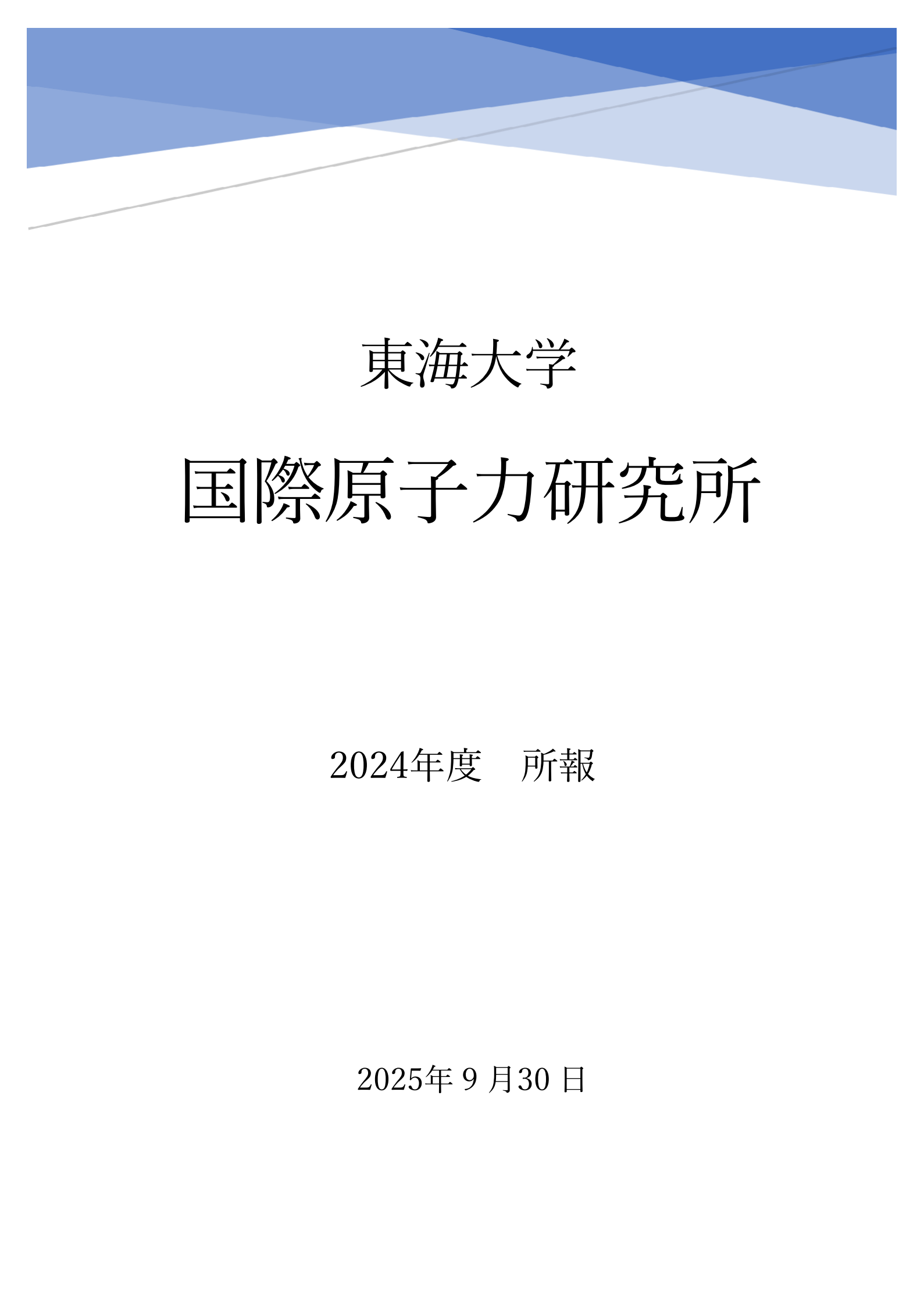




# 東海大学 国際原子力研究所

2024年度 所報

2025年9月30日

## 目次

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 巻頭言 世界が求める原子力利用に貢献する人材育成を目指して            | 1  |
| 近藤 駿介                                    |    |
| 国際的な核不拡散・核セキュリティ文化の醸成                    | 2  |
| 堺 公明                                     |    |
| 沿岸域を対象とした地層処分の安全評価技術の開発                  | 4  |
| 若杉 圭一郎                                   |    |
| 電子飛跡検出型コンプトンカメラ3号機の開発およびテクネチウム同位体の生体撮像実験 | 6  |
| 櫛田 淳子                                    |    |
| 安全機能を持つKAMADO燃料集合体・炉心の概念                 | 9  |
| 松村 哲夫, 亀山 高範                             |    |
| IAEAとの協力による取組み スクール・研修の実施                | 12 |
| 若杉 圭一郎                                   |    |

東海大学国際原子力研究所 所報URL

<https://www.u-tokai.ac.jp/education-research/research-centers/global-research-institute-of-nuclear-energy/kiyou/>

## 巻頭言 世界が求める原子力利用に貢献する人材育成を目指して

国際原子力研究所 所長 近藤 駿介

本研究所は、本学が建学の基盤の1つとする原子力の平和利用の理念に基づいて、60年以上にわたって展開してきた原子力・放射線分野の教育・研究の伝統と成果を引き継ぎ、さらなる研究の発展を通じて高度な専門性を持った人材を育成していくことを目指して活動しています。ここに発足5年目の活動を紹介する2024年度所報を発刊するにあたり、日頃お力添えをいただいている関係各位に感謝申し上げます。

さて、ロシアによるウクライナ侵略や中東情勢の緊迫化によりエネルギー安全保障に関する関心が高まったことや、クリーンエネルギーの利用拡大を図るグリーントランスフォーメーション(GX)に加えてデジタルトランスフォーメーション(DX)の進展が急速に顕在化し、これまで減少傾向にあった電力需要が増加に転じることが予想されるに至ったことから、2024年度に我が国の政府は、エネルギー基本計画の改定作業に着手しました。2025年2月に閣議決定された第7次エネルギー基本計画は、DXやGXの進展が求める脱炭素電源の確保のため、再生可能エネルギーや原子力などの脱炭素電源を最大限活用することが必要不可欠であり、これを可能とする政策を総動員するとして、そのための取り組みを示しています。原子力発電に関しては、技術開発、事業環境整備、教育・人材育成など、その最大限の活用に資する産・官・学の活動を強化するとしています。

私ども原子力教育に携わる者は、2011年に発生した福島第一原子力発電所事故の結果、今なお故郷に帰還できない人が多数おられることを片時も忘れることなく、また、各種世論調査にも明らかなように、原子力や放射線に対して漠然と不安を感じておられる人が少なくないことを謙虚に受け止め、原子力発電に関わる取り組みに対する国民の信頼回復に取り組み、この任を担う人材を育成しなければなりません。このためには、福島事故の教訓を絶えず学び直し、学んだ教訓を確実に実行するように、倫理観と社会的責任を内在化した判断力を涵養する必要があります。さらに、自己満足や集団思考に陥らないよう警戒しつつ、終わりのなき安全向上を目指す「継続的改善」の哲学を身につけた原子力人材を育成することが肝要です。そこではこうした社会的責任を果たせる倫理・社会的責任・対話力の涵養にも力を注ぐべきです。

他方DX時代に対応した人工知能(AI)、デジタルツインといった高度情報技術とそれを活用できる統合システム思考能力を備えた人材が求められる社会が到来しつつあります。これらの技術と人材は革新炉の開発、過酷事故対応、環境回復支援等、ポスト福島の新たな課題への挑戦において磨かれるものです。

この所報では、本学においてこのような「福島の記憶」と「DXの未来」を架橋する教育・研究を通じて、時代の求める人材の育成に努めている所員の取り組みの成果の一端を紹介しています。お読みいただき、その内容等についてご意見、ご教示をいただけますと幸甚に存じます。

