

Wed. Mar 28, 2018**Room B**

Planning Lecture | Technical division and Network | Risk Division

[3B_PL] The trend of research and development of the latest PRA methods

Chair: Yoshiyuki Narumiya (JANSI)

1:00 PM - 2:30 PM Room B (C1-311 -C1 Building)

[3B_PL01] The trend of research and development of PRA methods at PSA2017*Akira Yamaguchi¹ (1. Univ. of Tokyo)**[3B_PL02] The trend of research and development of Dynamic PRA***Ikuo Kinoshita¹ (1. INSS)**[3B_PL03] The R&D activities regarding multi-unit PRA methodology***Hiromichi Miura¹ (1. CRIEPI)**[3B_PL04] Dynamic Risk Analysis of Combined Event of Earthquake and Flooding in Nuclear Power Plant***Sunghyon Jang¹ (1. Univ. of Tokyo)**Room G**

Planning Lecture | Technical division and Network | Nuclear Data Division

[3G_PL] Present status and future of nuclear data evaluation code in Japan

Chair: Satoshi Chiba (Tokyo Tech)

1:00 PM - 2:30 PM Room G (U2-212 -U2 Building)

[3G_PL01] Development of AMUR for the evaluation of resonant cross-sections*Satoshi Kunieda¹ (1. JAEA)**[3G_PL02] Progress of a nuclear reaction model code CCONE***Osamu Iwamoto¹ (1. JAEA)**[3G_PL03] Development of DEURACS for prediction of deuteron-induced reaction cross section***Shinsuke Nakayama¹ (1. JAEA)**[3G_PL04] Improvement of nuclear reaction models in the PHITS code***Sintaro Hashimoto¹ (1. JAEA)**Room H**

Planning Lecture | Over view Report | Over View Report 4 - The University of Tokyo, Yayoi Research Conference

[3H_PL] Research developments of Lasers

Chair: Shuichi Hasegawa (Univ. of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM Room H (U2-213 -U2 Building)

[3H_PL01] Introduction of the session*Shuichi Hasegawa¹ (1. Univ. Tokyo)**[3H_PL02] Ionic valence change of metal ions in solution by laser excitation***Nobuaki Nakashima¹ (1. Osaka City Univ.)**[3H_PL03] Development of the high-speed remote inspection laser system for the defects in the concrete***Noboru Hasegawa¹ (1. QST)**[3H_PL04] Laser remote analysis for decommissioning of damaged reactor core***Ikuo Wakaida¹ (1. JAEA)**Room J**

Planning Lecture | Board and Committee | Decommissioning of Nuclear Power Stations Committee

[3J_PL] Periodical Report from Study Committee on Decommissioning of The Fukushima Daiichi NPP

Chair: Naoto Sekimura (Univ. of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM Room J (U3-211 -U3 Building)

[3J_PL01] General condition and subject of decommissioning for the Fukushima Daiichi NPP*Noriko Asanuma¹ (1. Tokai Univ.)**[3J_PL02] Investigation and evaluation of unresolved issues on Fukushima Daiichi accident***Akio Yamamoto¹ (1. Nagoya Univ.)**[3J_PL03] Current status and remaining issues for seismic safety of Fukushima Daiichi NPP***Tatsuya Itoi¹ (1. Univ. of Tokyo)**[3J_PL04] The report from a robot subcommittee***Takashi Yoshimi¹ (1. Shibaura Tech)**[3J_PL05] Study for decommissioning and waste management scenario***Daisuke Kawasaki¹ (1. Univ. of Fukui)**[3J_PL06] Whole discussion and exchange of opinions****Room K**

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

[3K_PL] Collaborative activities of industry for continuously improve towards Nuclear

Safety

Chair: Takanori Kitada (Osaka Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room K (U3-311 -U3 Building)

[3K_PL01] The status of correspondence to the new regulation standard addition items

*Katsunori Myoujin¹ (1. KEPCO)

[3K_PL02] About correspondence towards the new examination system

*Takeyuki Inagaki¹ (1. TEPCO HD)

[3K_PL03] Issues and challenges for overseas development of nuclear power

*Masato Yoshimura¹ (1. Hitachi GE)

Room N

Planning Lecture | Technical division and Network | Reprocessing and Recycle Technology Division

[3N_PL] Research activities on reprocessing using RI facilities in universities

Chair: Masanobu Nogami (Kindai Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room N (M3-211 -M3 Building)

[3N_PL01] Introduction

*Masanobu Nogami¹ (1. Kindai Univ.)

[3N_PL02] Activity on Institute for Materials Research, Tohoku University

*Tomoo Yamamura¹ (1. Tohoku Univ.)

[3N_PL03] Activity on Hot Laboratory, Kyoto University Research Reactor Institute

*Akihiro Uehara¹ (1. Kyoto Univ.)

[3N_PL04] Activity on Rokkasho Branch, Tohoku University and Aomori Prefecture QuantumScience Center

*Seong-yung Kim¹ (1. Tohoku Univ.)

[3B_PL] The trend of research and development of the latest PRA methods

Chair: Yoshiyuki Narumiya (JANSI)

Wed. Mar 28, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room B (C1-311 -C1 Building)

[3B_PL01] The trend of research and development of PRA methods at PSA2017

*Akira Yamaguchi¹ (1. Univ. of Tokyo)

[3B_PL02] The trend of research and development of Dynamic PRA

*Ikuo Kinoshita¹ (1. INSS)

[3B_PL03] The R&D activities regarding multi-unit PRA methodology

*Hiromichi Miura¹ (1. CRIEPI)

[3B_PL04] Dynamic Risk Analysis of Combined Event of Earthquake and Flooding in Nuclear Power Plant

*Sunghyon Jang¹ (1. Univ. of Tokyo)

リスク部会セッション

最近の PRA 手法の研究・開発動向

The trend of research and development of the latest PRA methods

(1) PSA2017 におけるリスク評価の研究動向について

(1) The trend of PRA research in PSA2017 International Conference

山口 彰¹¹ 東京大学大学院

米国ピッツバーグ市において、2017 年 9 月 24 日から 28 日まで、The 2017 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis (PSA 2017) (確率論的安全評価に関する国際会議) が開催された。主催は米国原子力学会であるが、確率論的安全評価／リスク評価 (PSA/PRA) に関する多くの研究成果活用実績の発表、討議が行われた。その発表論文から最新の研究動向について紹介する。

確率論的リスク評価に関連する国際会議としては以下のものがある。

(1) PSAM (Probabilistic Safety Assessment and Management)

国際 PSAM 組織委員会 (IAPSAM) が運営する会議で、2 年ごとに開催される。原子力分野の論文が多いが、非原子力分野もスコープとしている。米国、欧州、米国、アジアのローテーションで開催されている。2013 年には日本から Topical PSAM を提案し、東京にて開催した。その後、2015 年にはブラジル、2017 年にはドイツが Topical PSAM を開催され、Topical PSAM が定着した感がある。

(2) PSA (Probabilistic Safety Assessment and Analysis)

米国原子力学会が主催する国際会議で、2 年ごとに開催される。米国におけるリスク評価手法、リスク活用事例など、原子力分野のリスク評価の成果が発表・討議される。米国だけでなく、アジア、欧州からも多くの参加者がある。

(3) ESREL (European Safety and Reliability Conference)

欧州で開催される安全性と信頼性にかかる国際会議で、広く安全性と信頼性の分野を扱っている。PSAM 会議が欧州で開催されるとき (8 年に 1 回) には共催としており、1000 人以上が参加する。

(4) ASRAM (Asian Symposium of Risk Assessment and Management)

日韓 PSA ワークショップとして開催していたものを発展させ、アジアにおけるリスク評価とリスク管理を扱う国際会議である。第 1 回を横浜で開催 (2017 年 11 月 13 日から 15 日)、欧米からの参加もあり、参加者からは好評を博した。日本、韓国、中国の参加国で MOU を結んで実現し、当面を参加国で持ち回り、毎年開催する。次回は 2018 年 10 月に中国での開催が決まっている。

PSA2017 は、原子力分野においてもっともリスク情報活用が進む米国の最新状況が得られるという観点から注目すべき会議である。会議に先立ち、24 日 (日曜日) に 3 つのワークショップが開催された。そのうち、二つは動的リスク評価 (Dynamic PRA) に関するものであった。米国のアイダホ国立研究所(INL)から、RAVEN (Risk Analysis Virtual Environment)で熱水力のシビアアクシデントコードを統計的に扱うことにより PRA とシビアアクシデント解析を結びつけるプラットフォームである。もうひとつは仏国 EDF からの PyCATSHOO である。これは、汎用コンポーネントクラスを定義し、それを用いてシステムモデリングを行い、統計的にシステム応答を扱うツールである。両者のアプローチは異なっているが、いずれもシステム応答解析と PRA を結合させる方法である。三つ目のワークショップは PRA のためのベイズ推定に関するものである。近年、稀有事象のリスクを扱う上で、限られた情報を効率的に活用するためにベイズ流アプローチは重要な方法として注目されている。その他に特別セッションとして用意されたものは、多数基リスク評価、サイトリスク評価に関するパネル、リスク情報を活用した規制に関するパネルなどであった。

*Akira Yamaguchi¹

¹University of Tokyo

リスク部会セッション

最近の PRA 手法の研究・開発動向

(2) 動的な PRA の手法の開発動向について

(2) The trend of research and development of Dynamic PRA

*木下 郁男

原子力安全システム研究所

1. はじめに

本稿では、従来の静的なイベントツリー(ET)やフォールトツリー(FT)に基づく評価手法に動的な解析技術を組み込んだ動的 PRA の開発動向を紹介し、その有効性について議論する。

2. 動的 PRA の研究動向

2-1. 手法概要

従来の ET/FT に基づく静的 PRA では、起回事象に続いて生起する事象を予め与えた上で評価を行う。このため、事象生起のタイミングや順序が固定されており、原子炉システムの状態の動的変化が考慮されないという欠点がある。一方、動的 PRA では、事故時の原子炉内の物理プロセスを模擬するシミュレーションコードと、これと安全装置の動作や運転員操作との相互作用を制御するコントローラコードをカップリングして評価を行う。この際、シミュレーションコードのモデルパラメータや安全装置の故障確率、人的過誤率は不確かさパラメータとして扱われ、これらの不確かさ伝播解析により炉心損傷確率等の評価が行われる。こうした観点から、動的 PRA はシミュレーションベース PRA とも呼ばれる。

2-2. 計算コード

動的 PRA のための計算コードとしては、ADAPT, ADS, MCDET, PyCATSHOO など多くある。本稿では、米アイダホ国立研究所(INL)が開発中の RAVEN [1] を扱う。RAVEN は、当初 RELAP-7 の制御系、ポスト処理系として開発が始められたが、現在では、RELAP5-3D, MELCOR, MAAP などの様々なシステム解析コードとカップリングが可能な汎用的な感度解析・不確かさ解析のコードとして開発が進められている。RAVEN は、動的 PRA の解析で発生する大量かつ高次元のデータ処理を可能とするため、データマイニングや機械学習の適用に力を入れて開発されており、Topological Decomposition のような最新の次元削減の手法も導入されている。

RAVEN では、動的に ET を生成する branching laws として、①Threshold、②On demand、③Time driven の3つが用意されている。①Threshold は、パイプ破断等の確率の累積確率分布に対して閾値を設定して分岐させるものである。②On demand は、逃し弁の故障等の要求に応じて分岐させるものである。③Time driven は、ある指定した時刻で分岐させるものである。

2-3. 静的 PRA と動的 PRA の比較

Mandelli ら [2] は、BWR の SBO 事故シナリオを対象として、SAPHIRE を用いた従来の ET/FT 法による静的 PRA による炉心損傷確率と、RAVEN/RELAP5-3D によるシミュレーションベース PRA による炉心損傷確率の比較を行っている。その結果、全体の炉心損傷確率に顕著な相違は無いが、静的手法と動的手法とで異なった炉心損傷確率となるブランチがあり、その相違が生じるヘッディングを同定している。彼らは、各ブランチに対して被覆管表面温度(PCT)のヒストグラムを作成し、炉心損傷に至らないブランチに属するシナリオは、交流電源が炉心損傷の直前に回復したケースであるという分析を行っている。このように、評価結果に対してシミュレーション結果に基づく詳細な分析を行えるところが動的手法の長所である。また、感度解析においても動的手法は有効である。例えば、Mandelli ら [2] は出力向上などの場合における有効性を指摘している。この場合、従来の ET/FT 手法では、FT の再構築や ET の分岐確率の再設定が必要になると考えられる。一方、動的手法では、RELAP5-3D の入力を変更し不確かさパラメータは変更しな

い。したがって、感度解析を系統的に実施でき、評価結果の説明性も向上する。

一方、動的手法では、評価結果の情報が豊富になることと引き換えに、計算コストが増大する。これを解決するためには、適応サンプリング等のサンプリング手法の適用や、代替統計モデル等の機械学習の適用が有効になると考えられる。また、静的手法と動的手法のハイブリッドな運用が考えられても良いだろう。さらに、動的手法では、シミュレーションコードの精度が評価結果に影響することに注意が必要である。RELAP5-3D 等の最適評価コードの精度は、その大半が構成式の精度であると言えるが、構成式の不確かさが動的 PRA の評価結果に与える感度を把握しておくことが必要であると考えられる。特に、構成式の不確かさが大きいシビアアクシデント解析コードを用いて動的 PRA を実施する場合に、この検討は重要になると考えられる。

3. INSS における取り組み

3-1. これまでの取り組み

これまで、INSS では RELAP5/MOD3.2 コードを用いて統計的安全評価を実施してきた。小破断 LOCA 時高圧注入系不作動事象のアクシデントマネジメント策を対象に、主に構成式の不確かさが PCT 評価に及ぼす影響を評価した。この際、IAEA の Safety Guide に示された第 3 のオプション”Best Estimate + uncertainty approach”に則り、境界条件は partly most unfavorable condition で与え、機器の稼動は保守的条件で与えた。しかし、アクシデントマネジメント策に対する安全解析としては、第 4 のオプション”Risk informed approach”に則り実施することが自然である。この方法は、動的 PRA に最適評価コードの構成式の不確かさを考慮する方法とも言える。

こうした背景から、INSS の安全解析に RAVEN を導入した。RAVEN には構成式の不確かさを扱う機能はないため、構成式のモデルパラメータを統計的に振れるように RAVEN を拡張した。さらに、本コードを用いて ROSA/LSTF の小破断 LOCA/HPI 不作動模擬実験を対象に統計解析を実施し、構成式の不確かさが PCT 評価に与える感度を把握した [3]。以上より、構成式の不確かさを考慮した動的 PRA を実施する基盤を整備した。

3-2. 今後の課題

今後は、関電の PWR プラントに対する動的 PRA モデルの構築を行う予定である。これを用いて、2.3 節で述べたような静的 PRA 手法との比較評価や、炉心損傷確率等に大きな影響を与える要因の分析を行う。さらに、最適評価コードの構成式の不確かさに係る感度解析を行い、炉心損傷確率等への影響が大きい構成式の同定、および構成式の改良を実施する。

4. まとめ

本稿で紹介した動的 PRA 手法は従来の静的 PRA 手法の自然な拡張と考えられる。今後、動的 PRA 手法の計算技術上の課題を解決し、静的 PRA 手法と併用しながら、プラントの運用・管理等における意思決定のための有用なツールとして活用することが望まれる。

参考文献

- [1] Alfonsi, A., et al., RAVEN Theory Manual and User Guide, INL/EXT-16-3817, INL (2017)
- [2] Mandelli, D., et al., Risk-Informed Safety Margin Characterization Methods Development Work, INL/EXT-14-33191, INL (2014).
- [3] Kinoshita, I. et al., Uncertainty and Sensitivity Analysis of LSTF Small Break LOCA Tests Using RELAP5 and RAVEN, PSA2017 (2017).

*Ikuo Kinoshita

INSS

リスク部会セッション

最近の PRA 手法の研究・開発動向

The trend of research and development of the latest PRA methods

(3) マルチユニット PRA 手法の研究開発動向について

(3) Report on research and development trend of multi-unit PRA method

*三浦 弘道¹, 猪股 亮¹, 神田 憲一¹, 吉田 智朗¹¹一般財団法人電力中央研究所

2016 年 12 月より国際原子力機関（IAEA）が実施している、レベル 1 マルチユニット PSA（MUPSA）評価技術の確立と実施方法を提供する文書の作成を目的とした MUPSA プロジェクトの概要を紹介するとともに、電力中央研究所での MUPRA 研究の取組みについて紹介する。

キーワード：マルチユニット，MUPSA，MUPRA，サイトリスク，ユニット間相互作用，IAEA

1. 緒言

多くの原子炉発電所では、複数の原子力施設を有するものの、通常の安全評価では単一の原子炉に限定した評価しか実施されていない。一方で、福島第一発電所事故を受け、複数の原子炉が関与する事象に対する安全性評価について、国際的に関心が高まっている。IAEA では、加盟国の要請により、2012 年以来、マルチハザード・マルチユニットサイトの安全性評価に関する枠組みと方法論の開発を目的とした活動を実施してきており、2016 年 12 月にレベル 1 MUPSA 評価技術の確立と実施方法を提供する文書の作成を目的とした MUPSA プロジェクトを開始した。このような、国内も含む国際的な関心・動向から、電力中央研究所においても国内プラントに適用可能な MUPRA 評価技術の確立に向けた調査研究を開始した。本報告では、IAEA における MUPSA プロジェクトの概要を紹介するとともに、電力中央研究所での MUPRA 研究の取組みについて紹介する。

2. マルチユニット PRA 手法の研究開発動向**2-1. IAEA の MUPSA プロジェクト概要**

レベル 1 MUPSA の詳細な評価技術の確立を目指し、IAEA の MUPSA プロジェクトは、以下の 3 フェーズで構成される。

- ・フェーズ 1（2017 年）：実践的な MUPSA モデル化ガイダンスを伴った、MUPSA の実施方法を提供する文書の作成
- ・フェーズ 2（2018 年）：フェーズ 1 で作成した評価手法に従ったケーススタディの実施
- ・フェーズ 3（2019 年）：ケーススタディの教訓に基づく評価手法の改善

2-2. MUPSA プロジェクトにおいて作成された MUPSA 評価手法の概要

IAEA における MUPSA プロジェクトはフェーズ 1 が終了し、MUPSA 評価を実施する上での起因事象の抽出、事故シーケンスのモデル化方法、ユニット間での CCF や地震による損傷の相関の考え方、スクリーニング・モデル単純化の考え方等の MUPSA 評価手法を提案している。また、現在実施中のフェーズ 2 では、提案した手法の実施可能性を確認するため、ケーススタディに取り組んでいる。

2-3. 電力中央研究所（電中研）の MUPRA 研究の概要

電中研では、国内プラントにおけるマルチユニット相互作用の影響把握のための技術整備を目的として、MUPRA 評価手法開発に関する調査研究を 2016 年度より開始した。現在、内的事象レベル 1 MUPRA 評価技術の確立のため、実施上の技術的課題、評価手法の検討及びケーススタディを実施している。

*Hiromichi Miura¹, Ryou Inomata¹, Kenichi Kanda¹ and Tomoaki Yoshida¹

¹Central Research Institute of Electric Power Industry

リスク部会セッション

最近の PRA 手法の研究・開発動向

The trend of research and development of the latest PRA methods

(4) 原子力プラントの地震・洪水複合事象の動的リスク評価

(4) Dynamic Risk Analysis of Combined Event of Earthquake and Flooding in Nuclear Power Plant

*張 承賢

東京大学

1. はじめに

2つ以上の複合事象に対するリスク評価は事象進展が複雑であるため、複数の起因事象による事故シーケンスの定量的評価を既存の PRA 手法で行うことは困難である。例えば、地震と地震起因の内部洪水による影響を同時に考慮する場合、地震と内部洪水のどちらかの影響度が強い場合、事象進展は、影響度が強い事象の影響を受けると考えられる。その一方、両方とも強い影響度を持つ場合、事象進展はどのようなだろうか。地震による影響が支配的になるだろうか。内部洪水による影響が支配的になるだろうか。

