力事業者は L3 区分の金属廃棄物の処理に関して炭素鋼及びステンレス鋼の処理法を主として報告しているが、鉛の処理法に関する報告を見つけることができなかった。これは、実用発電用原子炉施設において鉛材の使用に関する調査が行われていなかった事を意味する。そこで、6 箇所の実用発電用原子炉施設を対象に鉛材の使用箇所及び使用量に関する調査を行い、L3 区分の金属廃棄物に含まれる鉛材の詳細を明らかにした。これらの調査結果を基に、実用発電用原子炉施設の廃止

措置における L3 廃棄物として生じる鉛材の処理方法を確立することを目的に、L3 廃棄物の模擬体として鉛ブロックを使用し、鉛材の汚染部分のみを切除して廃棄物を減容するための精密に切断する手法の研究開発を行い、処理方法を確立した。

2. 本研究手法による鉛ブロック切断手法

Fig.1 に本研究手法の鉛ブロック溶融切断システムを示す。詳細は講演時に報告する。

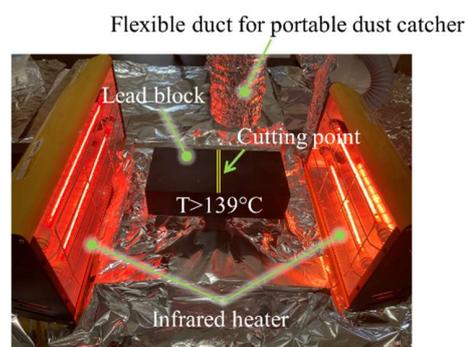


Fig.1 Lead block melting cutting system

参考文献

- [1] 原子力規制委員会: 廃止措置中の実用発電用原子炉.
https://www.nra.go.jp/activity/regulation/reactor/haishi/sochichu_jitsuyou.html (accessed 2025-1-19).
- [2] 日本原子力文化財団: 原子力発電所の解体廃棄物.
<https://www.jaero.or.jp/sogo/detail/cat-02-08.html> (accessed 2025-1-18).
- [3] 資源エネルギー庁: 放射性廃棄物について.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html#h01 (accessed 2025-1-18).
- [4] 柳原敏: 廃止措置ビジネスの展望—クリアランス物の有効利用と放射性廃棄物の行先—.
https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/dengen/shinkeikaku/r2kaigi_d/fil/shiryo1.pdf (accessed 2025-1-19).
- [5] 愛媛県 県民環境部防災局 原子力安全対策課: 廃炉に伴い発生する低レベル放射の処分について.
https://www.ensc.jp/committee/esm/2017/nuclear_power/file/20170718_genshiryou2-2.pdf (accessed 2025-1-19).

3.2.6 低圧コールドスプレー法による配管穴あき損傷部補修技術の確立

東北大学
東北大学
東北大学
東北大学
東北大学

舟木 大河
嶋原 航大
齋藤 宏輝
市川 裕士
小川 和洋

Taiga Funaki
Kodai Shigihara
Hiroki Saito
Yuji Ichikawa
Kazuhiro Ogawa

1. 序論

福島第一原発の廃炉作業の完了には約 30–40 年かかる見通しであり、その間の格納容器や配管の安全性確保が不可欠である。一般的に配管補修には溶接が用いられるが、施工時間の長さや火災のリスクが問題となる。そこで、本研究ではコールドスプレー法 (CS 法) を用いた補修に着目した。CS 法は材料粉末を固相状態のまま高圧ガスで加速し、基材に衝突させて成膜する技術である。CS 法は厚膜の形成が可能であり、成膜速度が速く、火災のリスクも少ないため、補修技術として近年注目されている。CS 法の中でも作動ガス圧力が 1 MPa 以下の低圧 CS 法は装置が小型で重量も 20 kg 以下と軽量であるため、作業用ロボットとの併用で無人作業も可能である。低圧 CS 法を用いた配管補修の例としては Sn/Zn 混合粉末を用いた例がある^[1]が、強度面を考慮するとステンレス鋼などの高強度材による補修が望ましい。そこで本研究では、ステンレス鋼粉末を用いた低圧 CS 法による配管補修技術を確立することを目的とした。一般的に低圧 CS 法によるステンレス鋼粉末単体の成膜は難しいため、硬質材粉末または軟質金属粉末を添加した粉末を用い、平板穴あき部の補修成膜について検討した。

2. 実験方法

本研究では、平均粒径 10.1 μm の SUS304L 粉末 (PF-20F, エプソンアトミックス) を主材料粉末として、平均粒径 5.5 μm の WC 粉末 (WC50, 日本新金属), 平均粒径 2.75 μm の Zn 粉末 (LS-4H, エーエスペイント), 平均粒径 10 μm の Al 粉末 (TFH-A10P) をそれぞれ 30 wt% 混合した 3 種類の粉末を使用した。これらの粉末を低圧 CS 装置 (DYMET423, Obninsk Center for Powder Spraying) を用いて、中央に直径 0.2 mm の穴を開けた SUS316L 平板 (20 mm \times 20 mm \times 0.8 mm) の穴あき部直上に成膜を行い、穴の補修を試みた。Table 1 に

Table 1 Spray conditions

Sample name	SUS/WC	SUS/Zn	SUS/Al
Mixing powder	WC	Zn	Al
Gas pressure (MPa)	0.5	0.5	0.5
Gas temperature ($^{\circ}\text{C}$)	470	350	470
Stand-off distance (mm)	10	10	10
Spray time (s)	20	20	10

成膜条件を示す。補修試験後は皮膜断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。

3. 結果と考察

各皮膜断面の SEM 画像を Fig. 1 に示す。SUS/WC は WC 粒子のピーニング効果によりち密な皮膜が形成できたが、穴部を塞ぐことができなかった。この理由としては、WC 粒子の衝突によるエロージョンにより、穴壁面での皮膜成長が阻害されたためと考えられる。一方、SUS/Zn では穴を塞ぐことに成功したが皮膜内に大きな裂が生じた。SUS 粒子と Zn 粒子界面の結合強度が弱く、残留応力の蓄積とともにき裂が生じた可能性がある。また、SUS/Al では穴の補修に成功し、皮膜もち密な構造であった。これは、Al が変形しやすく粒子間の結合強度が高いためと考えられる。

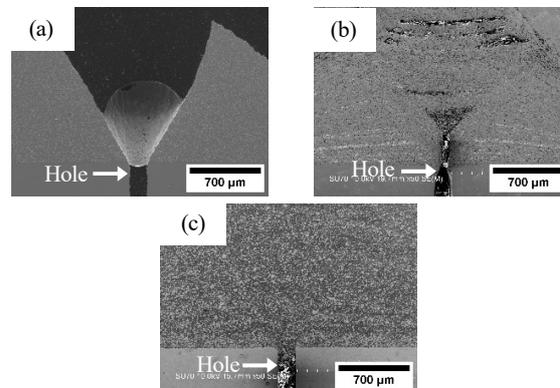


Fig. 1 Cross-sectional SEM images of (a) SUS/WC, (b) SUS/Zn, (c) SUS/Al

4. 結論

本研究ではステンレス鋼による穴補修技術を確立するためにステンレス鋼粉末に硬質・軟質粒子を混合した粉末で穴あき平板の補修試験を行った。その結果、ステンレス鋼と Al の混合粉末で穴の補修に成功した。

APCFS2024 (11月26日) で同一内容を発表済

参考文献

- [1] Y. Meng, et al.: "Parametric Study to Repair Leaks in Water Pipe Using the Low-Pressure Cold Spray Technique", Journal of Thermal Spray Technology, Vol.31, No.8, pp.2560-2576 (2022)

3.2.7 鋼管により開口補強した RC 造耐震壁のせん断抵抗機構と補強効果に関する実験

東北大学大学院 工学研究科
東北大学大学院 工学研究科
東北大学大学院 工学研究科

根本 大成
ジョナサン モニカル
前田 匡樹

Taisei Nemoto
Jonathan Monical
Masaki Maeda

1. はじめに

原子力施設の RC 造耐震壁において、出入口や配管敷設などの目的で、既存の壁に開口を増設する場合がある。RC 造耐震壁に開口を設ける場合には、日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」(以下、RC 規準)に依り、開口補強筋を配筋することが必要である。しかし、既存の壁に新たに開口を設ける場合、開口周辺よりも大きくコンクリートをはつる必要があり、施工の手間やコストの増加を招く虞がある。そこで、本研究では、耐震壁における鋼管・リブ・ボルトを用いた開口補強の効果を検討することを目的とし、鋼管補強を施した有開口 RC 造耐震壁の正負交番繰り返し载荷を行った。

2. 実験概要

試験体の概要を図1に示す。壁板は1750mm×1750mm、開口は350mm×350mm(開口周比0.2)とした。試験体は、従来補強試験体及び鋼管補強試験体2体の計3体である。従来補強試験体は、RC 規準に則り、開口補強筋を配筋した。補強鋼管には、角型鋼管(350mm×350mm×12mm)を使用した。鋼管には、曲げ剛性を高めるためのリブ(厚さ12mm)を溶接し、コンクリートから鋼管へ応力伝達を確保するためにアンカーボルト(M10)を挿入した。補強部分の設計では、無開口壁と補強壁の剛性が等しくなる、つまり、開口と同寸法(350mm×350mm)のコンクリートのせん断剛性と補強鋼管の曲げ剛性が等しくなるように設計したモデルを「補強 Full」、半分の剛性となるように設計したモデルを「補強 Half」としている。

3. 実験結果

図2に荷重-変形関係包絡線を示す。最大荷重は従来補強で1591kN(層間変形角0.55%)、補強 Half で1918kN(層間変形角0.60%)、補強 Full で2151kN(層間変形角0.79%)となり、鋼管補強の効果が見られた。各試験体において、最初に鉄筋が降伏した際の荷重は、それぞれの最大荷重に対して、約2/3となっていた。

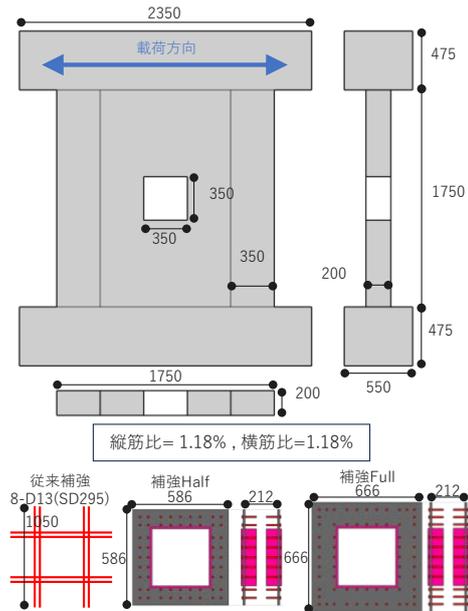


図1 試験体概要[mm]

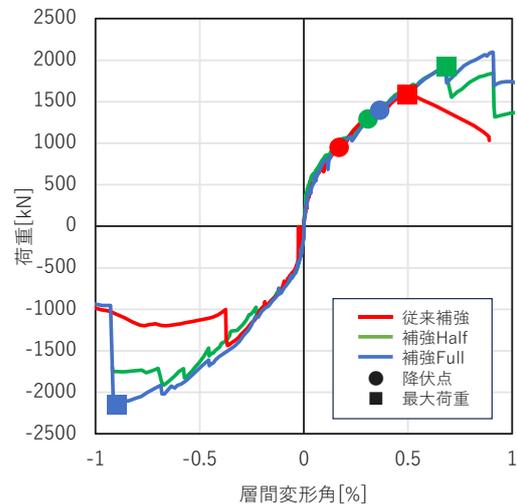


図2 実験結果

日本コンクリート工学会 (7月16-18日) で同一内容を発表予定

参考文献

[1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018年

This is a blank page.

3. 学生発表（オーラル）

3.3 セッション 3

（放射線計測・核種移行評価等技術部門）

This is a blank page.

3.3.1 Cs 汚染コンクリートに対する浸透・溶出挙動の研究 -モルタル構造における水セメント比の影響評価-

東京都市大学
東京都市大学

恵木 仁大
佐藤 勇

Norimasa Egi
Isamu SATO

1. 背景・目的

東日本大震災により、福島第一原子力発電所にて深刻な事故が発生した。この事故により、原子炉建屋が破損し、放射能性セシウム (Cs) を含む放射性核種が大量に放出された。これらが構造材であるコンクリートに取り込まれ、多くの放射性廃棄物が発生しており、コンクリートへの浸透メカニズムを考慮した処理が必要とされている。

先行研究では、コンクリートの乾湿サイクルに依存した Cs 移行プロセスについて研究しており[1]、その中でコンクリート内部の空隙が Cs の浸透に与える影響に着目した。特にコンクリートの空隙率は水セメント比に強く依存するので、これと浸透挙動の関係性を明らかにすることは重要である。本研究では水セメント比がコンクリートの汚染状況にどのような影響を与えるかを検討するため、水セメント比の異なるコンクリート試料について、微細構造の特徴や浸透挙動を評価した。

2. 方法

実験に先立ち、水セメント比が異なるコンクリート試料を準備した。試料は、一般的に使用される 0.45 および 0.55 に加え、高強度コンクリート用として 0.25 および 0.35 の水セメント比で作製した。具体的には、走査型電子顕微鏡、X線撮影及び蛍光エポキシ樹脂により水セメント比の異なる 4 種の試料を対象に表面の微細構造の観察や、密度や内部の構造を観察した。また、CsI 溶液を用いて浸透試験を行い、蛍光 X 線分析や中性子放射化分析を使用して浸透深さごとに Cs の計測を行い、浸透の程度を定量的に分析した。

3. 結果・考察

Fig.1 の X 線写真は色が白いほど密度が低いことを示している。水セメント比 0.25 を見ると、黒い斑点 (空隙) は多いが、全体として色は白いため、全体の密度が高い (2.26g/cm³)。一方、Fig.1 の水セメント比 0.55 では白い斑点 (空隙) が少ないが、全体は色が黒いため密度

が低い (1.99g/cm³) ことがわかる。つまり、水セメント比が高いほど空隙は少ないが、密度が小さくなる。

水が多いと流動性が高いためコンクリート作製時、振動機により空気が抜けやすいため大きい空隙は減るが、多く含まれる余分な水が蒸発することにより密度は低下するという他の研究[2]と整合する結果である。また、蛍光エポキシ樹脂を浸透させた試験では水セメント比が高いほどより浸透するといった結果になった。つまり、Fig.1 のような大きさ数ミリ程度の空隙でなく、作製時に含まれていた水が蒸発により抜けることにより小さくなった密度や目に見えない微細な空隙が浸透に大きく影響を及ぼしていると言えることが分かった。

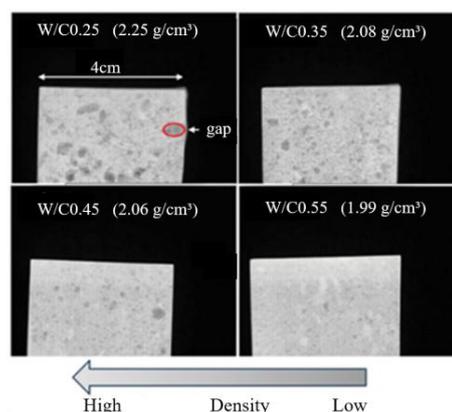


Fig.1 X-ray transmission image of concrete samples

4. 今後の展望

水セメント比がコンクリートへの Cs の浸透に影響を及ぼしていることが確認できた。今後は実験体系や実験手法を見直すこと、引き続き Cs の濃度分布やモルタル微細構造の検討を行うこと、界面が浸透力に及ぼす影響について検討を行うことが重要であると考えている。これらの点について実験を続けていくことで、1F 事故におけるコンクリート廃棄物の処理に役立てられると考える。

参考文献

- [1] 近藤 幸祐, 東京都市大学 令和 5 年度修士論文
[2] 春山 信人 他 “単位水量の変化が高強度コンクリートの諸性状に及ぼす影響

3.3.2 処分場のセメント利用に伴うコロイド状ケイ酸の生成とその核種移行抑制について

所属	東北大学 工学研究科	佐野 嵩	Takashi Sano
所属	東北大学 工学研究科	千田 太詩	Taiji Chida
所属	東北大学 工学研究科	関 亜美	Tsugumi Seki
所属	東北大学 工学研究科	新堀 雄一	Yuichi Niibori

1. 緒言

福島第一原発の廃炉に伴って生じる廃棄物は、その性状や放射能レベルに応じた処理・処分が検討されている。その選択肢の一つとして、従来の放射性廃棄物のように地下へ埋設処分する方策が挙げられる。処分場周辺では、構造材等に使用されるセメント系材料の成分溶出による pH 変動場が形成され、ケイ酸の再分配(変質)が生じる。この際、過飽和となったケイ酸が固相に析出、および、重合して液相中でコロイド状ケイ酸を生成する。特に、コロイド状ケイ酸は核種を収着して移行を促進させる懸念がある一方で、地下水流路を目詰まり(clogging)させて核種移行を遅延させる効果も考えられる。そこで本研究では、コロイド状ケイ酸の目詰まりによる流動場変化について、多孔質体を模擬する充填カラムを用いた流動実験、および、目詰まり効果を反映したモデル解析により検討した。

2. 実験

実験では、多孔質媒体として、脱気済みのアモルファスシリカ(粒径 75~150 μm)を充填したカラム(内径 15 mm、充填長さ 30 mm)を用いた。このカラムにオーバーフロー系を用いて、過飽和濃度 6 mM のコロイド状ケイ酸溶液(pH8)を初期流量 2.5 ml/min および定圧で通液した。そして、出口におけるコロイド状ケイ酸の濃度を所定時間毎に測定するとともに、併せて取得した流量を用いてダルシーの式から浸透率を算出した。

評価モデルでは、1 次反応と見なした目詰まりの効果を移流拡散方程式に組み込み、間隙率 ϵ [-]の時間および空間的な変化を計算した上で、コゼニー・カルマンの式[1]を導入すると、各時点および地点における浸透率 k_p [m²]は式(1)のように表せる。ここでは $n=2$ とした (c は定数)。

$$k_p = c \frac{\epsilon^{2+1}}{(1 - \epsilon)^2} \quad (1)$$

次に調和平均より、カラム全体の無次元浸透率を求め、これを実験値と比較した。

3. 結果および考察

Fig. 1 にカラム全体の無次元浸透率を示す。縦軸は初期の浸透率で正規化し、横軸はサンプリング時間 t [s] を代表時間 t^* [s] で除した無次元時間 ($t^* = x_1 \epsilon_0 / u_0$, ϵ_0 : 初期間隙率[-], u_0 : 初期のダルシー流速[m/s]) である。図中の計算値は、 $P=50$ とし、 D_a は 0.05~0.0001 として感度解析を行った結果である(ダムケラー数 $D_a = x_1 k^* / u_0$, clogging するコロイドの無次元密度 $P = \rho / \epsilon_0 C_{c0}$, k^* : 見かけの clogging 速度定数 [1/s], ρ : clogging するコロイドの密度[mol/m³], C_{c0} : 初期コロイド状ケイ酸の濃度[mol/m³])。計算値は、 $D_a=0.0005$ で実験値と最も良く一致した。Fig. 1 より、有意な浸透率の低下が確認され、コロイド状ケイ酸の目詰まりによる流動抑制が示唆される。

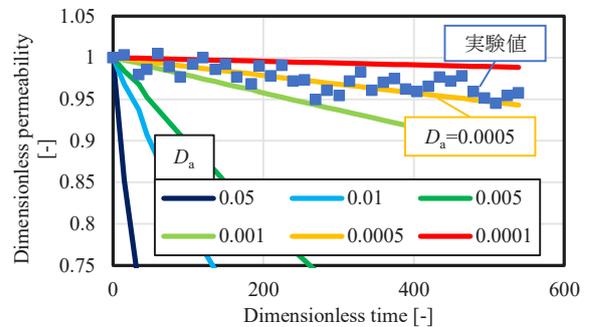


Fig. 1: Time variation of permeability and sensitivity analysis on D_a ($P=50$)

4. 結言

本研究では、多孔質体を用いた流動実験、および、モデル解析によってコロイド状ケイ酸の目詰まりに伴う流動場変化を検討した。その結果、コロイド状ケイ酸の通液に伴う透水性の低下が確認され、地下環境における核種移行抑制の可能性が示唆された。

参考文献 [1] Maryam Rehman et. al.: *Archives of Computational Methods in Engineering*, **31**, 3843–3855 (2024).