## 1. 緒言

2050 年までに世界の原子力発電設備容量を 3 倍にするという「原子力の三倍化宣言」に署名した国々は、2024 年現在 31 国に達している。こうした原子力平和利用を推進していくためには、国際的な核不拡散・核セキュリティ文化の醸成を図ることがその前提として必須である。ウクライナのザポリージャ原子力発電所(ZNPP)はロシアにより占拠された状態が継続し、国際原子力機関(IAEA)が ZNPP に駐在するもドローン攻撃が頻発するなど、予断を許さない状況が続いている。また、隣国の北朝鮮では核実験を含む核活動が継続し、その影響は直ちに日本に及ぶことから、その監視活動の重要性は論を待たない。東海大学では、日本原子力研究開発機構(JAEA)と連携し、原子力人材育成の中で核不拡散・核セキュリティに関連した研究活動を実施し、国際的な核不拡散・核セキュリティ文化の醸成に取り組んでいる。

## 2. 中東地域における大気拡散評価

中東地域のアラブ首長国連邦(UAE)は産油国であるが、従来より CO<sub>2</sub> 削減の観点から原子力発電の導入によるエネルギー源の多様化を推進している。アブダビから約 270km のペルシャ湾沿いに、バラカ(Barakah)発電所(図 1)を建設し、2024 年には 4 機目の稼働に成功し、計 5.6GWe の発電容量を達成している。一方、同地域では、イラン、イスラエルの情勢など、核不拡散・核セキュリティに関する状況は緊迫化している。東海大学では、UAE から原子力工学科に留学生を受け入れ、核不拡散・核セキュリティの認識を高める研究に取り組んでいる。



図 1 Barakah Nuclear power plant.

国際原子力研究所では、米国海洋大気庁(NOAA)より大気輸送拡散モデルコードである HYSPLIT コード<sup>1)</sup>の利用提供を受け、原子力発電所での事故を想定した放射性物質の大気拡散評価を実施している。同コードは、Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model と呼ばれ、全地球規模の大気中の粒子拡散をラグランジュモデルにより追跡した解析が可能である。特に、大気空間の過去の気象データ Global Data Assimilation System(GDAS)等と連携し、経緯度 1 度単位の解像度による 3 次元気象データを参照した解析が可能である。

今回、核セキュリティ上の事故原因に因らず、バラカ発電所にて放射性物質の放出に至るようなシビアアクシデントが発生することを想定し、その事故が地域へ及ぼす放射線影響を例示する解析を実施した。

放出される放射性物質の量を定める必要があるが、事故影響の例示が目的であることから、福島第一原子力発電所事故と同等の放出量を想定した。表 1 に主な解析条件を示す。放出後、放射性物質が拡散して沈着するまでの概ねの期間として、各ケース 2 週間の期間の拡散を評価する。また、地域での年間を通じた拡散傾向を示すため、年間を通じて開始日を 2 週間づつずらして 24 ケースの軌跡を実施した。気象データは 2024 年の GDAS の経緯度 1 度の解像度データを使用した。高度方向は 10,000m までの範囲についての 3 次元の拡散計算を行う。

表 1 Analysis conditions

|               |                                       |
|---------------|---------------------------------------|
| Duration      | Every 2week from 01/01/2024           |
| Run time      | 336 hours (2weeks)                    |
| Time step     | 3 hours                               |
| Emission rate | 1.4 times of 1F(Fukushima) rate       |
| Resolution    | 0.1 degrees & 0.01 degrees for cities |
| Span          | Middle-East region                    |
| Max particles | 1,000,000                             |
| Weather data  | GDAS 1.0 degrees                      |

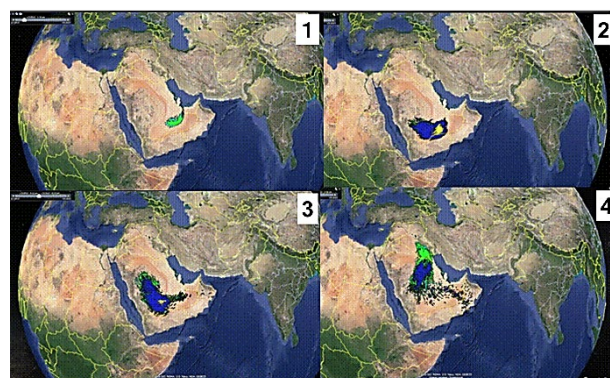


図 2 Example of the dispersion pattern from UAE.

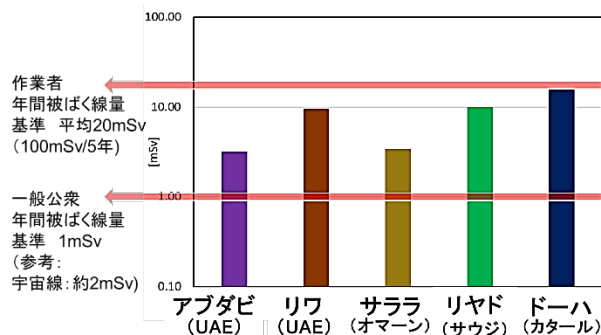


図 3 Radioactive effects around major cities.

典型的な大気拡散解析結果の例を図 2 に示す。この例では、当初北風により一旦南方向に拡散するが、その後、弧

を描くように北向きに拡散し、近隣地域に拡散することが分かる。事故後2週間の被ばく線量は、図3に示すように近隣の都市にて一般的な被ばく線量基準を超える可能性がある。また、季節風の影響を考慮した年間を通じた解析を積算して拡散地域を示すと図4のように示される。ペルシャ湾からの海風の影響と考えられるが、やや偏ったいくつかの方角へ拡散している。より理解しやすい注意喚起の観点から、図5に最大被ばく線量を発電所の廻りの同心円状に示した。これらの地域では、事故後2週間の被ばく線量がそれぞれの図示する最大被ばく線量に達する可能性があることを認識するべきである。尚、本研究を実施したUAEからの留学生であるAbdulla Bin Tamim君は、国際原子力工学会議(ICONE-32)<sup>2)</sup>にて、学生 best paper 賞を受賞した。

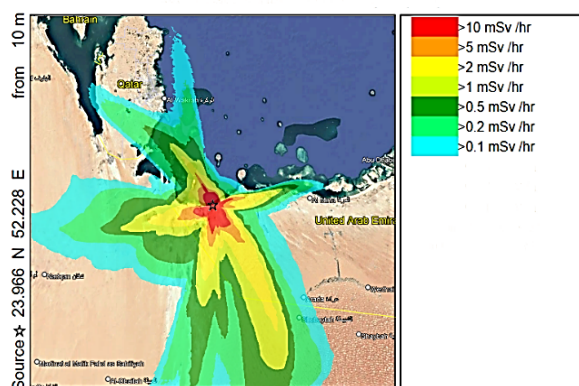


図4 Aggregated radioactive dose pattern.

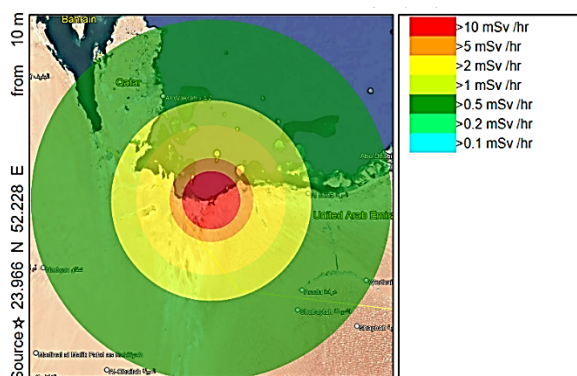


図5 Worst-dose circle around the power plant.