本研究では、地震と地震起因内部洪水の複合事象発生時の事故シーケンス定量化できる動的リスク手法を構築することで、複合事象におけるリスク評価についての検討を行った。

2. 内部洪水による影響評価

内部洪水事象発生時に安全上重要な設備の機能喪失確率は水位上昇に伴い変化する。そのため、洪水伝播経路を考慮し、時間進展による水位変化を把握することは重要である。本研究では、原子力発電所のタービン建屋を評価の対象とし、内部洪水によって洪水区画内に存在する機器の機能損傷確率及び事象進展による機能損傷確率の変化を評価するために、内部洪水評価モデルを作成した。

内部洪水評価モデルでは、洪水区画における水位の変化を、水の質量の収支を考慮することで評価することができる。また、洪水区画間の洪水伝播経路（区画間の止水板高さ、及び止水板の損傷）を考慮することによって、洪水区画内の複数の領域における水位変化を評価することが可能となる。

内部洪水による機器の故障は、内部洪水により上昇する水位が、各機器の機能喪失水位に達すると、没水によって機器の機能が失われると仮定した。ただし、今回の解析では、被水による機器の機能喪失は考慮していない。

タービン建屋内には、非常用発電機、電気盤、補助給水ポンプなど、様々な機器が存在しており、各機器はそれぞれ異なる内部洪水による機能喪失水位を有するため、内部洪水評価モデルを用いることで、各機器の機能喪失確率の経時的な変化を評価することが可能となる。

またイベントツリーを使い、各ヘッディングにおける分岐確率を評価することで、炉心損傷確率の経時的な変化を評価することも可能となる。

3. 地震による影響評価

地震によってタービン建屋に存在する安全上重要な設備の機能喪失確率は、地震脆弱性モデルを用いて評価を行う。

地震脆弱性評価には、各機器に対する現実的な耐力と現実的な応答評価より得られたデータを用いて複数の地震動レベルにおける機器の確率を行った。今回は解析では、地震の影響による機器故障確率の経時的な変化は考慮していない。

4. 複合事象による影響評価モデル

2章、3章で評価した内部洪水及び地震による機器故障確率にランダム故障による影響を加え、フォールトツリー手法を用いて、機器故障確率の評価を行った。

またある機器故障確率を持った機器が破損するかどうかの判断は、タイムステップ毎にモンテカルロ

法より生成された乱数と機器故障確率の比較を通して行った。またシナリオの遷移はマルコフ過程である
と考える。即ち、現在の時刻のプラント状態（各構成要素の状態の組み合わせ）は、ひとつ前の時刻のプラ
ント状態のみに依存し、それより前の時刻のプラント状態には依存しないと考える。

こういった手順を繰り返すことによって、各機器における機能損傷確率の経時的な変化を評価すること
が可能になった。更に溢水伝播経路における不確かさ（溢水源の大きさ、止水板における損傷の大きさ）
を考慮することで、地震及び地震起因内部溢水の複合事象発生時に炉心損傷確率の時刻歴変化を考慮した
事故シナリオの定量的かつ網羅的評価が可能であった。

また複数の地震動レベルにおける機器故障確率の変化や溢水源もしくは溢水伝播経路の大きさの変化を
考慮することが可能となるため、地震動による影響の強さ及び内部溢水による影響の強さに応じて事故シ
ナリオの変化を定量的に評価することも可能となった。

*Sunghyon Jang

.The University of Tokyo

[3G_PL] Present status and future of nuclear data evaluation code in Japan

Chair: Satoshi Chiba (Tokyo Tech)

Wed. Mar 28, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room G (U2-212 -U2 Building)

[3G_PL01] Development of AMUR for the evaluation of resonant cross-sections

*Satoshi Kunieda¹ (1. JAEA)

[3G_PL02] Progress of a nuclear reaction model code CCONE

*Osamu Iwamoto¹ (1. JAEA)

[3G_PL03] Development of DEURACS for prediction of deuteron-induced reaction cross section

*Shinsuke Nakayama¹ (1. JAEA)

[3G_PL04] Improvement of nuclear reaction models in the PHITS code

*Sintaro Hashimoto¹ (1. JAEA)

核データ部会セッション 「シグマ」 特別専門委員会共催]

我が国における核データ計算コード開発の現状と将来ビジョン

Present status and future of nuclear data evaluation code in Japan

(1) 共鳴解析コード AMUR の開発

(1) Development of AMUR for the evaluation of resonant cross-sections

*国枝 賢¹¹ 日本原子力研究開発機構

1. はじめに

共鳴領域における中性子断面積およびその共分散は原子力工学における重要な基礎データである。また、小型加速器を用いた中性子源の開発、イオンビームによる微量分析技術、さらには天体核物理学等の分野においては、軽核に対する荷電粒子反応のデータが不可欠である。しかし、共鳴断面積を理論計算のみで正確に導くことは、今日においてもチャレンジングな研究テーマある。そのため、米国や欧州諸国においては、半世紀近くに亘り断面積の測定が系統的に実施されてきた。また EDA(米), SAMMY(米)や REFIT(欧)をはじめとする解析コードが開発され、共鳴パラメータの取得が継続して行われてきた。日本ではこのようなアクティビティは皆無に近い状況であった為、汎用ライブラリ JENDL に格納されている殆どの共鳴パラメータの値は欧米諸国における測定値や評価値がベースとなっている。

近年、J-PARC における中性子共鳴データの測定が開始され、今後我が国においても共鳴断面積の測定データが蓄積されていくことが期待されている。また、IAEA の測定値データベース EXFOR の整備では、過去に欧米諸国で取得された共鳴断面積（生データに近いもの）の収集が開始されている。今後は独自のデータおよび各国のデータ双方に基づいた共鳴解析や評価が可能になると考えられる。一方、共鳴解析コードについては、他国のコードに頼らざるを得ないのが現状である。しかし、測定条件（例えば J-PARC でしばしば問題となるダブルバンチの影響）を柔軟に模擬できないという問題が必然的に生じる。また、利用可能な共鳴理論や計算可能な物理量、解析手法の組み合わせが制限されている等の壁がある。ソースプログラムが非公開であるコードも少なく無い。

本講演では、近年原子力機構で開発が進められている R 行列理論に基づく共鳴解析コード AMUR の概要および開発状況を説明する。また、 ^{15}N , ^{16}O , ^{19}F 等の軽核に対する共鳴解析への適用例を示す。さらに、各国のコード開発の現状にも触れると共に、今後の展開や展望について述べる。

2. コードの概要と開発状況

汎用性を重視する為に、オブジェクト指向言語を駆使して開発を進めている。従って AMUR は種々のクラスの集合体である。図 1 に示す通り、本コードは大きく二つのルーチンから構成される。一つは R 行列理論に基づいて断面積等の物理量を計算するルーチンである。このルーチンでは断面積のみならず、微分断面積や偏極分解能の計算が可能である。また、中性子入射反応のみに対応したコードが多い中、本コードでは荷電粒子入射反応の断面積も計算することが可能である。二つ目のルーチンでは、一般化最小二乗法(GLSQ)/カルマンフィルタ法を用いて、断面積等の測定データから共鳴パラメータおよび共分散を導出する。この際に重要となるのが、測定条件をできる限り考慮することである。現在は、測定の分解能や有限温度に対するドップラー広がりを考慮することが可能である。また、計算値同士の足し算や任意の関数による計算値の補正が可能である。従って、天然同位体組成の測定データを解析することができる。さらに、ダブルバンチの影響を受けた測定データからも共鳴パラメータを取得可能である。なお、複数の測定データを同時に解析可能な設計としている。その為、目的とする反応の断面積に対して、同じ複合核を形成する他の反応の測定値から情報を追加することができる。さらに、R 行列理論におけるユニタリ性等の物理

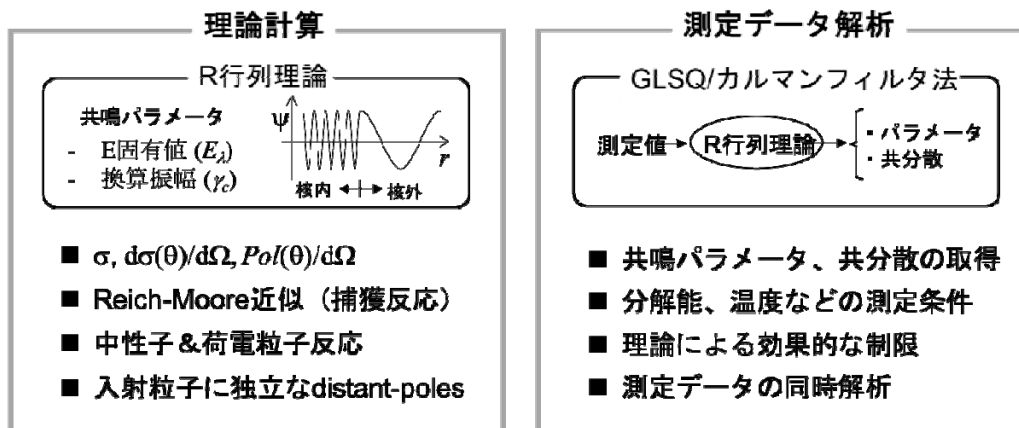
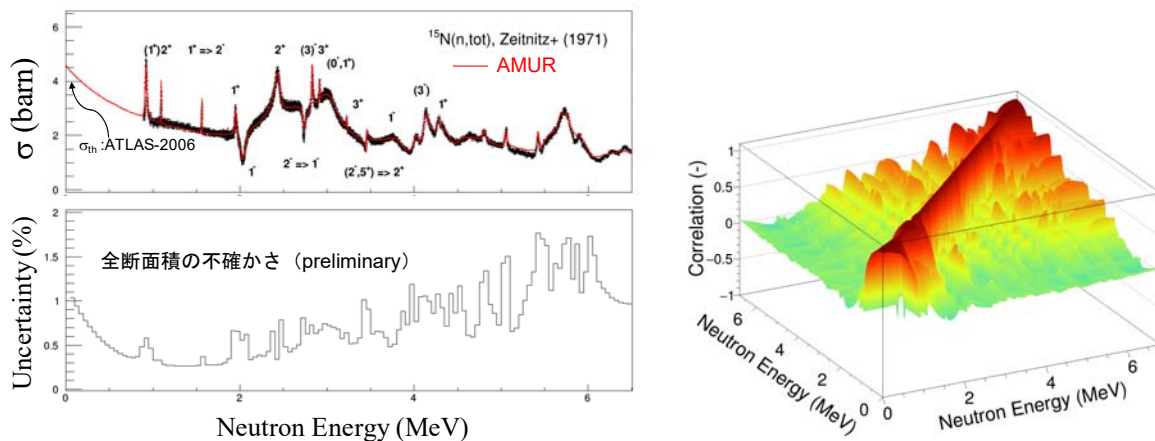


図1 AMUR コードの概要

拘束を効果的に用いることにより、不整合な測定データを物理的に合理的な解釈に基づいて解析に取り入れることができる（これに関しては講演において詳しく解説する）。

図2 AMUR コードの適用例 (^{15}N 中性子断面積および共分散の評価結果)

3. 核データ評価への適用、今後の課題

AMUR は次期 JENDL 開発の一翼を担うコードとして核データ評価への応用が徐々に始まっている。図2に ^{15}N に対する中性子断面積および共分散の解析結果を示す。 ^{15}N は ADS 燃料の構成材料として候補に上がっている元素であるが、共鳴解析による評価データはほぼ皆無であった。本コードを適用することにより、測定データの内外挿のみならず、共分散データの評価や微分断面積の予測計算を行うことが可能である。今後は、自己遮蔽効果や多重散乱による補正機能を加えることにより、適用範囲を重核側へ拡張することを計画している。それにより、実験と理論が一体となった核データ評価が期待される。また、核分裂反応が扱えるコードにすると共に、核構造理論を活用した共鳴断面積の予測計算にもチャレンジしたい。

* Satoshi Kunieda¹

¹Japan Atomic Energy Agency

核データ部会セッション「シグマ」特別専門委員会共催

我が国における核データ計算コード開発の現状と将来ビジョン

Present status and future of nuclear data evaluation code in Japan

(2) 核反応モデルコード CCONE の進展

(2) Progress of a nuclear model code CCONE

*岩本 修¹¹ 日本原子力研究開発機構

1. はじめに

核データの評価は基本的には測定データに基づく。しかしながら、核データライブラリーでは広いエネルギー範囲で、多くの種類の反応断面積、散乱断面積の角度分布、核反応放出粒子スペクトル等を網羅したデータが要求されるため、測定データのみで評価を完結させることはできず、核反応モデルに基づく理論的な計算が有力な手段となる。原子力では核データに対して高い精度が要求され、このモデル計算に課される基本的な要件として、測定データを十分な精度で再現できることがあげられる。要求されている核データについて、一つのモデルから計算することは現状では困難であり、必然的に複数のモデルが組み合わせて利用される。一方、JENDL-4.0 の開発では、核分裂生成物やマイナーアクチニドなど、測定データが十分でない核種に対する核データの信頼性を向上させることが課題であった。JENDL-4.0 以前は、複数の独立したコードを組み合わせた評価が行われていた。しかしながら、各種の反応の断面積や放出される粒子のスペクトルには相関があるため、異なる断面積やスペクトルの間に不整合が生じる可能性がある。逆にこれらを統一的に扱うことにより、評価データの信頼性の向上につなげることが可能である。このような観点から、CCONE コードは複数の核反応モデルの整合性を高めた計算システムとして開発された。

2. コードの概要と現状

CCONE コードは光学モデル、チャンネル結合モデル、歪曲波ボルン近似、励起子モデル、Hauser-Feshbach 統計モデルを用いて、核子入射反応の物理過程である直接過程、前平衡過程、複合核過程について整合性を持たせた計算を行うことができる。図 1 に計算のフローを示す。利用するモデルのパラメータは IAEA で整備している核データのモデル計算入力データライブラリー RIPL を組み込んで利用できるようにしており、様々なパラメータを簡単に選択可能である。これにより核データ評価にかかる労力の削減が可能となる。CCONE コードは、当初アクチニド核種の核データ評価に利用したが、汎用性を持たせており、JENDL-4.0 の開発では核分裂生成物や鉛同位体等の他の核種の評価にも利用された。

JENDL-4.0 の公開後、20 MeV 以上の高エネルギー核データライブラリー開発のため、高エネルギー反応で重要となる前平衡過程についてコードの拡張を行った。JENDL-4.0 の評価時には CCONE では前平衡過程から 1 個の粒子を放出した後は複合核を形成するとして、生成される励起した残留核を統計モデルにつないでいた（図 2 拡張前）。しかしながらエネルギーが高くなるにつれて、前平衡過程からの複数の粒子放出を考慮しないと測定データの再現性が悪くなるため、コードを拡張して任意の数の粒子を放出可能とした（図 2 拡張後）。また、高エネルギー反応では重陽子やアルファ粒子などの複合粒子の放出も大きくなるが、通常の励起子モデルの取り扱いでは測定データを再現できない。国枝等が実施した、岩本・原田のモデルの改良を取り込んで、これらの粒子放出スペクトルの再現性が大きく改善した。2015 年に公開した高エネルギー核データファイル JENDL-4.0/HE の開発では、これらの改良を取り込んだコードを系統的に使用して、核データの信頼性向上を行った。

光核反応への適用についても拡張を実施した。20 MeV 程度までは双極子巨大共鳴が主要な反応過程である。これらの反応は複合核のガンマ崩壊の逆反応にあたり、ガンマ線強度関数が重要となる。RIPL でも多くのモデルが提案されているが、CCONE でもこれらの多くのモデルを取り込んで利用可能とした。また、

高エネルギーでは準重陽子分解過程が主要となるが、Chadwick 等のモデルを導入し、計算可能とした。これらは 2017 年に公開した JENDL/PD-2016 の開発に広く利用された。

JENDL の開発以外では、CCONE では、励起状態からの統計崩壊を簡単に計算できるようにしており、ベータ崩壊からの遅発中性子放出や、代理反応における反応割合の計算にも適用されるなど、様々な研究へ活用されている。また、ImPACT プロジェクトの研究開発では、微視的理論による核構造データの計算結果をインプットとして利用できるようにし、測定データがほとんどない不安定核のモデル計算の信頼性を高めることも試みている。

3. まとめ

核反応過程を統合した CCONE コードは、JENDL-4.0 の核データ評価で広く利用された。その後、高エネルギーや光核反応への拡張を行いつつ、JENDL 特殊目的ファイルの開発等への利用を進めている。また、遅発中性子放出や代理反応の計算等への活用もされている。現在も、微視的理論による核構造データの取り込み等の開発を続けている。

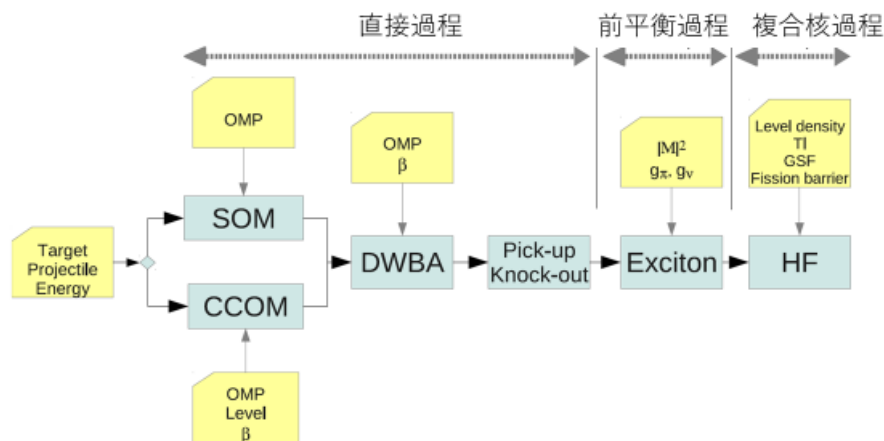


図1 CCONE コードの計算フロー

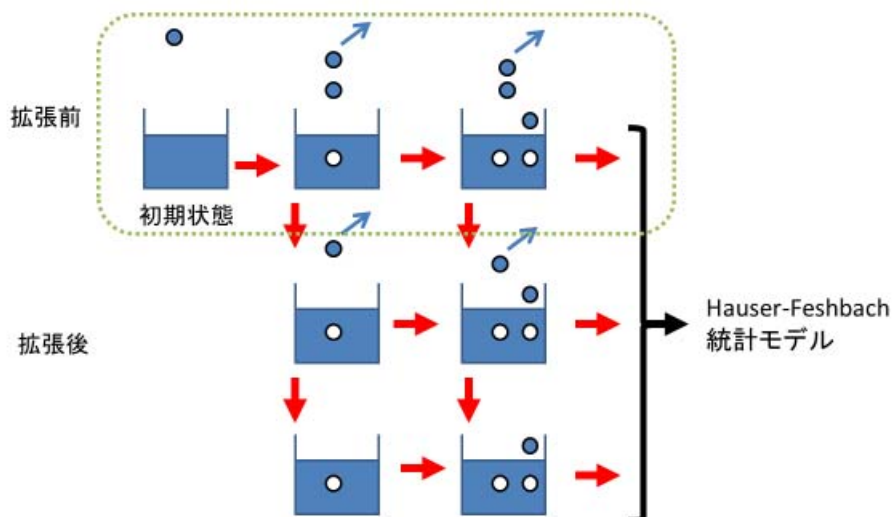


図2 励起子モデルの拡張

* Osamu Iwamoto¹

¹Japan Atomic Energy Agency

核データ部会セッション「シグマ」特別専門委員会共催]

我が国における核データ計算コード開発の現状と将来ビジョン

Present status and future of nuclear data evaluation code in Japan

(3) 重陽子入射断面積計算コード DEURACS の開発

(3) Development of DEURACS for prediction of deuteron-induced reaction cross section

*中山 梓介

日本原子力研究開発機構

重陽子核データファイルの作成に向けて開発している重陽子入射反応用の断面積計算コード DEURACS について、現在までの開発状況や今後の展望等を述べる。

1. 緒言

重陽子は陽子と中性子が弱く結合した粒子であるため、他の原子核との反応の際に容易に分解し中性子を放出しやすい。この性質を利用し、重陽子加速器を高効率の中性子源として利用することが提案されている。これは重陽子ビームを軽核 (Li, Be, C 等) に衝突させ、そこで起きる核反応を利用して中性子を得るというものであり、例としては医療用 RI 製造やホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) のための小型中性子源、ならびに核融合炉材料の照射試験施設 (IFMIF) や放射性廃棄物の核変換処理のための大強度中性子源などが挙げられる。

