



東海大学

国際原子力研究所

2021 年度 所報

2022 年 3 月 31 日

所報第 2 号発刊に思う

国際原子力研究所 所長 稲津 敏行

東海大学国際原子力研究所が発足 2 年目の活動を無事に終え、ここに所報第 2 号を発刊することができました。関係各位のお力添えに感謝いたします。

さて、カーボンニュートラルが叫ばれています。これは、地球温暖化に直接影響すると考えられる二酸化炭素の生成を、人類の生活から可能な限り減量しようという試みで、特に、化石燃料に依存するエネルギーからの変換が強く期待されています。

2022 年 2 月には、フランスのマクロン大統領は、「フランスを 30 年以内に化石燃料依存から脱却する世界で最初の主要国とし、気候変動対策の模範となりつつ、エネルギーと産業の独立性を強化する」と発表されました。

また昨年 6 月には、米マイクロソフト創業者のビル・ゲイツ氏が会長を務めるベンチャー企業のテラパワーが電力会社と共同で、ナトリウム冷却型の次世代原子炉第 1 号を建設することを明らかにしております。

決して、現状の原子力発電所を再稼働せよと短絡的な主張をするつもりはありません。しかし、原子力発電が再び注目されるときが近づいていることを予感させるニュースです。本研究所では、こうした将来の原子力技術を支える基礎研究や人材育成を着実に進めて参りたいと思います。幸いにも来年度より、原子力発電環境整備機構 (NUMO) 理事長の近藤駿介先生を本研究所の所長としてお招きできることとなりました。近藤所長の大所高所からのご指導により、本研究所の活動が活性化され、国際的になるものと期待しております。

最後になりますが、本所報に掲載された本年度の研究内容について、読者の皆様のご意見、ご教示を賜りますようお願い申し上げます。

目次

ナトリウム冷却高速炉におけるガス巻込み評価手法に関する研究堺 公明	1
医療への放射線応用技術評価 —X線マイクロビーム技術の低線量放射線影響およびがん診断研究への応用—吉田 茂生、伊藤 敦	3
新規抽出媒体の核燃料サイクルへの適用と炭酸塩水溶液浸出法によるウラン 廃棄物の処理浅沼 徳子、稲津 敏行	6
次世代医療用ガンマ線カメラ2号機の開発櫛田 淳子	8
IAEA原子力安全基準研修の実施亀山 高範	10

1. ナトリウム冷却高速炉のガス巻き込み評価

ナトリウム冷却高速炉 (SFR: Sodium-cooled Fast Reactor) の炉心上部プレナム内において、冷却系統にカバーガスが巻き込まれるガス巻き込み (GE: Gas Entrainment) 現象の発生が懸念されている。GE により巻き込まれた気泡は、炉心出力の擾乱を招く可能性があり、GE の防止・抑制評価手法の構築が日本原子力研究開発機構 (JAEA) にて進められてきた。一方、既存の評価基準は実機の広い自由液面上で発生する非定常的な渦 (Fig. 1) に対しては過度に保守的であることが仏国の研究機関 (CEA) により指摘 [1] されている。その現象を詳細に分析し、より適切な設計基準を構築するため、著者らは、大学研究所設置の回流水槽を用いて自由液面を移動しながら成長する渦からのガス巻き込み現象の実験を実施するとともに、解析による評価手法の検証、構築に取り組んでいる。

ここで紹介する本研究では、実験により測定された均一な入口流速分布と下部にピークのある入口流速分布の 2 つの条件を用いて、数値流体工学 (CFD) 解析を実施し、入口流速分布の変化が後流渦に及ぼす影響を分析した。加えて、ガスコア長さの実験値と解析結果を比較することにより、解析のガスコア長さの予測性を検証した結果について紹介する。

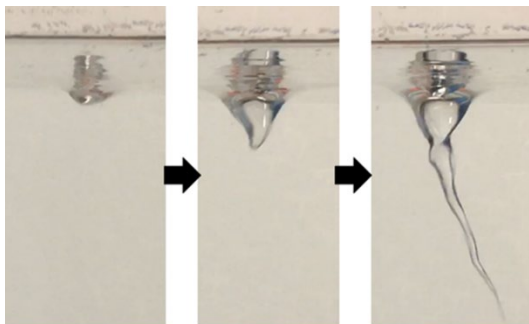


Fig.1 Photographs of gas core expansion in a flow

2. 研究の概要

(1) 実験・解析方法

実験は自由液面を有する矩形の開渠部を有する回流水槽 (Fig. 2) を用いた。ストレーナーにより整流後、長さ 700mm、幅 300mm、深さ 200mm のアクリル製の試験部 (Fig. 3, 4) へ流入する。試験部の底部には幅 40mm のスリット状の吸込み部を有しており、底部より流出する。入口近くに流れに直行して垂直平板を設置している。この平板端から後流渦が発生し、液面を移動しながらスリットへの下降流速によりガスコアが成長する。速度分布を計測するため、レーザー光による PIV (Particle Image Velocimetry) 手法により高速ビデオ撮影を実施し、体系流入口の鉛直方向における詳細な流速測定を実施する。また、発生したガスコアを高速度カメラで試験部側面から 30 秒間撮影し画像処理により成長する過程のガスコア長さを測定した。

解析では、実験と同様の体系で CFD 解析コード (FLUENT) により非定常解析を実施した。入口流速分布条件を平均

流速 0.17 [m/s] の均一に流入する条件 (均一分布) とスリット側下部に流速のピークが存在する条件 (下部高流速分布) の二つの条件で解析を実施し、後流渦の周波数に対し入口流速分布が与える影響を検討した。さらに、均一分布条件下で評価したガスコア長さを実験の測定結果と比較検討した。

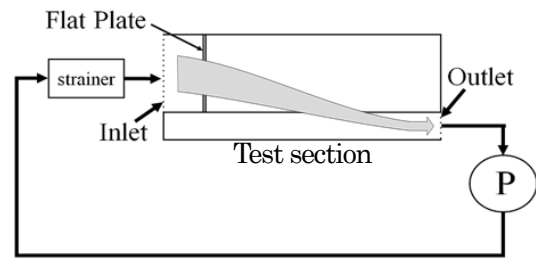


Fig. 2 Experimental apparatus and the test section

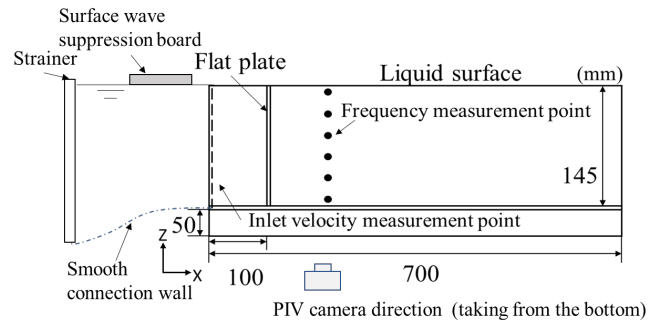


Fig.3 Test Section (Side view)

