

Thu. Sep 6, 2018

Room A

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

[2A_PL] Recent development of environmental monitoring method for substances derived from Fukushima Daiichi accident

Chair:Jun Kawarabayashi(Tokyo City Univ.)
1:00 PM - 2:30 PM Room A (B11 -B Building)

[2A_PL01] Radioactive particles emitted at the 1FNPS accident

*Yukihiko Satou¹ (1. JAEA)
4:20 PM - 4:35 PM

[2A_PL02] Monitoring method for radioactive cesium in marine sediment after Fukushima NPP1 accident

*Seiki Ohnishi¹ (1. NMRI)

[2A_PL03] Environmental radiation distribution at seven years after the accident and new technology development

*Yukihisa Sanada¹ (1. JAEA)

Room B

Planning Lecture | Joint Session | Joint Session

[2B_PL] Compact Accelerator Neutron Source and Nuclear Data Needs

Chair:Noriyosu Hayashizaki, Tatsuya Katabuchi(Tokyo Tech)
1:00 PM - 2:30 PM Room B (A21 -A Building)

[2B_PL01] New neutron spectrum formulation of Be+p reaction for design and applications of compact neutron sources

*Yasuo Wakabayashi¹ (1. RIKEN)

[2B_PL02] Needs for neutron source and nuclear data in developments of an active neutron non-destructive system

*Yosuke Toh¹ (1. JAEA)

[2B_PL03] Industrial applications (mainly medical) of small accelerators and nuclear data for those applications

*Takahiro Tadokoro¹ (1. Hitachi)

Room D

Planning Lecture | Technical division and Network | Nuclear Fuel Division

[2D_PL] Domestic and Overseas Progress on

Molten Salt Reactor Development

Chair:Takayuki Terai(Univ. of Tokyo)
1:00 PM - 2:30 PM Room D (A32 -A Building)

[2D_PL01] Progress in the World

*Yuji Arita¹ (1. Univ. of Fukui)

[2D_PL02] Progress in Japan

*Michio Yamawaki¹ (1. Univ. of Fukui)

[2D_PL03] Progress in China

*Xu Hongjie¹, Xia Xiaobin¹ (1. SINAP)

Room F

Planning Lecture | Technical division and Network | Nuclear Non-Proliferation, Safeguard, Nuclear Security Network

[2F_PL] Present Status of R&D Activities for Nuclear Non-proliferation, Safeguards and Security

Chair:Kazunori Suda(JAEA)
1:00 PM - 2:30 PM Room F (A36 -A Building)

[2F_PL01] Active Neutron NDA Technology

Development for Nuclear Non-proliferation, Safeguards, and security Purpose

*Mitsuo Koizumi¹ (1. JAEA)

[2F_PL02] Development of Cyber Security Target

Identification Method for Nuclear Facilities

*Kazuyuki Demachi¹ (1. Univ. of Tokyo)

Room G

Planning Lecture | Joint Session | Joint Session

[2G_PL] Current status and issues on the implementation of clearance (2)

Chair:Itsumasa Urabe(Fukuyama Univ.)
1:00 PM - 2:30 PM Room G (A37 -A Building)

[2G_PL01] Overview of the revision of the Safety

Guide RS-G-1.7 and its issues in discussion

*Takatoshi Hattori¹ (1. CRIEPI)

[2G_PL02] Concept of restricted use of contaminated

rubbles in the Fukushima Daiichi NPS

*Taro Shimada¹ (1. JAEA)

[2G_PL03] Reuse of useful elements recycled from spent nuclear fuels, and concept of their clearance

*Tomoyuki Takahashi¹ (1. Kyoto Univ.)

Room H

Planning Lecture | Technical division and Network | Advanced Reactor Division

[2H_PL] Report from Fast Reactor Strategic Roadmap Committee

Chair: Akira Yamaguchi (Univ. of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM Room H (B32 -B Building)

[2H_PL01] Scope of Fast Reactor Strategic Roadmap Committee

*Naoto Kasahara¹ (1. Univ. of Tokyo)

[2H_PL02] Long-Term Perspective: Significance of Fast Reactor Development

*Yukihide Mori¹ (1. MFBR)

[2H_PL03] Short-Term Perspective: Technology Succession and Safety Improvement Based on TEPCO Fukushima Dai-ichi Accident

*Takaaki Sakai¹ (1. Tokai Univ.)

[2H_PL04] Discussion

Room K

Planning Lecture | Joint Session | Joint Session

[2K_PL] Issues for security measures for univer

Chair: Nobuaki Sato (Tohoku Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room K (B41 -B Building)

[2K_PL01] Opening Remarks

*Mitsuru Uesaka¹ (1. Univ. of Tokyo)

[2K_PL02] Current status and issues of security measures at university nuclear fuel facilities

*Toshiaki Hiyama¹ (1. Kyushu Univ.)

[2K_PL03] Current status and issues of security measures at university RI facilities

*Tsutomu Ohtsuki¹ (1. Kyoto Univ.)

[2K_PL04] Subjects and prospects of security measures for facilities other than commercial reactors

*Toshiaki Hiyama¹, *Tsutomu Ohtsuki², *Mitsuru Uesaka³ (1. Kyushu Univ., 2. Kyoto Univ., 3. Univ. of Tokyo)

[2K_PL05] Closing Remarks

*Masayoshi Uno¹ (1. Fukui Univ.)

Room L

Planning Lecture | Board and Committee | Public Information Committee

[2L_PL] How to disseminate information to society as AESJ

Chair: Reiko Nunome (NUMO)

1:00 PM - 2:30 PM Room L (D12 -D Building)

[2L_PL01] The current status of disseminating information through mass media and the future

*Mito Sagai¹ (1. CRIEPI)

[2L_PL02] The current state of the positional statement and the future

*Ryuichi Yamamoto¹ (1. JAEA)

Room N

Planning Lecture | Technical division and Network | Fusion Engineering Division

[2N_PL] Education and human resources development in the field of fusion engineering and science

Chair: Satoshi Fukada (Kyushu Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room N (D23 -D Building)

[2N_PL01] Expectation of education and human resources in fusion engineering and science in universities

*Noriyasu Ono¹ (1. Nagoya Univ.)

[2N_PL02] Expectation of education and human resources in fusion engineering and science in companies

*Akira Ozaki¹ (1. Toshiba Energy Systems & Solutions)

[2N_PL03] Present status of education and human resources in nuclear engineering

*Nozomu Fujimoto¹ (1. Kyushu Univ.)

Room O

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

[2O_PL] Nuclear Energy in Poland

Chair: Yukio Tachibana (JAEA)

1:00 PM - 2:30 PM Room O (D25 -D Building)

[2O_PL01] Nuclear Energy in Poland

*Kazuhiko Kunitomi¹ (1. JAEA)

Room P

Planning Lecture | Technical division and Network | Nuclear Safety Division

[2P_PL] Learning from Progress of Fukushima Dai-ich Nuclear Accident Clarification

Chair: Naoto Sekimura (Univ. of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM Room P (E21 -E Building)

- [2P_PL01] Technical Bases of Severe Accident Sequence Groups including Fukushima Accident
 - *Mitsuhiro Kajimoto¹ (1. NRA)
- [2P_PL02] Classification of Resolved/Unresolved Issues and Implications for Nuclear Safety Research
 - *Akio Yamamoto¹ (1. Nagoya Univ.)
- [2P_PL03] Lessons for Ensuring the Effectiveness of Severe Accident Measures
 - *Yasunori Yamanaka¹ (1. CRIEPI)

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

[2A_PL] Recent development of environmental monitoring method for substances derived from Fukushima Daiichi accident

Chair: Jun Kawarabayashi (Tokyo City Univ.)

Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room A (B11 -B Building)

[2A_PL01] Radioactive particles emitted at the 1FNPS accident

*Yukihiko Satou¹ (1. JAEA)

4:20 PM - 4:35 PM

[2A_PL02] Monitoring method for radioactive cesium in marine sediment after Fukushima NPP1 accident

*Seiki Ohnishi¹ (1. NMRI)

[2A_PL03] Environmental radiation distribution at seven years after the accident and new technology development

*Yukihisa Sanada¹ (1. JAEA)

福島第一事故由来物質に対する環境モニタリング手法の最先端

Recent development of environmental monitoring method for substances derived from Fukushima Daiichi accident

福島第一原発事故で放出した放射性粒子 —不溶性セシウム粒子の概要

Radioactive particles emitted at the 1FNPS accident -Overview of insoluble Cesium particle-

*佐藤 志彦¹

¹ 日本原子力研究開発機構

1. 福島第一原発事故と放射性粒子

福島第一原子力発電所事故では、大量の放射性物質が環境中に放出したが、チェルノブイリ原発事故のような炉心の大気開放は起きておらず、核燃料を主とした放射性粒子の放出はないものと考えていた。しかし2013年にAdachiらによって、大量のセシウム(Cs)を取込んだ放射性粒子が報告され、Cs-bearing particle、不溶性セシウム粒子などの名称でその存在が認知されるようになった。この想定になかった未知の放射性粒子に対し、様々なバックグラウンドを持つ研究者が、物性、微量元素、そして生成過程に至る解明を試みている。

2. 不溶性セシウム粒子の特徴

不溶性セシウム粒子の最大の特徴は主成分がケイ酸化合物であることで、これまでに2種類の不溶性セシウム粒子が見つかっている。Cs 同位体比(¹³⁴Cs/¹³⁷Cs)および試料採取の行われた場所の特徴から、1号機と2号機由来であることが特定されており、発見された順番に2号機由来を Type A、1号機由来を Type B と呼称している。Type A は含有する Cs 濃度が高く、Cs が 10wt%に達する粒子も存在するため、電子顕微鏡に付帯するエネルギー分散型 X 線分析(EDS)で Cs を含む粒子として検出するところが可能である。また球状の粒子も多く見られることからセシウムボールと呼ばれることもある。これまでに見つかった Type A は採取した場所にも依存するが、数マイクロメートルの粒子が多い。これは水蒸気的环境放出のような比較的穏やかな現象で放出したためと推定される。一方、Type B は水素爆発に伴って放出したため、粒子の大きさも数百マイクロメートルに達する物が多く、肉眼で確認できることから GM サーベイメーターを使用して、環境試料から分離することが可能である。また Type B は粒径が大きいが、単位体積あたりの放射能(比放射能)は Type A に比べ小さく、EDS で Cs を検出することが困難なため、EDS に比べ検出限界の低いシンクロトロン放射光を使用した蛍光 X 線分析により粒子内の Cs を確認している。粒子の内部構造にも大きな違いが認められ、Type A は一部例外があるものの、基本的に大多数の元素が密に詰まり、均一な分布を示していることから、一度、全ての元素が溶融し凝縮する過程があったと推定される。一方、Type B は内部に無数の気泡が存在し、さらに構成元素が不均一に分布しており、2種類の粒子の生成過程が異なることを示唆している。

3. 不溶性セシウム粒子の原料供給源

複数の Type B 粒子の表面に数十ミクロンほどの太さの繊維状のケイ酸化合物が付着していることが確認された。繊維は粒子の表面に溶け込むように付着し、元素組成も粒子とほぼ一致していた。繊維の太さなどの情報から これらは1号機原子炉建屋周辺で使用されていた断熱材の可能性が高く、炉心から何らかの放出経路を経て Cs が断熱材に吸着し、水素爆発の熱と爆風により微粒子化して飛散したものと考えられる。一方、2号機から放出した Type A については諸説あるものの、生成過程やケイ酸の供給源を裏付ける決定的な証拠は得られておらず今後の解明が待たれる。

*Yukihiko Satou¹

¹Japan Atomic Energy Agency,

放射線工学部会セッション

福島第一事故由来物質に対する環境モニタリング手法の最先端

Recent development of environmental monitoring method for substances derived from Fukushima Daiichi accident

福島第一原子力発電所事故に伴う海底のモニタリング手法

Monitoring method for radioactive cesium in marine sediment after Fukushima NPP1 accident

*大西 世紀¹, 浅見 光史¹, 鎌田 創¹

¹海上技術安全研究所

1. 背景

2011年3月東日本大震災により福島第一原子力発電所事故が発生し、環境中に多量の放射性セシウムが放出された。その後、海水中の放射性セシウム濃度は原子力発電所前面における大半の海域で検出限界以下になったが、海底土中の放射性セシウムが残存したため、海底土のモニタリングを実施することとなった。本講演ではこれらのモニタリング手法についての解説を行う。

2. 測定装置と手法

海底土中放射性セシウムに関して、モニタリングの目的に応じて以下の3つの手法による測定を行った。

2-1. マルチコアサンプラーによる採泥サンプル測定

マルチコアサンプラーを用いて複数地点において柱状採泥を行い、層ごとの放射性セシウム濃度測定を行った。これは定点観測というだけではなく、後述の曳航式スペクトロメータによる測定結果の定量化のためにも用いられる。

2-2. 曳航式スペクトロメータによる広域分布測定

2-1における採泥調査は限られた地点の計測となる。広域分布を把握するために、曳航式スペクトロメータを導入し、東北沿岸海域での測定を行った。曳航式スペクトロメータでは毎秒1回波高分布が内蔵ロガーに記憶され、揚収後の解析で光電ピーク計数率を取得し、採泥サンプルの測定結果を考慮して計数率(cps)から放射性セシウム濃度(Bq/kg)へと換算している。

2-2. ROVによる高位置分解能測定

曳航式スペクトロメータでは操船の限界上2ノット未満での曳航が難しく、曳航速度の下限が位置分解能の限界となる。さらに高い分解能が要求される異常分布の詳細調査のため、操船速度の下限が存在しないROVにスペクトロメータを装着し、位置分解能の高い測定を行った。このとき粒子状放射性物質の存在が予想されるため、ROVには吸引式採泥器を導入し、狭いスポットでの放射性物質分布測定と粒子状放射性物質の取得を同時に試みた。

3. 結果

測定の結果、地形によっては放射性セシウム濃度が周囲より高くなる分布(アノマリ)の存在が明らかになった。また原子力発電所近傍では放射性セシウム粒子の存在が確認された。複数年の結果を比較した場合、大半の海域では放射性物質濃度は漸減傾向にあることがわかった。

謝辞

本研究の一部は、平成25年から平成27年度に実施された原子力規制庁受託研究「海域における放射性物質の分布状況の把握に関する調査研究」の成果である。

*Seiki Ohnishi¹, Mitsufumi Asami¹ and So Kamada¹

¹National Maritime Research Institute

放射線工学部会セッション

福島第一事故由来物質に対する環境モニタリング手法の最先端

Recent development of environmental monitoring method for substances derived from Fukushima Daiichi accident

事故 7 年後の福島の放射線分布状況及び環境モニタリング技術の最前線

Environmental radiation distribution at seven years after the accident and new technology development

*眞田幸尚¹

¹原子力機構, 福島環境安全センター

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故から 7 年が経過し、現在でも周辺環境では様々なモニタリングが実施されている。主な環境中でのモニタリングは原子力規制庁の受託事業として実施されており、有人のヘリコプターを用いた航空機モニタリング、無人ヘリを用いた発電所周辺のモニタリング、車両を用いたモニタリング及びサーベイメータを用いた定点測定等である。これらの測定結果は、除染範囲の決定や避難指示区域の解除等の政策の意思決定に利用される重要な情報を提供しているが、実際に帰還する住民のニーズとしては自宅の敷地内における放射性セシウムの存在状況や、微小なホットスポットの位置情報などより詳細な情報が求められている。本発表では、大規模におこなわれている放射線モニタリングの情報を整理するとともに事故直後からの線量率の変化傾向の考察および住民のニーズに応えるための地形や構造物を考慮した無人機を用いた放射線計測技術の新技术について紹介する。

2. 大規模モニタリングと環境半減期の評価

上記で示した政府の行う大規模なモニタリング結果は、事故 7 年の間蓄積され、それらの測定結果を比較することによって変化傾向に関する情報を得ることができる。また、測定手法毎に対象物が異なるので、相互に比較することも効果的である。例えば、車両サーベイは道路上の測定結果であることから他のモニタリング結果と比較すると空間線量率は低くなる。一方、有人ヘリの測定結果は森林も含めて測定できない場所はないが、地上を平面モデルとして換算していることから、地上での測定と比較すると高めに評価されやすい。事故後からの変化傾向の評価は、複数の指数関数での近似が用いられる。実際には、近似曲線の傾きを環境半減期と定義し、早い成分と遅い成分に分けて評価される。一例として、発電所から 80 km 圏内の航空機モニタリングの結果から環境半減期を求めると、早い成分が 0.61 年、遅い成分が 57 年と評価されている。このような情報は、将来の線量率分布の変化や被ばく量の予測に有効である。

3. 放射線計測技術へのニーズと新技术

前述のように現在の放射線測定へのニーズはより精密な測定に変化してきており、ハード面やソフト面で様々な開発・改善が行われている。ここでは、測定された放射線結果を補正する際の計算シミュレーション等を駆使した手法について紹介する。有人ヘリや無人機を用いた空からのモニタリング情報は、動きながら計測することから 1 地点における測定情報の不確かさは大きいが多方向からの放射線計測情報を得ることができる。このような複数方向からの放射線情報を元に強度分布（画像）を構築する方法は、PET などに代表される医療放射線計測技術を通ずる。ここでは、医療放射線計測技術の画像再構成技術として使われている ML-EM (Maximum Likelihood - Expectation Maximization) 法を空からの測定データの解析に適用した例とその課題について報告する。この手法は、空からだけでなくすべての環境中での放射線計測手法に適用なのであること、技術革新の著しい写真測量やレーザ測量による 3 次元測量手法と相性が高いことから様々な応用が期待できる。

*Yukihisa Sanada¹

¹Japan Atomic Energy Agency, Fukushima

Planning Lecture | Joint Session | Joint Session

[2B_PL] Compact Accelerator Neutron Source and Nuclear Data Needs

Chair: Noriyosu Hayashizaki, Tatsuya Katabuchi (Tokyo Tech)

Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room B (A21 -A Building)

[2B_PL01] New neutron spectrum formulation of Be+p reaction for design and applications of compact neutron sources

*Yasuo Wakabayashi¹ (1. RIKEN)

[2B_PL02] Needs for neutron source and nuclear data in developments of an active neutron non-destructive system

*Yosuke Toh¹ (1. JAEA)

[2B_PL03] Industrial applications (mainly medical) of small accelerators and nuclear data for those applications

*Takahiro Tadokoro¹ (1. Hitachi)

核データ部会、加速器・ビーム科学部会合同セッション [「シグマ」特別専門委員会共催]

小型加速器中性子源と核データのニーズ

Compact Accelerator Neutron Source and Nuclear Data Needs

(1) 小型中性子源のための p-Be 中性子スペクトル関数

及び応用利用から核データに対するニーズ例

(1) New neutron spectrum formulation of Be+p reaction for design and applications of compact neutron sources

*若林 泰生¹, 竹谷 篤¹, 橋口 孝夫¹, 池田 義雅¹, 小林 知洋¹,
王 盛², 严 明飞², 原田 正英³, 池田 裕二郎^{1,3}, 大竹 淑恵¹
¹理研, ²西安交通大学, ³J-PARC センター

物作り現場における非破壊診断技術開発などのニーズに応えることを目的とした RANS[1]は、7MeV 陽子パルスをも Be に入射し、p-Be 反応でパルス中性子を発生させる。中性子は減速されない連続高速中性子成分と、モデレーターで熱領域まで減速した熱中性子成分の混在スペクトルで測定系に引き出し、実験を行う。研究や技術開発を行う上で、p-Be による発生中性子(収量、角度分布、スペクトル)は基本情報として重要である。しかしながら、Be の低エネルギー陽子入射中性子発生核データは不十分、あるいは適切に計算コードに組み込まれていないため、放射線輸送シミュレーション計算では大きな不確実性がある。そこで、RANS 中性子スペクトル評価精度向上へ向けて、独自の p-Be 中性子発生関数を作成することを提案した。

開発は、エネルギー損失が数 keV~数十 keV 程度の薄い Be 標的および 20 MeV 以下の低エネルギー陽子を用いた p-Be に関する報告済みの発生中性子(全断面積、角度分布、エネルギースペクトル)の実験データを EXFOR ライブラリーから収集し、それらのデータを入射陽子エネルギー(Ep)でフィッティングすることで、12 MeV 以下の Ep に関して、発生中性子を再現する独自関数を完成させた。独自関数の発生中性子源としての妥当性評価のため、標的中のエネルギー損失を SRIM コード[2]で求め、モンテカルロ計算で Ep および標的厚を引数とした独自関数による発生中性子を求めた。角度依存エネルギースペクトルに関する厚い Be 標的の実験データ(Ep = 4 MeV, 12 MeV)および従来コードを用いた結果、並びに、RANS での In(n,n') 反応率実験と比較した。その結果、本独自関数は従来コードに比べ実験値をより正確に再現しており、p-Be を用いた小型中性子源における発生中性子評価に有用であることを示した[3]。

RANS では、中性子回折やイメージング実験技術を適用した鉄鋼集合組織の研究、鉄鋼材料錆の状態可視化などの研究とともに、現場のインフラコンクリート構造物の内部状態の直接および反射イメージング、非破壊元素分布分析など非破壊診断技術の開発を行い、それに適した可搬型小型中性子源システム開発も進めている。今回開発した中性子発生関数を用いて上記研究の再評価を行うとともに RANS の標準とした。本発表では独自関数作成を軸に、RANS での研究開発、そこから見えた核データのニーズを紹介する。

参考文献

- [1] Y. Otake, et al., J. Dis. Res. vol.12, No.3, pp.585-592 (2017).
- [2] J.F. Ziegler et al, The stopping and Range of Ions in Solids, Pergamon Press, 1985
- [3] Y. Wakabayashi et al., J. Nucl. Sci. Technol., vol.55, No.8, pp.859-867 (2018)

*Yasuo Wakabayashi¹, Atsushi Taketani¹, Yoshimasa Ikeda¹, Takao Hashiguchi¹, Tomohiro Kobayashi¹, Sheng Wang², Mingfei Yan², Masahide Harada³, Yujiro Ikeda^{1,3} and Yoshie Otake¹

¹RIKEN, ²Xi'an Jiaotong Univ., ³J-PARC Center

核データ部会、加速器・ビーム科学部会合同セッション 「シグマ」 特別専門委員会共催]

小型加速器中性子源と核データのニーズ

Compact Accelerator Neutron Source and Nuclear Data Needs

(2) アクティブ中性子非破壊測定装置開発における中性子源と核データのニーズ

(2) Needs for neutron source and nuclear data in developments of an active neutron non-destructive system

*藤 暢輔¹, 前田 亮¹, 土屋 晴文¹, 大図 章¹, 古高 和禎¹, 北谷 文人¹, 米田 政夫¹

¹ 原子力機構

1. 緒言

欧州委員会 - 共同研究センター (EC-JRC) と原子力機構との共同研究により、これまでの非破壊測定技術を用いることができない高線量核燃料物質のための非破壊測定技術開発を実施している^[1]。本研究開発では、小型中性子源を用いた 4 つのアクティブ中性子法 (ダイアウェイ時間差分析法: DDA、中性子共鳴透過分析法: NRTA、即発ガンマ線分析法: PGA、遅発ガンマ線分析法: DGA) を組み合わせ、それぞれの特長を生かすことによって高線量核燃料物質に対応できる非破壊測定法の確立を目指している。

2. 中性子源と核データのニーズ

平成 30 年度から開始したフェーズ II では、上述の 4 つのアクティブ中性子法の高度化を行うとともに、原子力機構燃料サイクル安全工学研究施設において、3 つの分析手法 (DDA, PGA, NRTA) を組み合わせた総合非破壊測定装置 (図 1) を開発する予定である。この 3 つの分析手法は中性子を用いるという点では共通しているが、DDA はパルス化された高速中性子、PGA は連続の熱中性子、NRTA はパルス化された白色中性子と、通常はそれぞれ異なる性質の中性子を用いている。市販されている小型中性子源は、3 つの分析手法からの要求を完全に満足しないため、測定装置全体の総合的な性能を勘案して DT 中性子源を採用している。装置性能をさらに向上させるためには、 10^9 neutrons/s 以上の中性子強度、 $1\mu\text{s}$ 以下のパルス幅を持つ小型中性子源の開発が望まれる。

本研究開発においては PHITS 等を用いたシミュレーションによる検討が不可欠であるが、一部の計算値において実験値との乖離が大きくなることが分かっている。例えば、DDA では問いかけ中性子として高速中性子を用い、試料自身やモデレータで高速中性子を減速させて熱化し、核物質に核分裂反応を起こさせる。そのため、シミュレーションに用いている核データのなかでも熱中性子散乱則 $S(\alpha, \beta)$ が乖離の主な原因であると考えている。また、NRTA では、実験で得られる中性子透過スペクトルに対し、共鳴パラメータから得られるデータを用いてフィッティングすることで分析値を得るが、一部の核種で、その共鳴パラメータに起因すると思われる測定精度の悪化が見られる。今後の中性子を用いた非破壊分析法開発や、その高精度化のための研究開発等においては、それらの核データの誤差の低減が望まれる。

謝辞: 本研究開発は、文部科学省「核セキュリティ強化等推進事業費補助金」事業の一部である。

参考文献 [1] M. Kureta 他、Proc. 37th ESARDA Symposium, Manchester, UK, 111-120, (2015)

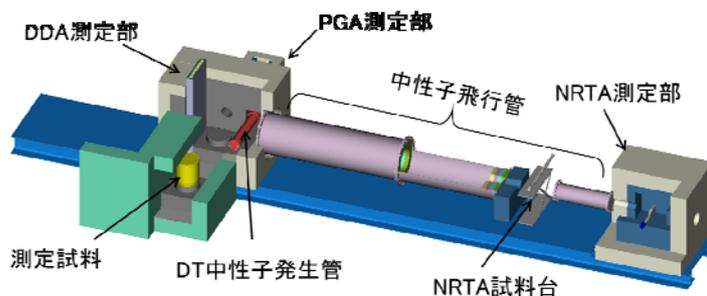


図 1 総合非破壊測定装置の概念図

*Yosuke Toh¹, Makoto Maeda¹, Harufumi Tsuchiya¹, Akira Ohzu¹, Kazuyoshi Furutaka, Fumito Kitatani¹, Masao Komeda¹
¹JAEA