これらの施設の工学的設計には包括的かつ高精度な重陽子核データが要求される。包括的な重陽子核データファイルとしては断面積計算コード TALYS の計算値をまとめた TENDL が現状で唯一存在している。しかし TALYS や CCONE などの計算コードは主に核子入射反応を対象としており、重陽子入射反応の取り扱いが必ずしも十分ではない。このため TENDL にも実験値と乖離のある値が格納されているのが現状である。

こうした状況の下、高精度の重陽子核データファイルの作成に向け、重陽子入射反応に特化した断面積計算コード DEURACS (DEUteron-induced Reaction Analysis Code System) の開発を行っている[1]。

2. DEURACS の概要・特徴

DEURACS では(核子入射にはない)重陽子入射に特有の反応過程に注意を払い、各々の反応の記述に特化した理論モデルを採用している。具体的には、弾性分解および非弾性分解反応は、それぞれ連続状態離散化チャネル結合法 (CDCC 法) および Glauber モデルで計算している。また、残留核の低励起準位へのストリップング反応は、過去の研究[2]から見出した規格化因子の入射エネルギー依存性を考慮した歪曲波 Born 近似 (DWBA) で計算している。

一方、核子入射の場合と同様と考えられる複合核過程などの反応過程は CCONE を用いて計算している。ただし、重陽子入射では非弾性分解反応や重陽子吸収反応により三種の複合核が形成され得る。このため、DEURACS では Glauber モデルの計算値を CCONE に引き渡して計算することにより、この効果を考慮した計算を行っている。

上記のように種々の理論モデルと CCONE を組み合わせることで、重陽子入射反応の断面積を精度良く計算できる上に、CCONE に改良がなされた場合にそれを速やかに反映できるシステムとなっていることが DEURACS の特徴である。

3. 計算結果

DEURACS の計算結果の例を図 1, 2 に示す。また、TENDL の最新版 TENDL-2017 の格納値および PHITS[3] 内の核反応モデル (INCL+GEM、重陽子全反応断面積は MWO の式[4]) による計算結果も併せて示す。

図1の通り、中性子源設計で最も重要な軽核からの中性子放出反応について、DEURACSの計算結果は幅広い中性子放出エネルギーにわたり実験値を良く再現している。なお、これらの中性子の多くは重陽子の分解から生じるため、この結果はDEURACS内での分解過程の記述の妥当性を示している。

また、図2には放射性物質であるトリチウムの発生量予測に関連し重要な (d,xt) 反応の結果を示す。図1と同様、DEURACSの計算結果は実験値を良く再現している。なお、この計算に当たり、CCONEに内蔵の核子入射のピックアップ反応を記述するKallbachの半経験式を重陽子入射にも適用できるように、CCONEを改良した[5]。図2の結果は、このようなCCONEの改良を速やかに反映できるというDEURACSの特徴が活かされた例と言える。

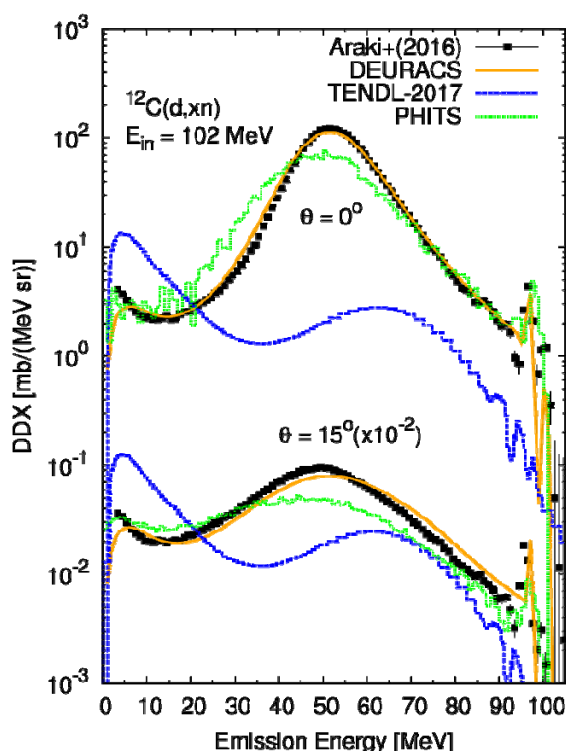


図1 $^{12}\text{C}(d,xn)$ 反応の二重微分断面積

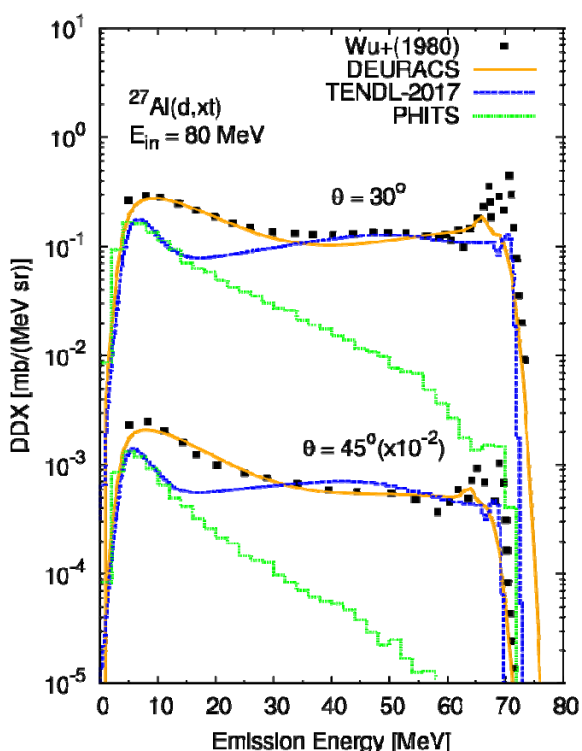


図2 $^{27}\text{Al}(d,xt)$ 反応の二重微分断面積

4. 今後の展望

DEURACSの開発から得られた成果を応用に活かすため、中性子源設計で最重要のLi, Be, C標的に対し、DEURACSの計算値に基づくPHITS独自のデータ形式のファイルを作成する作業が進行中である。さらに、今後はより一般的な核データの形式であるENDFフォーマットのファイルも作成する予定である。

また、医療用RI製造や核変換処理では重陽子を直接照射することも検討されている。こうした中性子源開発以外の応用で重要となる量（中重核に対する核種生成断面積など）についても精度良い計算ができるよう、DEURACS内の理論モデルを改良していく予定である。

参考文献

- [1] S. Nakayama et al., *Phys. Rev. C* **94**, 014618 (2016); S. Nakayama et al., *EPJ Web Conf.* **146**, 12025 (2017).
- [2] S. Nakayama and Y. Watanabe, *J. Nucl. Sci. Technol.* **53**, 89 (2016).
- [3] T. Sato et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* **50**, 913 (2013); T. Sato et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* (2018) in press.
- [4] K. Minomo et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* **54** 127 (2016).
- [5] S. Nakayama et al., *JAEA-Conf.* **2017-001**, 91 (2018).

*Shinsuke Nakayama

Japan Atomic Energy Agency

核データ部会セッション「シグマ」特別専門委員会共催

我が国における核データ計算コード開発の現状と将来ビジョン

Present status and future of nuclear data evaluation code in Japan

(4) PHITS コードにおける核反応断面積の計算手法の高度化

(4) Improvement of nuclear reaction models in the PHITS code

*橋本慎太郎¹, 佐藤達彦¹, 岩元洋介¹, 小川達彦¹, 古田琢哉¹, 安部晋一郎¹, 仁井田浩二²¹原子力機構, ²高度情報科学技術研究機構

1. はじめに

PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)[1]は、原子力機構を中心に多数の研究機関の協力の下で、開発が進められている汎用のモンテカルロシミュレーションコードである。中性子をはじめとする様々な放射線の挙動を幅広いエネルギー領域で模擬することができるため、加速器施設の遮へい設計や放射線防護研究、宇宙・地球惑星科学研究等の分野で利用されている。

2. PHITS コードにおける核反応

PHITS では様々なモデルやデータライブラリを用いて核反応を模擬している。図 1 に、核反応イベント発生時の流れを示す。まず、断面積モデルにより核反応の発生率を評価し、乱数によって発生の有無を決定する。発生が決まった場合は、核反応モデルを利用して、直接過程や前平衡過程に対応する dynamic stage の計算を行い、次に複合核過程に対応する static stage の計算を実行する。これらの計算で乱数を用いており、放出粒子の種類やエネルギーが具体的に決まるため、モンテカルロシミュレーションで利用し易い event-by-event な反応の結果を得ることができる。

我々は、近年の核物理研究の知見を反映させ、新規核反応モデルの導入や従来モデルの高度化を行ってきた。断面積モデルとして Kurotama を発展させた Hybrid モデルの開発を行った他、重陽子の断面積モデル MWO を導入した。数 100MeV の陽子・中性子の核反応モデルとして核内カスケード INCL4.6 や INC-ELF を導入し、原子核の核反応モデルである量子分子動力学 JQMD, JAMQMD を相対論的に記述した version 2.0 に改良した。加えて、加速器中性子源研究の際に有用な DWBA (歪曲波ボルン近似) +INCL の組み合わせモデルの開発、高エネルギーガンマ線による放射化を評価できる光核反応モデルの開発、様々なミューオンの工学研究で利用できるミューオン核反応のモデルを開発した。20MeV 以下の中性子については JENDL-4.0 を導入することで高精度化を図り、またその際に 2 次荷電粒子の放出を適切に記述するため、Event Generator Mode の改良も行った。なお、本節において引用した各モデル等については、佐藤らの文献[1]に示した引用文献で参照することができる。

3. まとめと今後の展開

現状の PHITS に組み込まれている核反応計算の精度をベンチマーク結果として、岩元らによる文献[2]にまとめた。この結果を基に、引き続き核反応モデルの精度向上を進める。また、核反応モデルやデータライブラリの不確かさを起源とする系統誤差の評価機能も開発しており、PHITS の計算結果の信頼性を様々な観点で分析できるよう機能の充実を図る予定である。

参考文献

[1] T.Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. (2018), DOI: 10.1080/00223131.2017.1419890.

[2] Y. Iwamoto et al., J. Nucl. Sci. Technol. 54:5, (2017) 617-635.

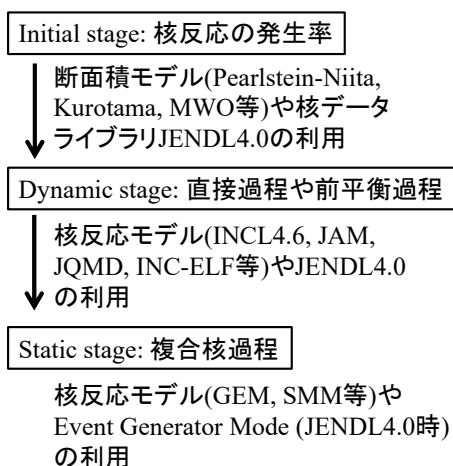
*Shintaro Hashimoto¹, Tatsuhiko Sato¹, Yosuke Iwamoto¹, Tatsuhiko Ogawa¹, Takuya Furuta¹, Shin-ichiro Abe¹, and Koji Niita²¹JAEA, ²RIST

図 1. PHITS の核反応計算の流れ。

[3H_PL] Research developments of Lasers

Chair: Shuichi Hasegawa (Univ. of Tokyo)

Wed. Mar 28, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room H (U2-213 -U2 Building)

[3H_PL01] Introduction of the session

*Shuichi Hasegawa¹ (1. Univ. Tokyo)

[3H_PL02] Ionic valence change of metal ions in solution by laser excitation

*Nobuaki Nakashima¹ (1. Osaka City Univ.)

[3H_PL03] Development of the high-speed remote inspection laser system for the defects in the concrete

*Noboru Hasegawa¹ (1. QST)

[3H_PL04] Laser remote analysis for decommissioning of damaged reactor core

*Ikuo Wakaida¹ (1. JAEA)

レーザーの特長を利用した研究開発

Research developments using the excellent properties of lasers

(1) 趣旨説明**(1) Introduction of the session**

*長谷川 秀一

東京大学大学院工学系研究科

レーザーは1960年に発明以来、その特長である指向性、単一波長性、エネルギー強度、短パルス性などにおいて、飛躍的な進展を遂げている。また、加速器や様々なデバイスを応用することで発振波長範囲もX線からテラヘルツ領域まで拡張が試みられている。これらの特長を用いて、身近なところではCDやレーザーポインターなど手軽なものから、核反応を実現するような巨大エネルギーを発生させる駆動源まで様々な応用が発明され、さらなる研究開発が進められている。原子力分野においても、様々な領域で利用が進んでいる。具体的には以下のような例が挙げられる。

レーザー核融合をはじめとする核反応、粒子加速、化学反応制御、元素分析、同位体分析、同位体濃縮、レーザーアブレーション、レーザーカッティング、衝撃波生成、など。

このように、原子力分野に限定しても、あまりに用途が広いことから、ハードウェアとしてのレーザーを考えた場合に、学会内での利用者相互での議論や情報交換が十分うまくいっているとは言えないところもあり、レーザーの特徴を十二分に引き出すために、学会において、レーザーをキーワードとしたセッションを企画することとした。

学会内でのレーザー利用は非常に多岐にわたるため、今回は初めての試みとして、レーザーの化学反応への利用、インフラ健全性検査への利用、遠隔分光分析への利用、に関して以下3件の講演をいただくこととした（敬称略）。

- レーザーによる金属イオンの価数変化（大阪市立大）中島 信昭
- レーザーによるコンクリート欠陥の遠隔・高速検出技術の開発（量研関西研）長谷川 登
- レーザーを利用した廃炉のための遠隔分光分析（原子力機構）若井田 育夫

原子力分野におけるレーザーを利用した研究に関して、集中的に議論できる場を作ることにより、応用先の各分野での発展と同時に、原子力分野でのレーザー利用の高度化を進めるためのプラットフォームになるものと期待される。

以上

*Shuichi Hasegawa

The University of Tokyo

レーザーの特長を利用した研究開発

Research developments using the excellent properties of lasers

(2) レーザーによる金属イオンの価数変化

(2) Ionic valence change of metal ions in solution by laser excitation

*中島信昭

大阪市大 院理

1. はじめに

重元素のリサイクルは 21 世紀の課題の一つである。一部の金属イオンはレーザーにより価数変化（酸化還元反応）を起こすことができる。一般にレーザー励起で期待される利点を以下 1～3 に示した。

1. 試薬の代わりに光の利用で、廃棄物の減容ができる。
2. 遠隔照射により、作業者の安全を確保できる。
3. 多光子励起により、金属イオンの選択性を高めることができる。

本稿では金属イオンの価数変化の代表例として、 $\text{Eu}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{2+}$ のレーザー反応を中心に紹介する。生成物の沈殿分離は単純な分離方法であり、 Eu^{2+} 塩でこれを試みた。他の元素イオンへの展望を述べる。

2. 光反応を示す金属イオン

光により価数変化を示す元素イオンと示さないイオン、調べられていないものがある。これらについて、Donohue(1979-)[1], 大野新一(1986-), 榎田洋一(1990-)らの実験、および、研究の提案、レビューがある。それらから抜粋し、表 1 に示した。

表 1. U-Pu 型原子炉の高レベル放射性廃液に含まれる元素を青字で示した。赤字はそのイオンが、通常の溶媒中で光反応が良く知られている元素。ランタニド元素はバックを黄色で示した。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Du	105 Jo	106 Rf	107 Bh	108 Hs	109 Mt									

Lanthanide	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinide	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

この反応分類は水溶液、アルコール中でのことである。イオン液体を溶媒とした場合とか、特殊な金属錯体形成では光反応を示す場合がある。なお、黒字赤字の元素イオンの光反応は良く知られている。

*Nobuaki Nakashima

Department of Chemistry, Graduate School of Science, Osaka City University

3. レーザー励起還元のパターン

$\text{Eu}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{2+}$ 系では下記 1~3 が実現できている. Cd, Pd, Ag, Au 系のように, 初期に 1 ないし 2 価イオンの場合, 還元反応の結果 4 の微粒子に至ることがある.

1. UV1 光子励起還元反応,
2. 2 光子励起還元,
3. フェムト秒パルスでフィラメンテーションを起こし還元.
4. 金属微粒子の生成

3-1. UV1 光子励起還元反応

$\text{Eu}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{2+}$ 系での結果を図 1 に示した. Eu^{2+} 生成の結果 Eu^{2+} 塩が沈殿した例である. Eu^{3+} イオンを含むエタノール溶液 (約 0.4 M) に 308 nm (15 Hz, 40 mJ/pulse) のレーザーを照射すると, 最初は Eu^{3+} イオンの赤色発光が見られるが (左端) 30 秒後には還元された Eu^{2+} イオンの蛍光に変わる (中, 青色), 30 分後には Eu^{2+} 塩と思われる白沈 (右) が得られた[2].



図 1. Eu^{3+} (赤い発光) $\rightarrow \text{Eu}^{2+}$ (青い蛍光) $\rightarrow$ 白色沈殿, ナノ秒 308 nm レーザー励起

UV スペクトル変化を図 2 に示す. 最初(黒)では 394 nm など Eu^{3+} の ff 吸収, 短波長側には $f \rightarrow d$ (CT) 吸収が見られる. 308 nm 照射 (62 mJ/パルス) 11-260 ショットで 350 nm 付近の吸光度が上昇する. これは Eu^{2+} の $d \rightarrow d$ 吸収の裾野にアサインでき, Eu^{2+} の生成を示している. 260 ショット後では塩が析出し, 試料溶液は白濁した. Eu^{2+} の吸収スペクトル, 吸光係数は別に求めているので, 反応量子収量を評価でき, それは 0.6 であった. なお, Eu^{2+} の飽和濃度を 3.2 mM と求めた. これは Eu^{3+} 塩が共在しない場合に比べ, 約半分となった.

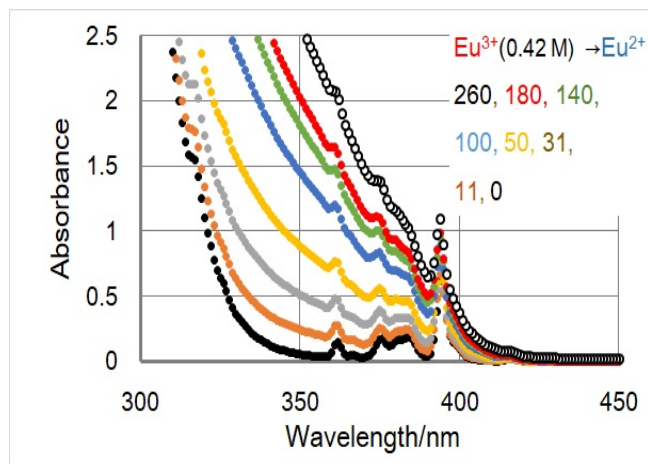
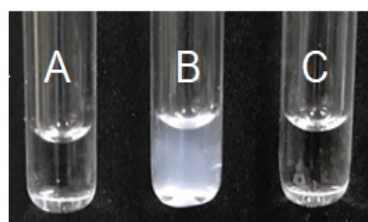


図 2. Eu^{3+} 塩のエタノール溶液に 308 nm レーザーを照射, その後の UV スペクトル. 図中の数値 0-260 は照射レーザーショット数. 260 ショット後は溶液の白濁が目視でき, 450 nm 付近ではそれによる吸収強度の (0.03) 上昇が見られた.

3-2. 2 光子励起還元

2 光子励起還元, 白濁の結果を図 3 に示した. 2 光子励起還元が起きることは以前に示していたが[3], 沈殿に至るところまで反応を進めることができていなかった. 今回再度実験を試みたところ, 比較的容易に白沈が出現した[4].

Eu^{3+} イオンは 394.1 nm 付近に $^5\text{L}_6 \leftarrow ^7\text{F}_0$ の 4f 電子間遷移の吸収を示す (図 3 中, 右) この遷移の 1 光子励起では反応しないことは以前より良く知られている. ナノ秒レーザー, 394.1 nm (Eu^{3+} の吸収ピークの中心, 共鳴波長) で集光照射した場合のみ (図 3 左中, 中 B) 白濁した. 実際, Eu^{2+} の吸収スペクトル (図 2 参照) の増大が見られた. 励起の波長を 3 nm 短波長の 391 nm にした場合 (非共鳴波長, 図 3 中 A, 左 A), 中心波長の 394.1 nm は保っているが集光しなかった場合 (フラット, 図 3 中 C, 左 C) では白濁には至らなかった.