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP21H04664、JP22K14627、および JP24K01395 の成果である。記して謝意を表す。

3.3.3 福島復興に向けた多機能巡回ロボットシステムの開発と検証

東京大学工学部システム創成学科
 東京大学大学院工学系研究科
 東京大学大学院工学系研究科

北川 琳久
 松日楽 信人
 鈴木 俊一

Riku Kitagawa
 Nobuto Matsuhira
 Shunichi Suzuki

1. 研究の背景と目的

2011年の東日本大震災により、福島県大熊町は福島第一原子力発電所の事故で全域が帰宅困難区域となり、住民は故郷に戻れなかった。しかし近年、避難指示が一部解除され、復興に向けた様々な取り組みが進められている。町役場や小学校の現代的な建築、新規事業の誘致など、町をイノベーションの拠点とする計画もある。

このような状況の中、本研究では大熊町を始めとし日本全体における少子高齢化と労働力不足の課題に着目し、ロボット技術による解決策を提案する。遠隔通信による自律走行ロボットと画像認識技術を活用し、ロボットが教師に代わって小学校内を巡回し、日常の小さな異変を検知して事故を未然に防ぎ、児童の些細な変化にいち早く気づくことを目的としている。

また、大熊町が新たに生まれ変わるためには人材の育成が非常に重要である。大熊町の課題に取り組むべく問題解決能力を育成するために、本研究では小学6年生を対象に、ロボット操作体験の授業を実施し、その教育的効果を評価した。

2. 巡回ロボットシステムの開発

2.1 システムの内容

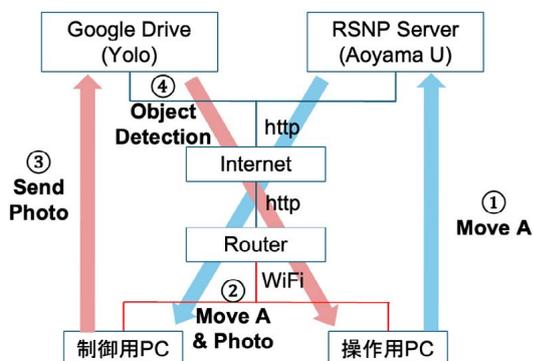


Fig.1 System diagram of the proposed service

Fig. 1に提案するシステムの構成図を示す。本システムでは、ロボット間の共通仕様であるRSNP通信[1]を用いてロボットの自律走行を行い、目的地で撮影した写真をGoogle Cloud上で処理している。異変の検知にはYOLO[2]という学習済みモデルを用いており、物体検出により何もないはずの場所に何かがある状況を検知することとした。

2.2 実証実験と結果

実際に大熊町の小学校でこのシステムの実証実験を行い、一連の動作が正しく実行されることを確認した。一方で物体検出では異変として設定した物体以外も検知してしまっているため、サービスとして実用化する上ではYOLOのファインチューニングにより特定のタスクに特化させることが必要であると言える。

3. 小学校でのロボット体験の実施

大熊町の小学校において、小学6年生6名を対象にロボット体験を実施し、問題解決能力の向上と好奇心の育成を図るとともに、その学習効果を評価した。

ロボット体験が終了した後、小学校の先生方と意見交換を実施し、ロボット体験に対するフィードバックをいただき今後の展望を議論した。子供たちはロボットに非常に興味を持っており、好奇心の育成に関しては十分であると言える。また、小学校のカリキュラムを考慮した上でロボット体験を実施し、授業で習った知識がどのように活用されているかを学ぶことにより、更なる学習効果を期待できるだろう。

参考文献

[1] Robot Service Initiative. Robot Service Network Protocol 2.3 仕様書
 [2] Ultralytics. “Ultralytic YOLO 資料”. Ultralytics 公式ホームページ. <https://docs.ultralytics.com/ja>, (閲覧 2025-01-03)

3.3.4 中性子検出のための⁶Li 添加 Tl:Cs₃(Cu, Li)₂I₅シンチレータの開発

東北大工学研究科・金研	浦野 雄介	Yusuke URANO
東北大金研・NICHe・RCNS, 大阪大レーザー研	黒澤 俊介	Shunsuke KUROSAWA
東北大金研・NICHe	山路 晃広	Akihiro YAMAJI
東北大金研・NICHe	吉川 彰	Akira YOSHIKAWA

1. はじめに

福島第一原子力発電所(1F)の廃炉に向けて、原子炉内部の放射線線量率をリアルタイムでモニタするため、当研究室ではシンチレータの発光を長さ 50 ~ 100 m の光ファイバーで伝送し、炉外にて CCD 分光器カメラで読み出す方法を開発している[1]。1F のような高線量率場では、光ファイバー中のフォトン伝送効率と光ファイバー由来のノイズの影響[2,3]から、シンチレータの特性として長波長発光長、高い発光量が要求される。また、原子炉内部にはガンマ線だけでなく ²⁴Cm 等からの中性子の存在も示唆されており、再臨界が生じていないことを見るためにも、中性子の詳細なマッピングも必要である。したがって 1F 内部で中性子検出に使用するシンチレータは、高い中性子検出能を有し、高い発光量 (30,000 光子/熱中性子以上) を示すことに加え、500 nm 以上の長波長発光を有する材料が要求される。一方で、既存の中性子シンチレータは青色発光を示すものが多く、発光波長は 450 nm より短い。そこでわれわれは、98,200 光子/MeV 以上の高い発光量を持ち、発光波長が 500 nm、Tl:CsI よりも吸湿性が低いといった優れた特性をもつ Tl:Cs₃Cu₂I₅ (Tl:CCI) シンチレータ[5]に着目し、Tl:CCI に中性子捕獲断面積の大きい⁶Li を添加した Tl:Cs₃(Cu, Li)₂I₅ (Tl:CCIL) 結晶を育成し、その発光特性を調査した。

2. 実験方法

⁶Li の添加量を変えた CCIL 結晶を垂直ブリッジマン・ストックバーガー法にて育成した。育成した結晶の相同定は、粉末 X 線回折(粉末 XRD)装置 D8 Discover, Bruker 社) により行った。その後、発光および励起スペクトル測定を、分光蛍光光度計(FP-8300, JASCO 社)を用いて行った。

さらに、¹³⁷Cs 線源と光電子増倍管 (R7600U-200, 浜松ホトニクス社)、マルチチャンネルアナライザ (Pocket MCA8000D, AMPTEK 社) を用いて、ガンマ線励起による発光量を評価した。同様に、²⁵²Cf 中性子線源から放出された高速中性子をパラフィンブロックにて熱中性子まで減速させ、熱中性子励起による発光量を見積もった。

3. 結果と考察

⁶Li 濃度を変えた複数の Tl:CCIL 結晶を得ることに成功し、粉末 XRD の結果から CCI の参考文献[3]と比較して、目的の相が得られていることを確認した。¹³⁷Cs 線源のガンマ線励起による Tl:CCIL のシンチレーション蛍光寿命は、およそ 800 ns と見積もられ、CCI よりも短くなっていることを確認した。また、熱中性子励起による Tl:CCIL の発光量は、Ce 添加 Li ガラス (GS-20, サンゴバン社) の発光量 (6,000 光子/熱中性子) と比べておよそ 9 倍と見積もられた。本講演では、Tl:CCIL 結晶の育成の様子とその光学特性、およびガンマ線や中性子で励起した際のシンチレーション特性について報告する。

参考文献

- [1] <https://fukushima.jaea.go.jp/en/pamphlet/topics/pdf/topics-fukushima070e.pdf>.
- [2] H. Liu *et al.*, "Cherenkov radiation-based optical fibre diagnostics of fast electrons generated in intense laser-plasma interactions", *Rev. Sci. Instrum.*, 89(8) (2018) 083302.
- [3] <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/9504-8006-optical-fiber-loss-and-attenuation>.
- [4] L. Stand *et al.*, "Crystal growth and scintillation properties of pure and Tl-doped Cs₃Cu₂I₅", *J. Phys. Chem. C*, 126 (2022) 12882.

3.3.5 スクリーン印刷法によるコンバータ膜を用いた太陽電池中性子線量計の開発

木更津工業高等専門学校
木更津工業高等専門学校
木更津工業高等専門学校
産業技術総合研究所
理化学研究所
理化学研究所

小林 歩人
栗本 祐司
岡本 保
上川 由紀子
奥野 泰希
小林 知洋

Ayuto Kobayashi
Yuji Kurimoto
Tamotsu Okamoto
Yukiko Kamikawa
Yasuki Okuno
Tomohiro Kobayashi

1. まえがき

福島第一原子力発電所の事故以来、原子炉内部の過酷環境に耐える放射線検出器が必要とされている。そこで我々は太陽電池を用いて放射線を検出する太陽電池型線量計の開発を行ってきた。しかし太陽電池型線量計は α 線、 β 線、 γ 線には感度を有しているが、中性子線に対してはほぼ感度を有していないことが判明している^[1]。そこで中性子を他の放射線種に変換するコンバータ膜をスクリーン印刷により作製し、太陽電池と組み合わせた線量計の開発を進めている。コンバータ膜として B_4C 膜、 LiF 膜、 Gd_2O_3 膜を用い、太陽電池として $InGaP$ 太陽電池、 $CIGS$ 太陽電池、 Si 太陽電池を用いて中性子検出特性を測定し、コンバータ膜および太陽電池の影響を検討したので報告する。

2. 実験方法

コンバータ膜は原料粉末とアクリルバインダ(OLYCOXKC-1700P, 共栄社化学株)を混合してガラス基板(Eagle XG)上にスクリーン印刷し、 $300^\circ C$ で15分間加熱して作製した。 B_4C 膜、 LiF 膜、 Gd_2O_3 膜の厚さはそれぞれ $15\ \mu m$ 、 $30\ \mu m$ 、 $20\ \mu m$ 、 $InGaP$ 、 $CIGS$ 、 Si 太陽電池の光吸収層の厚さはそれぞれ約 $1\ \mu m$ 、 $2\ \mu m$ 、 $180\ \mu m$ である。中性子照射には理研小型加速器中性子源RANSを用いた。中性子線はコンバータ膜内での荷電粒子の自己吸収効果を避けるため、太陽電池側から照射した。

3. 中性子検出特性への太陽電池の影響

Fig.1に様々な太陽電池とコンバータ膜を組み合わせた中性子線量計の誘起電流と陽子電流の関係を示す。 Si 太陽電池の感度は $InGaP$ 太陽電池や $CIGS$ 太陽電池の感度

に比べてどのコンバータ膜においても大きかった。この結果はコンバータ膜の中性子吸収によって放出される荷電粒子の飛程に比べて、 $InGaP$ 太陽電池と $CIGS$ 太陽電池の光吸収層の厚さが小さいためと考えられる。

本研究は、英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の一部として実施した。

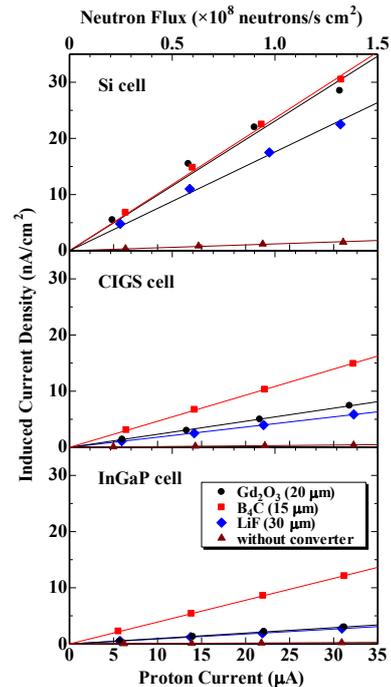


Fig.1 Relationship between induced current and neutron flux for the neutron dosimeters.

第85回秋季応物(2024年9月19日)、PVSEC-35(2024年11月12日)で同一内容を発表済

参考文献

[1] T. Okamoto et al., "Gamma-ray irradiation effects on CdTe solar cell dosimeter", Jpn. J. Appl. Phys., 60, SBBF-02 (2021).

3.3.6 モニタリングポスト削減のための LSTM を用いた空間放射線量率推定

東京大学工学部システム創成学科
システムデザイン&マネジメントコース
4年

菅原 和将

1. はじめに

2011年3月11日に発生した福島第一原発事故以来、福島県内では約3000台のモニタリングポストが設置され、空間放射線量率の測定・表示されている。しかし、モニタリングポストの運用には年間約6億円という非常に高額なコストが発生する。これを踏まえ、本研究では地域住民の安心・安全を確保しつつ、モニタリングポストの数を削減するため、モニタリングポストの代わりにAIモデルにより線量率を推定する方法を提案する。

2. 対象データと線量率推定手法

本研究では、時系列解析に優れ、長期的な依存関係の学習が可能なLSTMを機械学習手法として採用した。

推定地点周辺に設置された複数のモニタリングポストの実測値データを説明変数とし、推定地点の線量率を推定した。

3. LSTMモデルの実用性検証

3.1 モニタリングポストを撤去したシナリオの検証

複数の地域を対象に、モニタリングポストを10分の1に削減し、撤去地点の線量率をAIモデルで推定するシナリオを想定して精度を検証した。その結果、福島市のような線量率が低い地域では高精度な推定が可能だったが、浪江町のように現在も線量率が高い地域では精度が低く、実運用には適さないことが確認された。

3.2 推定期間移行後の定期的な測定による推定モデルの補正

推定期間移行後、1年ごとに1日分の線量率を再測定し、そのデータでAIモデルをファインチューニングする手法を検証した。その結果、福島市では推定精度が大幅に向上し、時間の経過に伴って推定精度が低下する課題が解消された(図1)。一方、浪江町のような

推定精度が極端に低下する地域では、ファインチューニングにより推定精度が向上したものの、運用できる水準には到達しなかった。このような地域でもAIモデルを運用可能にするために、地域ごとにファインチューニングの頻度や再計測の期間を最適化する必要がある。

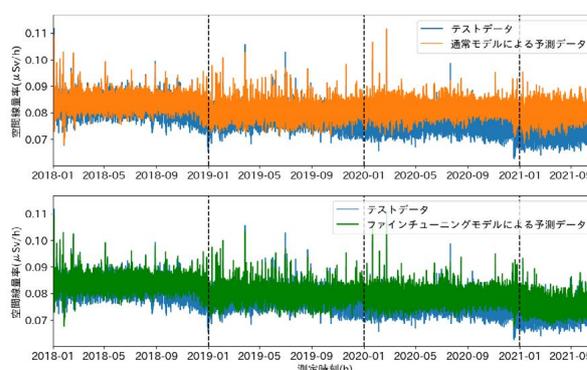


図1 福島市の任意の地点の推定結果

3.3 XGBoostモデルとの比較

伊地知や柳本が構築したXGBoostモデル^{[1][2]}と本研究のLSTMモデルの推定精度を比較したところ、XGBoostモデルのほうが高い推定精度を示した。

また、両モデルの推定結果の特性を分析した結果、LSTMモデルの推定値には細かな変動が多く含まれており、それが推定精度の低下の要因と考えられる。

4. 結論

本研究では、LSTMを用いたAIモデルで福島県の空間放射線量率を推定し、モニタリングポストの代替運用を検証した。結果、高線量で不安定な地域を除けば高精度な推定が可能と確認された。実運用には他地域での精度検証や、地域住民への適切な説明・理解促進が重要である。

参考文献

- [1] 伊地知, 東大工 卒業論文, 2023
- [2] 柳本, 東大工 卒業論文, 2024

3.3.7 軽量遮蔽体による減衰を活用した非指向性検出器による高線量3次元空間における放射線源分布推定

東京大学
東京大学
東京大学
東京大学

森田 英嗣
中島 慎介
安 琪
山下 淳

Eiji MORITA
Shinsuke NAKASHIMA
Qi AN
Atsushi YAMASHITA

1. 緒言

福島第一原発事故では、大量の放射性物質が環境中に飛散した。汚染環境における空間線量の正確な推定は、除染や遮蔽計画の立案に不可欠である。しかし、高線量環境では指向性検出器の使用が難しい。一方で、非指向性検出器[1]では測定点の偏りにより推定精度が低下する課題があるが、高線量環境で使用可能である。本研究では、軽量遮蔽体による減衰を活用し、非指向性検出器を用いた高線量環境下での放射線分布の高精度推定手法を提案する。

2. 放射線源推定手法

本研究では、移動ロボットに搭載した非指向性検出器と軽量遮蔽体を用いて放射線計測を行う。図1に示すように、非指向性検出器の周囲に軽量遮蔽体を配置する。軽量遮蔽体は、非指向性検出器を覆う球殻の8分の1の形状をしている。なお、本図では構造を分かりやすく示すために、非指向性検出器の上半分のみを描画している。この遮蔽体を回転させることで特定方向から入射する放射線を減衰させ、非指向性検出器に指向性情報を付加する。取得した測定結果をもとに、環境地図をグリッドに分割し、MAP推定を用いて放射線源の分布を推定する。またMAP推定を行う際の事前分布に、提案手法である軽量遮蔽体による減衰により得られた指向性の情報を取り入れる。

$$q^* = \arg \max_q \left[\sum_{i=1}^N (\tilde{b}_i \log b_i(q) - b_i(q)) + \sum_{j=1}^M \log p(q_j) \right] \quad (1)$$

計測結果 $b(q)$ から数式(1)を最大化する放射線源分布 q を探索することにより、放射線分布を推定する。

3. 検証実験

シミュレーション環境を構築し、10×10×10 m内に障害物を配置した状況で実験を実施した。放射線源は、環境中に3個の点線源を配置した。Fig.1の検出器を用いて、30箇所の測定点で8回ずつ回転測定を行った。結果はFig.2のようになり、高い精度の推定を達成した。

4. 結言

本研究では、軽量遮蔽体を用いた遮蔽減衰の利用により、非指向性検出器を用いた放射線分布推定の精度向上を図

った。シミュレーション実験を通じて提案手法の有効性を確認した。

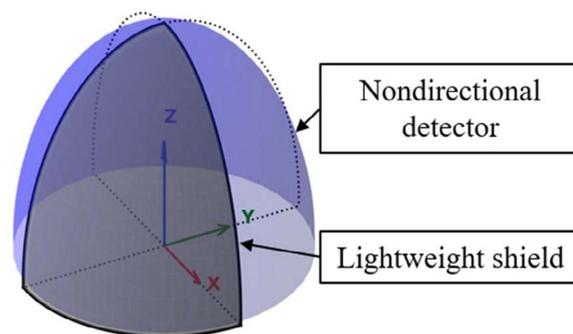


Fig.1 Configuration of the nondirectional detector and lightweight shield

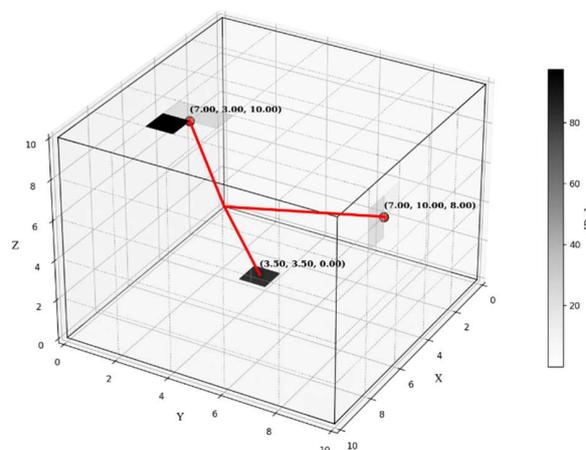


Fig.2 Radiation source estimation result

謝辞 本研究の一部は、JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JPJA24H24020026 の助成を受けた。

引用文献

[1] Minamoto, G. et al., 2014, "Estimation of Ground Surface Radiation Sources from Dose Map Measured by Moving Dosimeter and 3D Map". In: Proceedings of the 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1889–1895.

