

Wed. Mar 17, 2021

Room A

Planning Lecture | Joint Session | Research Committee for Mechanistic Evaluation of Critical Heat Flux for Nuclear Reactors, Thermal Hydraulic Division, Computational Science and Engineering Division

[1A_PL] Current Status of Numerical Simulation and Issues for CHF Evaluation

Chair: Tomio Okawa (UEC)

1:00 PM - 2:30 PM Room A (Zoom room 1)

[1A_PL01] Numerical Simulation with Two-Phase Flow Model

*Hiroyuki Yoshida¹ (1. JAEA)

[1A_PL02] Current Status and Issues for CFD Simulation of Boiling Phenomena

*Kei Ito¹ (1. Kyoto Univ.)

[1A_PL03] Current Status and Issues for Direct Numerical Simulation of Boiling Phenomena

*Yasuo Ose¹ (1. YSE)

Room B

Planning Lecture | Technical division and Network | Reactor Physics Division

[1B_PL] Recent actions on sustainable reactor training in reactor physics education

Chair: Go Chiba (Hokkaido Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room B (Zoom room 2)

[1B_PL01] Basic policy and target for "Establishment of nuclear education platform focusing on university research reactors"

*Kengo Hashimoto¹ (1. Kindai Univ.)

[1B_PL02] Experiences and prospects on the use of digital technologies in capacity development

*Masahiro Tatsumi¹ (1. NEL)

[1B_PL03] ADS development and reactor physics experiments at JAEA

*Kenji Nishihara¹ (1. JAEA)

Room C

Planning Lecture | Technical division and Network | Advanced Reactor Division

[1C_PL] Trends in other countries/organizations regarding safety standards for advanced reactors

Chair: Takaya Ito (MFBR)

1:00 PM - 2:30 PM Room C (Zoom room 3)

[1C_PL01] Status of efforts at Generation-IV

International Forum

*Shigenobu Kubo¹ (1. JAEA)

[1C_PL02] Status of efforts at International Atomic Energy Agency

*Hirofumi Ohashi¹ (1. JAEA)

[1C_PL03] Status of efforts in USA

*Hidemasa Yamano¹ (1. JAEA)

[1C_PL04] Issues to be addressed in Japan

*Akira Yamaguchi¹ (1. UTokyo)

[1C_PL05] Discussion

Room D

Planning Lecture | Board and Committee | Review Committee on Decommissioning of the Fukushima Daiichi NPS

[1D_PL] Decade of Fukushima Daiichi NPS decommissioning. What are the challenges of the future?

Chair: Naoto Sekimura (UTokyo)

1:00 PM - 2:30 PM Room D (Zoom room 4)

[1D_PL01] The Activity of Atomic Energy Society of Japan for 1F Decommissioning

*Hiroshi Miyano¹ (1. Chairman of Review Committee on Decommissioning of the Fukushima Daiichi NPS)

[1D_PL02] Fukushima Daiichi Decontamination and Decommissioning -Current Status and Challenges-

*Akira Ono¹ (1. TEPCO HD)

[1D_PL03] The Progress of R & D for decommissioning technologies

*Koichi Noda¹ (1. JAEA)

Room E

Planning Lecture | Technical division and Network | Operation and Power Division

[1E_PL] Efforts to Risk Informed Plant Operation and Maintenance

Chair: Tadashi Watanabe (Univ. of Fukui)

1:00 PM - 2:30 PM Room E (Zoom room 5)

[1E_PL01] Research and Development for Risk Informed Plant Operation

*Tai Furuta¹ (1. CRIEPI)

[1E_PL02] Status of Risk Informed Approach in KEPCO

*Shinji Masumoto¹ (1. KEPCO)

[1E_PL03] Status of Risk Informed Approach in TEPCO

*Ryota Tomiyasu¹ (1. TEPCO HD)

Room G

Planning Lecture | Board and Committee | Ethics Committee

[1G_PL] Nuclear Power Useful for the Society

Chair: Tomohito Nakano (TOSHIBA ESS)

1:00 PM - 2:30 PM Room G (Zoom room 7)

[1G_PL01] Significance in this Session

*Kyoko Oba¹ (1. JAEA)

[1G_PL02] Pursuit of Nuclear Technology Useful for the Society: understanding the AESJ's Code of Conduct, Article 2

*Tomoki Ohashi¹ (1. Miyagi Gakuin Women's Univ.)

Room I

Planning Lecture | Technical division and Network | Division of Nuclear Fuel Cycle and Environment

[1I_PL] Discussion on future technical investigation for the final disposal of removed soil and wastes

Chair: Daisuke Sugiyama (CRIEPI)

1:00 PM - 2:30 PM Room I (Zoom room 9)

[1I_PL01] Overview of the current status of the interim storage and development of volumetric reducing treatment method for removed soil and wastes

*Kazuto Endo¹ (1. NIES)

[1I_PL02] Multi-aspect assessment of scenarios for volumetric reducing treatment and final disposal of removed soil and wastes

*Tetsuo Yasutaka¹, Masahiro Osako² (1. AIST, 2. NIES)

[1I_PL03] Panel Discussion

Kazuto Endo¹, Tetsuo Yasutaka², Masahiro Osako¹, Kazuo Yamada¹, Yasuaki Miyamoto³, Daisuke Sugiyama⁴ (1. NIES, 2. AIST, 3. JAEA, 4. CRIEPI)

Room K

Planning Lecture | Technical division and Network | Materials Science and Technology Division

[1K_PL] Current Status of Research and Development Relating to Irradiation Tests and Necessity of Domestic

Materials Testing Reactor -Part I-

Chair: Tamaki Shibayama (Hokkaido Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room K (Zoom room 11)

[1K_PL01] Overview

*Tamaki Shibayama¹ (1. Hokkaido Univ.)

[1K_PL02] Consideration for the Modality of a New Materials Testing Reactor

*Kunihiko Tsuchiya¹, Takayuki Yamaura¹, Michihiro Naka¹, Tsuyoshi Kusunoki¹, Masanori Kaminaga¹, Takayuki Terai² (1. JAEA, 2. Professor Emeritus of UTokyo)

[1K_PL03] Importance of Materials Testing Reactor on Academic Research

*Yasuyoshi Nagai¹ (1. Tohoku Univ.)

[1K_PL04] The Role of Materials Testing Reactors and Post Irradiation Examination Facilities in the Development of Light Water Reactor Fuels

*Kan Sakamoto¹ (1. NFD)

[1K_PL05] Necessity of Domestic Materials Testing Reactor on Radioisotope Production

*Hiroshi Kawamura¹ (1. CTC)

[1K_PL06] Discussion

Chair: Mitsuhiro Kodama¹ (1. NFD)

Room L

Planning Lecture | Technical division and Network | International Nuclear Information Network

[1L_PL] University-driven Innovation to be pursued for realizing "Society 5.0"

Chair: Yukinori Hirose (TOSHIBA ESS)

1:00 PM - 2:30 PM Room L (Zoom room 12)

[1L_PL01] University-driven Innovation to be pursued for realizing "Society 5.0"

*Shuichi Sakamoto¹ (1. MEXT)

Planning Lecture | Joint Session | Research Committee for Mechanistic Evaluation of Critical Heat Flux for Nuclear Reactors, Thermal Hydraulic Division, Computational Science and Engineering Division

[1A_PL] Current Status of Numerical Simulation and Issues for CHF Evaluation

Chair: Tomio Okawa (UEC)

Wed. Mar 17, 2021 1:00 PM - 2:30 PM Room A (Zoom room 1)

[1A_PL01] Numerical Simulation with Two-Phase Flow Model

*Hiroyuki Yoshida¹ (1. JAEA)

[1A_PL02] Current Status and Issues for CFD Simulation of Boiling Phenomena

*Kei Ito¹ (1. Kyoto Univ.)

[1A_PL03] Current Status and Issues for Direct Numerical Simulation of Boiling Phenomena

*Yasuo Ose¹ (1. YSE)

合同セッション1（「原子炉における機構論的限界熱流束評価手法」研究専門委員会、
熱流動部会、計算科学技術部会）

数値シミュレーションの現状と限界熱流束評価に向けた課題
Current Status of Numerical Simulation and Issues for CHF Evaluation

二相流モデルを用いた数値シミュレーションについて

Numerical Simulation with Two-Phase Flow Model

* 吉田 啓之¹

¹原子力機構

1. はじめに

原子炉設計における燃料の限界熱流束評価は、炉心の熱的余裕を評価する上で最も重要な項目の一つである。燃料の限界熱流束は燃料集合体構造等に大きく依存するため、実機の燃料形状及び運転条件を模擬した大規模試験により関連データを取得している。しかしながら、そのような試験は多大な費用と期間を必要とし、試験実施可能な国内外の主要施設が限定的であることなどから、大規模試験に依存しない限界熱流束評価のための技術開発が望まれている。

「原子炉における機構論的限界熱流束評価技術」研究専門委員会においては、近年の計算機性能の飛躍的向上、数値解析技術や計測技術の進展を受け、限界熱流束の機構論的評価に向けた調査、課題抽出を行っている。本報告では、二相流モデルを用いたシミュレーションの概要、現状、課題について紹介する。

2. 二相流モデルを用いた数値シミュレーションによる限界熱流束評価

2-1. 二相流モデルを用いた数値シミュレーションの概要

二流体モデルを例として示す。二流体モデルの基礎式のうち、連続の式、運動量保存式を示す。

$$\frac{\partial \rho_m \alpha_m}{\partial t} + \frac{\partial \rho_m \alpha_m u_{m,k}}{\partial x_k} = \Gamma_m, \quad \frac{\partial \rho_m \alpha_m u_{m,i}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_m \alpha_m u_{m,k} u_{m,i}}{\partial x_k} = -\alpha_m \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{m,ik}}{\partial x_i} - M_{m,i} - \Gamma_m (u_{g,i} - u_{l,i}) + F_i$$

ここで、 ρ : 密度[kg/m³]、 α : ボイド率[-]、 u : 速度[m/s]、 Γ : 相変化速度[kg/s]、 t : 時間[s]、 x : 座標[m]、 p : 圧力密度[Pa]、 τ : セン断応力[N/m²]、 M : 界面摩擦[N/m²]、 F : 外力[N]であり、添え字 m は液相 l あるいは気相 g を、 i, k は座標の方向を表す。上式に加えエネルギー方程式を連立させることで、二流体モデルにより相変化を伴う二相流の挙動をシミュレーションすることができる。

2-2. 限界熱流束評価の現状

これまで、3次元二流体モデルを用いた限界熱流束評価はほとんど行われていなかったが、1. で述べた状況を反映し、近年、いくつかの試みが行われている。例えば Lifante らは、Fluent に壁面沸騰モデルなどを導入し、COSMOS-L 試験などの限界熱流束試験結果との比較を行っている[1]。また Feng らは、STAR-CCM+を用いて限界熱流束の予測を試みた[2]。両者とも、二流体モデルと気泡数密度に関する輸送方程式、相関式を用いていること、比較、検討した実験結果が熱流束一定の条件であることが共通である。

3. 機構論的限界熱流束評価に向けた課題

2-2 で示した解析においては、シミュレーションで壁面温度が急上昇した熱流束を限界熱流束として実験結果と比較した。Feng らは実験結果と±25%で一致したと報告しているが、過小評価の傾向が現れている。二流体モデルで得られる速度、ボイド率などは統計平均値であるが、近年の基礎的な研究では、局所・瞬時の気液挙動が限界熱流束の引き金になると指摘されている、上述の解析結果と実験結果との差異は、これらの影響を含まないことが一因と思われるため、機構論的な評価に向けては限界熱流束に係る局所・瞬時の挙動をモデル化することが不可欠と考えられる。

参考文献 [1] C. Lifante, et al., Proc. ICONE27, ICONE27-2070 (2019). [2] J. Feng, Z. Skirpan, E. Baglietto, Proc. ICONE2020, ICONE2020-16080 (2020).

*Hiroyuki Yoshida¹

¹JAEA

合同セッション1（「原子炉における機構論的限界熱流束評価手法」研究専門委員会、
熱流動部会、計算科学技術部会）

数値シミュレーションの現状と限界熱流束評価に向けた課題
Current status of Numerical Simulation and Issues for CHF Evaluation

沸騰現象の CFD における課題と現状

Current Status and Issues for CFD Simulation of Boiling Phenomena

*伊藤 啓¹

¹京都大学

1. はじめに

昨今、沸騰現象の CFD に関する様々なモデルが提唱されており、ミクロスケールからマクロスケールまで多種多様な解析が実施されている。本報告では、それらの沸騰解析モデルの現状について整理し、特に限界熱流束予測への適用性に関して、各モデルの利点や欠点（限界）を示す。

2. マクロスケールにおける沸騰現象解析

マクロスケールにおける沸騰現象の CFD は、平均流モデルと界面解析モデルに大別でき、平均流モデルとしては混合流モデルや二流体モデル、界面解析モデルとしては界面追跡法や粒子法が該当する。平均流モデルを用いた解析は、比較的計算負荷が小さい反面、沸騰現象の再現性は熱伝達や沸騰のモデル次第であり、沸騰開始点や限界熱流束の予測性には疑問が残る。一方、界面追跡法や粒子法は界面変形を直接計算するため、沸騰気泡の成長挙動などを平均流モデルよりも正確に計算することは可能であるが、格子解像度を高める必要があるため解析負荷は大きく増加する。それでも、壁面での沸騰核や Microlayer を解像することは難しく、限界熱流束予測のためには、壁面近傍のミクロスケールの現象をどのようにモデル化するかが課題となっている。

3. メソスケールにおける沸騰現象解析

メソスケールの CFD には、Phase-field 法を用いることが多い。Phase-field 法は Helmholtz の自由エネルギー密度に基づいて気液界面を記述する手法であり、沸騰解析においても本質的に優れた特性を有する。しかし、現実の解析においては、Phase-field 法が要請する気液界面厚さのスケール（nm オーダー）の格子を用いることは困難であるため、その優れた特性を生かし切れているとは言い難い。また、Convective Cahn-Hilliard 方程式の対流速度スケールについても、問題点が存在すると考えられる。

4. ミクロスケールにおける沸騰現象解析

ミクロスケール解析に関しては、分子動力学を用いた沸騰現象解析が行われている。Newton の運動方程式を用いるのみで人為的なモデル化を必要としないため、解析結果の信頼性は高いと考えられるが、解析負荷（取り扱う分子数）の観点から、解析領域のサイズは最大でも $1\mu\text{m}$ 程度であり、限界熱流束の予測などに用いることは難しい。

5. おわりに

ミクロスケールからマクロスケールまで、様々な沸騰解析手法が存在するが、現状ではどの手法も大きな課題を抱えており、数値解析に基づく限界熱流束の予測は未だ難しい状況である。今後、予測精度向上を目指して更なるモデル開発・改良が実施されることが望まれる。

謝辞

本報告の実施にあたり、京都大学名誉教授の功刀資彰先生に多くの資料を御提供頂きました。謹んで御礼申し上げます。

*Kei Ito¹

¹Kyoto University

合同セッション1（「原子炉における機構論的限界熱流束評価手法」研究専門委員会、
熱流動部会、計算科学技術部会）

数値シミュレーションの現状と限界熱流束評価に向けた課題
Current status of Numerical Simulation and Issues for CHF Evaluation

沸騰現象の直接数値シミュレーションにおける現状と課題

Current Status and Issues for Direct Numerical Simulation of Boiling Phenomena

*小瀬 裕男¹

¹大和システムエンジニア

1. はじめに

近年、解析に用いる計算機の大規模化、数値解析技術の進展により、沸騰現象に対する詳細な解析が行われつつある。特に、最近では実験式や経験式を用いずに、気液界面の微視的な構造を評価対象として、気液界面の動的な挙動や熱伝達を直接数値的に解析する、直接数値シミュレーション（DNS）が注目されてきている。本報告では、沸騰現象に対する DNS の現状について、その進展や最近の研究例を紹介するとともに、限界熱流束評価に向けて克服すべき技術的課題について議論する。

2. 沸騰現象の DNS に対する現状

沸騰現象の DNS では一般的な CFD と同様に、質量、運動量およびエネルギーの保存式を解く。くわえて、気液界面の微視的な挙動を表現するための気液界面モデリングや表面張力モデルといった計算モデル、さらには沸騰現象を模擬するために、相変化や気液界面における jump 条件、核生成、Micro-layer 蒸発などの物理モデルが必要となる。このように様々な素過程を必要とする沸騰現象の DNS が最初に報告されたのは、Lee ら[1]による移動格子を用いた研究例とされるが、当時の解析技術では気泡の変形や合体を再現することはできない。その後、VOF 法や level set 法などといった界面追跡法に代表される高精度な気液界面スキームの登場によって、気泡の大変形や気液間熱伝達を直接解くことが可能となり、たとえば Son らによる核沸騰中の単一気泡成長や離脱[2]、あるいは高熱流束下における核沸騰現象への適用[3]、さらに最近では Sato ら[4]による界面追跡法を用いた、核沸騰から膜沸騰に至る現象の3次元プール沸騰 DNS による研究例が報告されるなど、近年の DNS は飛躍的な技術的進展を遂げている（詳細なレビューに関しては[5]を参照）。ただし、その多くは飽和プール沸騰を対象としており、発生する気泡はせいぜい数個程度に限られている。実際の現象として想定されるサブクール状態の流動沸騰に適用した報告例は極めて少ないのが現状である。

3. 沸騰現象の DNS に対する課題

限界熱流束評価に向けて、DNS が有用な手段であることは間違いない。しかしながら、次に挙げるような克服すべき技術的課題が数多く残されていることも事実である。1) 現象のマルチスケール性：たとえば気泡の発泡まで想定すると、 μm から m （あるいは μs から s ）オーダーの空間（あるいは時間）スケールが要求されるため、フルスケールの DNS は現実的に困難、2) 核生成モデル：一般的には不均質核生成理論といわれるが、十分に確立されたモデルは存在しない、3) 発泡点密度のモデル化：発泡点密度を理論的に予測することは困難であり、何らかの経験式を導入するなどのモデル化が必要、4) その他：解析条件として仮定する初期熱流動場や伝熱面上の性状などは、評価結果に大きく影響するため、適切な条件設定が非常に重要である。実用的には解くべき問題やスケールに応じて最適な手法やモデルを組み合わせた DNS が必要と考えられる。

参考文献 [1] Lee et al., J. Heat Trans. 111 (1989), [2] Son et al., J. Heat Trans. 121 (1999), [3] Son et al., Int. J. Heat Mass Trans. 51 (2008), [4] Sato et al., Int. J. Heat Mass Trans. 125 (2018), [5] Kharangate et al., Int. J. Heat Mass Trans. 108 (2017)

*Yasuo Ose¹

¹YSE

Planning Lecture | Technical division and Network | Reactor Physics Division

[1B_PL] Recent actions on sustainable reactor training in reactor physics education

Chair: Go Chiba (Hokkaido Univ.)

Wed. Mar 17, 2021 1:00 PM - 2:30 PM Room B (Zoom room 2)

[1B_PL01] Basic policy and target for "Establishment of nuclear education platform focusing on university research reactors"

*Kengo Hashimoto¹ (1. Kindai Univ.)

[1B_PL02] Experiences and prospects on the use of digital technologies in capacity development

*Masahiro Tatsumi¹ (1. NEL)

[1B_PL03] ADS development and reactor physics experiments at JAEA

*Kenji Nishihara¹ (1. JAEA)

炉物理部会セッション

持続可能な原子炉実習教育への新たな取り組み

Recent actions on sustainable reactor training in reactor physics education

(1) 「大学研究炉を中心とした原子力教育拠点の形成」の実施方針と到達目標

(1) Basic policy and target for "Establishment of nuclear education platform focusing on university research reactors"

¹*橋本 憲吾¹²近畿大学原子力研究所

1. 原子力教育拠点形成計画の概要

原子力を専攻する学生が最低限学修すべき講義や実習の中で、実際の原子炉を利用した実習教育は、講義で得た知識を血肉化する実践現場として不可欠である。しかしながら、試験研究用原子炉の多くが廃止又は運転停止となり、教育・研究のために利用できる大学原子炉は近畿大学と京都大学の三基(UTR-KINKI, KUR, KUCA)のみとなっている。さらに、京都大学原子炉 KUR は 2026 年以降の運転の目処が立っておらず、我が国の原子力教育は危機的状況にある。文部科学省「国際原子力人材育成イニシアティブ事業」として今回採択された「大学研究炉を中心とした原子力教育拠点の形成」は、近畿大学原子炉(UTR-KINKI)と京都大学臨界集合体(KUCA)の有機的連携により、貴重な原子力教育リソースである両大学原子炉の効率的・有効的教育利用を推進するものである。このプログラムでは、参加各大学教員の実習指導への主体的関与、そして、各大学が持つ原子力教育リソースの共有と強化を大きな目標としている。また、原子力産業界と連携することにより、原子力技術者教育の専門性を高度化し、原子力アカデミアのみならず産業界への人材輩出を目指している。

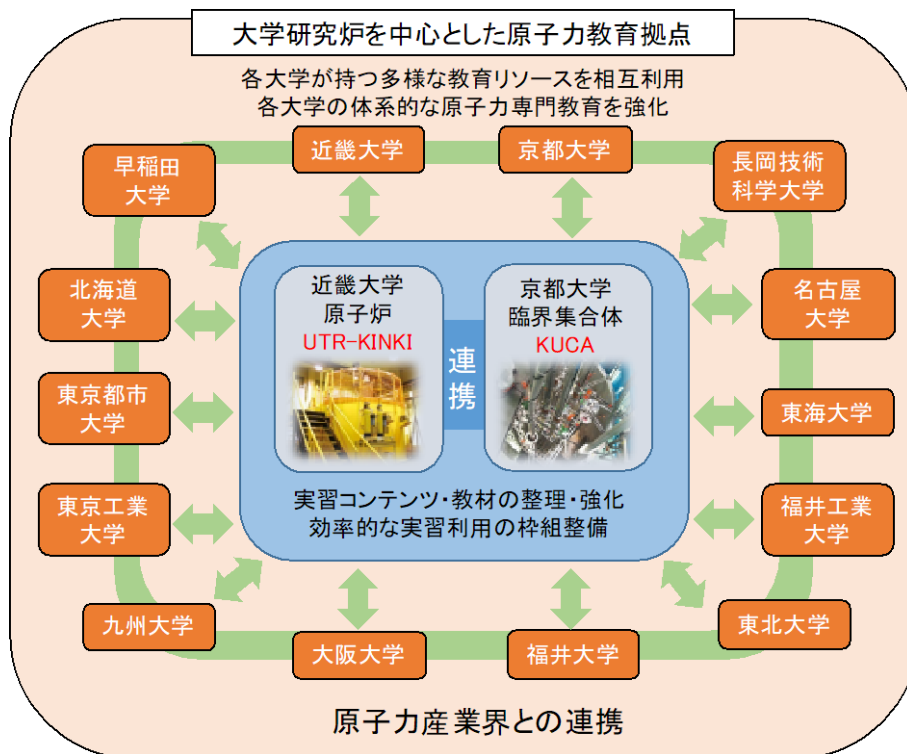


図1 大学研究炉を中心とした原子力教育拠点のコンセプト

¹ Kengo Hashimoto¹² Kindai Univ., Atomic Energy Research Institute

図1に示すように、本教育拠点には、近畿大学原子炉と京都大学臨界集合体を中心に全国の14の大学が参画し、原子力産業界、日本原子力研究開発機構とも連携する。さらに、従来から近畿大学が韓国・慶熙大と連携して実施してきた海外実習（AGN-201Kを活用）も本事業に合流する予定である。