A: 391 nm 集光,
B: 394.1 nm 集光,
C: 394.1 nm フラット

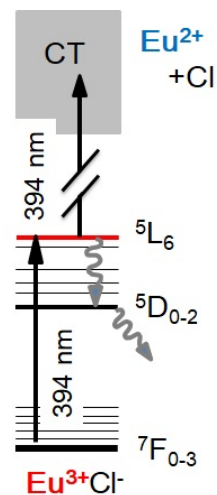
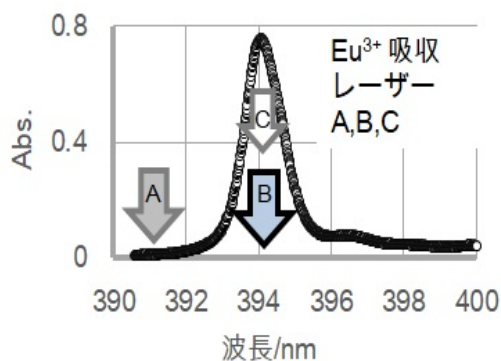


図 3 左: 2 光子励起, その後の白濁. 中: 吸収スペクトル, 照射条件, 右: エネルギーレベルと 2 光子励起機構.

2 光子反応が起き, その機構は中間状態 5L_6 に第 1 の光子で励起され, 第 2 の光子で反応の起きる CT レベルまで達し, Eu^{2+} 生成に至ったと解釈した. 図 3 の実験では 5 mJ/パルスでトータル 22 J 照射した. 飽和濃度を越すところまで反応したので, 現時点での変換効率 ($=\text{Eu}^{2+}$ のイオン数/入射光子数) を 2×10^{-3} と評価した. 2 光子反応なのでこの数値は励起光強度に依存(簡単には比例)するであろう. 2 光子還元の特長は励起波長を大きく長波長に変えることができる. UV 光では溶媒が不透明な場合もある. また, 多くのイオンの同時励起を避け, 特定イオンの高い選択励起が可能であろう. また, 一般に可視レーザーの方が高いパルスエネルギーを得やすいことも利点である. 同様の反応機構を $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+}$ 系で議論している [5].

3-3. フェムト秒パルスでフィラメンテーションを起こし還元

フェムト秒パルスを Eu^{3+} の EtOH 溶液に集光照射 (800 nm の 0.12 μJ /パルス, 30 fs, 5 kHz) するとフィラメンテーションを起こす (図 5). このことは赤外パルスが白色光変換に観測されることから確認できる. (レーザー光集光した場合, フィラメンテーションが起き, 入射光の一部は白色光に変換される. レーザー光強度を更に上げ集光すると媒体のレーザー破壊に至る [6].)

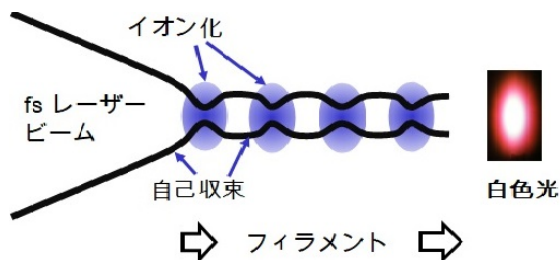


図 5. フィラメンテーション模式図. 自己収束が起き, 媒体はイオン化, 白色光の発生を伴う. フィラメントの長さは 20 cm のレンズで集光した場合, 約 1 mm とされる.

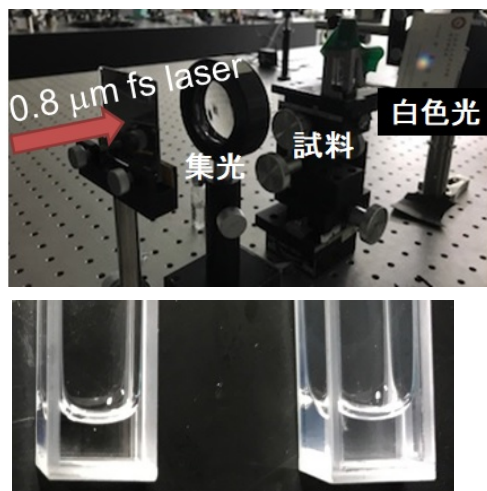


図 6. フェムト秒パルス励起でフィラメンテーションを発生させ, $\text{Eu}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{2+}$ 反応を起こさせた. その時のレーザー集光光学系および発生した白色光.

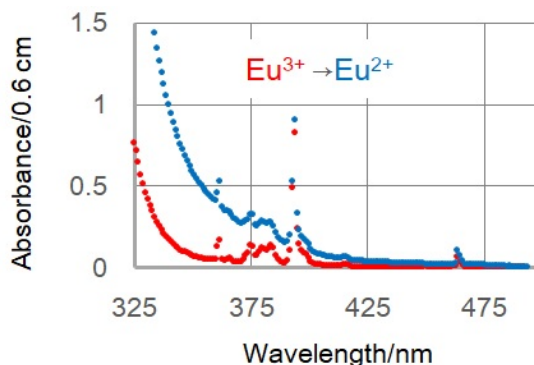


図 7. 照射前の透明な状態(写真左)に比べ照射後(写真右)では白濁が見られた. 右図の吸収スペクトルは試料照射前(赤)照射後(青)であり, スペクトルは Eu^{2+} の生成を示した. 白濁したので, 長波長部 (490 nm) における数値(0.13)をそれによる散乱として差し引いた.

集光されたフェムト秒パルスにより溶媒がイオン化し, $\text{Eu}^{3+} + e^-_{\text{sol}} \rightarrow \text{Eu}^{2+} \rightarrow (\text{Eu}^{2+} \text{ 塩沈殿})$ の反応が起きたと解釈した(3-4. 金属微粒子生成を参照). この場合トータルで 2.6J 照射しており, 変換効率(= Eu^{2+} のイオン数/入射光子数)では 8×10^{-3} が得られた. レーザー溶媒破壊, プラズマ化学と似ている点もあろうかと思われるが, フィラメンテーションの場合, 反応に関与する活性種がより少ないことが考えられる. また, 溶媒和電子による還元なので, 各種イオンが混在している場合, 還元されやすいイオンから順に反応が進むであろう.

3-4. 金属微粒子の生成

価数変化の系で安定金属イオンが Pd, Au, Ag, Cd イオンのように 1 ないし 2 価の場合, 微粒子を生成する場合がある. 1 価イオンが還元されると 0 価となり, それらが凝集することは自然なことであろう. Pd イオンは 2 価であるがナノ秒レーザー励起で微粒子を生成し, 佐伯らは Pd を Mo との混合溶媒から分離することに成功している[7]. ここではフェムト秒フィラメンテーション条件で見出された Au 微粒子について簡単に紹介する[6, 8, 9]. 反応機構は図 8 に示すように考えている. この機構は Eu^{3+} がフェムト秒レーザー励起で還元される反応と同じであろう(3-3. フェムト秒パルスでフィラメンテーションを起こし還元 参照). レーザーはパルス幅 100 fs, 1 kHz, 800 nm, 3 μJ /パルスであった.

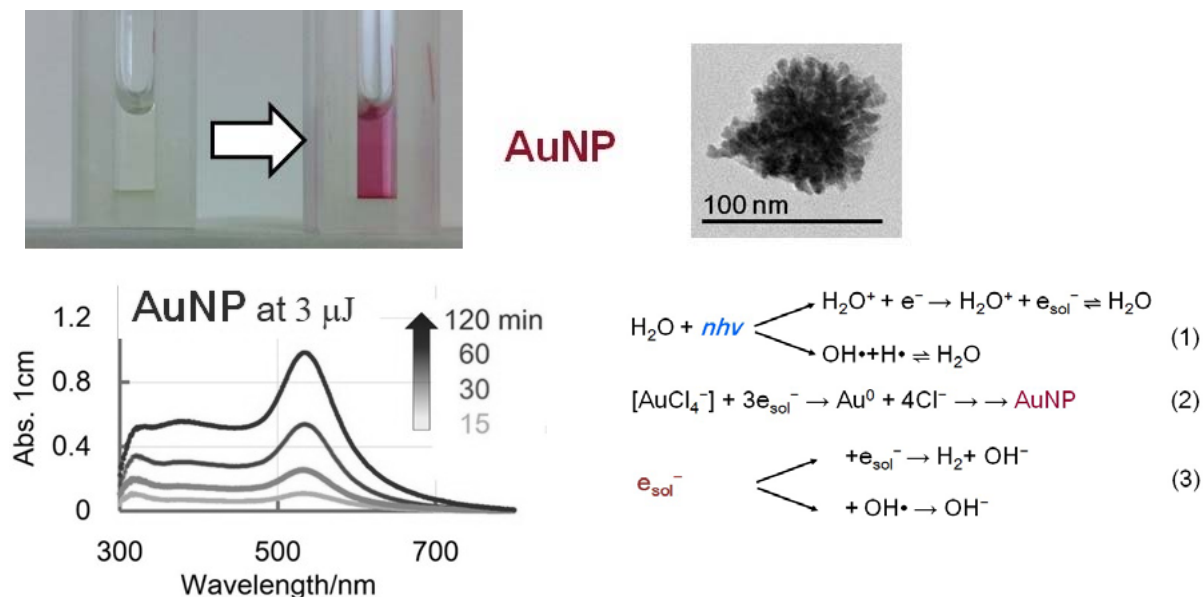


図 8. フェムト秒を集光照射すると金錯体の水溶液から微粒子の生成が見られた. サイズは 100 μm 程度であった. 微粒子特有の吸収が 530 nm 付近に出現し, 溶液の色はワインレッドを呈した.

4. まとめ

レーザーにより, Eu, Ce, Ce, Sm, Ce, Fe, Pd, Au, Ag, Cd, Rh 元素イオンの価数を変化させること, または, 微粒子生成が可能であった. 価数の変化は 2.3 の異なる励起方法行ってみた. 今後, 各種溶媒での実験, 多光子反応での変換効率の吟味を深めれば, 応用への議論に進むことができるであろう.

5. 共同研究者

多くの方々との共同研究を行なってきた. また, 装置利用の便宜を図っていただいた. ここ 1, 2 年でお世話になった方々を記して謝意を表す. ハッ橋 知幸(大阪市大), 迫田 賢治(大阪市大), 横山 啓一(原

研), 岩倉 いずみ(神奈川大学), 佐伯 盛久(原研), 大場 弘則(原研), 山中 孝弥(分子研), 上田 正(分子研).

参考文献

- 1) "Laser Purification of the Rare Earths", T. Donohue, *Opt. Eng.* **18**(1979)181.その後の Donohue の文献.
- 2) "希土類イオンのレーザー化学", 中島信昭, レーザー研究, **24**(1996)787-795.
- 3) "Two-Photon Reduction of Eu^{3+} to Eu^{2+} via the $f \leftarrow f$ Transitions in Methanol", M. Kusaba, N. Nakashima, Y. Izawa, C. Yamanaka, W. Kawamura, *Chem. Phys. Lett.* **221**(1994)407-411.
- 4) "Laser chemistry for Eu recovery", N. Nakashima, T. Yatsushashi, K. Sakota, I. Iwakura, K. Yokoyama, 日本化学会 第 98 春季年会(2018), 1PB-03.
- 5) "Reduction of Yb(III) to Yb(II) by Two-Color Two-Photon Excitation", N. Nakashima, K. Yamanaka, T. Yatsushashi, *J. Phys. Chem. A*, **117**(2013)8352-8359.
- 6) "Metal ion reductions by femtosecond laser pulses with micro-Joule energy and their efficiencies", N. Nakashima, K. Yamanaka, M. Saeki, H. Ohba, S. Taniguchi, T. Yatsushashi, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **319**(2016)70-77.
- 7) "Wet separation between palladium(II) and molybdenum(IV) ions by using laser-induced particle formation: Enhancement of recovery efficiency of palladium by laser condition", M. Saeki, T. Taguchi, N. Nakashima, H. Ohba, *J. Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **299**(2015)189-193.
- 8) "フェムト秒フィラメンテーションに伴う化学反応", CSJ カレントレビュー 第 18 号, 強光子場化学の展開, 分担執筆, ハッ橋知幸, 中島信昭, 日本化学会編, 化学同人, **2015**, **18**.
- 9) "フェムト秒レーザーによる液相化学反応およびナノ材料創成", 岡本拓也, 中島信昭, ハッ橋知幸, *Rev. Laser Engineering*, **45**(2017)278-282.

レーザーの特長を利用した研究開発

Research developments using the excellent properties of lasers

(3) レーザーによるコンクリート欠陥の遠隔・高速検出技術の開発

(3) Development of the high-speed remote inspection laser system for the defects in the concrete

*長谷川 登¹, 錦野 将元¹, 三上 勝大¹, 北村 俊幸¹, 岡田 大¹, 近藤 修司¹, 倉橋 慎理²,
島田 義則², 河内哲哉¹

¹量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所, ²レーザー技術総合研究所

1. はじめに

日本にはトンネルや橋梁を始めとするコンクリートを使用した社会インフラが数多く存在するが、現在では高経年化に起因する劣化が懸念されている。国土交通省では平成 25 年を「社会資本メンテナンス元年」として、インフラの老朽化対策についての様々な取り組みが推進されている。更に平成 26 年度からは、内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)において、インフラメンテナンスに関わる新技術の開発が行われている。

現在のコンクリート内部の検査方法の主流である打音法では、検査員がハンマーでコンクリートを叩いた際に発生する音の違いを耳で聞き分けることにより健全性を診断している。信頼性が高く多くの実績があるが、接触式（高所作業）であるため検査には時間がかかる事に加え、検査員に危険も伴う。日本のトンネルの総延長は鉄道・道路を合わせて約 8,000 km にも及び、それらを全て定期的に点検するには膨大な時間とコストが掛かるため、高速、非接触、遠隔操作が可能な新しい定量検査技術の開発が求められている。我々は SIP からの支援を受けて、レーザー照射による打撃とレーザー振動計測による振動の検出を同時に行うことにより従来の人の手による打音法と同様の検査を遠隔で行うことが可能と期待される「レーザー欠陥検出法」^{1,2)}の高速化に取り組んでいる³⁻⁶⁾。

2. レーザーによるコンクリート欠陥の遠隔・高速検査技術

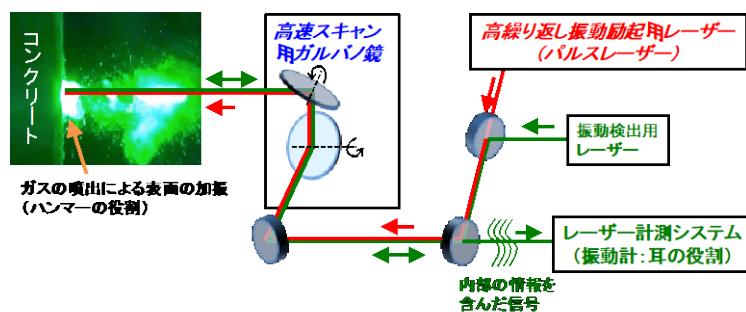


図1) 高速レーザー打音計測法の原理

2.1. 遠隔計測の原理と高速化について

レーザー欠陥検出法では、2 種類のレーザーを利用することで、打音法における「打撃」と「音の検知」を遠隔・非接触で行うことを可能とする。図 1 に概略を示す。ハンマーの役割をする振動励起レーザーは高強度のパルスレーザーであり、コンクリートに照射することで表面をわずかに蒸散させ、その反作用により表面に振動を

励起する。耳の役割をするレーザー振動計測システムは、コンクリート表面からの反射光を干渉計測することで、励起された振動を遠隔で計測する。通常の打音法と同様に、コンクリート表面の振動は内部の状態により変化するため、振動を解析することで内部の状態を観測することが可能である。従って本方式は、従来の打音計測と同様の原理で欠陥を検知するものであり、「レーザー打音法」とも呼べるものである。レーザー打音法の計測速度は、主に振動励起レーザーの動作速度と検査位置にレーザーを導くスキャン機構の速度によって制限される。我々は、高繰り返し動作の可能な振動励起レーザー及び高速掃引が可能なレーザー計測システムを新たに開発することで、内部に模擬欠陥を有するコンクリート供試体を最大 50 回/秒の計測速度で検査することに成功している。

2.2. 高速レーザー打音装置によるコンクリート供試体の計測

図 2 に、新たに開発した高速レーザー打音装置の外観を示す。上部に振動励起レーザー、下部にレーザー計測装置とスキャン装置が配置されている。微小なコンクリート振動を検知するために、それぞれの装置は防振定盤上に設置されており、装置全体は防音パネルによって覆われている。振動励起レーザーは、フラッシュランプ励起の Nd:YAG レーザーに像転送光学系を導入すると共に冷却効率を向上させることで、7 m（トンネルの天井までの距離に相当）先での良好な集光性能と最大 4 J（コンクリート位置）、50 Hz の高速動作を両立することに成功している。レーザーを検査位置に導くための高速掃引システムには軽量・高剛性な SiC 基盤を用いたガルバノミラーを採用することで、高速動作と高い開口率による検査精度の向上を実現した。図 3 に、表面から深さ 10 mm の位置に模擬欠陥を埋め込んだコンクリート供試体の検査結果を示す。白線は模擬欠陥の境界線を、黒点はレーザーによる検査箇所、緑の領域が健全部、赤い領域が欠陥と判定された部位をそれぞれ示している。内部に欠陥がある場合には、特定の振動（卓越振動）周波数が強く観測されており、これを検知することで欠陥の判定を行っている。今回、50 Hz での検査を行うことで、54 箇所の検査を約 1 秒で行うことに成功した。

試作したレーザー打音装置は、トラックへの搭載及びディーゼル発動機による運用も可能である。当日は、静岡県富士市の施工技術総合研究所の模擬トンネル内で行った屋外実証試験の結果も含めて紹介する。

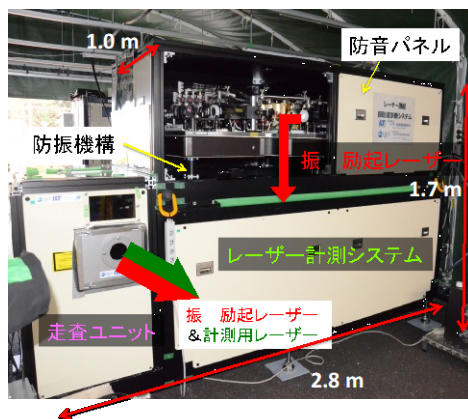


図 2) 高速レーザー打音装置試作機^{5,6)}

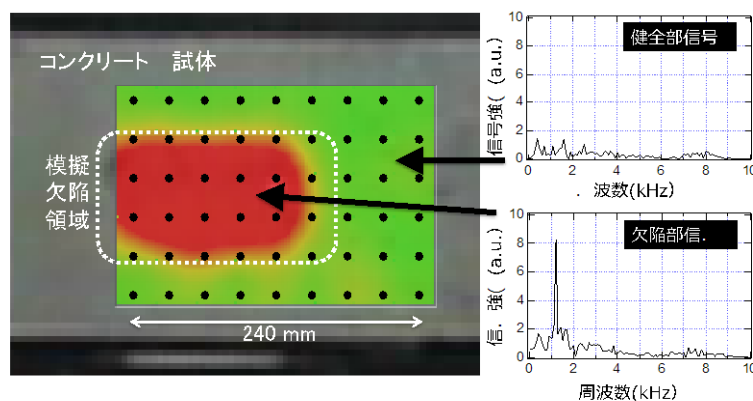


図 3) コンクリート供試体の判定結果⁶⁾

3. 今後の計画について

SIP の最終年度である平成 30 年度には、実際に運用されているトンネル内での試験を計画している。

謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「【インフラ維持管理・更新・マネジメント技術】」（管理法人：JST）によって実施した。

参考文献

- [1] 島田義則：検査技術, Vol.11, No.9, pp.8-14, 2006.
- [2] 御崎哲一 著「レーザーを用いたトンネル覆工コンクリートの欠陥検出方法に関する研究」, 2015.
- [3] S. Kurahashi, et. al : Journal of Applied Remote Sensing, Vol. 12(1), 015009, 2018.
- [4] 長谷川登、他：検査技術, Vol. 22 No. 3, 57-61, 2017.
- [5] 岡田大、他：レーザー研究, Vol. 45, 427-432, 2017.
- [6] 錦野将元、他：建設機械, 627, Vol. 53, No. 5, 20-24, 2017.