### 3. 中東地域における核セキュリティ教育に向けて

前述のように、中東地域では、CO<sub>2</sub>削減の観点から原子力エネルギー利用に関する開発が活発化している。その一方で、イラン、イスラエルの情勢など、核不拡散・核セキュリティに関する状況は緊迫化している。原子力施設は事故時の影響が広範囲に及ぶリスクも高いことから、地域での事故影響に関する情報の共有が、事故時の対応に関する事前の準備や核セキュリティ上の防護に関する認識の共有のために不可欠である。そのため、特に核セキュリティに精通した人材を育成する観点から、サウジアラビアからの留学生により、核セキュリティ教育に関するテキストブック(図6)の取りまとめを進めた<sup>3,4,5)</sup>。テキストブックは、基本的な知識を学ぶ「核セキュリティ入門」、地域特性が核セキュリティに与える影響を学ぶ「サウジアラビアの核セキュリティ」、国際的な立場や考え方

を学ぶ「核セキュリティによる現代社会が抱える問題」の3つを軸としている。研究を実施した Faisal Sarbaland 君は日本核物質管理学会年次大会(2022 年)にて、優秀発表賞を受賞した。

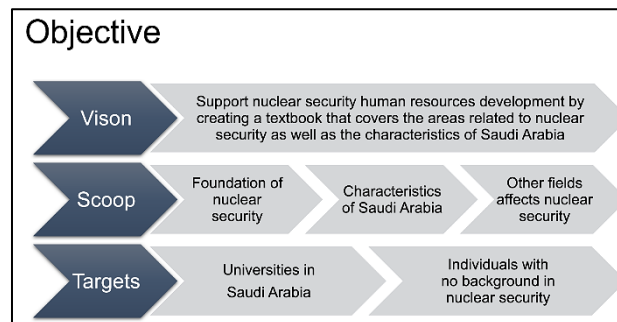


図6 Objective of the Nuclear security text book.

### 4. 核不拡散・核セキュリティ分野の人材育成と大学・研究機関の連携

IAEA では、国際核セキュリティ教育ネットワーク(INSEN)を構築しており、2024 年に JAEA が加盟している。JAEA は日本国内のみならずアジア地域における人材育成の役割が期待されている。2024 年 12 月に開催された国際フォーラム 2024 年ではパネルセッションにて東海大学での原子力教育等を紹介するとともに、国際的な原子力人材育成の在り方について議論した。今後、アジア諸国において、SMR(小型モジュール炉)等の導入が活発化することから、核不拡散・核セキュリティ文化の醸成に関する活動に貢献していきたい。

### 参考文献

- 1) A. F. Stein, et al., "NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System," DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1 (2015).
- 2) Abdulla Bin Tamim and Takaaki Sakai, "Consequence Analysis in the Case of a Severe Accident in Barakah Nuclear Power Plant-Evaluation of Atmospheric Dispersion of Radioactive Materials and Exposure Doses during Severe Accident Using HYSPLIT-," The 32nd Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE32), Weihai, China, June 22-26, 2025, ICONE32-0728(2025) (to be published).
- 3) Faisal bin Nasser Sarbaland, Takaaki Sakai, "Saudi Arabian Universities' Need for a Nuclear Security Educational Textbook: A Systematic Review," International Journal of Nuclear Security, Vol. 9, No. 1, DOI: 10.7290/ijns09394512 (2024)
- 4) Faisal Sarbaland, Takaaki Sakai, 第44回日本核物質管理学会年次大会, AYA'S LABORATORY 量子ビーム研究センター (2023).
- 5) Sarbaland Faisal Nasser, Takaaki Sakai, Naoko Noro, Naoko Inoue, 第43回日本核物質管理学会年次大会, 東京工業大学 (2022).
- 6) 堺公明, 原子力平和利用と核不拡散・核セキュリティに係る国際フォーラム 2024「核不拡散・核セキュリティ分野の人材育成と大学・研究機関の連携」, Panel Discussion (2024).

## 1. はじめに

原子力エネルギーは、気候変動や異常気象の原因とされる温室効果ガスの排出削減に貢献し、脱炭素社会の実現に不可欠なエネルギー源である。この原子力エネルギーを持続的に利用していくためには放射性廃棄物の問題を解決する必要がある。国際原子力研究所では、環境負荷低減や持続可能なエネルギー開発を目的とした放射性廃棄物の処分技術の研究開発を進めている。なかでも、放射能レベルが高く長期間にわたり影響を及ぼす「高レベル放射性廃棄物」については、安全な地層処分を実現するための技術基盤を整備しておくことが、原子力利用には重要なカギとなっている<sup>1)</sup>。また、地層処分の安全評価では、数十万年に及ぶ長期的な評価期間を対象とするため、地質環境の将来的な変動を適切に考慮することが求められる<sup>2)</sup>。

沿岸域は、一般に地下水の流動が緩やかであることや廃棄物の輸送面において有利であることから、地層処分に適した候補地の一つとされている。一方で、沿岸域には海水系および降水系の地下水が共存し、その密度差により形成される塩淡水境界が、海水準変動の影響を受けて時空間的に変化することが知られている。このような地下水環境の変動は、処分場から放出された放射性核種の移行挙動に影響を与える可能性がある。そこで本研究では、沿岸域特有の地下水環境が核種移行に与える影響を明らかにすることを目的とし、検討を実施した。

## 2. 海水準変動を考慮した地下水流動解析

本研究では、沿岸域特有の地下水環境の変動を考慮した核種移行解析を実施するため、海水準変動を考慮した地下水流動解析を行い、その結果に基づく粒子追跡線解析によって核種の移行経路を抽出し、核種移行解析を実施した。まず、地下水流動解析には、陸域・大陸棚・大陸斜面から構成される単層の鉛直二次元モデル(図1)を用いた。このモデルは、1種類の岩種(透水係数:  $1.0 \times 10^{-7} [\text{m/s}]$  間隙率: 2[%])で構成されている。処分場については、陸域及び大陸棚の深度1000mに設置された2つのケースを想定し、Dtransu-2D・EL<sup>3)</sup>を用いて海水準変動を考慮した密度流解析を行った。なお、海水準変動の周期は、海退7万年、海進2万年の1サイクル9万年とした。

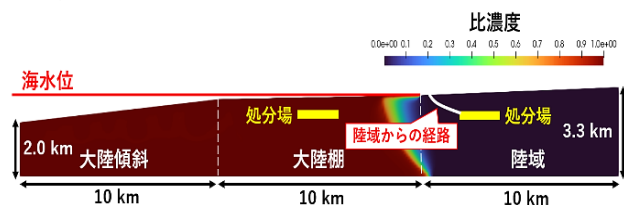


図1 沿岸部モデル(鉛直二次元モデル)と処分場の位置。

塩水と淡水の境界(以下「塩淡水境界」)は、海水準変動に伴って時間的に変化するが、従来の解析では計算の簡便性を優先し、各時間断面において境界を固定する手法が用いられてきた。しかし、塩淡水境界は実際には連続的に変化することから、この従来手法では処分場からの核種移行に関して、移行経路に誤差が生じる可能性がある。

そこで本研究では、9万年周期の海水準変動を1.4万年ごとに段階的に固定する「固定境界モデル」と、塩淡水境界の連続的な変化を考慮する「変動境界モデル」の2種類のモデル(図2参照)を構築し、塩淡水境界の長期的な挙動が核種移行解析に与える影響を評価した。

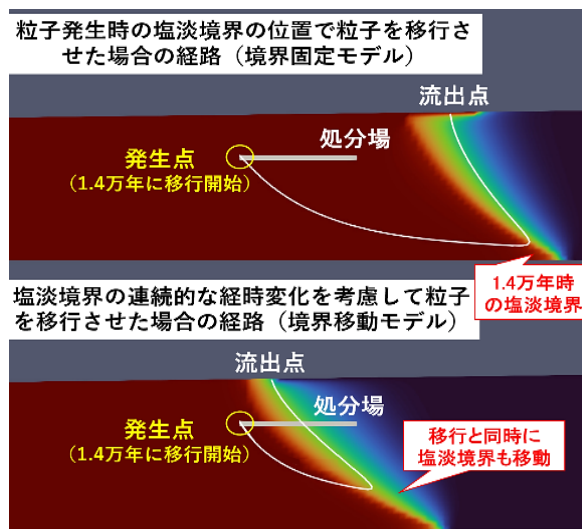


図2 1.4万年に発生した粒子の核種移行経路の比較(上:固定モデル 下:移動モデル)。

図3に、1.4万年ごとに粒子を発生させた各時点における、固定境界モデルおよび変動境界モデルで得られた移行時間および移行距離の相対比を示す。陸域に処分場を設置したケースでは、いずれのモデルにおいても、粒子は図1に示すように地表へ向かって斜めに移行する共通の経路を辿ったため、移行時間・距離の相対比は1.0付近となり、両モデル間に有意な差は認められなかった。一方、大陸棚に処分場を設置したケースでは、図2に示す通り、海水準の低下に伴い塩淡水境界が処分場に接近し、淡水域の領域が広がっていくため、変動境界モデルでは粒子が塩淡水境界に沿って移行し、固定モデルと比較して移行時間・移行距離が短縮される傾向が見られた。しかし、4.2万年以降の発生点が淡水域内となる陸化後の時期では、移行経路の差は小さくなったものの、例えば5.6万年の時点では相対比が1.1倍となるなど、固定モデルの方がやや保守的な結果を示す傾向が確認された。