2. 拠点形成計画の実施方針

2-1. 運営会議による重要事項の決定

本教育拠点形成計画（以後、本事業という）の企画運営主体として、参画機関等から構成される運営会議を組織する。この運営会議は、中長期ビジョンの策定やマシンタイム配分を含む重要事項の決定を行い、原子力実習教育に関する施策の立案、実行、結果の評価、改善のPDCAサイクルを有効にし、自律的な活動の持続的発展のための運営管理を実施する。

2-2. 学生の旅費を支給

原子炉実習に参加する学生と教員の旅費を本事業から支給する。実習指導を行うTA（原子炉実習履修済の院生）に対しても旅費等を支給することができる。

2-3. 実習教育の責任は参画大学教員が負う

実習プログラム・テキストの作成、実習の実行については、参画大学教員が責任を負う。学生実習のための原子炉運転と運転指導を参画大学教員が行えるよう、施設大学は参画大学教員の運転資格取得を進める。本事業の実習を持続可能とし更に有効性を高めるためには、この方針は必須条件となる。

2-4. 施設管理とマシンタイム確保の責任は施設大学が負う

原子炉施設の運転管理と放射線管理については、原子炉施設大学である近畿大学と京都大学教員が責任を負う。また、本事業に必要なマシンタイムの確保に最大限の努力をする。

2-5. 実習には3+αのコース

①基礎コース（学部生コース）

主に原子力を専攻する学部学生を対象とし、近畿大学原子炉を利用した原子炉実習「基礎コース」を整備・実施し、原子力ジェネラリスト育成を行う。このコースでは、原子炉物理・放射線計測等の基礎項目に関する実習を通して、既に講義で得ている知識を実物の原子炉で実践して理解を深め、原子炉施設における運転管理や放射線管理の実務（規制・法令に基づく管理業務を含む）を有機的に理解させる。また、原子力技術の面白さを体験し関心を高め、原子力分野への進学・就職意識を確かなものとする。

②中級コース（院生コース）

学部で原子力を専攻しなかった大学院生を主な対象として、京都大学臨界集合体を利用した短期間の原子炉実習を整備・実施する。原子力基幹科目の未履修院生の参加が見込まれるので、実習参加に先立って事前授業の受講と事前レポート提出を課す予定である。

③上級コース

上記「基礎コース」又は「中級コース」を受講した大学院生を対象として、近畿大学原子炉又は京都大学臨界集合体を利用した専門性の高い実習プログラムを整備・実施する。最新の中性子計測技術に基づいた高度な原子炉物理実験、商業用軽水炉等で採用されている核計装や炉物理試験技術に関する実習・演習等を行う。

④国際研鑽機会の付与

「基礎コース」受講の学生の中から意欲ある者を選抜し、「慶熙大原子炉実習」、「日韓合同原子炉実験研修会」、原子炉物理実験「国際専門コース」等に派遣する。使用言語は英語とし、各実習項目の後に結果のプレゼンテーションを行い、将来の原子力技術者としての国際的視野を養う。

3. 拠点形成計画の到達目標

本事業の目標とする人材像を次の3つに定め、運営会議又はそのワーキンググループにより目標到達度を定期的に評価し、改善策の立案等を継続的に実施する。



①原子力ジェネラリストの育成

幅広い総合工学である原子力工学の基礎的な知識と技能を身に付け、原子力産業界の基盤人材となる原子力ジェネラリストを育成する。これを実現するために、本事業の「基礎コース」又は「中級コース」を整備・実行し、参画機関による教育リソースを活用する。

②原子力スペシャリストの育成

自らの専門分野を持ち、優れた技術力と深い学識を兼ね備え、原子力産業界又は原子力アカデミアにおける将来のエースとなる原子力スペシャリストの育成を目指す。これを実現するために、本事業の「上級コース」を整備・実行し、参画機関が保有する高度な研究リソースを活用する。

③国際原子力人材の育成

高い専門的知識と技術に加えてリーダーシップと国際コミュニケーション能力を身に付け、世界の技術者・研究者と共働しうる国際原子力人材の育成を目指す。これを実現するために、本事業の「上級コース」に加えて、「慶熙大学校原子炉実習」等の国際研鑽機会を付与し、参画機関が一体となって育成に努める。

本事業を成功に導き持続可能な原子力教育システムを形成するためには、炉物理部会員のみならず原子力学会員各位の理解と協力が必須である。原子力工学の未来を担う若者の成長のために、ご支援をお願いしたい。

炉物理部会セッション

持続可能な原子炉実習教育への新たな取り組み

Recent actions on sustainable reactor training in reactor physics education

(2) 人材育成におけるデジタル技術活用の経験と今後の展望について

(2) Experiences and prospects on the use of digital technologies in capacity development

^{1*} 巽 雅洋¹²(株)原子力エンジニアリング

これからの社会を担う原子力人材の育成に関して、学生や社会人を対象とした実習経験や来るべき社会の変化に関する考察を通じて、デジタル技術活用の重要性と可能性について議論する。

キーワード：人材育成、シミュレータ、デジタル技術、プログラミング**1. はじめに**

原子力人材の育成における最も重要なテーマの一つに、原子力システムの安全性確保に関する理解が挙げられる。特に、原子炉物理学（以下、炉物理）における反応度やフィードバック効果に関する理解が重要となるが、数式や抽象的な概念だけでは直感的な理解は難しい。炉物理を工学として学ぶにあたり、実体験を得ることが大切であり、その役割を担うのが原子炉実習である。これまで、学生や原子力技術者を対象とした原子炉実験プログラムを通じて、理論を現実の事象として体感できる貴重な機会が提供されてきた。しかしながら、国内における原子炉施設の運転停止等により、この機会が急速に失われつつある。そこで本稿では、それを補う一つの手段としてシミュレータを用いた人材育成の可能性と、さらにその先を見据えた議論として、デジタル技術の活用とデジタルマインドの醸成の重要性について述べる。

2. デジタル技術の活用と今後の展望**2-1. シミュレータを用いたアクティブ・ラーニング**

大学における授業や国際ワークショップ等における人材育成プログラムでの経験から、シミュレータは教育ツールとして非常に有用であると考えられる。例えば、原子力技術の初学者向けのトレーニングコースにおいて、シミュレータを用いた事故解析の演習を通じて、システムの安全性がどのように実現されているかを議論した事例では、講師として高い実習効果が得られたと感じたのと同時に参加者からの評価も高かった。このように、シミュレータを用いた解析と分析を通じて学ぶ“Learning by doing”のスタイルは、教える側から教わる側への一方向の情報伝達ではなく、自発的な試みやグループでの議論を通じて、深い理解を醸成するアクティブ・ラーニングの実践として有効であると考えられる。ただし、限られた時間を有効に活用するために、導入部分の講義内容やシミュレータが提供するユーザ体験には注意を払う必要がある。詳細すぎる説明や高機能なシミュレータが必ずしも有効ではなく、教育テーマに相応しいレベルの解説やシミュレーション機能、並びにユーザインタフェースを有することが重要となる。したがって、各実習に最適化されることが理想的であるが、独立して製作することはリソースの観点からも現実的ではなく、拠点間での連携や共有を進めることが重要である。また、将来的には、後述する活動の一環として、より高い自由度と忠実度を有する「デジタルツインモデル」の開発と原子炉実習での活用が期待される。

2-2. 今後の展望と期待

Society5.0[1]に向けたデジタル技術を基盤とする社会構造への変容の中で、エネルギーの安定供給を支える

* Masahiro Tatsumi¹

² Nuclear Engineering, Ltd.

原子力技術のあり方は、今の延長線上で問題ないのだろうか？ 過去に実績ある技術や積み重ねられた議論は尊重すべきであるが、これまでの実績や規制の枠組みに固執するあまり、イノベーションが阻害されては意味が無い。合理的かつ説明性が高い技術が活用できるのであれば、建設的な議論がなされるべきであろう。元来、複合領域における先進技術の活用を牽引してきた達成してきたのが原子力分野であり、そのビジョンの原点に回帰する必要があるのではなかろうか。その一つの鍵がデジタル技術の活用にあると筆者は考える。

社会基盤の中核がソフトウェアによって駆動される「software-defined な社会」への移行が進む中、知の蓄積は指数関数的な速度で行われており、従来のパラダイムで人材育成を行うことが困難となりつつある。MIT メディア研究所が提唱する “Practice over theory” や “Learning over education” を始めとする 10 の原則[2]は、インターネット時代における研究や教育のあり方を再定義し得るインパクトを持つ。従前から実施されてきた演繹的な教育アプローチに偏重するのではなく、具体的な問題解決や実験を出発点とする帰納的な教育アプローチを適切に組み合わせ、大学 1 年次のような初期教育から社会人を対象としたリカレント教育に至るまで、多様なレベルで「考え方を学ぶ」機会を提供する必要がある。この際、問題を解くための手段としての計算機の利用やプログラミングに関するスキルの獲得は、筆者の過去の経験から、技術者として必要な論理的思考力、表現力、実行力の強化に非常に有効なアプローチであると考え。過去約 30 年間に於いて、領域毎にハードウェア中心の「ものづくり」で最適化してきた日本は、ソフトウェアを基盤とするプラットフォーム戦略を採ってきた欧米と比較して、大きな成長機会を逃してしまった感がある。しかしながら、ソフトウェア・ファースト[3]な視点を持つ人材を育成し、ものづくり技術とソフトウェア技術の融合を高いレベルで実現すれば、日本は比類なき優位性を再び得ることができると考えられる[4]。

単一の組織や分野だけで多様な教育機会を提供することは、リソースの観点から現実的ではなく、たとえ実現出来たとしても無駄が多い。それより各組織の特徴を活かした教育プログラムを共有可能な部品として互いに公開し、それらを自由に組み合わせることができる EaaS (Education as a Service) プラットフォームを実現すべきである。MOOC (Massive Open Online Course) や Micro Degree 制度の活用により、分野を超えて実現することが望ましいが、教育制度の変革が必須となるため、実現には時間が必要かもしれない。

翻って原子炉実習について見てみると、デジタル技術の積極活用こそ無かったが、近大原子炉や KUCA 等の共同利用や単位認定制度の整備など、EaaS 的な取り組みは既に実現されてきた。これを維持・発展するためには、今後の施設運営や各種リソースの制限、社会環境の変化から、今まさに変革が求められている。今回の「国際原子力人材育成イニシアティブ事業」における「大学研究炉を中心とした原子力教育拠点の形成」において、カリキュラム開発や教育実施におけるデジタル技術の積極活用を通じて、デジタルマインドを持つ原子力人材の育成が望まれる。

3. おわりに

原子炉実習は施設の共同利用という形で長期にわたり継続されてきたが、これは先進的な取り組みであったことを改めて認識すべきである。今回の原子力拠点形成の活動を契機に、過去のノウハウを活用すると同時に、デジタル技術の活用による新たな価値の提供とオープンな運営により、国際的に活躍する原子力人材の育成に資する次世代の教育プラットフォームとして進化することを期待したい。

[1] 内閣府, “Society 5.0”, https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/

[2] Ito, Joichi. “The Practice of Change.” PhD Dissertation, Keio University Graduate School of Media and Governance (2018).

[3] 及川卓也, “ソフトウェア・ファースト”, 日経 BP 社 (2019).

[4] 安宅和人, “シン・ニホン AI×データ時代における日本の再生と人材育成”, NewsPicks パブリッシング (2020).

炉物理部会セッション

持続可能な原子炉実習教育への新たな取り組み

Recent actions on sustainable reactor training in reactor physics education

(3) JAEA における ADS 開発と炉物理実験

(3) ADS development and reactor physics experiments at JAEA

*西原 健司¹¹日本原子力研究開発機構

持続可能な原子炉実習教育に向けて必要な条件の一つである教育実習へのニーズの多様性を、JAEA における加速器駆動システム（ADS）の開発経験を通じて議論する。

キーワード：原子炉実習教育、加速器駆動システム、新型炉開発

1. はじめに

持続可能な原子炉実習教育に向けて必要な条件の一つは、教育実習へのニーズの多様性であろう。教育実習は大学学部生・院生、原子炉技術者などに対して開かれているのが現状であるが、原子炉開発メーカーや国立研究開発法人の研究者も教育実習を受けるようになれば、人材育成に大きく貢献する可能性がある。それでは、これらの研究者に対する実習教育は有効だろうか？本発表では、JAEA における加速器駆動システム（ADS）の開発経験を通じて、この点について考えてみたい。

2. 臨界集合体を用いた ADS 開発

ADS 実現にむけた技術開発項目は多岐にわたるが、そのうち、計測系を含む炉心設計においては炉物理分野の開発が重要となる（下図）。ADS ではマイナーアクチノイド（MA）を主燃料として核分裂による核変換を行い、それに伴って発生する核分裂発熱を鉛ビスマス共晶合金（LBE）で冷却する。MA と LBE はこれまで国内の原子炉では多量には用いてこなかったため、核データの検証が十分ではない。そのため、臨界集合体（CA）を用いて、MA の核分裂反応率や、LBE とアルミ/空気の置換反応度の測定を実施してきた。

また、ADS は炉中心に強力な核破砕中性子源を持ち、未臨界状態で運転される点でも、これまでの原子炉と異なる。炉心出力は未臨界度に比例することから、未臨界度を精度よく、高い信頼性を持って予測・監視することは不可欠な技術である。そのため、CA を用いパルス中性子法（PNS 法）を代表とする未臨界度監視技術の開発を行ってきた。

上記の技術開発は主に KUCA と米国 LANL の臨界集合体で行われた。実施したのは5名程度の若手・中堅研究者で、入所後数年のうちに、1～2週間/年の炉物理実験を複数年実施している。これらの研究は、ADS を模擬できる CA 実験条件を検討して実施されたが、想定していなかった結果のばらつきや不整合から成果が生まれており、CA での開発の有効性を示すものとなっている。CA での開発を通じて、各研究員が研究の幅を広げたと考えられる。

3. おわりに

ADS の研究開発では、MA を用いることと、未臨界であることなどの開発要素がある。現実の ADS は存在しないため、設計を模擬できる実験に落とし込み、観測し、改善する必要がある。その訓練を行う場として、CA 実験は最適であるため、原子炉実習教育は、ADS などの新型炉開発を行う研究者にも有効であろう。

*Kenji Nishihara¹¹JAEA

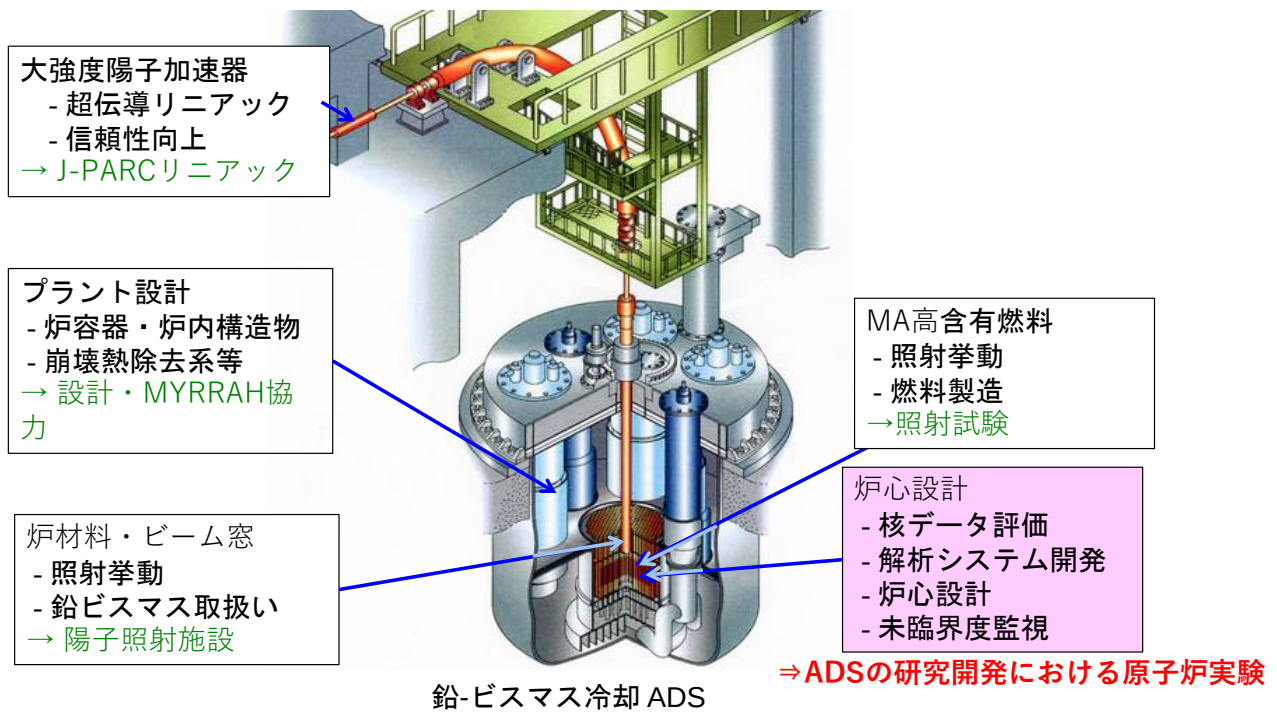


図 ADS 技術開発の全体像

Planning Lecture | Technical division and Network | Advanced Reactor Division

[1C_PL] Trends in other countries/organizations regarding safety standards for advanced reactors

Chair: Takaya Ito (MFBR)

Wed. Mar 17, 2021 1:00 PM - 2:30 PM Room C (Zoom room 3)

[1C_PL01] Status of efforts at Generation-IV International Forum

*Shigenobu Kubo¹ (1. JAEA)

[1C_PL02] Status of efforts at International Atomic Energy Agency

*Hirofumi Ohashi¹ (1. JAEA)

[1C_PL03] Status of efforts in USA

*Hidemasa Yamano¹ (1. JAEA)

[1C_PL04] Issues to be addressed in Japan

*Akira Yamaguchi¹ (1. UTokyo)

[1C_PL05] Discussion

新型炉部会セッション

新型炉の安全基準に関する諸外国の動向

Trends in other countries/organizations regarding safety standards for advanced reactors

(1) GIF における取り組み状況

(1) Status of efforts at Generation-IV International Forum

*久保 重信¹¹日本原子力研究開発機構

第4世代原子炉国際フォーラム（GIF）では、安全性・信頼性・経済性等に優れた次世代原子炉システムとして有望な6つの炉型（ナトリウム冷却高速炉、鉛冷却高速炉、ガス冷却高速炉、熔融塩炉、超高温ガス炉、超臨界圧水炉）の研究開発を進めている。これら新型炉の実現に向けては、国際的に標準となる安全基準の策定が必須であり、GIFにおいてその取り組みが進められている。ナトリウム冷却高速炉（SFR）を対象とした安全設計クライテリア（SDC）及び安全設計ガイドライン（SDG）が整備され、これを他の炉型へと展開するとともに、国際原子力機関（IAEA）や経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）とも連携し、GIFが開発対象としている炉型とも技術的共通点が多い水冷却以外の小型モジュール炉（SMR）の国際的な安全基準策定にも貢献している。

1. ナトリウム冷却高速炉の安全基準策定に係る取組

GIFでは、開発対象とする6炉型のうち、技術的成熟度が高いSFRを対象として、安全設計クライテリアの策定に着手した。原子炉施設の国際的な安全基準としては、IAEAにおいて現在国際的に主流となっている水冷却炉を主な対象として体系的な整備がなされているが、SFRを含む水冷却以外の新型炉に対する国際的な安全基準は見当たらない状況にあった。SFRは高速炉であることの炉心特性に加えて、液体金属ナトリウムを冷却材に用いた高温低圧の原子炉冷却材系となることから水冷却炉とは異なる安全設計上の特性を有しており、このことに対応した安全基準を策定する必要がある。SFR開発国である日・米・仏・炉・中・韓・EUに加えて、IAEAからの参加を得てSDCタスクフォースを組織し、2011年7月から活動を行い、これまでにSDC報告書に加えて、SDCの要求をより具体化・詳細化したガイドラインとして安全アプローチ及び設計条件に関するSDGをGIFでの承認を得て発行している。さらに、炉心系、冷却材系、格納系における具体的な設計上の推奨事項及び設計事例をまとめた系統別SDGを策定し、IAEA及びOECD/NEAの新型炉安全ワーキンググループ（WGSAR）のレビューを受けている。これらの安全基準類の策定に当たっては、当学会において特別専門委員会ならびに研究専門委員化を組織して、国内の知見を結集してひな形を作成しGIFのSDCタスクフォースに提示して主導的な役割を果たしている。また、GIFとIAEA合同のSFRの安全に関するワークショップをこれまでに8回開催してきており、GIFメンバー国以外の主要なSFR開発国であるインドを含め幅広く国際的な浸透を図っている。

2. 他炉型やSMRへの展開

GIFでは、炉型横断的に安全に関する検討を行うリスク安全ワーキンググループ（RSWG）が組織されており、炉型に依存しない第4世代炉の安全設計原則や各炉型の安全設計に関する共通した視点からの検討が行われている。ここでは、先行して策定されたSFRのSDC/SDGを他の炉型に展開する活動が行われている。液体金属を冷却材に使用する鉛冷却炉は、SFRとの共通点が多くSFRのSDCを参考としてSDCの検討が進められている。超高温ガス炉については、先行するIAEAでの高温ガス炉の安全基準検討の成果を参照した取り組みが進められている。IAEAでは、国際的な開発機運が高まっているSMRの安全基準策定に乗り出しており、新型炉の開発知見を有するGIF並びにその参加国の協力が求められている。SMRは、水冷却炉とそれ以外の炉型を含めた型にはまらない分野であるが故、個別の技術に依存しない安全基準が志向される一方、