This is a blank page.

4. 学生発表（ポスター）

4.1 グループ 1

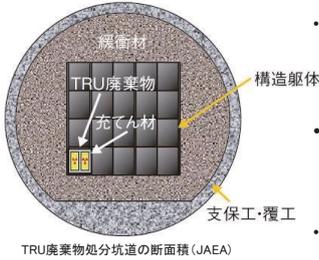
This is a blank page.

4.1.1 ホウ酸塩共存系における事故廃棄物のセメント固化を想定したCa-Al-Si系水和物とEuの相互作用

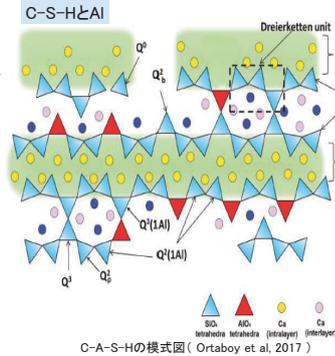
市田正、関亜美、千田太詩、新堀雄一
東北大学

背景・目的

放射性廃棄物処分について



- 放射性廃棄物は地下へ埋設処分される方針
- 低レベル放射性廃棄物とセメントを混和して200Lドラム缶に充填するセメント固化法
- 福島第一原子力発電所の廃炉に伴う事故廃棄物も埋設処分の可能性**
- 廃棄体から溶出した核種が地下水とともに生活圏へ到達することを想定



<カルシウムシリケート水和物(C-S-H)>
 ・セメント系材料の主成分
 ・セメント成分溶出により処分場周辺にも二次的に生成
 ・C-S-HへのEuの吸着はCaとのイオン交換の可能性(Chida et al., 2024)
 →核種との相互作用によるC-S-Hのバリア効果

<Alの影響>
 ・セメント系材料のAl含有量
 普通ポルトランドセメント: 約5wt%
 高炉セメント: 約13wt%
 ・母岩の鉱物を構成する主要元素
 ・Al含有によりC-S-Hの構造が変化
 →核種との相互作用にも影響

AmとEu

- 放射性廃棄物に含まれるAmは線量評価上重要な核種である(半減期は²⁴¹Am:432.2年, ²⁴³Am:7370年(α線放出核種))
- AmとEuは化学的特性が似ている
- 地下環境でAmとEuは溶解度が低く沈殿すると想定、一方、地下水中で移行しやすいコロイドを形成する可能性

周期表(教育出版)より抜粋

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

ホウ酸について

- ¹⁰Bは非常に大きな中性子吸収断面積を持つため、炭化ホウ素の形態で原子炉内における制御棒の材料として用いられている
- 加圧水型原子炉(PWR)の安全設備としてホウ酸水注入系に使用されている
- 福島第一原子力発電所では事故後ホウ酸水が注入され、事故廃棄物の一部にはホウ酸が付着していると予想される
- ホウ酸はセメント凝結を阻害するとされている

本研究の目的

Amの化学アナログとして用いられるEuに関して、ホウ酸塩共存系におけるCa-Al-Si系水和物との相互作用を検討し、その核種閉じ込め効果を明らかにする

実験

SiO₂、CaO、Al(NO₃)₃・9H₂Oを固相合計が1.5 gになるように所定量加える。(CaOは窒素雰囲気下で添加)

窒素雰囲気下
 塩化ナトリウム溶液、
 ホウ酸ナトリウム溶液(Na/B=0.2*)
 もしくはその両方、または超純水を
 30 mL加える。
 Eu(NO₃)₃溶液を30 μL加える。

恒温振とう機で
1, 2, 4週間
振とうする
(25 °C)

遠心分離機と
孔径 0.20 μmシリンジ
フィルターを用いて
固相と液相に分離する

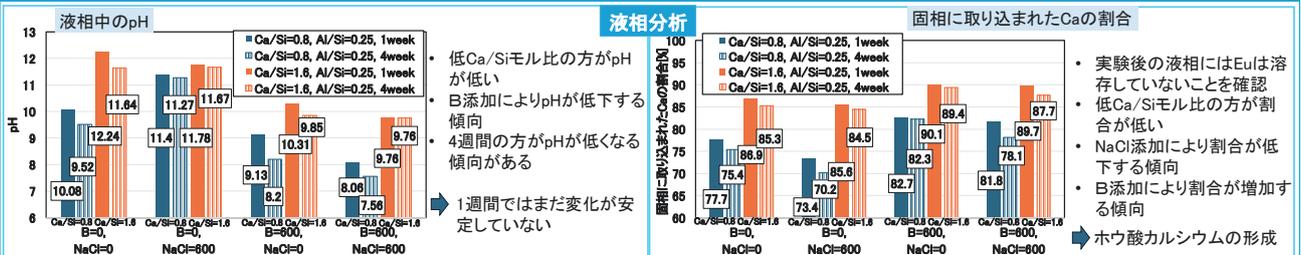
液相
 液相量測定
 ICP測定
 pH測定

固相
 ラマン測定
 蛍光分光分析

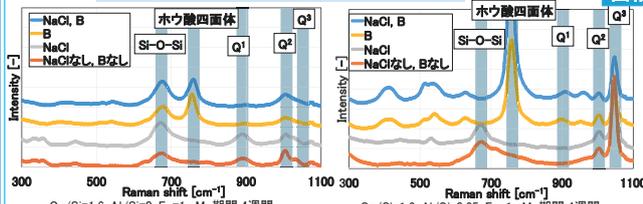
Ca/Siモル比	0.8, 1.6
Al/Siモル比	0, 0.25
B濃度 (Na/Bモル比=0.2)	0, 600 mM
NaCl濃度	0, 600 mM
Eu濃度	0, 1 mM
養生期間	1, 2, 4週間

*B濃度600 mMに対してNaOH濃度120 mMを含んでいる溶液

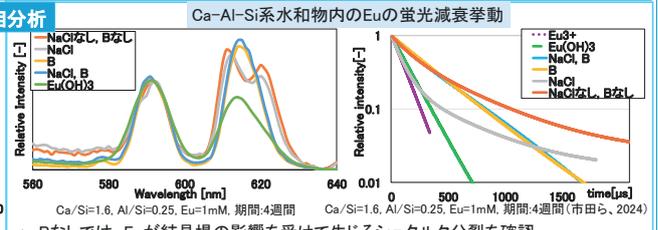
結果と考察



ラマン分光法によるCa-Al-Si系水和物の構造解析



固相分析



結論

本研究では、ホウ酸塩共存系におけるCa-Al-Si系水和物との相互作用について検討した。

- いずれの条件においても、Euは溶存せず、固相側に存在した。
- 蛍光分光分析より、いずれの条件においてもEuはEu³⁺やEu(OH)₃の化学形態になく、Ca-Al-Si水和物に取り込まれていることが示唆された。
- 一方で、EuのCa-Al-Si水和物はホウ酸に影響される可能性がある。
- ラマン分光分析より、Euの取り込みに伴うCa-Al-Si水和物の構造変化は確認されなかった

今後の展望

ホウ酸が共存する系においても、EuはCa-Al-Si水和物と相互作用して固定化されると考えられる

蛍光分光分析より得られたデータを定量的に解析し、Ca-Al-Si系水和物へのEuの吸着挙動に関する考察を深める

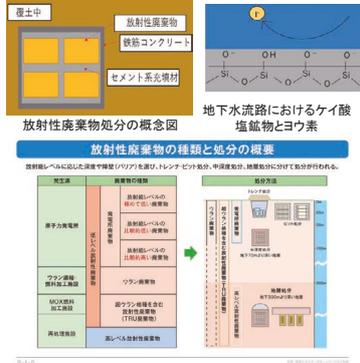
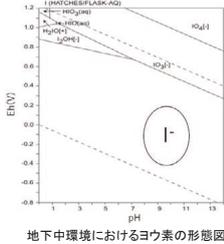
謝辞:本研究の一部は、JSPS 科研費 JP21H04664、JP22K14627 および大熊分析・研究センター拠点事業による。ここに記して謝意を表す。

4.1.3 事故廃棄物のセメント固化を想定したCa-Al-Si系水和物とヨウ素の相互作用に及ぼす硫酸イオンの影響

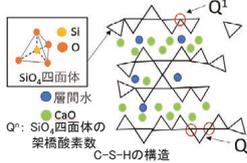
星 雄翔、関 亜美、千田 太詩、新堀 雄一
東北大学

背景・目的

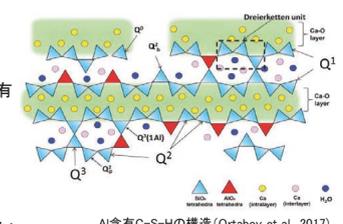
放射性廃棄物処分とヨウ素



カルシウムシリケート水和物 (C-S-H)



- 鎖状構造のSiO₄四面体、酸化カルシウム層、層間水で構成されるケイ酸塩物
- セメント中のC-S-HのCa/Siモル比1.6程度
- 処分場周辺にも二次的にC-S-Hが生成



着目する共存イオン

<アルミニウム(Al)>

- 除染装置のスラッジには硫酸塩が含有
- セメントや地下水に一定量混在
- セメントにスラグ等を混合増加
- Alを取り込んだC-S-Hは構造が変化<硫酸イオン(SO₄²⁻)>
- 低レベル放射性廃棄物に多く含有 (佐々木ら, 1997)、地下水にも溶存
- AlやSO₄²⁻共存下では、C-S-Hとともに **モンサルフェート** (3CaO·Al₂O₃·CaSO₄·12H₂O)や **エトリンガイト** (3CaO·Al₂O₃·CaSO₄·32H₂O)が生成する可能性

本研究の目的

これまで、C-S-Hとヨウ素の相互作用 (Tago et al., 2015) やAl含有C-S-Hとヨウ素の相互作用 (Nagahora et al., 2019) は評価されているが、硫酸イオンの影響は未評価

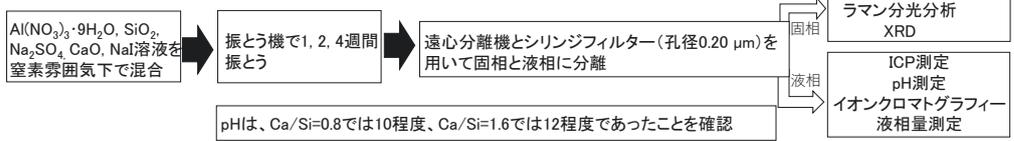
⇒ 事故廃棄物のセメント固化を想定したCa-Al-Si系水和物とヨウ素の相互作用に及ぼす硫酸イオンの影響を評価

地下におけるC-S-Hの二次生成

地下水とセメント系材料の長期接触により、セメント成分(Na, K, Ca)が溶出し、地下水pHが高アルカリとなる
→ 岩盤由来のSiとセメント系材料由来のCaが反応し、C-S-Hが生成

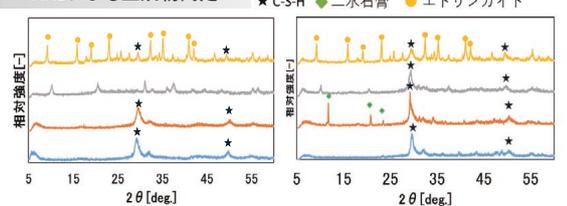
実験方法

I ⁻ 濃度	0.5mM
液固比	10(液相:30mL、固相:3g)
養生期間	1, 2, 4週間
振とう条件	25°C、120stroke/min
Ca/Siモル比	0.8, 1.6
Al/Siモル比	0, 0.25
Si/Caモル比	0, 0.25



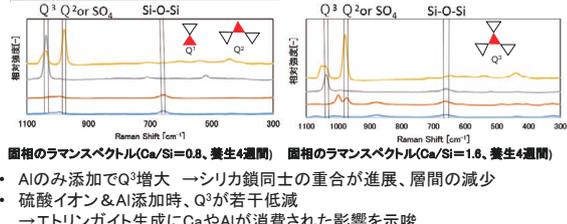
実験結果と考察

XRDによる生成物同定



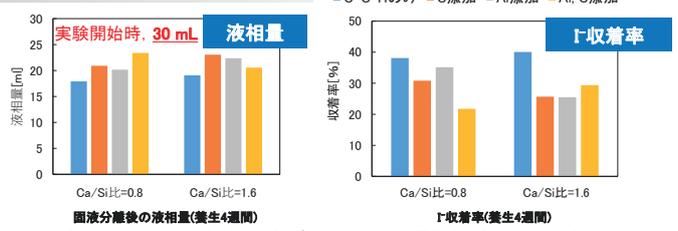
- いずれの条件でもC-S-H(tobermorite)の生成を確認
- 硫酸イオン添加で二水石膏生成 → Ca/Siモル比がCa消費により変化
- 硫酸イオン&Al添加時、エトリンガイトが生成
- C-S-H生成も減少、固相はエトリンガイト割合が多い状態

ラマン分光分析による構造解析



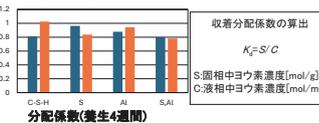
- Alのみ添加でQ³増大 → シリカ鎖同士の重合が進展、層間の減少
- 硫酸イオン&Al添加時、Q³が若干低減
- エトリンガイト生成にCaやAlが消費された影響を示唆

Ca-Al-Si系水和物へのI⁻の収着挙動



既往研究(Tago et al. 2015など)によれば、I⁻はC-S-Hへ層間水ともに取り込まれる。
→ 収着実験後に固相に取り込まれた水分量とI⁻収着率が関連

- 硫酸イオンのみ添加の際にC-S-Hのみと比べてI⁻収着率低下
→ 液相量増加、二水石膏生成によりCa消費、Ca-Al-Si系水和物構造が変化した可能性
- Alのみ添加の際にC-S-Hのみと比べてI⁻収着率低下
→ 液相量増加、Ca-Al-Si系水和物の層間減少に伴い層間水も減少
- 硫酸イオン&Alを添加した場合、Ca/Si=1.6では各々の単独添加よりもI⁻収着率増大
→ エトリンガイト生成の影響、取り込む水分量増大にも寄与する可能性
→ エトリンガイトは僅かにI⁻を収着するとの報告(藤原ら,1999)



- 分配係数K_dは0.78~1.02の範囲 (従来評価のIのK_d(対象は母岩及び人工バリア)は0 m³/kg (NUMO, 2021))
- Ca-Al-Si系水和物は、地下環境におけるI⁻の移行抑制に寄与することが期待される

結言

- 本研究では、事故廃棄物のセメント固化を想定したCa-Al-Si系水和物とヨウ素の相互作用に及ぼす硫酸イオンの影響を評価
 - 硫酸イオン、Alイオンを添加した試料では収着率の減少が見られた。
 - 硫酸イオン、Alイオンを同時にC-S-Hに添加した際、エトリンガイトの生成が確認され、硫酸イオン、Alイオンをそれぞれ単体で添加した場合に比較して収着率の増加がみられた。
 - Ca-Al-Si系水和物は、地下環境におけるI⁻の移行抑制に寄与する可能性が確認された。
→ 事故廃棄物のセメント固化によるヨウ素閉じ込めの可能性
- 謝辞:本研究の一部はJSPS科研費、JP21H04664、JP22K14627の成果である。ここに記して謝意を表す。

今後の展望
Alや硫酸イオンの添加量をパラメータとして、環境によって形態変化したヨウ素酸イオン(IO₃⁻)へも検討対象を広げる。



4.1.4 処分環境におけるフライアッシュ混合セメントによる亜セレン酸イオン固定化の予察検討

荒谷 慎人、関亜美、千田太詩、新堀 雄一
東北大学

背景・目的

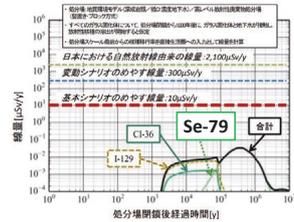
フライアッシュ (FA) のセメント利用

- 1Fの廃炉に伴い発生する放射性廃棄物はセメント固化し埋設処分される可能性がある
- セメント系材料には放射性核種を収着するバリア材としての機能が期待される
- セメント系材料の一つとしてフライアッシュ (FA) を混合したFAセメントや低アルカリセメントの使用が検討
- これらのセメント系材料は普通ポルトランドに比べ、施工性及び長期的な強度に優れている
- 一方で、FAは石炭由来の有害化学物質 (As, Se, Cr(VI)等) を含有
- これらの有害化学物質は水との接触によりその一部が溶出する
- FA利用においては、土壤汚染対策法に基づく溶出量基準 (右表) を満たす必要がある

溶出量基準	
	(mg/L)
カドミウム (Cd)	0.003以下
鉛 (Pb)	0.01以下
六価クロム (Cr(VI))	0.05以下
砒素 (As)	0.01以下
水銀 (Hg)	0.0005以下
セレン (Se)	0.01以下
ふっ素 (F)	0.8以下
ほう素 (B)	1以下

放射性Se

- Se-79は半減期約30万年の放射性核種であり、地層処分システムの性能評価において重要な核種 (右図)
- 1Fの事故廃棄物にもSe-79が含有すると考えられる
- Seは地下水中には大部分が亜セレン酸イオン (SeO_3^{2-}) で存在
- 本研究ではそれに加えてセレン酸イオン (SeO_4^{2-}) についても固定化を検討



高レベル放射性廃棄物に起因する線量と支配核種 (NUMO, 2021)

研究目的

FAのセメント利用に向け、FAが含有するSe, Asの溶出特性、および、Seとの相互作用の検討

実験

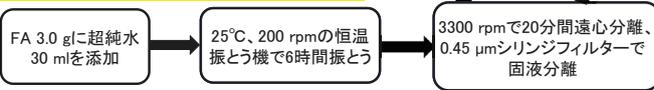
FA試料の主要成分の含有量 (%)									
含有量 (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃
FA 1	70.13	19.16	0.43	0.35	0.14	1.24	0.80	0.12	3.11
FA 2	64.86	19.27	1.32	0.73	0.17	0.91	0.96	0.22	4.16
FA 3	55.91	21.89	2.56	1.49	0.25	1.33	1.00	0.24	4.72



CaO添加

- セメント混合を想定し、FA 3.0gに超純水 1.2 ml, CaO 0.15 gを添加し、混合した後に1週間の静置養生
- その後、超純水 28.8 mlを添加し、以降は左記の溶出試験と同様
- 左の結果をNT, このCaO添加条件の結果をAdd-CaOとし、比較

溶出試験 (環境省告示18号準用)

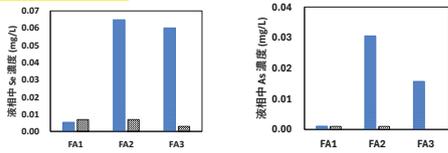


Se収着実験

- 左の溶出試験と同様の手順で、Se溶液 (Na_2SeO_3 1 μM, 1 mM, Na_2SeO_4 1 mM) を用いて、1週間養生により評価
- FAを入れない条件 (blank)、CaO 0.15 gを添加する条件 (Add-CaO) についても実施 (1週間の静置養生は行わない)