核データ部会、加速器・ビーム科学部会合同セッション [「シグマ」特別専門委員会共催]

小型加速器中性子源と核データのニーズ

Compact Accelerator Neutron Source and Nuclear Data Needs

(3) 医療応用を中心とした小型加速器の産業応用と核データ

(3) Industrial applications (mainly medical) of small accelerators and nuclear data for those applications

*田所 孝広

日立製作所 研究開発グループ

1. はじめに

加速器は、電子線あるいはイオンビームの発生を電源のON/OFFにより容易に制御できること、及び、各種小型加速器が開発されていることから、様々な産業分野で活用されている。日立では、これまで医療応用を中心とした小型加速器の産業応用に関する検討を進めており、本講演ではその内容を報告する。検討においては、実験とシミュレーションが必須であり、各種核データは重要である。

2. 小型電子線形加速器利用医療用核種製造システムの検討

診断用核種として広く使用されているテクネチウム 99m(Tc-99m)は、親核のモリブデン 99(Mo-99)からの分離精製により製造されているが、現在、Mo-99の9割以上は、世界に6カ所ある研究用原子炉で製造されており、日本は、その100%を輸入に依存している。また、海外研究炉のうち3カ所が建設から50年以上、2カ所が40年以上経っており、近年、老朽化が問題となっている。上記状況を受け、各種小型加速器を用いたMo-99の製造システムが検討されている。

日立では、京都大学と協力して、小型で低製造コストが期待される電子線形加速器を用いたMo-99/Tc-99mの製造システムについて検討を進めている。

図1に光子と原子核の反応を示す[1]。比較的lowエネルギーの光子において、巨大共鳴領域と呼ばれる反応断面積が大きい領域があり、核種製造反応として利用可能である。電子線形加速器を利用したMo-99の製造には、電子が重い元素に衝突した時に生成する制動放射線とMo-100との反応であるMo-100(γ, n)Mo-99を用いる。図2に、Mo-99/Tc-99m製造量の評価結果の一例を示す。加速エネルギー35MeV、加速電流値1mAのシステムにおいて、1340GBqのMo-99を製造でき、3システムで国内需要を賄うことが可能である。原料であるMo-100の部分を用いた他の元素に交換することで、他の医療用核種の製造が可能となり、システムの付加価値が向上すると考えている。今までに、診断と治療を同時に可能な銅67(Cu-67)、PET診断用核種としてのゲルマニウム68/ガリウム68(Ge-68/Ga-68)等の医療用核種に関して、実験とシミュレーションを合わせた製造量評価を進めている[2]。

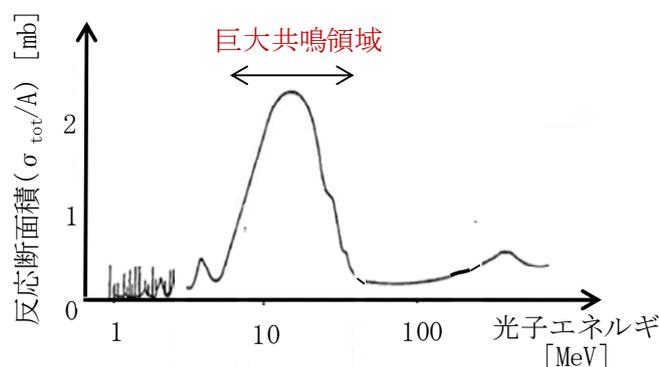


図1 光子と原子核との反応

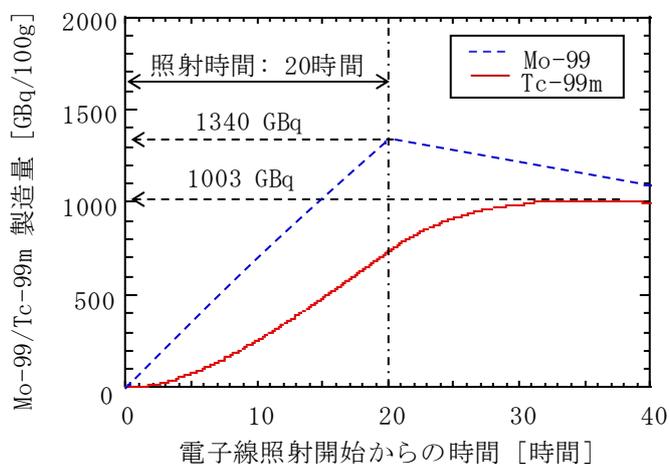


図2 Mo-99/Tc-99m製造量評価結果の一例

3. 小型陽子線形加速器のホウ素中性子捕捉療法(BNCT)への適用

小型加速器中性子源の有力な応用先に、ガン治療法である BNCT がある。BNCT は、悪性腫瘍に選択的に集積したホウ素化合物に中性子を照射し、ホウ素と中性子との核反応で生成する α 線とリチウムによって細胞レベルで悪性腫瘍を死滅させる治療法である。従来原子炉中性子源が必要であったため一般的な治療法ではなかったが、病院に設置可能なサイクロトロンを利用した装置が開発されており、近年、治療適用の広がりを見せている。現在 BNCT においては、ホウ素薬剤であるパラボロノフェニールアラニン(BPA)に陽電子放出核種である F-18 を付加した薬剤(F-18-BPA)を用いて、PET によるホウ素薬剤濃度の患部への集積特性を事前に評価し、患者が BNCT に適しているかどうかを判定している。そこで、PET 用放射性核種製造と BNCT 用中性子発生との共用が可能なシステムであればメリットが大きいと考え、PET 用薬剤製造に適した比較的低エネルギーである 11MeV の陽子線形加速器の BNCT への適用を検討した[3]。図 3 にシステムの一部を示す。中性子発生用ターゲットとしてベリリウム 9(Be-9)を用いることで、3mA の加速電流値において、原子炉中性子源と同等の治療が可能である。

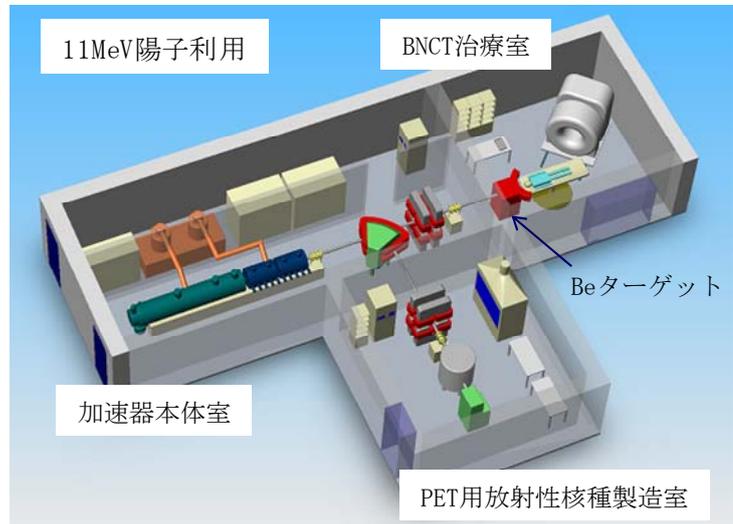


図3 小型陽子線形加速器を用いたシステムの一部

4. 中性子発生管の産業応用

中性子発生管は、トリチウム(T)と重陽子(D)、または、重陽子(D)と重陽子(D)との核融合反応によって中性子を発生させる装置であり、海外では、主に油田探査用として使用されている。小型で安価であることから、様々な産業応用が考えられ、日立では、今まで、化学プラントの外表面腐食検査用水分計や、危険物検知装置への適用を検討している。

4-1. 中性子水分計

化学プラントの塔(反応塔、蒸留塔、抽出塔等)及び配管類は、省エネルギー対策のために保温材で断熱されている。屋外設備のため、保温材の表面は亜鉛メッキ鋼等でカバーされているが、一部隙間からの雨水侵入等により保温材下の等及び配管材の外表面腐食が進行する。そこで、直接外部から錆の状態を調べるため点検と補修作業を計画的に実施し、設備の安全確保に努めている。しかし、カバー及び保温材の撤去作業が必要であり、検査補修に関する費用が大きい。また、検査補修時間も長くなってしまふことから、プラント稼働状態での非破壊診断技術の開発が望まれている。外表面腐食は、塔及び配管材外表面とカバー間の保温材部分に水分が無いところでは起こっていないことから、プラント稼働

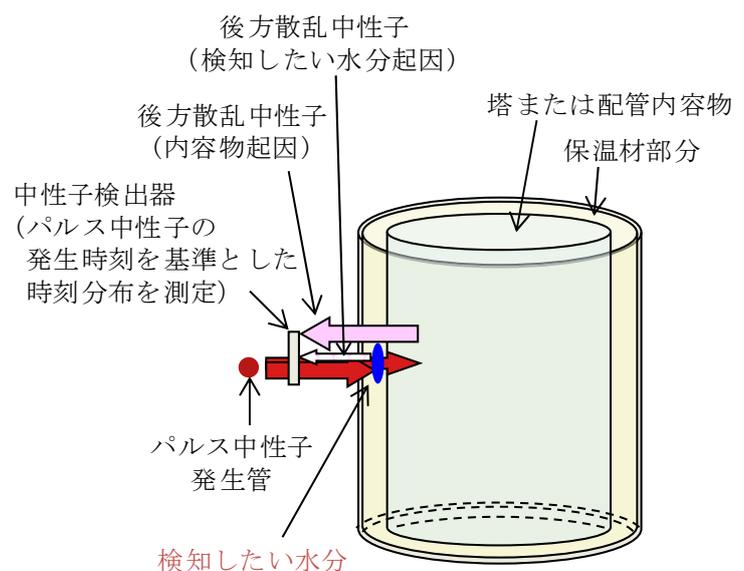


図4 パルス中性子発生管を用いた水分検知の概要

状態でこれらの水分を非破壊で検知できれば、点検補修に関する費用を大幅に低減できる。しかし、プラント稼働中は、塔及び配管内容物からのバックグラウンドが大きという課題があった。その解決法の一つとして、日立パワーソリューションズと協力して、パルス中性子発生管の適用を検討してきた。図4にパルス中性子発生管を用いた水分検知の概要を示す。パルス中性子発生時刻を基準とする後方散乱中性子の時刻分布を測定することで、検知したい水分起因の後方散乱中性子に対する内容物起因の中性子の割合を低減させることができ、水分検知性能を向上させることが可能である[4]。

4-2. 危険物検知

爆発物、薬物等の危険物は、荷物などに隠ぺいされて運搬されることが多いことから、その検知のための各種手法が開発されており、荷物を開けずに検査する手法として、X線透過及びCT装置が空港及び税関等に導入されている。中性子は、透過能力が高い、元素分析が可能という性質をもっていることから、熱中性子放射化法、高速中性子放射化法等の様々な検知法が研究開発されている。日立では、元素の種類と位置を同定可能な随伴粒子イメージング(API)法を適用した爆発物の検知装置を開発してきた。

図5に試作API装置の概要を示す。DT核融合反応において生成する α 線と高速中性子が180度方向に飛行することを利用し、 α 線と同時に生成する中性子と元素との反応で発生した即発 γ 線を同時計測する方法である。試作装置を用いて性能評価した結果、爆発物検知に必要な炭素、酸素及び窒素計測のS/Nが、 γ 線計測のみと比較して40倍以上となることを確認している。

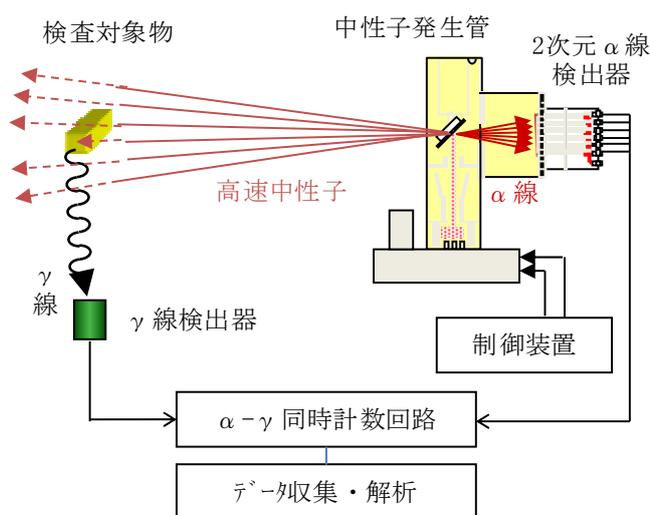


図5 試作API装置の概要

5. おわりに

本講演において、医療応用を中心とした小型加速器の産業応用に関する検討内容を紹介した。それぞれ実用化には課題が多いが、今後も、小型加速器の産業応用の検討を進めて行く予定である。

参考文献

- [1] F. Jallu, et al. Photoneutron production in tungsten, praseodymium, copper and beryllium by using high energy electron linear accelerator. Nucl Instr Meth. 1999;B155:373-381.
- [2] T. Tadokoro, et al. Examination of a Ge-68/Ga-68 production amount in a medical radionuclides production system using an electron linear accelerator. Atomic Energy Society of Japan, 2017 Fall meeting.
- [3] T. Tadokoro, et al. Feasibility study on a common use accelerator system of neutron production for BNCT and radionuclide production for PET. Proc ICNCT-12. 2006;304-307.
- [4] T. Tadokoro, et al. Development of a neutron moisture meter for moisture under heat insulation of tower and pipe (2) Basic study for a moisture meter using time measurement methods. Atomic Energy Society of Japan, 2009 Fall meeting.

*Takahiro Tadokoro

Hitachi, Ltd. Research & Development Group.

Planning Lecture | Technical division and Network | Nuclear Fuel Division

[2D_PL] Domestic and Overseas Progress on Molten Salt Reactor Development

Chair: Takayuki Terai (Univ. of Tokyo)

Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room D (A32 -A Building)

[2D_PL01] Progress in the World

*Yuji Arita¹ (1. Univ. of Fukui)

[2D_PL02] Progress in Japan

*Michio Yamawaki¹ (1. Univ. of Fukui)

[2D_PL03] Progress in China

*Xu Hongjie¹, Xia Xiaobin¹ (1. SINAP)

核燃料部会セッション

熔融塩炉開発の国内外の状況

Domestic and Overseas Progress on Molten Salt Reactor Development

(1) 世界の状況

(1) Progress in the World

*有田 裕二

福井大学

1. 国際的な枠組みにおける取り組み

熔融塩炉は第4世代原子力システムとして GIF(The Generation IV international Forum)の中で取り上げられており各国の開発状況等が報告されてきた。2014年に改訂されたロードマップにおいて、2025年までの開発目標として熔融塩高速炉の基本コンセプトを示すこと、熔融塩を利用する他システム(熔融塩冷却炉や熱輸送システムなど)との共同開発、熔融塩の物性把握や腐食に関する知見、塩処理に関することなどが示されている[1]。最近では、2017年1月にワークショップが開催され、各国からの進捗状況や計画が示されている。

一方、国際原子力機関(IAEA)は、2016年10月末に、トリウムを用いた熔融塩炉に関する国際会議「Technical Meeting on the Status of Molten Salt Reactor Technology」をウィーンの本部で開催し、研究開発の加速に向けた議論を始めた。IAEAは今までトリウム利用炉や小型炉の会合を開いたことはあるが、熔融塩炉に特化した国際会議の開催は初めてであった。欧州各国や米国などの先進国と、中国、インドなどのアジア諸国など、約20の国と国際機関から、熔融塩炉専門家約40名が参加した。IAEAは、今後、予算化を図り、熔融塩炉に関する国際プロジェクトを開始する」と宣言した。なお、これらの方針は、9月のIAEA総会で加盟各国に説明されたとのことである。

2. 各国における取り組み

地域的には大きく分けて4つの動きがある、(1)米国の政府とベンチャーと大学、(2)欧州共同体の研究計画を主軸とする活動、(3)中国の上海を中心とする動き、(4)中国を除くアジアの動き(インドネシア、日本など)である。

米国の特徴は、ベンチャー企業が参入していることである。プラントの最初の試験炉が立ち上がるまでの期間で、5年程度をターゲットにしたもの(2020~2025年)、20~40年後(2050年頃)をターゲットにしたものに大きく分類される。すなわち短期集中型と長期・基礎研究型である。前者ではすでにプラント設計に入っている。これらの特徴としては、1960年台のMSRE(Molten Salt Reactor Experiments)試験炉の設計を基礎としており、新材料の開発は最小限にする方針となっている。これら計画にはアメリカエネルギー省からも予算が割かれており官民協力して開発を推進しようとしている。また、これらの技術を元にしたプロトタイプ炉をインドネシアに導入しようとする計画も示されており新興国にも熔融塩炉導入の動きが進展している。欧州ではHORIZON2020(The EU Framework Programme for Research and Innovation)の中で熔融塩高速炉の安全性評価プロジェクトを進めている。英国においてもベンチャー企業が熔融塩炉の導入計画を示しておりファンドからの支援も含め、国家とは別の道筋で導入が進展する可能性も大きくなってきている。

参考文献

[1] "Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems" OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International Forum (Jan. 2014)

*Yuji Arita

University of Fukui

核燃料部会セッション

熔融塩炉開発の国内外の状況

Domestic and Overseas Progress on Molten Salt Reactor Development

(2) 国内の状況

(2) Domestic Progress

*山脇 道夫

福井大学・東京大学

1. 基盤研究から新型炉設計提案へ

「熔融塩技術の原子力への展開」研究専門委員会（主査：山脇道夫）が2013~2017年に活動した中で報告された熔融塩炉研究のハイライトとしては、先ず熔融塩炉の過酷事故を評価した研究があげられる。福井大―東大―電中研（有田、寺井、山脇ほか）により、事故時放射能放出について、何がどれだけ放出されるのかを模擬体系の蒸気圧測定により推定し、放射能放出量は軽水炉の場合に比べ桁違いに低くおさえられることを示した。炉心構造材料 Ni 基超合金と熔融塩との両立性についても評価され、良好な性能が示された。次いで、高レベル放射性廃棄物の減容への熔融塩炉による核変換の効果の評価が報告された。三田地によれば、熔融塩高速炉の40年運転2段構成方式で、TRU 消滅率90%以上が達成できることを導き、本手法の性能の高さを確認している。廣瀬は、熔融塩の相安定性を維持するため、TRU 専焼炉などでは緩衝材の適用が有用であることを指摘した。

熔融塩炉の新型設計としては、先ず福井大から静置型熔融塩炉が提唱された。この概念では、燃料は炉心のタンク内に保持されるため、炉心外部の熱交換器へ燃料を運ぶ配管が不要となり、過酷事故を想定する必要がなくなる利点がある。次いで、熔融塩炉心と乾式再処理施設を直接配管で結びつけ、熔融塩の連続再処理を可能にする統合型熔融塩炉の新しい方式 IMSFR が山脇・小山（福井大・電中研）により提唱された。乾式再処理を液体金属抽出法によって行えば、燃料熔融塩は液体状態のまま炉心と燃料処理系の間を循環させることが可能になり、極めて単純な構造のシステムとなりうる。高速炉の特性を向上させるため、フッ化物に換えて塩化物熔融塩を燃料として採用することが提案された。トリウム・テック・ソリューション社の木下らは、燃料ピン型熔融塩炉を提唱しているが、英国の Moltex Energy 社の提案と共通の特徴を有している。都市大の高木は、Moltex Energy 社のピン型熔融塩炉について、燃焼・増殖性能の評価を行っている。また塩化物熔融塩を用いる場合、塩素の同位体 ^{35}Cl 、 ^{37}Cl のうち、 ^{37}Cl を濃縮した場合の中性子エネルギースペクトルへの効果などを評価している。

2. 熔融塩炉を支える技術環境

わが国には熔融塩炉開発を直に支えていける技術環境が備わっている。「熔融塩技術の原子力への展開」研究専門委員会の委員の中で例を挙げれば、上述以外では電中研が乾式再処理の技術開発を長年続けてきていること、核融合科学研究所がフッ化物熔融塩ループを建設・運転していることがある。同志社大では熔融塩技術研究に長年の蓄積がある。日立、東芝、三菱の原子炉メーカーとしての経験、JAEA の原子力研究の蓄積、荏原製作所のポンプ、バルブ等の製作経験、東洋炭素の黒鉛の製造経験等、枚挙にいとまがない。このような我が国の総力を挙げて取り組めば、近い将来の日本型熔融塩炉の実現も夢ではないであろう。

*Michio Yamawaki

Univ. of Fukui and Univ. of Tokyo

(3) Progress in China

*Hongjie Xu¹, Xiaobin Xia¹

¹TMSR Center, Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP), Chinese Academy of Sciences, China

Abstract

TMSR (Thorium Molten Salt Reactor Energy System) is a research program of Chinese Academy Sciences, financial supported directly by Chinese Government. Research activities of TMSR include MSR (with FHR), Th-U fuel cycle and non-electric application, and to realize industrial application finally. TMSR started from 2011 has made much progress, which include the research team of about 500 staff has been founded, researching facility system on TMSR has established, and most technologies on TMSR have been mastered by the team. Several test reactor design have finished and TMSR-LF1 is under construction. Looking for future, MSR will play key role in Gen-IV R&D, not only on the performance of reactor, but also on the requirement. Accordance with the progress of TMSR program, a proposal about based on the small modular TMSR to realized TMSR industrial application by 2030 has been proposed.

Planning Lecture | Technical division and Network | Nuclear Non-Proliferation, Safeguard, Nuclear Security Network

[2F_PL] Present Status of R&D Activities for Nuclear Non-proliferation, Safeguards and Security

Chair: Kazunori Suda (JAEA)

Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room F (A36 -A Building)

[2F_PL01] Active Neutron NDA Technology Development for Nuclear Non-proliferation, Safeguards, and security Purpose

*Mitsuo Koizumi¹ (1. JAEA)

[2F_PL02] Development of Cyber Security Target Identification Method for Nuclear Facilities

*Kazuyuki Demachi¹ (1. Univ. of Tokyo)

核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会セッション

核不拡散・保障措置・核セキュリティに関する研究開発の動向と今後

Present Status of R&D Activities for Nuclear Non-proliferation, Safeguards and Security

(1) 核不拡散・保障措置・セキュリティのためのアクティブ中性子非破壊測定技

術開発 – 遅発ガンマ線分析技術の開発 –

(1) Active Neutron NDA Technology Development for Nuclear Non-proliferation, Safeguards, and security Purposes – Development of Delayed Gamma-ray Analysis Method –

*小泉 光生¹¹ 日本原子力研究開発機構

1. 緒言

非破壊分析 (NDA) 技術は、核壊変や核分裂などに伴い放出されるガンマ線や中性子などを測定する技術で、その精度は化学処理を伴う分析 (破壊分析 (DA) 技術) には及ばないが、試料をそのままの状態、その場で、短時間に測定できることに特徴がある。また、非均質な測定対象を容器全体で測定しサンプリング誤差を低減させるために利用されている。そのため、保障措置や計量管理においては、DA と併用して核物質の測定・定量に用いられている。また、核セキュリティでは、核物質が隠蔽されて持ち込まれないように調べる (核検知) 技術として用いられている。

その一方で、使用済燃料や再処理施設の溶解液の試料など放射能の高いものは、その高いバックグラウンドにより、新燃料核物質に対して通常行われている、核物質核種の壊変に伴い試料自身が発生する放射線を計測するパッシブ法 NDA による分析を行うことはできない。また、遮蔽物中に隠蔽された核物質や、爆薬、毒物などは、単なる放射能測定では検知できない。

日本原子力研究開発機構 (原子力機構) は、外部から働きかけ、核反応などを誘発しそれを測定するアクティブ NDA 技術による検知・測定技術開発を進めている。本発表では、原子力機構が進めている 2 つのアクティブ NDA 技術開発のプロジェクトの概略と、その中の技術開発テーマから遅発ガンマ線分析 (DGA) 技術開発について簡単に紹介する。

2. アクティブ非破壊分析技術プロジェクト

2.1 核共鳴蛍光非破壊分析技術の開発

核共鳴蛍光 (NRF) NDA 技術は準単色ガンマ線ビームを利用した核検知・測定技術である[1]。ガンマ線ビームは、加速された電子ビームにレーザー光を照射することによって得られる。その際、レーザーの光子は、電子とのコンプトン散乱でエネルギーを付与される (laser Compton scattering, LCS)。これをコリメーターで角度を制限して取り出すと、エネルギー幅が制限された高エネルギー光子ビームが得られる。こうして得られる準単色ガンマ線を核の励起エネルギーと一致するように調整すると、核が励起され、それに続く脱励起によりガンマ線が散乱される。この技術は、ガンマ線を利用するので貫通力が高いこと、核共鳴が関与するため特定の核種を狙って検知することが出来ること、そのため化学的な状態によらずに検知できること、ガンマ線照射なので放射化が起きないこと、といった特徴がある。

現在、兵庫県立大学のニュースバル施設において、隠蔽された核物質を模擬して、その検知が可能なことを示す実証実験を行うための準備を進めている。

2.2 アクティブ中性子非破壊分析技術の開発

アクティブ中性子法は、外部中性子源により核反応を誘起し、それによって発生する中性子、ガンマ線を測定する技術である[2]。原子力機構は、高線量の核物質の測定技術として、また、不審物の性状確認技術として適用できると考え、アクティブ中性子分析法のうち、ダイアウェイ時間差分析法 (DDA : Differential Die-away Analysis) [3]、中性子共鳴透過分析法 (NRTA : Neutron Resonance Transmission Analysis) [4-6]、即

発ガンマ線分析法（PGA：Prompt Gamma-ray Analysis）、遅発ガンマ線分析法（DGA：Delayed Gamma-ray Analysis）[7]の4種類の基礎技術開発を進めている。これらの測定技術の開発を同時に進め、最終的には、各々の分析で得られる情報を総合し、相補的な分析を行う技術確立することを目的としている。