*Noboru Hasegawa¹, Masaharu Nishikino¹, Katsuhiro Mikami¹, Toshiyuki Kitamura¹, Hajime Okada¹, Shuji Kondo¹, Shinri Kurahashi², Yoshinori Shimada² and Tetsuya Kawachi¹

¹Kansai Photon Science Institute National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, ²Institute for Laser Technology

総合講演・報告 4

レーザーの特長を利用した研究開発

Research developments using the excellent properties of lasers

(4) レーザーを利用した廃炉のための遠隔分光分析

(4) Laser remote analysis for decommissioning of damaged reactor core

*若井田 育夫¹, 赤岡 克昭¹, 大場 正規¹, 宮部 昌文¹, 大場 弘則^{1,2}, 田村 浩司^{1,2},
佐伯 盛久^{1,2}, 松本 歩³, 作花 哲夫⁴, 池田 裕二⁵, 平等 拓範⁶

¹原子力機構, ²量研機構, ³兵庫県大, ⁴京大工, ⁵イメージニング (株), ⁶自然機構分子研

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉においては、過酷事故炉内から溶融燃料デブリ等を取り出すという世界的に類例のない作業を安全かつ円滑、迅速に実行することが求められている。このためには、まず、圧力容器や格納容器内に存在する燃料デブリがどのような状態なのか、どんな組成構成となっているかを事前に知り、これを取り出し計画に反映させることが重要となる。また、中、長期的展望に立てば、取り出し作業時におけるデブリや構造物などの現場サーベランスとそれに基づく分別採取、作業自身のモニタリング、そして最終的には、炉内残存物のサーベランス等が不可欠であり、その場分析技術は廃炉工程において重要な役割を持つものと考えられる。これまでに、デブリ分析については、宇宙線による核燃料物質等の位置確認が試行されており、燃料集合体の溶融落下が示唆されている。また、最近では、小型ロボット、カメラ等が炉内に入れられ、2号機や3号機においては、映像の観察から、デブリの生成や格納容器下部への溶融落下が示唆されている。これらの情報を基に、各種シミュレーションや事故進展挙動解析等の高度な解析法により、デブリの状態、分布等を判断評価する試みが進められており、これを基にデブリ取り出し工法の選定がなされている。

一方、映像で捕捉されたデブリ状物質の性状、分布は、実際には計測されておらず、現実的な廃炉計画の策定、内部状況評価、デブリ取り出し作業においては、実際の計測によりデブリの状況を分析・把握することも不可欠となってくる。しかし、その方法については、従来技術によるコアサンプルの詳細な分析や放射線計測以外は、具体的準備がなされていないのが現状である。コアサンプルについては、サンプルの精緻な分析は可能である一方、サンプル数が限られればその代表性が問題となる。また、放射線計測も、ガンマ線などの強度を考えれば、係数計測によるエネルギー分析が困難であり、デブリやその構成物質の同定は、容易ではないことが予想されている。

これに対して、損傷炉内外の環境は、高放射線、水中又は高湿度、狭隘という過酷な環境条件となっており、撮像素子をはじめとして集積回路を多用した精密電子機器は強い放射線により素子自体の変質、配線の破断等の影響から動作が困難である。そこで、日本原子力研究開発機構では、これまで、次世代核燃料サイクル用燃料である、低除染 TRU 含有 MOX 燃料の遠隔・迅速分析技術として開発してきた、レーザー誘起プラズマ発光分光法 (Laser Induced Breakdown Spectroscopy : LIBS) を中心とした分析技術に着目し、廃炉措置における遠隔その場分析技術として応用する研究開発を開始した。この計測は、電気信号に代わってレーザーをプローブとした光分析手法であり、放射線の影響を受けにくい遠隔観察プローブとしての成立性が高い。

本報告では、LIBS を中心としたレーザーモニタリング分析手法開発の一連の取り組みと、最近の成果について報告する。

*Ikuro Wakaida¹, Katsuaki Akaoka¹, Masaki Oba¹, Masabumi Miyabe¹, Hironori Ohba^{1,2}, Koji Tamura^{1,2}, Morihisa Saeki^{1,2}, Ayumu Matsumoto³, Tetsuo Sakka⁴, Yuji Ikeda⁵, Takunori Taira⁶

¹JAEA-CLADS, ²QST, ³Univ. Hyogo, ⁴Kyoto Univ., ⁵Imaging Inc., ⁶NINS-IMR.

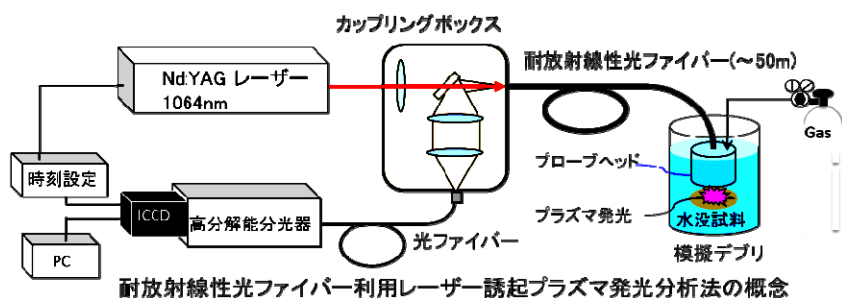
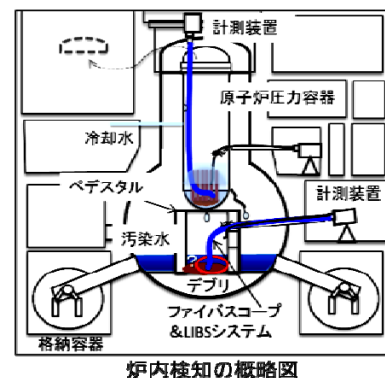


図1 基本コンセプト(上)と適用概念図(右)



2. レーザー利用遠隔分光分析手法の開発

2-1. 光ファイバーを活用した LIBS 計測プローブの基本特性

放射線線量率が高く過酷な炉内環境において、燃料デブリ等の組成その場分析を可能とする技術の一つとして耐放射線性光ファイバーを活用し、レーザー光及びプラズマ発光を同一のファイバーで搬送する簡便な LIBS 分析機構を構築した(図1)。耐放射線性光ファイバーの光透過特性については、図2に示すように線量率10kGy/h、積算線量数MGyの環境で、レーザー波長(Nd:YAG 基本波)及びスペクトル観測可能領域として近赤外領域が利用可能であることが確認されている。また、水中では、集光レンズと被分析物質との間にガスバブルを形成し、バブル中でレーザーを照射することでプラズマ発光実現した。これによって水没試料に対してもガス中計測同様に LIBS 計測が可能であることを U、Zr 酸化物試料で確認した。水没試料によるスペクトル測定例を図3に示す。さらに、強い放射線環境下での計測の実現性を確認するために10kGy/hを上回る強いガンマ線環境下においてプラズマ発光試験を実施した。スペクトル測定例を図4に示す。イオンの発光線について、若干変化が見られるものの、計測結果を左右する大きな差異は見いだせないことから、強い放射線環境下においても、放射線がない場合と同様に計測可能であることを明らかにした。

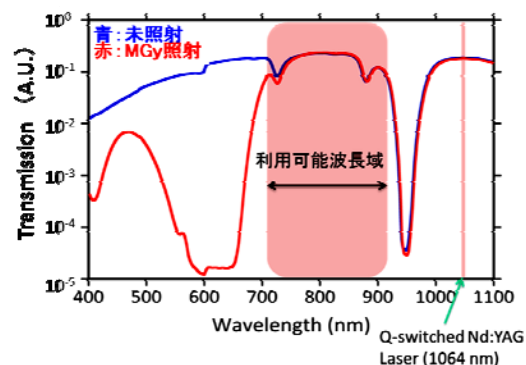


図2 耐放射線性光ファイバーの透過率例

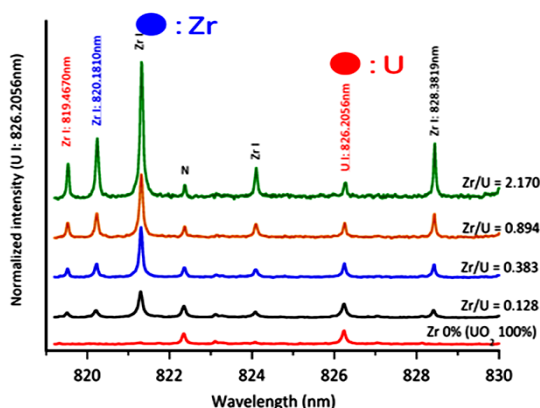


図3 水没模擬デブリのスペクトル例

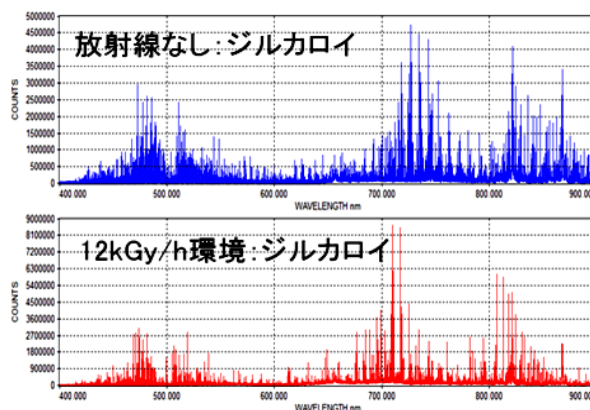


図4 強い放射線環境でのスペクトル例

2-2. ロングパルスレーザーを活用した LIBS 特性

より強いレーザー生成プラズマ発光強度が必要な場合や観察対象・環境によっては、より強いレーザー照射エネルギーを要する場合がある。この場合、発振時間幅が従来の6 ns程度のレーザー光源では、レーザーエネルギーの上昇により、光ファイバー端面が損傷してしまう。そこでパルス幅が100 nsのロングパルス波を有したNd:YAGレーザー光源をファイバーLIBS装置の光源として組み込み、光ファイバーのレーザー光伝送特性を従来型のNd:YAGレーザーと比較した(図5)。その結果、これまで使用してきた従来型のNd:YAGレーザーでは、最大で30mJ/pulse(ファイバー端面破壊エネルギー:45mJ/pulse)が伝送エネルギー

一の上限であったのに対し、ロングパルスレーザーでは、著しく伝送強度が増加し、150mJ/pulse を超えても伝送が可能であることが確認された。さらに、ロングパルスレーザーを大気雰囲気中において Zr 試料に照射し、得られた発光スペクトルを従来レーザーで得られたものと比較した（図6）。この結果イオンの発光線に比べ、近赤外領域の原子や分子（ZrO）の発光線の発光強度が倍増されること、レーザーエネルギーの増大に伴い得られる発光強度も増大すること等、ロングパルスレーザー特有の発光挙動が存在することが分かった。これは、耐放射線性光ファイバーの波長透過領域（近赤外領域）と一致することも考慮すれば、線量率の高い炉内観測に対しては、特に有利な特長となる可能性が高い。今後、小型で安定性の高いレーザー発振器の開発が求められる。

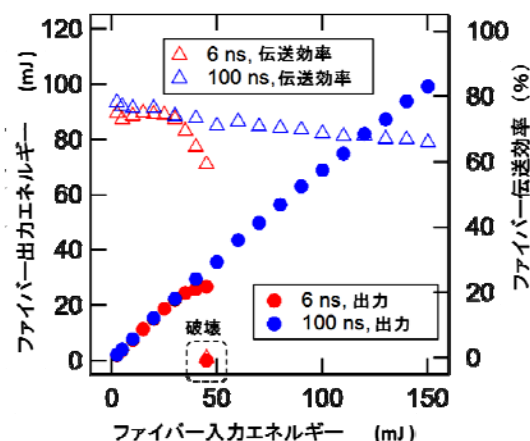


図5 光ファイバーの伝送エネルギー

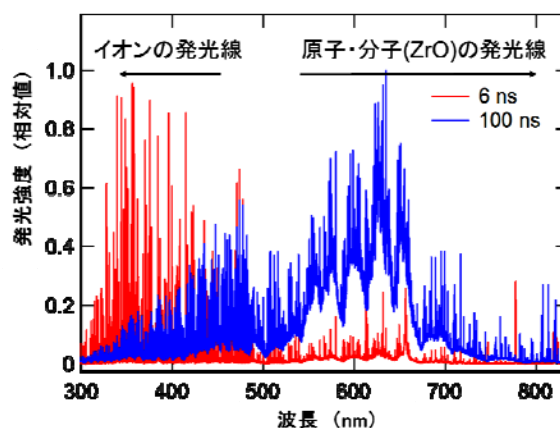


図6 発光スペクトルの比較 (Zr)

2-3. マイクロ波支援 LIBS による信号増倍の可能性

核燃料物質を明確に分離検出するためには、波長分解能が 1/50,000 以上の高分解能分光器が必要となり、検出効率の低下が問題となる。また、さらに同位体の信号を分解しようとするれば、1/150,000 程度の分解能が必要となる。そこで、近年、エンジン点火用に開発が進む車載型コンパクト高出力の半導体マイクロ波技術を導入し、レーザー入射に加えて高出力のマイクロ波エネルギーによりプラズマ発光を維持し、発光信号の増強を図る、マイクロ波支援 LIBS 法に着目した。マイクロ波支援 LIBS 法による信号増倍の様子を図7に示す。図では、レーザーのみの信号は小さく、ゼロレベルで表示されている。マイクロ波の入射により数十倍の発光強度増倍が容易に得られることが分かる。これによりマイクロ波の遠隔伝送が可能な範囲で本手法の有効性が示された。本手法は、炉内ではなく、廃炉現場での不明物サーベランスやホットセル内での簡易同位体分析に適用できる可能性がある。

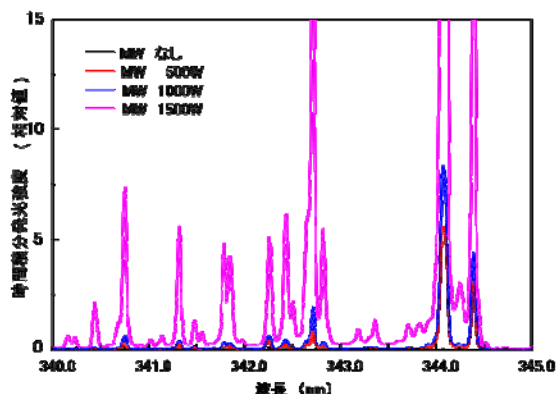


図7 マイクロ波支援 LIBS スペクトル測定例

2-4. マイクロチップレーザー利用 LIBS プローブ

これまで研究開発を進めてきた LIBS プローブは、レーザー発振器、分光機器を手元に置き、ブレイクダウンレーザー光を光ファイバで伝送する手法で開発を進め、光ファイバーの長さとして 50m まで利用可能であることを検証してきた。しかし、廃炉現場からは、原子炉上部から挿入する場合などを仮定すると、生体遮へい壁も含めれば、それ以上長い光ファイバーの要求も出てきている。そこで、これまでと大きく発想を転換し、プラズマ生成レーザー光を光ファイバーで伝送させるのではなく、レーザー光源そのものを小型化し、プローブの先端に取り付けることに着目した。これに最適なレーザー光源として、近年開発が目覚ましく、理化学分野だけでなく、レーザー点火エンジンをはじめとした産業利用等への適用研究が進んでいる、マイクロチップレーザーを活用することとした（図8）。

マイクロチップレーザーは、マイクロチップ化したレーザー素子に光ファイバーを介して外部からアルス幅の長い励起レーザー光を連続的に注入し、マイクロチップ素子を励起してエネルギーを蓄積したのち、外部からのトリガ信号なしに受動 Q スイッチ素子で高出力のパルスレーザー発振を可能としたものである。レーザー発振に電気信号を用いないことから、単純で小型化が可能である。また、利用する光ファイバーは径が細いものでもダメージを受けることはなく、また、伝送する長さを長くした場合でも、注入するレーザー光エネルギーの若干の損失にはなるものの、従来のブレイクダウンレーザー光そのものの伝送に比べれば、レーザー特性に大きな影響を与える可能性は低いものと考えられる。また、発散成分のないレーザー光そのものを集光できる点、二倍高調波の活用も可能である点等、本質的に光ファイバー伝送レーザー光を用いない場合の LIBS 法での光源と同様な特性を持つ。さらに、集光光学系も含め、本体の大きさは、直径 20 mm、長さ 100 mm 程度とすることが可能である。

以上の特長を考慮し、マイクロチップレーザーを利用した光ファイバーLIBS 計測系を従来の光ファイバーLIBS と比較した概念図を図 9 に示す。

これまでに、約 1MGy のガンマ線を照射したマイクロチップレーザーの構成部品によりレーザー発振特性を取得しており、発振特性に大きな影響が及んでいないことが確認されている。また、強い放射線環境下でのレーザー発振試験も実施しており、放射線の無い環境とほぼ同様にレーザー発振が可能であることも確認されている。今後、プラズマ発光集光系も備えることで、一体型の LIBS 装置としての性能試験や、放射線環境下での二倍高調波発振特性なども取得し、遠隔その場分析プローブとして適用性を検証していく予定である。



図 8 マイクロチップレーザー

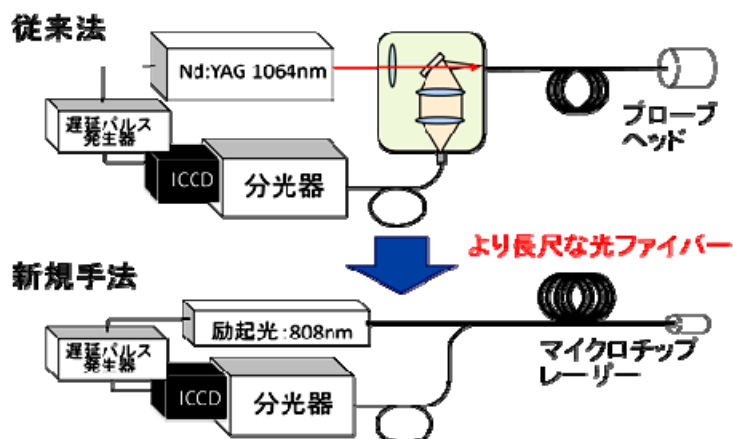


図 9 マイクロチップレーザーLIBS の概要

3. おわりに

燃料溶融により炉心が損傷した複数の事故炉の完全廃炉は、世界的にも類例がない。廃炉計画、廃炉手法の検討、廃炉の作業及び作業後の確認など、分析技術は共通基盤技術として必要不可欠なものである。特に、強い放射線環境で、遠隔分析を可能とするには、光を媒体とした非接触型の分析手法、特にレーザーを活用したアクティブな分光分析技術は、その適用の可能性が高い技術といえる。

ここに紹介した手法は、まず、組成や組成分布のサーベランスとして有用な方法の一つであるが、今後、精密な同位体分析も重要となる。これについては、LIBS の高分解能だけでなく、ホットセル内において、アブレーション共鳴吸収分光法などを活用した迅速精密分析法の導入を考えていく必要もある。

今後も、レーザーを活用した分光分析手法を廃炉現場で活用できるよう、基礎基盤研究を継続すると同時に、廃炉現場のニーズを把握した実用化技術開発が重要となると考えられる。

本報告には、文部科学省の原子力システム研究開発事業による委託業務「低除染 TRU 燃料の非破壊・遠隔分析技術開発」及び「次世代燃料の遠隔分析技術開発と MOX 燃料による実証的研究」並びに英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業による委託業務「先進的光計測技術を駆使した炉内デブリ組成遠隔その場分析法の高度化研究」の成果が含まれます。

[3J_PL] Periodical Report from Study Committee on Decommissioning of The Fukushima Daiichi NPP

Chair: Naoto Sekimura (Univ. of Tokyo)

Wed. Mar 28, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room J (U3-211 -U3 Building)

[3J_PL01] General condition and subject of decommissioning for the Fukushima Daiichi NPP

*Noriko Asanuma¹ (1. Tokai Univ.)