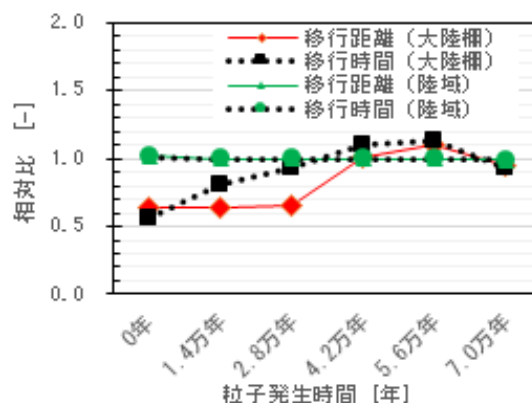


図3 大陸棚及び陸域の処分場を対象とした核種の移行距離・時間(変動/固定境界モデルの相対比)。

### 3. 塩淡境界の影響を考慮した核種移行解析

2章に示した移行経路情報に基づき、固定境界モデル (FBM) 及び変動境界モデル (T-VBM) のそれぞれについて、汎用シミュレーションコード GoldSim<sup>4)</sup>を用いて核種移行解析を行った。解析対象は、総線量の最大値に最も寄与する  $^{135}\text{Cs}$  とした。

陸域に処分場を設置した場合の  $^{135}\text{Cs}$  の線量は、変動境界モデルの最大値が固定境界モデルとほぼ一致した。これは、図3に示すように、両モデルで移行距離および移行時間に差がないことに起因する。一方、大陸棚に処分場を設置した場合には、固定境界モデルと変動境界モデルで得られた  $^{135}\text{Cs}$  の年間線量の最大値に約1桁の差が見られた。その経時変化を図4に示す。また、比較のため、固定境界モデルにおいては処分場周辺の地下水環境が淡水域に変化した時の線量を青字の○(FBM(Fresh))で、変動境界モデルでは処分場周辺の地下水環境が塩水域であった時期に処分場から放出された核種による線量を黄色の実線(T-VBM(Salt→Fresh))で、それぞれ重ねて表示している。変動境界モデルの結果では、陸域の処分場と同様に核種移行中に、地圏と生活圏の境界領域 (以下「GBI」) が陸上と海底の間で繰り返し変化することにより、線量の値が振動するような挙動が確認された。その結果、 $1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^6 [\text{y}]$ において両モデルの差異が顕著となった。また、両モデルにおける最大線量は、固定境界モデルの方が変動境界モデルよりも約1オーダー高くなる傾向が示され、固定境界モデルの方が保守的となる結果が得られた。

ここで、高線量が発生する要因が両モデル間で異なっていることに注意が必要である。すなわち、固定境界モデルでは、処分場周辺が淡水化した際に移行経路の距離が急激に短縮されるとともに (図3参照)、線量換算係数の値が大きい陸上が GBI となるタイミングで高線量が生じたと推察される。これは図4において、 $^{135}\text{Cs}$  の全移行経路からの線量と、淡水域での移行経路における線量の変化が一致していることから裏付けられる。

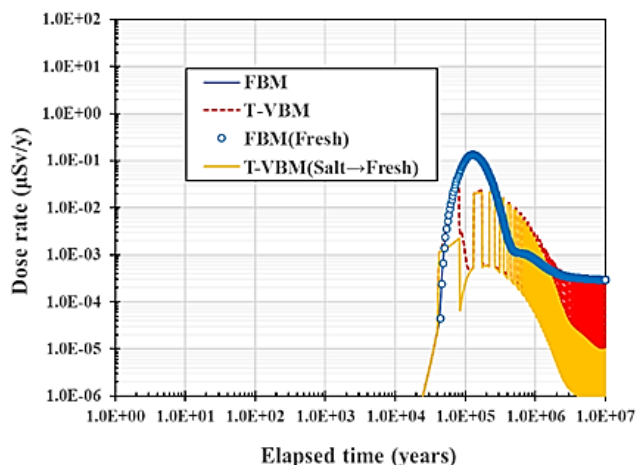


図4 大陸棚に処分場を想定した場合の固定境界モデル FBM および変動境界モデル T-VBM による年間線量( $^{135}\text{Cs}$ )。

一方、変動境界モデルにおいては、図4より約  $2.0 \times 10^5 [\text{y}]$  で生じる全経路からの年間線量が最大値となる時期は、移行距離の長い塩水域の経路からの線量と一致する。さらに、この期間では GBI の環境変化に起因する線量の変化も確認された。このことから、処分場から母岩へ

核種が移行し始める時点では、処分場周辺の地下水環境は塩水域であり、GBI が海底に位置する移行経路であったが、核種  $^{135}\text{Cs}$  が長い時間をかけて岩盤中を移行する過程で塩淡境界が移動し、流出点に到達する頃には GBI が陸上に変化していたことが示唆される。その結果、より大きな線量換算係数が適用され、最終的に線量が高くなったと考えられる。したがって、処分場周辺が塩水域である時点で核種の移行が開始された場合でも、移行中に塩淡境界の移動によって GBI が陸上へと切り替わることで、最終的な線量が増加する可能性があることが、変動境界モデルの結果から示唆された。

以上のことから、塩水条件下で海底下を核種が移行し、さらに海底が陸化することで線量換算係数が大きい地表へ核種が到達するといった複数の条件が重なることで、線量が増大する可能性があることが明らかとなった。

### 4. 業績

#### 【学会等発表】

- [1] 高橋正太郎, 若杉圭一郎: 沿岸域での地層処分を対象とした密度流解析に基づく移行経路の評価, 令和5年度 原子力学会関東・甲越支部学生研究発表会, まちなかキャンパス長岡, B16, 2023年2月28日。
- [2] 高橋正太郎, 若杉圭一郎: 海水準変動による塩淡境界の移動が核種移行経路に及ぼす影響評価, 日本原子力学会 2024 年秋の大会, 東北大学川内北キャンパス, 3M03, 2024年9月13日。

### 参考文献

- 1) 原子力委員会: 令和3年度版 原子力白書, 令和4年7月, 2022。
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁: 地層処分研究開発に関する全体計画 (令和5年度~令和9年度), 2023。
- 3) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎: 飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析的手法に関する研究, 土木学会論文集, No.511, III-30, p135-144, 1995。
- 4) GoldSim Technology Group: User's Guide GoldSim Contaminant Transport Modul, 2024。

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラ 3 号機の開発およびテクネチウム同位体の生体撮像実験

理学部物理学科 櫛田 淳子

## 1. はじめに

がんの早期発見に重要な役割を果たす放射線診断装置として、現在の医療現場では PET (Positron Emission Tomography) や SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) が使用されている。これらの装置では、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ることを利用し、それを目印として画像診断を行う。放射性薬剤の核種として  $^{99m}\text{Tc}$  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  $^{99m}\text{Tc}$  の親核種である  $^{99}\text{Mo}$  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できず、全て海外からの輸入に頼っている[1]。そのため、国際情勢や原子炉の老朽化に伴う原子炉の停止によって輸入できない場合に、日本国内での薬剤の供給不足が課題になっている[2]。

この問題を解消するため、東海大学医学部放射線治療科、日本原子力研究開発機構、金沢大学、京都薬科大学との共同研究で新たな薬剤および核医学診断装置の開発を行っている。日本原子力研究開発機構のタンデム加速器を利用して  $\text{Tc}$  同位体 ( $^{99m}\text{Tc}$  等) を生成し、金沢大学と京都薬科大学にて小動物に薬剤の投与を行い、東海大学が中心となって開発している電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron Tracking Compton Camera: ETCC) にて撮像し、医療現場での実用化を目指す。

