

Thu. Mar 17, 2022

Room A

Planning Lecture | Board and Committee | Board of Directors

[2A_PL] Contribution of "Knowledge" of the Atomic Energy Society of Japan to "Energy well-being"

Chair: Yuicih Niibori (Tohoku Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room A

[2A_PL01] How can nuclear knowledge contribute to society?

*Ekou Yagi¹ (1. Osaka Univ.)

[2A_PL02] What I think now about nuclear power generation in Japan: from an external perspective

*Tatsuhiro Kamisato¹ (1. Chiba Univ.)

[2A_PL03] Discussion

Akira Yamaguchi¹, Yoshitaka Nishino², Ekou Yagi³, Tatsuhiro Kamisato⁴, Chair: Yuichi Niibori⁵ (1. U Tokyo, 2. Tsukuba Univ., 3. Osaka Univ., 4. Chiba Univ., 5. Tohoku Univ.)

Room B

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

[2B_PL] Discussion on the review of simplified shielding calculational data and implementation of the new point-kernel integration code

Chair: Yukio Sakamoto (ATOX)

1:00 PM - 2:30 PM Room B

[2B_PL01] Positioning of simplified calculation method in shielding design and its engineering issues

*Yoshihiro Hirao¹ (1. NMRI)

[2B_PL02] Development goals and tasks of JPKG2022, a simplified shielding calculation code

*Fumiyoshi Nobuhara¹ (1. TNS)

[2B_PL03] Photon deep penetration calculations including photonuclear reaction for compilation of buildup factor data

*Seiki Ohnishi¹ (1. NMRI)

[2B_PL04] Development of the new point-kernel integration code and its demonstration

*Satoshi Tamura¹ (1. V.I.C.)

Room C

Planning Lecture | Technical division and Network | Subcommittee on Particle Accelerator and Beam Science

[2C_PL] Polymer Material Development and Application in Quantum Beam Science

Chair: Kai Masuda (QST)

1:00 PM - 2:30 PM Room C

[2C_PL01] Application of Ion Beam to Radiation-induced Graft Polymerization

*Akira Taniike¹ (1. Kobe Univ.)

[2C_PL02] Development of Functional Material and Evaluation Method by Quantum Beams

*Noriaki Seko¹ (1. QST)

[2C_PL03] Application of Solid State Nuclear Track Detectors for Laser-driven Ion Acceleration Experiments

*Masato Kanasaki¹ (1. Kobe Univ.)

Room D

Planning Lecture | Board and Committee | Standards Committee

[2D_PL] Organizing the roles and relationships in codes and standards

Chair: Akio Yamamoto (Nagoya Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room D

[2D_PL01] The role of the AESJ standards in hierarchy of codes and standards

*Yoshiyuki Narumiya¹ (1. SC)

[2D_PL02] Role of the Japan Electric Association in the Standards for Nuclear Power Plant Operations

*Hiroaki Abe¹ (1. UTokyo)

[2D_PL03] Collaboration among the stakeholders on codes and standards

*Kenta Murakami¹ (1. UTokyo)

[2D_PL04] Discussion on specific future efforts

Akio Yamamoto¹, Yoshiyuki Narumiya², Hiroaki Abe³, Kenta Murakami³, Keiji Matsunaga⁴, Haruko Sasaki⁵, Yasunori Yamanaka⁶ (1. Nagoya Univ., 2. SC, 3. U Tokyo, 4. TOSHIBA ESS, 5. NRA, 6. ATENA)

Room E

Planning Lecture | Joint Session | Research Committee for Mechanistic Simulation Method related to Severe Accident of Nuclear Reactors

[2E_PL] Recent Technology Trends in Severe Accident Simulations and Experiments

Chair: Koji Morita (Kyushu Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room E

[2E_PL01] Current Status and Issues Related to Detailed Analysis of Severe Accident*Susumu Yamashita¹ (1. JAEA)**[2E_PL02] Experimental Programs toward Understanding Reactor Pressure Vessel Failure Mechanism at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station***Hiroshi Madokoro¹ (1. JAEA)**[2E_PL03] SARNET Activities and Study on Core Damage during SA at INSS***Koji Nishida¹ (1. INSS)**Room F**

Planning Lecture | Technical division and Network | Health Physics and Environment Science Division