[3J_PL02] Investigation and evaluation of unresolved issues on Fukushima Daiichi accident

*Akio Yamamoto¹ (1. Nagoya Univ.)

[3J_PL03] Current status and remaining issues for seismic safety of Fukushima Daiichi NPP

*Tatsuya Itoi¹ (1. Univ. of Tokyo)

[3J_PL04] The report from a robot subcommittee

*Takashi Yoshimi¹ (1. Shibaura Tech)

[3J_PL05] Study for decommissioning and waste management scenario

*Daisuke Kawasaki¹ (1. Univ. of Fukui)

[3J_PL06] Whole discussion and exchange of opinions

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション

「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」現状及び活動報告

Periodical Report from Study Committee on Decommissioning of The Fukushima Daiichi NPP

(1) 福島の高炉の概況と課題

(1) General condition and subject of decommissioning for the Fukushima Daiichi NPP

*浅沼 徳子¹, 宮野 廣²¹ 東海大学, ² 法政大学

1. はじめに

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会（委員長：宮野 廣 法政大学大学院客員教授）（以降、廃炉委）では、2014 年の発足以来、学会員の関心を高め廃炉の技術課題の解決のための活動や研究に積極的に貢献いただくこと、社会に発信し廃炉の様々な作業に理解をいただくための支援を行うこと、それに廃炉委の学としての直接的な貢献を行うことなど様々な活動を行っている。毎年、春にはシンポジウムを開催し、学会として取り組む福島第一の廃炉の課題を紹介し、意見交換を行っている。学会の秋の大会では、広く活動を紹介するとともに資源エネルギー庁、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）とともに抱える技術課題についての意見交換の活動を行ってきた。春の年会では、廃炉委の 1 年の活動を振り返り成果の共有と、今後取り組まなければならない技術課題の共有を図る。

2. 廃炉委の活動成果の概要

2-1. 廃炉作業の概要－国の方針

福島第一原子力発電所の廃炉は、政府・東京電力の「中長期ロードマップ」に基づき進められている。継続的な見直しが行われる中、2017 年 9 月に「中長期ロードマップ」第 4 回改定版が国の廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議においてまとめられ、また 8 月には実施のための「廃炉のための技術戦略プラン 2017」が NDF においてまとめられた。

基本原則は、「放射性物質によるリスクから、人と環境を守るための継続的なリスク低減活動」と位置付けて適切な対策を行うことであり、次の 4 原則が上げられている。①周辺環境と作業員に対する安全確保を優先、②透明性を確保し情報発信とコミュニケーション、③現場の進捗と研究開発を踏まえ中長期ロードマップの見直し、④ロードマップに示す目標達成に向け、積極的に安全かつ確実に廃炉の中長期取り組みを進める。

また、以下のマイルストーンを定めている。1) 汚染水対策は 2020 年までに予定の計画を完了する。2) 2023 年度を目処に 1-3 号機の使用済燃料の取り出しを開始する。3) 2021 年内に燃料デブリの取り出しを開始し、廃棄物対策の見通しを得る。燃料デブリの取り出し開始後、準備段階を終えて第 3 期の「解体」の工程に入る。

2-2. 廃炉委の活動成果の概要

福島第一原子力発電所の廃炉の成功に向けて、様々な技術が求められている。

(1) リスク評価分科会

様々なリスクにどのように対応すれば、全体のリスク評価が可能かという視点に立ち、使用済燃料プールの使用済燃料の取り出しに関して、リスク評価の手法を検討した。検討の概要と開発した手法に関しては 2017 年度の報告としてまとめ公表する。

(2) 事故課題フォロー分科会

福島第一原子力発電所の事故では様々な課題が抽出され、得られた教訓に対応するものとして各組織が行うべき対応については既に報告書としてまとめ公表している。更に技術課題として、事故の進展に伴う未解明事項について、検討を加え報告書としてまとめ、公表した（廃炉委ホームページ参照）。

（３）その他の活動

水素爆発等の大きな負荷を受けた、原子炉建屋構造について、将来の経年劣化も含めた評価を学会として実施し、廃炉期間での構造健全性の確保の見通しを得た。報告書として取りまとめ中であり、近日公開する。

廃炉を進める工法では、遠隔自動化が重要なポイントとなっている。高放射線下、可視化困難な環境での高信頼性が求められる自動化技術、ロボットの開発は、廃炉事業の成功を差配する重要な課題である。広く、ロボット技術を有する技術者を結集してあたることが求められる。ロボット学会と共同でPCV内調査、デブリ取出しのロボットコンペを開催し、他分野のロボット技術者から優秀な応募をいただいた。今後も同様の活動を通じて、技術の底上げを図りたい。

廃炉委では、特に廃炉作業後の最終状態を描いた上で廃炉作業に取り掛かるべきである、と提言してきた。廃棄物の量と処分を描いた上で、「解体」作業に取り掛からなければ、放射性廃棄物を削減し管理を容易にすると言う目的が効果的に達成できないと考えるものである。今回は途中の要点のみの報告ではあるが、この課題は継続的に多くの学会員と共に考えて行きたい課題である。

（４）今後の取り組み

様々な技術開発は、既に事業者、設備製造者、保全業者などで取り組まれている。高放射線下での作業を支援する技術開発は、高いハードルであり、学会学術界の支援は必須である。

また、学会でしかできない課題もある。新たに、事故炉の廃炉における安全目標はどこに置くべきか、という課題と、廃炉の各作業工程におけるリスクはどう変化するのか、作業の違い、工法の違いとの関係について、重要なポイントを捉えてリスク評価を行う取り組みにもチャレンジしたい。更に引き続き、廃棄物の処分をどのように捉えるべきか、についてはエンドステートの議論と合わせて検討を進めたい。

3. おわりに

学会の活動は、ボランティアな活動であるが重要な活動と理解する。学会員の積極的な参加をお願いしたい。成果は全て共有するものであり、学会廃炉委のホームページで入手できるようにしている。

*Noriko Asanuma¹ and Hiroshi Miyano²

¹Tokai University, ²Hosei University

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション

「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」現状及び活動報告

Periodical Report from Study Committee on Decommissioning of The Fukushima Daiichi NPP

(2)福島第一原子力発電所事故における未解明事項の調査と評価

(2) Investigation and evaluation of unresolved issues on Fukushima Daiichi accident

*山本 章夫¹¹名古屋大学

1. はじめに

日本原子力学会は、2011年(平成23年)3月11日の東日本大震災に伴い発生した福島第一原子力発電所事故に対して「東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会」を設置し、原子力分野の専門家による審議を重ね、その審議結果を2014年3月に「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」(以下、「学会事故調報告書」という。)として出版した[1]。学会事故調報告書の第6章付録においては、「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」が取りまとめられている。

2017年9月で福島第一原子力発電所事故が発生してから約7年が経過し、学会事故調報告書で取りまとめられた「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」に関して多くの知見が得られてきた。そこで福島第一原子力発電所廃炉検討委員会傘下の事故・課題提言フォロー分科会に「事故進展に関する未解明事項フォローWG」を発足し、2014年3月に出版された学会事故調報告書の「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」に加えて、事故進展に関しさらに検討すべき事項を改めて公開文献により幅広く調査した上で、これらの検討すべき事項(以下、「未解明事項」と言う。)に関して、これまでに得られた新たな知見及びこれらに基づく検討状況を報告書として取りまとめた[2]。これにより、現時点における未解明事項の検討状況及び残された未解明事項を明らかにすることを目的としている。

なお、事故進展に関する未解明事項の解明には、長い時間を要するものも含まれていることから、未解明事項の調査・評価の進展に応じて、その結果を取りまとめていくことが望まれる。

2. 調査対象とした報告書類

事故進展に関する新たな知見の抽出及び未解明事項の検討状況の参考としては、公開のものを対象に、52編の国内の報告書類(学会事故調報告書第6章付録に記載している14編の参考文献を含む)及び17編の国外の報告書を対象として調査を実施した。

3. 調査及び評価結果の概要

文献調査の結果、抽出された73項目の課題について、これまでに得られた知見と評価結果を整理表(以下、報告書整理表という)の形に取りまとめた[2]。各課題の現状は、以下のように分類されている。

A: 合理的な説明がなされていると判断されるもの

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

*Akio Yamamoto¹¹Nagoya Univ.

73 項目の課題に対する評価結果の割合は、以下のようにまとめられる。

A : 45%

B : 8%

C : 4%

D : 43%

(複数の評価結果を含む項目については、それぞれの評価結果に対して等分の割合とした。)

現在までに得られた知見や検討・考察により、A の「合理的な説明がなされている」と判断される課題が相当数に上る。1 号機 DG の停止原因については、新たに過渡現象記録装置のデータや現地調査などにより、津波によるものと考えることが最も合理的であることが明らかになっている(報告書整理表番号 1)。また、地震動が安全上重要な機能に深刻な影響を与えておらず、冷却材圧力バウンダリに深刻な影響を及ぼしていないことが明らかになっている(報告書整理表番号 4)。事故時の放射性物質の放出に関しては、モニタリングポストなどで観測された放射線量のピークと、そのピークを発生させた原因の関係が概ね説明されている(報告書整理表番号 22)。1 号機については、原子炉建屋内の水素爆発シミュレーションが実施され、原子炉建屋の現状と整合的な結果が得られており、水素爆発時の様相についての理解が深まっている(報告書整理表番号 23)。事故当時、原子炉水位計が適切な表示を示していなかったが、この誤表示のメカニズムが明らかになっている(報告書整理表番号 27)。事故時、直流電源が失われた状態で 2 号機の RCIC が長時間駆動したメカニズムについては、主蒸気管から流出した気液二相流により、RCIC の蒸気タービンが長時間駆動されたためと推定されている(整理表番号 47)。事故進展解析の再現解析において、実測データの時間変化を再現できなかったいくつかの点について、そのメカニズムが推定され、解析による再現度が向上し、事故進展に関する理解が深まっている(報告書整理表番号 49, 50, 62, 65, 66 など)。

一方、D の継続して検討が必要な課題は、現時点においても、かなりの数に上る。特に、圧力容器内/格納容器内の詳細な事故進展に関しては、部分的な格納容器内の調査が実施されているものの、得られている情報は限定的であり、その全貌は明らかとなっていない(報告書整理表番号 7, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 38, 51, 66 など)。また、2 号機の格納容器ベントの成否にかかわるラプチャーディスクの状態や、1 号機の IC の格納容器内側隔離弁の状態なども、機器設計や測定データ等からその作動状況については推定がなされているものの、現地調査が行われておらず、確定的な情報は得られていない(報告書整理表番号 33, 60 など)。現場から得られる機器の作動状況に関する情報は、シビアアクシデントの進展の観点から重要な情報であると考えられ、廃炉作業の進展に併せて、継続した調査が望まれる。

4. おわりに

現在までの検討により、事故進展の概要に関する主要な未解明事項は、おおむね明らかになりつつあるものと考えられる。一方、圧力容器内/格納容器内の溶融燃料の挙動など、事故進展の詳細に関する未解明事項については、まだ今後の検討を要するものが多い。今後、廃炉作業を進めることにより、格納容器内及び圧力容器内の状態が徐々に明らかになり、その過程で解明されていくものと期待される。

圧力容器/格納容器内の情報は、事故進展の理解という観点から極めて重要であると考えられる。報告書整理表において、今後の廃炉作業時に確認が必要な項目については、評価結果の欄に「廃炉確認」とのキーワードを記載しており、廃炉作業の計画立案及び実施にあたって、留意すべき点であると考えている。ただし、評価結果が A で合理的な説明がなされていると評価されていても、廃炉時に確認することでさらにその説明が補強されと考えられる場合には、「廃炉確認」の記述を加えている。「廃炉確認」が必要とされている項目は、73 課題中 39 課題となっており、廃炉作業時に広範な知見が得られることが期待され、これらの知見を未解明事項の検討に活用することが重要となる。

参考文献

- [1]日本原子力学会 東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会、「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」2014 年 3 月.
- [2]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.

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション

「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」現状及び活動報告

Periodical Report from Study Committee on Decommissioning of The Fukushima Daiichi NPP

(3) 建屋の耐震安全性評価の現状と課題

(3) Current status and remaining issues for seismic safety of Fukushima Daiichi NPP

*糸井 達哉¹¹ 東京大学

1. はじめに

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会傘下の建屋の構造性能検討分科会（主査：瀧口克己東京工業大学名誉教授）では、2～3年ごとに中間報告書を作成し、活動内容を委員会、学会、社会に見ていただき意見を聞くのが適切であると考え、2017年度版の報告書のとりまとめを行っている。本稿では報告書のうち、検討の背景と今後の課題を中心に報告する。

2. 検討の背景と検討内容

2-1. 福島第一原子力発電所の廃炉の現状とリスク

福島第一原子力発電所の廃止措置は、政府・東京電力の「中長期ロードマップ」に基づき進められている。2011年5月に「東京電力福島第一原子力発電所事故の収束・検証に関する当面の取組のロードマップ」として、2011年12月21日に「中長期ロードマップ」としてとりまとめられて以来、計4回の改訂がなされている。

廃止措置では、リスクの特徴に応じ、最適なタイミングと方法の選択・実施、作業の柔軟な見直しを行い、全体としてのリスクの最小化を図った上で、可能な限り速やかな廃炉を実現していくことが必要であると考えられる。ロードマップに基づき策定された技術戦略プランでは、相対的にリスクが高く、かつ優先順位が高く、可及的速やかに対処すべきものとして、プール内燃料と建屋内滞留水に関するリスクが挙げられている。建屋内滞留水、プール内燃料とも建屋の耐震性が関係する項目である。それ以外にも、燃料デブリ、濃縮廃液等、廃スラッジ、HIC スラリー（高性能容器内に沈殿する泥しょう）、屋外のガレキ等、建屋内汚染構造物などが、主要なリスク源として挙げられている。

2-2. 廃炉の各段階における要求性能の整理

上述のように、リスクの要因として、大規模地震時に荷重が集中する部位（原子炉压力容器本体基礎、S/C等）が破損するリスク、原子炉压力容器(RPV)及び原子炉格納容器(PCV)における冠水工法等の成立性についても挙げられている。また、建屋に求められる性能としても、建屋内汚染水の閉じ込め機能が要求されている。廃止措置のロードマップを踏まえ、福島第一原子力発電所の廃炉工程の各区分に対して、閉じ込めが必要な放射性物質、プラントの基本的な安全機能、プラントに対する要求性能、留意事項等をまとめたものを表1に示す。

2-3. 中間報告書の検討範囲の設定と検討結果

(1) 検討対象とする期間

中間報告書では、廃炉までの期間のうち、まずは、使用済み燃料プール内燃料取出し架構設置前までの期間（第一期前半）を対象とした検討を実施することとした。

(2) 検討対象施設

検討対象建屋は、1～3号機の原子炉建屋とした。1～3号機の原子炉建屋のうち、水素爆発等の影響による損傷が大きいことおよび1～3号機原子炉建屋の構造が同等であることを考慮し、3号機原子炉建屋を代表として報告書の検討対象施設として選定した。

表 1 廃炉の各段階において必要と考えられる要求性能

工程	事故前	事故収束前	第一期		第二期	第三期
			前半	後半		
		冷温停止の達成まで	使用済み燃料プール内燃料取出し架構設置前まで	使用済み燃料プール内燃料取出し架構設置からプール燃料取出開始まで	使用済み燃料プール内燃料取出開始から燃料デブリ取出し開始まで	燃料デブリ取出し開始から解体、廃止措置終了まで
閉じ込めが必要な放射性物質 ^{注1}	炉内の燃料汚染水 使用済み燃料	燃料デブリ汚染水（建屋内滞留水） 使用済み燃料				燃料デブリ汚染水（建屋内滞留水）
プラントに求められる基本的な安全機能 ^{注2}	止める 冷やす 閉じ込める	冷やす	冷やす ^{注3} 閉じ込める			
建屋に対する要求機能	遮へい性 気密性 水密性 構造安全性	構造安全性	放射性物質を含む物質の閉じ込め 構造安全性			
留意事項		建屋の損傷 屋根崩落等の影響 事故時の熱履歴		加えて 上部カバー重量、反力の影響	加えて デブリ取出に伴う設備等の影響 高経年化対策	加えて 解体進展に応じた状態変化 高経年化対策

注1：瓦礫等については別途対処することとし、閉じ込めが必要な放射性物質として表に含めることはしていない。

注2：プラントに求められる基本的な安全機能は、閉じ込めが必要な放射性物質に関するリスクの大きさに応じて異なる。

注3：燃料デブリ取り出し開始まで

（3）検討対象事象

中間報告書では、表1の福島第一原子力発電所の廃炉工程の各段階のうち、使用済み燃料プール内燃料取出し架構設置前までの期間（第一期前半）を対象に、3号機原子炉建屋の耐震性評価において検討の対象とする検討対象事象について絞り込みをおこなうこととした。上述の通り、相対的にリスクが高くかつ優先順位が高く、可及的速やかに対処すべきものとして、汚染水およびプール内燃料をリスク要因として挙げた。また、直ちにリスクとして発現するとは考えにくい、安全・確実・慎重に対処すべきものとして燃料デブリをその要因として挙げた。

これらに対応する原子炉建屋の耐震性評価の対象とする検討対象事象としては、使用済燃料プール損傷による使用済燃料の冷却中断、生体遮へい壁損傷による燃料デブリの遮へい・閉じ込め性能の喪失及び地下外壁損傷による地下滞留水の漏えいの3項目があげられた。

以上を踏まえ、本検討では、原子炉建屋の耐震性評価の検討対象事象として、使用済燃料の冷却中断、燃料デブリの閉じ込め、地下滞留水の漏えいの3項目に着目した検討を実施することとし、これらの検討対象事象に対して、考慮する地震動、地震応答解析手法、解析結果の評価等の妥当性について、東京電力の公表資料、技術指針及び規定、既往の知見から総合的に評価した。

（4）評価結果

中間報告書では、検討対象とする3号機原子炉建屋について、使用済燃料プール損傷による使用済燃料の冷却中断、生体遮へい壁損傷による燃料デブリの遮へい・閉じ込め性能の喪失及び地下外壁損傷による地下滞留水の漏えいの3点を取り上げた。その上で、検討対象期間において、検討対象事象（使用済燃料プール損傷による使用済燃料の冷却中断、生体遮へい壁損傷による燃料デブリの遮へい・閉じ込め性能の喪失及び地下外壁損傷による地下滞留水の漏えい）に係わる原子炉建屋の耐震安全性の評価結果について、

これまでの検討結果を公開資料に基づき、耐震安全性を判断する上の終局限界状態の目安値の議論等を行った上で、その妥当性を議論した。

3. 今後の課題

中間報告書では、福島第一原子力発電所3号機を対象に、燃料プールからの燃料取り出し開始までの原子炉建屋の耐震性に関する検討を実施した。1号機や2号機については、今回の中間報告書の対象としておらず、同様の検討が必要である。

また、3号機については、本報告書作成時において、使用済燃料プール内の燃料取り出し用カバー等の設置工事が進められており、2018年度中頃に燃料取り出しが開始される予定である。本報告書では、使用済燃料プールからの燃料取り出し中およびそれ以降の建屋を含めた鉄筋コンクリート構造物の構造安全性に関する検討は実施しておらず、今後の検討が必要である。

特に、燃料デブリ取り出しの段階以降においては、以下の3つの課題などが挙げられる。

- ・ 熔融燃料により高温となった原子炉圧力容器本体基礎（RPV ペデスタル）の耐震性
- ・ 生体遮へい壁の耐震性能（選択される取り出し工法による追加開口等の影響）
- ・ 海水注入による塩分あるいは飛来塩分の影響を受けた鉄筋コンクリートの経年変化が耐震性へ与える影響

これらの項目について、廃炉完了までの期間が非常に長いことを前提として、その耐震性能が検討される必要がある。同様な条件下における鉄筋コンクリート構造物の性能に関する知見は限られていることから、どのような形で耐震性能が確保されていることを説明することができるのかが課題である。必要に応じて、事故以降の環境を模擬した長期間にわたる実験の実施などが検討されるべきであると考えられる。