$^{99m}\text{Tc}$  は国内の加速器にて生成可能であり、既存の薬剤である  $^{99m}\text{Tc}$  の同位体であるため化学的性質が把握され、医療現場での早期利用の可能性が高いが、放出するエネルギーが 835keV と高く、SPECT や PET での撮像は不可能である。我々が開発している ETCC は検出可能エネルギー範囲が 300~1800 keV であるため、幅広い薬剤に対応可能である。今年度は、3 台目の ETCC の開発および、2025 年 2 月には 2 台の ETCC を用いて  $^{99m}\text{Tc}$  の生体撮像実験を行った。

## 2. 3 号機のデザイン改良

現在 2 台で運用している ETCC のカメラサイズは 10×10 cm で、定量性が担保できる視野は 20×20 cm となり、他のコンプトンカメラよりは広い視野の撮像が可能である。しかしながら、人体の撮像には視野が不足する懸念があった。今回、臨床を見据えた開発に向け、カメラの大型化を進めた。カメラサイズを 20×20 cm に広げることによって視野は 40×40 cm 程度になると期待でき、人体であれば上半身の撮像が可能になる。将来的にこのカメラを円環上に数台配置することにより、ある程度大きなサイズの患者に対しても十分な精度で撮像可能になる。

図 1 に本年度に開発した装置の外観を示す。20×20 cm で広い視野を確保しつつ、カメラの外周サイズはコンパクトにし、検出器全体のサイズは大きく変えない設計とした。また将来的に更に感度向上を目指すため、耐圧容器を改良した。ETCC はガス検出器であるためガス圧によってガンマ線の相互作用の確率を向上させ、検出器感度を変えることが可能である。今回の設計は 2 気圧まで加圧できる仕様とし、これまでの 2 台の ETCC に比べて

2 倍の感度向上が期待でき、サイズと合わせて 8 倍程度の感度向上が見込まれる。一方で容器を耐圧にするために厚みが増加すると、容器にガンマ線が散乱されて真のガンマ線検出効率が低下することが懸念される。そこで、耐圧容器の壁厚を極力薄くする設計とした。



図 1 3 号機 ETCC の耐圧容器 (右) および電子ドリフトゲージ (左)。

## 3. ETCC のシミュレーション系の作成

本検出器はコンプトン散乱と呼ばれるガンマ線と検出器内に封入したガスの反応から、物理パラメータを計測し、コンプトン散乱方程式を解くことによってガンマ線の到来方向を決定する (図 2)。他のコンプトンカメラと異なり、方程式で必要とされる全ての物理パラメータを計測できる唯一のカメラで、高い画像再構成能を持つ。

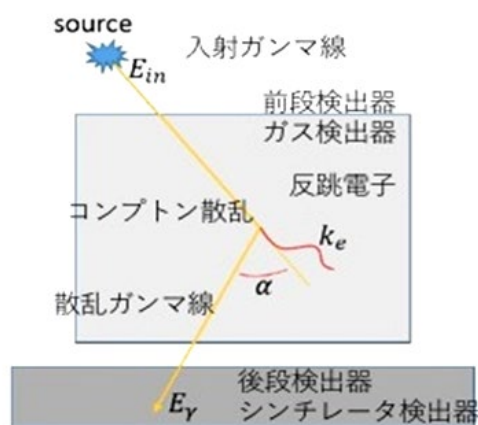


図 2 ETCC 検出概念図。

一方で既存の核医学用ガンマ線カメラより多くの物理情報を取り扱うため、得られたデータからガンマ線のみを抽出することが難しい。そこでガンマ線による物理反応を正しく評価するために、ガンマ線ごとに物理プロセスを追いかけることのできるシミュレーションを構築した。本研究では高エネルギー物理で使用される Geant4 と呼ばれるシミュレーションソフトを用いてガンマ線 1 事象ごとに物理シミュレーションを行った。将来的に解析には Deep Learning の導入を目指し、このシミュレーションデータを教師データとして使用する。本年度はシミュレーション精度を向上させるため、主にコンプトン散

乱を直接捉える検出器の精度向上を目標とした。これまで検出器のヒット情報のみを用いる簡易的なシミュレーションであったが、本年度はコンプトン散乱時の反跳電子の物理シミュレーションとその検出器応答を加味した信号をシミュレートできるように改良した。

検出器のガス領域は実験と同じアルゴン 90%、エタン 10%とし、反跳電子の飛跡とその電子雲の拡散、検出器の応答など、カメラの性能に直接寄与する箇所の修正を行った。特に2次元平面検出器を用いた長い電子飛跡の再現は難しく、シンプルなパルス信号ではなく、反跳が終わるまでの一定の長さに対して検出器で電子が増幅されるため、波形の再現が難しい。図3に3次元的な反跳電子の飛跡のシミュレーション画像の1例を示す。この図は中心に複数のガンマ線を入射しコンプトン散乱した時の反跳電子の様子を表している。電子は軽い粒子のため、物質内では多重散乱をするが、ガス検出器である本検出器であれば精度の高い電子飛跡を取得できた。また、検出器と電子回路の応答も実機と同じように再現した。実測ではノイズが多いが、検出器内部でのガンマ線の波形はおおよそ再現していることが判明した。

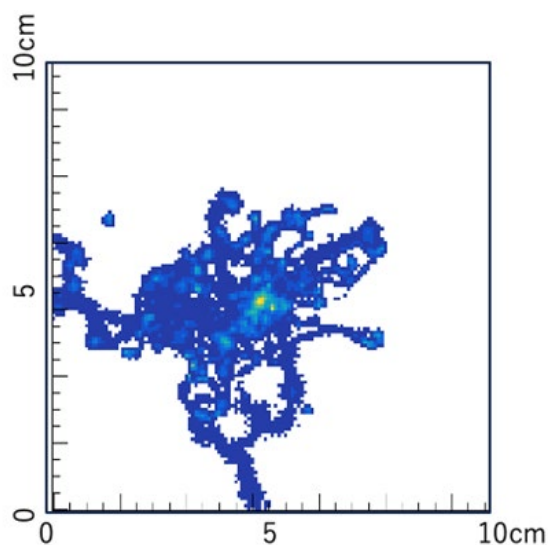


図3 3次元的な反跳電子の飛跡シミュレーション。

### 3. テクネチウム同位体の生体撮像実験

日本原子力研究開発機構のタンデム加速器を用いて生成された $^{95m}\text{Tc}$ を線源とし、2024年2月10日から2月22日にかけて、金沢大学にてファントムとラットを用いて2台のETCCで撮像を行った(図4)。評価用ファントムにおいて、1.32 MBqの $^{95m}\text{Tc}$ を封入した容器を撮像した。続いて、ラットに1 MBqの $^{95m}\text{Tc}$ -DTPA薬剤を投与後、CT撮影とETCC生体撮像(約16h)を実施した。

ここでは評価用ファントムの解析結果について紹介する。 $^{95m}\text{Tc}$ は、共同研究者の浅井正人氏によって $\text{MoO}_3$ をターゲットとして日本原子力研究開発機構のタンデム加速器によって生成され[3]、精錬後に金沢大学まで輸送された。金沢大学にて、2台のETCC表面からそれぞれ25.5 mm離して配置して撮像した。

検出されたガンマ線のエネルギーは582.6 keV, 822.6 keVであり、 $^{95m}\text{Tc}$ の放射エネルギーである582 keV, 835 keVに近いエネルギーが得られた。この2つのエネルギー領域内のイベントを用いて放射位置の再構成を行った結果を図5に示した。この結果より、評価用ファントム

の半値幅は21mm程度であることが確かめられた。

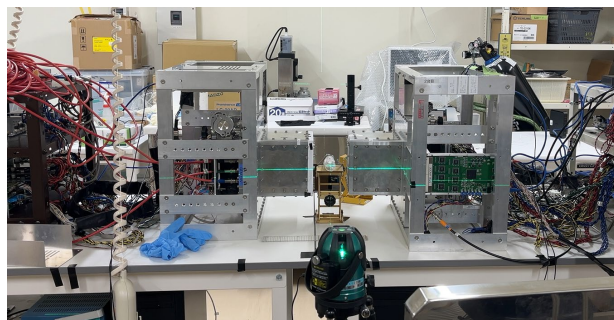


図4 撮像試験の様子。

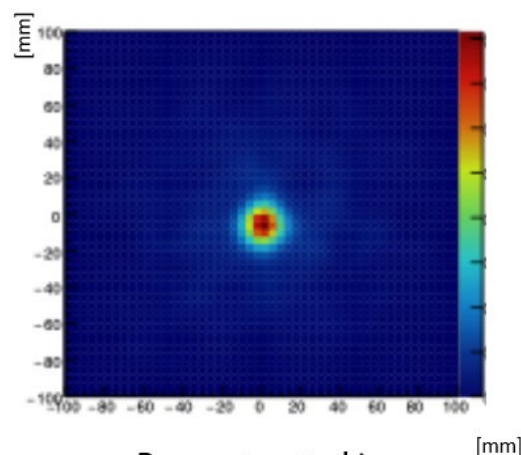


図5  $^{95m}\text{Tc}$ 点源の再構成画像(1号機)。

## 4. 展望

2024年から2台のETCCによる撮像が可能となり、引き続き3号機ETCCの開発も進めている。デザインと耐圧容器の製作は完了し、今後は検出器内部のモジュールやデータ収集系の開発を行っていく。