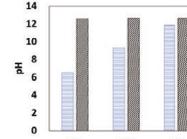
結果と考察

溶出試験結果

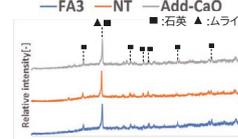


- Se, As濃度はCaO添加と静置養生により基準値 (Se, As: 0.01 mg/L) 以下に低下

CaO添加によるSe濃度変化

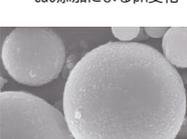


CaO添加によるAs濃度変化 (荒谷ら, 2024)



- CaO添加により、pHはすべての試料で12.6程度まで上昇
- XRD分析では、いずれの条件においても変化は見られない

CaO添加によるpH変化

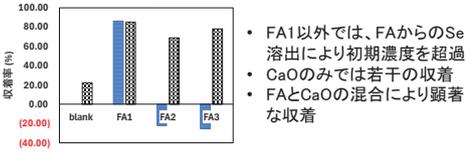


FA3の溶出試験前後のXRD分析結果



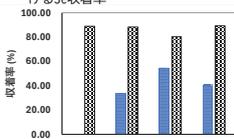
- SEM画像では、CaO添加により粒子表面に針状結晶の生成が確認
- EDXにより針状結晶にSやAl, Caの存在を確認
- この針状結晶はエトリンガイト ($\text{Ca}_2\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) であると考えられ、Se, Asの不溶化への寄与が示唆

Se収着実験



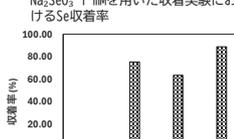
- FA1以外では、FAからのSe溶出により初期濃度を超過
- CaOのみでは若干の収着
- FAとCaOの混合により顕著な収着

Na₂SeO₃ 1 μMを用いた収着実験におけるSe収着率



- FAのみでも収着
- CaO添加では、CaSeO₃として沈殿した可能性 (CaSeO_3 の溶解度積 $\text{p}K_{sp} = 7.27$ より) (I. Baur 2003)

Na₂SeO₃ 1 mMを用いた収着実験におけるSe収着率



- FAのみ、CaOのみでは収着はほぼ見られない
- FAとCaOの混合により顕著な収着

FAとCaOの混合はSe-79の収着に寄与する可能性が示された

結言

- 本研究ではFAからのSe, Asの溶出挙動とFAによるSeの収着について評価した
- FAとCaOとの混合によるSe, Asの不溶化の有効性を確認
- FAとCaOの混合によるSeの固定化の可能性を示すことができた

事故廃棄物の処理・処分へのFA混合セメントの有効利用の可能性

今後の展望

実際にセメントと混合することでより実環境に近づけた溶出試験や収着実験について行う

本研究の一部は、経済産業省の委託事業「令和5年度放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務」およびJSPS科研費JP22K14627の成果である。ここに記して謝意を表す。

4.1.5 放射性廃棄物処分環境における過飽和ケイ酸の析出によるセシウムの移行抑制効果に関する予察

榎木 稜太、千田 太詩、関 亜美、新堀 雄一
東北大学

背景・目的

福島県内の汚染土壌の中間貯蔵・最終処分



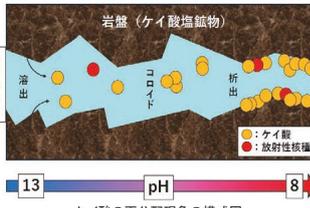
福島第一原発事故による汚染土壌
…中間貯蔵施設で貯蔵されているが、
2045年までに福島県外で最終処分

福島第一原発の廃炉に係る廃棄物
…最終的には地下施設に埋設処分
される可能性が高い

原発事故由来の放射性Csを含む
⇒その地中での挙動や他の物質との
相互作用について解明する必要がある

双葉町の中間貯蔵施設(土壌貯蔵施設)
(https://www.iesconet.co.jp/interim_infocenter/)

ケイ酸の再分配現象



本研究の目的

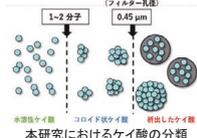
除染廃棄物の処分環境における過飽和ケイ酸の析出によるCsの移行抑制効果を示す

処分場近傍

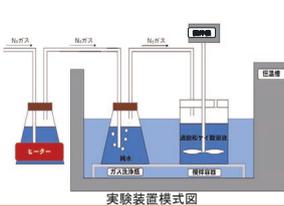
セメント系材料からのアルカリ成分溶出によって地下水のpH上昇
⇒岩盤の主成分のケイ酸の溶解度も増加
⇒ケイ酸が地下水に溶け出し流路拡大

下流域

アルカリ成分の分散で地下水のpH低下
⇒ケイ酸の溶解度も減少
⇒ケイ酸が析出し流路狭硬化



実験



実験装置模式図

地下の液相に対する固相の比表面積を模擬するため (BET法)比表面積=357 m²/g

所定の時間でサンプリング (フィルター濾過で固相を分離)

コロイド粒径とゼータ電位を測定

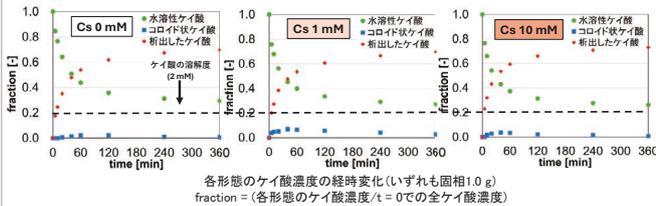
水溶性ケイ酸
コロイド状ケイ酸
固相に析出したケイ酸
それぞれの濃度を定量

Csイオン濃度の定量

実験条件	
pH	8
溶液温度 [°C]	0, 0.25
固相量 [g]	0.1, 0.5, 1.0
サンプリング時間 [min]	0, 5, 10, 20, 40, 60, 120, 240, 360
初期過飽和ケイ酸濃度 [mM]	8
初期Csイオン濃度 [mM]	0, 1, 10

結果と考察

1. ケイ酸析出に関するCs濃度依存性

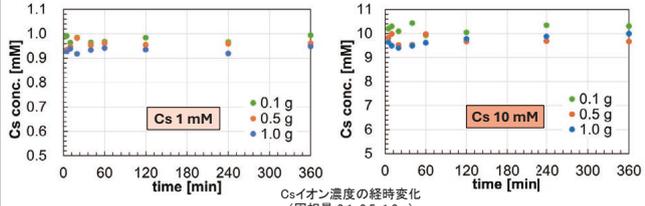


水溶性ケイ酸 : 初期Csイオン濃度が高いほど速く減少
最終的には初期Csイオン濃度によらず3 mMまで減少

コロイド状ケイ酸 : Cs 1 mMのとき最多、Cs 0, 10 mMではほとんど形成されず
析出したケイ酸 : Cs 1 mM→10 mMで
(コロイド状ケイ酸の減少分)=(析出したケイ酸の増加分)
⇒共存イオン濃度の増大によって電気二重層が圧縮
⇒コロイド状ケイ酸が凝集し、過飽和ケイ酸の析出が促進

Csイオン添加によってケイ酸の析出量が増加

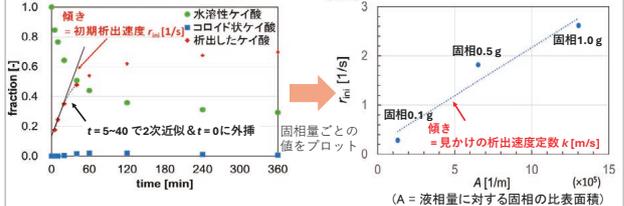
2. 液相中のCsイオン濃度の変化



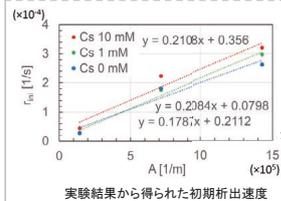
①Csイオンの吸着率は初期Cs濃度に依らずほぼ等しい
②Cs 10 mMのとき、Csイオン濃度がt=60 [min]までに少し低下してから上昇
その後一定値をとった
⇒ケイ酸の析出とともにCsイオンが一時的に固相へ吸着したと考えられる

Csイオンの吸着量/率は液固比に依存する

3. 見かけの析出速度定数の導出



各条件でのkを比較⇒Csの影響を評価
k 大 = 過飽和ケイ酸の析出が速く進展 = 核種移行抑制効果が高い



Cs濃度 [mM]	見かけの析出速度定数 k [m/s]
0	1.79 × 10 ⁻¹⁰
1	2.08 × 10 ⁻¹⁰
10	2.11 × 10 ⁻¹⁰

Csイオンの共存でケイ酸析出はわずかに促進される

4. ダムクーラー数による核種移行抑制効果の評価

ダムクーラー数 D_a : 移流速度と反応速度の比を表す無次元数
 $D_a > 1$ ⇒ 「ケイ酸の析出反応 > 移流による物質移動」

$$D_a = \frac{kAx^*}{u} \quad (= \frac{\text{析出速度}}{\text{移流速度}})$$

代表長さ x^* [m]	100
ダルシー流速 u [m/year]	0.5
固相の比表面積 A [1/m]	2.0×10^4

Cs濃度 [mM]	ダムクーラー数 D_a [-]
0	2.47×10^4
1	2.88×10^4
10	2.91×10^4

$D_a \gg 1$

本研究で想定される条件において
地下水の移流に対して
過飽和ケイ酸の析出が支配的

結言

本研究の目的

過飽和ケイ酸の析出によるCsの移行抑制効果を示す

得られた知見

Csイオン共存下においてケイ酸の析出が進展Csの移行を抑制する可能性を示唆

今後の展望

実環境に想定されるAI等を含むようなケイ酸析出条件での核種移行抑制効果を検討する

謝辞:本研究の一部は、JSPS 科研費 JP21H04664 および JP24K01395 によった。ここに記して謝意を表す。

4.1.6 福島第一原子力発電所における固体廃棄物貯蔵庫収納容器内の放射能インベントリの推定手法の開発

福井大学 石橋賢人

研究背景・目的

背景

福島第一原子力発電所事故で発生したガレキはコンクリート、金属で主であり、そのうち、表面線量率が30mSv/hを超える高線量の廃棄物は、固体廃棄物貯蔵庫のコンテナ内で保管されている。



図1 固体廃棄物貯蔵庫のコンテナ

放射能濃度管理への移行に向けた基本方針

ガレキ類

表面線量率により区分・管理が行われている既発生したガレキ類について、放射能濃度の推定、それに応じた管理をする手法を構築する。

目的

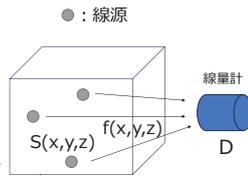
各コンテナの重量とコンテナ外側での線量がわかっている



線量計の線量率実測データからコンテナ内の放射能インベントリを推定する手法を開発する

放射能インベントリを求める原理

コンテナ内の線源の分布が $s(x, y, z)$ であるとき、微小線源 $s(x, y, z)dx dy dz$ に換算係数 $f(x, y, z)$ をかけたものの和が線量計の線量率実測データ D となる。



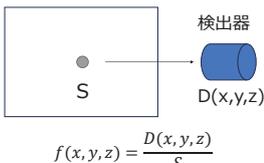
$$D = \iiint s(x, y, z) \cdot f(x, y, z) dx dy dz$$

すでにわかっている線量率実測データ、換算係数 $f(x, y, z)$ から線源の分布 $s(x, y, z)$ を推定する。

換算係数の求め方

換算係数 f を求めるため、粒子・重イオン挙動解析コード (PHITS) [1]を用いてシミュレーションを行った。

点線源の位置 (x, y, z) と線源強度 S を設定し、そこから γ 線が放出され検出器で受け取った線量率 $D(x, y, z)$ から換算係数 f を求めた。

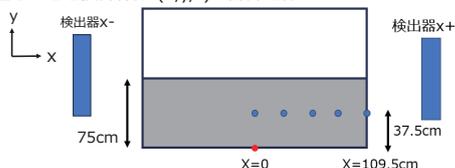


換算係数 f は線源の位置や検出器の位置によって変化するので、コンテナ内に細かく線源を配置し、計算していない点は内挿を行うことで線源位置に対応する換算係数 f を求めることができる。

[1] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, H.N. Ratliff, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Silver and K. Nitta, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.34, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135 (2024)

計算体系

- ・コンクリートと空気混合物
- ・コンテナ内高さ75cmまでガレキが充填されている
→(個々のガレキの詳細な形状は無視した)
- ・放射線源はCs-137
- ・コンテナの中心の底面に位置する座標を(0,0,0)とした
- ・ $y=37.5\text{cm}, z=0\text{cm}$ に固定し $x=-109\sim 109\text{cm}$ の間にひとつの点線源を配置したとき換算係数 $f(x, y, z)$ の計算を行った



換算係数

点線源をx軸方向に配置し、それぞれの点で換算係数を求めた(図2)。検出器に近くに配置したときの換算係数は指数関数的に減衰しているのに対し、検出器から離れるほど減衰が小さくなる結果となった。

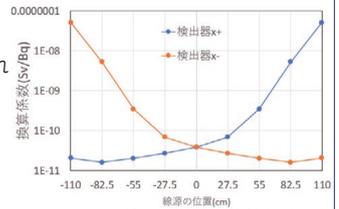


図2 線源の位置と換算係数

点線源のコンクリート内での減衰

点線源からの γ 線がコンクリート内を通過する際の線量の減衰は指数関数に従う。(1)

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \dots (1)$$

I : 厚さ x のコンクリートを通じた後の直接線の強度(線量率)
 I_0 : コンクリートに入射する前の放射線の強度(線量率)
 μ : コンクリートの線減弱係数(/cm)
 x : コンクリートの厚さ(/cm)

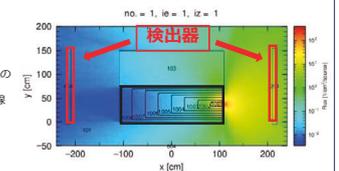


図3 点線源 $x=109$ での粒子の軌跡

図3は $x=109\text{cm}$ に点線源を配置したときの粒子の軌跡を表したものである。この図3より、コンクリート内を通過した粒子だけでなく、空気中を通過して検出器に到達した粒子によって検出器から離れた点線源の換算係数の減衰が抑えられたと考えられる。

点線源2個モデルの検討

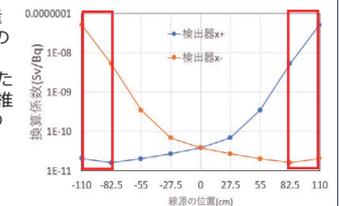
コンテナ内の放射能インベントリが一番大きくなるのは、点線源が1個のときだと考えた。そこで、図2の換算係数 $f(x)$ を用いて、点線源1個モデルと点線源2個モデルでの放射能インベントリ S の比較を行った。

$$D = f(x) \cdot S = f(x_1) \cdot S_1 + f(x_2) \cdot S_2$$

点線源1個

上式の検出器が受け取る線量 D に同じ値を与え、 S と S_1+S_2 の値を比較すると、図4グラフの赤四角にかまれた範囲で点線源2個モデルの方が推定される放射能インベントリの最大値が大きくなることが分かった。

点線源2個



点線源 $x=100\text{cm}$ での線量を用いて放射能インベントリを比較した(表1)

表1 放射能インベントリの比較

	放射能インベントリ(Bq)	この結果よりさらに点線源の数を増やす必要があるのか、また増やした際に放射能インベントリはどこまで大きくなるかと推定できるかを確認する必要がある
1線源モデル	1.0	
2線源モデル(max)	1.0646	
2線源モデル(min)	0.4526	

まとめ・今後の予定

- ・X軸方向で点線源を配置し、一次元方向で換算係数を求めた
→コンクリートの薄いところから空気中に飛び出した粒子が検出器を通過することで、線量の減衰が抑えられた。
- ・点線源2個のモデルの方が推定される放射能インベントリが大きくなる範囲が見つけられた
→点線源の数をさらに増やす必要があるのか、放射能インベントリがどこまで大きくなるか

4.1.7 原子炉内部での無線通信を可能にするための高放射線耐性受信機

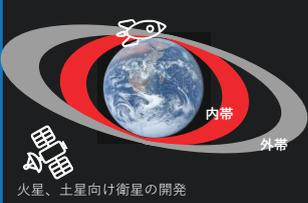
成清泰斗 谷中瑚太郎 白根篤史
東京科学大学 工学院 電気電子系



研究背景

高放射線耐性を有する無線データ伝送用チップセットの要素開発(高周波アナログ回路開発)

ヴァンAllen帯を超える深宇宙探査



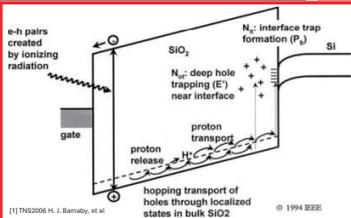
原子力発電所の安全な廃止
令和6年度 英知を結集した原子力
科学技術・人材育成推進事業 課題
解決型産研研究プログラム



電子回路への放射線の影響

SEE デジタル回路に影響
単発粒子が入射した際に生じる誤動作
陽子線・重粒子線が要因

TID アナログ回路に影響
定常的な放射線被曝による特性変化
電子線や陽子線が要因

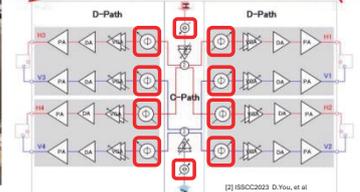
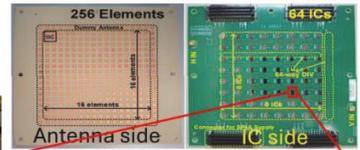


TIDの原理
1) e-hペアを生成
2) 再結合
3) 一部の残留したe-hペアが移動
4) 電子の正孔トラップにより新たな正孔の生成あるいはSiO2中の水素との反応による自由電子の生成

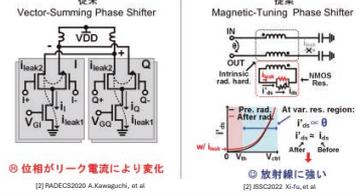
過去にTID試験した宇宙向けIC

衛星搭載向けKa帯送信機

4円偏波出力
25.5~25GHz
65nm CMOS process
放射線耐性位相器

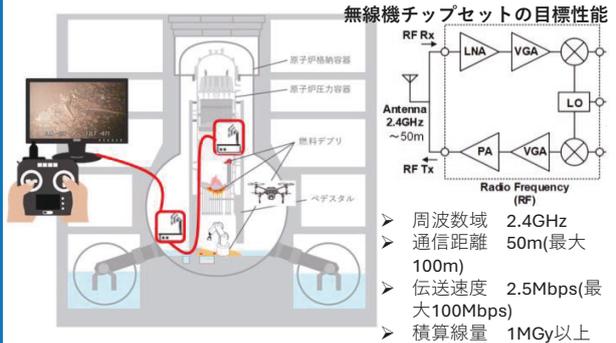


測定数	照射量	合計照射量
#1	0.1Mrad/hx10h	1Mrad
#2	0.1Mrad/hx20h	3Mrad
#3	0.1Mrad/hx20h	5Mrad
#4	0.1Mrad/hx50h	10Mrad



原子炉内部向けRF回路目標

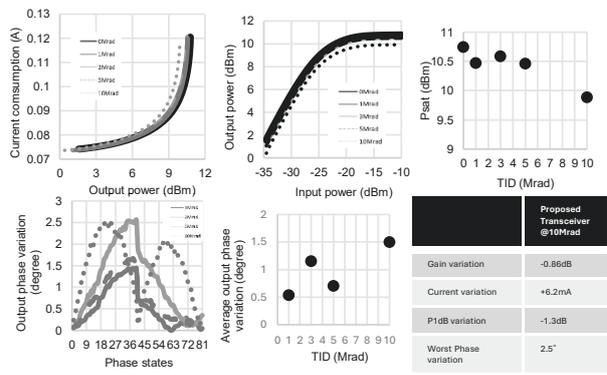
原子炉圧力容器内部で使用可能な無線システム



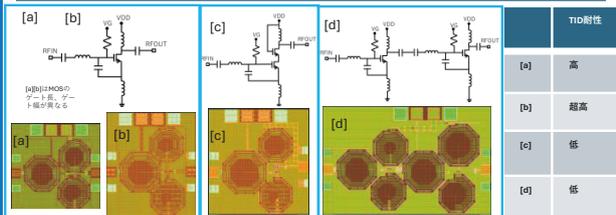
無線機チップセットの目標性能

- 周波数域 2.4GHz
- 通信距離 50m(最大100m)
- 伝送速度 2.5Mbps(最大100Mbps)
- 積算線量 1MGy以上

測定結果

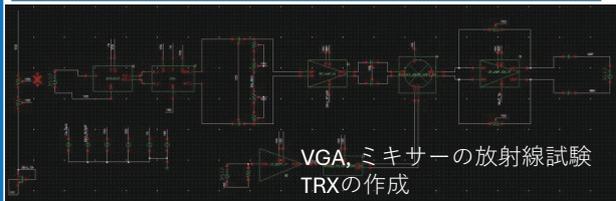


作成した2.4GHzLNA



4種類の異なる回路設計のLNAを作成し、これにガンマ線を照射し、それぞれの回路における性能の劣化具合を比較する。

今後の展望



VGA, ミキサの放射線試験 TRXの作成

謝辞
This work is partially supported by JAEA (PJJA24P402083), MIC/SCOPE #19220002, #192103003, and #P235003011, MC (JPJ00254) and VDEC in collaboration with Cadence Design Systems Inc., Mentor Graphics, Inc., and Keylight Technologies Japan, Ltd.