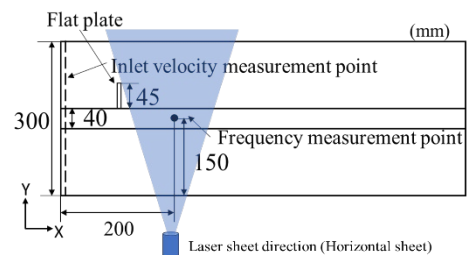


Fig. 4 Test Section (Top view)

(2) 評価結果

Fig. 5 に、PIV による速度分布の計測例を示す。平板後流に交互渦が形成され、条件に依存して、これらの渦中心よりガスコアが成長し、気泡が流れに連行される。

底部スリットからの各高さでの後流渦周波数を整理し、実験と解析の比較を実施した結果を Fig. 6 に示す。入口流速の分布の形状に関わらず、渦周波数はスリットからの各高さで概ね一定の値を示した。これらは、平板後流の渦周波数の考え方に重要な知見をもたらした。詳細には触れないが、本研究により、非定常に移動する渦からのガスコアの成長に関して、実験と解析の比較による定量的なデータベースを得た。

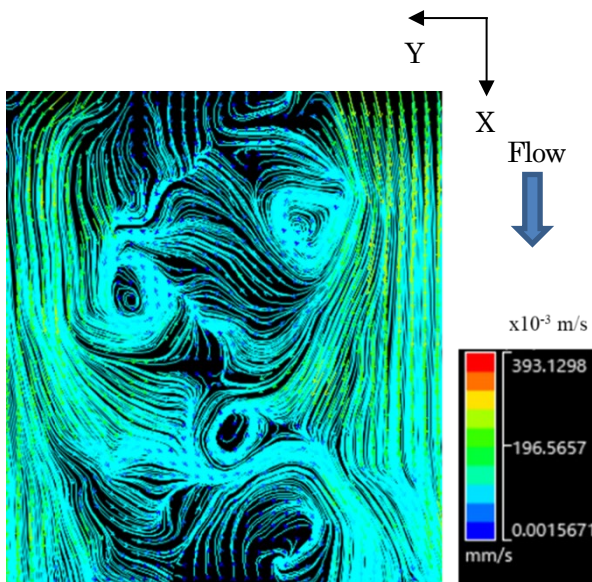


Fig.5 Measured Velocity behind the Flat Plate at 120 mm height from the slit (Bottom view)

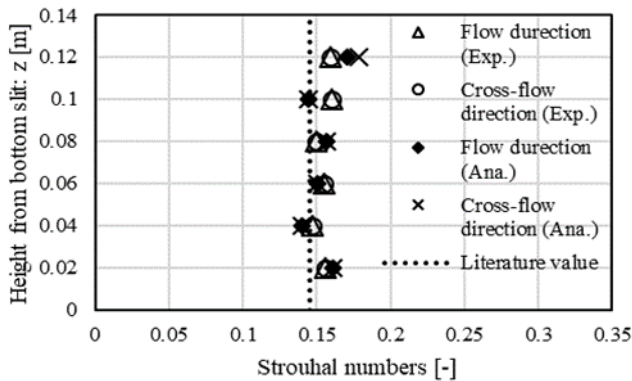


Fig.6 Comparison of the vortex frequency by Strouhal numbers

3. 展望

本研究は、JAEA から東海大学への委託研究契約に基づき実施した。試験により取得したデータは、仏国CEAにも提供され、JAEA と CEA 間のベンチマーク解析等の対象とする計画である。また解析を実施した学生は、JAEA の夏季実習生として、一定期間JAEA に滞在して解析手法を習熟し、大学のコンピュータにて解析評価を実施した。従来より、研究成果は公表^{2),4)}しており、2020年に米国機械学会主催の原子力工学国際会議(ICONE28)へプロシーディングス論文²⁾を投稿し、2020年8月に発表講演を実施した。また、2021年8月には、国際会議の特集号としてのJSMEジャーナル¹⁾へ掲載された。また、別途、解析メッシュ自動生成手法に関する研究^{5),6)}も進めており、それらについても、順次、学会発表、論文投稿を計画している。

4. 業績

【論文】

- 1) Mao Uchida, Takaaki Sakai, et al., "Analysis of gas entrainment phenomenon from free liquid surface for a sodium-cooled fast reactor design (Velocity profile and Strouhal number in a flow field)", Mechanical Engineering Journal, 2021, vol.8 No.4 p. 21-00161, JSME. <https://doi.org/10.1299/mej.21-00161>.

【国際会議プロシーディングス】

- 2) Mao Uchida, Moe Hirakawa, Aaru Sano, Keisuke Inoue, Takaaki Sakai, et al., "Analysis of gas entrainment phenomenon from free liquid surface for a sodium-cooled fast reactor design: Validation of Velocity Profile and Strouhal Number in a Flow Field." Proc. of the 2020 Int. Conf. on Nucl. Eng. Aug. 4-5, 2020, Virtual, Online, ASME, ICONE28-POWER2020-16418. <https://doi.org/10.1115/ICONE2020-16418>.
- 3) Mao Uchida, Haneen Alzahrani, Takaaki Sakai, et al., "Gas Entrainment Phenomenon from Free Liquid Surface in a Sodium-cooled Fast Reactor -Measurements and Evaluation on a Gas Core Growth Form the Liquid Surface-", The 19th Int. Topical Mtg. on Nucl. Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-19), Brussels, Belgium, March 6 - 11, 2022.