各技術のうち、DDAは核分裂性物質を定量する技術である。測定では、試料の測定領域を壁で囲い、そこにパルス状に中性子を照射すると、核分裂性核物質の量により中性子の減衰様式が変化することを利用する。NRTAは、パルス状に発生した中性子を飛行管に通し、試料を透過させ、検出器に到達した中性子を飛行時間（TOF）法により測定する。TOF測定で得られる中性子エネルギーに対する透過率パターンから試料中の核種ごとに面密度を決定する。PGAは、中性子を試料に照射し、中性子捕獲反応に伴うガンマ線を測定し、試料中に含まれる核種（元素）を同定する技術で、不審物中の爆発物や、毒物、遮蔽物などの検知に有用である。

3 遅発ガンマ線分析技術開発

アクティブ中性子NDA技術のうちDGAは、中性子照射により核分裂を起こし、生成した核分裂生成物から放出されるガンマ線を分光分析する技術である。核分裂生成物の構成は、各核分裂性核種で異なるため、得られるガンマ線スペクトルのパターンより、核分裂性物質の構成比を求めることができる。

DGA技術開発は、EC-JRCとの共同研究のもと、EC-JRC ISPRAのPUNITA（Pulsed Neutron Interrogation Test Assembly）と呼ばれる装置を利用して進めてきた。PUNITAは、DT中性子源を有し、 $50 \times 50 \times 80$ cmの内部に均質な熱中性子場を作り出すことのできる1辺約2 mのカーボンとポリエチレンで構成される箱状の装置である。原子力機構は、EC-JRCの協力のもと、PUNITA内部で熱化した中性子束を効率よく試料に照射するための中性子減速材を追加で設置した。EC-JRCは、PUNITAを改造し、核物質試料を移動するための直線シャトルシステムを導入した。核物質は、PUNITA内部で中性子照射され、その後、PUNITAの外の遮蔽体中に設置したGe検出器前まで輸送される。実験では、照射と測定を繰り返し行った。使用済み燃料など高線量試料の測定においては、寿命の長い核分裂生成物からのガンマ線がバックグラウンドとなることが想定される。そこで、当技術開発では、そのバックグラウンドの干渉がより少ない比較的半減期の短い核分裂生成物から放出される高エネルギーガンマ線に注目した測定を進めた。密閉された標準核物質試料を用い、U-235とPu-239の比率を変えて試験を行い、それに伴いガンマ線のピーク強度が変化にすることが観測できた。

今後、上記基礎技術開発を進めるとともに、放射能を含有する試料測定に適用するための技術開発を進める予定である。また、DD中性子源を導入すると、より小型なDGA装置の開発が可能と考えられるため、シミュレーション研究など、その基礎開発研究を進めているところである。

4. まとめ

原子力機構では、保障措置・セキュリティ技術開発において、核検知技術、高線量核物質測定技術、また、不審物の性状確認技術確立するため、アクティブNDA技術開発を進めている。NRF非破壊検知技術の開発では、核検知技術の実証試験に向けて準備を進めているところである。アクティブ中性子NDA技術開発では、低線量核物質を使った基礎的な技術確認を終え、高線量核物質の測定のための技術開発に取りかかっているところである。DGA技術開発では、実用化をめざして、より装置を小型化するための基礎開発研究を進めている。NRTAにおける測定では、中性子パルスを短パルス化するとより高精度とすることが期待できる[5]。そこで、短パルス中性子源の1つの候補として、レーザー駆動中性子源の基礎技術開発を開始したところである。

謝辞

本研究開発は、文部科学省「核セキュリティ強化等推進事業」の一部で、原子力機構の基礎工学研究センターおよび核不拡散・核セキュリティ総合支援センターと、EC-JRC、京大、阪大、兵庫県立大学、量子科学技術研究開発機構との共同研究のもとで進められている。

参考文献

[1] R. Hajima, T. Hayakawa, T. Shizuma, C.T. Angell, R. Nagai, N. Nishimori, M. Sawamura, S. Matsuba, A. Kosuge, M. Mori and M. Seya, Eur. Phys. J. Special Topics, 223, 1229–1236 (2014).

- [2] “Development of Active Neutron NDA Techniques for Nuclear Non-proliferation and Nuclear Security”, Y. Toh, A. Ohzu, H. Tsuchiya, K. Furutaka, F. Kitatani, M. Komeda, M. Maeda, M. Kureta, M. Koizumi, M. Seya, J. Heyse, C. Paradel, W. Mondelaers, P. Schillebeeckx, T. Bogucarska, J.-M. Crochemore, G. Varasano, K. Abbas, and B. Pederson, the Proceedings of ESARDA 39th Annual Meeting (2017) 684.
- [3] “Design study on differential die-away technique in an integrated active neutron NDA system for non-nuclear proliferation”, A. Ohzu, M. Maeda, M. Komeda, H. Tobita, M. Kureta, M. Koizumi, and M. Seya, the proceedings of Nuclear Science Symposium in IEEE conference 2016.
- [4] C. Paradel, J. Heyse, S. Kopecky, P. Schillebeeckx, H. Harada, F. Kitatani, M. Koizumi, and H. Tsuchiya, EPJ Web of Conferences 146, 09002 (2017).
- [5] H. Tsuchiya, F. Kitatani, M. Maeda, Y. Toh, and M. Kureta, Plasma and Fusion Research 13 (2018) 2406004.
- [6] F. Kitatani, H. Tsuchiya, M. Koizumi, J. Takamine, J. Hori, and T. Sano, EPJ Web of Conferences 146 (2017) 09032.
- [7] M. Koizumi, F. Rossi, D. C. Rodriguez, J. Takamine, M. Seya, T. Bogucarska, J.-M. Crochemore, G. Varasano, K. Abbas, B. Pederson, M. Kureta, J. Heyse, C. Paradel, W. Mondelaers, and P. Schillebeeckx, EPJ Web of Conferences 146, 09018 (2017).

*Mitsuo Koizumi¹

¹Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会セッション

核不拡散・保障措置・核セキュリティに関する研究開発の動向と今後
Present Status of R&D Activities for Nuclear Non-proliferation, Safeguards and Security

(2) 原子力施設のサイバーセキュリティターゲット同定手法の開発

(2) Development of Cyber Security Target Identification Method for Nuclear Facilities

*出町 和之¹¹ 東京大学

原子力施設のサイバーセキュリティに資するため、放射性物質の過大放出(HRC)を発生させるシーケンスを対象に IAEA の Technical Guidance の No.16 を用いてターゲットセット(TS)を求め、サイバー攻撃の対象となる各システムの制御内容とサイバー攻撃の手段で分類することで、対象となるコンピュータを抽出した。

キーワード：サイバーセキュリティ、核セキュリティ、ターゲットセット

1. 緒言

原子力発電所の核セキュリティ事象は、悪意を持つ人間・集団による妨害破壊行為が起因となるため、その発生確率を求めて PRA に似たリスク評価を行うことは困難である。そのため、同時に機能喪失することで安全機能が失われて重大事故に至るような重要機器・設備の組み合わせ (TS:ターゲットセット) を導出し、これらを防護するための対策を講じることが必要となる。IAEA の Technical Guide (TG) である IAEA Nuclear Security Series No.16, "Identification of Vital Areas at Nuclear Facilities"では、TS への攻撃を防ぐために必ず防護せねばならない区域 (PS : Protect Set) を導出するための VAI(Vital Area Identification)が解説されている。ただし、通常の VAI 手法では悪意を持つ人間・集団がその区域に物理的に侵入する場合を想定した枢要区域を導出できるが、サイバーセキュリティに対してはコンピュータネットワーク空間上の枢要区域の導出が求められる。そこで本研究では、VAI 手法をコンピュータネットワーク空間に適用し、サイバーセキュリティ上の TS を導出することを目的とした[1]。

2. 手法

VAI 手法をコンピュータネットワーク空間に適用するにあたり、サイバー攻撃の対象範囲を以下とした。

- 逆走防止効果のあるダイオード設置が考えられるため、外部からのサイバー攻撃は想定しない。
- 内部脅威者が中央制御室の端末や各所のローカルネットワークボードから攻撃を行うことを想定する。

また、サイバー攻撃により重大事故に至る機能喪失を発生させ得る手段として、次の3つを想定した。

- ・ 安全系設備の起動信号に対する妨害
- ・ 安全系設備の制御プログラムの改竄
- ・ 安全対策の人為的ミス誘発を目的とした、中央制御室モニター誤表示のためのプログラム改竄

これらの対象範囲、サイバー攻撃手段を対象に、新規制基準に示されている放射性物質の過大放出(HRC)を発生させるシーケンスを用い、BWR と PWR について TS を求めた。

3. 結論

サイバー攻撃の対象となる各システムの制御内容を各システムの運転制御を考慮して整理し、それをサイバー攻撃の手段で分類した。これにより攻撃対象となるコンピュータを抽出する手法を示すことができた。

参考文献

[1] 出町和之, 「枢要区域特定手法による原子力施設のサイバーセキュリティに関する核セキュリティ研究」平成 29 年度 JAEA 委託研究報告書

*Kazuyuki Demachi¹, ¹The University of Tokyo

Planning Lecture | Joint Session | Joint Session

[2G_PL] Current status and issues on the implementation of clearance (2)

International trends on clearance and relevant studies for recycle

Chair: Itsumasa Urabe (Fukuyama Univ.)

Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room G (A37 -A Building)

[2G_PL01] Overview of the revision of the Safety Guide RS-G-1.7 and its issues in discussion

*Takatoshi Hattori¹ (1. CRIEPI)

[2G_PL02] Concept of restricted use of contaminated rubbles in the Fukushima Daiichi NPS

*Taro Shimada¹ (1. JAEA)

[2G_PL03] Reuse of useful elements recycled from spent nuclear fuels, and concept of their clearance

*Tomoyuki Takahashi¹ (1. Kyoto Univ.)

保健物理・環境科学部会、バックエンド部会 合同セッション

クリアランスの現状と課題(2)-国際動向と再利用の検討状況-
Current status and issues on the implementation of clearance (2)
- International trends on clearance and relevant studies for recycle -

(1) IAEA 安全指針 RS-G-1.7 改訂の動向と主な論点

(1) Overview of the revision of the Safety Guide RS-G-1.7 and its issues in discussion

*服部 隆利¹

¹ 電中研

1. はじめに

IAEA（国際原子力機関）のCSS（安全基準委員会）は、2017年11月、日本のクリアランスレベルの引用元である安全指針 RS-G-1.7「除外、規制免除及びクリアランスの概念の適用」^[1]の改訂を開始するための2つのDPP(文書準備計画書)を承認した。これらのDPPでは、IAEA GSR Part3 (BSS:国際基本安全基準、2014)^[2]に新しい概念として取込まれた「緊急時、現存、計画の3つの被ばく状況別の放射線防護」に対応してRS-G-1.7を改訂することが計画され、規制免除についてはDS499、クリアランスについてはDS500として、それぞれIAEAのRASSC（放射線安全基準委員会）及びWASSC（廃棄物安全基準委員会）の主管の下で、検討を進めることが規定された。また、DS500については、従来の放射能濃度（Bq/g）の値に変更を加えず、新たに表面汚染（Bq/cm²）の値を与えること、既存の無条件クリアランスレベル（再利用の方法、範囲等に制限を設けないクリアランスレベル）に加え、条件付クリアランスレベル（クリアランス後の再利用等に一定の制限条件を課したクリアランスレベル）を与えること、並びに気体や液体のクリアランスを扱うこと、が定められた。

このような背景のもと、IAEAは、DS500については、2018年2月中旬及び6月初旬の2回にわたって改訂ドラフト作成のための専門家会合を開催し、そのドラフトの準備を開始した。本発表では、専門家会合の概要と改訂にあたって議論となった論点について紹介する。

2. 安全指針 RS-G-1.7 のポイント

RS-G-1.7は、天然起源及び人工起源の放射性核種の両方に対して、大量の物質を規制除外、規制免除またはクリアランスする際の「放射能濃度値（Bq/g）」を示すことを目的に2004年に策定され、2014年に出版されたIAEA GSR Part3 (BSS: 国際基本安全基準)にも取り入れられた。それらの放射能濃度値は、人工起源の放射性核種の場合、全ての固体状物質を対象に、外部被ばく、ダスト吸入及び経口摂取（直接及び間接）を包含するように選定された典型的な被ばくシナリオの線量評価に基づき、算出された。なお、基準線量が10 μ Sv/yの場合は現実的なパラメータ値が、基準線量が1mSv/yの場合は低確率なパラメータ値が用いられた。また、皮膚被ばくの等価線量に対する基準線量については50mSv/yが用いられた。

人工起源の放射性核種に対して算出された放射能濃度値については、クリアランスレベルに適用可能とされ、2005年、我が国はクリアランスレベルとしてこの値を引用するに至っている。なお、RS-G-1.7では、段階的なアプローチを採用し、その放射能濃度値を数倍（例えば10倍まで）超える場合であっても、IAEA加盟国の国内の規制の枠組みによっては、規制機関は規制要件を適用しないことを決定できるとしている。

3. 改訂のための主な論点

DS500のドラフト作成のための専門家会合は、IAEA本部において、2018年2月19～23日と6月4～8日に開催された。改訂にあたっての主な論点は下記のとおり。

- ・現存被ばく状況下でクリアランスをどのように位置づけるか？

計画被ばく状況におけるクリアランスの線量基準：10 μ Sv/y（現実的な被ばくシナリオの時）

現存被ばく状況における参考レベル（1～20mSv/y の下方から選定）

- ・表面汚染に対する新しいクリアランスレベル（Bq/cm²）はどのように規定するか？

クリアランスレベル（無条件）のよう統一した値を提示するのか？

表面とは？（土壌やコンクリートがら等の扱い）

重量濃度と表面密度の2つの基準の適用方法は？

物品持ち出し基準との関係は？

- ・新しい条件付クリアランスレベル（Bq/g）はどのように規定するか？

クリアランスレベル（無条件）のよう統一した値を提示するのか？

- ・どのように過剰に保守的な評価を避けるか？

TECDOC 1000^[3]における平均化の10倍ルール

平均してクリアランスレベルを満足していれば、部分的に平均値より10倍高くても許容できる
クリアランス判断における測定と核種組成比の不確実性の取扱い

日本原子力学会標準「クリアランスの判断方法: 2005」の考え方

IAEA Safety Report No. 67, ICRP Pub.104 の考え方

4. おわりに

今回の DS500 ドラフト作成に係る専門家会合は、2018年10月以降に、DS499に係る専門家会合と同時に開催する方向で調整されており、その後、専門家会合のほかIAEA技術会合やWASSC会合等での審議を経て、2022年8月の発行を目指して作業が進められる見込みである。

参考文献

[1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series, No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna (2004).

[2] EUROPEAN COMMISSION, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014).

[3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Clearance of Materials Resulting from the Use of Radionuclides in Medicine, Industry and Research, IAEA-TECDOC-1000, IAEA, Vienna (1998).

*Takatoshi Hattori¹

¹CRIEPI

保健物理・環境科学部会、バックエンド部会 合同セッション

クリアランスの現状と課題(2) -国際動向と再利用の検討状況-

Current status and issues on the implementation of clearance (2)

- International trends on clearance and relevant studies for recycle -

(2) 福島第一原子力発電所における低線量がれきの限定的な再利用の考え方

(2) Concept of restricted use of contaminated rubbles in the Fukushima Daiichi NPS

*島田 太郎¹, 三輪 一爾¹, 武田 聖司¹¹ 日本原子力研究開発機構 安全研究センター**1. はじめに**

福島第一原子力発電所（1F）敷地内に保管されている汚染がれきのうち、表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 以下の屋外集積がれきを資源化物として敷地内である特定の用途に限定して再利用することが検討されている⁽¹⁾。本研究では、安全を確保し適切な規制の下で再利用可能なめやす濃度設定とその妥当性確認の考え方を提案する。そして 1F 敷地内での道路及びコンクリート構造物基礎への再利用を想定し、再利用可能な資源化物中の放射性セシウム濃度のめやす値を用途別に試算するとともに、そのめやす濃度の妥当性を確認した。

2. 限定再利用の考え方

1F 敷地内は平成 23 年 12 月 15 日に緊急時被ばく状況から現存被ばく状況に移行して、その状況が継続されている。また、1F 敷地全体が管理対象区域に設定されており、敷地に立ち入る人員はすべて被ばく線量が管理されている。上記のような現存被ばく状況下において、限定的に再利用される資源化物のめやす濃度を設定した例は国際的にもない。こうした場合、限定再利用を実施することによって廃止措置に向けた作業に影響を与えないこと、及び、周辺公衆への影響を抑制することを考えるべきである。そこで、本研究では現存被ばく状況である現状の 1F 敷地内の空間線量率分布に着目し、汚染がれきから取り出された放射能を含む資源化物を、汚染されていない資材の代わりに使用することによって上昇する空間線量率が、敷地サーベイでの線量率の低いほうとすることを必要条件とした。具体的には平成 30 年 1 月の測定では、1F 敷地内の空間線量率は原子炉建屋周辺を除き多くの測定点で $1\mu\text{Sv/h}$ 程度であることから追加の線量率を $1\mu\text{Sv/h}$ と設定した。また、評価されためやす濃度での再利用によって 1F 敷地内で運用されている目標などに影響を与えないことを確認する必要がある。そこで、図 1 に示すように、めやす濃度で各用途へ適用する際に①資源化物を再利用する放射線業務従事者の追加的な被ばく線量②1F 敷地境界の空間線量率への影響③地下水への核種漏洩の影響を評価し、それぞれ① 20mSv/y （5 年で 100mSv 、 50mSv/y より）に対して影響が小さいと判断される 10%以下であること②限定再利用からの寄与を合算しても評価上の目標値 1mSv/y を超えないこと③排水の運用目標値を超えないことを確認することにより、試算されためやす濃度の妥当性を確認することとした。建屋外で採取されたがれきの分析結果では Cs-137, Cs-134, Sr-90, Co-60, H-3 が検出されているが、Co-60 濃度は Cs-137 に対して 0.01%以下、H-3 濃度はクリアランスレベルより 2 桁程度低いことから除外した。めやす濃度対象核種はガンマ線放出核種である放射性セシウムとし、Sr-90 濃度は Cs-137 濃度に対して 1%とした。

3. 放射性セシウムめやす濃度の試算

汚染コンクリートがれきから取り出した資源化物を、道路及びコンクリート構造物基礎部に適用する場合について評価した。道路の場合、道路幅 9m、長さ 100m を想定し、舗装材あるいは路盤材として利用した場合の道路中央高さ 1m の位置における線量率が $1\mu\text{Sv/h}$ となるように資源化物中の放射性セシウムのめやす濃度を試算した。評価条件および試算結果を表 1 に示す。めやす濃度はコンクリート道路の路盤材では 10 万 Bq/kg、コンクリート構造物基礎部では 16 万 Bq/kg となった。

4. 試算しためやす濃度の妥当性確認

図1に示した①～③の妥当性確認の評価方法を以下に示す。①は1F敷地内の廃止措置作業の中で再利用物に最も接近する可能性のある作業者を想定し、道路上作業者および基礎直上に位置する地下2階での作業者を評価対象とした。外部被ばく評価では、作業空間における作業者位置における線量率を計算し、1F敷地内での作業条件（時間、遮蔽等）を基に被ばく線量を求めた。道路表面の舗装材に再利用した際は、舗装面の摩耗により発生する粉塵の吸入による内部被ばく線量も評価した。②では1F敷地内で再利用された資源化物（道路、建造物）からの距離ごとの空間線量率を計算し、目標値1mSv/yを満たすために必要な敷地境界からの離隔距離を評価した。③では再利用物に降雨または地下水が浸透することにより核種を含んだ浸透水が帯水層へ流入し、核種が帯水層中を海洋側へ移行することを想定した。海洋出口における地下水中核種濃度が、東京電力が定める排水運用目標値 Cs-134: 1Bq/L, Cs-137: 1Bq/L, Sr-90: 5Bq/L 以下となる必要がある。評価は1F敷地内に設置した再利用物（道路、建造物）からの距離ごとの地下水中核種濃度を評価し、運用目標値を満たすために必要な敷地境界（海洋出口）からの離隔距離を評価した。核種の流出および帯水層中の移行は分配平衡を仮定しており、帯水層中の核種移行は JAEA が開発したクリアランスレベル評価コード PASCLR2 を用いて評価した。

その結果、①では両用途の被ばく線量はともに1.3mSv/yとなり条件(20mSv/yの10%以下)を満足した。②は道路へ再利用した場合、図2に示すように、敷地境界まで25m以上の離隔をとれば従来の評価上の敷地境界線量率(0.6mSv/y)を考慮しても目標値1mSv/y以下となった。また、構造物基礎へ再利用した場合は敷地境界まで1mの地点で目標値以下となった。③は構造物基礎に再利用した場合は、図3に示すように、Sr-90濃度は離隔なしに運用目標5Bq/L以下となるが、Cs-137については5m以上の離隔により運用目標値以下となった。以上のように①～③の評価から1F敷地内で試算しためやす濃度で安全な再利用を行うための離隔距離を提示することにより、めやす濃度の妥当性を確認した。

参考文献(1) 原子力規制委員会第5回特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会 資料1

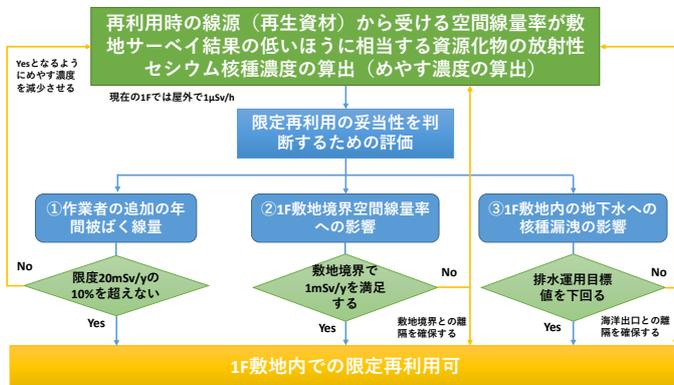


表1 用途別資源化物の放射性セシウムめやす濃度

再利用先	用途	舗装厚さ	路盤厚さ	放射性セシウムめやす濃度
アスファルト道路	路盤材	5 cm	80 cm	13,000 Bq/kg
	舗装材	20 cm	-	7,400 Bq/kg
コンクリート道路	路盤材	15 cm	80 cm	100,000 Bq/kg
	舗装材	30 cm	-	8,100 Bq/kg
コンクリート構造物	基礎部	20 cm 床スラブ厚	200 cm 基礎部厚	160,000 Bq/kg

図1 めやす濃度設定と妥当性確認の考え方

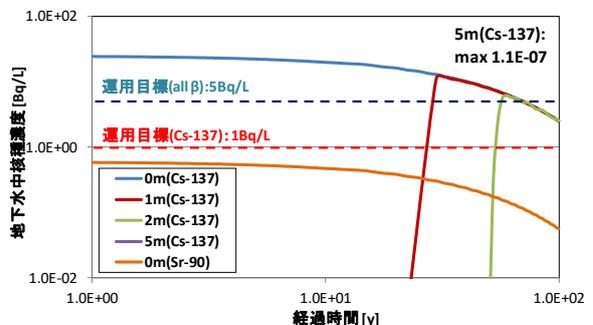
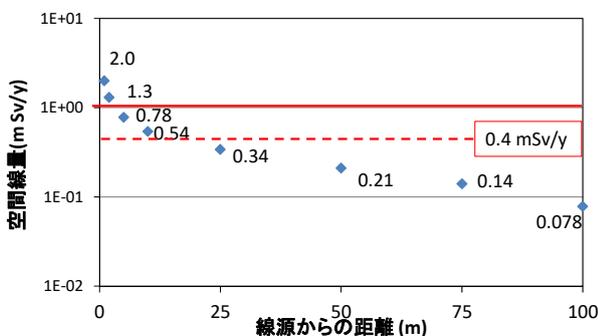


図2 道路に再利用した際の敷地境界への空間線量率寄与

図3 構造物基礎に再利用した際の地下水中濃度

*Taro Shimada¹

¹Nuclear Safety Research Center, Japan Atomic Energy Agency

本研究は原子力規制委員会原子力規制庁「平成29年度廃棄物の限定再利用に関する検討」として実施したものである。

保健物理・環境科学部会、バックエンド部会合同セッション

クリアランスの現状と課題(2) -国際動向と再利用の検討状況-

Current status and issues on the implementation of clearance (2)

- International trends on clearance and relevant studies for recycle -

(3) 使用済核燃料から回収した有用元素の再利用とクリアランスの考え方

(3) Reuse of useful elements recycled from spent nuclear fuels, and concept of their clearance

*高橋知之¹, 高橋千太郎¹

¹京都大学

1. 概要

高レベル放射性廃棄物に含まれる核分裂生成物の分離・変換は、環境への負荷低減の観点から、各国で研究開発が進んでいる。我が国では、革新的研究開発推進プログラム ImPACT (Impulsing Paradigm Change through disruptive Technologies) の「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化(藤田玲子プログラムマネージャー)」において、研究開発が進められている。このテーマは、高レベル放射性廃棄物(HLW)から回収した長寿命核分裂生成物(LLFP)を、加速器を用いて短半減期核種や安定核種に変換し、有用なものはリサイクルして再利用することを目的としている。

このプログラムは、以下の5つのプロジェクトから構成されている。

- ・PJ1: HLW から LLFP の回収技術
- ・PJ2: 核変換データの取得と核反応実証試験
- ・PJ3: 理論モデルの構築とシミュレーション
- ・PJ4: 加速器の要素技術およびシステム開発
- ・PJ5: 廃棄物低減および資源化シナリオの策定とプロセス概念

回収した有用元素のクリアランスの考え方は、PJ5において検討されている。すなわち、再利用される有用元素には、回収・資源化の過程において微量ながら放射性核種が含まれることになり、この放射性核種による被ばくが懸念される。このため、再利用される元素に含まれる放射性核種による被ばく線量を評価し、この評価結果から、基準となる被ばく線量に相当する放射性核種濃度を算出してクリアランスレベルを提示することにより、最終的にこのプログラムを実現するプラントの概念設計に寄与することとしている。

2. 本評価の特徴

原子炉施設から発生する廃棄物のクリアランスは法制化され、既にいくつかの原子炉施設に対して適用がなされているが、使用済核燃料から回収した有用元素の再利用におけるクリアランスの考え方は、このような廃棄物のクリアランスレベルの評価と比べた場合、以下のような特徴が挙げられる。

- ・原子炉施設から発生する廃棄物はコンクリートや金属であり、その廃棄物中に混入している放射性核種濃度をクリアランスレベルとして設定しているのに対し、有用元素の再使用においては、当該元素単位重量あたりの放射性核種濃度として設定される。
- ・コンクリートや金属は廃棄物として埋設処分されるかあるいは再利用され、再利用における用途は比較的明確であるのに対し、使用済核燃料から回収される有用元素の再利用は、希少金属を対象としているため、元素毎に用途が大きく異なり、かつ多種多様である。よって、利用経路の詳細な把握及びシナリオの設定に関する十分な検討が必要である。
- ・耐熱ジルコニウム質レンガのように、使用後に廃棄物として処分される経路については、再利用された後に埋設処分されることによる被ばく線量も把握する必要がある。
- ・これまで被ばく線量評価上重要とみなされていなかった放射性核種を対象とするため、環境移行パラメータに関する知見が少ない。

3. 評価手法

使用済核燃料から回収される有用元素としてジルコニウム (Zr) とパラジウム (Pd) を対象として、その中に含まれる Zr-93 及び Pd-107 に起因する被ばく線量評価を進めている。なお、評価手法は、主な原子炉施設におけるクリアランスレベルの設定手法[1]に準拠した。

まず、わが国における Zr および Pd の利用形態やその量、年度ごとの変動等については (独) 石油天然ガス金属鉱物資源機構のマテリアルフローを、一般公衆における摂取量等については国際保健機関の調査報告書を中心に調査した。また、線量評価の観点から必要な情報を個別の学術論文等から取得した。これらの情報に基づき、Zr および Pd が資源化されて一般環境において再利用された際に、公衆に被ばくを与えると考えられる経路を列挙した。列挙したシナリオのうち、評価すべき重要シナリオを確定し、簡易なモデルによって被ばく線量評価を実施した。なお、評価に用いられるパラメータの一部は実験的に取得することにより、線量評価の妥当性の向上を図った。この被ばく線量の評価結果に基づき、年間 10 マイクロシーベルトに相当する放射性核種濃度を算出し、これらの核種のクリアランスレベルについて検討した。

4. 結論

高レベル放射性廃棄物に含まれる核分裂生成物の分離・変換し、再利用するという原子力の新しい領域において、クリアランスレベルを策定することは必要不可欠である。今後、線量評価に関する技術的な研究を更に進めるとともに、社会科学的な観点を含めた多方面からの研究もあわせて進めることにより、社会的受容性の観点も含めた検討を進める必要がある。

(付記) 本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する 革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施したものです。

参考文献

[1] 原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会：主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて(1999).