参考文献
[1] H. J. Barnaby, "Total-Ionizing-Dose Effects in Modern CMOS Technologies," in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 53, no. 6, pp. 3103-3121, Dec. 2006.
[2] D. You et al., "19.4 A Small-Satellite-Mounted 256-Element Ka-Band CMOS Phased-Array Transmitter Achieving 63.8dBm ERP Under 26.6W Power Consumption Using Single-Dual-Circular Polarization Active Combs," IEEE International Solid-State Circuits Conference, pp. 296-300, Mar. 2023.
[3] A. Kawaguchi, J. Pang, Z. Li, K. Yamaguchi, A. Shirai, and K. Ohaki, "Total Ionizing Dose Effects on 28GHz CMOS Bi-Directional Transceiver for 5G Non-Terrestrial Networks," 20th European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, pp. 1-4, Aug. 2020.
[4] D. You et al., "A Low-Power Radiation-Hardened Ka-Band CMOS Phased-Array Receiver for Small Satellite Constellation," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 59, no. 2, pp. 349-363, Feb. 2024.



4.1.8

SEEM学構築に向けた1F廃炉エスノグラフィーシステム

吉田 佳乃子¹, 中尾 虹海¹, 安田 仲宏², 高橋 信³, 渡邊 豊⁴, 小山 智加⁵, 米山 昭彦⁵, 小野 晋太郎⁵.

¹福井大学工学研究科, ²福井大学附属国際原子力工学研究所, ³東北大学大学院工学研究科,

⁴東北大学原子炉廃止措置基盤研究センター, ⁵株式会社 構造計画研究所

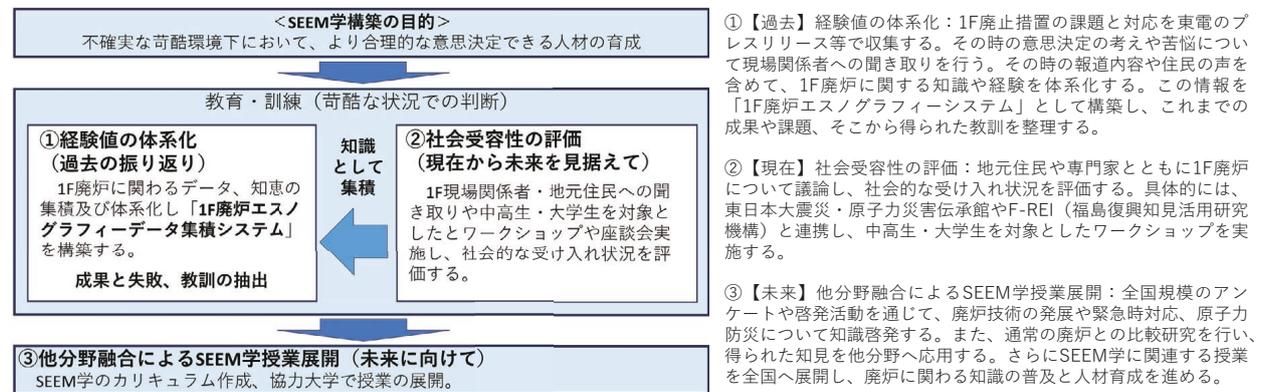
Email: kanokoyoshida01@gmail.com

1. 背景

福島第一原子力発電所 (以降、1F) の廃止措置は「東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所 1~4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ[1]」に基づき、30~40年の計画が進められている。1F廃炉は人間が踏み込めない高線量場であり、原子炉建屋内は電気も電波もない環境の中で原子炉内の状況を把握し廃炉を進めなければならない。この計画は人類史上前例がなく、過酷な環境下で数多くの不確実な課題に直面している。現在、廃炉作業に関わる技術者や作業員は、個人や組織の経験則に基づいて意思決定を行っているが、そのマネジメント手法は体系化されていない。さらに、今後は事故当時を知らない世代が廃止措置を担うことになり、過去の判断や経験を学び、適切な意思決定ができる人材を育成する必要がある。このような未経験の過酷環境に対し、既存の知見だけでは十分に対応できないため、不確実性を考慮しながら最適な解決策を導き出す新たな理論やエンジニアリング・マネジメント手法が求められる。そこで、新たな学問分野「シビアエンジニアリングマネジメント (Severe Environment Engineering and Management, SEEM)」を定義し、廃炉のみならず、他の分野にも応用可能な理論と実践的アプローチの構築を目指し、SEEM学を体系的に学ぶための研究人材育成システムの確立にも取り組んでいる[2]。

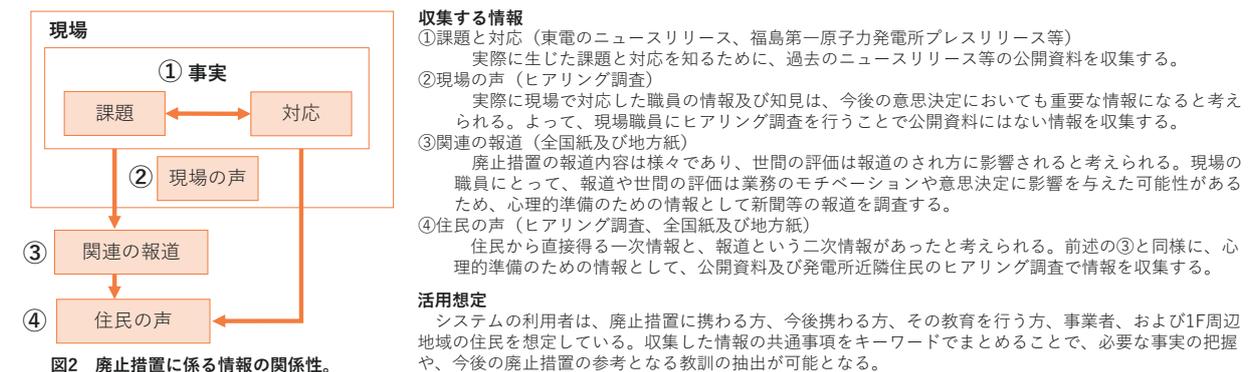
2. SEEM学を構築する上でのコンセプト

SEEM学を構築する目的は、不確実な過酷環境において、合理的な意思決定ができる人材を育成することである。これを達成するために1F廃止措置に関わる「①経験値の体系化」「②社会受容性の評価」「③他分野融合によるSEEM学授業展開」の手順に則り教育・訓練を行う。



3. 経験値の体系化：1F廃炉エスノグラフィーシステム

今後廃止措置に携わる人材を育成するためには、これまでに行われてきた廃止措置に関する取り組みを把握できる環境を整える必要があると考える。そこで、「1F廃炉エスノグラフィーシステム」では、廃止措置に関わるデータを収集し、システムに格納することで、知見の集積と体系化を行う。このシステムにより、過去の事例を把握し、教訓を得ることができる。



4. まとめと今後の展望

福島第一原子力発電所の廃止措置は不確実性を伴う過酷環境で進められている。このような未知の領域において対応するため手法を研究する学問をSEEM学と定義した。このSEEM学構築は、①1F廃炉に関する経験値の体系化、②社会受容性の評価、③他分野融合によるSEEM学授業展開の3ステップで行う。先駆けとなる経験値の体系化を目指し、「1F廃炉エスノグラフィーシステム」を構築する。廃止措置に関する課題と対応、現場の声、関連の報道、住民の声を収集・整理する。本システムにより、廃止措置に関する知見を集積・体系化することで、これまでの廃止措置における事実の把握や今後の取組において参考となる教訓の抽出を可能にする。今後は具体的なシステムの構築に取り組み、本システムを活用したSEEM学に関連するカリキュラムの作成や全国の授業展開に繋げる。

参考文献

- [1] 原子力災害対策本部政府・東京電力中長期対策会議、東京電力株式会社福島第一原子力発電所 1~4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ、平成 23 年 12 月 21 日。
- [2] 次期研究人材育成プログラムについて、JAEA、<https://clads.jaea.go.jp/jp/eichijigyo/human.html> (2025/2/2閲覧)。

4.1.9 充電/通信回路を分離したハーモニックセンサノード

濱田 清空¹, 村田 翔¹, 芹澤 伊織¹, 久我 宣裕¹
 (¹横浜国立大学 理工学府)

研究背景, 目的

- 高放射線環境での無線センシングにおいて, チップICを用いたタグ[1-2]は誤動作の可能性がある.
- 無線機にダイオードを用いたハーモニックタグ[3]は, チップレスでセンサ情報を通信可能なため, 有効である.
- 一方で無線充電機能が搭載されていないため, パッシブ動作に課題がある

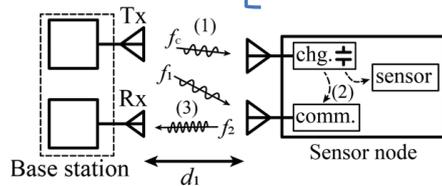


目的

- チップレスな無線充電機能の搭載によるハーモニックセンサノードのパッシブ化
 → 遠隔実験により動作検証

センサ情報の通信手法

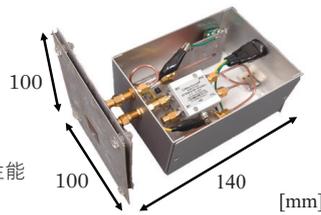
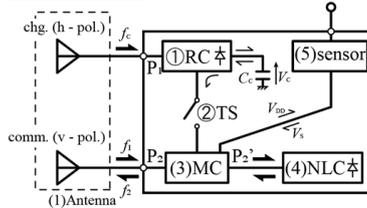
- (1) センサノードの無線充電
 - (2) センサノードの起動
 - (3) センサ情報の通信
- ① f_1 周波数信号を受信
 ② f_2 周波数に変換
 ③ センサ情報をのせ再放射



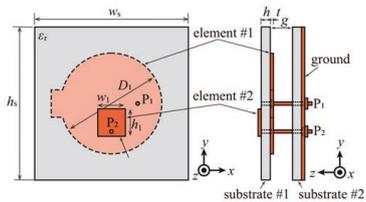
無線充電機能を搭載したセンサノード

センサノードの構成

- (1) アンテナ
 → 2系統一体型 (右図)
- (2) 無線充電回路
 ① 整流回路
 ② 充放電切り替え回路
- (3) 変調回路
 * デジタル変調回路
- (4) 無線機
- (5) センサ
 → 温度センサ

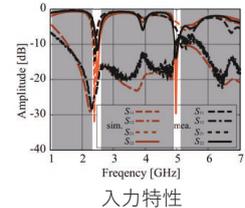


分離構成のため, 各回路の性能改善が可能



アンテナの構成

- ✓ 充電用ポート P1 と通信用ポート P2 を備えた 2 系統一体型構成
- × アンテナが狭帯域動作のため, 変調方式がデジタルに制限される



無線での充電・センサ電圧通信

電波暗室内, 基地局との距離 3 m での遠隔実験

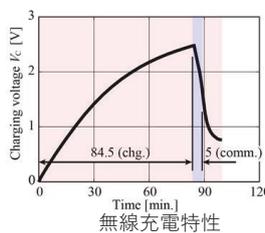
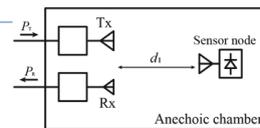
- * 無線充電: $f_c = 2.45$ GHz
- * センサ情報通信: $f_1 = 2.5$ GHz, $f_2 = 5.0$ GHz

(左図)

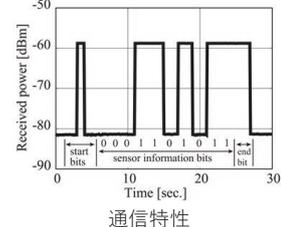
- ✓ 無線充電 → 通信 → 再充電の 1 サイクルは約 100 分
- ✓ 100 分中 5 分間センサノードが駆動

(右図)

- ✓ 駆動中 30 秒おきにセンサの出力電圧を通信
 → パッシブ動作を実現
- × デジタル変調



測定環境



まとめ

- ✓ チップレスな無線充電機能の搭載により, センサノードのパッシブ化を実証
- アンテナの広帯域化 → ICチップを用いない変調方式の適用
- 放射線環境における動作検証

参考文献

- [1] C. Mikeka, et al., IEICE trans B. vol. J95-B, no.2, pp.130-137, Feb. 2012.
- [2] R. Colella, et al., IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 63, no. 5, pp. 2272-2281, May 2015.
- [3] N. Kuga; et al. "Passive Broadband Harmonic Sensor-Tag using Circular Disk Dipole Antenna," IEEE WiSNeT, Jan. 2024

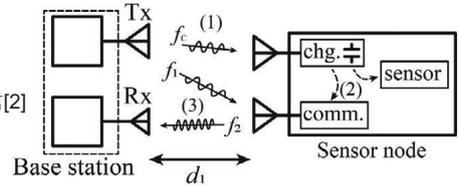
4.1.10 センサ電圧をアナログ変調するハーモニックセンサノード

村田 翔¹, 芹澤 伊織¹, 濱田 清空¹, 久我 宣裕¹
 (¹横浜国立大学 理工学府)

研究背景

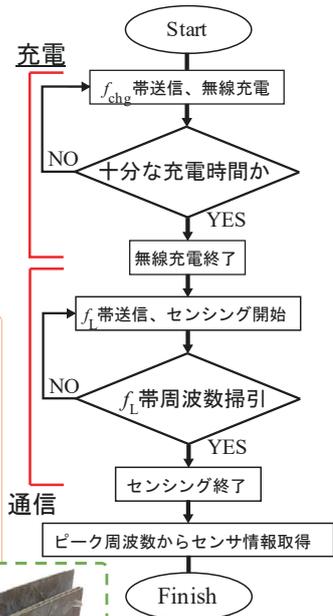
- ・高放射線環境では、デジタル素子を用いないセンシングが必要
 - ハーモニック通信：RFIDチップ不要、ダイオードを用いた通信[1]
 - アナログ変調：デジタル回路不要、センサ情報を周波数情報に変換して通信[2]

アナログ変調によるフルパッシブセンサノード



充電・通信フロー

- 1) 充電周波数 f_{chg} を基地局から送信、無線充電が開始
- 2) 十分な充電時間が経過後、センサノードのスイッチがonとなり通信可能に
 ※現在は充電時間を予め把握、今後はライト等の遠隔で視認可能な方法に
- 3) 通信用上り周波数帯 f_l を基地局から周波数掃引、各 f_l 信号に対する2倍波 f_H を観測
 ※パルス波の照射による一斉送信も可能
- 4) 得られた f_H 帯観測レベルのピークから、対応するセンサ情報を取得



センサノードの構成

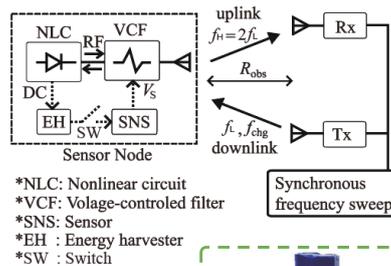
1) 充電時

- ・アンテナで f_{chg} 信号を受信、NLC内のダイオードに印加
- ・NLCで生じた直流電流がEH内コンデンサに充電

↓ 閾値電圧へ到達しスイッチon

2) 通信時

- ・アンテナで f_l 帯受信、NLCへ印加
- センサ情報に対応した周波数のみカット
- ・NLCで2次高調波生成、アンテナから再放射



*NLC: Nonlinear circuit
 *VCF: Voltage-controlled filter
 *SNS: Sensor
 *EH: Energy harvester
 *SW: Switch



無線での充電・センサ情報通信

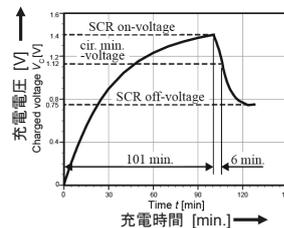
- ・センサ：温度センサ（電圧出力センサとしての基礎検討）
- ・距離6mの暗室内で測定
- ・基地局アンテナ4×4ダイポールアレー（Tx: 18dBi, Rx: 20dBi）

1) 充電時

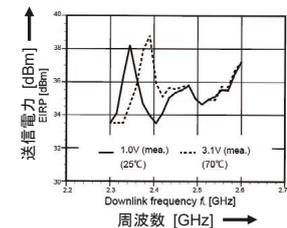
- ・動作時間はセンシング通信の必要な時間を満たす必要有
- ・閾値電圧1.4Vまで100分で充電完了、その後6分の動作時間

2) 通信時

- ・25°Cと70°Cの場合のセンシング
- ・2.0Vの差で約5dBのピークを検出（オペアンプで差を拡大）



充電時及び通信時の充電電圧の変化



周波数掃引で得られたセンサ情報取得結果

Conclusion

高放射線環境下で使用可能な、アナログ変調によるセンサ情報の遠隔取得が可能なセンサノード構成を提案した。センサへの無線充電とアナログ変調でのセンサ情報取得を、フルパッシブで実現した。

References

- [1] S. Mondal, P. Chahal, "A passive harmonic RFID tag and interrogator development," IEEE Journal Radio Frequency Identification, vol. 3, no.2, Jun. 2019.
- [2] Kuga; et. al. "Passive Broadband Harmonic Sensor-Tag using Circular Disk Dipole Antenna," IEEE WiSNeT, Jan. 2024

4. 学生発表（ポスター）

4.2 グループ 2

This is a blank page.