【国内学会発表】

- 4) 内田真緒, 堺公明, 他, 「ナトリウム冷却高速炉の自由液面からのガス巻き込み現象の分析」, No. 3I05, 日本原子力学会 2020年秋の大会 (2020年9月).
- 5) 松下健太郎 (JAEA), 内田真緒, 堺公明, 他, 「AMR法を適用した非定常ガス巻き込み渦解析手法の高度化検討」, 計算工学講演会論文集 Vol.26 (2021年5月).
- 6) アルザハラーニ ハニーン, 堺公明, 他, 「自由液面からのガス巻き込み評価手法に関する研究-非定常後流渦解析に関する Adaptive Mesh Refinement 法の適用-」, 学生ポスターセッション, 日本原子力学会 2022年春の年会, 2022年3月.

参考文献

- [1] D. Guenadou, P. et al., "Gas entrainment in the mock-up of the upper plenum of a sodium cooled reactor", Nucl. Eng. and Design 383 (2021) 111448. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111448>.

医療への放射線応用技術評価

—X線マイクロビーム技術の低線量放射線影響およびがん診断研究への応用—

工学部原子力工学科 吉田 茂生、伊藤 敦

1. はじめに

本研究は医療への放射線技術の展開を目標に、医学、生物学分野での様々の課題に対して特徴的な放射線利用の可能性を探ることを目的としている。今年度も昨年度同様に以下の2テーマを設定した。

- 1) 低線量放射線の生物影響評価
- 2) 乳がんの早期診断への放射線分析技術の利用

これらのテーマにおける外部加速器利用実験は、コロナ感染拡大のため実施が困難であった。そのため、これまでに集積したデータの追加解析及び実験室タイプの装置による実験について報告する。

2. 研究の概要

1) 低線量放射線の生物影響評価

低線量放射線の人体影響の問題は、広島・長崎の原爆による被ばく、ラドンなど環境中の放射性物質などによる被ばく、レントゲン・CT検査などによる医療被ばくなど、さまざまな局面で関心を持たれてきた。2011年の福島第一原子力発電所事故による環境中への放射性物質の放出は、この分野の知見の蓄積を急務とするものであった。

低線量環境下では、通常の線量照射で見られるようにすべての細胞に均一に照射される状況と異なることが想像される。すなわち、線量が低いため、照射される細胞とされない細胞が混在しており、照射されない細胞は照射された細胞から何らかの影響を受ける可能性があり、実際に照射されない細胞での損傷が報告されている（バイスタンダー効果と呼ばれる）。この実験には、低線量環境を模擬するために特定の細胞を狙い撃ちできる放射線マイクロビームが有効である（2020年度報告書参照）。

① 放射光X線マイクロビームを用いた研究

共同研究者：小嶋光明博士（大分看護科学大・准教授）

我々は前年度、物質構造科学研究所（つくば市）の放射光を用いてビーム照射面積を変えることによって、非照射細胞から何らかの因子が照射細胞に作用してDNA損傷を減少させるレスキュー効果を見いだした¹⁾。これまで照射細胞による非照射細胞へのDNA損傷の誘導が主なバイスタンダー効果として知られてきたが、その逆の

レスキュー効果の報告はこれまでほとんどなかった。本研究ではレスキュー効果の原因を探るため、これまでの正常細胞に代えてがん細胞を用いてレスキュー効果発現の有無を検討した。1Gy照射後24時間での照射細胞でのDNA二重鎖切断(double strand breaks: dsb と略記)量をマイクロビーム照射面積に対してプロットしたものを図1に示す。dsb量の有意な照射面積依存性は観察されず、正常細胞と異なる結果が得られた。正常細胞では照射面積が1.89mm²より小さくなるとともにdsb量は減少し（レスキュー効果の発現）、0.09mm²より小さい領域では一定量となった。正常細胞と異なり、がん細胞では隣同士の細胞とコミュニケーションを行うギャップ結合が働いていないことが知られており、レスキュー効果を引き起こす因子はギャップ結合を通して細胞間を移動している可能性が示唆された（研究成果1）。今後ギャップ結合を阻害する薬剤の効果の検討を行う予定である。将来的には、低線量放射線影響の評価に、バイスタンダー効果とレスキュー効果をどのように組み込むか、大変重要な課題である。

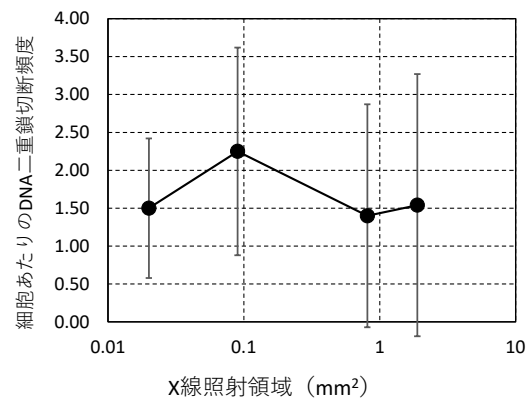


図1 肺がん由来 A549 細胞における DNA 二重鎖切断頻度のマイクロビーム X線照射面積依存性

② 実験室タイプ X線マイクロビームを用いた研究

共同研究者：富田雅典博士（電力中央研究所・研究推進マネージャー、東海大学大学院工学研究科・非常勤講師）

電中研に設置されたマイクロビーム装置は、X線強度は弱いものの放射光実験施設よりさらに微小サイズのビームを発生させることができ、個々の細胞核を狙い撃ちできる。細胞シートの中央付近にある数個の細胞核を照

射し、照射後周囲の未照射細胞における DNA 損傷誘発を検討した。DNA 損傷の種類について、今年度は昨年度の dsb に加えて塩基損傷の誘導についても検出を試みた。未照射細胞での dsb 誘導は、dsb 修復酵素の発現を指標として、また塩基損傷の誘導は、塩基グアニンの酸化損傷の修復酵素発現を指標としてバイスタンダー効果が観察された細胞の割合を照射後の培養時間に対してプロットすることにより、バイスタンダー効果発現を調べた(図2)。dsb 誘導は照射後 60 分を過ぎて 6 時間まで増加することがわかった(パネル a)。また塩基損傷はデータのばらつきが大きく培養後一定の傾向は見られなかったが、いずれの培養時間でも照射直後の状態(バイスタンダー細胞がゼロ)より有意に増加していることがわかった。以上の結果より、バイスタンダー効果によって未照射細胞において DNA 二重鎖切断、DNA 塩基損傷ともに誘導されることが判明した。