*Tomoyuki Takahashi¹ and Sentaro Takahashi¹

¹Kyoto Univ.

Planning Lecture | Technical division and Network | Advanced Reactor Division

[2H_PL] Report from Fast Reactor Strategic Roadmap Committee

Chair: Akira Yamaguchi (Univ. of Tokyo)

Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room H (B32 -B Building)

[2H_PL01] Scope of Fast Reactor Strategic Roadmap Committee

*Naoto Kasahara¹ (1. Univ. of Tokyo)

[2H_PL02] Long-Term Perspective: Significance of Fast Reactor Development

*Yukihide Mori¹ (1. MFBR)

[2H_PL03] Short-Term Perspective: Technology Succession and Safety Improvement Based on TEPCO Fukushima Dai-ichi Accident

*Takaaki Sakai¹ (1. Tokai Univ.)

[2H_PL04] Discussion

新型炉部会セッション

高速炉戦略ロードマップ検討会報告

Report from Fast Reactor Strategic Roadmap Committee

(1) 高速炉戦略ロードマップ検討会の検討範囲

(1) Scope of Fast Reactor Strategic Roadmap Committee

*笠原 直人¹¹ 東京大学

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故、電力自由化の進展および2016年末の「もんじゅ」廃止措置決定といった情勢の大きな変化により、高速炉開発戦略を練り直す必要性が出てきている。また、国が設置した高速炉開発会議の下、今後10年程度の高速炉開発戦略ロードマップ構築の検討が実施されている[1]。

このような状況から、原子力学会の新型炉部会は「高速炉戦略ロードマップ検討会」を設置し、高速炉サイクル開発の長期目標や人と社会との係りを含む技術戦略を中心に、今後検討されるロードマップを補完する見解を示すこととした。ここでは、検討の基本方針、検討範囲及び技術戦略の視点について述べる。

2. 検討の基本方針

原子力学会新型炉部会は、公衆の安全をすべてに優先させて、原子力の平和利用に関する学術および技術の進歩を図る立場から、高速炉の研究開発に係る大学、研究機関、メーカー、電力の職員、OBが多く参加している。このため、高速炉開発に強い関心を持つ研究者、技術者、経験者が自由に討議し、多様な議論の中から本質的な部分を抽出・展開していくことが期待されている。併せて、高速炉開発の意義と開発の方向性について、それぞれの立場で高速炉開発に関与した経験を踏まえ、国民が理解し易い形で示していくことも期待できよう。

ここで、大規模な技術開発を長期に亘り継続するには国民の理解が必要であることから、提示する技術戦略は、世の中がそれをどのように理解するかを考え、国民に支持が得られる論理（Logic）とそれを支える事実認識（Fact Finding）が必要である。

このため、検討の範囲を技術から人や社会まで広げ、以下の（1）から（6）の範囲の検討に基づき、技術戦略に関する提言を行うこととした。

- （1）高速炉サイクル開発の意義
- （2）高速炉サイクル開発の特徴
- （3）我が国の高速炉開発の歴史と現状
- （4）海外の高速炉開発の状況
- （5）長期開発における不確実性とその対応策
- （6）失敗や事故の経験を活かすマネジメント

3. 検討の範囲

上記方針に基づく検討範囲の中で、特徴的な（2）（5）（6）について以下に説明する。

3-1. 高速炉サイクル開発の特徴

高速炉サイクルの開発を含めどんな技術でも、新しい技術の開発には失敗を繰り返しながらの試行錯誤の過程がある。新型原子炉を開発していく場合、万一大きな事故が起きた場合は、放射性物質の放散に至

* Naoto Kasahara

¹The University of Tokyo

る可能性があることから、炉心溶融などの大失敗は許容されない。このため特に慎重に開発を進めていく必要があり、燃料材料等の基礎基盤的な研究開発から原子炉の原理を確認する「実験炉」、発電システムまで含めた工学実証を目指す「原型炉」、経済的に建設・運転管理できることを確認する「実証炉」、発電炉として事業性を見込める「商用炉」と、段階を踏んだ開発が行われてきた。このため、新型炉の実用化には、技術者の現役寿命を超える数十年以上の研究開発期間と、それぞれの段階の原子炉の設計及び建設費が必要となり、開発の段階が実用化に接近していくとともに、その開発総額はかなり大規模になる[2]。

特に高速炉サイクルの実用化には、高速炉用の燃料製造や再処理技術も必要になる。軽水炉と共存する高速炉の導入初期は、軽水炉の使用済燃料を再処理して、燃料製造をする施設の建設が必要となるほか、軽水炉でのプルサーマル利用との共用等、効率的な開発が重要である。

高速炉として最も多くの国で開発が進められてきたナトリウム冷却高速炉は、原型炉級の開発から実証炉あるいは商用炉の段階に到達しており、その開発に必要な資金規模は大きくなっている。その一方で、未だ開発段階にあるため、安全審査から建設、安定運転に対するリスクが軽水炉と比較して大きく、その投資を回収できる事業見通しが立てられる状況ではない。このため、高速炉の実用化を目指す、フランス、ロシア、中国、インドは、国策として国が主導的に、建設までに必要となる研究開発に投資し、実用化に向けた着実な研究開発が進められている。

3-2. 長期開発における不確実性とその対応策

高速炉サイクル技術の開発の最大の特徴は、技術の利用時期も含め、開発スパンが非常に長期に及ぶところである。このため、リソース（人的、予算的を含む）を如何に計画的に配分し効果的に開発を進めていくかが課題となる。

一般に、長期間にわたる開発は、それが実用化する時には、当初のニーズが陳腐化して役に立たなくなるリスク等が指摘されている。しかしながら高速炉サイクル技術は我が国のエネルギー安全を保障する最も有力な技術であるとの認識は、原子力技術開発の黎明期から現在に至る60年以上何ら変わっていない。我が国は世界で最も資源に恵まれない国の一つであり、かつ現在優れた工業技術を有している。また、リサイクルによって資源を無駄にせず環境に負荷をかけない方針は、国柄にあっている。以上から、我が国の目的達成が、そのまま世界貢献につながる、意義深いテーマである。こうした意義が陳腐化することはないと考えられるが、人材を確保し技術を維持していくには、それを国民に理解してもらい継続努力が必要である。

現時点で高速炉サイクルの実用化に向けた開発を進めているフランス、ロシア、中国、インドのみならず、多様な新型炉の研究開発をしている米国や英国においても、ナトリウム冷却高速炉がもっとも実現性が高い技術体系と評価している専門家は多い。しかし、高速炉サイクルを実用化する方策については、長期的開発期間を考慮すると、現在の主流であるナトリウム冷却以外の可能性も否定できず、適切に国際的開発動向を踏まえた計画の定期的な見直しが必要となる。

以上より、高速炉サイクル技術の実現に向けては、50年以上に亘る長期の開発計画を具体化し、必要なリソースの確保および効果的な配分が重要となる。また、適当な期間毎に社会情勢の変化、国内外の開発動向等を考慮して、開発の進め方を見直すことができるホールドポイントを設けることが必要であると考えられる。

3-3. 失敗や事故の経験を活かすマネジメント

高速炉サイクル技術のような新技術開発は、どのような努力をしても開発中の失敗やトラブル、事故は避けられず、それらのリスクに対するマネジメント（リスクマネジメント）を徹底したしぶとさが必要である。例えば、ナトリウム漏えい事故の場合、日本では「もんじゅ」におけるナトリウム漏えいに対するマネジメントに失敗し、結果的に長期運転停止を招いた。一方、海外ではロシアBN-600では20回以上のナトリウム漏えいを経験しながらも、マネジメントをしっかり行いその経験を技術開発に生かした結果、高い稼働率で運転している。フランスも同様に20回以上のナトリウム漏えいを原型炉フェニックスで経験し、それらの教訓も含めて実証炉スーパー・フェニックスの建設運転を行った。

我が国において、失敗やトラブル、事故の経験を活かすマネジメントを実現するためには、適切でかつ丁寧な社会への情報発信や関係するステークホルダー（規制機関等）との議論や情報共有と、PDCA（Plan, Do, Check, Action）による継続的改善が必要である。

具体例の一つとして、安全神話などの誤解や、絶対安全か非安全かといった二項対立による不合理な判断がなされることが無いように注意が必要である。「もんじゅ」が放射線に無関係な2次系のナトリウム漏えい事故で長期間停止した要因の一つに、ナトリウム漏えいは起こり得ないとの誤解を与える説明をしたことと、事故後もそうした誤解を解く努力をしてこなかったことが挙げられる。その結果、ナトリウムに対する過度の恐れを招き、高速炉は軽水炉より危険な炉との印象が広がった感は否めない。

「もんじゅ」は、ナトリウム漏えいやSG伝熱管破損でのNa-水反応等が例え起こったとしても、炉心損傷事故には繋がらないシステム構成になっている。これからは、絶対安全のような安易な説明ではなく、どんなに努力してもトラブルや軽微な事故が起る可能性はゼロで無いことを伝えた上で、仮にナトリウム漏えいが起ったような場合でも、その影響が炉心燃料の健全性に影響を及ぼさない設計対策、漏えいを早期に検出し停止させる対策、漏洩の影響が建屋施設や設備の健全性に影響を与えない対策などを、多重に講じることで重大事故には至らないことを丁寧に説明していくべきである。また、このような設備の適切な保全により、信頼性や安全性を向上させる努力を継続していくことも説明すべきである。さらに、軽水炉と高速炉では、炉心損傷事故につながる要因と、事故時の影響緩和策が異なることから、それを考慮した対策や規制が合理的であることを、ねばり強く説明していくことが必要である。

「もんじゅ」の廃止措置はナトリウムの安全性や取扱いの技術に問題があったからではない。技術的には実用化一歩手前まで確立されていることを、高速炉開発の意義と共に、国民に説明し続けることも大切である。

4. 技術戦略の視点

上記の検討結果から、従来の実験炉から実証炉へステップアップする単調な計画では、3-2で述べた不確実性の大きい環境下での長期開発は困難が予想される。このため、今後50～100年程度の期間が必要であると見込まれる開発を継続するための意義を確認し、現在の情勢や目先の利益からは一定の距離を置いた普遍的な目標を定め、長期的視点でもって、本来あるべき姿からバックキャストで考えることとする。次に、長期的視点との整合性を前提とした上、短期的視点で、現在の情勢から出発してフォアキャストで検討することとする。このような長期と短期の2つの視点を設けることで、長期に亘る一貫性と不確実性に対する柔軟性の両者を確保する方針とする。

4.1 長期的視点(30年～100年)：本来あるべき姿からのバックキャストの検討

長期間一貫性のある研究開発を継続するため、高速炉を開発する意義を国民に分かり易く説明できる技術戦略とする。そのためには、エネルギー安全保障、世界情勢、世界貢献といった大きな視野に基づくものとする。特に我が国にとって死活的に重要なエネルギー安全保障については、予測の不確実性に対して安全側の立場から検討する。

また、局所的因子の影響を受けた見直しにより変動幅が大きくなる短期的な技術戦略と、柔軟に整合できるような、普遍的かつ間口の広い技術戦略とする。

理論的可能性のある理想的な技術（高速中性子を利用した閉じた燃料サイクル）の追求を最終目標として、そこに至るまでのステップを示す。特に、我が国において原子力エネルギーを持続的に利用していくために以下項目の考慮が重要である。

- ① 軽水炉利用の拡大に伴い顕在化するウラン資源の価格高騰リスクへの備え、
- ② 軽水炉サイクルでは廃棄物側に移行する超長半減期核種の減容と有害度低減

4.2 短期的視点(20年～30年)：現在の情勢からのフォアキャストの検討

東京電力福島第一原子力発電所事故後の現在の情勢と、「もんじゅ」廃止措置の教訓を踏まえ、長期の開

発目標である閉じた核燃料サイクルを実現していくための最初の一步の技術戦略を提示する。

- ③ 軽水炉によるプルサーマルで蓄積していくMOX使用済み燃料(高次化プルトニウムを含む)の低減
- ④ 「常陽」、「もんじゅ」、その後の実用化研究開発やASTRID協力等で蓄積された我が国の高速炉技術の維持発展と有効活用
- ⑤ 我が国が主導的に開発してきた高速炉の安全性向上技術(受動安全性技術や炉心損傷時の影響緩和対策)を実証し、世界の高速炉安全性のデファクトスタンダード化

国内軽水炉やプルサーマル利用が進んでいる仏は、③②①の優先順位で開発を進めている。一方、軽水炉の導入拡大と並行して高速炉開発を加速している露印中は、①を中心に開発を進めている。我が国の開発方針を決めるにあたっては、我が国の原子力利用の状況に照らして、向こう20年から30年でどのようなことに取り組むべきかを検討していく必要がある。

参考文献

- [1] 原子力関係閣僚会議、「高速炉開発の方針」(2016年12月決定)
- [2] 原子力教科書「高速炉システム設計」オーム社(2014)

新型炉部会セッション

高速炉戦略ロードマップ検討会報告

Report from Fast Reactor Strategic Roadmap Committee

(2) 長期的視点からの検討：高速炉開発の意義

(2) Long-Term Perspective: Significance of Fast Reactor Development

* 森 行秀¹, 小野 清², 大滝 明²¹MFBR, ²原子力機構

1. はじめに

世界は、脱炭素社会を目指すことで合意されている。我が国もCO₂を排出しないベースロード電源として原子力エネルギーを利用していく方針が閣議決定された第5次エネルギー基本計画に謳われている。原子力の利用に際して、高速炉サイクルは、安全性の確保を大前提に、ウラン資源の利用の大幅な拡大によって長期に亘りエネルギーを安定供給し、放射性廃棄物の減容と潜在的有害度の低減を達成できる技術であることから、その開発意義は今も変わることはないが、最終目標に至るには長期の開発が必要であり、その間には国際環境の変化、政策の変化など種々の不確実性が存在する。このため、今後50～100年程度の期間におけるエネルギー安全保障、世界情勢、世界貢献といった大きな視野に基づき、2100年がどのような状況なのかを、原子力発電量、ウラン資源量等から予測設定し、そこに至る道筋をケーススタディした。

2. 世界の原子力情勢の見通し

2015年12月に196か国が参加した気象変動に関するパリ協定では、地球の平均気温上昇を2℃以内に収める目標が合意され、各国政府は約束草案を提出して対策を取ることとなった。2017年にIAEAがまとめた2050年までの世界のエネルギー・電力・原子力発電予測[1]によると、30カ国で448基の原子力発電所が稼働、15カ国に61基が建設中であり、2016年末の原子力発電量は391GWeに達し、これまでに報告された最高レベルにある。多くの加盟国は、エネルギー供給の安全保障の向上と気候変動の緩和において原子力が低炭素技術として引き続き主導的な役割を持つと認識している。

2-1. 原子力成長見通し

世界の原子力成長の見通しは、国際原子力機関（IAEA）を始め国際エネルギー機関（IEA）が毎年取り纏め報告されている。IAEAは、将来の原子力成長の見通しを高位/低位で予測[1]しており、原子力発電設備容量に関する低位予測として、2016年の391GWeから2030年には345GWe、2050年には382GWeに回復すると予測する一方、高位予測では、現在の経済需要及び電力需要の伸び率が引き続き継続し、特に極東で高い成長が続くと想定し、2030年に554GWe、2040年には717GWe、2050年には874GWeに達するとしている。IAEA/NEAのUranium2016[2]では、2015年に382(低)～392(高)GWe、2030年には418(低)～612(高)GWeと報告されている。また、OECD/IEAの原子力成長見通し[3]では、IEA2℃シナリオ（IEA-ETP2015-2DS）において全発電量に占める原子力の割合が11%（2012年）から17%（2050年）へ増大するとともに、原子力発電設備容量を2014年の396GWeから2050年に930GWeまで増大する予測を提示している。特に中国、インドにおける原子力利用の拡大は顕著であり、近年の当該国情報[4],[5]によると、2050年時点で中国は現在計画240GWeをはるかに超える400GWe超へ拡大との報告があるほか、インドでは275GWeを目指す目標が表明されている。これらの情報を基に、長期的視点として2100年断面の世界の原子力発電設備容量を外挿すると、低位予測として420～630GWe、高位予測として1,500～1,600GWeに達することを想定する必要がある。

* *Yukihide Mori¹, Kiyoshi Ono² and Akira Ohtaki²¹Mitsubishi FBR Systems, Inc., ²Japan Atomic Energy Agency

2-2. 天然ウラン資源の見通し

天然ウラン資源は、金属資源として濃集したもの（鉱床）でなければ回収には多大なコストとエネルギーを要するため、実用に供することは難しい。Uranium 2016によると、コスト区分USD260/kgU未満のウラン資源量が記載されている。そこでは既知資源として764万tU、これは、鉱床の規模・品位・形状が明らかな確認資源439万tUと、鉱床の規模・特性に関するデータが不十分な推定資源326万tUの合計として示されている。これに加え、未発見の資源として、既存鉱床の地質的延長にウラン資源の存在が間接的事実をもとに推定される予測資源と、特定の地質鉱床地帯の中に期待される期待資源を合計した742万tUも推定されており、既知資源と未発見資源を合わせた在来型ウラン資源の総計は1506万tUとされている。一方、同報告では、前述の原子力発電設備容量の予測とともにウラン需要量予測も併記されている。パリ協定合意前の2014年における世界の原子力発電設備容量（377GWe）が必要とする年間の天然ウラン使用量（約5.6万tU/年）で使い続けた場合、既知資源764万tUは135年間賄える量となるが、確認資源量439万tUで評価すると約1/2の78年が消費限界年数となる。同機関の過去の報告（Uranium2005以降）を資源コスト区分ごとに見ると、USD40/kgU未満やUSD80/kgU未満のウラン資源は、確認資源、続いて推定資源と確実に資源量が減少し、2009年以降、USD80/kgU以上USD260/kgU未満の資源量が平衡状態にあることがわかる。これらのウラン資源量と左記に外挿した2100年の原子力発電容量（低位予測：420GWe、高位予測：1600GWe）に対応する年間消費量（低位予測：7.2万tU、高位予測：22.3万tU）から2100年までの残存資源量を評価すると、2014年に764万tUとされる既知資源は、低位予測で176万tUまで減少すると評価され、高位予測では2070年過ぎに残存量がゼロ（枯渇）になる。同様に確認資源439万tUで評価すると、それぞれ、低位予測で2080年、高位予測で2055年には残存資源量がなくなることになる。パリ協定後、脱炭素化指向によりロシア、中国、インドを始めとして、原子力発電の導入を加速する動きを踏まえると、決して考えられないことではないことがわかる。現実的には、低位予測と高位予測の間で推移することが考えられるが、いずれも、確認資源が消費限界に到達する前には、資源流出抑制が働き、流通量の規制やこれを引き金とする価格の高騰が十分懸念されるため、21世紀半ばまでにはウラン資源の確実な確保に加え、ウラン資源の輸入に頼らない準国産エネルギーシステムの構築、即ち、高速炉を実用化できる技術基盤を整備しておくことが必要である。

3. 国内原子力の見通し

2018年6月現在、新規基準への適合性審査にかけられた原子力発電所は26基であり、2015年7月に策定された「長期エネルギー需給見通し」[6]における2030年断面の原子力比率（20～22%）確保に必要な原子力発電設備容量は、設備利用率を75%（既設軽水炉発電所のこれまでの平均）とした場合、32～36GWeとなるが、既に20年の延長申請が認可された発電所を含め全ての発電所を再稼働しても40年運転制限の下では需給見通しは達成できず、既設軽水炉を全て再稼働し、なおかつ60年運転とすることでようやくクリアできる。しかし、2030年のエネルギー需給を満足したとしても、2030年代半ばまでには60年を過ぎた発電所の廃止措置が始まり、急速に発電量は減少していく。原子力の発電設備容量を維持するには、2040年頃には従来から計画されていた新規発電所を投入していくことで、2050年頃までの発電量需給見通し維持は何とか達成が可能である。2050年断面における原子力発電比率が維持できたとして、その後も発電比率を維持するには、2050年以降導入すべき次世代の発電所をどのような炉型とするかをそれ以前には決定しなければならない。そこで、21～22世紀に向けた日本の原子力政策におけるあらゆる方面からの選択肢を検討し、今後の世界の原子力環境の中で、我が国が選択すべき方向性を評価した。

3-1. 国内原子力政策の選択肢の組合せ（導入シナリオ）の特徴

我が国の核燃料サイクル政策は、第5次エネルギー基本計画にも示されるように、高レベル放射性廃棄物の減容化・潜在的有害度低減や資源の有効利用等に資することを基本方針として、再処理やプルサーマル等の推進を指向している。そこで、原子力発電の長期継続に至る過程を分解し、①再稼働する原子力発電所をいつまで継続するか（順次停止・発電の継続）、②そこで発生する使用済燃料はどう処置するか（直接処分・再処理）、③使用済燃料から分離回収したPuをどう処置するか（現計画のプルサーマル計画まで使用・プルサーマルの長期継続）、④その使用済燃料（プルサーマル）はどう処置するか（直接処分・再処理）、

⑤使用済プルサーマル燃料から分離回収したPuはどう処置するか（プルサーマルでマルチリサイクル・高速炉で燃焼）、⑥その使用済燃料はどう処置するか（第二再処理以降で適宜再処理・さらに将来再処理）の間に沿い、表1に示す長期に亘る選択肢の組合せ（シナリオ）について諸量を評価した。評価に際しては、以下の指標を設けシナリオの比較を実施した。

指標①・・・使用済燃料の中間貯蔵量は、現在計画する中間貯蔵対策量(約3万tHM)を超えないこと。

指標②-1・利用目的のないPu(余剰Pu)を保持しないため、再処理で回収したPuの貯蔵量はできるだけ少なくする。

指標②-2・核燃料サイクル系内の炉外Puインベントリが過剰に増加しないこと。

指標③・・・天然ウラン使用量が現在の購入契約量を超過する時期の明確化

指標④-1・放射性廃棄物発生量の減容効果として、処分場面積が増加しないこと。

指標④-2・処分後の放射能の潜在的有害度の低減

表1 原子力政策で考えられる選択肢の組合せ（シナリオ）一覧

シナリオ		軽水炉				高速炉(FR)	
		発電(UOX)	使用済UOX燃料	発電(MOX)	使用済MOX燃料	発電(MOX)	使用済FR燃料
原子力 早期停止	A1	2030年までに 全プラント停止	中間貯蔵後 ⇒直接処分	既保有Pu分の み発電	発生分は 直接処分	—	—
原子力 順次停止	B1	再稼働し所定の 年数稼働後、停止 新增設なし	中間貯蔵後 ⇒直接処分	既保有Pu分の み発電	中間貯蔵後 ⇒直接処分	—	—
	B2		RRPで再処理 以降は直接処分	現計画のみ (大間NPPまで)		—	—
2030年発電 割合を維持 高速炉導入 なし	C1	発電量維持のため UOX新增設導 入	中間貯蔵後 ⇒直接処分	既保有Pu分の み発電	中間貯蔵後 ⇒直接処分	—	—
	D1		RRPで再処理 以降は直接処分	現計画のみ (大間NPPまで)		—	—
	E1		Puバランス範囲内 で継続発電 (全発電量の1/3)	第2再処理～	—	—	
	E2				—	—	
2030年発電 割合を維持 高速炉導入 あり	F1	高速炉移行完了 までは新增設	全量再処理 六ヶ所再処理 第2再処理 第3再処理	現計画のみ (大間NPPまで)	第2再処理～	2050年頃導入 (最大導入量:プ ルサーマル規模)	第2再処理～
	F2					第3再処理～	第3再処理～
	G1				第2再処理～	2050年頃導入 2100年以降、全 発電量規模まで 移行	第2再処理～
	G2					第3再処理～	第3再処理～
	G3					第3再処理～ 再処理/MA分離	向上 MA2wt%含有