Osaka University

4.2.1 ハイパースペクトルイメージングによる1F炉内物質の把握

佐藤亨哉¹, 牟田浩明¹, 沖田 隆文¹, 坂口 知聡², 坂本 寛², 大場 弘則³, 若井田 育夫³, Paul Murray⁴

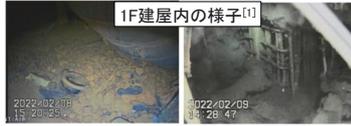
¹ 大阪大学大学院工学研究科, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1
² 日本核燃料開発株式会社, 〒311-1313 茨城県東茨城郡大洗町成田町2163番地
³ 日本原子力研究開発機構, 〒319-1111 茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地1
⁴ University of Strathclyde, 16 Richmond Street, Glasgow, UK



Muta Laboratory

Introduction

✓ 炉内状況、廃炉作業時の課題

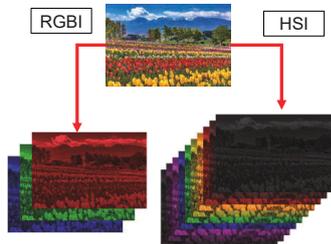


✓ 建屋内が高線量
 ✓ 建屋内部のデブリ・ガレキについて情報が不足
 → 炉内物質の事前把握が必要

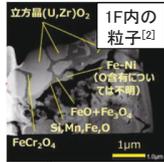
✓ 模擬物質の選定^{[2][3][4][5]}

種類	化学式または材料
ウラン含有	(U,Zr)O ₂
金属	Fe _{0.8} Ni _{0.2} , Fe ₂ Zr, SUS304, Pb, 鉄筋 (SD295)
酸化物	Fe ₃ O ₄ , (Fe,Cr) ₃ O ₄ , FeO, Fe ₂ O ₃ , ZrSiO ₄ 等
コンクリート	コンクリート、およびコンクリート反応物

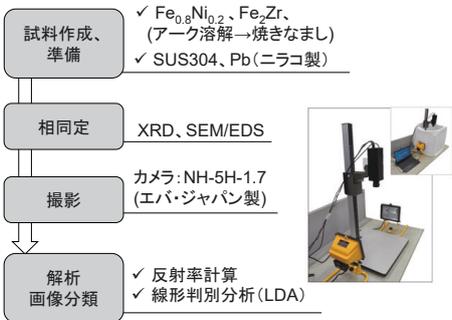
✓ HSI(Hyperspectral Imaging)



✓ 対象の二次元分光情報を100色以上取得
 → 対象表面の構成要素特定に有効



Experiment



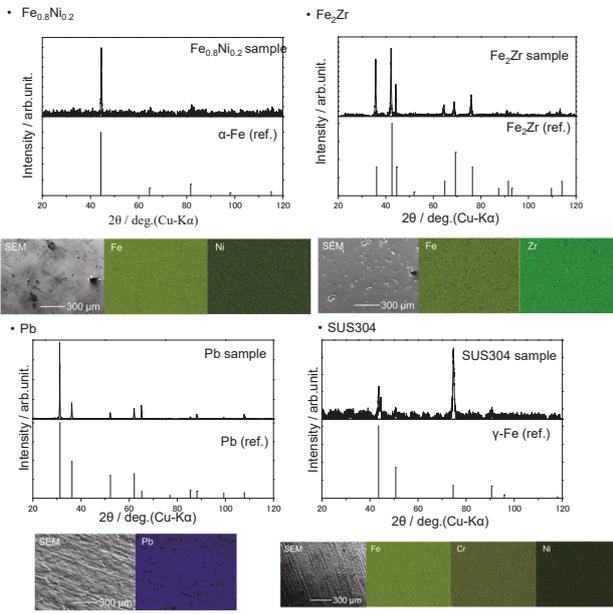
性能	NH-5H-1.7
解像度 (pixels)	1024 × 768
波長 (nm)	350-1100
サンプリング分解能 (nm)	1.7
波長分解能 (nm)	5
最大バンド数	442
データビット数 (bit)	10

目的 HS画像を用いた機械学習により炉内物質を特定することを目指す

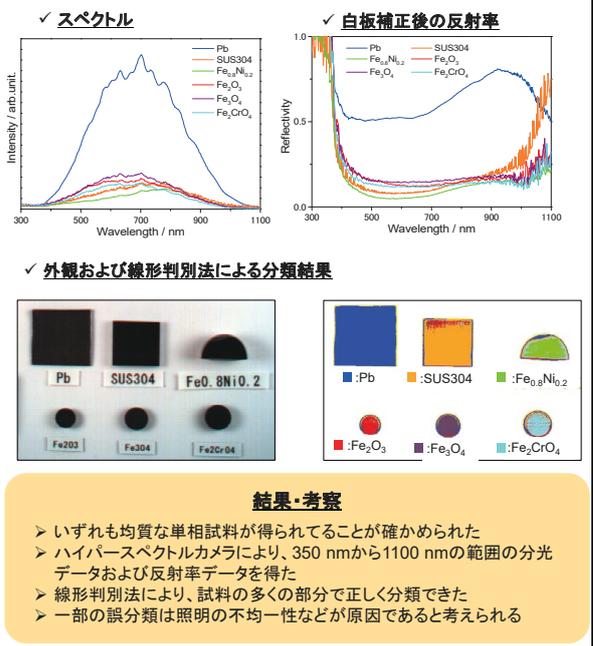
Results and discussion

試料作製

✓ XRDパターン・FE-SEM/EDS観察



画像分類



結果・考察

- いずれも均質な単相試料が得られることが確かめられた
- ハイパースペクトルカメラにより、350 nmから1100 nmの範囲の分光データおよび反射率データを得た
- 線形判別法により、試料の多くの部分で正しく分類できた
- 一部の誤分類は照明の不均一性などが原因であると考えられる

Summary

- 1F炉内物質の識別にハイパースペクトルイメージング (HSI) の適用を検討している
- 教師データを得るための標準試料のうち、金属試料の作製を行い、相同定の結果均質な単相試料を得た
- HSカメラにより金属試料と鉄酸化物試料の撮影を行い、得られたデータを機械学習し線形判別法を適用した結果、試料の分類に成功した
- 試料一部の誤分類については適切な前処理、撮影条件、最適な機械学習法を検討すること等により分類精度を向上させることを目指す

Acknowledgement and References

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JPJA23F23830470の助成を受けたものです

[1] TEPCO, 1号機原子炉格納容器内部調査 (2022/2/8-9), <https://www.tepco.co.jp/decommission/>
 [2] T. Kitagaki et al., J. Nucl. Mater., 486 (2017) 206.
 [3] L. Brissonneau et al., J. Nucl. Mater., 528 (2020) 151860.
 [4] TEPCO/IRID, 東京電力/CLADS/原子力規制庁による1F内部調査結果-1, <https://www.tepco.co.jp/decommission/>
 [5] M. Takano et al., J. Nucl. Sci. Technol., 51 (2014) 859.

4.2.2 原子炉内無線通信に向けた2.4GHz帯電力増幅器の高放射線耐性化

谷中瑚太郎 成清泰斗 白根篤史
東京科学大学

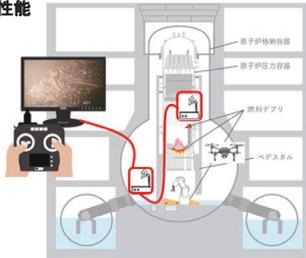
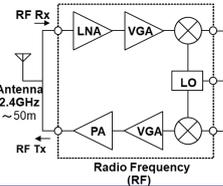


1. 研究背景

原子炉格納機内での無線通信を実現

アクセスポイント用無線機チップセットの目標性能

- 周波数: 2.4GHz
- 伝送速度: 2.5Mbps(最大160Mbps)
- 伝送距離: 50m
- 放射線量: 10Gy/h(最大1kGy/h)
- 積算線量: 1MGy以上
- 耐用年数: 1年以上

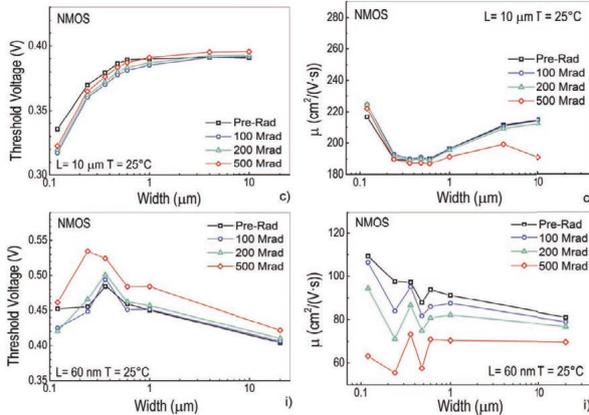


令和8年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 隔年度題解決型産学共同研究プログラム「高放射線耐性を有する無線データ伝送用チップセットの要素開発(高周波アナログ回路開発)」

2. 放射線の影響

トータルドーズ効果(TID): 放射線が入射し、生成された電荷がMOSFETに蓄積して起こる現象

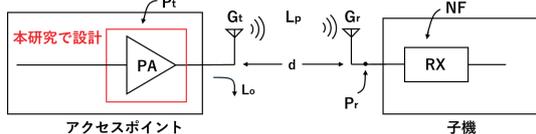
リーク電流の増加、しきい値電圧の減少、移動度の低下といった性能劣化[1][2]



n-MOSFETでは、ゲート幅が大きいと性能劣化が小さい
「電力増幅器においても、ゲート幅Wが大きいほど放射線耐性を持つ」という仮説を検証

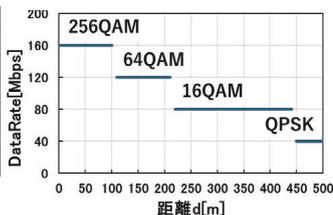
3. 通信速度

$$P_t + G_t + G_r - L_p - L_o \geq P_{rs} + NF + SNR_{out} + 10 \log_{10}(B)$$



出力電力 P_t [dBm]	13
アンテナ利得 G_t, G_r [dBi]	0
給電損失 L_o [dB]	1
熱雑音 P_{rs} [dBm/Hz]	-174
雑音指数 NF [dB]	4
帯域幅 B [MHz]	20
自由空間伝搬損失 L_p [dB]	$20 \log_{10}(32 \pi d)$

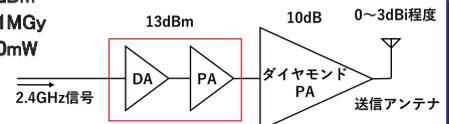
BER(Bit Error Rate)が 10^{-4} 以上となる最小のSNRから通信方式決定



4. 性能目標

TSMC 65nmプロセスを用いて設計

- 出力電力: 13dBm
- 放射線耐性: 1MGy
- 消費電力: 150mW

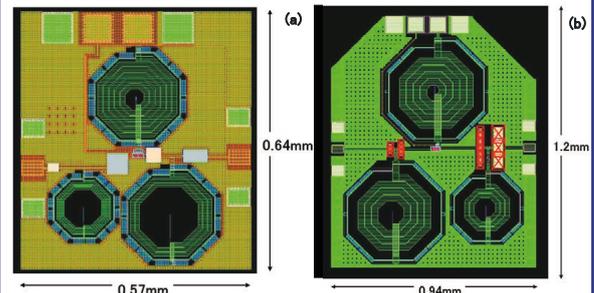
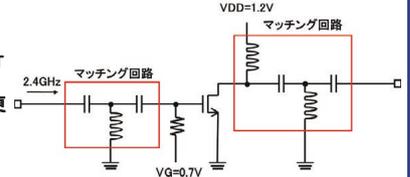


後段にダイヤモンドPA
最大10dBまで出力、補助として使用
>障害物が多く、自由空間伝搬損失が大きい場合を想定

5. 設計した回路

ソース接地型PA

ゲート幅6umのMOSFETを複数並べて作成
>合計のゲート幅を変更し仮説の検証



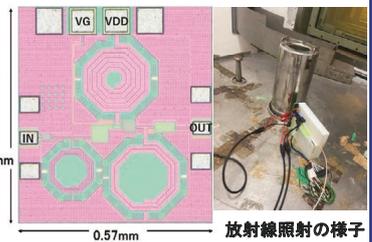
□(a) 12umPAのレイアウト図、(b) 36umPAのレイアウト図
L: 60nm, VG: 0.7V

6. 今後の展望

設計した回路へ放射線照射
>仮説の検証

他のパラメタ等に対する仮説
>ゲート長とバイアス電圧
>消費電力など

別トポロジーの検討
>補正回路の利用
>モニタリング用MOSFET



謝辞

This work is partially supported by JAEA (JPJA24P24020833), MIC/SCOPE (#192203002, #192103003, and JP235003011), MIC (JPJ000254), and VDEC in collaboration with Cadence Design Systems, Inc., Mentor Graphics, Inc., and Keysight Technologies Japan, Ltd.

参考文献

- [1] L. Chevas et al., "Investigation of scaling and temperature effects in total ionizing dose (TID) experiments in 65 nm CMOS," in Proc. 20th Int. Conf. Mixed Design Integr. Circuits Syst. (MIXDES), Jun. 2018, pp. 313-318
- [2] H. Barnaby, "Total-ionizing-dose effects in modern CMOS technologies," IEEE transactions on nuclear science, vol. 53, no. 6, pp. 3103-3121, 2008

4.2.3 サブストレート型CdTe太陽電池線量計の開発

木更津高専¹ ○森野 達也¹, 高椋 勇士朗¹, 栗本 祐司¹, 岡本 保^{1,*}

*E-mail: okamoto@e.kisarazu.ac.jp

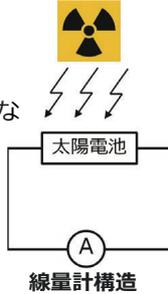
研究背景

福島第一原子力発電所事故

原子炉内部の線量分布の把握が必要
→過酷環境で高い線量率の測定が可能な放射線検出器を開発

太陽電池式線量計

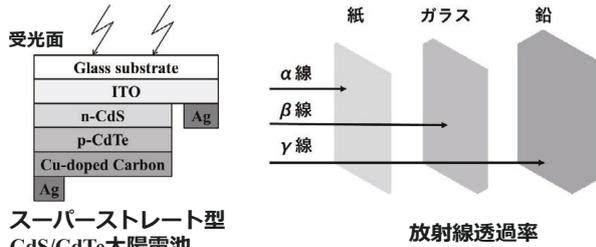
- 放射線照射による出力電流を測定
- 高電圧の印加が不要



目的

問題点

- スーパーストレート型CdTe太陽電池
 α 線, β 線の測定不可能 (ガラス基板内で放射線が減衰)
→受光面が逆側のサブストレート型を使用



スーパーストレート型CdS/CdTe太陽電池

- サブストレート型

暗電流 (放射線非照射時に流れる電流) が大きく
微弱な放射線による誘起電流の測定が困難

→CdS層の膜厚増加させることで

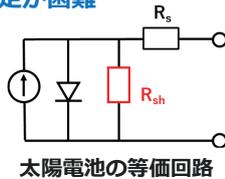
暗電流の抑制を検討

暗電流

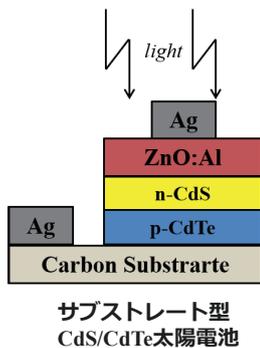
主に並列抵抗 R_{sh} に流れる電流

並列抵抗

短絡状態近傍におけるI-V特性の傾き

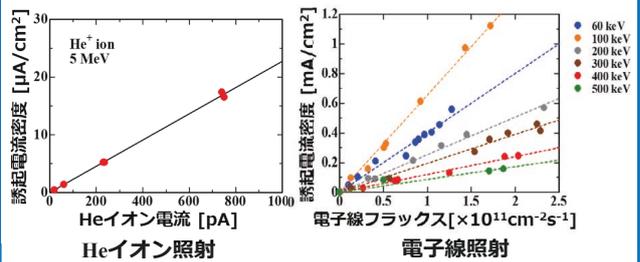


CdTe太陽電池の作製プロセス



CdTe太陽電池 α 線および β 線の照射

- α 線を模擬した5MeVのHeイオンを照射 (QST高崎量子応用研究所 タンデム加速器)
→Heイオン電流の増加に伴い誘起電流を観測
- β 線を模擬した電子線を照射 (大阪公立大学 コッククロフト・ウォルトン型電子線加速器)
→エネルギーフラックスの増加に伴った誘起電流を観測



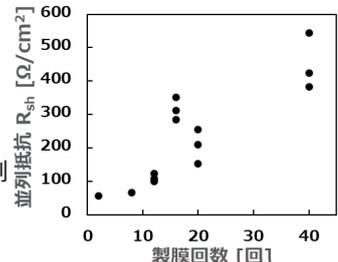
サブストレート型CdTe太陽電池は

α 線, β 線に対し感度を有する

暗電流低減

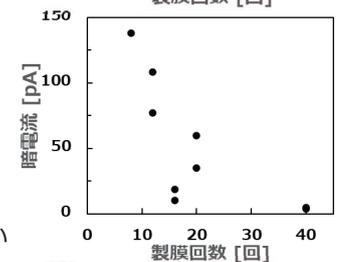
製膜回数と並列抵抗

製膜回数を増加
↓
並列抵抗の増加を観測



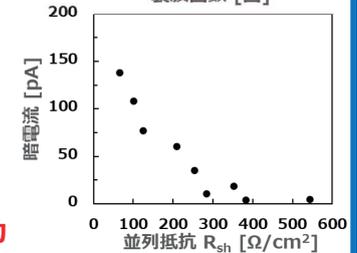
製膜回数と暗電流

製膜回数を増加
↓
暗電流の低減を観測



並列抵抗と暗電流

並列抵抗の増加に伴い
暗電流の低減を観測



CdS層の膜厚増加

↓
ピンホール欠陥減少
↓
並列抵抗増加
↓
暗電流の抑制に成功

まとめ

- サブストレート型の α 線, β 線に対する感度を確認
- CdS層の膜厚増加により暗電流の低減に成功

謝辞 本研究の一部は「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」により実施した

4.2.4 CsI(Tl)シンチレータとMPPCを用いた放射線検出回路に関する研究

福井工業高等専門学校 電気電子工学科 大谷治輝, 米田知晃



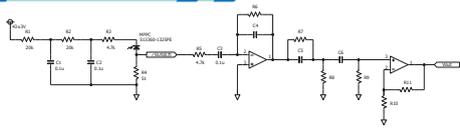
研究背景・目的

本研究ではCsI(Tl)シンチレータとMPPCを用いた放射線検出回路の作成を目指している。

昨年度の研究では放射線パルス計測はできたが、波高値とエネルギーの線形性を得ることができず、正常なエネルギースペクトルを測定することができなかった。この原因はMPPCの1ピクセル内へシンチレーション光の同時入射が生じ、光量と出力電流の線形性が得られなかったためである。

この問題を解決するため、今年度の研究では十分なピクセル数を持った(受光面サイズが大きいまたはピクセルピッチが小さい)MPPCを用いた測定を行い、この違いによるスペクトルの変化について確認した。また、EGS5を用いたシミュレーション結果との比較により、シンチレータサイズの違いによるスペクトル形状について検討した。

パルス測定



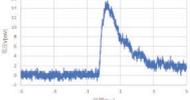
放射線検出回路図の回路図



5mm角シンチレータとMPPC(S13360-1325PE)を実装した放射線検出回路



スペクトル測定の様子

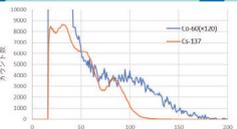


Cs-137線源を右側の回路で測定した際の出力パルス

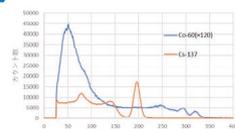
本研究で作成した放射線検出回路の回路図を示す。この回路ではMPPCにCsI(Tl)シンチレータを取り付ける。放射線がシンチレータに入射すると、シンチレータから光子が放出される。ノイズ除去を行った逆バイアス電圧を印加したMPPCに光子が入ると電流が流れ、パルス出力端子に電圧パルスが出力される。パルス出力より右側の回路はパルスを増幅するための回路となっている。