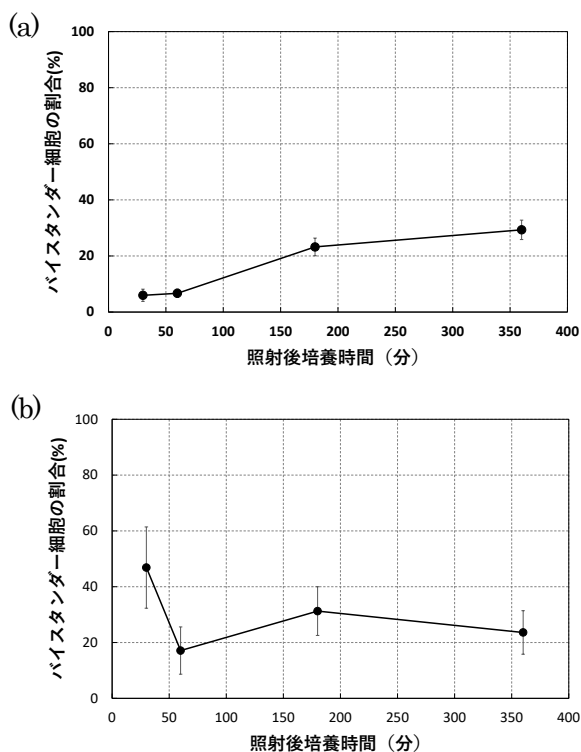


図2 X線マイクロビーム照射後の周辺未照射細胞におけるバイスタンダー効果発現の時間経過。(a)DNA二重鎖切断の生成、(b)DNA塩基損傷の生成

2) 乳がんの早期診断への放射線分析技術の利用

がん組織など病理試料における元素量の異常にX線分析を利用する試みは、古くから多くの報告がある。たとえば蛍光X線分析を用いたがん組織と正常組織でのFeとZn量の違いなどである。近年、毛髪が毛根において血液中の栄養分とともに元素を取り込み伸長する、すなわ

ち元素量を毛根から時系列で保持するメモリー組織であるという特徴を生かして、毛根から毛先までのCa量の変化と乳がん発症時期の関連を示唆する大変興味深い研究が千川らによって報告された²⁾。彼らは将来的に乳がん予知の可能性を示唆した。我々は千川らの研究をさらに進め、毛髪を中心部メデュラでのCa蓄積が血液中のCa量を反映する結果を得た³⁾。メデュラのサイズは数ミクロンから数十ミクロンであり、このようなミクロンサイズの微小領域の元素量の測定には、X線マイクロビームによる局所蛍光X線分析が有用である。X線マイクロビームのX線源は昨年度実施したように放射光が理想的であるが、将来的な乳がんスクリーニングを考えると実験室タイプの装置が望ましい。今年度は、東海大学高度物性評価施設に設置されたX線分析顕微鏡(XGT2700、堀場製作所)の適用性を検討した。ただし、この装置のマイクロビームサイズは100ミクロンであり、メデュラのみならず毛髪全体のCa量の測定となる。なお、毛髪試料は本学医学部附属病院に来院した健常者とがん患者から提供を受けた(人試料を対象とする研究の倫理委員会承認済)。がん患者の試料の場合、がんの大きさ、増殖度などの病理データも合わせて提供いただいた。

図3に早期(非浸潤)乳がん患者由来毛髪と健常人の毛髪のCa量を比較した。横軸は毛根からの距離を示し、1cmごとに測定した。縦軸は毛髪のサイズ・厚さを補正するためにイオウ(S)量で規格化した(毛髪の主要アミノ酸はSを含むため)。毛根から遠い部位では両者の差は誤差範囲内であるが、特に毛根に近い部位では有意にCa量が増加した部位の特定は放射光による蛍光X線分析で行う必要があるが、実験室タイプの分析装置によるスクリーニングの可能性が示唆された。

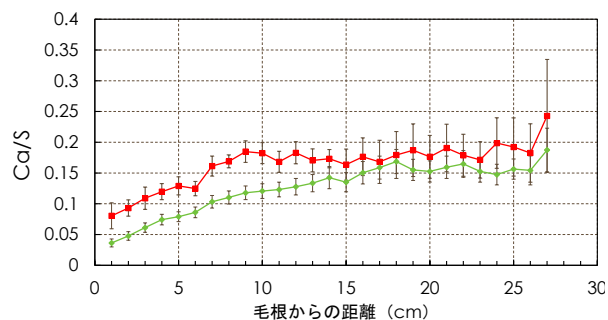


図3 毛髪Ca量の毛根からの距離依存性
健常人(緑)、早期(非浸潤)乳がん患者(赤)

3. 展望

本研究はX線マイクロビームを低線量放射線の人体影響、乳がん予知へ利用する試みである。X線マイクロビームを利用できる施設は全国に2機関に限られており、その2機関のビーム特性を生かした研究を行ってきた。

低線量影響については、バイスタンダー効果及びレスキュー効果の検出により、照射細胞と非照射細胞の相互作用の重要性を明らかにすることができた。今後の展望として、このような相互作用は正常細胞とがん細胞で異なることが示唆されており、細胞間ギャップ結合の観点からメカニズムについて研究を進める計画である。また、低線量放射線影響研究ばかりでなく、X線によるがん治療においても、照射されたがん組織と照射されない正常組織が隣接している状況にあることから、本研究での実験系はがん治療の基礎研究としても展開できると考えている。

Caの毛髪内局所定量による乳がん予知の研究については、乳がん病理データとCa量ピーク位置の相関を求めることが当面の課題である。早期がん、若年性がん、進行性がんなど種々のタイプの乳がんについてCaピークとの関連を見いだすことも課題となる。さらに、本研究での予備的な結果から、実験室タイプでの元素分析装置の有効性を検討することも将来的なスクリーニングへの活用の観点から重要である。

これらの研究は外部研究機関との共同研究によって実施された。加速器のような大型の装置、あるいは特殊なビームを作り出す装置の活用は、研究の独自性の点で優位となるばかりでなく、学生の教育面からも大変有効であったことを付記したい。

4. 業績

【論文】

- 1) M. Ojima, A. Ito, N. Usami, M. Ohara, K. Suzuki, M. Kai: The cellular response of DNA damage in X-irradiated cancer cell population -Verification of radiation-induced field size effect in cancer cell-, Photon Factory Activity Report, **39**, 196 (2022).
- 2) M. Torigata, A. Ito, T. Sehata, K. Urano, S. Yoshida, K. Yokoyama, R. Oshitanai, N. Niikura, Y. Tokuda, Ca accumulation in hair medulla as a possible early diagnosis of breast cancer: X-ray imaging of hair specimens from early breast cancer patients, Photon Factory Activity Report, **38**, 71 (2021).