また、データ収集条件の改善やデザイン改良のためにシミュレーション系の構築を行い、ガス内の正確な飛跡シミュレーションが可能になった。金沢大学ではFDG (Fluorodeoxyglucose)を用いた100MBqの大強度耐久試験も行っており、この結果を踏まえてETCCにおいてデータ取得可能な強度を求める。さらに実際の大強度データとシミュレーション結果を比較して、トリガー条件等を見直し、取得可能な放射線強度を向上させていく予定である。

金沢大学で行った $^{95m}\text{Tc}$ を投与したラットの撮像試験の結果は2025年9月に行われる国際会議「7th Asia-Pacific Symposium On RadioChemistry (APSORC 2025)」にて報告する。

## 5. 業績

### 【論文】

- 1) 吉田航也, 電子飛跡検出型コンプトンカメラを用いた放射性薬剤( $^{95m}\text{Tc}$ -DTPA)を投与したラットの生体機能イメージング, 東海大学修士論文, 2024.
- 2) 松下拓泰, GEANT4シミュレーションによる電子飛跡検出型コンプトンカメラの位置別再構成画像評価, 東海大学卒業論文, 2024.

【口頭発表】

- 3) Koya Yoshida, Shigeto Kabuki, Junko Kushida et al., In Vivo Imaging Experiment of Tc-95m Using Electron Tracking Compton Camera (ETCC), The 10th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics (JKMP), 2024.9.

参考文献

- [1] Steven C. van der Marck et al., The options for the future production of the medical isotope  $^{99}\text{Mo}$ , 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] Hatsukawa, et al., Electron-tracking Compton camera imaging of technetium-95m. PLoS ONE, 13(12): e0208909, 2018.

## 安全機能を持つ KAMADO 燃料集合体・炉心の概念

工学部原子力工学科 松村 哲夫, 国際原子力研究所 亀山 高範

### 1. 緒言

原子炉の安全確保には、原子炉の健全な停止と停止後の崩壊熱除去などの安全対策が重要である。原子炉の固有安全と構造的な崩壊熱除去機能などの安全機能を持つ KAMADO 燃料集合体・炉心概念を沸騰水型原子炉 (Boiling water reactor: BWR) 燃料の取替燃料集合体 (KAMADO-BWR)<sup>1)</sup>, 原子炉圧力容器の無い BWR 炉心 (KAMADO-Free Scale Reactor: KAMADO-FSR)<sup>2)</sup>, 高中性子束炉 (KAMADO-High Flux Reactor: KAMADO-HFR)<sup>3)</sup>, ガス冷却高速炉 (KAMADO-Fast Reactor revision 2: KAMADO-FR2)<sup>4)</sup> に適用している。それぞれの KAMADO 燃料集合体・炉心の概要を紹介する。

### 2. 取替 BWR 燃料集合体 (KAMADO-BWR)

被覆管・部材に Zr などの金属を使わず、高融点 3000K の SiC のみで構成した事故耐性の高い BWR 燃料集合体 KAMADO-BWR の概念を構築した (図 1)。BWR 9×9 型 UO<sub>2</sub> 燃料ペレットは炭化珪素 SiC ブロックに空けられた 72 本の燃料孔 (燃料スタック) に収納される。SiC の高い熱伝導率により燃料ペレット最高中心温度は BWR と同等の 1371K 以下に抑制され、限界熱流束 (Critical heat flux: CHF) も BWR 9×9 型燃料集合体と同程度と評価でき、本集合体を取替燃料として使用することが可能である。SiC は機械強度も高く、燃料健全性の向上も期待できる。

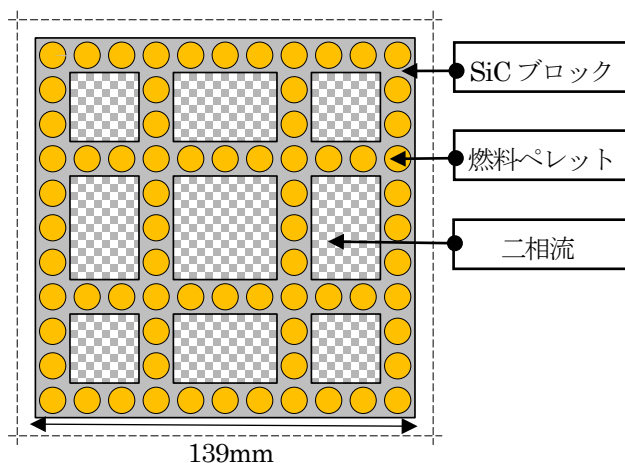


図1 KAMADO-BWR 燃料集合体の概念。

BWR 9×9 型燃料ペレットより細い BWR 11×11 型燃料ペレット (直径 8.2mm) も適用可能で、96 本の燃料スタックの燃料集合体では、最高燃料中心温度が BWR 9×9 型燃料より 200 K 程度低くなり、安全性と出力密度の向上が期待される。

本燃料集合体概念では、CHF を超えても集合体周囲からの除熱が可能であり、通常運転時と変わらない燃料温度分布が得られた。また、本燃料集合体は、冷却材喪失事故 (Loss of coolant accident: LOCA) / 流量喪失 (Loss of flow: LOF) 時に安全機能が働かない場合も燃料表面からの熱放射により、燃料の溶融が防止できる可能性がある。

### 3. 圧力容器の無い BWR 炉心 (KAMADO-FSR)

固有安全と自由出力規模の新しい BWR 炉心概念 KAMADO-FSR を構築した。中空の SiC ブロック内に燃料ペレットが挿入された燃料集合体が大気圧の原子炉水プールに設置される (図 2)。SiC ブロック燃料集合体内の燃料ペレットから発生した熱は燃料集合体内の BWR 条件相当の二相流に伝達される。冷却材は炉心下部ハウジング内の水管から上昇流路 (△) を通過して加熱されて蒸気となり、下降流路 (▽) を通過して蒸気管に到達する。LOCA/LOF 時には、崩壊熱は燃料集合体の表面から原子炉水プール (最終ヒートシンク) に直接放散され、固有安全性を達成する。

燃料集合体の高強度の SiC ブロックが圧力境界となるため、圧力容器は不要である。燃料集合体の装荷数を増すことによってモジュール化なしに出力規模を 300MWe から 1000MWe まで容易に変更でき (図 3), 原子炉への投資とコストを 60% 程度に削減できる。燃料集合体間ギャップの水を排除・注入することでスペクトラル・シフト運転が可能となり、サイクル末期の炉心平均反応度で 5% Δk/k 程度の効果が得られる。