なお、運転中の原子力発電所については、決定論的に評価する地震動を超える揺れに対しても、耐震裕度を確保したり、アクシデントマネジメント策を用意したりすることにより、残存するリスクを可能な限り小さくことが要求される。将来的には、そのような観点からの検討が必要になると考えられる。

*Tatsuya Itoi¹

¹The University of Tokyo

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション

「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」現状及び活動報告

Periodical Report from Study Committee on Decommissioning of The Fukushima Daiichi NPP

(4) ロボット分科会からの報告

(4) The report from subcommittee on robotics

吉見 卓¹¹ ロボット分科会主査，芝浦工業大学

1. はじめに

福島第一原子力発電所の廃炉作業において、ロボット技術の貢献が期待されている。廃炉作業へのロボット適用には、ロボットと原子炉、両方に関する高度な知識、経験、技術力が求められ、ロボット技術の専門家集団である日本ロボット学会と、原子力技術の専門家集団である日本原子力学会の緊密な連携の下、2015年1月に、日本ロボット学会「廃炉に向けたロボットの調査研究と社会貢献に関する研究会」および日本原子力学会「廃炉検討委員会ロボット分科会」が設立された。これら二つの組織は、両学会の共同設置によるものであり、福島第一原子力発電所の廃炉にかかわる遠隔操作ロボットに関し、ロボット技術からの俯瞰的支援と社会に受け入れられるロボット技術貢献の在り方の検討・提言を行う、廃炉作業の重大課題となっている燃料デブリ取り出しのための格納容器下部に侵入できるロボット技術の開発へのチャレンジを目的とする、といった異なる名称・目的を掲げているものの、両学会のいずれかに所属する共通の委員（2017年12月現在で、産5名、学19名、国研等8名、計32名の委員、1名のオブザーバー）で構成されており、原子力ロボットの研究開発に関わる両分野の技術者、研究者の連携により、その目的達成に向けた活発な活動が進められている。ロボットの開発は、基本的には IRID（技術研究組合国際廃炉研究開発機構）を中心とする事業者とメーカーが行うため、学術界は、新しいアイデア、広い視野からの技術提供、人材の広がり担当を担うことが求められているとの考えから、本研究会/委員会では、特にこの部分にフォーカスをして、それを中心に据えた活動を行っている。

2. これまでの活動報告

2015年1月の発足以来、これまでに16回の委員会・幹事会・WG会合、4回のオープンフォーラム、シンポジウム、を開催してきた。初年度の2015年度は、日本ロボット学会主催のシンポジウム「廃炉に向けた日本原子力学会との連携と課題」（2015年9月，RSJ2015 オープンフォーラム）を開催し、双方の学会員からの情報提供の発表、パネル討論を行った。また、ロボット分科会の中に組織したWGが、「ロボットへのニーズ、環境条件、作業条件等」をまとめ、「ロボット分科会への提言」として、廃炉に利用できる技術やアイデアを広く募集するコンペの企画実施を提言した。これを受けて、2016年度は、「ロボット技術提案公募 廃炉のためのロボット技術コンペーあなたの技術・アイデアに基づく新しい廃炉のためのロボット技術提案-」を日本ロボット学会と日本原子力学会の共同企画で実施し、その成功に向けた、アイデア募集の詳細説明、応募者への情報提供等を目的としたシンポジウム（2016年9月）を開催した。この技術コンペでは、原子炉圧力容器下部のテスト環境とデブリサンプリングおよび回収の模擬作業を設定し、全行程あるいは、そのうちの部分的な個別要素技術のアイデア提案を求めた。2016年9月に提案公募を開始し、2017年1月末で提案公募を締切ったところ、応募総数16件（大学教員等から7件、中小企業等から3件、学生から6件）となり、原子力学会、ロボット学会の研究会、委員会の委員にて構成した審査委員会にて提案

応募内容を審査した。その結果、6 件の優秀アイデア（最優秀賞：1 件、優秀賞：2 件、奨励賞：3 件）が選出され、2017 年 3 月 11 日開催の日本原子力学会福島第一原発廃炉についてのシンポジウムにて表彰および受賞講演を行った。今回の受賞者は下記のとおり。

最優秀賞：「ミミズ・アメンボ等の生物規範ロボットの協力作業による廃炉システム」

山田泰之、中村太郎（中央大学）

優秀賞①：「デブリサンプリングのための複数ロボットシステム」

内村裕、小林泰生、小宮幸大、法月広夢（芝浦工業大学）

優秀賞②：「Twin-tube 構造による柔軟レール仮設式流体駆動ロボット」

塚越秀行（東京工業大学）

奨励賞①：「ワイヤーロープ吊り下げ式デブリサンプル採取装置」

沖野晃久、武田和久（オキノ工業株式会社）

奨励賞②：「エンドエクスプローラ」

下山未来、松日楽信人（芝浦工業大学大学院）

奨励賞③：「ヘビ型ロボットによる狭隘空間、水中の移動および弾丸燃料デブリ粉碎吸引回収」

植田聖、澤野風佐（芝浦工業大学大学院）

さらに、2017 年度は、廃炉作業への具体的な貢献体制・内容を考える年と位置付け、「廃炉のためのロボット技術コンペ」の結果を NDF（原子力損害賠償・廃炉等支援機構）、資源エネルギー庁に説明し、廃炉作業への具体的な貢献についての活動の可能性を探り、今後の協力についての理解を得た。2017 年 9 月に開催した日本ロボット学会主催のシンポジウム「廃炉に向けた日本原子力学会との連携と課題 3」（2017 年 9 月，RSJ2017 オープンフォーラム）では、これを、日本ロボット学会会員への情報発信の場と捉え、廃炉技術に関するロボット分野、学会への期待について、IRID 新井副理事長と廃炉検討委員会宮野委員長にお話をいただいたが、このような機会を利用した情報発信は重要ということで、次年度以後も継続して実施することになった。また、第 2 回コンペの実施に向けた、学会会員への課題共有のためのワークショップ開催の検討を実施した。

3. おわりに

福島第一原子力発電所の廃炉作業、特に遠隔操作ロボットの整備、技術開発活動は、両学会の技術者・研究者はもとより、さまざまな人々の英知を集結して解決していく必要がある難しい作業である。ロボット技術提案公募で集まったアイデア提案が、今後の具体的な工法検討の際に参考となることを目指し、本研究会/委員会は、その実現に向けた活動を進めていくとともに、第 2 回コンペの実施も含め、その役割をしっかりと考え、担っていきたい。

Takashi Yoshimi¹

¹Shibaura Institute of Technology

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション

「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」現状及び活動報告

Periodical Report from Study Committee on Decommissioning of The Fukushima Daiichi NPP

(5) 廃炉と廃棄物管理シナリオに関する検討

(5) Study on Scenarios for Decommissioning and Radioactive Waste Management

*川崎大介¹¹ 福井大学

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(1F)の廃炉やサイト修復で発生する放射性廃棄物の管理(処理, 貯蔵, 処分)を合理化するためには, これまでの作業で発生した放射性廃棄物の量と特性を分析するとともに, 今後の活動で発生する放射性廃棄物の量と特性を予測することが必要である。その際, 事故対応からサイト修復までの一連の取組を総合して検討し, 発生する放射性廃棄物を時系列に沿って整理することが有用である。特に, 1Fサイトの最終状態(エンドステート)が, 廃炉や廃棄物管理のシナリオ選択に大きく影響すると考えられる。本報告ではこれまでの検討と今後の計画について紹介する。

2. 検討方法

廃棄物管理シナリオの検討にあたっては, まず事故炉(1~4号機)の廃止措置完了時の状態(中間ステート)の選択肢を, 施設の解体撤去状況によって整理し, また, 1Fサイトのエンドステートの選択肢をサイト修復後のサイト利用形態によって整理した。次に, 各々のエンドステートに至るまでの一連の作業内容を想定し, そこから発生する放射性廃棄物の発生量及び特性を予想した。尚, 1Fサイトには幾つかの施設が存在し, 土地利用の形態も異なるため, サイト内の作業および廃棄物が発生する領域を区分した上で, エンドステートに至るまでの作業内容を考慮した。

3. 中間ステート及びエンドステート

表1に想定した中間ステート及びエンドステートの選択肢を示す。エンドステートにおいて無拘束解放するためには, サイト全体の放射能汚染を全て取り除き,

表1 想定した中間ステート及びエンドステートの選択肢

事故炉の中間ステートの選択肢(廃止措置完了時)	エンドステートの選択肢(サイト修復後)
- 全施設を撤去した状態 - 一部施設のみ撤去した状態(原位置埋設)	- 無拘束解放 - 制限付き再利用 - 原子力施設としての再利用 - 利用しない(スチュワードシップ)

原子力以外の目的の土地利用も可能なように放射能レベルを低減($300\mu\text{Sv/y}$ 以下)する必要がある。原子力施設として利用する場合は, 一部放射能レベルの高い領域を残すことも可能である。一部の領域を再利用しない場合は, 能動的なサイト修復作業を行わずに, そのまま保守・監視(スチュワードシップ)を継続するという選択も考えられる。

発生する放射性廃棄物の量の予測は今後の課題であるが, 全容量は約560万 m^3 と見積もられており[1]、これは六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターの容量(約60万 m^3)の9倍以上になる。但し、放射能レベルが極めて低い廃棄物(L3廃棄物)が全体の70%近くを占めている。また、サイト修復作業において約250万 m^3 の廃棄物が発生すると見積もられており、この廃棄物を発生させないためにサイト修復作業を行わずに保守・監視(スチュワードシップ)を継続するという選択肢もあり得る。

参考文献

[1] H. Kawamura et al., TopSafe 2017, 12-16 February 2017, Vienna, Austria

*Daisuke Kawasaki¹¹University of Fukui

(Wed. Mar 28, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room J)

[3J_PL06] Whole discussion and exchange of opinions

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会（平成26年度設置）では、長期にわたり継続される事故炉の廃炉が安全かつ円滑に進むよう、活動している。特に、関心の高い個別検討課題に取り組むため、分科会を設けて検討を進めている。

本セッションでは、廃炉検討委員会の4分科会（事故提言・課題フォロー分科会、建屋の構造性能検討分科会、ロボット分科会、廃棄物検討分科会）での活動成果を紹介し、原子力学会の会員との全体討議・意見交換を行う。本結果を今後の活動に生かしていきたいと考えている。

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

[3K_PL] Collaborative activities of industry for continuously improve towards Nuclear Safety

Chair: Takanori Kitada (Osaka Univ.)

Wed. Mar 28, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room K (U3-311 -U3 Building)

[3K_PL01] The status of correspondence to the new regulation standard addition items

*Katsunori Myoujin¹ (1. KEPCO)

[3K_PL02] About correspondence towards the new examination system

*Takeyuki Inagaki¹ (1. TEPCO HD)

[3K_PL03] Issues and challenges for overseas development of nuclear power

*Masato Yoshimura¹ (1. Hitachi GE)

原子力発電部会セッション

継続的な原子力の安全性向上に向けた産業界の連携した取り組み
Collaborative activities of industry for continuously improve towards Nuclear Safety

(1) 新規制基準追加事項への対応状況について

(1) Status of response to additional items of the new regulatory requirements

*明神 功記¹¹関西電力株式会社 原子力事業本部

1. 新規制基準に対する追加事項への対応

現在、東日本大震災の知見等を反映し、改正された原子炉等規制法に基づく規制基準（以下、新規制基準という）に対する適合性審査が行われているところである。また、新規制基準施行後も、海外知見や審査経験、研究成果、各種運転経験など、プラントの安全性向上に資する知見が得られている。

そのため、新規制基準に対して要求事項の追加が検討され、新規制基準への適合性審査への反映とともに、新規制基準への適合済みの原子力発電所についても、その知見の遡及的な適用、いわゆるバックフィットを行う案件が増加している。

事業者としては、規制等の動向によらず自主的な知見収集を行い、安全性向上対策を行うことと、これら新規制基準への追加事項へのバックフィット対応の両輪で、原子力発電所の安全性向上が図られると考えているが、我が国においてはバックフィット運用の経験はまだ浅く、その運用によっては、プラントの運転状況に影響を与えうる可能性は否定できない。

そこで、本稿では、これまでの事業者の対応経験から、今後、事業者が注視すべき点を整理し、今後の対応の一助とすることを目的とする。

2. バックフィットにかかる経過措置期間の整理

新知見等を踏まえたバックフィットは、原子力発電所の安全性を継続的に向上させるためのものであり、グレーデッドアプローチにより、安全上の重要性を考慮したうえで、事業者が対応するために必要な期間、審査に要する期間等を踏まえて経過措置期間が設定されるべきものと考ええる。

バックフィットにおける経過措置期間については、その基本的考え方が原子力規制委員会において議論されている^{*1}。そこで、原子力規制委員会での議論も踏まえて、第1表のとおり、安全性への影響を踏まえた段階的な経過措置期間（案）を整理する。

※1：平成27年11月13日第40回原子力規制委員会にて議論されている。

第1表 バックフィットにかかる経過措置期間（案）

	原子力安全への影響	経過措置期間
ケース1	原子力安全へ重大な影響があり、技術基準への適合性を改めて確認する必要がある場合。	即時適用が前提。 運転中プラントは、停止の上、適合性確認する。
ケース2	原子力安全への影響が否定できないが、緊急性は認められず、技術基準への適合性を改めて確認する必要がある場合	適合性確認に、短期の経過措置期間を設ける。 (数ヶ月)
ケース3	① 原子力安全への影響が小さい ^{*2} ことが明確だが、安全性を向上させるため、継続的改善を行う必要がある場合。	適合性確認に、長期の経過措置期間を設ける。 (数年)
	② 原子炉安全への影響が小さい ^{*2} ことは見通しが立っているが、具体的な影響確認を要するとともに、並行して行政判断の根拠を明確化する必要がある場合。	明確な期限は設けないが、遅滞なく対応する。

※2：「事前に影響を確認している場合」や「必要な措置は実施済みであり更なる向上を実施する場合」が挙げられる。

3. これまでのバックフィット事例の整理・考察

新規制基準に追加された主な要求事項を紹介するとともに、2.にて述べた経過措置期間の考え方に当てはめることで、第1表でどのケースに分類されるかについて考察を行った。

3-1. 有毒ガス対応

制御室、緊急時対策所等の有毒ガスに対する防護措置として、①空気呼吸具の配備、手順・体制の整備、②影響評価とその結果に基づく検知器、警報手順等の対策を要求する内容である。①については3ヵ月以内もしくは起動するまで、②については平成32年5月1日以降の運転を開始する日までの対応を要求している。①の対応により必要な措置は実施済みとなることから、②の対応についてはケース3-①に該当すると考える。

3-2. 高エネルギーアーク損傷（HEAF）

国内原子力発電所において、地震により常用電気盤（非耐震型）の遮断器にアーク放電が発生・継続した結果、火災となり、列盤全体に損傷が拡大した事例が発生したことを受けた要求である。非常用DG以外の非常用電気盤は平成31年8月1日以降の定期検査終了まで、非常用DGの非常用電気盤は平成33年8月1日以降の定期検査終了までの対応を要求している。これまで実施されてきた対策により重要安全施設への電源の供給機能は担保されており、本件は電源の信頼性の一層の向上を図るものであることから、ケース3-①に該当すると考える。

3-3. 燃料被覆管の耐震評価

燃料被覆管の閉じ込め機能の評価をより精緻化する観点から、耐震性能要求を追加するものであり、通常運転時および運転時の異常な過渡変化時に生じる荷重と、地震時の荷重を組み合わせた条件でも、燃料被覆管の閉じ込め機能が維持できることを要求する内容である。地震時の荷重を組み合わせた条件においても、許容値を満足し安全性は確保していることを確認していることから、解析や許認可手続きに要する期間を考慮して、施行後3年以内の対策を要求しているものであり、ケース3-①に該当すると考える。

3-4. 実用炉規則別表改正（SA設備の追加他）

新規制基準の工事計画認可の審査経験を踏まえて、実用炉規則別表第二を改正し、工事計画書本文及び添付書類への記載事項を充実させるものであり、工事計画書への記載事項に、安全弁・逃がし弁や重大事故対処設備、火災防護設備の一部の追加を要求している。新規制基準の工事計画認可申請の審査の中で技術的な確認は行われていることから、期限は設けられておらず、遅滞なく提出のみ行うよう要求されている。書類の適正化の位置づけであることから、ケース3-②に該当すると考える。

3-5. 地震時の動的機能維持評価

新規制基準の工事計画認可の審査経験を踏まえて、動的機器の機能維持の方法を明確化すべく、JEAG4601に具体的な評価方法が規定されていない場合、新たな検討および詳細検討として、既往の研究等を参考に異常要因分析を実施し、それに基づき抽出した評価項目が評価基準値を超えていないこと等を要求する内容である。改正前の設計手法でも機能が維持されていることを確認済であるとともに、今回の改正を踏まえても技術規準への適合結果は変わらない見通しを得ているものの、図書の再提出のみであることから施行後1年以内に認可手続きを行うことを要求しているものであり、ケース3-②に該当すると考える。

3-6. 火山の降下火災物対策

火山影響等発生時においても、原子炉停止等の操作を行えるよう、非常用動力電源設備の機能を維持するための対策、代替電源設備その他の炉心を冷却するために必要な機能を維持するための対策、交流動力電源喪失時に炉心の著しい損傷を防止するための対策に係る体制の整備を要求している。本体制については、新規制基準の審査の中で仮に全交流動力電源喪失状態に至ったとしても、炉心損傷防止対策が講じられていることを確認済みであることから、施行後約1年以内に認可手続きを行うことを要求しているものであり、ケース3-①に該当すると考える。

3-7. 内部溢水による管理区域外への漏えい防止

国内原子力発電所において、地震によって使用済燃料ピットの水面が揺動（スロッシング）し、溢水事

象が発生したことを受けて、放射性物質を含む液体を内包する配管、容器等の設備から、当該の液体があふれ出た場合においても管理区域外へ漏えいすることを防止するための措置を行うことを規制基準に明文化するものである。新規規制基準に適合しているプラントは、審査の中で、スロッシングに対しても管理区域外への漏えい防止措置が適切に実施されていることの確認を受けていることを踏まえ、施行後 1 年以内に許認可手続きを行うことを要求しているものであり、ケース 3-①に該当すると考える。

4. まとめ

バックフィットの経過措置期間については、今回整理した考え方と合致していることが確認でき、現時点では安定した運用がなされているといえる。ただし、原子力規制委員会において、バックフィットの運用に関する基本的考え方がまとめられているが、個々の案件における経過措置期間の設定には、具体的な設定基準が明確になっていないのも事実である。

したがって、経過措置期間の設定方法の体系的な整備が、今後行われることを期待するが、少なくとも、事業者側からは、一定の共通した視点で、経過措置期間設定における議論へ意見を述べることが重要である。

なお、将来的には、米国において既に導入されているようにバックフィットの検討プロセスにおいて、安全目標・確率論的リスク評価なども考慮した体系が構築されていくことも考えられるが、これについては、更なる知見の蓄積等が必要である。

*Katsunori Myojin¹

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

原子力発電部会セッション

継続的な原子力の安全性向上に向けた産業界の連携した取り組み
Collaborative activities of industry for continuously improve towards Nuclear Safety

（２）新検査制度に向けた対応について（コンフィグレーション管理の視点から）

(2) About correspondence towards the new examination system
(From viewpoint of configuration management)

*稲垣 武之¹

¹ 東京電力ホールディングス株式会社

1. コンフィグレーション管理とは

コンフィグレーション管理は、原子力発電所の各設備・機器が設計で要求したとおりに製作・設置され、運転・維持（保全）されていることを常に確認、保証する仕組みであり、事業者がプラントを運転・維持管理していくために必須の管理プログラムである。具体的には、各設備・機器について以下の３つの要素がきちんと整合していること（３要素の平衡状態）を維持し、管理していく必要がある。

- ① 設計要件（そこにある設備・機器はどのようなものでなければならないか）
- ② 設備構成情報（そこにある設備・機器がどのようなものかを示す図書、情報）
- ③ 物理構成（実際にそこにある設備・機器）