【学会等発表】

- 1) 浦野 建太, 井出 通利, 伊藤 敦, 吉田 茂生, 平山 亮一, 古澤 佳也, 舟山 知夫, 横田 裕一郎, 重イオン線トラックによるDNA酸化損傷領域のLET及び粒子種依存性, QST 高崎サイエンスフェスタ 2021, 2021.12.07.
- 2) A. Ito, K. Urano, M. Ide, A. Sudo, D. Buihoa, R. Hirayama, Y. Yokota, T. Funayama, Generation of Oxidative DNA Damage by Heavy Ions: Distribution Analysis along Individual Beam Track, 日本マイクロビーム生物研究会 2021年度Webシンポジウム, 日本マイクロビーム生物研究会, 2021.12.14 (招待講演)
- 3) 伊藤 敦, 毛髪のCaマイクロ分析による乳がん早期診断の可能性, 第35回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2022.01.09 (招待講演)

参考文献

- 1) M. Ojima et al., M. Kai, Field size effects on DNA damage and proliferation in normal human cell populations irradiated with X-ray microbeams, Scientific Reports, (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-86416-7
- 2) J. Chikawa et al.: The universal concentrations and cancer signs of trace elements in hair observed by X-ray fluorescence analysis, J. X-ray Sci. Technol., **15**, 109-129, (2007).
- 3) A. Ito et al.: Biomedical application of soft X-ray microscopy with special reference to spectromicroscopy, Acta Physica Polonica A, **129**, 260-263 (2016).

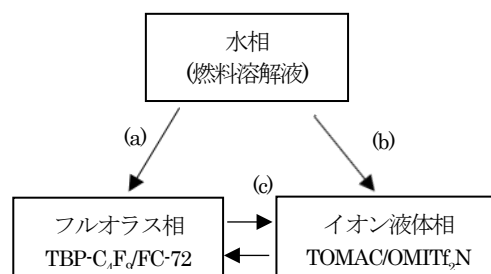
1. フルオラス溶媒とイオン液体による溶媒抽出

フルオラス化合物とイオン液体をトリウム燃料再処理の抽出媒体として使用することを検討している。トリウム酸化物は硝酸へ溶解しにくいいため、フッ化水素やフッ化ナトリウムを添加した混酸系で燃料溶解が行われる。また、Th(IV)のリン酸トリブチル(TBP)による抽出錯体の有機溶媒に対する溶解性が低いため、水相にも有機相にも混ざらない第三相形成が課題となっている。このような反応性の高い燃料溶解液からの抽出には、耐薬品性に優れるフルオラス化合物が適している。またイオン液体は電解質媒体であるため、抽出錯体の高い溶解性が期待できる。フルオラス溶媒とイオン液体を抽出媒体に使用すれば、これらの課題を解決できる可能性がある。これまでに、Th(IV)の模擬元素としてCe(IV)を使用し、硝酸水溶液からの分配挙動を調べてきた[1]。ここでは、抽出系として、水相、フルオラス相、イオン液体相を組み合わせた3種類の媒体による抽出系 (Fig. 1) での分配挙動を検討した。また、使用済みトリウム燃料の溶解液を想定し、フッ化ナトリウム含有硝酸水溶液からCe(IV)と核分裂生成物(FP)の主要元素の分配挙動についてデータを取得するとともに、再処理への適用性について検討した。

フルオラス相には、抽出剤としてTBPをフルオラス化したTBP-C₄F₉ [(CF₃(CF₂)₃(CH₂)₃O)₃PO)を、希釈溶媒としてFluorinert™FC-72を用いた。イオン液体相には、1-octyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (OMITf₂N)を使用し、抽出剤として第四級アンモニウム塩のmethylnrioctylammonium chloride (TOMAC)を用いた。フルオラス相およびイオン液体相に含まれる抽出剤濃度は、それぞれ0.5Mとした。模擬トリウム燃料溶解液として、3M HNO₃にCe(IV)濃度が0.1Mとなるように、Ce(NH₄)₂(NO₃)₆を溶解し、FP模擬元素としてSr(II), Zr(IV), Pd(II), Cs(I), Nd(III)の硝酸塩をそれぞれ1mM, NaFを4mMとなるよう添加した。

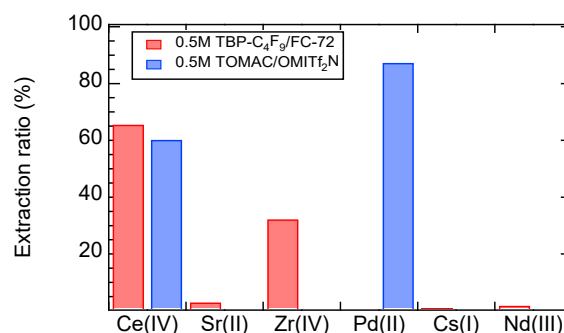
模擬トリウム燃料溶解液中の各種金属イオンの抽出率をFig. 2に示す。TBP-C₄F₉/FC-72抽出系 (Fig.1 (a)) では、Ce(IV)の抽出にZr(IV)が同伴することが分かった。Zr(IV)はU(VI)と類似の挙動を示すことが知られており、U(VI)の抽出剤であるTBPの誘導體を用いたことで、

Zr(IV)も抽出されたものと考えられる。一方、TOMAC/OMITf₂N抽出系では (Fig.1 (b))、Pd(II)がCe(IV)とともに抽出された。抽出剤のTOMACは塩化物であるため、0.5M濃度では1mM Pd(II)に対して大過剰の塩化物イオンが存在することになる。Pd(II)は塩化物イオンと安定なクロロ錯イオンを形成することが知られている。従って、水相中のPd(II)はPdCl₄²⁻としてイオン液体相中のTOMACに抽出されたものと推察する。



(a) 水相⇔フルオラス相抽出系
(b) 水相⇔イオン液体相抽出系
(c) フルオラス相⇔イオン液体相抽出系

Fig. 1 3種類の媒体による抽出系



[HNO₃]=3M, [NaF]=4mM, [Ce(IV)]₀=0.1M, [Sr(II)]₀=[Zr(IV)]₀=[Pd(II)]₀=[Cs(I)]₀=[Nd(III)]₀=1mM, [TOMAC]=0.5M/OMITf₂N, [TBP-C₄F₉]=0.5M/FC-72