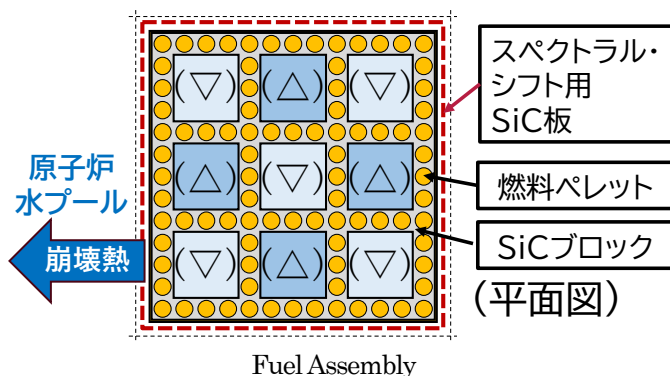
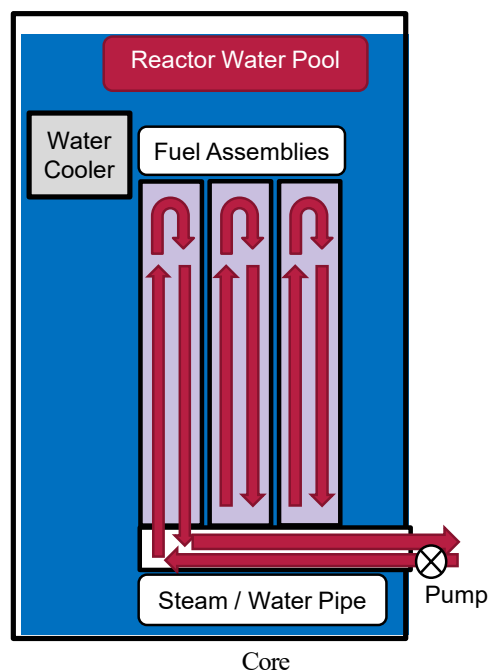


図2 KAMADO-FSR の概念。

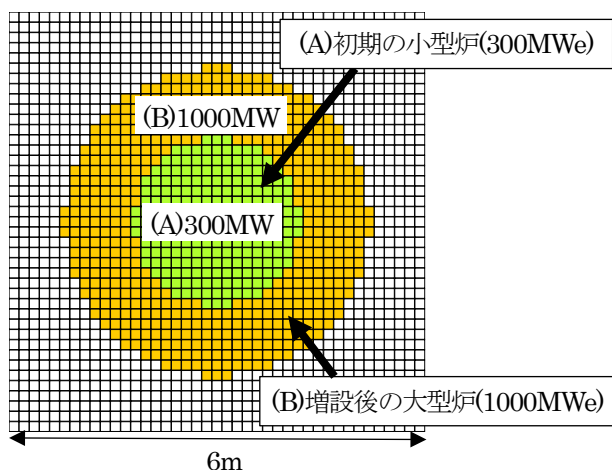


図3 KAMADO-FSR の出力規模の変更.

#### 4. 高中性子炉 (KAMADO-HFR)

テクネチウム  $^{99m}\text{Tc}$  は最も広く使用されている医療診断用の放射性核種の 1 つであり、 $^{99m}\text{Tc}$  の親核種のモリブデン  $^{99}\text{Mo}$  を生産する新型の高中性子束炉 KAMADO-HFR を概念設計した (図 4)。

炉心は中性子反射体である重水  $\text{D}_2\text{O}$  タンクに囲まれ、 $\text{D}_2\text{O}$  タンクと炉心は常圧の軽水プール内に設置される。金属  $\text{Mo}$  棒は中空の  $\text{Al}$  ボックス内で照射され、炉心下部の気密の操作室から遠隔操作で挿入・引抜が行われる。

$^{235}\text{U}$  濃縮度 5% の  $\text{UO}_2$  燃料ペレットを用いた  $\text{SiC}$  ブロック型燃料集合体・炉心概念をモンテカルロ法中性子輸送+燃焼計算コード MVP<sup>5)</sup> および MVP-BURN<sup>6)</sup> で解析した。10MW 出力で 1 週間あたり  $6 \times 10^{19}$  原子以上の  $^{99}\text{Mo}$  の製造が可能であり、日本国内の  $^{99m}\text{Tc}$  の医療診断用の需要を充足できる。

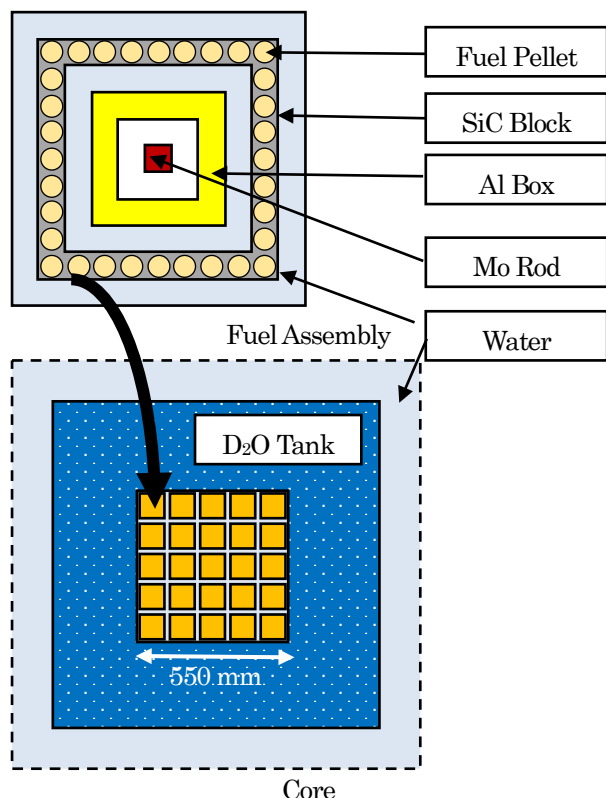


図4 KAMADO-HFR の概念.

#### 5. ガス冷却高速炉(KAMADO-FR2)

炭酸ガスを冷却材とし固有安全性を有する高速炉概念 KAMADO-FR に金属燃料 ( $\text{U-Pu-10Zr}$ ) を適用して  $\text{Pu}$  富化度 8% で取出燃焼度 256  $\text{MWd/kgHM}$  (転換率 0.96) の超長寿命炉心 ULLC (Ultra-long life core) を設計した (図 5)。

KAMADO-FR2 の燃料集合体外寸は加圧水型原子炉 (Pressurized water reactor: PWR) 17×17 燃料集合体と同じとし、ステンレス鋼で被覆された 6mm 厚×3.7m 高の金属燃料板 (22 枚) で構成されている。燃料集合体中央に崩壊熱冷却管が設置され、管内を水蒸気が流れる。燃料集合体は 3 MPa の  $\text{CO}_2$  圧力容器に収納され、圧力容器は原子炉水プールに沈められている。金属燃料は運転時に  $\text{CO}_2$  で冷却されるが、LOF 時には燃料の崩壊熱は崩壊熱冷却管内の二相流により冷却され、固有の安全性を確保する。

900MWe の KAMADO-FR2 炉心は  $\text{Pu}$  12.9 t と劣化 U 148 t を用いて燃料交換無しに 45 EFPY (Effective full power year) 運転が可能である。 $\text{Pu}$  を含まない  $\text{U-10Zr}$  燃料でも  $^{235}\text{U}$  濃縮度 9% で 227  $\text{MWd/kg}$  の燃焼度が達成できる。通常の 900 MWe の PWR では 45 年間に天然 U 4700 t が必要であり、KAMADO-FR2 は U 資源と既存  $\text{Pu}$  の有効活用 に寄与する。オプションとして、PWR の 45  $\text{MWd/kg}$  の使用済燃料集合体を炉心の外周部に再装荷すると 5 EFPY の燃焼期間で 29.8  $\text{MWd/kg}$  の追加燃焼を達成できる。KAMADO-FR2 炉心は水没可能で、PWR 使用済燃料も同一の原子炉水プール内に設置することによって、PWR 使用済燃料の炉心への装荷・取出は容易となる (図 6)。