本回路において出力される検出信号は非常に弱いパルスである為、測定の際には静電気対策としてアルミ箱の中に回路を入れて行う。さらにアルミ箱の周辺を暗幕によって遮光し、外部からの光による誤検出を防ぐ。また、アルミ箱の出力端子とオシロスコープは同軸ケーブルで配線する。

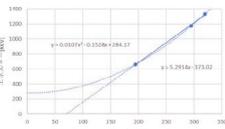
スペクトル測定



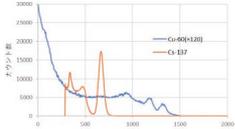
シンチレータサイズ5mm角 受光面積1.29mm²ピッチ25μmのMPPC(S13360-1325PE)で測定した際の放射線スペクトル



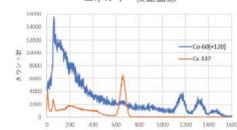
シンチレータサイズ10mm角 受光面積3.0mm²ピッチ25μmのMPPC(S13360-3025CS)で測定した際の放射線スペクトル



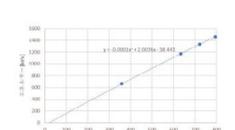
10mm角CsI(Tl)シンチレータエネルギー校正曲線



上図をエネルギー校正した放射線スペクトル



シンチレータサイズ3inchのNaI(Tl)で測定した際の放射線スペクトル



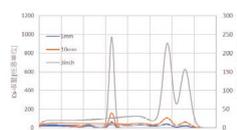
3inch角NaI(Tl)シンチレータエネルギー校正曲線

放射線検出回路の出力をMCA (Amptek社, MCA8000D) により測定することで、Cs-137線源とCo-60線源の放射線スペクトルを得た。

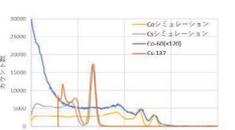
シンチレータサイズが小さく、MPPCの受光面積が小さい場合は、Co-60のピークが生じない。一方、シンチレータサイズが大きく、MPPCの受光面積が大きい場合は、Cs-137とCo-60のピークが生じている。しかし、エネルギー校正曲線の2次の項が大きく線形性が得られていない。エネルギー校正した結果から、662keVのガンマ線に対する分解能は約10%であった。

鉛ブロックで遮へいた市販の3インチのNaI(Tl)シンチレータと光電子増倍管を用いたシンチレーションスペクトロメータを用いてCs-137線源、Co-60線源、K-40線源について測定を行った結果、CsI(Tl)シンチレータの測定よりもバックグラウンドが低く、エネルギー校正曲線の2次の項が小さく線形性が得られ、662keVのガンマ線に対する分解能が8%である。Cs-137線源のCsI(Tl)シンチレータでの測定時間は1時間、NaI(Tl)シンチレータの測定時間は10分間である。

EGS5シミュレーション



5mm角と10mm角のCsI(Tl)シンチレータと3inchのNaI(Tl)シンチレータにおけるスペクトルシミュレーション



シンチレータサイズ10mm角 受光面積3.0mm²ピッチ25μmのMPPC(S13360-3025CS)で測定した際の放射線スペクトルをエネルギー校正したスペクトルとEGS5の分解能10%のシミュレーション結果

EGS5を用いてシミュレーションにより、シンチレータのサイズによって全吸収ピークが大きくなり、コンプトン端との区別が容易になるが、サイズが小さいシンチレータの場合ピーク弁別が難しい。また、今回の測定結果とシミュレーション結果では、コンプトン端の位置がずれていることもエネルギー校正曲線の線形性が得られていないことが原因である。エネルギーの線形性が得るために、狭ピクセルピッチ、受光面積の大きいMPPCの使用が必要である。

まとめ

CsI(Tl)シンチレータとMPPCを用いて、Cs-137線源とCo-60線源からの放射線を検出した際のパルスおよび放射線スペクトルを測定することができた。前年度よりも分解能が高く精度の良いスペクトルが得られたが、線形性は得られておらず適切なMPPCの選定には至っていない。今後の課題として、ピクセルピッチが小さく、受光面積の大きいMPPCを用いた測定を行う必要がある。

謝辞

本研究は、令和6年度原子力規制人材育成事業の支援により実施しました。関係各位に感謝します。

4.2.5 個人被ばく線量計応用を企図したEu添加ホウ酸ナトリウムガラスの放射線誘起蛍光特性に関する研究
 Study on radiation-induced fluorescence properties of Eu-doped sodium borate glasses for personal dosimeter applications
 ○竹下朔也, 福嶋宏之, 米田知晃 (福井高専), 遠藤優介, 坪内 廉, 中内 大介, 柳田健之 (奈良先端大)

研究背景

診療放射線用
ガラス素子



AGCテクノガラス株式会社

RPLの応用例

環境放射線モニタリング
用ガラス線量計



AGCテクノガラス株式会社

個人被ばく
線量計



千代田テクノ

ラジオフォトルミネッセンス(RPL)を利用した放射線計測には、従来のシンチレーションと比較して何度も情報を読み出せるという利点が存在する。これにより測定誤差を抑えられる他、計器の作製コストを抑えられるといったメリットが存在する。
 RPL材料に求められる特性は、高い発光量や短い減衰時定数、高いエネルギー分解能、低残光、大きい実効原子番号 (Z_{eff}) や高い密度などである。
 先行研究にて、発光中心としてSmやEuの3価イオンを添加した材料でRPLが発生することが明らかとなっている。
 今回我々は、混合した粉末を電気炉で溶融したのち、急冷してガラス化し、それらのフォトルミネッセンス (PL) 特性、X線照射時のラジオルミネッセンス (RL) 特性およびX線照射後のRPL特性の評価を行った。

サンプル作成

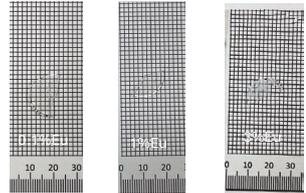
ガラス制作工程

- ① 粉末の混合
- ・ Na_2CO_3 (99.99%)
 - ・ Al_2O_3 (99.99%)
 - ・ H_3BO_3 (99.99%)

- ③ 焼成、成形
- ・ 大気圧中で 1100°C で1時間溶融。その後、ホットプレート上に流し込み、急冷することでガラス化させた。

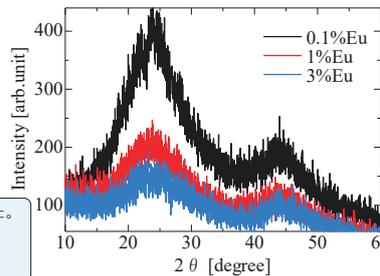
- ② 電子天秤で計量後、乳鉢、乳棒で均一に混合

サンプル外観



- ▶ 組成比は $10\text{Na}_2\text{O}-5\text{Al}_2\text{O}_3-85\text{B}_2\text{O}_3$ で作成した。
- ▶ Eu_2O_3 濃度は、0.1、1、3%である。
- ▶ 無色透明なサンプルが得られた。
- ▶ 厚みは1 mm程度である。

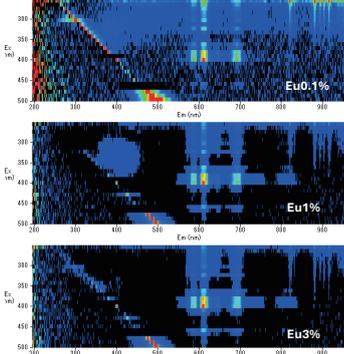
XRDパターン



▶ Eu0.1%, Eu1%, Eu3% 全てのサンプルにおいてガラス特有のブロードなパターンが得られたため、作成したサンプルはガラス化していると考えられる。

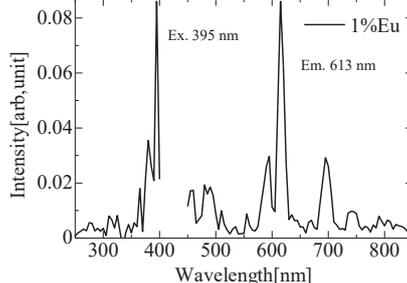
PL・シンチレーション特性

励起・蛍光マップ



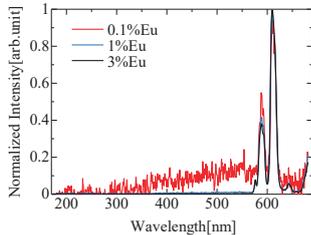
- ▶ 励起波長 350-400nm 付近において、600-620nm 付近にシャープなピークが観測された。
- ▶ 励起波長 300-400nm 付近において、350-450nm 付近にブロードなピークが観測された。

励起・蛍光スペクトル



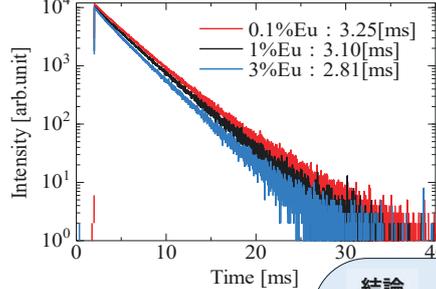
- ▶ 1% Eu添加材料におけるPLスペクトルを示した。
- ▶ 励起波長 390 - 400nm 付近において 600-620nm 付近にシャープなピークが観測された。
- ▶ この発光の起源を特定するために、励起波長 340nm、蛍光波長 615nm でPL減衰曲線を測定した結果、得られたPL減衰曲線は1成分の指数関数で近似できた。

X線誘起RLスペクトル



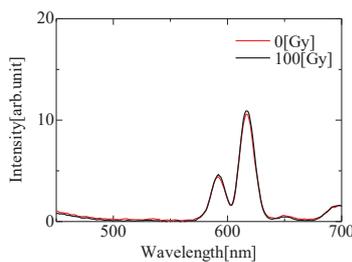
- ▶ 各濃度間の発光ピークの強度差が極めて大きかったため、規格化を行った。
- ▶ X線照射時のRLスペクトルでは、580-600nm 付近、600 - 620nm 付近に鋭いピークが観測された。

PL減衰曲線



- ▶ Eu添加濃度が高いほど減衰定数が小さい、すなわち減衰が速くなる傾向にあった。
- ▶ 減衰時定数の値と発光ピークより、発光起源は Eu^{3+} の 4f-4f 遷移であると考えられる。[1]

X線照射前後のPLスペクトル



- ▶ 1% Eu添加材料における、X線照射前後のPLスペクトルを示した。
- ▶ X線の照射前後でPLスペクトルに大きな変化が見られなかった。
- ▶ Eu^{2+} 価イオン特有のブロードなピークが見られなかった。この2点から、RPLは発生していないと考えられる。

結論

- ▶ Eu添加ホウ酸ナトリウムガラスの作成に成功し、PLおよびRL特性評価を行った。
- ▶ PL減衰時定数は3ms程度であったが、Eu添加濃度が高いほど小さくなる傾向にあった。
- ▶ 作製した材料は、スペクトル及び減衰曲線測定より、発光起源は Eu^{3+} の 4f-4f 遷移であることが判明した。
- ▶ Eu1%ガラスにX線100Gy照射ではRPLは観測出来なかった。RPLが発生する条件として、1%よりも低い最高濃度あるいは1%よりも高い最低濃度が存在すると考えられる。

参考文献

[1] Go.Okada, et al., Radio-photoluminescence observed in Eu-doped BABF glass-ceramics, (2019)

4.2.6 PINフォトダイオードを用いたX線検出器の作製

福井工業高等専門学校 電気電子工学科 前枝遼夜 米田知晃



研究背景と目的

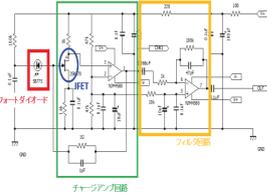
本研究室では、高専での学生実験や様々な科学イベント等で使用できる教育用放射計測システムに関する研究を行っている。本研究室のテーマの一つとして、放射線計測に関する実験を行うためのX線発生器の作製がある。昨年度の研究において、タングステンフィラメントへの通電により熱電子の発生、発生したX線の検出回路の研究が行われている。一方、高電圧電源を発生させるための回路が課題である。昨年度の研究では、スライダックからの出力を電子レンジトランスにより最大3kVの交流電圧をコッククロフト・ウォルトン回路（以降CW回路と呼ぶ）によりさらに昇圧を試みたが、十分な高電圧を得ることができなかった。そのため、本研究では高周波交流電圧源として利用できる冷陰極管インバータと自作のCW回路を用いた高電圧発生回路を作製し、放電実験を行った結果について報告する。

PINフォトダイオードを用いた放射線検出回路

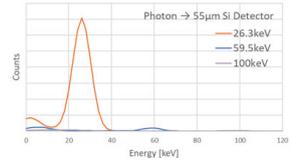
右図は、昨年度作製された、PINフォトダイオード、チャージアンプ回路、バンドパスフィルタ回路、JFETを用いた放射線検出回路である。

PINフォトダイオードに放射線が入射した際に電荷パルスが発生し、JFETと後段のオペアンプにより電圧パルスに変換、バンドパスフィルタによって低周波、高周波の信号を除去し、信号部分のみ増幅して出力する。これによって、放射線を検出することができる。

また、EGS5によって26.3keV、59.5keV、100keVの光子の約55 μmのSi検出器内の空乏層でのエネルギー吸収分布計算から求めたエネルギースペクトルのシミュレーション結果を示す。



PINフォトダイオードを用いた放射線検出回路



EGS5によって求めたシミュレーションスペクトル

JGIPLDのおもちゃ箱、PD用チャージアンプ—簡易版— http://www1.plala.or.jp/k1hrb/k170+NUM4580/easy_amp.htm

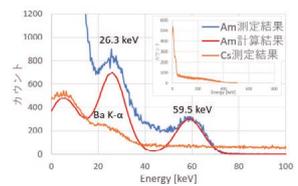
測定結果

作成した回路からの出力パルスをMCA（Amptek社、MCA8000D）で接続することにより、エネルギースペクトルを得る。Am-241とCs-137線源の測定を行った結果を示す。EGS5のシミュレーション結果と同様にCs-137線源の662keVのピークは検知できなかったが、Am-241線源では59.5keVおよび26.3keVのピークを検知でき、ピークチャンネルのエネルギー校正から得たスペクトルとEGS5のシミュレーション結果は一致している。この結果から、この検出回路において低エネルギーのγ線・X線に対してエネルギー分析が可能であることを確認した。

今後は、空乏層幅の厚い素子の使用により計数率向上およびエネルギー域の改善を目指す。



PINフォトダイオードを用いた放射線検出回路の実装写真

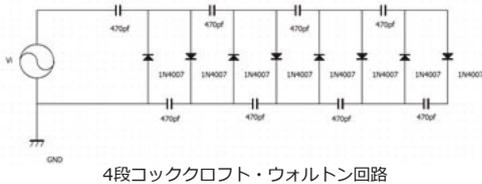


Am-241とCs-137のエネルギースペクトル測定結果およびシミュレーション結果

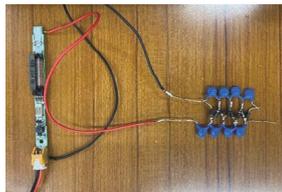
高電圧電源回路の作製

X線を発生させるために必要な高電圧発生回路として、冷陰極線管インバータ回路（約80kHz、Vp=550Vの交流電圧）とコッククロフト・ウォルトン回路を用いて作成した。コッククロフト・ウォルトン回路とは、コンデンサとダイオードを多段式に接続することで、低電圧の交流電源を高電圧の直流電源に変換する整流回路である。

そして、4段コッククロフト・ウォルトン回路と、冷陰極管インバータを組み合わせた回路を作製した。この回路を用いて放電実験を行った結果、約3mmの放電を確認することができた。大気中の放電には、1mmで約3000V必要なため、出力電圧は9000V程度と考えられる。今後は、トランスを用いた昇圧回路と組み合わせ、作製する数10kVの高電圧発生回路を用いて、真空中でタングステンフィラメントにより発生させた熱電子を加速させ、ターゲット金属に衝突することでX線を発生させるX線発生器の作製を行う。



4段コッククロフト・ウォルトン回路



作製した高電圧電源回路



大気放電の様子(3mm)

まとめ

PINフォトダイオードを用いたX線検出器により、低エネルギーのX線を検出することができた。また、コッククロフト・ウォルトン回路と冷陰極管インバータを用いて高電圧電源回路の作製を行い、約3mmの大気中放電を確認することができた。

謝辞

本研究は、令和6年度原子力規制人材育成事業の支援により実施しました。関係各位に感謝します。

第10回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス
(NDEC-10)

4.2.7 金属粉末を添加したFRP遮蔽材の高性能化

福島工業高等専門学校

大内 紘斗
鈴木 茂和
赤尾 尚洋

・研究背景

福島第一原発の燃料デブリ除去のため遠隔操作ロボットが必要だが、放射線性能や軽量化が課題となっており、除染廃棄物の輸送には住民の安全面で懸念があり、放射線遮蔽効果の高い新素材の開発が求められている。

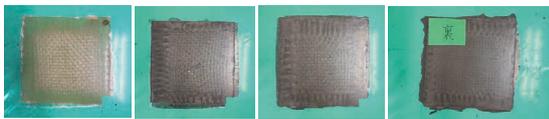
・研究目的

FRPと金属粉末を用いて**軽量且つ高強度で放射線遮蔽効果の高い遮蔽材**を開発すること

・実験内容

1.遮蔽材の作製

ビスマス粉末38 μ mを用いて遮蔽材を作製



添加率を変化させ、作製を行った。

2.金属粉末の沈殿を防ぐ方法の検討

遮蔽材の作製から**金属粉末が沈殿**する



2.1.超音波洗浄機を用いた検証 ※鉄粉使用

比較基準

- ・添加率 (10~40%)
- ・印加時間 (1~20min)

※周波数35kHzの超音波洗浄機を使用



2.2.GM管を用いた遮蔽性能評価

測定ミスにより遮蔽性能の再評価が必要

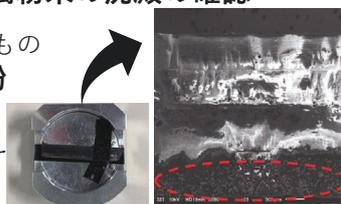
線源であるCs137が設置できていなかった



2.3.SEMを用いた金属粉末の沈殿の確認

白い粒子のようなもの
→EDS分析より**鉄粉**

試料を切断、研磨し観察



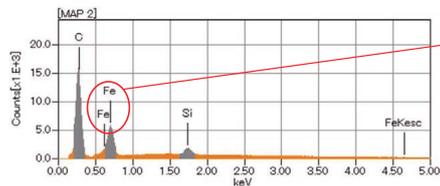
・研究結果

ビスマス粉末を用いて遮蔽材を作製した結果

→金属粉末の沈殿が発生

金属粉末の沈殿を防ぐため超音波洗浄機を用いて試料を作製

→SEMの観察から沈殿が発生してしまっていた



白い粒子についてEDS分析した結果

・考察

作製条件の再検討

・超音波洗浄機を用いて作製

→水温による硬化の変化

→硬化時間の変化

・超音波洗浄機以外の沈殿を防ぐ

方法の検討

→増粘剤の利用

→冷却

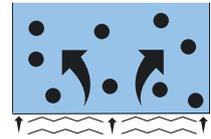
→超音波洗浄機より高振幅、低周波

の振動を与える

粘度の調整



超音波洗浄機 アロエジル使用例



・まとめ

・ビスマスを用いて遮蔽材を作製したが、金属粉末の沈殿が見られた。



・超音波洗浄機を印加させたが、沈殿を防ぐことができなかった。



新しい金属粉末の沈殿を防ぐ方法の検討が必要



遮蔽材の作製方法を確立し、ビスマスを用いて試験を行う。

・今後の予定

三点曲げ試験
放射線遮蔽効果試験

- ・遮蔽性能評価を行うため、食品放射線測定システムを利用し測定する
- ・新しい金属粉末の沈殿を防ぐ方法を検討し、その評価を行う



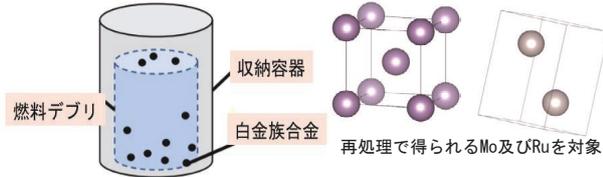
4.2.8 核分裂生成物の有効利用に関する検討 第一原理計算を用いた白金族合金の熱力学的諸量評価