Fig.2 模擬トリウム燃料溶解液に対する抽出率

トリウム燃料再処理の抽出媒体としてフルオラス溶媒とイオン液体を使用する場合、燃料溶解液からフルオラス相へCe(IV)を抽出し (Zr(IV)が一部同伴)、フルオラス相中のCe(IV)をイオン液体相へ分配する抽出系 (Fig. 1

(a), (c) が適していると考えられる。そこで、模擬トリウム燃料溶解液から分配した Ce(IV)と Zr(IV)を含むフルオラス相をイオン液体相と接触させ、その分配挙動を検討した結果、Ce(IV)のみがイオン液体相へ抽出されることが分かった。フルオラス溶媒はその疎水性の高さから、Th(IV)のような高価数のイオンの溶解性は低い可能性が高い。そこで、水相—フルオラス相—イオン液体相の分配を連続的に処理できれば、再処理法としての適用可能性が高まると考えられる。

今後は、FP 主要元素の中でも陰イオンとして溶存し、TBP 抽出による U(VI)への同伴元素として知られている TcO_4^- (模擬元素として Re(VII)を使用) の挙動を調べる。また、イオン液体抽出系で高い抽出率となった Pd(II)の抽出メカニズムを詳細に検討する。

本研究は、JSPS 科研費 JP18K19047 の助成を受けたものである。

2. 炭酸塩水溶液浸出法によるシリカ澱物の処理

燃料加工施設等から発生するウラン廃棄物には、フィルタ類やスラッジ、焼却灰など様々な種類のものがある。中でも、ウランを含む排水の処理により発生するスラッジ状の廃棄物にはウラン濃度が高いものがあり、浅地中へ処分するために、あらかじめウランを分離して濃度を低減させる必要がある。スラッジ中のウラン分離法として、炭酸塩水溶液による浸出法を検討している。海水中の U(VI)が比較的高い濃度で溶存しており、その要因として U(VI)が安定な炭酸錯イオン ($\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$) を形成することが知られている。そこで、本研究では、スラッジ状のウラン廃棄物を炭酸塩水溶液に浸漬し、U(VI)のみを炭酸錯イオンとして浸出させることで、ウランを分離することを検討した。

ウラン廃棄物の中でもシリカ澱物を選定し、劣化ウランを用いた模擬澱物を調製して試験に使用した。U(VI)を含む硝酸水溶液とケイ酸ナトリウム溶液 (約 38%) を混合してゲル化させた後、ろ過及び乾燥したものを模擬シリカ澱物として使用した。また、炭酸塩水溶液として、 Na_2CO_3 水溶液を用いた。

Fig. 3 に液温 50°C における浸出試験の結果を示す。なお、模擬シリカ澱物のウラン含有量は 3.38% である。 Na_2CO_3 濃度が高いほど浸出率も高く、1M 濃度では、4 時間の処理による浸出率は 90% を超えた。しかし、残渣として残る模擬澱物の割合は約 10% と低く、 Na_2CO_3 水溶液中でシリカ澱物のマトリクスそのものが溶解していることが分かった。また、0.1M Na_2CO_3 水溶液を用いて、

溶液温度の高い条件で浸出試験を行った。その結果、4 時間処理後の浸出率は、70°C で 44%、90°C で 48% となり、温度とともに浸出率は上昇することが分かった。なお、温度の増加により、比較的速い時間で浸出率は飽和したことから浸出速度も温度とともに速くなることが分かった。

今後は、シリカ澱物の溶解を抑制しつつ、浸出率を向上させる条件を模索する。また、シリカ澱物以外のウラン廃棄物 (鉄澱物や焼却灰) の処理についても模擬廃棄物を調製し、ウラン浸出挙動を検討する。

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁「令和 3 年度放射性廃棄物の減容化に向けたガラス固化技術の基盤研究事業 (JP1010599)」の成果の一部である。

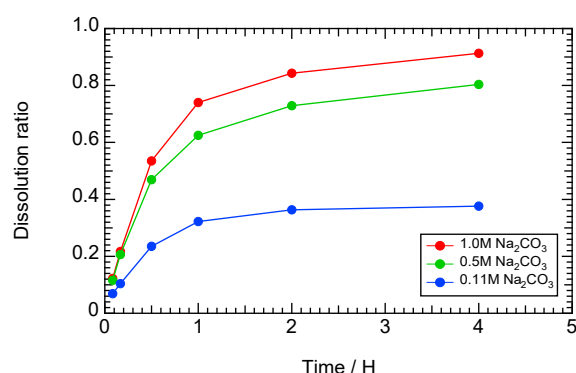


Fig. 3 ウラン浸出率の経時変化 (50°C)
(Na_2CO_3 濃度の影響, シリカ澱物 3.38%)

3. 業績

学会発表

- 1) 横内優, 黒木裕也, 砂川凌摩, 稲津敏行, 浅沼徳子: 「イオン液体 TOMAC/OMIT₂N とフルオラス抽出剤 TBP-C₄F₉ による溶媒抽出試験～混酸中 Ce(IV)と FP 主要元素の抽出挙動検討」, 日本原子力学会 2022 年春の年会, 3I03, 2022 年 3 月オンライン開催
- 2) 黒木裕也, 浅沼徳子, 小林慎一, 久野義夫, 鈴木啓二, 藤永英司: 「炭酸塩水溶液を用いたウラン廃棄物からのウラン分離～模擬シリカ澱物のウラン浸出試験～」, 日本原子力学会 関東・甲越支部 第 15 回学生研究発表会, B4-2, 2022 年 3 月オンライン開催

参考文献

- [1] 横内優, 砂川凌摩, 山口恭弥, 稲津敏行, 浅沼徳子: 「イミダゾリウム型イオン液体とフルオラス溶媒による硝酸中 Ce(IV)の抽出」, 日本原子力学会 2021 年春の年会, 3H12, 2021 年 3 月オンライン開催