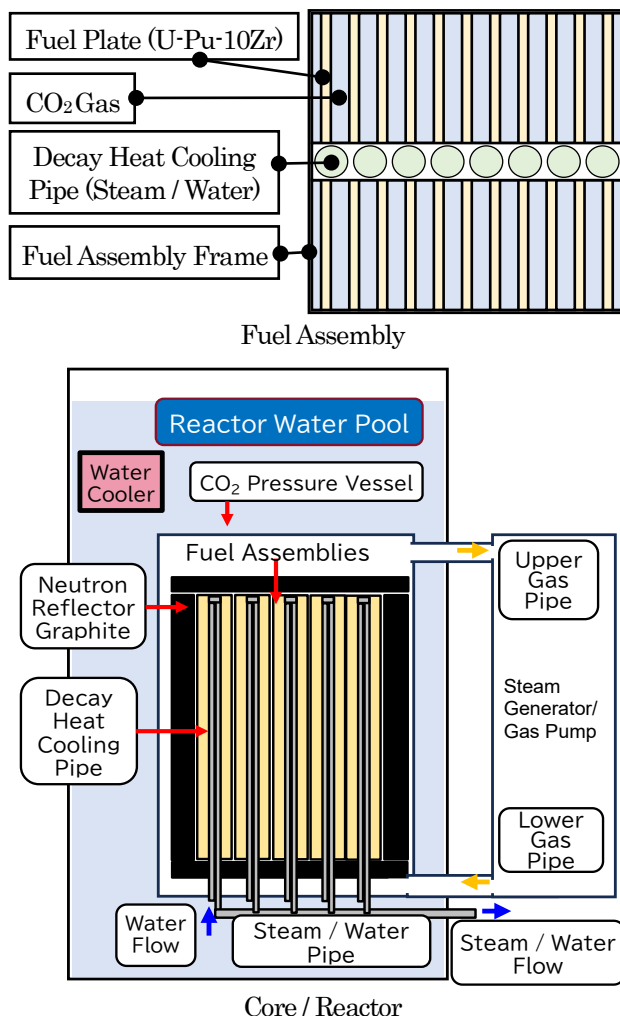


図5 KAMADO-FR2 の概念.

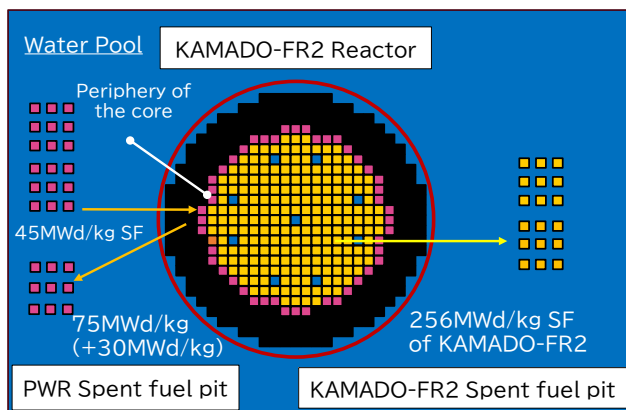


図6 KAMADO-FR2 による使用済PWR燃料の再利用.

## 6. 結言

KAMADO 燃料集合体・炉心概念は、燃料ペレットを SiC ブロックに収めた燃料集合体を BWR 燃料集合体の取替燃料 KAMADO-BWR とすることで、燃料健全性と安全性の向上が期待できる。

KAMADO-BWR 概念を発展して、SiC の機械強度の高さを生かし、BWR 燃料集合体を压力容器代わりにすることで、压力容器の無い BWR 炉心概念 KAMADO-FSR を構築した。KAMADO-FSR は压力容器や能動的安全装置が不要になるため、出力規模の自由度が高く、燃料集合体の装荷数を増すことによってモジュール化なしに、出力規模を 300MWe から 1000MWe まで容易に変更できる。これによって原子炉への投資とコストを 60%程度に削減できる。

燃料ペレットを SiC ブロックに収めた燃料集合体は、燃料ペレットを小さくすることで高中性子束が可能であるため、高中性子束炉 KAMADO-HFR は、10MW 出力で  $^{99}\text{Mo}$  を生産し、日本国内の  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  の医療診断用需要を充足できる。

炭酸ガス冷却高速炉概念 KAMADO-FR2 では、燃料集合体を金属燃料 (U-Pu-10Zr) 板と崩壊熱冷却管で構成することで、崩壊熱の構造的な除去が可能になり、高い安全性が期待できる。KAMADO-FR2 で ULLC の構築により、既存 Pu と U 資源を有効活用でき、PWR の使用済燃料集合体の再利用により、我が国の軽水炉の使用済燃料の蓄積問題、核不拡散抵抗性への寄与も期待される。

## 参考文献

- 1) Proc. Schl. Eng. Tokai Univ., Ser. E 47, 7-13 (2022).
- 2) Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 8, 76-81 (2025).
- 3) 東海大学紀要工学部 Vol.64, No. 1, 7-12 (2024).
- 4) Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 8, 70-75 (2025).
- 5) JAEA-Data / Code 2016-019 (2016).
- 6) J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 37, No. 2, 128-138 (2000).

## 1. 原子力・放射線安全リーダーシップに関する国際スクール

東海大学は2025年2月24日～3月4日の日程で国際原子力機関（International Atomic Energy Agency (IAEA)）との共同により、日本・アジア諸国の中堅の人材を対象にした「IAEA 国際スクール 原子力・放射線安全リーダーシップ」を開催した。本スクールは、IAEA が2017年10月から原子力・放射線分野の安全利用を担う次世代リーダーの育成を目的に世界各国で行っている研修プログラムの一つであり、IAEA と本学が2018年度に締結した原子力安全教育分野における実施協定に基づき実施しているものである。今回で5回目の開催となり、IAEA、外務省、日本原子力開発研究機構、日本原子力産業協会の支援を得て準備を進め、今年度は国内から9名、国外から10名の計19名が参加した（図1）。

本スクールは、5日間の研修と2日間の施設見学（東京電力福島第一原子力発電所および廃炉に関連する施設）により構成され、IAEA が策定した一般安全要件の一つである GSR-Part2 に基づき、原子力安全におけるリーダーシップおよびマネジメントに関する能力の開発を目標としている。また、本スクールでは、講師からの一方的な知識提供による従来型の講義は一切行わず、グループワーク、ゲーム、ケーススタディなどを多用した参加型のダイナミックな教育アプローチが採用されている。このうち、特にケーススタディは本スクールの中心的な教育プログラムとして位置付けられており、原子力現場において実際に起こりえる要件間の対立（たとえば、原子力発電所の定期検査における「スケジュールの遵守」と「安全確保」）を想定したシナリオが用意された。参加者は、実際の事故発生時の記者会見映像を視聴し、当時の担当者の対応をリーダーシップの観点から検証した上で、ロールプレイ形式により、事故を起こした原子力発電所の責任者、環境団体、住民などの立場を演じながら、模擬記者会見を実施した。このようなプログラムを通じて、原子力分野における事故につながる可能性のある複雑な状況や、現場で直面するさまざまな立場や役割を疑似体験し、改善を試みることで、より深い理解を得ることができた。

湘南キャンパスでの研修後は、東京電力福島第一原子力発電所の現状および廃止措置や環境修復の進捗状況について学ぶために福島県へ移動し、同発電所の視察に加え、環境省の特定廃棄物埋立情報館「リプルンふくしま」や「櫛葉遠隔技術開発センター」などの関連施設を見学した。



図1 IAEA 国際スクールでの集合写真。

## 2. 原子力安全基準研修

東海大学は2025年3月17～21日の日程で原子力安全基準研修を実施した。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）」に位置付けられている事業の一環である。

研修には、国内外から大学9名、一般36名の計45名が参加した（オンライン参加を含む）。IAEA および国内の専門家（原子力規制庁、東海大学）が講師を務め、講義には原子力安全基準に関する多岐にわたる内容が扱われた。研修は、対面と遠隔によるハイブリット形式で実施され、IAEA が定めた安全原則をはじめ、IAEA 安全基準のすべての分野に共通する基本的な安全思想、安全基準ドキュメントの作成プロセス、安全基準文書のデータベース、最新の動向などについて講義が行われた。さらに今年度は、IAEA のスタッフと参加者が密に意見交換できる時間が日々設けられ、参加者の具体的な関心・ニーズに応じた柔軟な対応が可能となるよう配慮がなされた。

IAEA の安全基準に関するドキュメントを包括的かつ体系的に学べる機会に限られているため、研修後に実施したアンケートでは、参加者から高い評価が得られた。

なお、2024年度の講義資料は、東海大学国際原子力研究所ホームページにて公開されている。

<https://www.u-tokai.ac.jp/education-research/research-centers/global-research-institute-of-nuclear-energy/iaea-training-course/>

東海大学国際原子力研究所URL

<https://www.u-tokai.ac.jp/education-research/research-centers/global-research-institute-of-nuclear-energy/>

東海大学国際原子力研究所 2024年度 所報

発行日：2025年 9月30日

発行者：東海大学国際原子力研究所 近藤 駿介

〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4丁目1-1