東京都市大学 理工学部 原子力安全工学科
森 翔太

福島第一原子力発電所の廃止措置に向けて取り出される燃料デブリでは、水分の放射性分解によって発生する水素による内圧上昇や爆発のリスクを抑制するため、再処理で得られる白金族合金を水素抑制触媒として再利用することを目指し、相変化などを予測評価をするために、合金の比熱容量（熱力学データ）取得を試みる

01 背景・目的

- 燃料デブリから発生する水素によって内圧上昇や爆発のリスク
- 再処理に溶け残る白金族合金を水素抑制触媒として再利用できないか？



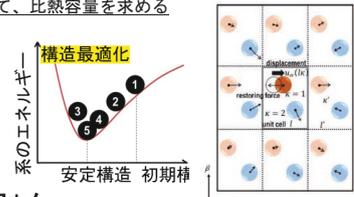
- 比熱容量を得ることでギブスの自由エネルギーが分かり、安定な相や温度に対する挙動が分かるので、機能評価の際や性質を知る際に役立つ
- 計算は実験ではできない事象のシミュレーションが可能
- 文献値との比較を行い、計算の妥当性を評価

核分裂生成物であるMoを対象として、
第一原理計算を用いて比熱容量の評価

02 第一原理計算と比熱容量

原子の振動を量子力学的に評価して、比熱容量を求める

ステップ1：構造最適化
原子の最安定構造を求める
構造を徐々に変化させながらエネルギーの低い**安定構造**を求める



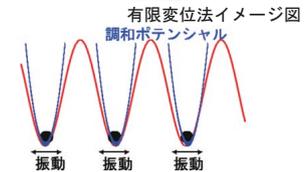
ステップ2：原子振動評価（フォノン計算）

・調和近似

原子の平衡位置周りのポテンシャルを調和ポテンシャルで近似

・有限変位法

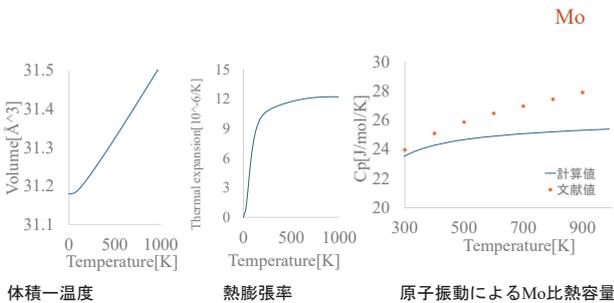
原子を微小に変位させて調和ポテンシャルの強さ（係数）を求める手法



第一原理計算：Vienna Ab initio Simulation Package (VASP)
フォノン計算：Phonopy

03 結果・考察

原子振動による比熱容量計算結果



体積—温度 熱膨張率 原子振動によるMo比熱容量

- 右図では原子振動を考慮した定圧モル比熱を第一原理計算で評価
- 原子振動では温度を考慮した計算が実施できていることを確認
- 900Kでは約10%程度のズレが見られた
- このズレは電子比熱に由来すると考え、電子比熱の計算を実施

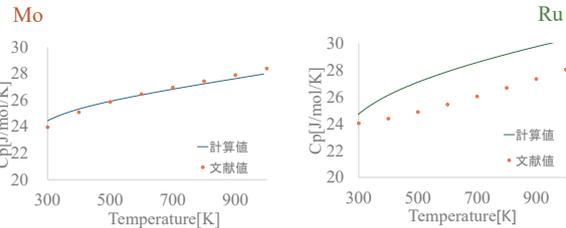
電子比熱計算式

$$C_e = \int_0^{\infty} (E - E_F) D(E) \frac{df}{dT} dE$$

フェルミ分布関数

$$\frac{df}{dT} = \frac{E - E_F}{T^2} \frac{\exp\left\{\frac{E - E_F}{k_B T}\right\}}{\left\{\exp\left\{\frac{E - E_F}{k_B T}\right\} + 1\right\}^2 \cdot k_B}$$

E：電子のエネルギー
E_F：フェルミエネルギー
D(E)：状態密度
k_B：ボルツマン定数



原子振動による比熱容量+電子比熱

- Mo、Ruで同様の計算条件で計算を実施
- Mo原子振動による比熱容量+電子比熱では文献値とおおよそ一致
- Ruではズレが約10%ほど見られた
- 計算条件（擬ポテンシャルや交換相関関数の選択、k点メッシュの分解能など）

04 まとめ・今後の展望

まとめ

・原子振動による比熱容量測定

→スーパーセルでのMo及びRuの原子振動による比熱容量及び、電子比熱の評価を実施した結果、Moは文献値と一致したが、Ruには違いが見られた
→Ruの計算条件の見直しが必要

今後の展望

・計算の妥当性評価

計算条件、構造サイズを変更

・触媒機能評価

熱力学データ（比熱容量）と結晶構造を基に合金系の触媒機能評価

・状態図の作成

相状態を把握することで実験条件を決定

参考文献

[1] 田中 功, ほか, 202. "第一原理計算による格子振動と熱的性質の評価", First Principles Calculations of Phonon and Thermal Properties, *Netsu Sokutei*, 49 (3), p. 122

[2] 樽見 直樹 令和5年度 修士論文

[3] FactPS - FACT pure substances database (2023).

[4] 清水 清孝 8章固体中の電子

森 翔太

所属：東京都市大学 理工学部 原子力安全工学科 原子力燃料・物質工学研究室（佐藤 勇 教授）

Email: g2116045@tcu.ac.jp



4.2.9 福島第一原子力発電所廃炉について学ぶ

福島工業高等専門学校
 橋本拓真 平晃伎 望月陽向 山根勝 (本科2年生)
 鈴木茂和 赤尾尚洋

研究の目的・方法

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉について、燃料デブリ取り出しや放射性廃棄物やトリチウム、環境回復などオンサイト、オフサイトの課題について幅広く学ぶ。また放射線に対する自分の知識を向上させると共に地域社会にイベントを通して学びを提供する。

福島第一原子力発電所や関連施設、建設工事中の大間原子力発電所での講習・実習・研修を通して原子力発電に対する知識を向上させる。

福島第一原発事故の概要

主な事故の流れ(時系列)

日時	場所	状況
3月11日 14:46	三陸沖	東日本大震災発生
	発電所	原子炉緊急停止
3月11日 15時半ごろ	発電所沖	津波襲来
3月11日 15:42	発電所	全交流電源喪失
3月12日 15:36	1号機	水素爆発
3月14日 11:01	3号機	水素爆発

多核種除去設備(ALPS)で処理された処理水が構内にタンクで保管されている



- ・福島第一原子力発電所が位置する双葉郡では**震度6強を観測**。
 - ・地震発生後、1~3号機は原子炉の出力を制御するための制御棒が自動的に挿入され**緊急停止(原子炉スクラム)に成功**→地震による直接的な被害は確認されなかった。
 - ・4~6号機は定期検査のため停止中であった。
 - ・非常用発電機が自動起動したことで電源を確保することができ、原子炉停止中にも燃料から発生する**崩壊熱(残留熱)を冷却できた**。
 - ・地震発生から50分後に津波が発電所を襲来。発電機などの設備が浸水したことにより**全交流電源喪失(SBO)***→設備を使用しての**冷却不可**。
 - ・消防車などで代替冷却を行ったが間に合わず、冷却水は蒸発し、大量の水素が発生。原子炉建屋内に漏洩→**炉心溶融**。
 - ・4号機は3号機の**ベント***に伴い**水素爆発**。
 - ・2号機は1号機の爆発の衝撃で建屋のパネルが開き水素が放出され**爆発を免れた**。
- *SBO(ステーションブライアウト):発電所内の外部電源及び非常用電源など全ての交流電源が失われること
 *ベント:原子炉格納容器の圧力が高くなった場合、破損を避けるため放射性物質を含む気体の一部を外部に放出する措置

サイエンスラボ

2024年8月11日
 サイエンスラボで補助員



霧箱実験で使った器具
 スポンジテープ・シャーレ・コトボンフ・黒い紙・ピンセット・懐中電灯・カップ・放射線源・ラドン・白いトレイ・ドライアイス

放射線測定で使った器具
 やさしお・食塩・きざみ昆布・湯/花・アクリル板・鉛板・ステンレス・アルミ板・GM計数管・プラスチックの容器・化学肥料

霧箱のつくりかた

1. スポンジテープを貼る
2. スポンジテープを貼る
3. スポンジテープを貼る
4. スポンジテープを貼る

霧箱の実験の様子

霧箱の作り方

放射線の測定実験の様子

福島第一原子力発電所と関連施設の視察・見学

実施日と実施内容

- ①2024年8月25日
 田中俊一氏(元原子力規制委員会委員長)による講演会
- ②2024年8月26日
 廃炉資料館及びバーチャル原子力施設見学、デコミテック説明会、福島第一原子力発電所の視察
- ③2024年8月27日
 CLADS、NARREC、TPTテクニカルセンター見学会

田中氏による講演会の様子

廃炉資料館見学の様子

デコミテック説明会の様子

バーチャル原子力施設見学の様子

測定実習

(2)放射線線による線量率の測定
 線源としてCo-60(90キロベクレル)を使用
 検出部から線源まで10cmの距離がある

測定値(μSv/h)	最小値	最大値	中央値
	0.70	0.59	0.65

測定値(μSv/h)

測定値	3分	10分
最大値(μSv/h)	0.03	0.03
最小値(μSv/h)	0.02	0.02
中央値(μSv/h)	0.025	0.025

(3)距離による線量率の低下測定

測定値	5cm	10cm	20cm	40cm
最大値(μSv/h)	2.26	0.64	0.21	0.08
最小値(μSv/h)	2.23	0.62	0.19	0.06
中央値(μSv/h)	2.23	0.62	0.19	0.06

(4)表面汚染の測定

汚染範囲

表面汚染密度

$$Y=Kx(N-Nb) \quad (K=0.0067)$$

自然放射線(バックグラウンド)の測定 30s 計数率N_B:11 (min-1)
 最大汚染箇所の測定 30s 計数率N:8300 (min-1)
 $Y=0.0067 \times (8300 - 11) \approx 55.5 \text{ Bq/cm}^2$

大間原子力発電所建設地の視察

2024年9月18日
 青森県下北半島の大間町にて建設中の大間原子力発電所を視察した。

・第3世代原子炉と呼ばれる原子炉で燃料技術、熱効率、安全面、メンテナンスとコストの面において優れている

・2008年に建設が始まったが規制基準改定に伴い一時中断中。現在原子力規制委員会に新規制の審査を申請中。

・原子炉建屋の基礎工事は終了しており、内部の機器などは品質維持の為にカバーが設置されている。

・視察では建屋内部のほか、取水口の見学を行った。また、研修施設にて本物同様の制御盤を用いて発電量の調整や非常時の操作シミュレーション実習を行った。

建設中の原発と大型カバーの様子

展望台からの様子

実習の様子

まとめ

講習や実習、研修を通して、福島第一原発の“いま”を知ること、これからの原子力発電を知ること、放射線や環境課題の解決方法、新しい技術力など幅広い分野を学ぶことができたことに加え、貴重な体験を多くすることができた。

4.2.10 1F3デブリ-構造物相互作用の推定に向けた高精度FSI計算手法の開発に関する研究



*¹益子 智成, ²横山 諒

1:東京大学工学部システム創成学科Aコース
2:東京大学大学院工学系研究科原子力専攻

研究背景 - 1F3燃料デブリ

- 1F3の廃炉に向け燃料デブリ取り出し
- 燃料デブリの空間分布の把握が必要
- CFDを用いた推定が実施されてきた

現状の課題

- 「溶融燃料」と「構造物」が複雑に堆積 (FSI)
- 1F3デブリ分布推定のためには・



Fig.1F3ベDESTALに堆積した燃料デブリの状況[1]

溶融燃料と構造物のFSIを理解する必要がある

研究の目的

既存手法の課題

- 溶融燃料 (高粘性流体) と構造物 (剛体等) を統一的に計算できない。
- 1Fのような大規模体系を安定的に計算できない・

本研究の目的

FSIを統一的に計算できる [MPH-PMS] を開発・V&Vによって精度保証し、1F3のデブリ分布を推定できる手法を確立する。

1. 手法 [MPH-PMS] [2]

I-MPH法

粒子法の一つ、離散化式が運動量や角運動量を保存
→剛体と流体を統一に計算可能

$$\frac{Du}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 u + \rho_0 g$$

運動量保存

$$P = -\lambda \nabla \cdot u + \kappa \frac{\Delta \rho}{\rho_0}$$

非圧縮性

$$\frac{DH}{Dt} = k \nabla^2 T + Q$$

エネルギー方程式

臨的な時間積分を適用
→高粘性流体を安定的に計算

PMS法

剛体粒子を流体と仮定して計算
• 座標を修正し剛体を模擬する方法

アルゴリズムが簡単 (単なる定常修正)
剛体-剛体相互作用は支配方程式が内包
ルンゲ・クッタ法 (RK4) により角速度の数値不安定性を抑制

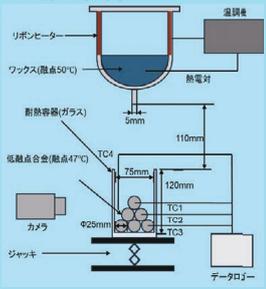
相変化モデル

固相率 (固相の割合) に応じて粘性を変化させることで疑似的に相変化を再現するモデル

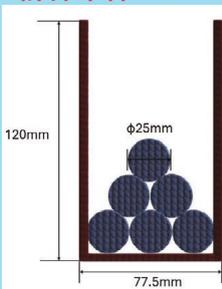
粘性大 → 固相 粘性小 → 液相

2. Validationのための実験条件と計算条件

実験条件

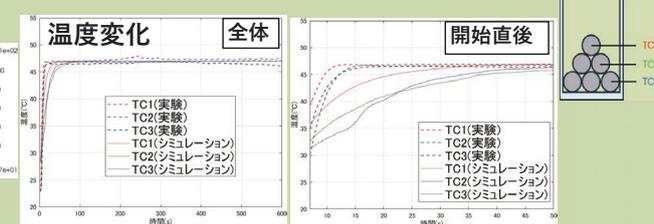


計算条件



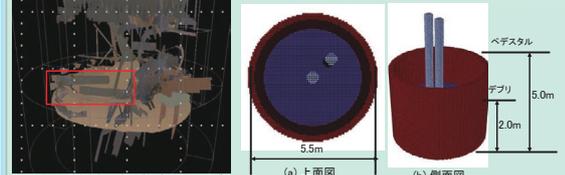
粒子径 (m)	4.0 × 10 ⁻⁴
剛体密度 (kg/m ³)	9.5 × 10 ³
流体密度 (kg/m ³)	3.6 × 10 ³
流体粘性 (Pa·s)	1.0 × 10 ⁻²
流体粘性率 (Pa·s)	10
体積弾性率 (Pa)	1.0 × 10 ⁴
融点 (ワックス) (°C)	50
融点 (合金) (°C)	47
熱伝導率 (ワックス) (W/m·K)	0.4
熱伝導率 (合金) (W/m·K)	12
比熱 (ワックス) (J/kg·K)	7.8 × 10 ²
比熱 (合金) (J/kg·K)	2.7 × 10 ³
初期温度 (ワックス) (°C)	115
初期温度 (合金) (°C)	20
時間刻み (s)	1.0 × 10 ⁻⁵

3. 結果・考察



融点 (47°C) 付近で一定で一致 温度の上昇速度が異なる
• 合金の形状が実験では球体、2D計算上では円柱による、表面積や熱容量の差異
• 粘性や限界流動固相率などのパラメータの差異

4. 1F3体系による「デブリ-構造物相互作用」予備解析



計算条件	デブリベッド	CRGT	ベDESTAL
初期温度 (K)	2100	1200	450
熱伝導率 (W/mK)	3.0	20	0.4
比熱 (J/kg K)	800	442	1300
潜熱 (J/kg)	2.7 × 10 ⁵	3.0 × 10 ⁵	1.4 × 10 ⁵
初期粘性 (Pas)	4.5 × 10 ³	1.0 × 10 ⁻²	1.0 × 10 ⁴



本手法は1F3の複雑な燃料デブリ堆積挙動を推定できる手法である。

- 実機体系でも安定的かつ高速に計算可能なことを確認
- 現状まででは、CRGTの大きな損傷・溶融は確認されない
→ベDESTAL・構造物が大きな熱容量を有しているためと考えられる。

まとめ

- 1FにおけるFSIの推定のための手法を開発し、V&Vによって精度保証した。
- 実験とシミュレーションを比較した結果、定性的な溶解挙動は一致したが、定量的な挙動は一部一致しなかった。
- 予備解析を実施し、本手法は1F3の複雑なFSIおよびデブリ分布を推定できる手法であることを確認した。

参考文献
[1] https://www.tepco.co.jp/en/news/library/archive/e.html?video_uuid=90xy34&catid=61785
[2] R. Yokoyama, S. Suzuki, K. Okamoto, Development of Large Scale Highly Viscous Fluid-Structure Interaction Calculation Method For Clarifying Sedimentation Behavior of Fuel Debris in Unit 3, In Proceedings of International Topical Workshop on Fukushima Daiichi Decommissioning Research 2024 (FDR2024), 10-13 October 2024, Naraha Fukushima, Paper No. 1005

謝辞

This study is funded by Toussu Mirai Technology Co. Ltd. Authors would like to express our gratitude for great discussion and the financial support for this research. This work is founded by JSPS KAKENHI grant number JP24K22849. This work was supported by JAEA Nuclear Energy S&T and Human Resource Development Project Grant Number JPA24H24020026

5. NDEC-10 実行委員会名簿

委員長	宇埜 正美	(福井大学)
副委員長	渡邊 豊	(東北大学)
委員	小峯 秀雄	(早稲田大学)
	山口 克彦	(福島大学)
	高貝 慶隆	(福島大学)
	高橋 隆行	(福島大学)
	藤本 勝成	(福島大学)
	岡本 孝司	(東京大学)
	鈴木 俊一	(東京大学)
	浅間 一	(東京大学)
	小原 徹	(東京工業大学)
	小林 能直	(東京工業大学)
	堂崎 浩二	(東北大学)
	新堀 雄一	(東北大学)
	永井 康介	(東北大学)
	出光 一哉	(東北大学)
	鈴木 茂和	(福島高専)
	川崎 大介	(福井大学)
	中村 隆之	(原子力損害賠償・廃炉等支援機構)
	小野 喬	(原子力安全研究協会)
	佐藤 勇	(東京都市大学)
	成瀬 継太郎	(会津大学)
	鷺谷 忠博	(日本原子力研究開発機構)
事務局	田川 明広	(日本原子力研究開発機構)
	眞田 幸尚	(日本原子力研究開発機構)
	伊藤 倫太郎	(日本原子力研究開発機構)
	宇佐美 博士	(日本原子力研究開発機構)
	武田 俊志	(原子力安全研究協会)

This is a blank page.