2. 米国でコンフィグレーション管理が強化された背景

米国では、事業者の設計要求事項の理解不足に起因する原子炉緊急停止系や原子炉給水系設備の故障といった原子力安全を脅かす事象が 70~90 年代に多数発生している。US NRC は、この問題の原因を事業者が SSC の設計要件・根拠を適切に把握、管理せず、コンフィグレーション管理が十分でなかったことにあると指摘し、全事業者に対して設計根拠再生プログラムを実施するとともに、設計要件を整備・管理し、コンフィグレーション管理を強化することを要求した。これを受け、全事業者が設計要件・根拠の再整備と管理を開始し、設計管理・コンフィグレーション管理の強化を図ってきている。

3. 国内の状況

日本国内の原子力発電所について言えば、コンフィグレーション管理の概念はこれまであまり浸透しておらず、重要設備の設計要求事項の体系的整理・管理も十分ではなかったが、メーカ、当社のベテラン社員の暗黙知等により致命的な問題発生が防止されてきた。これら経験者がリタイアしていく中、設計要求事項を体系的に管理していないと、今後、設備の改造や取替時等で過去の米国と同様の安全問題が発生する可能性あり、現実、問題も顕在化してきている。

4. 原子炉監視プロセスの観点からみたコンフィグレーション管理

加えて、US NRC が実施している原子炉監視プロセス（Reactor Oversight Process: ROP）を日本でも導入する方向となっており、2018 年秋に、PWR、BWR のモデルプラント（BWR は KK-6/7）を対象とした試験運用が行われる予定である。2020 年 4 月には本格運用が開始される予定となっている。コンフィグレーション管理（CM）は、リスク情報を活用してパフォーマンススペースで発電所の安全を確保し、改善していくという ROP の理念を実現する上で必須な基盤のひとつであり、事業者自身の活動として計画的に整備を進めるべきものである。

5. 今後の取組の方向性

コンフィグレーション管理を完全な形で構築していくことは膨大なマンパワーが必要な作業となり、個別の事業者がばらばらに整備することは効率的ではない。このような状況から、日本原子力安全協会（JANSI）においてコンフィグレーション管理に関するガイドラインの整備が進められており、各事業者やプラントメーカもオーナーズグループ等の場を利用して、共同検討を開始したところである。

6. 今回の発表内容

本発表では、コンフィグレーション管理の重要性、特に ROP の観点から見たコンフィグレーション管理の意義を説明するとともに、東京電力ホールディングス株式会社の取組状況及び事業者、プラントメーカーによる共同検討の状況について概説する。

*Takeyuki Inagaki¹

¹Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

原子力発電部会セッション

継続的な原子力の安全性向上に向けた産業界の連携した取り組み
Collaborative activities of industry for continuously improve towards Nuclear Safety

(3) 原子力海外展開の課題と挑戦**(3) Issues and challenges for overseas development of nuclear power**

*吉村 真人¹

¹ 日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社

1. 原子力海外展開の意義

原子力供給メーカーとして福島復興を完遂し、長期にわたって国内原子力の安全確保を担っていくことは企業使命である。その使命達成のためには原子力技術・人材・サプライチェーンの維持を図る必要がある。将来の国内原子力事業の見通しが不透明な中、技術・人材維持のためには海外展開による新設プラント受注機会を創出していかなければならない。

2. 世界の原子力建設市場の動向

2010-2030 の 20 年間に、世界の原子力建設市場には大きな変化が予想されている。中国の原子力発電設備容量はこの間に 10 倍以上に伸び、2030 年には世界一の原子力発電所保有国になると見られている。中国、ロシア、インド等が着実に原子力発電設備容量を増加していく一方で、西欧先進諸国(米・仏・日・独・英・加)ではむしろ減少にあり、また、それ以外の新規導入国における新設は実現性が不確実な状況にある。

3. 新規原子力発電所建設における主要課題

新規原子力発電所の建設がプロジェクトとして実現する為には「原子力発電所の建設」が「経済的に成立するプロジェクト」であることが必要である。先進諸国において原子力運転基数が減少する要因の一つは、原子力建設の経済的成立性が不確定になっている為に原子力発電に対する投資判断が困難になっていることによる。また、新規導入国の新設プロジェクトが抱える困難の最大の課題も資金調達にある。

4. 海外原子力発電所建設の競争環境

海外の新規原子力発電所建設において供給者に期待される役割は、「発電設備納入」から「発電事業開発」へと変化している。競合国が政府、電力会社、メーカーが一体となって取り組んでいる競争環境下で、民間企業が市場参入する為には、「Bankable」な案件であることが事業成立の鍵となる。

5. 英国での取り組み

英国は気候変動対応や安定供給、エネルギー・セキュリティ確保のため、原子力の構成比を増加させる政府方針を明確にし、原子力の事業成立性を高める市場メカニズムとして、差額清算型固定価格買取制度(CfD)を導入している。日立は 2013 年に Horizon 社を買収し、現在 Wylfa サイトへの ABWR 建設プロジェクトに取り組んでいる。

6. 更なる展開に向けて

今後、将来に亘って新規原子力発電所の建設が着実に進展する為には、プロジェクトリスクの低減が重要な鍵となる。そのためにはまず「成功事例」を実現することであり、日立 GE は現在英国 Horizon プロジェクトを成功事例とするべく取り組んでいる。成功事例を通じて経験を蓄積し、ベストプラクティスが有効に活用される仕組みを構築して「号機要因」を削減していくことが、原子力発電所建設を「経済的に成立するプロジェクト」にする為の道筋であると考えている。

*Masahito Yoshimura¹

¹Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

[3N_PL] Research activities on reprocessing using RI facilities in universities

Chair: Masanobu Nogami (Kindai Univ.)

Wed. Mar 28, 2018 1:00 PM - 2:30 PM Room N (M3-211 -M3 Building)

[3N_PL01] Introduction

*Masanobu Nogami¹ (1. Kindai Univ.)

[3N_PL02] Activity on Institute for Materials Research, Tohoku University

*Tomoo Yamamura¹ (1. Tohoku Univ.)

[3N_PL03] Activity on Hot Laboratory, Kyoto University Research Reactor Institute

*Akihiro Uehara¹ (1. Kyoto Univ.)

[3N_PL04] Activity on Rokkasho Branch, Tohoku University and Aomori Prefecture QuantumScience Center

*Seong-yung Kim¹ (1. Tohoku Univ.)

再処理・リサイクル部会セッション

大学の RI 等施設における再処理研究

Research activities on reprocessing using RI facilities in universities

(1) 趣旨説明

(1) Introduction

*野上 雅伸

近畿大学

当部会の研究アクティビティの今後の維持・発展のためには、大学の RI・核燃施設の充実が欠かせない。我が国における放射性同位元素等の取扱事業所数は、平成 29 年 3 月 31 日現在 7,988 であり、これを機関別にみると、医療機関が 1,096、研究機関が 440、教育機関が 518、民間機関が 4,407、その他の機関（地方自治体の公害センター、保健所、水道局等）が 1,060 となっている[1]。大学を含む教育機関の事業所数が 500 以上というのは、一見すると多いように見受けられるが、当部会に関係の深い事業所、特に核燃も扱える事業所に限れば、その数は激減する。そのため、特に全国の共同利用施設にかかる期待は大きい。しかし、スタッフや予算等での苦労も推察される。ここでは当部会員に関係の深い化学分野を扱う以下の大学・センターについて、研究テーマ、教員、施設の状況（実験設備、規制庁対応等）に関してご講演いただく。施設毎に強みや弱みもあるはずであり、これらの情報を部会員が共有することで、今後の研究の活性化につなげたい。また、共同利用施設全体の今後の方向性についても議論したいと考えている。

- ・東北大学金属材料研究所（仙台、大洗）
- ・京大炉ホットラボ
- ・東北大学六ヶ所分室および青森県量子科学センター

【参考文献】

[1] http://www.nsr.go.jp/activity/ri_kisei/kiseihou/kiseihou4-1.html

*Masanobu Nogami

Kindai Univ.

再処理・リサイクル部会セッション

大学の RI 等施設における再処理研究

Research activities on reprocessing using RI facilities in universities

(2) 東北大金研のアクティビティ

(2) Activity on Institute for Materials Research, Tohoku University

*山村 朝雄

東北大学

1. はじめに

東北大学金属材料研究所（「金研」と略称）には、法令上その取扱いが厳しく制限されているアルファ放射体のアクチノイド元素を扱える施設が 2 箇所あります。その一つが JAEA 大洗研究開発センター内に位置する量子エネルギー材料科学国際研究センター（「大洗センター」と略称）で、1969 年 6 月に日本学術会議の審議により全国国立大学利用組織として設置が認められたものです。もう一つは仙台に立地するアルファ放射体実験室で、古く 1958 年に核燃料物質、1960 年に放射性同位元素の使用許可を得た RI 実験室の後継です。現在の建物は 1978 年 3 月にサイクロトロン・ラジオアイソトープセンター片平サブセンターとして発足した当時に建立されたものです。組織上は大洗センターの仙台分室という位置付けではありますが、金研が全国共同利用型研究所として改組された 1987 年以降、全国の共同利用者を直接受け入れています。筆者はアルファ放射体実験室の室長であることから、後者を中心としつつ、前者についても触れます。

2. 共同利用の状況

アルファ放射体実験室は少量のウラン、トリウムについて、隣接する極低温センター、強磁場センターとの連携のもと、実験室内での手厚いテクニカルサポートを受けながら取扱える施設です。全国の大学等ではアクチノイド元素の管理や使用が難しくなったことから貴重な施設となっており、金研の研究部共同研究（共同利用）の制度で申請して来研される全国の大学等の研究者や学生が増えています。これら利用者間やアルファ放射体実験室との間の情報交換を目的としたアルファ放射体実験室利用研究会が毎年開催され、2017 年度には金研ワークショップとの共同開催で第 9 回を数えています。このような活動がベースとなり、2017 年 7 月には金研の共催で、アクチノイドの物理・化学・原子力・核医薬等に関する国際会議（Actinides2017）を東北大で開催しました。

金研の共同利用ではペアレビューが行われ、採択課題に対して一般で 30 万円弱の費用が措置され、旅費や消耗品に利用できます。課題については、2014 年度までは部門（研究室）あたり 6 課題の制約があったため、多くの先生方に相乗りをお願いしていました。現在ではその制約がなくなったことから、物理、化学、核医薬の 12 課題がアルファ放射体実験室で活発な利用を行なっています。

大洗センターのアクチノイド分野は青木教授（アクチノイド物質科学研究部門）の着任以降、課題数が伸びており、2017 年度で 35 件程度です。そのうち、核燃料、再処理等の分野が 10 件程度です。

*Tomoo Yamamura

Tohoku Univ.

再処理・リサイクル部会セッション

大学の RI 等施設における再処理研究

Research activities on reprocessing using RI facilities in universities

(3) 京大炉ホットラボのアクティビティ

(3) Activity on Hot Laboratory, Kyoto University Research Reactor Institute

*上原章寛

京都大学原子炉実験所

京都大学原子炉実験所ホットラボラトリは、多種の放射性同位元素および核燃料物質のみならず研究用原子炉（KUR）にて照射することにより生成する核分裂生成物（FP）元素を使用できる希少な全国共同利用研究所である。演者は使用済核燃料物質の処理処分に関わる様々な分析手法の研究及び開発を行ってきた。同分析手法は、貴金属元素や希土類元素の分析にも適用可能で、これらを扱う研究者が放射線業務従事者となり来所することも増えつつある。原子力化学分野のみならず新規に冶金・金属材料化学分野の利用者も加わり、両者の研究交流に繋がっている。一方、福島第一原子力発電事故の対応からも分かるように、核燃料物質を含むアクチニドおよび FP 元素の化学挙動には未だ不明な点も多く、大学等が行う基礎研究の重要性が再認識されつつある。以上の背景を踏まえ、KUR およびホットラボラトリの利用活性化と、アクチニドおよび FP 元素の化学研究の向上を目指し、アクチニドの利用に関わるプロジェクト研究が実施されてきた。演者も平成 30 年度よりプロジェクト課題：アクチニドおよび核分裂生成物元素の溶液化学的研究、を立ち上げ、全国の 11 の大学、研究所の研究課題を推進する。本課題では、大別して以下の 2 つのテーマを掲げている。いずれのテーマにおいてもアクチニドもしくは FP 元素を用いた化学実験を行う。アクチニドについては現有試料、必要に応じて他施設より輸送した試料を用いる。FP 元素については、放射性・非放射性の別は問わないが、放射性トレーサについては KUR の照射設備を用いて製造する。製造が難しい核種については他施設より輸送、もしくはアイソトープ協会より購入する。

（１）原子力バックエンド化学研究： 電解質溶液中に溶存したウラン、トリウムおよび FP 等の溶質元素について、電気化学および分光学的手法をもちいて錯生成状態を分析する。液-液、固-液、等の分配実験を行い、平衡反応および動的反応の機構を解明する。（京大、阪大、東北大、同志社大、東京都市大、電中研、原子力機構）

（２）金属資源・材料化学研究： 核分裂生成物元素である白金族元素や希土類元素について、電気化学的手法をもちいた生成法や回収法を研究する。（京大、岩手大、同志社大、東京都市大、物材研）

本課題は 3 年の計画で実施予定である。初年度に実験系を構築、2 年目に研究成果を挙げながら、2 年目から 3 年目にかけては更に上記 2 テーマ間の分析手法の共有・高度化のための協力研究体制を構築する。

実験所ホットラボラトリにて使用可能な主要な研究設備として、研究炉照射設備（Pn 等）、アルファスペクトロメータ、ガンマスペクトロメータ、グローブボックス、フード、電気化学分析装置、吸光分光装置、蛍光分光装置、ラマン分光装置、発光分析および質量分析装置、X 線回折装置、走査型電子顕微鏡等がある。

本発表では、実験所におけるホットラボラトリの紹介及び、近年実験所において実施された研究成果について述べ、今後のアクチニド研究を展望する。

*Akihiro Uehara

Kyoto Univ. Research Reactor Inst.

再処理・リサイクル部会セッション

大学の RI 等施設における再処理研究

Research activities on reprocessing using RI facilities in universities

(4) 東北大学六ヶ所分室と青森県量子科学センターのアクティビティ

(4) Activity on Rokkasho Branch, Tohoku University and Aomori Prefecture Quantum Science

*金 聖潤

東北大学

東北大学 大学院工学研究科・量子エネルギー工学専攻 (QSE)・六ヶ所村分室

六ヶ所村分室は、原子燃料サイクルで排出される高レベル放射性廃棄物の有効利用を目指し、高レベル放射性廃液に含まれる放射性同位元素の高度分離技術と、分離して得られた放射性同位元素を工学から医学までの幅広い分野に応用する高度利用技術の開発を行うため、原子燃料サイクルの拠点である青森県六ヶ所村に開所されました。六ヶ所村分室には 2 つの研究室が設置されており、大学院学生の受入れ、常駐教員による研究指導、出張・遠隔による講義を通じて量子エネルギー工学専攻の教育・研究活動を行っています。平成 17 年に量子専攻における六ヶ所村での原子力教育拠点構想が生まれ、平成 20 年から六ヶ所校を開校し、社会人学生の受入れと大学院教育を開始しました。平成 22 年には六ヶ所村から施設の貸与を受け、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターの六ヶ所村分室として研究・教育拠点を開所し、核燃料科学研究部と放射線高度利用研究部が設置されました。平成 25 年からは工学研究科量子エネルギー工学専攻内に所掌・配置換えとなり、それに伴って核燃料科学分野及び放射線高度利用分野への名称変更と社会人以外からの学生受入れも開始しました(表 1)。六ヶ所村分室には、高レベル放射性廃液の有害度低減と減容化を達成するための革新的な核種分離プロセスと、分離された有用な核種の高度利用技術の研究開発を行っている「核燃料科学分野」、分離された核種から放出される放射線を医学、工学、物理学等の広い分野で高度利用するために放射線センサーの開発を行っている「放射線高度利用分野」の 2 つの研究室が設置されています。これらの研究室は量子エネルギー工学専攻の基幹講座となっており、大学院学生の受入れ、常駐教員による研究指導、出張または遠隔による講義を通じて量子エネルギー工学専攻の教育・研究活動を行っています。それぞれの実験室には、研究を行うために必要な設備や装置が充実していますので、テーマにもよりますが分室での実験のみで卒業・修了に差し支えありません。この他、分室には講義室、学生居室、ミーティングスペース等が整備してあります。また、六ヶ所村という土地柄、豊かな自然と静かな環境に恵まれていますので、研究活動に打ち込むことができます。所属を希望される方は、大学院入試で工学研究科の機械・知能系を受験し、これらの研究室を希望してください。一般、推薦入学(他学部・他大学、高等専門学校)などのいずれの方法でも可能ですが、事前のお問い合わせ、見学を推奨します。六ヶ所村分室では、主に社会人学生向けの集中講義形式で、駐在の教員による講義、本校(仙台)から教員が出張して行う講義、分室と本校(仙台)をテレビ会議システムによって繋いで行う遠隔講義を行っています。これらによって分室で開催される講義のみで大学院の単位を取得することが可能となっています。ただし、大学、高等専門学校から博士課程前期 2 年の課程に進学された方は、1 年生の前期は単位取得のため仙台の本校に通学していただきます。

青森県量子科学センター (QSC)

青森県では、原子力関連施設の立地環境を活かして、原子力分野を含めた量子科学分野の人材育成及び研究開発の活動推進に向け、その拠点となる施設として「青森県量子科学センター (QSC)」を平成 29 年 10 月に開設しました。QSC では、人材育成活動として、学生、社会人等を対象に、原子力安全・防災、放射線管理等の専門的知見を有する人材の養成、放射線取扱主任者等の国家取得のための講習、作業管理者、中堅技術者の養成等を展開していくこととしています。

また、研究開発活動では、サイクロトロン加速器、国内初導入の 3.0T 一体型小動物用 PET/MRI システム等を活用し①高レベル放射性廃棄物からの放射性同位元素の高度分離技術の開発②放射性同位元素の医療・工学等への応用③先進放射線計測技術の開発④放射線・放射線場を用いた材料科学技術の開発の 4 つの活動目標に沿ってそれぞれ研究開発に取り込むこととしています。

これらの活動を展開することにより、原子力関連の高度な知識・技術の習得が進み原子力関連産業における雇用促進を図り、青森県の人づくり、産業づくりにつなげていきます。

1. センターの構成

- ・研修棟：人材育成のための研修室、地域産業振興のための産学連携室、利用者のための宿泊室等
- ・研究棟：物理・化学・材料試験のための実験室、分析室等

- ・RI 棟：サイクロトロン室、PET 関連研究及び放射性同位元素（RI）を使用する物理・化学・生物等の試験のための実験室等
- ・開館時間 午前9時から午後5時まで
- ・休館日 土曜日、日曜日、祝日、年末年始（12月29日～1月3日）

2. 主な研究設備

サイクロトロン加速器、BNCT 装置、NRT 装置、PIXE 分析装置、薬剤合成装置、PET/MRI 装置、PET/CT 装置等詳細は青森県量子科学センター研究機器配置表のファイル

(<https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/energy/qsc/files/kiki-ichiran.pdf>) をご覧下さい。

表 1. 六ヶ所村における量子エネルギー工学専攻の人材育成・教育・研究の歴史

平成 17 年	量子エネルギー工学専攻における六ヶ所村での原子力教育拠点構想 第 2 回 量子エネルギー工学フォーラム 六ヶ所村における教育拠点設置にむけた検討開始
平成 19 年	第 3 回 量子エネルギー工学フォーラム
平成 20 年	第一期生の入学 六ヶ所村文化交流プラザ「スワニー」での講義開始（六ヶ所校の開所式） 文部科学省 人材育成事業による補助
平成 21 年	特別経費「新原子力利用研究分野の開拓」（H21～25 年度）採択 サイクロトロン・RI センターに核燃料科学研究部、放射線高度利用研究部を設置 サイクロトロン・RI センター 六ヶ所村分室開設（六ヶ所村より施設貸与）
平成 24 年	青森県大学連携研修センター開設
平成 25 年	工学研究科量子エネルギー工学専攻分室に改組 核燃料科学分野、放射線高度利用分野 （青森県原子力人材育成・研究開発拠点計画 H25.3 月策定）
平成 28 年	青森県原子力人材育成・研究開発拠点施設 建設開始
平成 29 年	青森県量子科学センター開所



*Seong-Yun Kim

Tohoku Univ.