従来の水冷却炉と異なる特性を十分把握する必要もある。GIF において SFR の SDC/SDG を策定するにあたっては、IAEA の安全基準類を参照しており、水冷却炉と異なる安全特性の分析をすでに行っている。その経験を踏まえ、IAEA における SMR の安全基準策定に係る活動に貢献している。

*Shigenobu Kubo¹

¹Japan Atomic Energy Agency

新型炉部会セッション

新型炉の安全基準に関する諸外国の動向

Trends in other countries/organizations regarding safety standards for advanced reactors

(2) IAEA における取り組み状況

(2) Status of efforts at International Atomic Energy Agency

*大橋 弘史¹¹日本原子力研究開発機構

1. はじめに

国際原子力機関（IAEA）では、加盟国における小型モジュール炉（SMR）導入の機運の高まりを背景として、この数年間で SMR 安全基準に関わる活動が活発化してきている。本講演では、諸外国（英国、米国、カナダ、ポーランドなど）において SMR としての早期導入が検討されて高温ガス炉への我が国の取り組みを例として、IAEA における SMR 安全基準に関する取り組み状況について報告する。

2. 国内における取り組み

高温ガス炉は、耐熱性に優れた燃料（セラミック製被覆粒子燃料）や減速材（黒鉛）、不活性な冷却材（ヘリウムガス）の特徴から、優れた固有の安全性や炉心溶融しないなど、他の原子炉とは異なる安全特性を有しており、実用化にあたっては高温ガス炉の特徴を考慮した安全基準の策定が望まれる。原子力機構では、実用高温ガス炉の安全基準の構築に資するため、海外の規制機関や規制支援機関等が参加する OECD/NEA の国際共同プロジェクトとして、高温工学試験研究炉（HTTR）を用いて炉心冷却流量喪失時の高温ガス炉の安全性を実証するとともに、データや知見の蓄積を進めている。また、日本原子力学会では、IAEA での国際標準化を目標として、「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会を設立（2013 年 4 月～2015 年 3 月）し、HTTR の建設、運転・試験などを通じて蓄積した知見を取り込んだ実用高温ガス炉の安全要件を作成した。

3. IAEA における取り組み

IAEA では、原子力エネルギー局（NE 局）において、「モジュラー型高温ガス炉の安全設計」研究協力計画（CRP）が設立（2014 年 12 月～2018 年 12 月）され、日・中・独・米など 8 カ国の高温ガス炉専門家が集い高温ガス炉の安全要件を検討した。原子力機構は日本原子力学会で作成した安全要件を提案し議論を主導して、CRP の成果物としてまとめた。また、原子力安全・セキュリティ局（NSS 局）では、SMR の安全基準に関する技術報告書（TECDOC 又は Safety Report）の作成を進めている。まず、早期導入が期待される軽水炉と高温ガス炉の SMR を対象とし、規制機関やベンダー等の専門家が招集され、安全要件（SSR-2/1（Rev.1））の SMR への適用性評価が実施された（2017 年 2 月～2019 年 2 月）。原子力機構は CRP と同様に日本原子力学会で作成した安全要件を提案し、これをまとめた TECDOC が 2020 年 12 月に刊行された。現在、NSS 局では、安全評価指針及び安全設計指針の SMR への適用性評価について検討を開始したところであり、軽水炉と高温ガス炉に加えて液体金属炉や溶融塩炉の SMR も対象炉型に含める方向で議論が進められている。

4. おわりに

IAEA では、大型軽水炉を想定した既存の安全基準の SMR への適用性評価を中心として、SMR 安全基準に関する検討を進めている。原子力機構は、我が国の技術の国際標準化を目指し、今後も IAEA における当該活動に積極的に参加して、我が国の技術知見の反映を図っていく。

*Hirofumi Ohashi¹¹Japan Atomic Energy Agency

新型炉部会セッション

新型炉の安全基準に関する諸外国の動向

Trends in other countries/organizations regarding safety standards for advanced reactors

(3) 米国における取り組み状況

(3) Status of efforts in USA

*山野 秀将¹¹日本原子力研究開発機構

1. はじめに

米国では、民間投資が盛んになり、従来炉と異なる小型モジュール炉（SMR）や非軽水型の新型炉の開発が活発になってきている。米国原子力規制委員会（NRC）は、新型炉許認可に向け、炉型横断的なリスク情報を活用した性能を基準とする枠組みを定めた新たな規則の草案について、2020 年 11 月に意見公募を開始した。本講演では、米国を中心として、新型炉の安全規制の取り組み状況について報告する。

2. 米国における取り組み状況

エネルギー省は 2020 年 5 月には「先進型原子炉実証プロジェクト（ARDP）」を開始し、5～7 年以内に実証可能な先進型原子炉、将来の実証リスク低減を目的とした技術・運転・規制課題解決、2030 年代半ばに実用化が期待される革新的先進型原子炉概念の 3 つのカテゴリーに選ばれた先進型原子炉開発プロジェクトに対して資金援助が実施するため公募がなされ、2020 年 7 月には「原子力エネルギーリーダーシップ法案（NELA）」を盛り込んだ予算案が上院で可決された。2020 年 10 月には先進型実証炉カテゴリーとしてナトリウム冷却高速炉（TerraPower）と高温ガス冷却炉（X-Energy）が選定され、2020 年 12 月には他の 2 つのカテゴリーについても原子炉概念が選定された。米国は、多くのプロジェクトを立ち上げ、商業原子力技術における国際的リーダーシップの再構築を狙っている。

NRC が 2008 年に発行した「新型炉の規制に関する政策声明」には、「新型炉は、増強された安全裕度を提供するとともに、それらの安全性及びセキュリティの機能を果たすため、単純な、固有の、受動的な、もしくは他の革新的な手法を活用することを期待する」と述べられ、従来とは異なる新たな考え方を示した。2016 年 12 月には、非軽水炉技術の申請を効果的、効率的に審査するため、NRC はビジョンと戦略を策定し、その実現のため、2017 年 7 月には、近未来、中期及び長期の実行活動計画を策定した。2019 年 1 月に「原子力技術革新・規制最新化法案（NEIMA）」が成立し、新型炉の審査プロセスを 2 年以内に策定することを NRC に指示するとともに、熔融塩炉や液体金属冷却炉、高温ガス炉といった新型原子炉設計の開発者が利用可能になるよう、炉型横断的な許認可の枠組を 2027 年までに完成することを求めた。

NRC は産業界主導の許認可近代化計画に参加し、米国産業界は、NEI-18-04, Revision 1「非軽水炉の許認可の基盤を開発するためのリスク情報を活用した性能を基準とするガイダンス」を 2019 年 4 月に発行した。NRC は、それを基に、2020 年 6 月に、規制指針 RG1.233「非軽水炉の許可、認可、承認のための申請に係る許認可基盤と内容を情報提供するための、炉型横断的なリスク情報を活用した性能を基準とする方法論についてのガイダンス」を公表した。同内容を含む新たな規則（10 CFR Part53）の草案について 2020 年 11 月には意見公募が開始され、2021 年 11 月まで募集される。米国では、ステークホルダーの交流を大切にしながら、新型炉の安全規制活動が積極的に行われている。

3. おわりに

米国では、最新知見や新たな手法を取り込み、産業界と規制当局が交流を図りながら、安全規制の枠組みを構築しており、我が国において新型炉の安全基準を検討する上で参考になる。

*Hidemasa Yamano¹¹Japan Atomic Energy Agency

新型炉部会セッション

新型炉の安全基準に関する諸外国の動向

Trends in other countries/organizations regarding safety standards for advanced reactors

(4) 我が国で取り組むべき課題

(4) Issues to be addressed in Japan

*山口 彰¹¹東京大学

1. はじめに

2020年10月、日本政府は「温室効果ガスの排出量を2050年までに実質ゼロにする」方針を発表し、「省エネルギーを徹底し、再生可能エネルギーを最大限導入するとともに、安全最優先の原子力政策を進めることで、安定的なエネルギー供給を確立」と表明した。世界的には、特に原子力導入国を中心に、脱炭素に向けたエネルギー供給の一つとして小型モジュール炉（SMR）が注目されており、米国、カナダ、英国、ロシア、中国等を中心に開発が盛んになってきている。非軽水型を含む SMR は従来炉と異なる特徴を有しており、安全規制のあり方や安全基準について国際的に様々な議論がなされている。そのような背景を受けて、本講演では、今後、新型炉開発に携わるステークホルダー間の議論を活発化させるため、我が国で取り組むべき課題を検討する。

2. 我が国で取り組むべき課題

2013年に原子力発電所の規制基準が策定され、既設軽水型発電炉や試験研究炉に対して適合性審査が行われている。研究開発段階の規制基準については、ナトリウム冷却高速原型炉「もんじゅ」の審査時に見直すこととなっていたが、申請されなかったため、規制基準の見直しはされていないままである。

第4代国際フォーラム（GIF）において、軽水型発電炉の安全要件（SSR-2/1）を参考にして、ナトリウム冷却高速炉の国際標準の安全基準（安全設計クライテリア：SDC）が2013年に発行され、現在、同ガイドラインを含めて、IAEAや規制当局を含むOECD/NEAの新型炉安全ワーキンググループでレビューがなされているが、我が国の規制当局も参加すべきである。GIFでは、他炉型についても順次SDCを構築しており、新型炉安全基準の国際標準化を図っている。高温ガス炉の安全基準については、2014年からIAEAエネルギー局において検討され、成果物としてまとめられた。現在は、IAEA安全局において、軽水炉、ガス炉、液体金属炉、熔融塩炉の先進的なSMRの安全基準として検討が進められている。国際的な安全基準を検討するとき、様々な意見が交わされ、文章の背景を理解することができる。今後検討される国内基準の参考になるため、安全基準検討の段階から規制当局の参加が期待される。

米国を中心に、新型炉の安全規制に関する取り組みが活発になっている。炉型横断的なリスク情報を活用した性能を基準とする方法論についても議論がなされており、特に、緊急時計画区域（EPZ）の適正化、安全系の電源の取り扱い、機構論的ソースターム評価といった確率論的リスク評価（PRA）の役割が拡大している。我が国でも新検査制度においてリスク情報を活用して、規制活動を向上しようとしている。新型炉の安全基準についても、海外の動向を踏まえて、原子力イノベーションを取り込んだ様々な設計を共通の尺度で公平に評価する国内基準の検討に着手すべきである。

3. おわりに

新型炉の安全基準策定のため、産業界と規制当局を含むステークホルダーが一体感をもってコミュニケーションをとりつつ、国内基準の検討に着手していくことが肝要である。

*Akira Yamaguchi¹¹University of Tokyo

(Wed. Mar 17, 2021 1:00 PM - 2:30 PM Room C)

[1C_PL05] Discussion

世界的には、SMR等の革新炉導入に向けた活発な動きがみられ、GIFやIAEAでもSMRに対する安全基準の検討が進められている。特に、米国では、非軽水炉に対してリスク情報を活用した安全規制が提案され、新型炉特有の許認可プロセスがみられる。本セッションでは、GIF、IAEA、米国における安全基準の検討状況について報告し、新型炉に対する国際的な安全基準の検討状況を学会員と共有する。また、我が国において将来の新型炉の安全規制について今後どのように取り組むべきかについて検討を開始する。

Planning Lecture | Board and Committee | Review Committee on Decommissioning of the Fukushima Daiichi NPS

[1D_PL] Decade of Fukushima Daiichi NPS decommissioning. What are the challenges of the future?

Chair: Naoto Sekimura (UTokyo)

Wed. Mar 17, 2021 1:00 PM - 2:30 PM Room D (Zoom room 4)

[1D_PL01] The Activity of Atomic Energy Society of Japan for 1F Decommissioning

*Hiroshi Miyano¹ (1. Chairman of Review Committee on Decommissioning of the Fukushima Daiichi NPS)

[1D_PL02] Fukushima Daiichi Decontamination and Decommissioning -Current Status and Challenges-

*Akira Ono¹ (1. TEPCO HD)

[1D_PL03] The Progress of R &D for decommissioning technologies

*Koichi Noda¹ (1. JAEA)

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション

廃炉作業 10 年 福島第一の廃炉の今 課題はなにか

Decade of Fukushima Daiichi NPS decommissioning. What are the challenges of the future?

(1) 原子力学会の 1F 廃炉に向けた活動

(1) The Activity of Atomic Energy Society of Japan for 1F Decommissioning

*宮野 廣¹¹廃炉委員長

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（以下「福島第一」という）の廃炉は、2011 年 3 月 11 日の大震災発生と引き続く発電所の事故の発生から 10 年を経過した。日本原子力学会の福島第一原子力発電所廃炉検討委員会は、学会事故調の後を受け 2014 年に発足してから、7 年足らずである。福島第一の廃炉は、国の一大プロジェクトでもあり、これまで原子力発電を推進してきた国の組織、また原子力発電事業を任せてきた東京電力をはじめとする電気事業者が責任を持って実施して行かなければならない事業でもある。しかし、事故の発生はわが国の原子力にかかわる組織全体の大きな責任でもあると考える。日本原子力学会をはじめとする原子力の安全を担ってきた学術団体の担う役割は大きい。

廃炉委では、福島第一の廃炉の活動に対して、学術の視点を中心に検討を加えてきた。これまでの活動の中から、見えてきた課題がいくつかある。以下に、これらの課題を取り上げ、学会としての取り組みについてまとめる。

2. 廃炉委の活動

2-1. 分科会の活動

廃炉委の活動は、主に分科会にて実施している。個別検討課題に取り組む分科会の活動を以下にまとめる。

- ①リスク評価分科会・・・廃炉過程でのリスク要因の分析や評価法の確立のための手法を検討した。
- ②廃炉リスク評価分科会・・・廃炉の過程でのリスクの分析方法や工法への反映を検討した。
- ③建屋の構造的健全性検討分科会・・・事故に遭った建屋の健全性を確認した。経年による劣化を考慮した健全性を検討する。
- ④ロボット分科会・・・高放射線場であり、かつ手探りの狭隘部での構造物の分解取出しおよび燃料デブリ取り出しの工法に適用するロボット技術を検討する。
- ⑤事故提言・課題フォロー分科会・・・燃料の破損過程などの未解決の技術課題の研究に結び付けるための解明事項をまとめた。今後の取り出し時の調査に役立てる。
- ⑥廃棄物検討分科会・・・福島第一サイトの「目指すサイトの姿」をいくつか想定し、そのための廃炉の過程で排出される多量の放射性廃棄物の量と処分法の検討を行う。
- ⑦強度基準検討分科会・・・事故炉の構造物の構造強度の基準の在り方を検討する。

2-2. ワークショップの活動

廃炉委では、深い議論を行い実効的な成果をあげるべく、非公開での自由な議論を進めている。2018 年以來以下のテーマで「ワークショップ」を開催し、深い議論を行い課題への対応の提案に反映した。

第 1 回 1F 廃炉－廃炉の論点と対応

第 2 回 廃止措置（1F は“廃炉”という）と管理目標

第 3 回 廃炉での“廃棄物の取り扱い”について

第 4 回 事故炉の廃炉における放射性廃棄物・放射線の閉じ込めのためのバウンダリの考え方について

第 5 回 廃炉での“廃棄物の取り扱い”について（その 2）

第 6 回 外部ハザードにどこまで対応すべきか

第 7 回 ロボットの信頼性をどのように考えるか

第8回 IAEA の活動と汚染処理水対応

第9回 燃料デブリに関連する保障措置

第10回 クリアランスレベルの考え方

2-3. 国際会議の開催

福島第一原子力発電所の廃炉に係る国際研究者会議 FDR2019 を 2019 年 5 月 24-26 日@ J ビレッジで開催した。40 年にも及ぶとされる福島第一の廃炉について、国内外の技術者や研究者が最新の研究成果などを報告する国際会議である。JAEA の協力と各学会、JSME のロボ・メカ部門、JSME の動エネ部門、と AESJ からの多くのボランティアの支援で運営された。この会議は、日本機械学会（JSME）と日本原子力学会（AESJ）が共同で開催した初めての福島第一の廃炉に関する国際会議であり、欧米の各国から技術者や研究者など多くが参加した。これから廃炉の本格的な作業に取り組む段階に入る計画であり、難しい技術開発も最終段階に入るとともに、新たな研究にも着手される。本国際会議は先進的な一歩となるであろう。新型コロナウイルス感染症の影響により、次回は、2022 年を予定している。

2-4. 残された課題

福島第一の廃炉は、通常炉の廃炉、廃止措置とは大きく異なる。技術的課題は様々にある。放射線の強い環境で残存する燃料や燃料デブリを取り出すことは容易ではない。極めて長期に渡る事業となることが予想される。まず、①長期に渡る事業の目標と責任を明確にした取り組みが必要である。その上で、②エンドステートをどのようにするのか、③それに向かうロードマップとその管理の仕組みを作り、④大量の放射性物質の取り扱いをどのような指標、リスク管理で行うのか、といった明らかにしなければならない課題が残されている。これらを地域社会のかかわり、国内の扱い、国際社会との連携を考えて、どのように取り組むのか、容易に解決しない難しい課題もある。

学会は、これらの課題解決に向けて、これからも積極的に取り組んで行かなければならない。

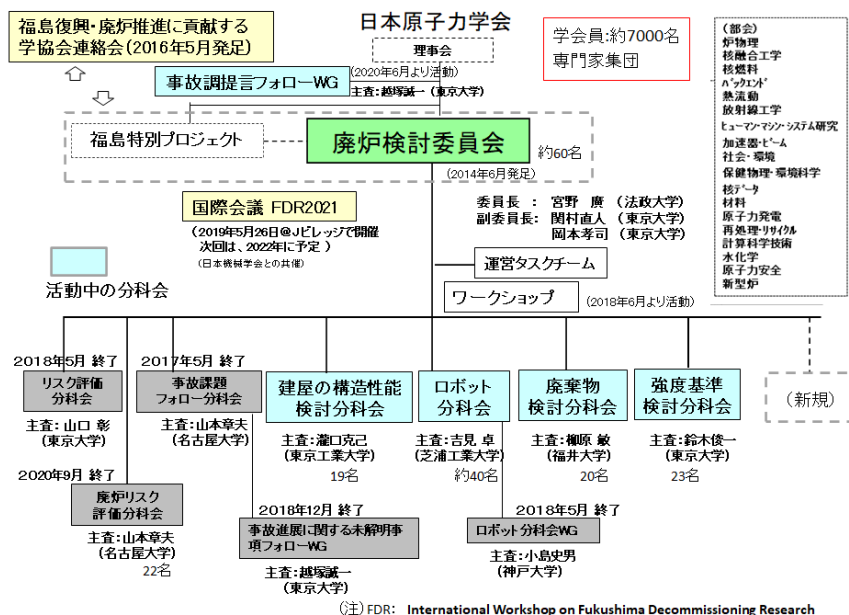
3. おわりに

廃炉委は、毎年、春に公開のシンポジウムを開催し、廃炉の状況や課題、その解決策の提案などを社会に解説し、廃炉作業への理解の一助となることを目指している。

公開の報告書、シンポジウムでの使用資料など、全ては以下の URL で公開しており、参照願いたい。

また、本企画セッション講演資料は、セッション開催前に以下 URL に掲載予定である。

原子力学会廃炉委員会 HP https://www.aesj.net/aesj_fukushima/fukushima-decommissioning



福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション

廃炉作業 10 年 福島第一の廃炉の今 課題はなにか

Decade of Fukushima Daiichi NPS decommissioning. What are the challenges of the future?