3-2. シナリオ諸量の比較

(1) 使用済燃料の中間貯蔵管理量の逼迫

直接処分を選択した場合、使用済燃料の中間貯蔵量は、2030年過ぎに貯蔵限界量(約3万tHM)を超えるため、約1万tHM程度の追加の貯蔵施設が必要となる。一方、全量再処理を選択した場合には、使用済燃料の中間貯蔵量は1.5万tHM程度に留まる。2050年～2120年にかけて全発電量の1/3程度(約12GWe)まで高速炉を導入した場合、2150年時点の中間貯蔵量は1万tHM以下に留まる。さらに2090年頃から高速炉に本格移行するシナリオでは、貯蔵量は0.3万tHM程度までに減少する。

(2) プルトニウム管理

再処理によって回収されるPuの貯蔵量は、多くのシナリオにおいて最大50tPu以下(平均的には30tPu以下)に抑制することが可能である。また、使用済燃料、ガラス固化体、貯蔵中の製品Puなどの炉外のPuインベントリに関して、直接処分を選択した場合、使用済燃料の形態で単調増加し2150年には約1,000tPuを超える。一方、高速炉の本格導入を行い完全移行する選択肢では、高速炉の本格導入開始時期(2090年

頃)から炉外Puインベントリは減少し、完全移行到達の2120年以降、使用済燃料集合体(冷却中・再処理待機)の形態で約300tPu程度になる。

(3) エネルギー安全保障

ウラン燃料を利用する軽水炉体系を長期に継続する場合、天然ウランの使用量は単調増加し、2070年には我が国のウラン購入契約量35万tUを超え、2150年には80万tUに達する。また、プルサーマルの長期継続や高速炉との併存によってウラン資源の使用量を抑制する場合、使用量は約8%~18.5%削減されるが、2150年時点で68万tUに達する。一方、2090年頃から高速炉の本格導入・完全移行を行うと、完全移行が完了する2120年時点でウランの使用量は50万tUとなり、その後の増加は抑制されるが、約10万tUの追加契約が必要となる。このウランの使用量は、高速炉の導入量に比例するため、将来的に現契約量に留めるには、高速炉の実用化を2050年頃より始める必要があることを示唆している。

(4) 放射性廃棄物の減容・潜在的有害度の低減

直接処分を選択した場合、安定処分に必要な廃棄体の離間距離がガラス固化体の離間距離に比べて、より距離を取る必要があることから、より多くの処分場面積が必要となる。ワンスルーで軽水炉を継続使用した場合、処分場面積は約32km²(山手線内側の面積の約1/2)が必要となるが、再処理を行いガラス固化体として処分すると高速炉の導入如何に関わらず処分場の面積は約7km²(羽田空港の約1/2)となる。さらに高速炉サイクルとしてMAを廃棄物から分離することにより、ガラス固化体の処分面積は約5km²に縮小が可能となる。直接処分体の放射能の潜在的有害度は、埋設後から天然ウランレベルに低下するまでに、約19万年を必要とする。一方、現計画のプルサーマルと高速炉の併存を行い、その後再処理からガラス固化体として埋設する場合、天然ウランレベルに低下するには、約1~2万年を要する。高速炉の本格導入・移行を行い、さらに再処理時の高レベル廃液からMAを99%の収率で分離回収し(ただし、超長寿命核分裂生成物:LLFPの分離は除く)高速炉に一定量装荷して燃焼させると、放射能の潜在的有害度は、約0.2万年まで短縮が可能となる。

4. 結論

2015年12月の気象変動に関するパリ協定合意を受け、世界の原子力発電の規模は増加傾向に向かい、2050年時点の予測は、400GWeから930GWeへと拡大する傾向にあり、これに伴って天然ウランの需要増加が予想される。現在評価されている天然ウラン資源量は既知資源量で764万tUであり、パリ協定以前の世界の年間ウラン使用量が一定と仮定した消費限界年数は約135年と評価されるが、エネルギー政策として議論する際には、原子力発電規模の拡大の不確実性も考慮した検討が必要である。この視点から見ると、天然ウラン資源は、21世紀半ば(2050~2060年)には確認資源を消費し尽くし、推定資源に頼ることとなり、流通制限により価格高騰が懸念される。エネルギー自給率の低い日本として、このような状況に対応していくには、高速炉建設に必要となるリードタイムも考慮し、21世紀半ばには、ウラン資源への依存度を下げることができる高速炉技術の実用化見通しを獲得しておくべきである。

種々のシナリオにおける諸量評価の結果においても、高速炉の導入は、天然ウランの需要を抑え、我が国をウラン資源の流通規制や価格高騰のリスクから回避できる方策であるとともに、結果として我が国のエネルギーセキュリティ確保において有効であることを示した。さらには、ガラス固化体の発生量、処分場面積や潜在的有害度の低減効果も期待できる可能性を提示した。

これらの結果より、長期的視点からみた高速炉開発は、21世紀半ばまでに使用済MOX燃料を高速炉燃料として利用(U/Puの資源有効利用)することを可能にし、ウラン価格高騰の不確実性に備えるべきである。その次には、高速炉サイクルとしてMAのリサイクルを目指し、放射性廃棄物発生量を減容と潜在的有害度の低減に向けて段階的なシステムの技術拡張を図るべきである。

参考文献

- [1] IAEA-RDS-1/37, “Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2017 Edition”, Sep. 2017
- [2] IAEA/NEA No.7301, “Uranium 2016 Resources, Production and Demand.”,2017
- [3] IEA/NEA, “Technology Roadmap Nuclear Energy 2015 edition”, 2015
- [4] 第4回戦略ワーキンググループ資料2, ”The Progress of the GEN-IV reactor in China”, 2017.9
- [5] 第5回戦略ワーキンググループ資料2, 「インドの高速炉サイクル開発戦略」,2017.10
- [6] 経済産業省, 「長期エネルギー需給見通し」, 平成27年7月

新型炉部会セッション

高速炉戦略ロードマップ検討会報告

Report from Fast Reactor Strategic Roadmap Committee

(3) 短期的視点からの検討：技術継承と東電福島第一事故を踏まえた安全性向上

(3) Short-Term Perspective: Technology Succession and Safety Improvement Based on TEPCO Fukushima Dai-ichi Accident

*堺 公明¹¹ 東海大学**1. はじめに**

我が国は、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進を基本的方針としている。その方針の下、「第5次エネルギー基本計画」（2018年7月閣議決定）[1]では、『高速炉開発の方針』（2016年12月原子力関係閣僚会議決定）に基づき策定されるロードマップの下、米国や仏国等と国際協力を進めつつ、高速炉等の研究開発に取り組む」とされており、我が国は今後も技術開発を推進していくこととされている。新型炉部会は、長期的視点から検討した結果、「資源の有効利用」と「環境負荷低減」を両立できる高速炉を、必要性が高まる可能性のある21世紀半ばには高速炉を実用化できる技術基盤を整備すべきと考えている。一方、東京電力福島第一原子力発電所事故、電力自由化の進展および2016年末の「もんじゅ」廃止措置決定といった情勢の大きな変化を踏まえる必要がある。このため、短期的視点からの検討として、現在の情勢を考慮して向こう20年から30年間に取り組むべき事項の観点について検討する。

2. 社会的合意形成に向けた取組み

「高速炉開発の方針」[2]において、「今後の我が国の高速炉開発は、世界最高レベルの技術基盤の維持・発展を図りつつ、高い安全性と経済性を同時に達成する高速炉を開発し、将来的な実用化を図り、もって国際標準化に向けたリーダーシップを最大限に発揮することを目標に掲げる。」こととされているが、開発のステークホルダーをはじめ、規制機関を含む政府の関係省庁、都道府県、関係市町村、国民の各層において本決定が十分に浸透し、理解を得た状態で開発を推進することが重要である。特に、高速炉開発は、向こう50年から100年程度の長期的な取組みが必要となることから、エネルギー安全保障等の重要性、確保すべき安全性の目標、得られる便益及びコスト等の視点を長期間にわたって共有できるように、社会的な合意形成に取り組むとともに、その維持に努めることが重要である。

3. 安全性の向上（リスク低減）

東京電力福島第一原子力発電所事故により、我が国では安全性に対する考え方が見直され、新規制基準では、より過酷な自然災害への対策や様々なシビアアクシデント対策等を確実に行うことが要求されるようになった。一方、第4世代炉国際フォーラム（GIF）では、高速炉開発国の政府間協力として、ナトリウム冷却高速炉（SFR）に対する国際的な安全設計要件である安全設計クライテリア（SDC）と安全設計ガイドライン（SDG）の構築が進められている[3]。

そこでは、自然災害を起因とする事象を含めて炉心損傷を受動的に（物理現象を利用して）防止できる機構や、仮に大規模な炉心損傷に至った場合にも、その影響を原子炉容器内で終息させ、最終障壁である格納容器内に放射性物質を閉じ込め、周辺公衆の避難を不要とできるほど安全性を高めるための技術開発が重要となっている。これまでは、炉心損傷に至る事故を起こさないことに重点が置かれていたが、それだ

* Takaaki Sakai¹

¹ Tokai Univ.

けではなく、今後は、炉心損傷が発生しても、敷地外への放射性物質の拡散を実質的に防ぐためのリスク低減努力を重視していく必要がある。そのためには、実用発電用原子炉（軽水炉）とは異なる高速炉の特徴を考慮したリスク低減を図る必要がある。また、こうした技術は、先行して開発された技術がデファクトスタンダード化することから、国際的な開発状況に遅延することなく、実用化を進めることが重要である。

4. 技術継承

我が国の高速炉開発は原型炉「もんじゅ」の設計・建設から30～40年経過している。このため「もんじゅ」経験者の引退により次期炉の設計にその経験を生かしていくことが困難な状況になってきており、世代間での技術伝承や人材育成は急務である。机上の設計研究と要素技術開発だけでは、高速炉の実用化に必要な機器の開発、プラント建設、運転保守等の能力は涵養されない。先行炉の経験知があるうちに、次世代を担う若手研究者・技術者と共に我が国の高速炉技術を維持・発展させるべきである。このためには、今後数十年かけて、安全性を向上させたプラント設計と技術開発、そして機器・構造物の製造・建設、運転という一連の経験を積む必要がある。

人材育成の観点からは、原子力エネルギーの役割、その安全な利用のための種々の対策等に関する丁寧な説明に継続的に取り組むとともに、原子力について正しく理解し、社会に対して伝えていくことのできる人材の育成が重要である[4]。特に、高速炉に関する正確な知識と情報に基づく教育がモチベーションを有した人材の育成につながることから、大学における原子力エネルギー利用に関する幅広い教育を強化するとともに、研究開発機関、規制機関等と大学間の高速炉サイクル技術に関する具体的な研究連携を推進し、研究開発人材に関するシームレスな育成を図ることが重要である。

5. 不確実性への備え

エネルギー安全保障と環境負荷低減のいずれがどの程度要求されるか不確実性が高いことから、両者に柔軟に対応できる計画とすることが重要である。また世界の技術開発の方向や市場の動向と整合できるように、炉型や燃料などに柔軟性を確保しておくことが望ましい。

現状の世界の高速炉開発に関する趨勢は、ナトリウム冷却と酸化物燃料あるいは金属燃料を組み合わせた高速炉サイクルである。我が国で蓄積されている技術は、酸化物燃料とナトリウム冷却炉の技術に厚みがあることから、ナトリウム冷却高速炉サイクルから優先的に開発していくのが合理的である。

一方、国際的には、萌芽的なものを含めて、様々な冷却材、燃料形態の革新的な高速炉概念の研究開発も行われている。これらの研究開発の動向については、常にアンテナを高くし、革新炉における研究開発から酸化物燃料ナトリウム冷却高速炉へ適用できる技術が開発される可能性に常に注意を払っていく必要がある。我が国はナトリウム冷却高速炉等の基幹技術の実用化に向けた技術開発とともに、革新炉技術の多様性確保の両者を達成できる研究開発環境を整備し、自由な発想ができる大学等が中心となって、幅広く多様な概念検討や基礎研究に取り組み、革新技術の創出と人材の育成を進めていくことが期待される。

6. 国内資産の活用

国際的にも貴重な施設である「もんじゅ」は廃止措置に移行するが、廃止措置期間中においても燃料取り出し時の燃料取り扱い技術知見蓄積や廃止措置過程における点検経験に基づく高速炉保守管理技術知見の蓄積や、解体過程において長期間ナトリウムを内包した機器の経年特性データ取得・設計検証を行うなど重要な技術成果を取得することができる。また、地震時のプラント安全性の評価構築に向けた「もんじゅ」の主要機器や構造物を活用した耐力限界の把握、次期炉設計に必要な技術開発成果の集約、運転シミュレータ、ナトリウム取扱い訓練施設等を活用した高速炉技術者の人材育成にも活用できる。さらに、既存及び今後「もんじゅ」で得られる知見・経験とシミュレーション技術を組み合わせた新たな設計最適化手法を開発することにより、「もんじゅ」で期待された成果に匹敵した知見を得ることも期待できる。このため、廃止措置期間中においても国際的な視野で「もんじゅ」を最大限に活用した技術開発、知見・経験の蓄積を実施するべきである。

実験炉「常陽」は、現在、新規制基準への適合性審査に対応しているところである。「常陽」は世界最高レベルの高速中性子束を有しており、多様なニーズに対応可能なように工夫がなされている。また、高速炉研究や人材育成のみならず、核融合や非原子力分野からの基礎基盤研究や多目的利用が期待されている。さらに、照射後試験施設が近接しており、インフラが充実していることから、研究の発展性に期待できる。このような期待に応えるためにも、「常陽」は早期に再稼動して最大限活用していくべきである。

7. 国際協力

フランスとのASTRIDの共同開発や、ロシアの運転経験の習得など、海外と積極的に知識共有を図るべきであるが、国際協力にはギブアンドテークが要求される現実を考えると、国内技術の維持・向上が前提であることを忘れてはならない。また、ASTRID計画の規模縮小など資本主義国におけるプロジェクトはその時代の経済に大きく左右されることから、過度な海外依存は安定性を損なう可能性もある。

したがって、国内での開発と技術維持が基本であり、国際協力はそれを補うものであり、有効に活用しつつも、肩代わりするものではないと認識すべきである。

8. 結論

高速炉開発は、数十年オーダーの長期的な取組みが必要となることから、社会的合意形成に向けた取組みが必要である。また、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえて安全性を高める技術開発を推進していくとともに、先行炉の経験知があるうちに、次世代を担う若手研究者・技術者と共に我が国の高速炉技術を維持・発展させるべきである。このためには、今後数十年かけて、安全性を向上させたプラント設計と技術開発、そして機器・構造物の製造・建設、運転という一連の経験を積む必要がある。将来の不確実性への備えとして、基幹技術のみならず多様な技術開発にも取り組み、革新技术の創出を推進して、柔軟性を確保しておくことが望ましい。また、次期炉に役立つ知見を蓄積するため、「もんじゅ」、「常陽」といった国内資産を有効に活用すべきである。国際協力は有効に活用しながら、国内での開発と技術維持を基本的に推進していくべきである。

参考文献

- [1] 経済産業省、第5次エネルギー基本計画（案）（2018年7月閣議決定）
- [2] 原子力関係閣僚会議、「高速炉開発の方針」（2016年12月決定）
- [3] Gen-IV International Forum, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_93020/safety-design-criteria
- [4] 文部科学省原子力人材育成作業部会、「中間取りまとめ」（2016年8月）

(Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room H)

[2H_PL04] Discussion

東京電力福島第一原子力発電所事故、電力自由化の進展および2016年末の「もんじゅ」廃止措置決定といった情勢の大きな変化により、高速炉開発戦略を練り直す必要性が出てきている。また、国が設置した高速炉開発会議の下、今後10年程度の高速炉開発戦略ロードマップ構築の検討が実施されている。このような状況から、原子力学会の新型炉部会は「高速炉戦略ロードマップ検討会」を設置し、高速炉サイクル開発の長期目標や人と社会との係りを含む技術戦略を中心に、今後検討されるロードマップを補完する見解を示すこととした。

Planning Lecture | Joint Session | Joint Session

[2K_PL] Issues for security measures for univer

Chair:Nobuaki Sato(Tohoku Univ.)

Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room K (B41 -B Building)

[2K_PL01] Opening Remarks

*Mitsuru Uesaka¹ (1. Univ. of Tokyo)

[2K_PL02] Current status and issues of security measures at university nuclear fuel facilities

*Toshiaki Hiyama¹ (1. Kyushu Univ.)

[2K_PL03] Current status and issues of security measures at university RI facilities

*Tsutomu Ohtsuki¹ (1. Kyoto Univ.)

[2K_PL04] Subjects and prospects of security measures for facilities other than commercial reactors

*Toshiaki Hiyama¹, *Tsutomu Ohtsuki², *Mitsuru Uesaka³ (1. Kyushu Univ., 2. Kyoto Univ., 3. Univ. of Tokyo)

[2K_PL05] Closing Remarks

*Masayoshi Uno¹ (1. Fukui Univ.)

(Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room K)

[2K_PL01] Opening Remarks

*Mitsuru Uesaka¹ (1. Univ. of Tokyo)

本セッションでは、IRRS規制に伴う、発電炉等以外の原子力施設へのセキュリティ対策の強化に関して、大学等核燃およびRI施設のセキュリティ対策の現状について関連機関より報告していただくとともに、規制の在り方、今後の対応について意見交換を行う。具体的には原子力系大学関係者より、①大学等核燃施設のセキュリティ対策の現状と課題について、② 大学等R施設のセキュリティ対策の現状と課題について報告していただく。

これらを踏まえて、講演者および関係委員をパネラーとしてパネルディスカッションを行い、大学等核燃およびRI研究施設のセキュリティ対策について今後の在り方、対応について意見交換を行い、まとめる。

教育委員会・「原子力アゴラ」調査専門委員会 合同セッション

大学等核燃料および RI 施設におけるセキュリティ対策の在り方

Issues for security measures for univer

大学等核燃料施設セキュリティ対策の現状と課題

Current status and issues of security measures at university nuclear fuel facilities

*檜山 敏明

九州大学

1. 概要

平成 28 年に原子力規制庁が IAEA による IRSS (Integrated Regulatory Review Service) を受入れ、IAEA から日本国政府へ IRSS 報告書が提出された。これを受け平成 29 年 2 月に改正法令案提出、平成 29 年 4 月から一部施行され、平成 31 年度には完全施行の予定である。この中で RI 法において、初めて核セキュリティ対策が法令化された。

一方、核燃料施設では、従前から原子炉等規制法に基づく「核物質防護」対策が進められており、核物質防護規定の認可、核物質防護管理者の選任、核物質防護検査等が義務付けられている。しかし、殆どの大学における核燃料施設では、プルトニウム、濃縮ウラン、ウラン 233 等の防護対象特定核燃料物質は取扱っていないため、核物質防護の対象施設とはなっていない。従って、大学の核燃料施設において、核セキュリティ対策について、現段階において問題になることはないと考えられるが、施設の老朽化、核燃料物質等の安全管理、保管管理等の問題が顕在化しつつあり、核セキュリティを広義に解釈すれば、課題を有していることが分かった。

「大学等核燃料および RI 研究施設検討・提言分科会」では、国立大学を中心に、核燃料使用施設（J 施設）、国際規制物資使用施設（K 施設）の現状を調査するとともに、それぞれの施設における課題について整理を進めてきた。この中で、大学における核燃料施設では、研究分野の縮小と施設の使用頻度の減少、施設の老朽化と安全管理能力の低下、担当教員の激減と管理業務の増加、核燃料物質の保管施設、施設の廃止、長期にわたる基礎・基盤研究への影響等が課題として挙げられた。

このような状況を背景に、大学では、核燃料研究施設の維持やそれに伴う実験教育の継続が難しく、原子力分野における基礎・基盤研究の展開への影響が懸念されている。また、原子力分野における教育および研究における環境整備と次世代への人材育成への対応が喫緊の課題となっている。

そこで本委員会では、

- (1) 学内の K 施設、J 施設の集約化による管理安全、維持管理の合理化
- (2) 核燃料施設の拠点化と統廃合による安全管理体制の確保
- (3) 核燃料物質及び核燃料廃棄物の集約・保管による核セキュリティ対策
- (4) 原子力人材育成に対する核燃料施設の重要性

等についての提言を纏めた。

*Toshiaki Hiyama, Kyushu Univ.,

教育委員会・「原子力アゴラ」調査専門委員会 合同セッション

大学等核燃および RI 施設におけるセキュリティ対策の在り方
Issues for security measures for univer**大学等 RI 施設のセキュリティ対策の現状と課題**

Current status and issues of security measures on RI facilities in universities

*大槻 勤

京都大学

1. 概要

平成 28 年に IAEA から日本政府に与えられた勧告 IRSS (Integrated Regulatory Review Service) に伴い、平成 29 年 4 月 14 日から新法令が一部施行され、平成 31 年度 9 月には完全施行される予定である。この新法令では従来からの従事者や公衆の安全に加えて、ラグビーワールドカップや東京オリンピックを見据えたテロ対策(特定放射性同位元素セキュリティ、いわゆる特定 RI セキュリティ)が求められている。

改正放射線障害防止法施行規則第 24 条の 2 の 2 に特定 RI セキュリティの区分として以下のような区分 1 から区分 3 に分類され、特定 RI の数量等を定める告示がなされた。ここでは非密封(固体状のもの、それ以外)、密封線源について基準数量が別表として与えてある。これらのデータは、基本的に IAEA Dangerous quantities of radioactive material (D-values) に基づいている。また、特定核燃料物質セキュリティとの違いは DBT(設計基礎脅威)がないことが挙げられる。

区分	$\Sigma A/D$ の倍数*	主な実施内容
区分 1	1000 以上	防護区域の設定 カメラ等による常時監視 アクセス制限(鍵などで実施。2 種類以上。) 障壁の設置(2 層以上)
区分 2	10 以上 1000 未満	防護区域の設定 カメラ等による常時監視 アクセス制限(鍵などで実施。1 種類以上。) 障壁の設置(2 層以上)
区分 3	1 以上 10 未満	防護区域の設定 アクセス制限(鍵などで実施。1 種類以上。) 障壁の設置(1 層以上)

これらの RI セキュリティ区分の共通事項として 1) 特定 RI 防護管理者の選任・届出(選任にあたり教育が必要)、2) 特定 RI 防護規程の制定・届出、3) 特定 RI に係る報告、4) 法定帳簿、5) 防護従事者・常時立入者の選任・教育訓練、6) 情報セキュリティ(管理用 PC)、7) 特定 RI の所外運搬に関する事項等が義務化される。

京大複合原子力科学研究所(旧原子炉実験所)はいわゆる特定核セキュリティ施設と特定 RI セキュリティの二重規制施設となる。これらを踏まえて、当研究所の RI セキュリティの準備状況や具体的な方策について紹介する。

*Tutomu Ohtsuki, ¹Kyoto Univ.,

教育委員会・「原子力アゴラ」調査専門委員会 合同セッション

大学等核燃および RI 施設におけるセキュリティ対策の在り方
Issues for security measures for univer**パネルディスカッション**

Subjects and prospects of security measures for facilities other than commercial reactors

*檜山 敏明¹, *大槻 勤², *上坂 充³¹九州大学, ²京都大学, ³東京大学**1. 概要**

福島第一原子力発電所事故以降に IAEA の勧告による IRRS 規制が法令改正を経て実施されつつある。これらの原子力規制に対しては、規制内容によっては大学等における RI 等研究施設の維持やそれに伴う実験教育の継続が難しく、原子力分野における基礎・基盤研究の展開への影響が懸念されるとともに、原子力分野における教育および研究における環境整備と次世代への人材育成への対応が喫緊の課題となっている。特に、セキュリティ対策が取り上げられ、実用炉等以外の原子力施設に対する内部脅威対策の強化が検討され始め、多くの大学等施設が対象となってくる状況にある。そこで、大学等核燃および RI 施設のセキュリティ対策の現状や課題について該当施設からの講演を受け、さらにセキュリティ対策の課題と展望についてパネルディスカッションにて検討することとした。多くの原子力学会員にとって、原子力分野の大学における RI 等研究施設利用に係る基礎・基盤研究の現状を理解し、今後の在り方を考えることは重要であり、非常に関心が高いテーマである。

本セッションでは、IRRS 規制に伴う、発電炉等以外の原子力施設へのセキュリティ対策の強化に関して、大学等核燃および RI 施設のセキュリティ対策の現状について関連機関より報告していただくとともに、規制の在り方、今後の対応について意見交換を行う。具体的には

① 大学等核燃施設セキュリティ対策の現状と課題

原子力系大学関係者より、大学等核燃施設のセキュリティ対策の現状と課題について大学から報告していただく。

② 大学等 R 施設のセキュリティ対策の現状と課題

原子力系大学関係者より、大学等 RI 施設のセキュリティ対策の現状と課題について大学から報告していただく。

これらを踏まえて、講演者および関係委員をパネラーとしてパネルディスカッションを行い、大学等核燃および RI 研究施設のセキュリティ対策について学会として、なすべきこと、できることは何かを考える場とする。

*Toshiaki Hiyama¹, *Tutomu Ohtsuki², *Mitsuru Uesaka³

¹Kyushu Univ., ²Kyoto Univ., ³The Univ. of Tokyo

(Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room K)

[2K_PL05] Closing Remarks

*Masayoshi Uno¹ (1. Fukui Univ.)