1. はじめに

現代社会において、がんは我が国の死因の第一位であり、早期発見・治療には、放射線診断装置が大きな役割を果たしている。現存の画像診断装置として知られているのはPET(Positron Emission Tomography)とSPECT(Single Photon Emission Computed Tomography)である。これらの装置は、体内に注入した放射線を放出する薬剤ががんに集積され、それを目印として画像診断装置を使用して撮像を行う。放射性薬剤の核種として ^{99m}Tc が最も多く、全体の約60%の割合で使用されている。しかしこの ^{99m}Tc の親核種である ^{99}Mo は、高濃縮ウランから生成されており日本国内では核不拡散条約から製造することが出来ず、全て海外からの輸入に頼っている[1]。また海外でも原子炉の老朽化や停止によって、日本国内での薬剤の供給不足が課題になってくる[2]。この問題を解消するため、日本原子力研究開発機構でタンデム加速器を利用して Tc 同位体(^{96}Tc)による新薬の開発を検討している。しかし ^{96}Tc のエネルギーは(778, 812, 850keV)と高く、約300keV以下しか検出できないSPECTは511keVしか検出できない。また、PETでは ^{96}Tc の撮像は不可能である。そこで我々は新たな画像診断装置として電子飛跡検出型コンプトンカメラ(Electron Tracking Compton Camera : ETCC) [E:300-2000keV]の開発を行っている。本報告ではETCCの開発現状について述べる。

2. 研究の概要

我々が開発しているETCC(図1)は、前段検出器と後段検出器の2つの検出器から構成されている。後段検出器ではコンプトン効果によって散乱したガンマ線のエネルギーと吸収点を検出することができ、前段検出器ではコンプトン点に加え反跳電子のエネルギーと飛跡の検出が可能である。これらの情報からガンマ線の到来方向を再構成することができる。独創的な点は、既存のガンマカメラよりも測定可能なエネルギー範囲が広く300-2000keVまで撮像可能なことである。

このことから、使用できる薬剤の選択肢の拡大につながる。また、反跳電子の飛跡が検出できることで従来のコンプトンカメラよりも分解能の向上や再構成時においてノイズの低減がなされている[3]。

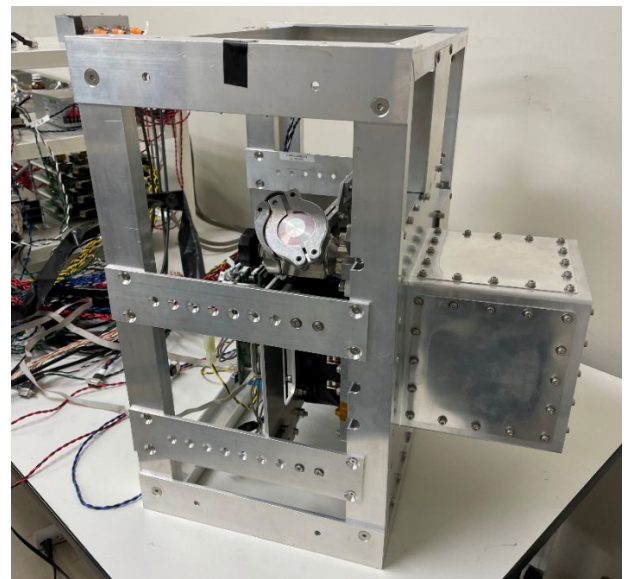


図1 電子飛跡型コンプトンカメラ (ETCC)

医療現場で利用するためには、下記についてさらに進めていく必要がある。

- (1) コンパクト化
- (2) データ収集の高速化

今年度はこの2つの目標を考慮した2台目のETCCの後段検出器の開発を行った。

・ETCC 2号機後段検出器の開発

後段検出器では、散乱ガンマ線の吸収点とエネルギーを検出するため、GSOシンチレータに光電子増倍管(PMT)を組み合わせた検出器を用いている。GSOシンチレータは、高い原子番号であり、高密度かつ高い阻止能を持ち、放射化しにくく潮解性が無いという特徴を持つ。GSOで励起された光電子はPMTで増幅し、電気信号へと変換する。本研究で用いているPMTは、光電面が正方形で 8×8 個のピクセルを持つ浜松ホトニクス社製H8500Cで、このPMT

を縦3個×横3個の計9個並べている。

ETCC 1号機では、PMTからの信号は、Headampを通った後にVME (VERSA Module Eurocard) を使用して読み出している (図2)。VMEは拡張性の高さや様々な用途に合わせ、使用できるメリットを持つが、汎用品であるためラックサイズの大きさや、モジュール間のデータ転送速度の遅さがあるなどのデメリットがある。

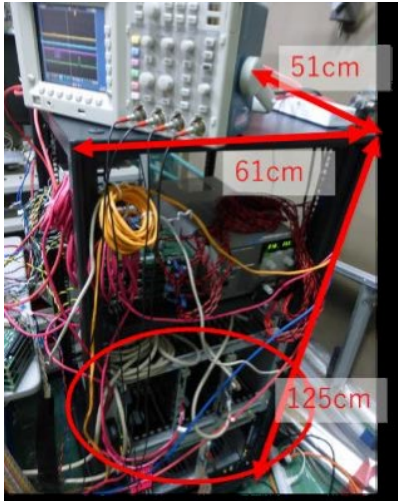


図2 ETCC1号機データ読み出し用VME

そのため、2号機ではVMEに代わり、クリアパルス社のHeadamp Data Processor 80339型(HADP)を使用する(図3)。HADPは内部にFPGAを持ち、データ処理をプログラムによって書き換えが可能である。HADPに変更するメリットとして装置の大幅なコンパクト化、データ取得速度の向上などが挙げられる。実際にHADPを用いたことにより、サイズは40分の1になった。



図3 Headamp Data Processor 80339型

前述の通り、後段検出器においてPMTは9個あり、データは各PMTから4ch分取得するため、ADCのデータは $9 \times 4 = 36$ ch分Headampに送られる。各Headampは24ch処理できるため、ETCC2号機ではHeadamp1, 2の2つでデータ処理を行っている。

HADPは4つのポートを持ち、各ポートからTCP/IP通信で入力されたデータを順番に出力する仕様だったため、1つのTCP/IP通信を処理している間には他のデータを受け付けず、デッドタイムが多いという問題があった。そのため、通信の負荷を軽減させるために4つのTCP/IP通信を1つに統合し、1度にすべてのデータを送ることができるようにプログラムの修正を行った。

3. 展望

ETCC1号機で、Tc-96を投与したマウスの撮像の成功を受けて、現在2台目のETCCの開発を行っている。1号機よりもよりコンパクト化、データ取得速度の向上を目指し、2号機ではデータ処理にVMEではなくHADPを用いるよう変更した(図4)。引き続き2台目前段検出器を改良し、2台のETCCを用いた生体反応撮像試験に向けて開発を進めていく。