(2) 福島第一における廃炉・汚染水対策の現状と課題

(2) Fukushima Daiichi Decontamination and Decommissioning: Current Status and Challenges

*小野 明¹¹東京電力ホールディングス 福島第一廃炉推進カンパニー

1. はじめに

本講演では、事故後 10 年が経過した福島第一原子力発電所における廃炉・汚染水対策の現状と今後の課題について説明する。

まず廃炉をどのような全体計画の下、進めているか述べてい。東京電力ホールディングスは、国により 2011 年 12 月に取り纏められた「東京電力（株）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」（以下「中長期ロードマップ」）に基づき廃炉作業を進めている。このロードマップにおける第 1 期とは、使用済燃料の取り出しを開始するまでの期間、第 2 期とは、溶け落ちた燃料デブリの取り出しを開始するまでの期間と定義されている。最後の第 3 期は、廃炉が完了するまでの長い期間になるが、2019 年 12 月に改訂された中長期ロードマップで、第 3 期の最初の 10 年間を新たに 3-1 期と位置づけた。この期間は、より本格的な廃炉作業、つまりデブリ取り出し作業を着実に実施するために、燃料の取り出し、汚染水対策など複数の工程を計画的に進める時期と定義している。そして、それぞれの分野における主なマイルストーンも定めている。

これを踏まえ、当社は 2020 年の 3 月にこれらのマイルストーン及び原子力規制委員会のリスクマップに掲げられた目標を達成するための主要なプロセスを作って公表した。「廃炉中長期実行プラン 2020」と呼ばれるものである。今後は毎年、改訂を実施し、例えば次回は 2021 年 3 月に「廃炉中長期実行プラン 2021」を公表する予定である。

「廃炉中長期実行プラン」により当社は今後の廃炉作業を、将来を見据えながらより計画的に進めることが可能となる。一方、地域の方々からみると、今後の廃炉作業を具体的に把握し、廃炉事業に参入する際の検討を行うことができる。福島第一の廃炉を通じて福島復興にいかに関与できるかが鍵であり、「復興と廃炉の両立」の大原則の下、東京電力ホールディングスは、引き続き廃炉・汚染水対策に責任を持って取り組んでいく。

2. 汚染水対策

汚染水は、原子炉内に注入された冷却水が燃料デブリに触れることで発生する。そして、この汚染水と建屋内に流入する地下水と雨水が混ざり合うことで、新たな汚染水が発生し続けている。これに対処するため、東京電力は、①汚染源を取り除く、②汚染源に水を近づけない、③汚染水を漏らさない、の 3 つの基本方針に基づき対応を進めてきた。

これらの対策は既に成果を上げつつあり、現在は、

- ・②の主要対策である地下水や雨水の原子炉建屋等への流入抑制を更に徹底すること
- ・汚染水を①により多核種除去設備等で処理した後の処理水の処分
- ・原子炉建屋やタービン建屋等に残っている汚染水の除去を更なるリスク低減の観点から進めていくこと（建屋滞留水の処理）

の 3 点が主な課題となっている。

2-1. 地下水・雨水の流入抑制

フェーシング、サブドレーン、陸側遮水壁(凍土壁)など、地下水の流入を抑制するための従来からの対策に

加えて、最近では雨水が建屋内に流入することを防ぐための対策も強化している。例えば、3号機タービン建屋は水素爆発により大きな損傷部があり、雨が降ると3号機タービン建屋全域に降った雨が、この損傷部を通じて建屋内部に入り込み汚染水を増やしていた。この箇所には雨水カバーを設置する工事を2020年8月に完了している。

これらの重層的な対策により、1日当たり汚染水発生量は対策前の約540m³/日（2014年5月）に対し、対策後は140m³/日程度（2020年1～12月）まで低減し、中長期ロードマップに掲げている目標を達成した。

2-2. 多核種除去設備等処理水への対応

前述の通り1日当たり汚染水発生量は大きく低減した。しかし、依然として雨水、地下水が流入し汚染水が発生し続けていることも事実である。そのため汚染水を多核種除去設備等で処理した後の水を保管するタンクは増え続け、その貯蔵量は1月21日現在で約124万m³に達している。

処理水の今後の取り扱いについては、国の小委員会が2016年以降17回にわたって議論を行い、2020年の2月に報告書をまとめた。同報告書では、「技術的には、実績のある水蒸気放出及び海洋放出が現実的な選択肢であり、より確実なのは海洋放出」との提言が行われた。

東京電力としては、小委員会報告書及び2020年4月から開催された「関係者の御意見を伺う場」でのご意見も踏まえて、今後、国から基本的な方針が示されると認識しており、それを踏まえ、丁寧なプロセスを踏みながら適切に対応する。

なお、二次処理時の多核種除去設備の性能を確認するため、2020年9月と10月にトリチウムを除く告示濃度比総和が100以上のタンク群の中から、高い濃度のタンク群（J1-C群）、低い濃度のタンク群（J1-G群）を選択し、それぞれ1000m³ずつ確認試験を実施した。62核種にC-14を合わせた告示濃度比総和が、前者は2,406→0.35、後者は387→0.22といずれも二次処理後に1未満となることを確認した。

2-3. 建屋内滞留水の処理

放射性物質の濃度が高い汚染水は原子炉建屋、タービン建屋、廃棄物処理建屋等に滞留しているが、津波発生時等の漏えいリスクを念頭にその除去を進めてきた。2017年3月には他の建屋に先駆けて、1号機のタービン建屋の滞留水を除去することに成功した。その後も作業を継続し、1～4号機のタービン建屋、廃棄物処理建屋、4号機原子炉建屋について建屋内滞留水の水位を低下させ、中長期ロードマップに掲げられた滞留水処理の目標を達成したことを2020年12月に確認した。

当初、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋についても、2020年中の滞留水処理完了を目指していたが、最近行われた建屋内調査で高線量源が見つかったため対応方針を変更した。これらの建屋は事故後、高濃度汚染水をセシウム吸着装置（キュリオン、サリー）で処理する前の貯水槽として用いられているが、調査の結果、放射性物質を吸着するためのゼオライト土嚢が地下階に設置されており、この土嚢が高い放射能を有していることが判明した。このまま建屋から水を除去すると、滞留水による遮蔽がなくなり、屋内が高線量化する等のリスクがあるため、現在、それへの対応策を検討している。

3. 使用済燃料プールからの燃料取り出し

福島第一の廃炉においても、一般の原子力発電所同様、まず初めに燃料の取り出しを行うことになるが、通常炉と異なって、水素爆発とメルトダウンの影響が取り出しに向けての準備の大きな妨げになっている。使用済燃料プールからの燃料の取り出しは、オペレーティングフロア（以下、「オペフロ」）における①瓦礫撤去（水素爆発のなかった2号機を除く）、②除染・遮へい、③燃料取扱設備の設置、④燃料取り出し、⑤構内の共用プール等での保管の順に実施している。

2014年12月に取り出しが完了した4号機を別として、燃料の熔融を起こした1～3号機のオペフロはいずれも線量が高く、作業員の被ばくには特に留意する必要があることから、これらの作業はほとんどを遠隔操作で実施する。

3-1. 1号機の取り出し準備状況

オペフロ北側の瓦礫撤去に2018年1月着手し、既に完了している。一方、使用済燃料プールのある南側では、燃料交換機、天井クレーン、更に崩落屋根の鉄骨やスラブというように、瓦礫が山のようにうず高く積

み重なって使用済燃料プールを覆っている。これらの撤去に際して、鉄骨やスラブ等が使用済燃料プールへ落下したりダストが舞い上がったりするリスクを可能な限り低減するため、瓦礫落下防止・緩和対策として使用済燃料プールのゲートへのカバー設置、使用済燃料プール上への養生設置、燃料交換機・天井クレーンを下部から支える支保材の設置等を最近実施した。今後、大型カバーを設置し、その中でオペフロ上の瓦礫の撤去を行い、2027～2028年度頃を目標に取り出しを開始する。

3-2. 2号機の取り出し準備状況

2号機では2020年6月には、水中ROVで使用済燃料プール内の燃料等の状態を確認し、燃料取り出しに支障となる新たな課題がないことを確認した。現在、原子炉建屋南側に構台を設置する作業を進めており、今後、建屋南側側面に開口部を設けて、この構台からオペフロにアクセスし、2024～2026年度頃に取り出しを開始する。

3-3. 3号機の取り出し状況

3号機については、2019年4月に燃料取り出しを開始した。途中、ケーブル等のトラブルにより取り出し作業がストップした時期があったものの、2021年1月30日現在、566体中524体の燃料集合体を取り出し済みである。小瓦礫撤去などの関連作業を間欠的に実施している他、ハンドル変形燃料についても新規掴み具の開発、適用により対応し、2021年3月末に計画通り取り出しを完了する予定である。

3-4. 関連作業（1・2号機共用排気筒の解体）

1、2号機共用排気筒は、震災後の点検で一部の部材の損傷を確認した。評価上、大規模な地震が起こっても倒壊しないことを確認しているが、耐震上の裕度を向上させるため、1、2号機の燃料取り出し開始に先立ち、120mの高さの排気筒を半分程度の高さまで解体することとした。

2019年8月から地元企業による解体工事を開始し2020年5月に一連の作業を終了した。

なお、解体作業は遠隔操作で実施したが、この技術を開発し解体を行ったのは、福島県の浜通りを拠点とする地元の企業である。

4. 燃料デブリ取り出しに向けて

福島第一1～3号機における燃料デブリの取出しは、これまでに経験したことのない取り組みとなる。取り出し作業は、①原子炉格納容器内部調査、②燃料デブリ取り出し、③保管というステップで進めていくが、極めて高線量の環境下での作業となるため、ほとんどの作業を遠隔で実施することになる。

4-1. 格納容器内部調査と燃料デブリ分布状況の推定

取出し方法を決定し具体的な取出し機器の開発を進めるためには、まずその位置や性状を把握する必要がある。これまでに格納容器内部の状況をロボット等の遠隔調査機器、ミュオン透過法などにより調査している。燃料デブリの分布の状況は、以上のような調査の結果や事故進展解析結果等から下記のとおり推定している。

1号機：燃料デブリの大部分が格納容器底部に存在

2号機：圧力容器底部に多くが残存し格納容器底部にも一定の量が存在

3号機：1号機と2号機の間

4-2. 取り出し初号機の決定と装置開発

この中で取り出し初号機に決まったのは2号機である。他号機に比べて現場の線量が低いことや内部調査により、より多くの情報が得られていること、燃料取り出し作業との干渉がないこと等が主な理由である。

最初に行う取り出しは試験的な取り出しと位置付けており、その際に用いる装置は、英国で開発されている。モックアップ施設での試験・訓練を経て、実運用に移行する予定である。長さ最大約22mのロボットアームを用いて格納容器内にアクセスする計画であり、伸ばしてもたわまないように高強度のステンレス鋼となっている。また、先端部に金ブラシや真空容器型回収装置をとりつけ、粉状の燃料デブリを回収する予定である。

なお、2021年内の取り出し開始を目指していたが、英国内の新型コロナウイルス感染拡大の影響でこれらの装置の開発が遅れている。工程遅延を1年程度に留められるよう引き続き安全最優先で取り組んでいきたい。

4-3. 1号機内部調査の準備状況

1号機については、次期調査として、潜水機能付ボート型調査装置による格納容器内ペDESTAL（台座）外の堆積物分布等の調査を計画している。この調査装置は、直径25cm、長さ1mの大型のものとなる。調査装置を投入するため、「X-2」ペネと呼ばれる貫通孔をアクセスルートとして、装置を内部へガイドするためのパイプを設置、これを通して格納容器内に投入する計画としている。現在は、アクセスルート構築のために格納容器内の干渉物の切断を実施中しているところであるが、最近、配管等、新規の干渉物を確認したことから、今後、カメラを投入してルートを確認した後、その結果に基づいて具体的な切断作業を再開する予定である。

潜水機能付ボート型調査装置を用いて調査する際には、カメラ撮影、堆積物の3次元形状や厚さの測定、更に少量のサンプリング等、調査目的に応じた5種類の調査装置を用いることとしている。

4-4. 取り出し規模の拡大

2号機における試験的取り出し後は、取り出し方法の検証や確認を行った上で、同じ機構の装置を用い、段階的に取り出し規模を拡大していく。中長期的には1、3号機においても取り出しを開始し、取り出し規模を拡大していく予定である。

1号機、3号機における取り出しに当たっては、1・2号機排気筒残置部や3・4号機排気筒等の撤去を行い、デブリ取り出しに必要な設備の設置を行っていく。加えて、1、3号機は2号機と比較して作業現場の線量が高いことから、遠隔操作で汚染した配管の撤去や除染を行い、線量を低減することを検討している。

また、これらと並行して取り出し・保管設備の設計、製作も順次進めていく。

5. 放射性固体廃棄物の管理

固体廃棄物については、「保管管理計画」において、向こう10年間に発生する物量の予測を行った上で、必要な減容処理施設や保管施設を導入する計画を立案している。ただし、発生する物量の予測は今後の廃炉作業等の進展状況等により変動するため、毎年、見直しを行い、計画を更新している。

2020年7月に発表した計画では瓦礫等は10年間で約78万m³発生することを見込んでいる。これらを線量や形態により分類の上、例えば、伐採木や使用済保護衣は焼却、また金属物は切断や破砕をするなどして最終的に26万m³まで減容し、これらを各貯蔵庫に保管することを計画している。

減容処理設備のうち、既に雑固体廃棄物焼却設備が2016年3月に運開し使用済保護衣類の焼却処理を行っている。また、可燃性瓦礫類（木材、梱包材・紙）等の処分を目的とした増設雑固体廃棄物焼却設備についても2020年度中の竣工を目指し、建設が進んでいる。2020年11月の火入れ式後、系統試験、コールド試験、ホット試験を経て2021年3月に竣工する予定である。加えて、金属、コンクリートを減容するための設備の設置を、2022年度内竣工を目途に進めているところである。

こうした方策により、現在、屋外に仮置きしています廃棄物は2028年度内に固体廃棄物貯蔵庫内への保管に移行していく。

また、汚染水処理により発生した水処理二次廃棄物も固体廃棄物としての管理が必要である。これらについても、今後、屋内保管への移行を進める方針である。吸着塔類等を保管する予定の大型廃棄物保管庫は2021年度運用開始を目指し、2020年6月より本体工事を実施している。

※当原稿は2021年1月時点のものである

なお、本講演資料は、セッション開始前に以下URLに掲載予定である。

原子力学会廃炉委員会 HP https://www.aesj.net/aesj_fukushima/fukushima-decommissioning

*Akira Ono¹

¹ Tokyo Electric Power Company Holdings

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション

廃炉作業 10 年 福島第一の廃炉の今 課題はなにか

Decade of Fukushima Daiichi NPS decommissioning. What are the challenges of the future?

(3) 廃炉技術の研究開発の進捗：成果と課題

(3) The Progress of R&D for Decommissioning Technologies: Achievements and Challenges

*野田 耕一¹¹日本原子力研究開発機構

東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所（以下、1F）の事故から 10 年が経過した。1F の廃炉は世界がまだ経験したことがない困難な取組みであり、当初から廃炉作業とともに各種研究開発、技術開発が必要であるとされ、実際に、国を始め各機関においてそのための取組みも行われてきた。これまでの 1F 廃炉技術の研究開発の取組みと主な成果を踏まえ、研究開発の進捗と廃炉への貢献について概説するとともに、今後取り組むべき課題について紹介する。

1. 研究開発の体制とこれまでの取組み

1-1. 研究開発体制の整備

1F廃炉に関する取組みについては、2011年12月に「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」（以下、「中長期ロードマップ」）が政府の「原子力災害対策本部 政府・東京電力中長期対策会議」において決定され、以降、継続的な見直しが行われつつ、この「中長期ロードマップ」に基づき進められている。現在は、2019年12月に政府の「廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議」で決定された第5回改訂版に基づき廃炉が進められている。1Fの廃止措置の主な作業は、汚染水対策、使用済み燃料プールからの燃料取り出し、燃料デブリの取り出し、原子炉施設の解体、放射性廃棄物の処理・処分であり、それぞれに研究開発が必要な技術課題が多数存在する。「中長期ロードマップ」の決定と同時に、これらの技術課題に必要な研究開発をまとめた「研究開発計画」も決定されており、当初から、廃止措置に合わせて研究開発を進めていくこととされていた。

2013年3月には、遠隔操作機器・装置等の開発実証施設（モックアップ施設）及び放射性物質の分析・研究施設の整備を行うことが政府の「東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議」で決定された。これらの施設は、日本原子力研究開発機構（以下JAEA）を中心として、政府機関、産業界の協力の下、整備することとなった。この決定に基づき、JAEAは櫛葉遠隔技術開発センター（モックアップ試験施設；2016年4月運用開始）（通称「NARREC」）及び、現在建設中の大熊分析・研究センター（放射性物質分析・研究施設；2018年3月施設管理棟運用開始）を整備している。

また、2013年8月には、1Fの廃炉に必要な技術開発を直接的に担うメーカーや研究機関からなる技術研究組合国際廃炉研究開発機構（以下、IRID）が設立された。IRIDには、プラントメーカー（日立GEニュークリア・エナジー、東芝エネルギーシステムズ、三菱重工業、アトックス）、電力会社（東京電力、中部電力、他）、国立研究開発法人（JAEA、産業総合研究所）が参画し、格納容器内部調査用のロボット開発、デブリ取り出しマニピュレータ開発、廃棄物の分析・評価、廃棄体化技術開発等、数多くの1Fの廃炉に直結する技術開発に取り組んできているところである。

こうした体制整備と合わせて、経済産業省は、1F廃炉の現場で使われる技術の研究開発を行うため、廃炉・汚染水対策事業を2013年度から開始した。

1-2. 基礎・基盤研究体制の整備

一方、1Fの廃炉は極めて技術的難易度の高い試みであり、国内外の英知を結集し、産学官一体となって、先端技術開発と人材育成に関する取り組みを推進する必要性も指摘された。これを踏まえ、2014年6月に文部科学省が「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン」（以下、「加速プラン」）を策定した。

本プランを踏まえて、JAEAは2015年4月に廃炉国際共同研究センター（2020年4月に福島環境安全センターと統合して、廃炉環境国際共同研究センターに改組）（以下、CLADS）を組織し、IRID 組合員としての技術開発のみならず、大学や国内外の機関と連携しつつ廃炉に必要な基礎・基盤研究として、「燃料デブリの性状把握」、「炉内状況の解明」、「放射性廃棄物の処理・処分」、「遠隔技術開発」を進めている。

また、本プランに基づき文部科学省では、2015年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」（以下、「英知事業」）を開始した。本事業では、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取り組みが推進されてきた。2018年度の新規採択課題から「英知事業」の実施主体を文部科学省からJAEAに移行させ、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとなった。

1-3. 現在の研究開発体制

1F廃炉は「中長期ロードマップ」でも30～40年と長期にわたるプロジェクトとされており、研究開発についても、「中長期ロードマップ」に基づき戦略的に進めていく必要がある。そのため、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（以下、NDF）が2014年8月に改組・設立され、中長期的な視点から廃炉を適正かつ着実に進めるための技術的な検討を行うこととされた。これを踏まえ、NDFは毎年度「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炉のための技術戦略プラン」を策定し、公表している。この中で研究開発の体制について、研究拠点整備も含め下記のように述べている。現在は、研究開発はこの体制で進められてきている。

- 国内外の大学やJAEA等の研究機関による基礎・基盤研究や応用研究、並びにIRID、海外企業、東京電力等による実用化研究、現場実証が、産学官の多様な主体により実施。
- これらの研究開発を推進するため、政府は、応用研究、実用化研究及び現場実証のうち難度の高いものは「廃炉・汚染水対策事業」により、基礎・基盤研究に係るものは「英知事業」により支援しており、東京電力においても現場適用に直結した研究開発に取り組む。
- NDFにおいて、関係機関をメンバーとして研究開発のニーズとシーズの情報共有、廃炉作業のニーズを踏まえた研究開発の調整、研究開発・人材育成に係る協力促進等の諸課題について検討する「廃炉研究開発連携会議」を設置。
- 研究開発を進めるに当たっては、JAEAの櫛葉遠隔技術開発センター、大熊分析・研究センター、廃炉環境国際共同研究センターも活用し、国際的な視点を含めた廃炉研究開発拠点を整備していくことが重要。

1-4. JAEAにおける研究開発の取組み

JAEAは、前述したように、「加速プラン」に基づき、大学や国内外の機関と連携し、世界の英知を結集して、1Fの廃炉に向けた研究開発と人材育成に関する取り組みを推進している。その研究開発拠点として2017年4月には福島県富岡町に、国際共同研究棟の運用を開始した。CLADSは、NARREC、大熊分析・研究センターや茨城地区にあるJAEAの各施設、さらには国や福島県、東京電力、国際機関、国内外の大学、研究機関、企業との研究連携を進めている。

国内外の英知を結集する場として、定期的に「福島リサーチカンファレンス（FRC）」を開催し、国内外の研究者との交流や情報共有等を行っている。国内外の廃炉研究の強化を図るために海外からの研究者を招聘するとともに、OECD/NEAや海外の研究機関との国際協力等を実施し、廃炉に必要な研究分野について、外部の研究者や専門家を交えたワーキンググループ等の活動を行っている。

また、CLADS 及び「英知事業」における「廃止措置等基盤研究・人材育成プログラム」採択事業者の共同運営による廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体として、「廃炉基盤研究プラットフォーム」を整備し、多様な分野の研究者個人の独自性やアイデアを尊重しつつ、NDFが示した戦略的かつ優先的に取り組むべき6つの重要研究開発課題（ α ダスト等飛散微粒子挙動や燃料デブリ経年変化プロセスの解明等）について検討を深めてきている。さらに、東京電力が直面する廃炉現場における課題や研究ニーズの把握、研究の進め方等の議論を踏まえ、汚染水対策から廃棄物の処理・処分まで含めた廃炉全体を俯瞰し、研究開発のニーズとシーズを整理した「基礎・基盤研究の全体マップ」を公表し、更新を行っている。

現在の「英知事業」の公募に当たっては、NDFが示した6つの重要研究開発課題も含め、「基礎・基盤研究の全体マップ」を研究ニーズとして活用している。

2. 研究開発成果

2-1. 1F 廃炉のための実用化研究（遠隔技術開発の例）

1F 廃炉の現場で使われる技術の実用化研究は、経済産業省で予算化された「廃炉・汚染水対策事業」において実施されている。その実施者は多岐にわたるが、多くの事業が IRID において取り組まれてきた。IRID における研究開発は、①燃料デブリ取り出しに係る研究開発、②放射性廃棄物の処理・処分に係る研究開発が中心であり、①では、格納容器内部調査技術開発、デブリ取り出し装置の開発、事故進展解析、ミュオンを用いたデブリ検知技術開発などが行われた。特に、ロボット等の遠隔技術開発では、格納容器内部の画像やデータが入手されるなど様々な成果が出ている。

PCV 内の状況は各号機毎に異なることから、各号機の状況・調査内容に即した内部調査用ロボットが開発されてきた。

1号機の PCV 内は、水位が高い状態にあることから水中での調査機能が求められる。2017年には、形状変化型ロボット「PMORPH」による調査が行われ、ペDESTAL外底面に堆積物が確認された。今後の調査では、「潜水機能付ボート型アクセス・調査装置」を用いて、堆積物の下に何があるかの解明が期待されている。

2号機の PCV 内は1号機と異なり、気中での調査となる。2017年、2018年に開発された「クローラ型遠隔調査ロボット」や「釣りざお型調査装置」による調査結果により、圧力容器(RPV)ペDESTALの内側の画像情報が取得され、堆積物の接触調査も行われた。今後、「アーム型アクセス装置」による調査が計画されている。

3号機の PCV 内は水位が高いことから、水中遊泳型ロボット「ミニ-マンボウ」が開発された。2017年に実施された調査から、ペDESTAL下部に溶融物が固化したと思われるものやグレーチング等の複数の落下物、堆積物他が確認された。

燃料デブリ取り出しについては、「廃炉・汚染水対策事業」において、各技術シナリオの比較検討が行われ、気中横取り出しに軸足を置くとの NDF の提言、ひいては、「中長期ロードマップ」の改定に反映された。今後は、IRID で開発中の「アーム型アクセス装置」を用いて、2号機の内部調査、最初の試験的取り出しを行い、その後段階的に取出し量を増やしていく予定である。さらに取出し量を拡大するために、大型の装置を組み合わせた「アクセスレール・ロボットアーム組み合わせ工法」、「アクセストンネル工法」及び「搬送台車利用工法」を開発中である。

現在開発中の各ロボットや装置は、開発後にモックアップ試験等を実施し、性能を検証するとともに、捜査員の訓練等も実施する予定である。

2-2. JAEA における基礎・基盤研究開発の例（JAEA-Review-2020-023）

事故炉の廃炉技術の研究開発は、科学技術の最前線に位置している。例えば、炉内状況の把握には、わずかな量のサンプルから高度な分析技術を用いて最大限の情報を引き出すことが必要であり、また、耐放射線性の機器による遠隔での計測技術が不可欠である。このような技術課題への取組みとして、JAEA では1-4で述べた基礎・基盤研究開発を進めてきている。

「炉内状況の解明」では、原子炉圧力容器破損モード解析を行い、号機ごとの燃料デブリのペDESTALへの移行挙動の特徴をとりまとめるとともに、制御棒ブレード破損試験装置（LEISAN）等を用いて、金属系デブリ形成メカニズムと特性に係る試験データを取得し、炉内状況推定図を整備し、提供した。