本セッションでは、IRRS規制に伴う、発電炉等以外の原子力施設へのセキュリティ対策の強化に関して、大学等核燃およびRI施設のセキュリティ対策の現状について関連機関より報告していただくとともに、規制の在り方、今後の対応について意見交換を行う。具体的には原子力系大学関係者より、①大学等核燃施設のセキュリティ対策の現状と課題について、② 大学等R施設のセキュリティ対策の現状と課題について報告していただく。

これらを踏まえて、講演者および関係委員をパネラーとしてパネルディスカッションを行い、大学等核燃およびRI研究施設のセキュリティ対策について今後の在り方、対応について意見交換を行い、まとめる。

Planning Lecture | Board and Committee | Public Information Committee

[2L_PL] How to disseminate information to society as AESJ

Activities of the Public Information Committee

Chair:Reiko Nunome(NUMO)

Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room L (D12 -D Building)

[2L_PL01] The current status of disseminating information through mass media and the future

*Mito Sagai¹ (1. CRIEPI)

[2L_PL02] The current state of the positional statement and the future

*Ryuichi Yamamoto¹ (1. JAEA)

広報情報委員会セッション

原子力学会としての社会への情報発信のあり方 —広報情報委員会の活動—

How to disseminate information to society as JAES

-Activities of the Public Information Committee-

*佐賀井美都¹、*山本隆一²、布目礼子³¹電力中央研究所、²日本原子力研究開発機構、³原子力発電環境整備機構

1. はじめに

学会には外部への公式な情報提供として、プレスリリース（以下PR）とポジション・ステートメント（以下PS）という二つの手段がある。このうちPRは学会主催イベントの開催案内や学会長の記者会見の他、特に緊急性を要する案件について活用してきている。また、PSについては、時間をかけて議論をし、学会員パブコメを含めて学会内の多くの目でチェックアンドレビューをした上で、学会HP上で公開している。これら状況については、この3年ほど秋の大会にて現状紹介し、併せて学会員各位のご意見を伺ってきたところである。

PRは学会HPにおいて「社会への情報提供を行うため、本会の主要な動きについて、随時プレスリリースを行っています」としているが、適時性を優先するが故に公平性、厳密性、正確性、さらに分かりやすさ、というような概念は明示されていない。これはPRの性格上、情報の受け取り手（市民の代表としてのマスコミ）との対話を通じてある程度の解説が可能との発想ではないかと考えられる。

一方、PSは「社会が関心を持つ原子力の平和利用に関する重要事項」について

- ① 学会としての見解等を分かり易く説明し、原子力技術への社会の理解向上に寄与する
- ② 学会員が平易に説明するためのツールを提供する
- ③ 学会のホームページ（以下HP）に掲載し、学会の内外に広く公開し、学会活動の透明性を高め、社会に対するオピニオンリーダーとしての責任を果たす

ことを目的として発信している、と学会HP上で明記していることから、その責任を果たすべく、公開までの手続きを重厚にしているのであるが、過去の企画セッションでも議論したように適時性については目をつぶらざるを得ない状況である。今回は、この二つの情報発信手段の有り方について、学会員各位に問題の所在を共有して頂くとともに、それぞれのあるべき方向について意見交換したい。

2. PRの意義と課題

PRは冒頭記述したように適時性を身上としており、特に緊急時には「広報・情報伝達に関する規程」（社会への情報発信）第7条（緊急時や異常事象発生時の情報発信）に基づきPRを通じて情報発信することとされている。PRの実施対象となる案件は、発信元または依頼元となる部会等による正式な承認を経るなど、学会として公式に情報・コメントを発信できるものであることを前提とし、未承認、未発表の活動等に関わるものは原則として対象としていない。つまり、PRは実施手順にしたがって手続きされたものであれば、広報情報委員会が作成した原案（PR定型）に合わせつつ、依頼元の各部会等の自律性を尊重して実施される。それ故に公平性、厳密性、正確性、分かりやすさは、依頼元の部会等に委ねている。そのため、学会員の立場によっては、その表現や発出のタイミング等について疑義を生じ得る可能性を秘めている。

PRにおける広報情報委員会の役割は、依頼元部会等からの資料をもとに内容等を協議しながらPR原案を作成し、広報情報委員長の権限により実施可否を決定・実施することである（但し、学会声明・提言・見解は広報情報委員会による審議を必要とする）。現行ルールでは、この過程において依頼元の部会等が意図するPRのための資料に対して広報情報委員会がその内容・表現等について是非を議論し審議する仕組みになっていない。

PRは部会等が適時に情報発信できる仕組みであり、部会等の専門性を生かす手段としてその機能を維持する意義は大きいと考えるものの、社会への直接的な情報発信であることを念頭に置き、誤解を招きかねない表現やタイミングは本会としてのリスクを負うかもしれないことを意識し考慮していくこともまた大切である。そこで、各部会等の自律性を尊重・担保しつつリスクを低減する手段として、例えば、PRを作成する際のガイドライン作成し、部会等にこれを尊重してもらおうといった工夫が必要ではないかと考えるが、学会員各位のご意見を賜りたい。

3. PSの意義と課題

PSは、学会及び学会員が市民に対して学問的成果あるいはそれを基にした見解等を示す仕組みであるため、専門性を基にしつつも、理解しやすい表現と構成の工夫で、学会が言わんとするところを理解して頂くことに留意している。そのためにPSの作成に当たっては、それぞれの専門分野における知見を持つ研究者・技術者で構成する部会等が原案を作成した後、専門外の研究者や技術者が第三者的な立場で検討する組織（PSWG）がチェックした上で、倫理委員会のチェックも受け、更には一般学会員からの意見も求め、それらに添えつつ仕上げるという非常に手間のかかる仕組みとしている。また、作成公開したPSについては3年ほど前から定期的な妥当性評価を行う仕組みを導入し、将来にわたって維持管理する仕組みを構築した。

PSは、公表までに時間を要し、適時性と両立は困難であるものの、一般学会員の意見も含めた多面的なチェックをした上で仕上げるができる故に、学会としての姿勢や考え方を市民に提示する仕組みとして有意義と考えている。つまり、適時性が必要なメッセージについてはPRに仕組で対応すると考えれば、昨年度まで議論したPSの課題の内、特に即時性の確保については、これを必要以上に追い求めるべきではないのかもしれない、と考え始めている。

そこで例えば、適時性を優先したいメッセージについてはプレスリリースで対応することとして、それを発信した後、必要であればあらためて議論し、学会として有意義と判断したものについてはPSの仕組みに組み込んで入念にブラッシュアップした上で、その置き場所をPSに移し、維持管理していく、といったプロセスを用意しておくことも考えられるのではなからうか。即ち、PSとしてリリースするメッセージは、前記のようなものも含めて、適時性は求めないものの、学会として明示すべきもの、と再定義してはどうだろうか。このカテゴリーに入るものとしては、比較的普遍性が高い専門用語の説明や解説なども当然含まれるものとする。

いずれにしても、学会から発信するメッセージについてはその公平性、普遍性が有る程度のレベルで求められるはずであり、それを担保するための仕組みを構築していく必要が有るのではないかと考えている。学会員各位の御意見を賜りたい。

4. まとめ

PRについては、発出までの余裕が取りにくいことを考慮しつつ、公平性や分りやすさを多少なりとも改善し、学会の信頼を回復すると共に学会員の信頼を維持するために、本セッションでの学会員各位のご意見を参照しつつ、広報情報委員会として議論を進め、より適切な仕組みの中で運用すべきと考えている。

一方、PSにおいて残る課題として昨年度紹介した3点の内「和文版HPでPSの存在に気付にくい」との課題については、学会HPの改定作業の中でPSへのアクセス性の改善に取り組んでもらっており、早晩解決するものと考えている。そこで、現時点では以下の2点が課題として残っている。

① 現状のPSは「解説」が約7割を占めており、「見解」、「提言」が少ない

② 部会等による提案から最終的にPS公開に至るまで時間が掛かり過ぎ、適時性に課題有

このうち、①については昨年も紹介したように2、3の部会で「提言」を出す意欲が見られている他、2.で紹介したように提案組織の拡大に加え、テーマの公募も可能となることから、今後改善されていくことを期待したいところ。

最後に残る適時性については、3.で整理したように、プレスリリースとの棲み分けが適性化されれば、

そもそも課題ではなくなるようにも思う。

なお、新PS『燃料デブリ』について」において、分りやすさと適時性を両立させるべく取り組んだ便宜的手段（後日の用語解説集の作成）も本文のパブコメ対応に予想外の時間を要したこともあって、時間短縮効果は見られなかった。とはいえ、この過程で発案された「用語集」自体については、今後その対応範囲を拡大しPS全体の共通用語集としていくのが良いのではないかとの意見がPSWGの中で出ていることを紹介しておく。

以上

*Mito Sagai¹, *Ryuichi Yamamoto², Reiko Nunome³

¹CRIEPI, ²JAEA, ³NUMO

広報情報委員会セッション

原子力学会としての社会への情報発信のあり方 —広報情報委員会の活動—

How to disseminate information to society as JAES

-Activities of the Public Information Committee-

*佐賀井美都¹、*山本隆一²、布目礼子³¹電力中央研究所、²日本原子力研究開発機構、³原子力発電環境整備機構

1. はじめに

学会には外部への公式な情報提供として、プレスリリース（以下PR）とポジション・ステートメント（以下PS）という二つの手段がある。このうちPRは学会主催イベントの開催案内や学会長の記者会見の他、特に緊急性を要する案件について活用してきている。また、PSについては、時間をかけて議論をし、学会員パブコメを含めて学会内の多くの目でチェックアンドレビューをした上で、学会HP上で公開している。これら状況については、この3年ほど秋の大会にて現状紹介、併せて学会員各位のご意見を伺ってきたところである。

PRは学会HPにおいて「社会への情報提供を行うため、本会の主要な動きについて、随時プレスリリースを行っています」としているが、適時性を優先するが故に公平性、厳密性、正確性、さらに分かりやすさ、というような概念は明示されていない。これはPRの性格上、情報の受け取り手（市民の代表としてのマスコミ）との対話を通じてある程度の解説が可能との発想ではないかと考えられる。

一方、PSは「社会が関心を持つ原子力の平和利用に関する重要事項」について

- ① 学会としての見解等を分かり易く説明し、原子力技術への社会の理解向上に寄与する
- ② 学会員が平易に説明するためのツールを提供する
- ③ 学会のホームページ（以下HP）に掲載し、学会の内外に広く公開し、学会活動の透明性を高め、社会に対するオピニオンリーダーとしての責任を果たす

ことを目的として発信している、と学会HP上で明記していることから、その責任を果たすべく、公開までの手続きを重厚にしているのであるが、過去の企画セッションでも議論したように適時性については目をつぶらざるを得ない状況である。今回は、この二つの情報発信手段の有り方について、学会員各位に問題の所在を共有して頂くとともに、それぞれのあるべき方向について意見交換したい。

2. PRの意義と課題

PRは冒頭記述したように適時性を身上としており、特に緊急時には「広報・情報伝達に関する規程」（社会への情報発信）第7条（緊急時や異常事象発生時の情報発信）に基づきPRを通じて情報発信することとされている。PRの実施対象となる案件は、発信元または依頼元となる部会等による正式な承認を経るなど、学会として公式に情報・コメントを発信できるものであることを前提とし、未承認、未発表の活動等に関わるものは原則として対象としていない。つまり、PRは実施手順にしたがって手続きされたものであれば、広報情報委員会が作成した原案（PR定型）に合わせつつ、依頼元の各部会等の自律性を尊重して実施される。それ故に公平性、厳密性、正確性、分かりやすさは、依頼元の部会等に委ねている。そのため、学会員の立場によっては、その表現や発出のタイミング等について疑義を生じ得る可能性を秘めている。

PRにおける広報情報委員会の役割は、依頼元部会等からの資料をもとに内容等を協議しながらPR原案を作成し、広報情報委員長の権限により実施可否を決定・実施することである（但し、学会声明・提言・見解は広報情報委員会による審議を必要とする）。現行ルールでは、この過程において依頼元の部会等が意図するPRのための資料に対して広報情報委員会がその内容・表現等について是非を議論し審議する仕組みになっていない。

PRは部会等が適時に情報発信できる仕組みであり、部会等の専門性を生かす手段としてその機能を維持する意義は大きいと考えるものの、社会への直接的な情報発信であることを念頭に置き、誤解を招きかねない表現やタイミングは本会としてのリスクを負うかもしれないことを意識し考慮していくこともまた大切である。そこで、各部会等の自律性を尊重・担保しつつリスクを低減する手段として、例えば、PRを作成する際のガイドライン作成し、部会等にこれを尊重してもらおうといった工夫が必要ではないかと考えるが、学会員各位のご意見を賜りたい。

3. PSの意義と課題

PSは、学会及び学会員が市民に対して学問的成果あるいはそれを基にした見解等を示す仕組みであるため、専門性を基にしつつも、理解しやすい表現と構成の工夫で、学会が言わんとするところを理解して頂くことに留意している。そのためにPSの作成に当たっては、それぞれの専門分野における知見を持つ研究者・技術者が構成する部会等が原案を作成した後、専門外の研究者や技術者が第三者的な立場で検討する組織（PSWG）がチェックした上で、倫理委員会のチェックも受け、更には一般学会員からの意見も求め、それらに添えつつ仕上げるという非常に手間のかかる仕組みとしている。また、作成公開したPSについては3年ほど前から定期的な妥当性評価を行う仕組みを導入し、将来にわたって維持管理する仕組みを構築した。

PSは、公表までに時間を要し、適時性と両立は困難であるものの、一般学会員の意見も含めた多面的なチェックをした上で仕上げることができる故に、学会としての姿勢や考え方を市民に提示する仕組みとして有意義と考えている。つまり、適時性が必要なメッセージについてはPRに仕組で対応すると考えれば、昨年度まで議論したPSの課題の内、特に即時性の確保については、これを必要以上に追い求めるべきではないのかもしれない、と考え始めている。

そこで例えば、適時性を優先したいメッセージについてはプレスリリースで対応することとして、それを発信した後、必要であればあらためて議論し、学会として有意義と判断したものについてはPSの仕組みに組み込んで入念にブラッシュアップした上で、その置き場所をPSに移し、維持管理していく、といったプロセスを用意しておくことも考えられるのではなかろうか。即ち、PSとしてリリースするメッセージは、前記のようなものも含めて、適時性は求めないものの、学会として明示すべきもの、と再定義してはどうだろうか。このカテゴリーに入るものとしては、比較的普遍性が高い専門用語の説明や解説なども当然含まれるものとする。

いずれにしても、学会から発信するメッセージについてはその公平性、普遍性が有る程度のレベルで求められるはずであり、それを担保するための仕組みを構築していく必要が有るのではないかと考えている。学会員各位の御意見を賜りたい。

4. まとめ

PRについては、発出までの余裕が取りにくいことを考慮しつつ、公平性や分りやすさを多少なりとも改善し、学会の信頼を回復すると共に学会員の信頼を維持するために、本セッションでの学会員各位のご意見を参照しつつ、広報情報委員会として議論を進め、より適切な仕組みの中で運用すべきと考えている。

一方、PSにおいて残る課題として昨年度紹介した3点の内「和文版HPでPSの存在に気付にくい」との課題については、学会HPの改定作業の中でPSへのアクセス性の改善に取り組んでもらっており、早晩解決するものと考えている。そこで、現時点では以下の2点が課題として残っている。

① 現状のPSは「解説」が約7割を占めており、「見解」、「提言」が少ない

② 部会等による提案から最終的にPS公開に至るまで時間が掛かり過ぎ、適時性に課題有

このうち、①については昨年も紹介したように2、3の部会で「提言」を出す意欲が見られている他、2.で紹介したように提案組織の拡大に加え、テーマの公募も可能となることから、今後改善されていくことを期待したいところ。

最後に残る適時性については、3.で整理したように、プレスリリースとの棲み分けが適性化されれば、

そもそも課題ではなくなるようにも思う。

なお、新PS『燃料デブリ』について」において、分りやすさと適時性を両立させるべく取り組んだ便宜的手段（後日の用語解説集の作成）も本文のパブコメ対応に予想外の時間を要したこともあって、時間短縮効果は見られなかった。とはいえ、この過程で発案された「用語集」自体については、今後その対応範囲を拡大しPS全体の共通用語集としていくのが良いのではないかとの意見がPSWGの中で出ていることを紹介しておく。

以上

*Mito Sagai¹, *Ryuichi Yamamoto², Reiko Nunome³

¹CRIEPI, ²JAEA, ³NUMO

Planning Lecture | Technical division and Network | Fusion Engineering Division

[2N_PL] Education and human resources development in the field of fusion engineering and science

Chair:Satoshi Fukada(Kyushu Univ.)

Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room N (D23 -D Building)

[2N_PL01] Expectation of education and human resources in fusion engineering and science in universities

*Noriyasu Ono¹ (1. Nagoya Univ.)

[2N_PL02] Expectation of education and human resources in fusion engineering and science in companies

*Akira Ozaki¹ (1. Toshiba Energy Systems &Solutions)

[2N_PL03] Present status of education and human resources in nuclear engineering

*Nozomu Fujimoto¹ (1. Kyushu Univ.)

核融合工学部会セッション

核融合理工学分野の教育と人材育成

Education and human resources development in the field of fusion engineering and science

(1) 大学での核融合理工学教育と人材育成への期待

(2) 企業からの核融合理工学教育と人材育成への期待

(3) 原子力工学分野での教育と人材育成

(1) Expectation of education and human resources in fusion engineering and science in universities

(2) Expectation of education and human resources in fusion engineering and science in companies

(3) Present status of education and human resources in nuclear engineering

*大野哲靖¹, *尾崎 章², *藤本 望³, 深田 智³¹名古屋大学, ²東芝エネルギーシステムズ, ³九州大学

1. 部会セッション企画の背景と発表者紹介

平成 29 年 12 月核融合科学技術委員会が、「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」をとりまとめ、付随して「原型炉開発に向けたアクションプラン」と「項目別解説」を策定し、ITER 運転開始の開発優先度やマイルストーン等総合的開発行程、戦略的ロードマップを取りまとめた。この開発・研究の実証には、最低でも 10 年以上にわたる長期の核融合研究の継続が必要である。産業界、研究機関、大学に各役割が果たされており、オールジャパン体制で支えるためには、長期視野の洞察が必須である。核融合研究分野は、総合工学の一分野をなし、自己点火核燃焼プラズマの閉じ込め物理制御から、超伝導工学、プラズマ計測、ダイバータ先進材料、第一壁の熱・放射線照射過酷条件での高融点材料の健全性、燃料トリチウムの増殖と精製、安全管理を遵守した閉じ込め管理等多岐にわたる分野を総合した俯瞰力や専門力が必要である。その一方で人材を輩出する大学側において、いわゆる核融合学科・大学院はなく、理学部では物理、化学、生物等の専門領域、工学部では電気、機械、原子力（核）、材料工学等の多様な専門分野・視野での研究に支えられている。

上に述べた開発研究戦略で考えると、少なくとも 21 世紀中葉までの原型炉から遠く商業炉に至る研究開発が暗黙の了解のもとにある。この長期の核融合研究を支えるためには、人材育成が必要不可欠からざる状況で、産官学の協力体制が必須であり、要求される人材を育成するシステムを構築する必要がある。一方、原子力工学分野では 1960 年代から長期の人材育成が行われて来ており、今回原子力学会の部会セッションの場で、核融合理工学分野の教育と人材育成のための効果的手段について議論を深め、原子力・核分裂工学分野でさまざまな取り組みがなされている状況を踏まえながら、長期の人材育成に必要な事を先ず考えて行きたい。今回の部会セッションには、核融合科学技術委員会において、主査代理を勤め、人材育成方策について議論を主導されている名古屋大学大学院工学研究科大野哲靖教授、核融合原型炉、ITER、JT60SA の設計経験を通し人材育成の視点について造詣が深い東芝エネルギーシステムズの尾崎章氏に、核融合分野からの今後の人材育成について必要な事を示唆いただく。そして九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学専攻で原子力分野の大学院教育を続けるとともに、平成 29 年度原子力人材育成事業において「多角的思考力の養成と規制を加味した九州大学原子力カリキュラムの充実」を代表している藤本望教授に教育内容について説明をいただき、同じ高エネルギー粒子の核分裂と核融合の共通点を認識して、学会の場で議論を計画するものである。

核融合人材のポテンシャル

核融合炉システムを代表とする**総合理工学分野**を牽引する人材を育成● 横断的分野に対応できる**確実な基礎力**● 研究課題を解決する**卓越した専門力**● 巨大で複雑なシステムを的確に把握する**俯瞰力**● 国際協力においてプロジェクトを遂行できる**国際共創力**● 安全で安心な巨大・複雑システムを構築できる**システム統合力**核融合分野の人は、核融合の研究開発にとどまらず、
様々な分野・領域で活躍できる高いポテンシャルを有する。
(核融合フォーラム 松浦戦略官 資料より)ITERで働くためにどんな資質が必要？(核融合エネルギーフォーラムパネルディスカッションより)
機器・装置の設計・施工・組立、サイト建設、プロジェクト管理等の分野では実社会で経験を積むことも重要
英語での議論、書類の読み方、書類のまとめ方等の技術が重要
あらゆるプレッシャーに負けずに英語で話の出来る柔軟性
計算(解析)も得意な方がより理想的第 13 回核融合科学技術委員会資料¹⁾より

2. セッションでの議論の内容

原子力工学分野の中でも、特に本部会企画セッションに関わる核融合工学分野は、総合工学の特徴が顕著であり、物理、化学、材料等の基礎科学の基盤の上に機械、電気、原子核工学等多くの工学技術分野を横断し専門知識を集約し、最新の研究成果を反映させる力とともに、システム全体が俯瞰できる総合力を必要としている。核融合工学の目標の一つに新しい自立エネルギー発生装置が技術的に可能である事を立証することにあるが、極高温プラズマ状態、中性子やガンマ線の高い照射状態で高エネルギー粒子閉じ込めを維持し、放射性トリチウムの高い安全処理管理技術を、期待される期限までに確立する必要がある。ITER 運転開始の 2025 年から本格的 DT 実験が実施される 2035 年、さらに今後検討が深まる DEMO 炉から商業炉に繋がる核融合炉の研究開発過程は、遠く見えながらも着実な発展と進歩を必要としている。

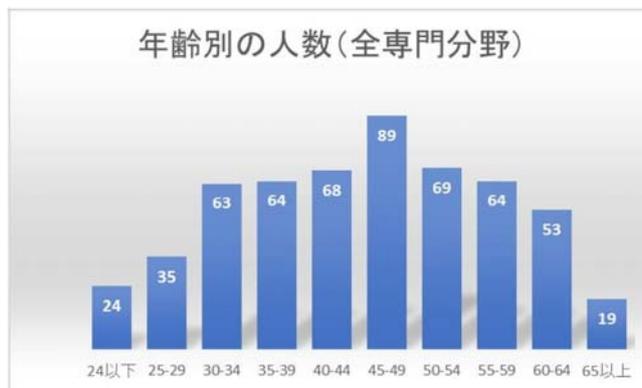
以上の核融合工学分野の状況把握の上に立ち、各研究開発分野でこれまで達成された最新技術の蓄積、継承のみならず、AI を始めとした革新的技術等の新規成果の導入、国際共同研究を実行する競争力やシステムを統合する知識や経験が技術者や研究者には必須である。そのためにも ITER を始めとした国際研究交流が必要であり、総合的な核融合工学教育の実施と技術者育成システム構築は必須の項目となっている。しかしながら現在核融合工学を表看板に示す大学はなく、既往の基礎科学や工学を学んだ技術者・研究者が各専門知識に基づいて、核融合工学の新たな基盤を作り、技術研究成果を積み上げている状況であり、今後はこの方式が成功するかどうか、あるいは最善の方策かどうかの保障はない。特に総合力・俯瞰力を専門的に養う核融合工学の共通基盤の育成は各個人の自己努力に期待されている状況と思われる。

本企画セッションでは、核融合工学分野に関連する大学、研究所における現在の技術者や研究者への教育と人材育成のためのシステム現状紹介を始めとし、核融合工学に関する教科書や副読本の紹介、研究者間の情報交換のためすでに取りられている方策、さらに現在抱えている課題、要請の現状を報告していただき、将来核融合工学分野に必要な人材育成や技術者教育のあり方を議論し知識共有するとともに、課題克服のための方針について議論し、核融合工学分野の発展に寄与したいと考えている。セッションでは、大学・研究所・企業からそれぞれ核融合工学分野の人材育成や教育活動に関わる報告をおこなっていただくとともに、すでに総合工学として原子力分野で人材育成をおこなって来た大学の例を参考にし、共通の認識を通じて、長期の教育と人材育成システム構築を目指すための手始めとして、本企画セッションを実施する。

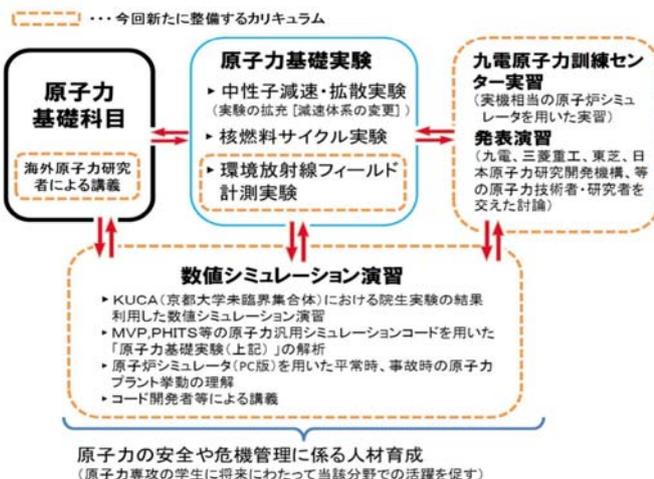
引用資料：(1) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/shiryo/1405518.htm