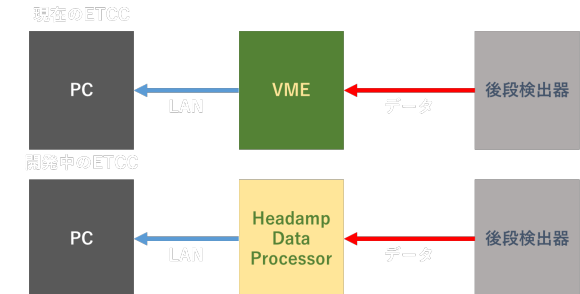


図4 1号機(上段)、2号機(下段)のデータの流れ

4. 業績

【論文】

- 1) 遠藤冴星, 電子飛跡検出型コンプトンカメラの前段検出器のDAC値の設定および性能評価, 東海大学卒業論文, 2022.
- 2) 川口龍矢, 電子飛跡型コンプトンカメラの後段検出器の開発, 東海大学卒業論文, 2022.

参考文献

- [1] Steven C. van der Marck et al., The options for the future production of the medical isotope ^{99}Mo , Eur J Nucl Med Mol Imaging, 37(10), 1817–1820, 2010.
- [2] 遠藤啓吾, 井戸達雄, 国産化 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ の医療運用に向けての課題, RADIOISOTOPES, 61(7), 385-397, 2012.
- [3] Toru Tanimori and on behalf of SMILE project, Journal of Physics, Conference Series, 2020.

IAEA 原子力安全基準研修の実施

工学部原子力工学科 亀山 高範

1. IAEA 原子力安全基準研修

国際原子力機関(International Atomic Energy Agency: IAEA)と本学の共同により、原子力安全基準研修を2022年3月7～10日(4日間)遠隔オンラインにて実施した。本研修は、文部科学省が公募する「国際原子力人材育成イニシアティブ事業(原子力人材育成等推進事業費補助金)」のうち、「原子炉及び大型実験施設等を活用した持続的な原子力人材育成拠点の構築(令和2～8年度)」の中に位置付けられている。また、国内原子力教育コンソーシアムとして設立された「未来社会に向けた先進的原子力教育コンソーシアム: Advanced Nuclear Education Consortium for the Future Society (ANEC)」の中で本研修は「国際グループ」による活動とされている。

2021年度研修の概要を次に記す。IAEA および国内の専門家(原子力規制庁NRA, 東海大学)を講師とする原子力安全基準に関する研修を実施した。使用言語は英語、講義資料を事前に配布し、参加者の理解を深めた。COVID-19感染拡大防止のため、遠隔オンライン形態にて実施し、毎日の講演(録画配信)の終了後、質疑応答(ライブ配信)を設け、講師と参加者で活発な議論が行われた。参加者は、大学10名(筑波1, 東海5, 京都1, 北九州1, 九州2), 高専2名(長野1, 岐阜1), 一般20名(国内13, 国外7), 計32名であった。2021年度研修のプログラムを表1にまとめる。研修後に行ったアンケート調査の結果から、本研修に満足した、内容が役立った、同僚・仲間に参加を勧めると回答した参加者はそれぞれ80%以上であった。

遠隔オンライン形態で実施したため、国外からの参加者の割合が高く、オンライン実施の利点も確認できた。次年度以後もオンライン形態も継続し、対面形態と併用することとした。

2. 本研修の経緯と計画

文部科学省の国際原子力人材育成イニシアティブ事業「原子力国際基準等を基盤とした多層的な国際人材育成(平成25～27年度)」の中で、IAEAと本学の共同による本研修が3日間のプログラムとして開始された。IAEAから派遣された講師が本学高輪キャンパスで講演し、参加者と質疑応答を行った。当時、遠隔オンライン形態では実施されなかったが、それ以外の方法・目的は継続されている。参加者数は2013年度80名(大学16, 一般64), 2014年度68名(大学23, 一般45), 2015年度65名(大学26, 一般39)であった。アンケート調査の結果、参加者からの評価は良好であった。

上記の文部科学省の事業終了後も、本学はIAEAと協力して本研修を継続した(2016～2019年度)。この間、2018年度にIAEAとの間で「原子力安全教育分野にお

ける実施協定」を締結している。

2020年度から文部科学省の国際原子力人材育成イニシアティブ事業として再び位置付けられ、本研修を継続している。同年度に本学内に国際原子力研究所が設立されたのにもない、本研究所は本研修に協力・分担することを始めている。2020年度にはCOVID-19感染拡大防止のため、本研修を遠隔オンライン形態で実施し、参加者数は大学13名、一般40名(国内28, 国外12), 計53名であった。

来年度(2022年度)には、COVID-19感染症も収束に向かうと予想されるため、本学高輪キャンパスにて学内対面+オンラインの複合方式で実施する計画としている。

本研修は、2026年度まで国際原子力人材育成イニシアティブ事業として実施されるが、その事業終了後もIAEAと本学の「原子力安全教育分野における実施協定」にもとづき継続される計画である。

表1 IAEA 原子力安全基準研修 2021年度プログラム

講演タイトル	実施機関
1. Safety Standards, Safety Fundamentals (SF-1)	IAEA
2. Leadership and Management for Safety (GSR Part2)	IAEA
3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources; International Basic Safety Standards (GSR Part3)	IAEA
【Q & A】(Live)	All
4. Site Evaluation for Nuclear Installations (SSR-1)	IAEA
5. Safety of Nuclear Power Plants: Design (SSR 2/1 Rev.1, including TECDOC)	IAEA
6. Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation (SSR 2/2 Rev.1)	IAEA
【Q & A】(Live)	All
7. Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants (SSG-54)	IAEA
8. Safety Assessment for Facilities and Activities (GSR Part4 Rev.1) & Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plant (SSG-2 Rev.1)	IAEA
9. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency (GSR Part7)	IAEA
10. NSS-OUI (Nuclear Safety and Security Online User Interface)	IAEA
【Q & A】(Live)	All
11. Overview of Nuclear Regulatory Inspection Program	NRA
12. International Legal System of Nuclear Energy	Tokai University
【Q & A】(Live)	All

東海大学国際原子力研究所所報 2021
発行日：2022 年3月 31 日
発行者：東海大学国際原子力研究所
稲津敏行
〒259-1292
神奈川県平塚市北金目 4 丁目 1-1