「燃料デブリの性状把握」では、模擬燃料デブリを用いて、ウラン-ジルコニウム混合酸化物の機械的性質評価や、炭化ホウ素と燃料、被覆管との反応生成物の評価、Pu 含有模擬燃料デブリの融点測定等を実験室規模で試験するとともに、JAEAの原子力科学研究所で保管されていたTMI-2の燃料デブリサンプルについて、改めて性状評価を行い、1Fの燃料デブリの性状推定を進めた。また、燃料デブリ取出し、処理・処分、事故原因の究明等における課題、その課題を解決するための燃料デブリの分析条件について検討し、JAEAの報告書（JAEA-Review-2020-004）として公開した。公開にあたっては、外部有識者を含むタスクチ

ームにおいてレビューを受けた。

「放射性廃棄物の処理・処分」では、2-1のIRID事業②の一環として、瓦礫類や汚染水処理二次廃棄物中の放射性物質の分析を進め、得られたデータをデータベースとして公開した。このデータベースは、国際学会及び国内学会にてレビューを実施し、固体廃棄物の取扱い・管理の安全性の向上及び廃炉作業の効率化の検討に貢献している。

「遠隔技術開発」では、コンプトンカメラを用いて、1Fサイト内に飛散・沈着した放射性物質を3次元的に可視化するための放射線イメージングシステムを開発し、1Fサイト内作業現場の汚染箇所を遠隔で検知し3次元的に可視化した。さらなる1F現場への適用に向けてレーザー光を活用した燃料デブリ等の遠隔その場スクリーニング分析技術を開発した。また、プラスチックシンチレーションファイバー（PSF）を用いた $\beta\gamma$ 線弁別放射線モニターを開発し、すでに1Fサイトで設置、運用されている。

2-3. 「英知事業」での取り組みについて

2015年度から開始された「英知事業」では、具体的には、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」が推進されてきた。主に、大学等のアカデミアを中心に事業が実施されてきている。

「戦略的原子力共同研究プログラム」では、原子力利用の安全性向上、放射線影響などの基礎・基盤研究に係る20課題が採択された。「廃炉加速化研究プログラム」では、燃料デブリ取出しや廃棄物を含めた環境対策に関する研究として22課題が採択された。

また、「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」では7課題が採択され、「遠隔操作技術及び核種分析技術を基盤とする俯瞰的廃止措置人材育成（東京大学）」、「廃止措置のための格納容器・建屋等信頼性維持と廃棄物処理・処分に係る基盤研究および中核人材育成プログラム（東北大学）」などが実施された。

その後、「英知事業」実施体制が見直され、2018年度の新規採択課題からその実施主体が原子力機構に移行された。これにより、原子力機構とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築するとともに、事業全体の管理を行うPD(Project Director)に山名NDF理事長が着任し、ステアリングコミティに廃炉関係者が参加するなど、1F廃炉と「英知事業」との連携がより強化されることとなった。従来のプログラムは、「共通基盤型原子力研究プログラム」、「課題解決型廃炉研究プログラム」、「研究人材育成型廃炉研究プログラム」及び「国際協力型廃炉研究プログラム」の4つに再編され、2018年度からこれまでに計48課題が採択され、現在、いずれも実施中である。

3. 研究開発体制の強化と今後の課題への取り組み

3-1. 研究開発体制の強化

1F事故から2021年3月で10年が経過し、これまでの間、廃炉のための様々な対応等が行われてきたが、「野戦病院」とも称された1F現場の状況はかなり安定してきたといえる。一方、今後は、燃料デブリの取出し、廃棄物の処理・処分など、より難易度の高い課題に取り組んでいく必要がある。また、集中ラド建屋での高線量のゼオライト対応など、新たな課題も出てきている。このため、中長期的な戦略に基づき、関係者がより連携して取り組んでいく必要がある。

東京電力においても、プロジェクト管理体制を構築し、研究開発も含めた事業管理体制の強化を図ったところである。

このことから、「廃炉・汚染水対策事業」は、東京電力によるニーズや現場適用を見据えた研究開発との連携をより強化する必要がある。2020年度からNDFが「廃炉・汚染水対策事業」の事務局に参画することにより、プロジェクトの企画立案及び進捗管理の両方の機能を強化する体制に移行した。併せて、東京電力は、研究実施主体と共同での交付申請を行う等、現場適用者としての研究開発への関与が明確になった。NDFは、東京電力と情報交換や意見交換によるコミュニケーション強化を行いつつ、ともに現場のニーズや適用性を考慮した案件を企画するとともに、研究開発の目的や成果の達成目標時期に合致した開発となるよう、研究開発の進捗状況を管理していくこととしている。

3-2. 今後の研究開発体制

「中長期ロードマップ」では、2019年12月の改訂において、初号機（2号機）から試験的取り出しに着

手し、段階的に取り出し規模を拡大することが示され、燃料デブリ取り出し開始から 2031 年末までの期間を「第3-①期」と定めた。特に、燃料デブリ取り出しは、その準備から取り出し、搬出・処理・保管等の作業を、現場における他の作業等と並行して進めることから、全体最適化を目指した総合的な計画とするとしつつも、取り出しを進めながら徐々に得られる新たな情報・知見や経験を踏まえ、不断の見直しを行うといった工程管理の重要性が示された。また、廃棄物対策については、2017 年 9 月に決定した「基本的考え方」に基づき、固体廃棄物の分析による性状把握等を進めることが示された。

東京電力は、「中長期ロードマップ」や原子力規制委員会のリスクマップに掲げられた目標を達成するため、廃炉全体の主要な作業プロセスを示す「廃炉中長期実行プラン」を作成した。本プランでは、例えば燃料デブリ取り出しでは、初号機の燃料デブリ取り出し開始の実現のための工程、段階的な取り出し規模の拡大（2号機）、燃料デブリの処理・処分方法の決定に向けた取り組み、取り出し規模の更なる拡大（1と3号機）に向けた取り組み方針が示されている。廃棄物対策では、今後の廃炉作業の進捗状況等を踏まえつつ、現在整備を進めている放射性物質分析・研究施設を活用し、固体廃棄物の処理・処分等の検討に必要な性状把握を進めることとしている。

さらに NDF と東京電力は、「中長期ロードマップ」と「廃炉中長期実行プラン」を踏まえ、燃料デブリの取り出し規模の更なる拡大の達成に向け必要な研究開発の抽出とその実施を適切に管理するため、研究開発の今後約 10 年間の研究開発の全体を俯瞰した「研究開発中長期計画」を示した。ここでは、燃料デブリ取り出しにおける各段階で現在想定される研究開発項目及び内容を東京電力の「廃炉中長期実行プラン」と紐づけた形で明らかにした。具体的には、燃料デブリの取り出し規模の更なる拡大に向けた技術課題として、燃料デブリの取り出し方法の開発、臨界管理技術等の安全システムの開発、デブリ飛散率や被ばく評価に係る安全評価技術の開発を挙げている。また、廃棄物対策のための技術課題として、固体廃棄物の性状把握の効率化、処理・処分概念の構築と安全評価手法の開発、保管・管理方法の検討・評価を挙げている。

「研究開発中長期計画」の実行及び更新に関しては、「英知事業」との連携を図っていくこととされ、「廃炉・汚染水対策事業」と「英知事業」との連携の強化も期待される。

一方、JAEA においても、東京電力が直面する廃炉現場における課題や研究ニーズの把握、研究の進め方等の議論を踏まえ、汚染水対策から廃棄物の処理・処分まで含めた廃炉全体を俯瞰し、研究開発のニーズとシーズを整理した「基礎・基盤研究の全体マップ」を公表し、更新を行っている。「英知事業」の実施に当たっては、当該「基礎・基盤研究の全体マップ」をベースとしており、「研究開発中長期計画」とも連携を図り、1F 廃炉の中長期的な技術的ニーズや工程に即した研究開発が適切に実施されることが期待される。

3-3. 今後の課題

今まで俯瞰してきたように、2011 年 12 月の最初の中長期ロードマップの策定の時から、1F 廃炉のための研究開発の体制整備が進められ、様々な関係機関が実施し様々な成果を上げてきている。1F 廃炉に直接適用することを目的とした「廃炉・汚染水対策事業」と、計測や分析といった基礎・基盤的な研究を目的とした「英知事業」の両方が車の両輪となり、国内メーカーだけでなく、大学や海外の研究機関との連携など、国内外の英知を結集して対応してきている。

しかしながら、今後は、デブリの取り出し、その分析、その結果を活用した炉内状況把握、事故進展の解明、瓦礫や水処理 2 次廃棄物などを含む放射性廃棄物の処理・処分など、より難易度の高い技術的課題への取り組みが必要となってくる。また、実施主体についても、海外の研究機関との連携がより必要になるとともに、福島県地元企業の活用も求められており、より多様なプレーヤーが参加することが想定される。このためにも、今後は、国、NDF、東京電力、JAEA がより緊密に連携し、中長期的な計画、目標をもとに、基礎・基盤研究から現場実装まで、適切に資源配分を行いながら技術をつなげていくことが求められる。

なお、本講演資料は、セッション開始前に以下 URL に掲載予定である。

原子力学会廃炉委員会 HP https://www.aesj.net/aesj_fukushima/fukushima-decommissioning

*Koichi Noda¹

¹Japan Atomic Energy Agency

Planning Lecture | Technical division and Network | Operation and Power Division

[1E_PL] Efforts to Risk Informed Plant Operation and Maintenance

Chair: Tadashi Watanabe (Univ. of Fukui)

Wed. Mar 17, 2021 1:00 PM - 2:30 PM Room E (Zoom room 5)

[1E_PL01] Research and Development for Risk Informed Plant Operation

*Tai Furuta¹ (1. CRIEPI)

[1E_PL02] Status of Risk Informed Approach in KEPCO

*Shinji Masumoto¹ (1. KEPCO)

[1E_PL03] Status of Risk Informed Approach in TEPCO

*Ryota Tomiyasu¹ (1. TEPCO HD)

原子力発電部会セッション

プラント運営・保守管理へのリスク情報活用の取り組み
Efforts to Risk Informed Plant Operation and Maintenance

リスク情報活用 ―技術開発と実機適用―

Research and Development for Risk Informed Plant Operation

*古田 泰¹, 喜多 利亘¹¹ (一財) 電力中央研究所 原子力リスク研究センター

1. はじめに

原子力事業者は、福島第一原子力発電所事故後に策定された新規規制基準に適合すべく多くの対策を実施するとともに、事故に対する反省から、さらなる安全性向上を目指した自主的な安全対策も検討、実施している。その中で、原子力発電所の安全性に対するリスクを継続的に管理、抑制するために、リスクマネジメントの枠組みの必要性を認識した。そこで事業者は、リスク情報を活用した意思決定（以下「RIDM」）プロセスを、発電所のマネジメントに導入することとし、実現のための取り組み方針等を2018年2月「リスク情報活用の実現に向けた戦略プラン及びアクションプラン」に取りまとめた。2020年6月には、その後の取り組み状況を踏まえ、同プランを改訂した。

電中研 NRRC（以下「NRRC」）は、事業者の安全性向上の取り組みに必要となる技術やノウハウを獲得するための研究開発拠点として2014年10月設置され、更に2016年7月には、「リスク情報活用推進チーム」を設置し、戦略プラン策定、およびPRAパイロットプロジェクトの推進・水平展開などリスク情報の実機適用を促す取り組みを行っている。

2. 「リスク情報活用の実現に向けた戦略プラン及びアクションプラン」策定とリスク情報を活用した意思決定プロセスの導入

2-1. 「リスク情報活用の実現に向けた戦略プラン及びアクションプラン」の概要

戦略プランの目的は、強固なリスクマネジメントの仕組みの導入を実現し、原子力発電所の安全性を向上することである。RIDMを実行するマネジメントシステムは図1に示すとおり、「パフォーマンス監視・評価」「リスク評価」「意思決定・実施」の3つの主要な機能、これらの機能を支える「改善措置活動」「コンフィギュレーション管理」の2つのプログラムを含んでいる。

戦略プランの実施は、2020年3月末若しくはプラント再稼働までのフェーズ1、それ以降のフェーズ2に分けられる。RIDMプロセスを組織全体に定着させていくため、フェーズ1では、マネジメントの仕組みの整備等のRIDMプロセス導入のために必要な機能を整備し、フェーズ2では、フェーズ1で導入したマネジメントを実践し、原子力規制委員会が2020年度に導入した原子力規制検査において有効性を示しながら、その改善に引き続き取り組むこととした（図2）。

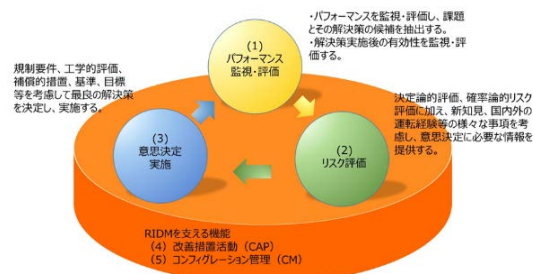


図1 RIDMによるリスクマネジメントの概念図

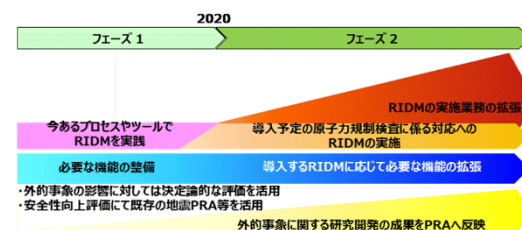


図2 戦略プランの基本方針

2-2. フェーズ1アクションプランの成果及びフェーズ2アクションプランの取り組み

原子力事業者は、2020年3月の断面でフェーズ1における取り組みを振り返り、RIDM導入のための基盤整備が着実に進捗していることを確認し、フェーズ2における取り組みとして、継続的なプラントの安全性の維持・向上及び効果的かつ効率的な発電所運営を目標として、「RIDMのための技術基盤の活用及び改善」「研究開発の継続と成果の適用」「RIDMプロセスの適用範囲の拡大」を推進することとした。

NRRC は、上記事業者の取り組みを支援するため、研究ロードマップを策定し、事業者が実施している内的事象 PRA 高度化に対する専門家レビューによるサポート、RIDM 推進のための人材育成のサポート、外的事象の高度化も含むリスク評価技術の開発などにフェーズ 1 より取り組んでおり、フェーズ 2 においても継続的に実施していくこととしている。

3. 結語

NRRC は、事業者がアクションプランを着実に遂行するため必要となる技術開発等の支援を継続的に実施することにより発電所の安全性向上に寄与していく。

*Tai Furuta¹ and Toshinobu Kita¹

¹Nuclear Risk Research Center (NRRC), Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI)

原子力発電部会セッション

プラント運営・保守管理へのリスク情報活用の取り組み
Efforts to Risk Informed Plant Operation and Maintenance

関西電力におけるリスク情報活用の状況について

Status of Risk Informed Approach in KEPCO

*榎本 晋嗣¹¹関西電力株式会社 原子力事業本部

1. はじめに

現在、原子力発電所のプラント運営・保守管理への活動に対してリスク情報を活用する取り組みにより、規制の枠に留まることなく、発電所の安全性向上に向けた活動を実施している[1]。本稿では、当社における具体的なリスク情報活用の状況を紹介する。

2. 当社におけるリスク情報活用の取り組み事例

2-1. CAP（是正処置プログラム）

CAP の判断基準として、リスク情報として PRA 結果（炉心損傷頻度の増分（ Δ CDF）等）を安全上の影響度「高」に分類すべき事象の判断基準の一つに取り込み、発電所で気付いた様々な問題（CR：コンディショニングレポート）を安全上の影響度高・中・低の3段階に分類し、影響度に応じた是正処置を講ずることとしている。

2-2. 停止時安全管理

発電所の定期検査工程作成時に停止時 PRA 結果を活用し、高浜 3,4 号機および大飯 3,4 号機の定期検査において、原子炉停止直後の炉心に燃料がある状態において実施するミッドループ運転について、保有水量を増加させ、またその時間を短縮することにより、リスクの低減を行っている。

2-3. 手順変更プロセス

重大事故等対処設備（SA 設備）を考慮した PRA モデルが整備された高浜 3,4 号機および大飯 3,4 号機を対象に運転手順や緊急時対応の手順変更前に PRA による手順変更のリスク評価を実施する仕組みを構築し、運用を開始している。

2-4. 定期点検時の待機除外時間の実績管理

高浜 3,4 号機および大飯 3,4 号機の PRA に待機除外時間が定められている機器（非常用ディーゼル発電機、ECCS ポンプ等）の定期試験について、待機除外時間を実績管理する仕組みを構築し、運用を開始している。

2-5. 追加安全対策の抽出

高浜 3,4 号機および大飯 3,4 号機の安全性向上評価において、PRA から得られるリスク情報を分析し、追加安全対策案の検討を実施し、RCP シャットダウンシールを導入することとした。

2-6. 安全系ポンプの性能確認

美浜 3 号機および高浜 1,2 号機の安全系ポンプの性能確認として、安全上重要な機器であるタービン動補助給水ポンプ（TD-AFWP）の性能確認について、プラント起動時に工夫して実施することで建設時からの懸念を解消すべく、現在、詳細計画を検討しているところである。

3. 結論

当社はリスク情報を活用し強化すべき改善点を把握するとともに、有限な資源を有効に活用することにより、規制の枠に留まることなく原子力発電所の安全性を向上させ、継続的な改善活動を実施していく。

参考文献

[1] 原子力発電の安全性向上のためのリスク情報の活用について、原子力発電事業者 11 社、2020 年 6 月 19 日

*Shinji Masumoto¹

¹The Kansai Electric Power Co., Inc., Nuclear Power Division

原子力発電部会セッション

プラント運営・保守管理へのリスク情報活用の取り組み
Efforts to Risk Informed Plant Operation and Maintenance

東京電力におけるリスク情報活用の状況について

Status of Risk Informed Approach in TEPCO

* 富安亮太¹, 平出真之¹, 滝口剛司¹, 竹内雅憲¹, 水野聡史¹, 田邊恵三¹, 石崎泰央¹¹東京電力ホールディングス株式会社

1. はじめに

確率論的リスク評価(PRA)から得られる知見などのリスク情報を分析することで、プラントの脆弱性(リスク)を把握し、随時、その脆弱性を補うための対策を講じていくことは、発電所の安全性の維持・向上を図る上で重要な取り組みである。また、2020年4月から原子力規制検査が施行され、この検査制度においては、リスクインフォームド、パフォーマンスベースの検査が実施されている。事業者においては、自主的に発電所のパフォーマンスを維持・向上させていくことが重要である。

これらの観点から、発電所の運営・保守管理におけるリスク情報活用の重要性をあらためて認識し、当社においても、発電所のリスクマネジメントにおいて、リスク情報を活用した意思決定(RIDM)の導入を促進している。本稿では、当社の柏崎刈羽原子力発電所におけるリスク情報活用の事例を紹介する。

2. 東京電力 HD におけるリスク情報活用例

当社は、従来から定検工程の計画時に PRA を用いて、定検期間中の炉心損傷頻度(CDF)を評価し、CDF が大きく上昇する期間が確認された場合は、その期間の CDF を低減するよう計画を見直すなど、プラントの運営・保守管理に PRA の知見を活用し、安全性の向上に努めてきた。また、PRA モデルの高度化にも取り組んでおり、柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉の内的事象運転時レベル 1PRA については、より精緻な評価が可能となった(2020年7月モデル高度化完了)。

現在は、これらの PRA モデルから得られる重要度解析の結果を、発電所の運営・保守管理に反映し、更なる安全性の向上を図る取り組みを進めている。

2-1. 設備ガード対象の見直し

当社では、安全上重要な設備を誤接触等による故障や劣化から保護することを目的として、設備ガード(物理的または視覚的防護による設備の保護)の対策を実施している。当該対策の対象設備について、PRA から得られる知見を活用し、見直しを実施した。従来は、保安規定において運転上の制限が定められている設備等を対象としていたが、これに PRA のリスク増加価値(RAW)が高い設備(故障時に CDF を大きく上昇させ得る設備)を追加することとした。これにより、保安規定の運転上の制限の有無という観点だけでなく、炉心損傷リスクの観点も踏まえ、設備ガードの対象設備が最適化でき、プラントの安全性の向上につながる。

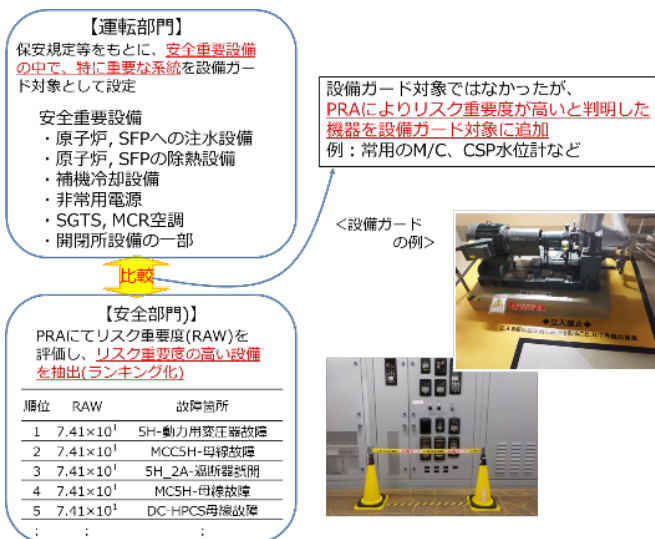


図1：設備ガードの検討のイメージ

2-2. 予備品の確保等によるリスク低減策の実行

設備の保守管理という観点では、安全上重要な設備の予備品確保の検討に際し、有効にリスクを低減する確保のあり方について、リスク情報を活用した検討を実施している。

具体的には、安全部門において、PRAの結果から、故障時に大きくCDFを上昇させる設備と故障モードを特定した。PRA上の故障モードは様々な故障事例をグループ化し、一般化の上、データベースとして活用できるようにしたものに基づいて設定されているため、特定した故障モードを、保全部門において、過去の故障実績や劣化メカニズム等の運転経験と照らし合わせ、実機において起こりやすい故障との紐づけを実施した。これにより、機能喪失時のリスク上昇幅の高い設備の故障モードとして、実機で想定すべき故障や劣化のパターンを特定した。この故障や劣化のパターンに対し、復旧方法や復旧に必要な時間を検討し、許容時間内の復旧が困難と想定される設備を予備品確保等の対策が必要な設備として選定し、事前の対策を検討している（例えば、部品の調達に時間がかかるが、現在、予備品が配備されていないものについては追加で配備するなど）。本検討により、リスクが高い設備が故障した際にも、当該設備の速やかな復旧によるリスク低減に期待している。