研究者・技術者の状況

○総括表（総数：548人）



会議資料(1)より引用



原子力人材育成事業で実施している演習・教育・実験

核融合工学部会セッション

核融合理工学分野の教育と人材育成

Education and human resources development in the field of fusion engineering and science

(1) 大学での核融合理工学教育と人材育成への期待

(2) 企業からの核融合理工学教育と人材育成への期待

(3) 原子力工学分野での教育と人材育成

(1) Expectation of education and human resources in fusion engineering and science in universities

(2) Expectation of education and human resources in fusion engineering and science in companies

(3) Present status of education and human resources in nuclear engineering

*大野哲靖¹, *尾崎 章², *藤本 望³, 深田 智³¹名古屋大学, ²東芝エネルギーシステムズ, ³九州大学

1. 部会セッション企画の背景と発表者紹介

平成 29 年 12 月核融合科学技術委員会が、「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」をとりまとめ、付随して「原型炉開発に向けたアクションプラン」と「項目別解説」を策定し、ITER 運転開始の開発優先度やマイルストーン等総合的開発行程、戦略的ロードマップを取りまとめた。この開発・研究の実証には、最低でも 10 年以上にわたる長期の核融合研究の継続が必要である。産業界、研究機関、大学に各役割が果たされており、オールジャパン体制で支えるためには、長期視野の洞察が必須である。核融合研究分野は、総合工学の一分野をなし、自己点火核燃焼プラズマの閉じ込め物理制御から、超伝導工学、プラズマ計測、ダイバータ先進材料、第一壁の熱・放射線照射過酷条件での高融点材料の健全性、燃料トリチウムの増殖と精製、安全管理を遵守した閉じ込め管理等多岐にわたる分野を総合した俯瞰力や専門力が必要である。その一方で人材を輩出する大学側において、いわゆる核融合学科・大学院はなく、理学部では物理、化学、生物等の専門領域、工学部では電気、機械、原子力（核）、材料工学等の多様な専門分野・視野での研究に支えられている。

上に述べた開発研究戦略で考えると、少なくとも 21 世紀中葉までの原型炉から遠く商業炉に至る研究開発が暗黙の了解のもとにある。この長期の核融合研究を支えるためには、人材育成が必要不可欠からざる状況で、産官学の協力体制が必須であり、要求される人材を育成するシステムを構築する必要がある。一方、原子力工学分野では 1960 年代から長期の人材育成が行われて来ており、今回原子力学会の部会セッションの場で、核融合理工学分野の教育と人材育成のための効果的手段について議論を深め、原子力・核分裂工学分野でさまざまな取り組みがなされている状況を踏まえながら、長期の人材育成に必要な事を先ず考えて行きたい。今回の部会セッションには、核融合科学技術委員会において、主査代理を勤め、人材育成方策について議論を主導されている名古屋大学大学院工学研究科大野哲靖教授、核融合原型炉、ITER、JT60SA の設計経験を通し人材育成の視点について造詣が深い東芝エネルギーシステムズの尾崎章氏に、核融合分野からの今後の人材育成について必要な事を示唆いただく。そして九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学専攻で原子力分野の大学院教育を続けるとともに、平成 29 年度原子力人材育成事業において「多角的思考力の養成と規制を加味した九州大学原子力カリキュラムの充実」を代表している藤本望教授に教育内容について説明をいただき、同じ高エネルギー粒子の核分裂と核融合の共通点を認識して、学会の場で議論を計画するものである。

核融合人材のポテンシャル

核融合炉システムを代表とする**総合理工学分野**を牽引する人材を育成● 横断的分野に対応できる**確実な基礎力**● 研究課題を解決する**卓越した専門力**● 巨大で複雑なシステムを的確に把握する**俯瞰力**● 国際協力においてプロジェクトを遂行できる**国際共創力**● 安全で安心な巨大・複雑システムを構築できる**システム統合力**核融合分野の人は、核融合の研究開発にとどまらず、
様々な分野・領域で活躍できる高いポテンシャルを有する。
(核融合フォーラム 松浦戦略官 資料より)ITERで働くためにどんな資質が必要？(核融合エネルギーフォーラムパネルディスカッションより)
機器・装置の設計・施工・組立、サイト建設、プロジェクト管理等の分野では実社会で経験を積むことも重要
英語での議論、書類の読み方、書類のまとめ方等の技術が重要
あらゆるプレッシャーに負けずに英語で話の出来る柔軟性
計算(解析)も得意な方がより理想的第 13 回核融合科学技術委員会資料¹⁾より

2. セッションでの議論の内容

原子力工学分野の中でも、特に本部会企画セッションに関わる核融合工学分野は、総合工学の特徴が顕著であり、物理、化学、材料等の基礎科学の基盤の上に機械、電気、原子核工学等多くの工学技術分野を横断し専門知識を集約し、最新の研究成果を反映させる力とともに、システム全体が俯瞰できる総合力を必要としている。核融合工学の目標の一つに新しい自立エネルギー発生装置が技術的に可能である事を立証することにあるが、極高温プラズマ状態、中性子やガンマ線の高い照射状態で高エネルギー粒子閉じ込めを維持し、放射性トリチウムの高い安全処理管理技術を、期待される期限までに確立する必要がある。ITER 運転開始の 2025 年から本格的 DT 実験が実施される 2035 年、さらに今後検討が深まる DEMO 炉から商業炉に繋がる核融合炉の研究開発過程は、遠く見えながらも着実な発展と進歩を必要としている。

以上の核融合工学分野の状況把握の上に立ち、各研究開発分野でこれまで達成された最新技術の蓄積、継承のみならず、AI を始めとした革新的技術等の新規成果の導入、国際共同研究を実行する競争力やシステムを統合する知識や経験が技術者や研究者には必須である。そのためにも ITER を始めとした国際研究交流が必要であり、総合的な核融合工学教育の実施と技術者育成システム構築は必須の項目となっている。しかしながら現在核融合工学を表看板に示す大学はなく、既往の基礎科学や工学を学んだ技術者・研究者が各専門知識に基づいて、核融合工学の新たな基盤を作り、技術研究成果を積み上げている状況であり、今後はこの方式が成功するかどうか、あるいは最善の方策かどうかの保障はない。特に総合力・俯瞰力を専門的に養う核融合工学の共通基盤の育成は各個人の自己努力に期待されている状況と思われる。

本企画セッションでは、核融合工学分野に関連する大学、研究所における現在の技術者や研究者への教育と人材育成のためのシステム現状紹介を始めとし、核融合工学に関する教科書や副読本の紹介、研究者間の情報交換のためすでに取りられている方策、さらに現在抱えている課題、要請の現状を報告していただき、将来核融合工学分野に必要な人材育成や技術者教育のあり方を議論し知識共有するとともに、課題克服のための方針について議論し、核融合工学分野の発展に寄与したいと考えている。セッションでは、大学・研究所・企業からそれぞれ核融合工学分野の人材育成や教育活動に関わる報告をおこなっていただくとともに、すでに総合工学として原子力分野で人材育成をおこなって来た大学の例を参考にし、共通の認識を通じて、長期の教育と人材育成システム構築を目指すための手始めとして、本企画セッションを実施する。

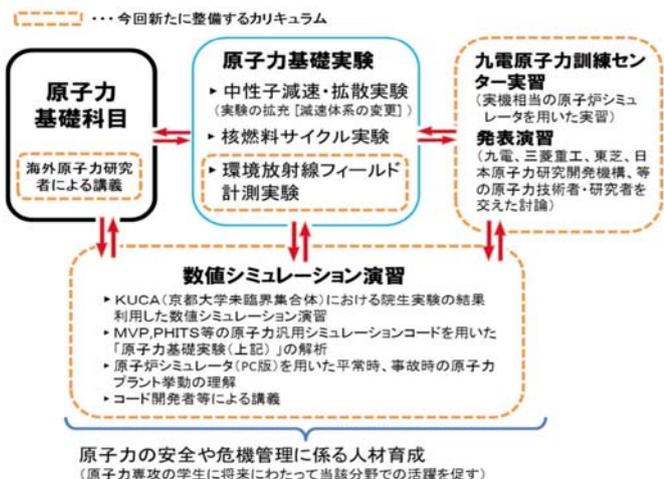
引用資料：(1) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/shiryo/1405518.htm

研究者・技術者の状況

○総括表（総数：548人）



会議資料(1)より引用



原子力人材育成事業で実施している演習・教育・実験

Noriyasu Ono¹, Akira Ozaki², Nozomu Fujimoto³ and Satoshi Fukada³

¹Nagoya Univ., ²Toshiba Energy Systems & Solutions Corp., ³Kyushu Univ.,

核融合工学部会セッション

核融合理工学分野の教育と人材育成

Education and human resources development in the field of fusion engineering and science

(1) 大学での核融合理工学教育と人材育成への期待

(2) 企業からの核融合理工学教育と人材育成への期待

(3) 原子力工学分野での教育と人材育成

(1) Expectation of education and human resources in fusion engineering and science in universities

(2) Expectation of education and human resources in fusion engineering and science in companies

(3) Present status of education and human resources in nuclear engineering

*大野哲靖¹, *尾崎 章², *藤本 望³, 深田 智³¹名古屋大学, ²東芝エネルギーシステムズ, ³九州大学

1. 部会セッション企画の背景と発表者紹介

平成 29 年 12 月核融合科学技術委員会が、「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」をとりまとめ、付随して「原型炉開発に向けたアクションプラン」と「項目別解説」を策定し、ITER 運転開始の開発優先度やマイルストーン等総合的開発行程、戦略的ロードマップを取りまとめた。この開発・研究の実証には、最低でも 10 年以上にわたる長期の核融合研究の継続が必要である。産業界、研究機関、大学に各役割が果たされており、オールジャパン体制で支えるためには、長期視野の洞察が必須である。核融合研究分野は、総合工学の一分野をなし、自己点火核燃焼プラズマの閉じ込め物理制御から、超伝導工学、プラズマ計測、ダイバータ先進材料、第一壁の熱・放射線照射過酷条件での高融点材料の健全性、燃料トリチウムの増殖と精製、安全管理を遵守した閉じ込め管理等多岐にわたる分野を総合した俯瞰力や専門力が必要である。その一方で人材を輩出する大学側において、いわゆる核融合学科・大学院はなく、理学部では物理、化学、生物等の専門領域、工学部では電気、機械、原子力（核）、材料工学等の多様な専門分野・視野での研究に支えられている。

上に述べた開発研究戦略で考えると、少なくとも 21 世紀中葉までの原型炉から遠く商業炉に至る研究開発が暗黙の了解のもとにある。この長期の核融合研究を支えるためには、人材育成が必要不可欠からざる状況で、産官学の協力体制が必須であり、要求される人材を育成するシステムを構築する必要がある。一方、原子力工学分野では 1960 年代から長期の人材育成が行われて来ており、今回原子力学会の部会セッションの場で、核融合理工学分野の教育と人材育成のための効果的手段について議論を深め、原子力・核分裂工学分野でさまざまな取り組みがなされている状況を踏まえながら、長期の人材育成に必要な事をまず考えて行きたい。今回の部会セッションには、核融合科学技術委員会において、主査代理を勤め、人材育成方策について議論を主導されている名古屋大学大学院工学研究科大野哲靖教授、核融合原型炉、ITER、JT60SA の設計経験を通し人材育成の視点について造詣が深い東芝エネルギーシステムズの尾崎章氏に、核融合分野からの今後の人材育成について必要な事を示唆いただく。そして九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学専攻で原子力分野の大学院教育を続けるとともに、平成 29 年度原子力人材育成事業において「多角的思考力の養成と規制を加味した九州大学原子力カリキュラムの充実」を代表している藤本望教授に教育内容について説明をいただき、同じ高エネルギー粒子の核分裂と核融合の共通点を認識して、学会の場で議論を計画するものである。

核融合人材のポテンシャル

核融合炉システムを代表とする**総合理工学分野**を牽引する人材を育成● 横断的分野に対応できる**確実な基礎力**● 研究課題を解決する**卓越した専門力**● 巨大で複雑なシステムを的確に把握する**俯瞰力**● 国際協力においてプロジェクトを遂行できる**国際共創力**● 安全で安心な巨大・複雑システムを構築できる**システム統合力**核融合分野の人は、核融合の研究開発にとどまらず、
様々な分野・領域で活躍できる高いポテンシャルを有する。
(核融合フォーラム 松浦戦略官 資料より)

ITERで働くためにどんな資質が必要？(核融合エネルギーフォーラムパネルディスカッションより)
機器・装置の設計・施工・組立、サイト建設、プロジェクト管理等の分野では実社会で経験を積むことも重要
英語での議論、書類の読み方、書類のまとめ方等の技術が重要
あらゆるプレッシャーに負けずに英語で話の出来る柔軟性
計算(解析)も得意な方がより理想的

第 13 回核融合科学技術委員会資料¹⁾より

2. セッションでの議論の内容

原子力工学分野の中でも、特に本部会企画セッションに関わる核融合工学分野は、総合工学の特徴が顕著であり、物理、化学、材料等の基礎科学の基盤の上に機械、電気、原子核工学等多くの工学技術分野を横断し専門知識を集約し、最新の研究成果を反映させる力とともに、システム全体が俯瞰できる総合力を必要としている。核融合工学の目標の一つに新しい自立エネルギー発生装置が技術的に可能である事を立証することにあるが、極高温プラズマ状態、中性子やガンマ線の高い照射状態で高エネルギー粒子閉じ込めを維持し、放射性トリチウムの高い安全処理管理技術を、期待される期限までに確立する必要がある。ITER 運転開始の 2025 年から本格的 DT 実験が実施される 2035 年、さらに今後検討が深まる DEMO 炉から商業炉に繋がる核融合炉の研究開発過程は、遠く見えながらも着実な発展と進歩を必要としている。

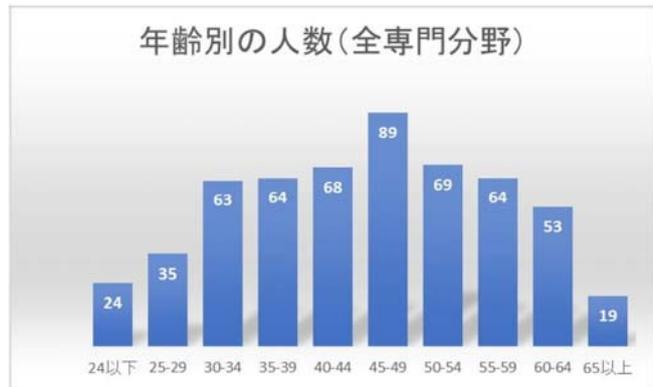
以上の核融合工学分野の状況把握の上に立ち、各研究開発分野でこれまで達成された最新技術の蓄積、継承のみならず、AI を始めとした革新的技術等の新規成果の導入、国際共同研究を実行する競争力やシステムを統合する知識や経験が技術者や研究者には必須である。そのためにも ITER を始めとした国際研究交流が必要であり、総合的な核融合工学教育の実施と技術者育成システム構築は必須の項目となっている。しかしながら現在核融合工学を表看板に示す大学はなく、既往の基礎科学や工学を学んだ技術者・研究者が各専門知識に基づいて、核融合工学の新たな基盤を作り、技術研究成果を積み上げている状況であり、今後はこの方式が成功するかどうか、あるいは最善の方策かどうかの保障はない。特に総合力・俯瞰力を専門的に養う核融合工学の共通基盤の育成は各個人の自己努力に期待されている状況と思われる。

本企画セッションでは、核融合工学分野に関連する大学、研究所における現在の技術者や研究者への教育と人材育成のためのシステム現状紹介を始めとし、核融合工学に関する教科書や副読本の紹介、研究者間の情報交換のためすでに取りられている方策、さらに現在抱えている課題、要請の現状を報告していただき、将来核融合工学分野に必要な人材育成や技術者教育のあり方を議論し知識共有するとともに、課題克服のための方針について議論し、核融合工学分野の発展に寄与したいと考えている。セッションでは、大学・研究所・企業からそれぞれ核融合工学分野の人材育成や教育活動に関わる報告をおこなっていただくとともに、すでに総合工学として原子力分野で人材育成をおこなって来た大学の例を参考にし、共通の認識を通じて、長期の教育と人材育成システム構築を目指すための手始めとして、本企画セッションを実施する。

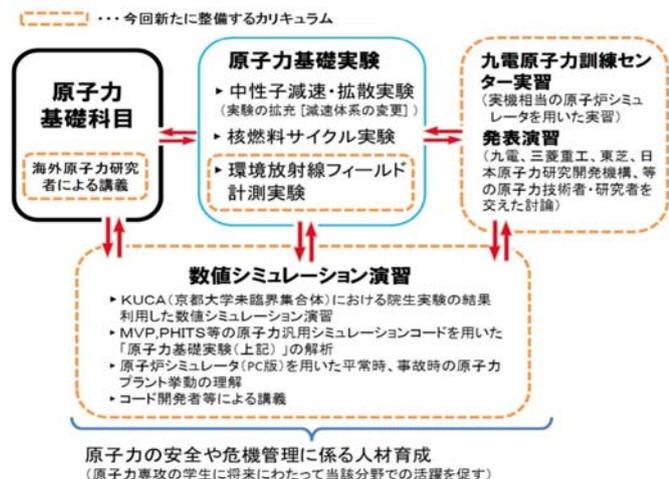
引用資料：(1) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/shiryo/1405518.htm

研究者・技術者の状況

○総括表（総数：548人）



会議資料(1)より引用



原子力人材育成事業で実施している演習・教育・実験

Noriyasu Ono¹, Akira Ozaki², Nozomu Fujimoto³ and Satoshi Fukada³

¹Nagoya Univ., ²Toshiba Energy Systems & Solutions Corp., ³Kyushu Univ.,

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

[2O_PL] Nuclear Energy in Poland

Chair: Yukio Tachibana (JAEA)

Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room O (D25 -D Building)

[2O_PL01] Nuclear Energy in Poland

*Kazuhiko Kunitomi¹ (1. JAEA)

ポーランドにおける原子力の動向

Nuclear Energy in Poland

國富 一彦

(国研) 日本原子力研究開発機構

1. はじめに

ポーランドにおける2018年1月29日付報道によると、Tchorzewski エネルギー相が、2050年を見据えたエネルギー需給の見通しについて、石炭火力の比率を現在の8割から5割に低減することに改めて言及しており、原子力発電所の新設が検討されている。また、ポーランド政府は、高温ガス炉の導入についても検討しており、研究炉と商用炉の建設が計画されている。

2. ポーランドにおける原子力の動向

2-1. ポーランドの概要

面積：31万2千km² (EU28 か国内6番目、日本の約4/5)、人口：約3,842万人 (2017年：EU内6番目)、GDP：約4,693億米ドル (2016年, IMF) (EU内8番目、日本の約1/10)。堅調な個人消費とEU資金により、安定した経済成長を達成している。

2-2. ポーランドのエネルギー事情

1次エネルギー供給の5割以上、電力供給の8割以上を石炭に依存しており、石炭火力の老朽化、地球温暖化ガス排出の問題等から、石炭依存度を下げることが喫緊の課題となっている。CO₂ガスの放出量に応じて課税される炭素税に関しては、EU内で炭素税の大幅増加の議論がなされており、これが決まると、発電のみならず、その他の産業にも大きな影響がある。石炭火力のリプレイスとしては原子力と再生可能エネルギーが候補である。

2-3. ポーランドにおける高温ガス炉開発

原子力としては、軽水炉（発電）、並びに、高温ガス炉（熱利用と発電のコジェネレーション）の導入を検討中である。ポーランドエネルギー省は、高温ガス炉の導入に向けた諮問委員会（HTR委員会）を2016年7年に設置し、2018年1月にはHTR委員会の報告書が公開されている。

同報告書に示されている、高温ガス炉導入の意義は、①天然ガス輸入依存から脱却、②石炭火力によるCO₂排出の削減、③競争可能なコストでの国内産業への熱供給、④高温ガス炉輸出の高い可能性、であり、熱出力10MWの研究炉と熱出力165MWの商用炉（熱利用炉）の建設が計画されている。それぞれ、2020年代、2030年代の完成を目指している。

2-4. 日本とポーランドの高温ガス炉開発協力

2017年5月18日、日・ポーランドの外相会談において「2017年から2020年までの日本国政府とポーランド共和国政府との間の戦略的パートナーシップの実施のための行動計画」に署名。経済・科学・技術協力において、日本原子力研究開発機構（JAEA）とポーランド国立原子力研究センター（NCBJ）との間における高温ガス炉冷却炉技術の研究開発に向けた協力を奨励することが明記されている。

2-5. 原子力機構におけるポーランドとの高温ガス炉開発協力

ポーランドにおける高温ガス炉（研究炉、商用炉）開発を支援するとともに、高温ガス炉に関する燃料・材料のシミュレーション技術等を共同開発することを目的として、JAEAとNCBJは、2017年5月18日に、研究協力覚書を締結した。また、具体的な研究協力を開始するため、実施取決めを締結予定である。

Kazuhiko Kunitomi

Japan Atomic Energy Agency

Planning Lecture | Technical division and Network | Nuclear Safety Division

[2P_PL] Learning from Progress of Fukushima Dai-ich Nuclear Accident Clarification

Chair: Naoto Sekimura (Univ. of Tokyo)

Thu. Sep 6, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room P (E21 -E Building)

[2P_PL01] Technical Bases of Severe Accident Sequence Groups including
Fukushima Accident

*Mitsuhiro Kajimoto¹ (1. NRA)

[2P_PL02] Classification of Resolved/Unresolved Issues and Implications for
Nuclear Safety Research

*Akio Yamamoto¹ (1. Nagoya Univ.)