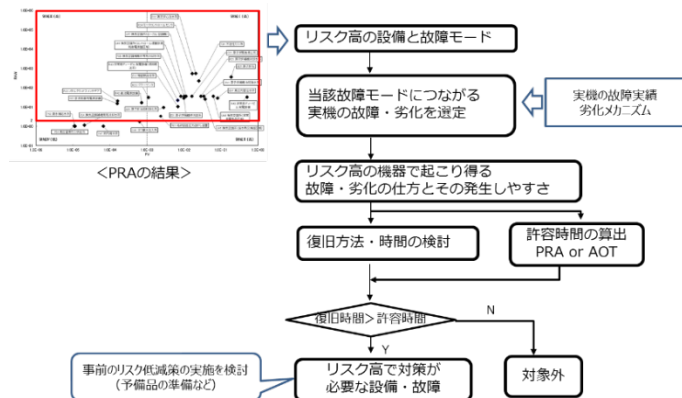


図2：検討フロー

2-3. 定検工程管理におけるリスクの事前検討の実施

定検工程の計画・作成においても、当社では、更なるリスク情報の活用を促進している。工程計画段階において、運転、保全、安全の各部門が集まり、保全部門が作成した工程案に、潜在するリスクを抽出し、それに対してどのようにリスクを低減するかを検討している。当該検討において、安全部門からは、工程案のCDFやリスク重要度(RAW, FV)の評価結果を提示し、機能喪失によりCDFが大きく上昇するため保護を推奨する系統・設備や、信頼性の向上がCDFの低減に大きく寄与するため巡視点検などの強化を推奨する系統・設備の情報等を提供している。この取り組みにより、部門間で、事前にリスクを共通認識とでき、また、運転、保全部門でリスクの低減策を検討・実施した上での工事作業が実施できることから、安全性の向上につながると共に、検討を通じた発電所員のリスク感度向上にもつながると期待している。

項目	リスク	対応方針	検討・回避策
WW06-P21-R0W-B WW06-P41-R0W-B	RCWA/RCWBの機能不待機 A-Bへのタイライン運用の変更	RCWA/RCWB系設備に対する警備ガード RCWタイライン運用はしない	・人的過失によるリスク上昇防止 ・人的過失等による新規リスクを把握 ・タイラインは行わないがインゲート入は可能 ・RCWタイライン運用の分岐は工務設備で確保
WW06-C11-R1R-B	SFP冷卻が停止した場合SFP冷卻がRCWA/RCWBのみの稼働が確保	設備の修理・SFP冷卻設備の修理 ・修理完了後RCWA/RCWBの稼働を、アラートとアラーム	・SFP冷卻設備の修理に備えて修理手配
WW06-R12-D10-B WW06-R14-D10-H	保安規定11条100条の 保安規定100条100条のD/Qを含め2を動作可能	K10/D/Qの伝達確認 K10/D/Qの伝達確認 K10/D/Qの伝達確認 K10/D/Qの伝達確認	・K10/D/Qの伝達確認 ・K10/D/Qの伝達確認 ・K10/D/Qの伝達確認 ・K10/D/Qの伝達確認

工程実施によるリスクを明確化

リスクの低減策を検討

図3：リスク検討の実施事項のイメージ

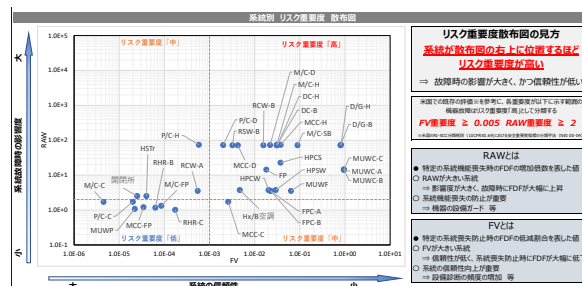


図4：リスク重要度レポートの抜粋例

3. まとめ

当社は、発電所の更なる安全性向上を目指し、リスク情報の活用を進めている。今後も、運転員のパトロールの視点にPRAなどから得られる知見を反映し、運転管理で培った視点にリスクの観点を加えたより効果的なパトロール方法を検討するなど、リスク情報活用の更なる拡充を進め、発電所の更なる安全性向上に寄与していく。

*Ryota Tomiyasu¹, Masayuki Hiraide¹, Takashi Takiguchi¹, Masanori Takeuchi¹, Satoshi Mizuno¹, Keizo Tanabe¹, Yasuo Ishizaki¹

¹Tokyo Electric Power Company Holdings, inc.

Planning Lecture | Board and Committee | Ethics Committee

[1G_PL] Nuclear Power Useful for the Society

Nuclear Academic Society's Code of Ethics and Behavior

Chair: Tomohito Nakano (TOSHIBA ESS)

Wed. Mar 17, 2021 1:00 PM - 2:30 PM Room G (Zoom room 7)

[1G_PL01] Significance in this Session

*Kyoko Oba¹ (1. JAEA)

[1G_PL02] Pursuit of Nuclear Technology Useful for the Society: understanding the AESJ's Code of Conduct, Article 2

*Tomoki Ohashi¹ (1. Miyagi Gakuin Women's Univ.)

倫理委員会セッション

社会に役立つ原子力であるために ～原子力学会の倫理規程と実際の行動～
Nuclear Power Useful for the Society: Nuclear Academic Society's Code of Ethics and Behavior

(1) 本企画セッションの意義 ～倫理規程改定における論点～

(1) Significance in this Session: Major Issues in the Revision of Code of Ethics

*大場 恭子¹¹JAEA

1. 本セッション開催の趣旨

日本原子力学会は、学会としての基本的な理念を示した「行動指針」と、学会員の心構えと言行の規範とである「倫理規程」を定めている。そして、これらはいずれも東京電力福島第一原発事故（以下、1F 事故）を踏まえ、2014 年に改定を行った。さらに、倫理規程は、2021 年にさらなる改定を予定している。

本セッションでは、1F 事故後の学会の行動指針および倫理規程の改定の背景に改めて注目するとともに、現在の学会あるいは学会員の活動を現在の「行動指針」および「倫理規程」に照らし合わせ、実践できているのか、いないのか。今後どのような活動が求められるかに、率直な議論をしたい。

2. 行動指針と倫理規程

2-1. 行動指針

原子力学会の行動指針は、学会設立 50 周年を迎えるにあたって 2007 年 12 月に制定された。日本原子力学会の理念、ビジョン、日本原子力学会の社会に対するつとめ、原子力学会による会員活動への支援の 3 つのカテゴリーによる計 15 条から成っている。

その後、1F 事故および学会の定款の改定を受け、行動指針も改定され、現在に至っている。現在の行動指針は、学会としての基本的な理念を示すことを目的にしつつ、コンパクトにすると同時に、定款と重複する具体的な事業内容は省いたものとなった。

1. 信頼醸成への貢献

- 1.1 弛まず安全性の向上を追求する。
- 1.2 より高い倫理観を醸成する。
- 1.3 公平公正を旨とし、透明性を維持する。
- 1.4 国民・地域社会から信頼される技術情報源となるよう努める。

2. 社会に役立つ原子力技術の追求

- 2.1 広く国内外の知見・経験に学び、学術および技術の向上を主導する。
- 2.2 研究開発成果の活用と普及を進め、地球環境の保全、人類社会の持続的 発展に寄与する。
- 2.3 次世代の研究者・技術者を育成・支援し、技術の継承を図る。

3. 国際的な活動

- 3.1 原子力平和利用の豊富な実績と、原子力事故の当事国となった経験に基づき、世界の原子力技術とその安全性の向上に貢献する。
- 3.2 我が国の原子力平和利用と核セキュリティに対する国際的信頼の向上 に努める。

2-2. 倫理規程

1998 年の使用済み燃料輸送容器データ改ざん等の問題を受け、学会員の心構えと言行の規範として 2001 年に制定された。「前文」「憲章」「行動の手引」の 3 部構成は、6 回の改定を経た現在も変わっていない。

1F 事故後は、事故そのものを受けての改定（たとえば、「規制適合が目的化することへの戒め（2-8）」、「技術成熟の過信への戒め（2-9）」）だけでなく、組織文化を重視し、組織の責任を明確にした。

以下に、現在の倫理規程の憲章のみを掲載する。

1. (行動原理)

会員は、人類の生存の質の向上および地球環境の保全に貢献することを責務と認識し、行動する。

2. (公衆優先原則・持続性原則)

会員は、公衆の安全をすべてに優先させて原子力および放射線の平和利用の発展に積極的に取り組む。

3. (真実性原則)

会員は、最新の知見を積極的に追究するとともに、常に事実を尊重し、自らの意思をもって判断し行動する。

4. (誠実性原則・正直性原則)

会員は、法令や社会の規範を遵守し、自らの業務を誠実に遂行するとともに、社会に対する説明責任を果たし、社会の信頼を得るように努める。

5. (専門性原則)

会員は、原子力の専門家として誇りを持ち、携わる技術の影響を深く認識して研鑽に励む。また、その成果を積極的に社会に発信し、かつ交流して技術の発展に努めるとともに、人材の育成と活性化に取り組む。

6. (有能性原則)

会員は、原子力が総合的な技術を要することを常に意識し、自らの専門能力に対してその限界を謙虚に認識するとともに、自らの専門分野以外の分野についても理解を深め、常に協調の精神で臨む。

7. (組織文化の醸成)

会員は、所属する組織の個人が本倫理規程を尊重して行動できる組織文化の醸成に取り組む。

2-3. 倫理委員会における 1F 事故以降の倫理規程改定以外の活動

倫理委員会の任務は、倫理委員会規程第2条により、定められているが、1F 事故以降の主な活動としては、東日本大震災良好事例集の発行、年会・大会における企画セッションの実施、倫理研究会の実施が挙げられる。また、2019 年の学会誌（6月号、7月号）では、委員会活動の報告を掲載した。

3. 企画セッションに向けて

本セッションでは、1F 事故前から原子力産業にかかわられていらっしゃる産業心理学、安全人間工学（ヒューマンエラー予防、安全と安心）の専門家である大橋先生にご講演いただき、率直なご意見を伺うと同時に、そのご講演も踏まえながら、今後の原子力学会あるいは原子力学会のあるべき姿について、率直なディスカッションを展開したい。

*Kyoko Oba¹

¹ Japan Atomic Energy Agency

倫理委員会セッション

社会に役立つ原子力であるために ～原子力学会の倫理規程と実際の行動～
Nuclear Power Useful for the Society: Nuclear Academic Society's Code of Ethics and Behavior

(2) "社会に役立つ原子力技術の追求（行動指針第2条）"とは

～1F 事故を踏まえて～

(2) Pursuit of Nuclear Technology Useful for the Society: understanding the AESJ's Code of Conduct, Article 2 -lessons learned from the 1F accident-

*大橋 智樹¹

¹宮城学院女子大学

1. 東日本大震災のこと

宮城県山元町立中浜小学校は、避難マニュアルに定められた避難場所では津波到達まで間に合わないと判断し、地域住民を合わせて約 90 人が校舎屋上に避難した。津波は屋上直前まで到達したが、かろうじて屋上を超えることはなく、全員無事だった。石巻市立雄勝小学校では、地域住民とともに約 150 人が校庭に避難していた。児童を引き取りに来た保護者から大規模な引き波を指摘された後にあらかじめマニュアルで定められていた山の神社へ避難。その後さらに山を登り、全員が助かった。石巻市立谷川小学校では、地域住民とともに約 70 人が校庭に避難していた。消防団員二人が海の様子を監視し、津波の予兆を確認したのちに、マニュアルに従って県道まで避難。その後さらに山を登り、全員が助かった。

一方、南三陸防災庁舎では、職員 53 人が庁舎屋上に避難したものの、屋上を超える津波で 43 人が死亡した。七十七銀行女川支店では、13 名の行員が屋上に避難したが、屋上を超える津波で 13 人全員が流され、12 人が死亡した。石巻市立大川小学校では、地域住民合わせて約 100 人を超える人々が、市職員が避難を呼びかけていた河川堤防に向かって避難を開始した直後に襲来した陸上遡上津波によってほぼ全員が死亡した。

東日本大震災では、このように生死が分かれた例は枚挙にいとまがない。原子力事業は、再稼働を本格化させるこの時期に、原子力関係者は、これらの事例から何を学ぶべきだろうか。

2. 生死を分けたものは何か？

生還と悲劇を分けたものは何か。生還事例は成功なのか。悲劇となった事例は失敗なのか。同じことは原子力事業にも当てはまる。福島第一は失敗事例で、福島第二、女川、東海第二は成功事例なのだろうか。結果はたしかに大きな差があった。しかし、結果には常に運がつきまとう。運良く何も起こらないこともあれば、運悪く犠牲が出ることもある。結果のみに基づいて技術を語るべきでないことは専門家ならば誰でも知っているはずだ。

3. たゆまぬ安全性の向上のために

たしかに、結果が重大であればあるほど社会は強く反応をするものだし、その責任を負う者は、社会の声に対応する責任がある。しかし、真に安全性の向上を目指すならば、事象の評価を結果の重大性のみに委ねてきた歴史からの脱却が必要だろう。技術的に言えば、たとえ結果が重大でも何一つ対策を変えなくて良いこともあるし、逆に、何事も起こらなくても対策をすべて見直す必要があるときがある。しかし、福島事故への対応はどうだっただろうか。過去のすべてを否定しなければ前に進めないと諦めていないか。

結果評価の代わりに採用すべきは、たとえば「プロセス評価」だろう。何がどうなっていたら良い状態と評価するのか、何がどうなっていたら悪いと評価するか、“物差しと基準”を明確にし、常にモニタリングし続けることによって、「結果が出る前の状態」の評価をし続ける。そして、これら一連の評価プロセスをステイクホルダーと共有し、広く意見を求めつつ、必要な改善を行う。それによって、結果のみによらない評価が可能になる。もちろん解はほかにもあるだろう。それを考えねばならない。

本学会の倫理規程、憲章、行動の手引きには、原子力に関わる者たちが行動に移されねばならないことがたくさん書かれている。たとえば2条「公衆の安全をすべてに優先させて」、行動原理「不断的努力とチャレンジ精神の醸成」「規制適合が目的化することへの戒め」。結果のみに基づく評価を甘んじて受け入れている現状はこれらの規程に反しないだろうか。

*Tomoki Ohashi¹

¹ Miyagi Gakuin Women's University

Planning Lecture | Technical division and Network | Division of Nuclear Fuel Cycle and Environment

[1I_PL] Discussion on future technical investigation for the final disposal of removed soil and wastes

Chair: Daisuke Sugiyama (CRIEPI)

Wed. Mar 17, 2021 1:00 PM - 2:30 PM Room I (Zoom room 9)

[1I_PL01] Overview of the current status of the interim storage and development of volumetric reducing treatment method for removed soil and wastes

*Kazuto Endo¹ (1. NIES)

[1I_PL02] Multi-aspect assessment of scenarios for volumetric reducing treatment and final disposal of removed soil and wastes

*Tetsuo Yasutaka¹, Masahiro Osako² (1. AIST, 2. NIES)

[1I_PL03] Panel Discussion

Kazuto Endo¹, Tetsuo Yasutaka², Masahiro Osako¹, Kazuo Yamada¹, Yasuaki Miyamoto³, Daisuke Sugiyama⁴ (1. NIES, 2. AIST, 3. JAEA, 4. CRIEPI)

バックエンド部会企画セッション

除去土壌等の県外最終処分の実現に向けた技術開発と研究の方向性

Discussion on future technical investigation for the final disposal of removed soil and wastes

(1) 除去土壌等の中間貯蔵施設運営と処理技術開発の状況

(1) Overview of the current status of the interim storage and development of volumetric reducing treatment method for removed soil and wastes

*遠藤 和人¹¹国立環境研究所 福島支部

1. 除去土壌等の処理状況

事故後、年間積算線量が 50 mSv、20 mSv、1 mSv という区分によって帰還困難区域等が設定されると共に、除染の基本方針¹⁾についても同じ年間積算線量によって区分され、積算線量が 20 mSv を超えるおそれがある区域（計画的避難区域）については自治体と連携して国が主体的に除染を実施することが示され、1～20 mSv の範囲にある地域ではコミュニティ単位での計画的な除染が効果的であるとして市町村が「市町村による除染実施ガイドライン（平成 23 年 8 月 26 日）」に基づいて除染を実施することとなった。除染措置は、自然減衰やウェザリングによって 2 年後（2013 年 8 月末）までに追加被ばく線量を 50%（自然減衰 40%に除染措置で 10%）まで減少させることを目標に設定された（学校や公園等については 60%）²⁾。また、年間積算線量が 20 mSv を超えるような高線量区域を主な対象として、除染措置の効率的・効果的な除染方法や作業員の放射線防護に係る安全確保方策を確立することを目的に「除染モデル実証事業」や「除染技術実証試験業務」が実施された³⁾。この内閣府除染と呼ばれるものから国直轄の除染が始まり、伊達市や郡山市の学校除染（2012 年 4 月）なども含めて市町村による除染が開始された⁴⁾。これら面的除染と呼ばれる除染措置は 2018 年 3 月に完了し、現在の除去土壌等の運搬へと移行している。

中間貯蔵施設の基本的考え方（ロードマップ）は 2011 年 10 月に公表された⁵⁾。この時すでに、中間貯蔵開始後 30 年以内に、福島県外で最終処分を完了することが示されている。その後、2013 年にはボーリング調査等が開始され、2015 年 2 月にはストックヤード（保管場）が、2016 年 11 月には受入・分別施設や土壌貯蔵施設の工事が着手された。除去土壌等の輸送は、2015 年 3 月に開始され、2021 年 1 月 28 日時点で、累積搬出量は 1,036.7 万 m³であり、輸送対象物量約 1,400 万 m³に対して 74%程度の搬出（運搬）が完了している⁶⁾。2016 年 3 月に公表された“中間貯蔵施設に係る「当面 5 年間の見通し」⁷⁾”に近い数値を実現している。現在、図 1 に示される通り、中間貯蔵施設は、大熊町で 5 工区、双葉町で 3 工区の合計 8 工区に 9 ヶ所の受入・分別施設と 8 ヶ所の土壌貯蔵施設が整備されている。また、大熊町に 1 ヶ所、双葉町に 2 ヶ所の仮設焼却施設（仮設灰処理施設を含む）と、仮設焼却施設と同数の廃棄物貯蔵施設が大熊町と双葉町のそれぞれに整備されている⁸⁾。土壌貯蔵施設の総容量は約 1,290 万 m³であり、仮設焼却施設の日当たり総処理可能量は 550 トン、仮設灰処理施設は日当たり 150 トン、廃棄物貯蔵施設は、鋼製角形容器として約 74,000 個を貯蔵可能である。中間貯蔵施設に受け入れられた除去土壌等の処理の流れについて図 2 に示す。

輸送された除去土壌等の種類と濃度は、2020 年 3 月 23 日に開催された中間貯蔵施設環境安全委員会（第 17 回）資料 1 によれば、重量比で 95%が除去土壌であり、残りの 5%が可燃物、焼却灰、その他不燃物と報告されている。輸送済みの除去土壌のうち、8,000 Bq/kg 以下が 75%、3,000 Bq/kg 以下が 52%程度となっており、20,000 Bq/kg 超は 5.8%である。特定復興再生拠点区域等の除染が進むと、除去土壌の放射能濃度が高くなり、これらの割合は変化している可能性がある。

*Kazuto Endo¹¹National Institute for Environmental Studies.

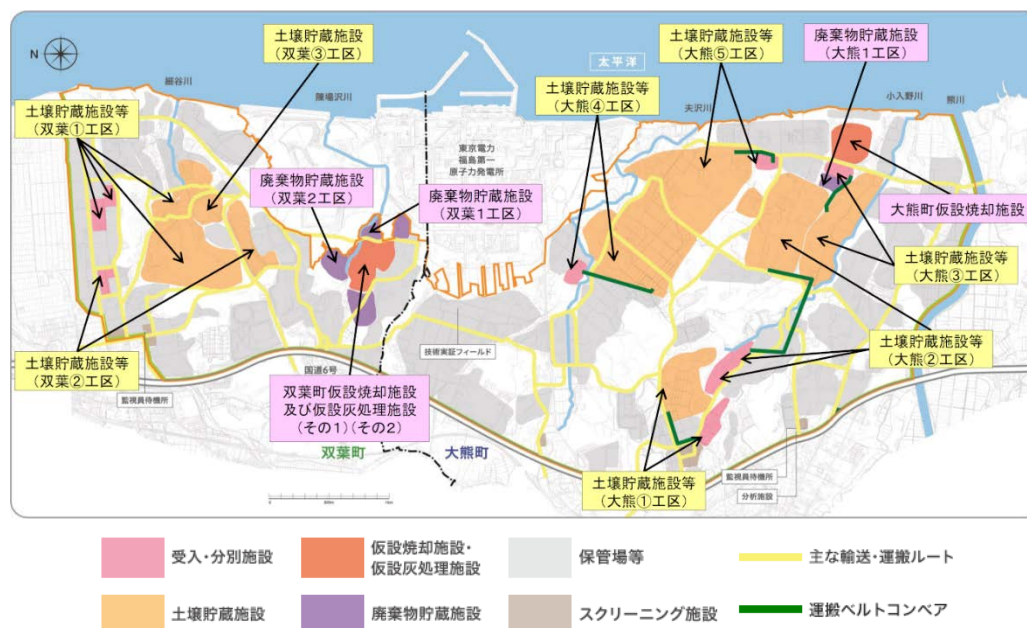


図1 中間貯蔵施設の整備状況（2021年1月時点）⁹⁾

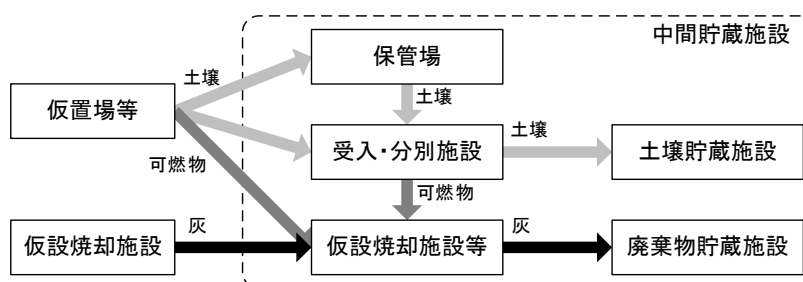


図2 中間貯蔵施設に輸送された除去土壌等の処理フロー（概略）

2. 県外最終処分に向けた処理技術開発等の状況

県外最終処分に向けた8つのステップは2014年7月の「中間貯蔵施設等に係る対応について（平成26年7月28日）」で示された。その中で法制度化が示され、2015年には改正JESCO法として第3条第2項に“中間貯蔵開始後30年以内に、福島県外で最終処分を完了するために必要な措置を講ずるものとする。”という条文が加えられた。また、環境省と復興庁から2014年に発出された「中間貯蔵施設等に係る対応について（平成26年8月8日）」には、町の将来像として、復興庁と共に両町の復興に向けた基本的な考え方を示し、避難地域の中長期的・広域的な視点に立った将来像の検討も謳われている。

県外最終処分を完了するための必要な措置には、最終処分必要量の低減があり、除去土壌等の効率的減容化方策、除去土壌の再生資材化に係る技術開発も含まれており、県外最終処分自体も含めたこれら一連の課題に対して、①減容・再生利用技術の開発、②再生利用の推進、③最終処分の方向性の検討、④全国的な理解の醸成等、の4つが中長期的な方針として定められ、2016年4月に「中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略」が策定された。この戦略は、2019年3月に“戦略目標の達成に向けた見直し”として改訂されている⁹⁾。2011年の放射性物質汚染対処特措法に基づく基本方針（閣議決定）の段階では、焼却等による減容化とコンクリートくず等の廃棄物の再生利用が示されているものの、除去土壌の再生利用については言及されていないが、2015年に締結された「中間貯蔵施設の周辺地域の安全確保等に関する協定書」の第14条第4項には、“除去土壌等の再生利用の推進”が示され、それ以降、2017年の「福島復興再生利用基本方針改定」（閣議決定）、2019年の「創生期間」における東日本大震災からの復興の基本方針変更（閣議決定）においては、除去土壌等に対して“減容・再生利用等”について示されるようになった。

先述した4つの中長期的な方針について、理解醸成以外の3つについては、2024年度を戦略目標と定め、

それまでに基盤技術開発を一通り完了させる目標となっている¹⁰⁾。①の減容・再生利用技術については、毎年度、「除去土壌等の減容等技術実証事業」として公募されており、2019年には技術開発を行うための施設として中間貯蔵施設内に技術実証フィールド（大熊町）が整備された¹¹⁾。本技術実証事業では、中長期方針の④国民的理解醸成についても実証が進んでいる。県外最終処分量の低減において、②の除去土壌の再生利用推進は必須であり、南相馬市や飯館村において再生利用の実証が進められると共に、2019年12月には「福島県内における除染等の措置に伴い生じた土壌の再生利用の手引き（案）」が示された。再生資材化した除去土壌の濃度上限は原則 8,000 Bq/kg とされ、用途ごとに追加被ばく評価計算から算出される年間 1 mSv 相当濃度がこれ以下の場合には、その濃度とする、とされている¹²⁾。また、除去土壌に含まれる放射性セシウムが細粒分に多く含まれていることから、細粒分を取り除けば有効利用可能な除去土壌が増加するという考えから、分級処理システムの実証事業も実施され、通常分級処理で、礫（2 mm 以上）、砂（75 μm～2 mm）、シルト・粘土（75 μm 未満）に分離し、さらに礫や砂に付着した細粒分を除去するための高度分級処理の試験も実施された。高度分級により砂・礫の除染率は約 8 割程度になり、砂・礫の放射能濃度は原土の約 1/4 まで削減可能なことが実証されている¹³⁾。③の最終処分の方針性の検討についても検討が進められており、除去土壌については濃度によって表 1 に示される区分が提案されている¹⁴⁾。高度分級等の分級処理をせず、中間貯蔵施設の搬入開始から 30 年後の 2045 年に 8,000 Bq/kg 以下となる砂質土は約 690 万 m³、粘性土は 466 万 m³ で全体の 86.6% 程度と試算されている（土壌 A と B の合計）。同資料¹⁴⁾では、シナリオ評価も同時に実施されており、既に実証試験が実施された分級処理（高度分級）に加えて、化学処理、熱処理および新技術を含めた高度処理を実施することで除去土壌の最終処分量を減少させるシナリオ（ケースⅢ）、さらに焼却灰に対して洗浄を行って最終処分量を減少させるシナリオ（ケースⅣ）などが提案されており、ケースⅢでは最終処分量が 28.2 万 m³、ケースⅣでは 3.4 万 m³ と試算されている。2024 年度末までには、より多くの技術が開発され、それに伴って多くのシナリオが提案されると思われるが、減容化技術の絞り込みに加え、県外最終処分の方式についても一通りの検討を終了することが求められている。

表 1 除去土壌の放射能濃度区分と物量（2018 年 10 月末時点）

区分	定義	濃度 (Bq/kg)	砂質土 (万 m ³)	粘性土 (万 m ³)	合計 (万 m ³)	物量の 割合
土壌 A	放射能濃度評価時点で 8,000 Bq/kg 以下	≤8,000	655.0	416.1	1,071.1	80.2%
土壌 B	搬入開始 30 年度（2045 年）に 8,000 Bq/kg 以下	8,000～15,000	35.2	50.0	85.3	6.4%
土壌 C	高度分級による生成物が搬入開始 30 年後（2045 年）に 8,000 Bq/kg 以下	15,000～62,000	20.8	112.9	133.7	10.0%
土壌 D	土壌 C より高濃度	>62,000	0.7	9.8	10.6	0.8%

3. 県外最終処分に向けた環境放射能除染学会の活動

県外最終処分に向け、技術等の実証とシナリオ評価が実施されているが、これまで実証されてきた技術オプションについて概略的にまとめると表 2 となる。化学処理や熱処理を含む高度処理、飛灰洗浄／吸着処理については、先に示した「除去土壌等の減容等技術実証事業」で技術開発が進められている。

表 2 除去土壌等の減容化処理の技術オプションと実証状況

除去土壌	異物除去 ⇒	分級処理 高度分級	⇒ 高度処理	⇒ 安定化処理
	○実施中	○2018 年に実証	? 開発中	? 未定
除染廃棄物等	焼却処理 ⇒	熔融処理 ⇒	飛灰洗浄 吸着処理	⇒ 安定化処理
	○実施中	○2020 年から稼働	? 開発中	? 未定

環境放射能除染学会（正式名称は、（一社）環境放射能とその除染・中間貯蔵および環境再生のための学会）では、中立的な学側の立場として県外最終処分の在り方を多面的に検討するため、コスト試算を含んだ純粋な技術論として考えた県外最終処分シナリオ、技術開発の方向性、最終処分構造、そして社会的合意形成に向けた考え方を議論するための「県外最終処分に向けた技術開発戦略の在り方に関する研究会」を2018年10月に設置した。同学会ホームページに活動報告が掲載されている¹⁵⁾。本研究会の検討方針は、●環境省が示した技術開発戦略の方向性・工程を踏まえながら、県外最終処分の出口からのアプローチと、これまで研究開発され導入されてきた技術の流れからのアプローチの両方から検討、●検討する技術は、開発済みの焼却灰熱的減容化技術、灰洗浄／吸着濃縮、安定化（セメント、ジオポリマー、ガラス、焼成などの固型化技術）、最終処分（処分構造、規模、高耐久性容器等）などの範囲を主体とするが、除染からの最終処分の全体を俯瞰し、適宜必要な技術とそれに伴う課題、関連法規なども柔軟に検討範囲とする、●処理プロセスのマスバランス解析を行い、合わせて経済性評価も行う、社会的合意形成に求められる要件に関し、ステークホルダーヒアリングを実施する、●この際、技術論に加え、経済性、環境など多面的評価を考慮する、等とされている。今後も本研究会の活動は継続される予定となっているが、活動報告の提言として、“未来の望ましい最終処分のゴールを社会の熟議により設定し、そこに至るための技術システムと社会システムづくりをどのように進めていけば良いかを同時に考え、フォアキャストとバックキャストの両方から検討し、建設的かつ着実な事業の進め方を考えていく必要がある。”として図3が示されている。上記研究会の検討結果の詳細については、環境放射能除染学会ホームページ¹⁵⁾に掲載された活動報告書を参照されたい。

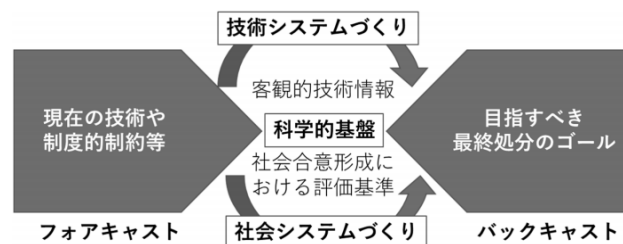


図3 最終処分に向けたフォアキャストとバックキャストが融合した戦略の必要性¹⁵⁾

参考文献

- 1) 原子力災害対策本部：除染推進に向けた基本的考え方，平成23年8月26日（2011）
- 2) 原子力災害対策本部：除染に関する緊急実施基本方針，平成23年8月26日（2011）
- 3) 独立行政法人日本原子力研究開発機構：福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における実証業務報告書、平成24年6月（2012）
- 4) 環境省除染事業誌編集委員会：東京電力福島第一原子力発電所事故により放出された放射性物質汚染の除染事業誌，平成30年3月（2018）
- 5) 環境省：東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について，平成23年10月29日（2011）
- 6) <http://josen.env.go.jp/chukanchozou/transportation/index.html>（2021年1月30日閲覧）
- 7) http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/acceptance_request/pdf/correspondence_160327_01.pdf（2021年1月30日閲覧）
- 8) <http://josen.env.go.jp/chukanchozou/about/>（2021年1月30日閲覧）
- 9) 環境省：中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略，戦略目標の達成に向けた見直し、平成31年4月（2019）
- 10) http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/investigative_commission_process_2003.pdf（2021年1月30日閲覧）
- 11) <http://www.jesconet.co.jp/interim/information/josenjissho.html>（2021年1月30日閲覧）
- 12) 環境省：再生資材化した除去土壌の安全な利用に係る基本的考え方について，平成28年6月30日（2016）
- 13) 例えば、中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会（第11回）資料3-2（2019）
- 14) 例えば、中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会（第10回）資料4-2別添資料（案）（2019）
- 15) <http://khjosen.org/home/activity.html>（2021年1月30日閲覧）

バックエンド部会企画セッション

除去土壌等の県外最終処分の実現に向けた技術開発と研究の方向性

Discussion on future technical investigation for the final disposal of removed soil and wastes

(2) 減容化処理・最終処分シナリオの多面的評価

(2) Multi-aspect assessment of scenarios for volumetric reducing treatment and final disposal of removed soil and wastes

*保高 徹生¹, 大迫 政浩²¹産業技術総合研究所, ²国立環境研究所

1. 概要

中間貯蔵施設に搬入される除去土壌量は約 1,300 万 m³と推定されている¹⁾。また、中間貯蔵施設で保管される放射性セシウムを含有する焼却灰は 46 万 t といわれており、膨大な量に上る。環境省は、これらの除去土壌や焼却灰について中間貯蔵開始後 30 年以内、すなわち 2045 年までに福島県外での最終処分を完了させる計画であり、今後、県外最終処分に向けた本格的な検討が始まる。特に、県外最終処分の立地選定プロセスはきわめて重要であり、過去の環境分野での知見から、幅広いステークホルダーの参画、複数のオプション（代替案）の準備、ステークホルダーの価値観を取り入れやすい評価手法の適用、柔軟な計画変更、公正性が担保された計画手続き等の必要性が指摘されている。

一方、除去土壌については、最終処分量を減らすための減容化（土壌分級や加熱処理）や再生利用が検討されており、最終処分される除去土壌・廃棄物の性状は未だ決まっていない。例えば、1300 万 m³の除去土壌の約 80%が 8000 Bq/kg 未満と推定されており¹⁾、半減期を考慮するとその多くは 300 年を経過することでクリアランスレベル（100 Bq/kg）以下となる。また、焼却灰については、高レベルの減容化（熱処理や飛灰洗浄および吸着材による回収等）が可能であり、「県外最終処分技術開発戦略あり方研究会（以下、本研究会）」のマスバランスによる試算では、46 万 t、3.3 万 Bq/kg の焼却残渣を減容化することにより 920 t まで減容化可能であるが、その濃度は 1,500 万 Bq/kg になることが報告されている³⁾。当然であるが、減容化の実施により、最終的に得られる濃縮物、すなわち最終処分される廃棄物（以下、廃棄体という）の濃度や性状が大きく変化することとなる。県外最終処分される廃棄体の濃度や性状は、県外最終処分の社会受容性に大きく関係してくると考えられることから、環境安全性や技術的側面の観点のみならず、社会受容性や経済的な観点からも、検討を進めることが必要である。

これらの社会受容性を評価・実装する方法として、近年、複数のオプションに対するステークホルダーの価値観を取り入れやすい評価手法として、多面的な評価の概念が注目されつつある。英国で環境影響がある事業において実施されることがある「最善な実用的選択肢(best practical environmental option : BPEO)」では、事業による影響を可能な限り低減するため、技術的観点に社会・経済的視点を加え、選択肢の立案・評価の段階でも広範なステークホルダーの参画の必要性を記載している⁴⁾。また、最近、土壌汚染分野で実装が進んでいる Sustainable Remediation⁵⁾ も同様の概念であり、複数の措置オプションに対して環境、社会、経済の各視点から、ステークホルダーの価値観を反映した合意形成のプロセスを提案している。

本発表では、環境影響評価や修復における多面的な評価の概要を紹介するとともに、県外最終処分に向けた複数のシナリオに対して多面的な評価の一環として、本研究会で実施したステークホルダーヒアリング調査の予備的な結果およびオンラインアンケートの結果の一部を紹介する。

引用文献：

1)環境省、中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会（第9回）、2018年12月17日。

2)環境省、県外最終処分に向けた取組、環境省 HP (<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/>)、閲覧 2021 年 2 月 3 日。

- 3)有馬謙一、山田一夫、大迫政浩、保高徹生、芳賀和子、福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムによる汚染物の処理・処分方法の総合的比較（第1報）焼却残渣の熱処理・灰洗浄を含む減容化プロセスの定量的評価方法の開発、環境放射能除染学会誌、Vol. 4, pp. 241-252, 2019.
- 4) 菅原慎悦、稲村智昌、田口裕史、桑垣玲子、自由化後の原子力事業者と立地地域との新たな関係構築に向けた課題、電力中央研究所 研究資料 Y16504, 2017.
- 5) 保高徹生、古川靖英、張 銘、わが国と諸外国のサステナブル・レメディエーションへの取り組み、環境情報科学 46(2), 43-47, 2017.

*Tetsuo Yasutaka¹ and Masahiro Osako²

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ²National Institute for Environmental Studies.

(Wed. Mar 17, 2021 1:00 PM - 2:30 PM Room I)

[1I_PL03] Panel Discussion

Kazuto Endo¹, Tetsuo Yasutaka², Masahiro Osako¹, Kazuo Yamada¹, Yasuaki Miyamoto³, Daisuke Sugiyama⁴ (1. NIES, 2. AIST, 3. JAEA, 4. CRIEPI)

In this session, a progress of investigation on the treatment and disposal of the removed soil and wastes by the Society for Remediation of Radioactive Contamination in Environment is shared, then some issues on the technical options of volume reduction and stabilization and on the viewpoint of societal aspects with stakeholder engagement for decision-making in the management of the removed soil and wastes are provided. Panelists will discuss direction of future technical investigation with experts in the field of the back-end nuclear fuel cycle and environment.

Planning Lecture | Technical division and Network | Materials Science and Technology Division

[1K_PL] Current Status of Research and Development Relating to Irradiation Tests and Necessity of Domestic Materials Testing Reactor -Part I-

Chair: Tamaki Shibayama (Hokkaido Univ.)

Wed. Mar 17, 2021 1:00 PM - 2:30 PM Room K (Zoom room 11)

[1K_PL01] Overview

*Tamaki Shibayama¹ (1. Hokkaido Univ.)

[1K_PL02] Consideration for the Modality of a New Materials Testing Reactor

*Kunihiko Tsuchiya¹, Takayuki Yamaura¹, Michihiro Naka¹, Tsuyoshi Kusunoki¹, Masanori Kaminaga¹, Takayuki Terai² (1. JAEA, 2. Professor Emeritus of UTokyo)

[1K_PL03] Importance of Materials Testing Reactor on Academic Research

*Yasuyoshi Nagai¹ (1. Tohoku Univ.)

[1K_PL04] The Role of Materials Testing Reactors and Post Irradiation Examination Facilities in the Development of Light Water Reactor Fuels

*Kan Sakamoto¹ (1. NFD)

[1K_PL05] Necessity of Domestic Materials Testing Reactor on Radioisotope Production

*Hiroshi Kawamura¹ (1. CTC)

[1K_PL06] Discussion

Chair: Mitsuhiro Kodama¹ (1. NFD)

照射炉利用関連研究開発の現状と国内照射炉の必要性（１）

Current Status of Research and Development Relating to Irradiation Tests and Necessity of Domestic Materials Testing Reactor ~Part I~

（１）全体概要

(1) Overview

* 柴山 環樹¹¹北海道大学大学院工学研究院附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター

軽水炉、高速炉、核融合炉材料の研究開発において、構造材料の安全性向上と健全性評価のためには、中性子照射に伴う材料特性の変化やメカニズムを理解することが重要であり、照射試験炉を用いた照射試験は不可欠である。国内では、これまで様々な燃材料に対する照射炉として利用されてきた JMTR (JAEA) の廃止決定がなされ、国外では、我が国の軽水炉燃料開発に大きな役割を果たしてきた Halden 炉（ノルウェー）の廃炉も決定したことから、我が国の事故耐性燃料の開発は諸外国に比べて遅れている。これら照射試験炉は、照射試験利用に留まらず、産業用アイソトープの製造等にも活用されており、照射試験炉の廃止に伴う影響は学術研究のみならず、医療分野等にも多大な衝撃を与えるものである。これらの状況を踏まえ、現在国内では JMTR の後継となる新たな照射試験炉の開発に向けた検討が開始されているが、今後既存軽水炉の安全研究や新材料開発に向けた材料照射研究を継続的に進めていくためには、産官学それぞれの分野における諸課題を抽出・整理し、新たな国内照射試験炉の早期設置に役立てていくことが重要である。

現在材料部会が整備を進めている原子力材料分野のロードマップにおいても、材料照射研究の将来展開は、早急に検討を進めるべき課題の一つとして位置付けられている。この課題に対し、最近では、仏国にて開発が進められているジュールホロビッツ炉、今後材料照射場としての利用が期待される常陽 (JAEA) をはじめとした国内照射施設に係るテーマについて企画セッションを開催し、活発な議論がなされてきた。また、上述のように新たな材料試験炉の国内材料照射試験炉が利用できない現状、国外炉や国内照射施設の活用は有効な手段の一つとなり得る一方で、照射コストや照射条件の制御性といった観点からは未だ解決すべき課題が多く、燃材料の実用化研究に大きく貢献した JMTR の後継となる新たな照射試験炉の早期設置が不可欠な状況にある。本企画セッションでは、JAEA における新たな照射試験炉の検討状況をはじめ、国内大学や企業における材料照射試験に関わる研究開発、アイソトープ製造分野における現状や課題について報告し、国内照射試験炉の喫緊の必要性を広く周知するとともに、早期設置に向けた議論を行う。

*Tamaki Shibayama¹¹Center for Advanced Research of Energy and Materials, Faculty of Engineering, Hokkaido University

材料部会セッション

照射炉利用関連研究開発の現状と国内照射炉の必要性（１）

Current Status of Research and Development Relating to Irradiation Tests and Necessity of Domestic Materials Testing Reactor ~Part I~

(2) 新たな照射試験炉の在り方に関する検討

(2) Consideration for the Modality of a New Irradiation Testing Reactor

*土谷邦彦¹、山浦高幸¹、那珂通裕¹、楠 剛¹、神永雅紀¹、寺井隆幸²¹原子力機構, ²東京大学名誉教授

1. 概要

平成 30 年 7 月に閣議決定された第 5 次エネルギー基本計画において、原子力は「安全性・信頼性・効率性の一層の向上」、「再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションを促進」、「人材・技術・産業基盤の強化に直ちに着手し、安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求、バックエンド問題の解決に向けた技術開発を進めていく」とされた。

原子力機構では、平成 29 年 4 月に施設中長期計画を公表し、高経年化した原子力施設を廃止することが決定された。特に、我が国で照射機能を有する材料試験炉(JMTR)も廃止施設となったが、文科省原子力科学技術委員会原子力研究開発基盤作業部会の「中間まとめ」において、我が国が持つべき原子力研究開発機能が示された。このため、原子力機構内に JMTR 後継炉検討委員会を設置し、長期的な視点から JMTR 後継炉としての照射試験炉の在り方に関する検討を開始した。

2. 検討内容

2-1. JMTR 廃止決定の影響と国内外の調査結果

我が国は、JMTR 廃止により、エネルギー基本計画に示されている軽水炉の安全性、信頼性・効率性向上のための技術開発や新型炉開発に必要な照射場を失い、実用的なデータの取得が出来なくなった。また、運転技術や研究開発を行う人材を育成することも困難となっている。さらに、工業用・医療用 RI 製造も海外に依存するしかない状況となっている。一方、海外においても、高出力照射試験炉が高経年化により相次いで廃止されており、現在稼働している多くの照射試験炉も 10 年後には廃止の可能性が高くなっている。世界で建設されている高出力照射試験炉は JHR(フランス)と RA-10(アルゼンチン)の 2 基であるが、規制強化等の問題で建設工期が大幅に遅れている。日本では、もんじゅサイトの試験研究炉の建設のための概念設計が開始されたが、熱出力は数~10MW で中性子ビーム利用を主目的としており、これまでの研究開発で培った技術を維持・高度化するための基礎基盤技術の確立も行いつつ、社会的要請に応じていくためには、新たな照射試験炉の検討も必要不可欠であるといえる。

2-2. 新たな照射試験炉の必要性和実現に向けた検討課題

JMTR 後継としての新たな照射試験炉は、高出力の試験研究炉であることを前提に検討を進めており、その建設には多額の建設費が必要となる。このため、社会的要請を踏まえた利用ニーズをさらに調査し、海外で建設されている照射試験炉やもんじゅサイトの試験研究炉との関係を踏まえた位置づけを明確にすることが重要である。また、これまで JMTR で蓄積した照射技術を継承・維持しつつ、より高度な照射技術を開発することが要求されることから、他の炉とは異なった特徴を有する照射試験炉であることを明示し、国内外との連携を強化することにより、中核的な研究施設とするような運営方針の構築を検討することも必要である。特に、運用にあたっては、国内外の研究者・技術者等の意見を踏まえつつ、その運営形態や利用料金・稼働率向上などの課題を解決しながら、検討を進めることが望まれている。