[2P_PL03] Lessons for Ensuring the Effectiveness of Severe Accident Measures

*Yasunori Yamanaka¹ (1. CRIEPI)

原子力安全部会セッション

福島第一原子力発電所事故の解明の進展から学ぶ

Learning from Progress of Fukushima Dai-ich Nuclear Accident Clarification

(1) 重大事故に至る事故シーケンスグループの技術的背景と福島事故

(1) Technical Bases of Severe Accident Sequence Groups including Fukushima Accident

*梶本光廣¹, 星 陽崇¹¹原子力規制庁

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災の際、東京電力福島第一原子力発電所の1号から3号までが炉心損傷に至るといって、重大な事故が発生した（以後、「福島原子力発電所事故」）。事故後に、国会事故調、政府事故調、民間事故調、事業者、規制機関及び研究機関によって事故の分析が進められ、種々の報告書に事故原因の分析及び事故の教訓が取り纏められ公開された¹⁾。また、その後、IAEA及びOECD/NEA等の国際機関、各国の規制機関及び研究機関からも事故関連の報告書が出された²⁾。

事故後の2012年9月19日に原子力規制委員会が発足し、同年の10月から公開の原子力規制委員会「検討チーム」会合において、原子力発電所の安全性に係る従来規制の強化及び重大事故対応の新たな規制を含む新規制基準の策定が進められた。そしてパブリックコメント及び原子力規制委員会を経た後に、2013年7月に施行された。

この報告では、新規制基準の中の「重大事故」に係る事故シーケンスグループについて、事故進展及び放射性物質挙動に関する技術的背景を紹介する。また、これらの技術的背景と福島原子力発電所事故との関連をまとめる。

2. 重大事故に至る事故シーケンスグループ

2-1. 事故シーケンスグループ

シビアアクシデントに至る事故の種類と発生頻度を体系的に分析したWASH-1400(1975)において、確率論的リスク評価の手法が適用され、事故の発端となる起因事象とその後の事故緩和系の作動・不作動の組合せ(事故シーケンス)を樹形図(イベントツリ:ET)で表現する方法が導入された。その後、樹形図は詳細化され大規模で複雑化したが、基本的なアプローチは現在も変わっていない。このような状況の中、シビアアクシデント研究の進展に伴って、事故時の事故進展及び放射性物質挙動を解析する解析コードの開発が各国で進み、樹形図で分類する事故シーケンスの種類は拡大するのではなく、事故進展及び放射性物質挙動の特徴が類似した少数の事故シーケンスグループに分類できることが分ってきた。

1990年代の初めには、シビアアクシデント研究と確率論的リスク評価の研究の成果とが相互補完できるようになり、事故シーケンスグループの検討が飛躍的に進んだ³⁾。これらの成果は、日本原子力学会のPRA実施基準にも反映されている。

2-2. 重大事故の事故進展の特徴

BWR-5 Mark-II原子炉施設の事故進展の解析結果をFigure 1.に示す。過渡事象発生後に、高圧系及び低圧系による炉心注水が失敗すると早期に炉心損傷に至る(Figure 1.のTQUV)。その後、事故緩和系の復旧操作等が失敗すると、原子炉圧力容器破損、格納容器破損に至る。また、全交流電源喪失(Figure 1.のTB)では、非常用バッテリーが有効な期間までは、蒸気駆動の隔離時冷却系によって炉心に注水可能である。

*Mitsuhiro Kajimoto¹, Harutaka Hoshi¹

¹Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA)

また、炉心への注水に成功しても、崩壊熱除去機能が喪失すると **Figure 1.**の TW の事故シーケンスのように、格納容器が先行破損して、その後に炉心損傷に至る。

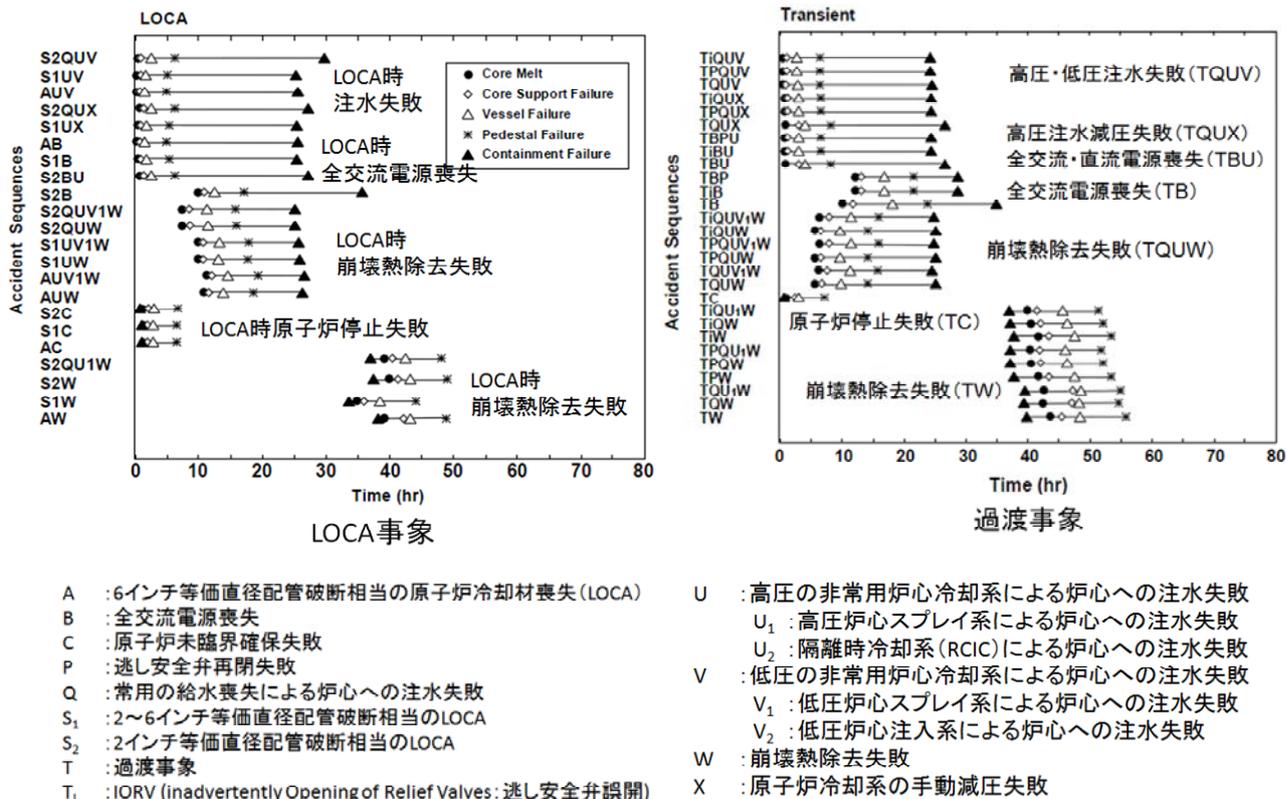


Figure 1. Accident Progressions of various Accident Sequences (例えば, OECD/NEA, CSNI-No.176 (1990))

Figure 1.に示したとおり、炉心損傷、原子炉圧力容器、格納容器機能喪失の発生時期が類似した事故シーケンスグループに分けることができる。

2-3. 放射性物質挙動の特徴

シビアアクシデント時の放射性物質挙動を、模式的に **Figure 2.**に示す⁴⁾。事故時に燃料から放出されたエアロゾル状及びガス状の放射性物質は、原子炉冷却系内で沈着すると共に、一部は破断口や逃し安全弁を経由して、格納容器系へ移行する。格納容器内では、沈降及び凝縮等の自然沈着、格納容器スプレイ及び圧力抑制プールなどの工学的安全設備によって雰囲気中から除去される。

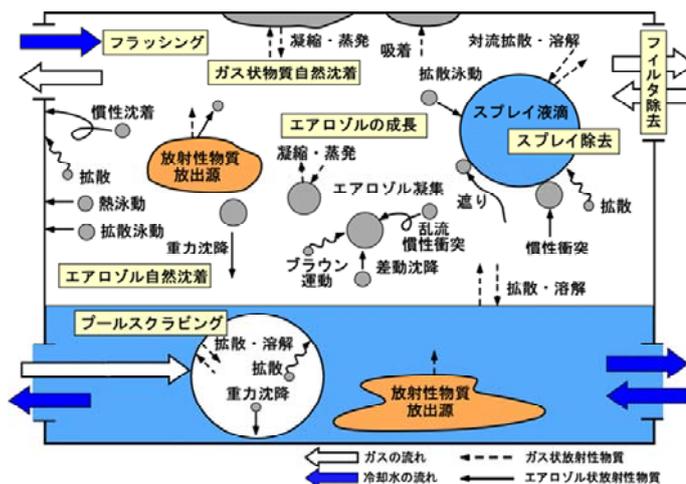


Figure 2. Radionuclide Behavior under Severe Accident Conditions

これらの放射性物質挙動の特徴は、やはり事故進展の事故シーケンスグループで分類できる。**Figure 3.**に格納容器内の放射性物質の沈着割合及び圧力抑制プールにおける放射性物質の除染係数の解析結果を示す³⁾。同図の横軸は、炉心損傷開始から格納容器過圧破損に至るまでの時間に表示している。従って、この軸の負の値は、炉心損傷前に格納容器が破損することを示す。放射性物質の種類によって沈着の程度に相違があるものの、**Figure 3.**のとおり、事故進展と同じ事故シーケンスグループで

分類できる。

格納容器（ドライウェル）の沈着割合の傾向を見ると、炉心損傷から格納容器破損に至るまでの時間が長い事故シーケンスでは、沈着量が増加する傾向にある。これは、この期間に格納容器内での自然沈着が進むことによる。

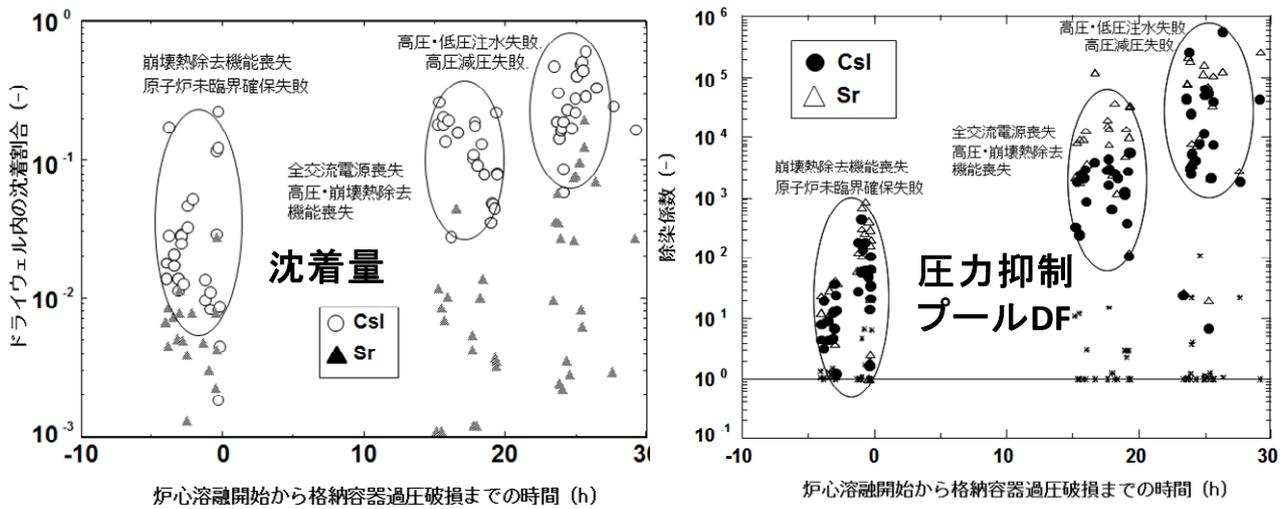


Figure 3. Natural Deposition in the Drywell & Decontamination Factor (DF) at Suppression Pool (例えば, OECD/NEA, CSNI-No.176 (1990))

また、圧力抑制プールにおける放射性物質の除染係数（DF）をみると、崩壊熱除去機能が喪失する事故シーケンス（TWのグループ）では、炉心から放出された放射性物質が圧力抑制プールに移行する頃には、圧力抑制プールが飽和状態に近い場合、プールスクラビングによる放射性物質の除去効率が低下する。

2-4. ソースターム

エアロゾル状及びガス状の放射性物質は、原子炉冷却系及び格納容器系で様々な沈着・除去過程を経た後、一部が大気中に放出される。事故シーケンスグループによって、沈着・除去過程に特徴があり、ソースタームも事故シーケンスグループに応じた特徴を持つことになる。しかしながら、ソースタームは事故シーケンスグループの特徴だけでなく、格納容器の破損個所などの大気中への放出経路に強く依存する。例えば、圧力抑制プールの気相部から放出される場合は、圧力抑制プール内のスクラビングによる放射性物質の除去が期待できる。

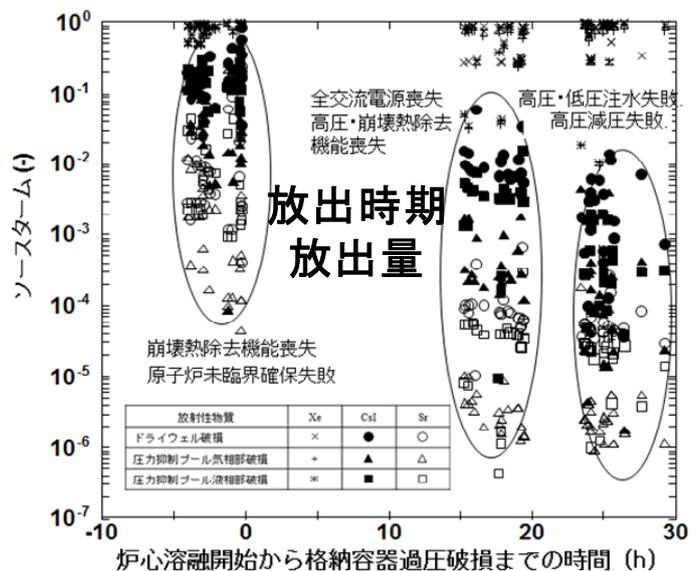


Figure 4. Source Terms (例えば, OECD/NEA, CSNI-No.176 (1990))

Figure 4.に大気中へのソースタームの解析例を示す³⁾。同図には、格納容器過圧破損が、ドライウェル気相部、圧力抑制プール気相部及びウェットウェル液相部で破損する場合の結果をまとめて示している。

よう素類のソースタームを見ると、ウェットウェル気相が破損する場合は、前述の通り、放出経路上の圧力抑制プールで放射性物質が除染されることから、他の破損部位の場合と比べてソースタームが小さ

い。ドライウェル気相の破損の場合は、雰囲気中の放射性物質の低減は、自然沈着によることになる。ドライウェル気相破損の場合、よう素のソースタームは、炉心内蔵量に対して数%弱である（格納容器先行破損に至る事故シーケンスを除く）。また、よう素類のソースタームと比べて、Sr-Ba 類のソースタームは十分に小さい。

このように、大気中へのソースタームを考える場合は、事故シーケンスグループに加えて、格納容器破損モード（放出経路含む）も考える必要がある。

3. 福島原子力発電所事故

福島原子力発電所事故の炉心損傷等の事象発生時期は、事故後まもなく東京電力及びJNESによって試算された^{1) 5)}。Figure 5.は、MELCOR1.8.5を適用して福島原子力発電所事故の事故進展を解析した結果を、それまでのJNESの解析結果と合わせて示している⁵⁾。

福島原子力発電所の1号炉は、全交流電源喪失に加えて津波によって直流電源も喪失し、Figure 5.のTBUの事故シーケンスと類似の事故進展であった。3号炉は典型的な全交流電源喪失TBに類似した事故進展であり、2号炉は結果的にTB 亜流型の事故進展となった。詳細については、今後の知見を反映して一層の検討が必要である。しかしながら、これまでのシビアアクシデント研究及び確率論的リスク評価の研究の成果が、事故シーケンスを俯瞰したシビアアクシデントの事故進展及び放射性物質挙動の知見を与えていることも確かである。

4. おわりに

福島原子力発電所の事故後、原子力規制委員会が発足した2012年の10月から原子力規制委員会「検討チーム」会合において、重大事故対応の新たな規制を含む新規基準の策定を進めた。策定のための議論において、福島原子力発電所の事故のタイプだけでなく、それまでのシビアアクシデント研究及び確率論的リスク評価研究の技術的背景を踏まえて、重大事故に至る事故シーケンスグループを体系的に検討した。

福島第一原子力発電所の炉心内及び格納容器内の損傷状況の調査・分析は、現在でも進められている。今後、事故進展及び放射性物質挙動に関する新たな知見を系統的に分析すること、そして得られた知見を原子炉施設の継続的な安全性向上のための方策に確実に反映することが重要である。

- 1) 例えば、国会事故調報告書(2012)、政府事故調中間・最終報告書(2012)、IAEA 日本国政府の報告書(2011)。
- 2) 例えば、IAEA, "Fukushima Daiichi Accident," (2015)。
- 3) 例えば、M.Kajimoto, et. Al., OECD/NEA, CSNI Report No.176 (1990)。
- 4) 梶本光廣、日本原子力学会誌、Vol.48, No.6, 409(2006)。
- 5) 星 陽崇、JNES-RE-2011-0002 (2011)。

福島第一発電所の事故の進展

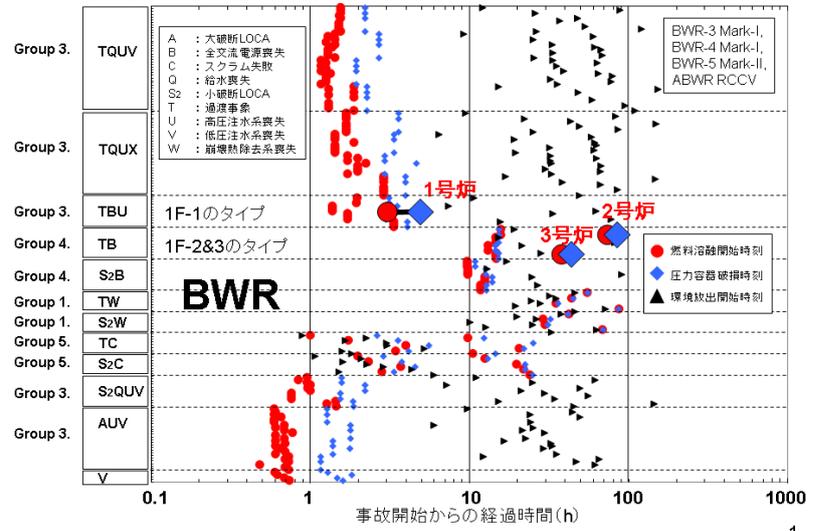


Figure 5. Fukushima Dai-ichi Accident

*Mitsuhiro Kajimoto¹, Harutaka Hoshi¹

¹Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA)

原子力安全部会セッション

福島第一原子力発電所事故の解明の進展から学ぶ
Learning from Progress of Fukushima Dai-ich Nuclear Accident Clarification

(2) 解明／未解明事項の整理と原子力安全研究への教訓

(2) Classification of Resolved/Unresolved Issues and Implications for Nuclear Safety Research

*山本 章夫¹¹名古屋大学

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故から7年半が経過し、事故進展に関して、多くの知見が得られてきた。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において、「事故進展に関する未解明事項フォローWG」(以下、未解明WG)が設置され、これまでに得られた知見と、残された未解明事項の整理が行われた。その成果は、2018年1月に報告書として公開されている¹。

本稿では、この未解明事項の調査と評価において整理された知見や、残された未解明事項に基づき、原子力安全研究において今後取り組むべき課題を議論する。

2. 未解明事項の調査と評価の概要

2-1. 調査方法の概要

未解明WGでは、2014年3月に日本原子力学会より出版された「福島第一原子力発電所事故 その全貌と明日に向けた提言: 学会事故調 最終報告書」の第6章付録に示された「事故進展に関し今後より詳細な調査と検討を要する事項」に加え、52編の国内外の報告書を精査し、事故進展解明に関する新たな知見や、残された未解明事項を調査している。調査の結果、73項目の課題について、これまでに得られた知見と、未解明WGとしての評価が「対象号機」「日時」「分類」「対象物」「未解明事項」「内容」「調査資料」「調査結果」「評価結果」からなる整理表として取りまとめられている。

2-2. 評価結果の概要

整理表では、課題はA:合理的な説明がなされていると判断されるもの、B:既存発電所の安全対策高度化や廃炉作業の進捗の観点から重要でないと考えられるもの、C:重要度は高いが、現時点では、これ以上の調査が困難であると考えられるもの、D:重要であり、今後も継続した検討が望まれるものに区分された。

73項目の課題に対する評価結果は、以下の通りとなっている。

A 合理的な説明がなされていると判断されるもの	: 45%
B 重要でないと考えられるもの	: 8%
C これ以上の調査が困難と判断されるもの	: 4%
D 重要であり、今後も継続した検討が必要と考えられるもの	: 43%

福島第一事故発生時点において「未解明」とされた項目のうち、相当数について「合理的な説明が出来る」だけの知見がこれまでに得られていると判断されている。一方、今後も継続した検討が必要な項目もかなりの数に上る。特に、原子炉容器内、格納容器内の事故進展の詳細に関しては、これまでに実施された調査が限定的であることもあり、多くが継続した検討が必要、との区分になっている。

¹ 日本原子力学会 福島第一原子力発電所廃炉検討委員会 「福島第一原子力発電所事故: 未解明事項の調査と評価」、2018年1月 http://www.aesj.net/activity/activity_for_fukushima/public

3. 原子力安全研究への教訓

3-1. 評価結果から示唆される安全研究の課題

以下では、未解明事項に関する調査結果をまとめた整理表の評価結果に基づき、今後取り組むべきと考えられる安全研究の課題を示す。

(1)津波シミュレーション

建屋に対する津波侵入プロセスについては、高精度津波シミュレーションや廃炉作業において新たに得られる知見を活かして、より詳細な全体像を検討する余地がある。また、建屋や設備の被害状況の再現の観点から、継続して津波シミュレーション手法の高度化に取り組むことが重要である。

(2)海水冷却時の除熱効果

塩分を含む海水を代替注水したときの冷却効果(熱伝達)については、必ずしも知見が十分ではなく、継続して検討する余地がある。

(3)過酷事故時の γ ヒーティングの効果

炉心に冷却材がない状態では、 γ ヒーティングによる発熱分布は、冠水状態に比べて変化すると考えられるが、定量的な評価はなされていない。この効果を定量化することにより、燃料の温度上昇など、事故進展への影響を評価することができると考えられる。

(4)酸化ジルコニウムの高熱特性

酸化ジルコニウムの機械的特性の基礎的なデータは存在するが、高温時の特性も含め、必ずしも最新のデータではないことから、より信頼性の高いデータの取得が望まれる。

(5)DCH、シェルアタック、水蒸気爆発

廃炉作業に伴い、原子炉容器及び格納容器の破損形態、破損メカニズム、原子炉容器内・格納容器内の状況が明らかになると想定されることから、DCH、大規模なシェルアタックや水蒸気爆発が発生しなかったメカニズムを継続して検討することは過酷事故進展の理解の上で重要であると考えられる。

(6)溶融燃料の性状と移行経路

原子炉容器内の状態は、ミューオンによる調査以外の情報は得られておらず、今後、廃炉作業に伴い得られる知見を活かしつつ継続して検討を行う必要がある。また、燃料デブリの性状については、不確かな点が多く、今後継続して検討が必要である。また、得られる知見をシビアアクシデント解析の高度化につなげることが重要である。

(7)原子炉容器・格納容器の損傷、MCCI の状況

原子炉容器、格納容器の損傷状態、MCCI の状況については、詳細は明らかになっておらず、廃炉作業の進展に伴って得られる情報を取り入れつつ、事故進展再現の観点から継続した検討を行うことが必要である。

(8)水素爆発シミュレーション

廃炉作業に伴って得られる現場の情報を加味しつつ、水素爆発シミュレーションの高度化を行うことは、より精緻に現象を理解するために重要である。

(9)過酷事故時の計測機器の信頼性

廃炉作業における現場確認の知見などを活用して、計測機器の信頼性について検討を進めることが望まれる。

(10)RCIC の駆動メカニズムと停止メカニズム

2号機におけるRCICの動作については、二相流によるRCICタービン駆動により、合理的に説明できる。今後、試験などを行うことにより、二相流によるRCICのタービン駆動状況について確認をすることが可能になると考えられる。また、RCIC停止のメカニズムが推定されているが、廃炉作業時にRCICの状態を確認することにより、その妥当性を確認することができる。

(11)非凝縮性ガスがS/Cの健全性に及ぼす影響

非圧縮性ガスがS/Cの健全性に与える影響については、継続して検討が必要と考えられる。

(12)PLR ポンプメカニカルシールの健全性

交流電源喪失時における PLR ポンプメカニカルシールからの冷却材漏えい挙動を把握することは、特に事故対応が長期にわたる場合、重要になる可能性があり、継続して検討が望まれる。

(13)環境中に放出された放射性物質の量や化学形態など

環境中に放出された放射性物質の量については、様々な評価がなされているものの、不確かさが大きい状況である。廃炉作業時の知見などを取り入れることにより、不確かさを低減する検討が可能になると考えられる。また、シビアアクシデント時の放射性物質の移行については、放射性物質の化学形態が重要になるが、知見が十分でない場合があり、今後継続して検討していく必要がある。

(14)モニタリングで測定された放射線のピークと放出量

廃炉作業時に得られる格納容器損傷状態の情報、解析の高度化などを含めて継続して検討することが望まれる。

(15)ウエットベント時の DF

今後、さらに知見を拡充し、様々な条件における DF の不確かさを低減する取り組みが必要であると考えられる。

3-2.安全研究に対する教訓

3-1 でまとめた課題を概観すると、①シミュレーション手法の高度化、②過酷事故時の現象の理解の深化、③ ①・②を支える基礎データの取得に大別することができる。

シミュレーション手法の高度化は、過酷事故解析、津波シミュレーション、水素爆発シミュレーション、大気拡散シミュレーションなどであり、事故時の原子力発電所の振る舞いを正確に予測し、安全対策に活かすという観点から重要である。

過酷事故時には多種多様な複雑な物理現象が発生する。これまで実機における詳細な観測例が存在しない MCCI や BWR に特有の原子炉容器下部の制御棒駆動機構の破損メカニズム、ウエットベントの性能など、さらに理解を深化させる必要がある課題が存在する。

また、シミュレーション手法の高度化や、現象の理解を深化させるためには、これらを支える基礎的なデータの拡充も必要である。福島第一の事故前は、このような基盤的な安全研究が十分に行われていたとはいえず、福島第一事故後に精力的に取り組まれているとはいえ、さらなる取り組みが必要である。

4. まとめ

本稿では、福島第一原子力発電所事故の事故進展に関し、残された未解明事項を元にして、取り組むべき安全研究の課題を概観した。今後、福島第一の廃炉作業が進展するにつれ、特に原子炉建屋内、格納容器内、原子炉容器内の状況が明らかになり、残された未解明点に関する知見が新たに得られていくものと考えられる。取り組むべき安全研究の課題は、新たに得られる知見を反映しつつ、今後も検討していく必要がある。

*Akio Yamamoto¹

¹Nagoya Univ.

原子力安全部会セッション

福島第一原子力発電所事故の解明の進展から学ぶ

Learning from Progress of Fukushima Dai-ich Nuclear Accident Clarification

(3) シビアアクシデント対策とその実効性確保への教訓

(3) Lessons for Ensuring the Effectiveness of Severe Accident Measures

*山中 康慎¹¹ (一財) 電力中央研究所

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故は、東北地方太平洋沖地震により引き起こされた津波によって、福島第一原子力発電所1～3号機がシビアアクシデントに至るとともに、放射性物質を環境に放出した事故である。

国内の電気事業者は、1992年7月の通商産業省（当時）からの要請に基づき、自主的な保安対策としてのシビアアクシデント対策を整備済みであったが、これらは建屋内への浸水によって交流電源に加え直流電源も喪失したことから、シビアアクシデント対策は十分にその効果を発揮することは出来なかった。

本稿では、国内の電気事業者が福島第一原子力発電所事故を踏まえて整備・拡充したシビアアクシデント対策等を概観するとともに、実効性確保に向けた取組についても紹介する。また、それらを踏まえた今後の課題についても議論する。

2. 国内電気事業者が進めるシビアアクシデント対策

福島第一原子力発電所事故を踏まえて、国内電気事業者が福島第一原子力発電所の事故を踏まえて実施した対策には以下の3つに分類される。

- ①設備対応（新設、追設）
- ②人的対応（緊急時対応組織、手順書整備、訓練の充実）
- ③その他

設備対策については、福島第一原子力発電所事故を受けて新たに導入された新規制基準への対応という側面が強いが、特定重大事故対処設備やBWRに要求されたフィルターベント等、事故の教訓を反映しようとした対策となっている。また、福島第一原子力発電所事故では津波によって発生したガレキ等によって事故対応が阻害された経験もあることから、それらを取り除くためのホイールローダー等の整備も行っているところである。

さらに、これらを十分に機能させるための対策として、人的な対策も取られており、緊急時組織の拡充や、手順書の整備、訓練の充実等が行われている。

3. 今後の課題

既に述べたとおり、福島第一原子力発電所事故の教訓を反映し、多くの設備が新設若しくは追設され、それらを有効に活用するための人的対応についても充実されてきている。

一方で、諸外国では福島第一原子力発電所事故分析の結果等について、さらなる検討が進められ対策の充実化を図ろうとする動きがある。

事故の当事国である我が国においても、福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえた実効的な対策となっているかについて振り返りが必要である。

*Yasunori Yamanaka¹

¹Central Reserch Institute of Electric Power Company,