*Kunihiko Tsuchiya¹, Takayuki Yamaura¹, Michihiro Naka¹, Tsuyoshi Kusunoki¹, Masanori Kaminaga¹ and Takayuki Terai²¹Japan Atomic Energy Agency, ²Professor Emeritus of the University of Tokyo

材料部会セッション

照射炉利用関連研究開発の現状と国内照射炉の必要性（１）

Current Status of Research and Development Relating to Irradiation Tests and Necessity of Domestic Materials Testing Reactor ~Part I~

(3) 学術研究における照射炉の重要性 —東北大金研大洗の共同利用研究から—

(3) Importance of Materials Testing Reactor on Academic Research

- Activities of IMR-Oarai as a collaborative user facility -

*永井 康介¹¹東北大学金属材料研究所

1. はじめに

東北大金研 附属量子エネルギー材料科学国際研究センター（大洗センター）は、1969年に設置された前身の附属材料試験炉利用施設時代より、JMTR を中心とした照射炉を利用した学術研究の全国共同利用施設として、JAEA との密接な協力関係を基に、キャプセル開発から照射後試料の最先端の分析まで、様々な学術研究に貢献してきた。また、2008年のJMTRの停止以降は、共同利用者の照射ニーズに応えるため、海外の研究機関と学術協定を結び、海外炉による代替照射を行ってきた。本講演では、大洗センターにおけるこれらの取り組みを紹介し、共同利用・共同研究における照射炉利用研究ニーズと、国内照射炉の必要性について述べる。

2. 学術における材料照射関連研究分野の現状と照射キャプセルの推移

50年間で研究のトレンドには様々な変化が見られたが、近年は、軽水炉（压力容器鋼、シュラウド等の炉内構造物の健全性、事故耐性燃料（被覆管）等）、Gen-IV、核融合炉材料は高い耐照射性を示す様々な候補材料の開発（タングステン、低放射化フェライト、ODS 鋼、バナジウム合金等）、年代測定に用いられる放射化分析など幅広い研究が行われている。図1に共同利用を通じてJMTRで照射された照射キャプセル数の推移を示す。稼働初期は無計装キャプセルや水カラビットといった簡易的な照射が多く行われてきたが、1990年代から計装キャプセルが増加し、照射温度や環境を精密に制御した照射が強く求められるようになった。2000年代後半のJMTRの停止によりこれらの照射ニーズが実施できなくなり、主としてベルギーSCK・CENのBR-2による代替照射を細々と行っているのが現状である。

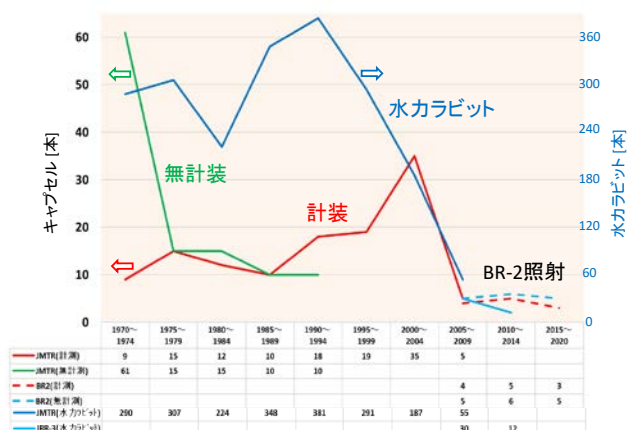


図1：照射キャプセル数の推移

3. 海外炉代替照射と国内炉の必要性

上記の海外炉代替照射では単なる照射依頼だけでなく、SCK・CENに教員が長期滞在し、新しい照射キャプセルの共同開発を行っている。先端の材料照射研究にはこのような取り組みが欠かせないが、国内炉と比べて多大な労力、時間、費用がかかる。また、照射領域の確保においても我が国の研究者の希望通りになるわけではない。特に近年世界中の照射炉の老朽化に伴い、稼働中の照射炉に照射希望が集中し、価格の高騰と照射スペースの奪い合いが起きている。これらの事実は国内に一刻も早く照射炉の稼働が欠かせないことを示している。

*Yasuyoshi Nagai¹¹Institute for Materials Research, Tohoku University

材料部会セッション

照射炉利用関連研究開発の現状と国内照射炉の必要性（１）

Current Status of Research and Development Relating to Irradiation Tests and Necessity of Domestic Materials Testing Reactor ~Part I~

（４）軽水炉燃料開発における照射試験炉と照射後試験施設の役割

(4) The Role of Materials Testing Reactors and Post Irradiation Examination Facilities in the Development of Light Water Reactor Fuels

*坂本 寛¹¹NFD**1. はじめに**

軽水炉燃料には高い信頼性が要求されるため、その開発には幅広い知識が必要となるだけでなく、安全性を含めてその性能を事前に実証することが必要となる。我が国で使用されている商業用軽水炉燃料も 1970 年代から信頼性向上を主な目的とした本格的な開発が始まり、1980 年代以降は経済性向上、高性能化を実現するための開発が精力的に行われてきた。近年では、2011 年の福島第一原子力発電所事故の教訓から事故に対してより耐性を高めた事故耐性燃料 (Accident tolerant fuel: ATF もしくは Enhanced accident tolerant fuel: EATF) の開発も取り組まれている。

軽水炉燃料は当然のことながら高温高压の水/水蒸気、高照射環境において年オーダーの長期にわたり燃料として使用される。そのため、その性能の実証には熱機械解析に代表される使用環境における燃料ふるまい予測と先行使用燃料 (Lead use assembly: LUA) の照射後試験に代表される試験的実証を組み合わせてきた。この燃料ふるまい予測と試験的実証において、高照射環境を模擬するための照射試験炉と照射により放射化した燃料・材料を調べる照射後試験施設が重要な役割を果たしてきた。

以降では、これまでの軽水炉燃料開発における照射試験炉と照射後試験施設が果たしてきた役割の例を紹介するとともに、例として現在実施されている ATF 開発において今後必要となる役割について述べる。

2. 軽水炉燃料開発における照射試験炉と照射後試験施設の役割**2-1. 軽水炉燃料開発における照射試験炉と照射後試験施設が連携した例**

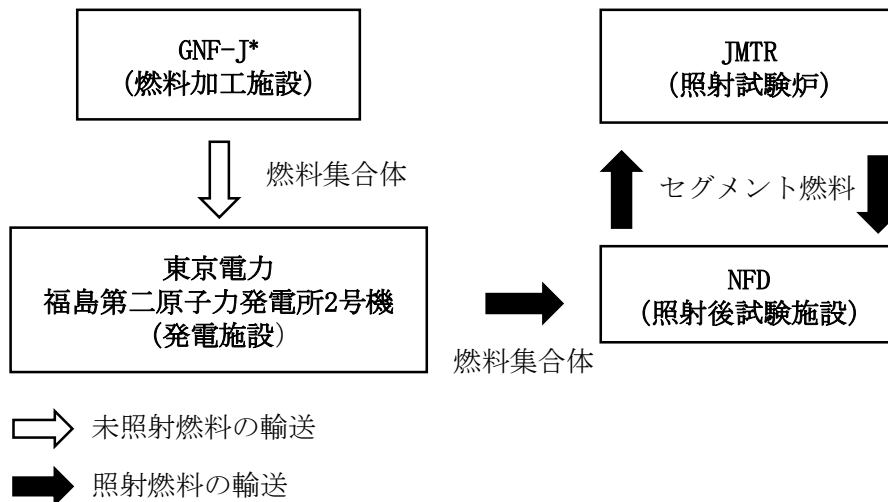
これまでの軽水炉燃料開発の概要については参考文献 1 等にまとめられているが、本稿では国内照射試験炉と国内照射後試験施設が連携して軽水炉燃料開発の役割を果たした例を紹介する。具体的には昭和 61 年度から開始し平成 13 年度に終了した「高燃焼度等燃料安全性試験」において実施された、(1)沸騰水型原子炉 (Boiling water reactor: BWR) 高燃焼度燃料の LUA 照射試験及び照射後試験と(2)LUA に組み込まれたセグメント燃料を用いた出力急昇試験と照射後試験を紹介する。出力急昇試験は燃料の破損限界を試験的に評価する試験であり、軽水炉燃料の信頼性向上、経済性向上、高性能化のいずれに対しても重要な実証データが得られる貴重な試験である。詳細は参考文献 2 にまとめられている。

事業全体のフロー図を図 1 に示している⁽²⁾。「高燃焼度等燃料安全性試験」では、燃料加工施設で製造された 8 体のステップ II 燃料集合体を福島第二原子力発電所 2 号機で 1-5 サイクル炉内燃焼させ、サイクル毎に NFD に輸送して照射後試験を実施して照射後試験データを取得した。また、3 サイクル以上炉内燃焼した集合体については、NFD において燃料集合体から採取したセグメント燃料を材料試験炉 (Japan materials testing reactor: JMTR) において出力急昇試験を実施して出力急昇試験データを取得し、出力急昇試験後のセグメント燃料を NFD にて照射後試験を実施して照射後試験データを取得した。本稿では、セグメント燃料を NFD から JMTR に輸送した以降のフローのみを取り上げる。

図 1 に示したように NFD と JMTR の間でセグメント燃料の輸送を行っている。出力急昇試験におけるセグメント燃料のふるまいを詳細に調べるために、出力急昇試験前後において出力急昇試験中に起こる変化 (塑

性変形、ガス放出、外観変化等)を評価するための数多くの試験を実施した。また、出力急昇試験では出力急昇試験中の試験条件及び破損による冷却材放射能上昇をその場計測した。

試験データや試験結果については参考文献 2 に譲るが、出力急昇試験では照射後試験施設、照射試験炉の両施設が高い精度、信頼性をもった試験データを採取することで初めて試験結果が得られる。「高燃焼度等燃料安全性試験」では、被覆管外面からの破損という新たな破損形態が観察され、その後その機構解明を目的とした研究が実施されたが⁽³⁾、出力急昇試験前後の試験データと出力急昇試験中の計測データの全てが高い精度、信頼性を持っていたことがその機構解明に大いに寄与した。また、数多くの出力急昇試験を実施することができたが、これは照射試験炉(JMTR)と照射後試験施設(NFD)が隣接していたために輸送が比較的容易であったという物理的な面の寄与も実施を可能とした要因の一つであった。



※:株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
(当時は設計が株式会社日立製作所、製造が日本ニュークリア・フュエル株式会社)

図1 高燃焼度等燃料安全性試験の事業全体のフロー図⁽²⁾

2-2. ATF 開発における照射試験炉と照射後試験施設の役割

前節では国内の照射後試験施設と国内照射試験炉が連携した好例を示したが、現在進められている ATF 開発においても照射後試験施設と照射試験炉が必要である。ATF として国内外で開発されている候補材はこれまでのジルカロイ-UO₂系燃料だけではなく、SiC/SiC や FeCrAl-ODS 等の全く新しい被覆管材や UN 等の新しい燃料材を使用するものも含まれており⁽⁴⁾、基礎的な物性データの取得から必要な場合も多く、当然のことながら照射による物性変化も必要な物性データであり、これまで以上に照射後試験施設と照射試験炉を利用する必要がある。

国内の ATF (被覆管材) の開発状況であるが、概ね照射試験炉、照射後試験施設の両者が必要な段階であり⁽⁵⁾、至近の課題として材料照射試験、模擬燃料棒照射試験及びその照射後試験が必要であることが明確である。しかし、JMTR の廃炉が決定した現状では少なくとも国内だけでの実施は困難となっており、海外照射試験炉の利用を前提とせざるを得ない。

3. 国内照射試験炉と国内照射後試験施設への期待

前章で示した様に、ATF 開発においては至近の問題として材料照射試験、模擬燃料棒照射試験及びその照射後試験が必要であり、そのためには照射試験炉、照射後試験施設の両者が必要であるが、少なくとも照射試験炉としては海外施設を利用せざるを得ない。この状況における短期的、長期的課題を以下に考察する。

(1) 短期的課題

種々の課題があると思われるが、主な課題は照射試験の実施機会が減少することであり、その影響は照射

した燃料・材料の輸送を伴う場合にはより顕著である。特に照射した燃料の輸送を伴う場合には、輸送の費用負担が大きく実施機会も限られるため、結果として実施機会が大幅に減少してしまうことを意味する。なお、材料照射試験の場合、未照射材料を海外照射試験炉に送付し、海外照射試験炉で照射された試験材を国内照射試験後施設に返送して照射後試験を実施することも可能である。しかしながら、照射試験材の国境を跨いだ輸送が必要なため予定通りに実施できない懸念があり、海外照射後試験施設において試験データを採取せざるを得ない場合もある。一方、種々の条件を整えば、海外照射試験炉、海外照射後試験施設を利用することで、より効率的に試験データを採取できるが、これら海外施設の利用のみが選択肢では照射方法や時期についての自由度が低下してしまう。

(2) 長期的課題

短期的課題において述べたが、国内照射試験炉が利用できない状況が続くと照射試験の機会が減少してしまうことに加えて、国内照射後試験施設を利用する機会も減少することになる。この状況が続くと、長期的には国内照射後試験施設における継続的な照射後試験が困難となり、最終的には国内照射後試験施設の維持も困難となる。すなわち、国内照射試験炉の問題は国内照射後試験施設の存続にも密接に繋がっており、国内の照射試験技術・知見が散逸するだけでなく、照射後試験を通じて得られてきた照射後試験技術・知見も散逸してしまうことを意味する。このような状況では、照射燃料・材料に精通した人材を育成することを期待することは困難であり、長く続けられてきた国内軽水炉燃料開発への影響が懸念される。

これら短期的・長期的課題から、高品質の試験データの採取及び試験データ採取を通じた人材育成が可能な国内照射試験炉と国内照射後試験施設の連携を確保することが期待される。その実現（再生）には、国内照射試験後施設が存続している状況を逃すことなく、至近の問題として燃料・材料の照射試験が可能な国内照射試験炉を検討し、長年培ってきた高度な照射試験技術・知見を礎とした新たな国内照射試験炉の復活が望まれる。

4. 参考文献

- (1) 財団法人 原子力安全研究協会、「軽水炉燃料のふるまい」（改訂第5版）、平成25年3月
- (2) 財団法人 原子力発電技術機構、「平成13年度高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書」（BWR高燃焼度燃料 総合評価編）、平成14年3月
- (3) 独立行政法人 原子力安全基盤機構、「平成22年度 高燃焼度燃料破損限界試験成果報告書」、平成24年12月
- (4) OECD/NEA, State-of-the-art report on light water reactor accident-tolerant fuels, NEA No. 7317 (2018)
- (5) S. Yamashita, I. Ioka, Y. Nemoto, T. Kawanishi, M. Kurata, Y. Kaji, T. Fukahori, T. Nozawa, D. Sato, N. Murakami, H. Sato, T. Kondo, K. Sakamoto, K. Kusagaya, S. Ukai, A. Kimura, A. Yamaji, "Overview of accident-tolerant fuel R&D program in Japan", Proceedngs of TopFuel2019, Seattle, WA, Setember 22-27, 2019, 206-216

*Kan Sakamoto¹

¹NFD

材料部会セッション

照射炉利用関連研究開発の現状と国内照射炉の必要性（１）

Domestic Status of Research and Development Relating to Irradiation Tests and Necessity of
Domestic Materials Reactor ~Part I~

(5) RI 製造における国内照射試験炉の必要性

(5) Necessity of Domestic Materials Testing Reactor on Radioisotope Production

*河村 弘¹¹株式会社千代田テクノル

1. はじめに

弊社は、1997年2月の「特殊法人の整理合理化」に関する閣議決定を受け、日本原子力研究所から技術移転され、2000年からRIの製造・頒布を行ってきた。その後、東日本大震災の影響によりJMTR及びJRR-3が停止され、10年以上にわたって海外から輸入してきた。しかしながら、利用してきた国外炉の老朽化、炉利用合理化等による供給停止により、新たな国外炉を探しながら、薄氷を踏むようにして安定供給を継続してきた。この状況を踏まえて、RI製造の視点から国内照射試験炉の必要性について述べる。

2. 国内照射試験炉の必要性

(1) 国外からのRI輸入

- ・短半減期核種の輸入は空輸で行われるが、テロや火山噴火等の自然災害により不安定である。また、長半減期核種の船舶輸入に関しては、運航会社が少なく、専用船に近い運航になる。このように、RI輸送手段の不安定さにより、国外炉からの輸送には大きなリスクが発生している。
- ・RI生産用国外炉の老朽化等によりRIの安定供給が難しくなっている。特に、がん診断に必要な⁹⁹Mo/^{99m}Tcの全世界生産量は2014年頃から順次減少し、10年後には20%以下になる可能性が高い。
- ・RI生産国は自国への供給が最優先である。特に、がん撲滅の特効薬になりえる α 核種の日本への輸入量と需要量のバランスが維持できない状況にある。

(2) 抵抗均一性が高いNTD-Si（Si半導体）の供給

- ・Si単結晶に中性子照射し、³⁰Siを³¹Pに核変換させて製造するn型Si半導体(NTD-Si)は、非常に抵抗均一性が高く、100%輸入されている。このNTD-Siは、パワー半導体への利用が急拡大しそうになってきており、業界全体で需要予測検討が開始されている。このように、材料セキュリティの観点から、NTD-Siの供給は、日本の電器産業にとって死活問題になる可能性がある。

3. まとめ

現在、RI製造に関して下記のような課題がある。

- ① 輸送手段の不安定さにより、国外炉からの輸送に大きなリスクが発生する。
- ② 国外炉の老朽化等により、RIの安定供給が難しくなっている。特に、がん診断に必要不可欠な⁹⁹Mo/^{99m}Tcの全世界の生産量は、2014年頃から順次減少し、10年後には20%以下になる可能性が高い。
- ③ RI生産国は自国への供給が最優先である。特に、がん撲滅の特効薬になりえる α 核種の日本への必要量の供給は、困難になると思われる。
- ④ 100%輸入されているNTD-Siは、抵抗均一性が他のSi半導体より高いため、パワー半導体への利用の急成長したら、材料セキュリティの観点から、NTD-Siの供給は日本の電器産業にとって死活問題になる。

上記課題を解決する唯一の方策は、国内に照射試験炉を速やかに建設することである。

*Hiroshi Kawamura¹¹Chiyoda Technol Corporation

(Wed. Mar 17, 2021 1:00 PM - 2:30 PM Room K)

[1K_PL06] Discussion

Chair: Mitsuhiro Kodama¹ (1. NFD)

軽水炉、高速炉、核融合炉材料の研究開発において、照射試験炉を用いた照射試験は不可欠である。これまで国内の照射試験炉として利用されてきたJMTRの廃止決定を受け、新たな照射試験炉の設置が求められている。本企画セッションでは、JAEAにおける新たな照射試験炉の検討状況をはじめ、国内大学や企業における材料照射試験に関わる研究開発、アイソトープ製造分野における現状や課題について報告し、国内照射試験炉の喫緊の必要性を広く周知するとともに、早期設置に向けた議論を行う。

Planning Lecture | Technical division and Network | International Nuclear Information Network

[1L_PL] University-driven Innovation to be pursued for realizing “ Society 5.0”

Chair: Yukinori Hirose (TOSHIBA ESS)

Wed. Mar 17, 2021 1:00 PM - 2:30 PM Room L (Zoom room 12)

[1L_PL01] University-driven Innovation to be pursued for realizing “ Society 5.0”

*Shuichi Sakamoto¹ (1. MEXT)

海外情報連絡会セッション

Society5.0 時代に求められる大学発イノベーション

University-driven Innovation to be pursued for realizing “Society 5.0”

*坂本 修一¹

文部科学省

1. 政策的背景

第5期科学技術基本計画においては、サイバー空間とフィジカル空間（現実社会）が高度に融合した「超スマート社会」の実現を目指した一連の取組が「Society 5.0」として位置付けられている。言い換えれば、生産活動や社会生活の状態をセンシングによってリアルタイムで把握し、AIによって解析して高度に最適化、自動化していく取組であるが、このような取組は急速に進展し、経済社会の構造を大きく変えつつある。経済界においては、「Society 5.0」を『「創造社会」すなわち「デジタル革新と多様な人々の想像・創造力の融合によって、社会の課題を解決し、価値を創造する社会』と捉えられている。

このような状況の中で、学問が取り組むべき重要な社会課題は数多く存在する。近年、様々な技術分野のデジタルトランスフォーメーションを先導する人材の育成をはじめ、本格的な産学官連携が重要であるという議論が盛んに行われている。ますます高度化する知識社会の中で、大学あるいは学問のあり方も変わらなければならないという要請がますます強くなっている。

2. 大学の機能に求められる変化

2006年の教育基本法改正により、我が国においても、大学の機能について、教育と研究に加えて、それらの成果の社会還元という第3の機能が加わった。大学は学術論文の発表だけではなく、学術的な成果をもとに価値を生み出すところまで実践するよう活動領域を拡張する必要があるのではないかということが、産学官の関係者が集う様々な場で議論されている。

したがって、伝統的な学問分野の再構成を行って新しい領域を開拓し、最先端の学術的知識を基にイノベーションを起こすとともに、さらなる開拓の芽となるような学術的課題を探索していく活動を専門分野を超えて展開していくことは、産学官連携、産業競争力強化のみならず、学問の発展や新領域の人材育成を含めた大学の使命を果たすうえで非常に重要な課題となっているといえるのではないだろうか。

近年の産学官連携の動向を見ても、例えば企業の研究開発部門と大学との関係について、研究成果や技術を企業がどう取り込むかだけでなく、企業が将来展開しようとする事業戦略に必要なシーズ、コンセプトを共同でつくることを企業側は求めはじめており、さらに製造部門や事業部門まで、大学に大きな役割が期待されている。第一線の研究者の研究成果をもとにスタートアップが大学から生み出されて企業のアライアンスの先となる、そういった新たなビジネス創出の重要な部分を担っていくところまで、学問の役割の進化が必要となっていると言えるのではないだろうか。

3. 海外の状況と原子力分野への示唆

米国では、上記のように産学共同研究を構造化し、その中で博士人材も育成する取り組みが長年継続されている。産学共同による研究人材育成は英国においても重視されており、産学官連携の枠組みの下で開発された人材育成フレームワークによって伝統的な学問分野を超えた構想力、創造性を培う取り組みが進められている。産学共同による研究・人材育成の一体的推進は、欧米主要国の中で大きな流れとなっており、様々な学問分野での新しいサイエンスの形成（例えば核融合）において特に重要になるものと考えられる。

*Shuichi Sakamoto¹¹Ministry of Education, Sports, Culture, Science and Technology