[2F_PL] Current and future perspectives of collaborative activities of academic society on radiation protection

Chair: Makoto Hashimoto (JAEA)

1:00 PM - 2:30 PM Room F

[2F_PL01] Overview of the Umbrella Project, a Newly Established Platform for the Field of Radiation Protection*Reiko Kanda¹ (1. QST)**[2F_PL02] Study on individual dose registry system for occupational exposure***Michio Yoshizawa¹ (1. JAEA)**[2F_PL03] Efforts to train and secure on radiation protection experts in nuclear emergencies***Chie Takada¹ (1. JAEA)**[2F_PL04] Activities of the Working Group on Effective Dose and Operational Quantities***Michiya Sasaki¹ (1. CRIEPI)**Room G**

Planning Lecture | Technical division and Network | Committee on Nuclear Non-Proliferation, Safeguards and Security

[2G_PL] Application of artificial intelligence in the field of nuclear security and its challenges

Chair: Hironobu Unesaki (Kyoto Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room G

[2G_PL01] Application of machine learning models on

the technologies related to nuclear forensics and first response for nuclear and radiological terrorism

*Yoshiki Kimura¹ (1. JAEA)**[2G_PL02] Proposal, development, and implementation of detection methods by combining image deep learning and natural language processing***Kazuyuki Demachi¹ (1. UTokyo)**[2G_PL03] How can AI be used in the operation and management of important social infrastructure?***Atsuhiko Tanaka¹ (1. NEC)**Room H**

Planning Lecture | Over view Report | Research Committee on Fission Product Behavior Related to Decommissioning Work of Fukushima Daiichi NPP

[2H_PL] Activity Reports of Research Committee on Fission Product Behavior Related to Decommissioning Work of Fukushima Daiichi NPP

Chair: Junichi Takagi (TOSHIBA ESS)

1:00 PM - 2:30 PM Room H

[2H_PL01] Aims and policy of activities of this research committee*Shuhei Miwa¹ (1. JAEA)**[2H_PL02] Estimation of dose rate distribution in PCV and future challenges***Keisuke Okumura¹ (1. JAEA)**[2H_PL03] Behavior of FP suggested by radioactive contamination of waste***Yoshikazu Koma¹ (1. JAEA)**[2H_PL04] Activity status of extended committee members***Yoichi Wada¹ (1. Hitachi)**Room I**

Planning Lecture | Over view Report | Research Committee on Feasibility of Nuclear Fuel Cycle

[2I_PL] Recommendations from Research Committee on Feasibility of Nuclear Fuel Cycle

Chair: Isamu Sato (TCU)

1:00 PM - 2:30 PM Room I

[2I_PL01] About "Research Committee on Feasibility of

Nuclear Fuel Cycle"

*Isamu Sato¹ (1. TCU)

[2I_PL02] Recommendations from the Research Committee

*Akira Sato¹ (1. MHI)

[2I_PL03] Consideration of "Opportunities to discuss" based on the opinions from the study session at YGN

*Naoto Hagura¹ (1. TCU)

[2I_PL04] Comprehensive discussion

Room J

Planning Lecture | Technical division and Network | Senior Network (SNW)

[2J_PL] How did the Decarbonization Movement worldwide affect on the students' way to think the energy-mix and nuclear energy?

Chair: Mikio Sakurai (SNW)

1:00 PM - 2:30 PM Room J

[2J_PL01] A consideration on what was changed in the students' way to think the nuclear energy through SNW dialogs with students and questionnaire surveys

*Kazuhiko Wakasugi¹ (1. SNW)

[2J_PL02] The Tendency shown in Dialog Meetings on the Carbon Neutral and Energy in Nagasaki Univ. and Kyutech

*Kenichi Matsunaga¹ (1. SNW)

[2J_PL03] On Carbon Neutral and Energy from the student Viewpoint

*Tomohiro Okamura¹ (1. Tokyo Tech)

[2J_PL04] Panel Discussion with Students

Room K

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

[2K_PL] Current Status of Radioactive Waste Generated from Research, Medical, and Industrial Facilities and Activities toward Disposal Project

Chair: Kazuya Idemitsu (Kyushu Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room K

[2K_PL01] Current Status of Radioactive Waste Management in JRIA

*Minoru Okoshi¹ (1. JRIA)

[2K_PL02] Current Status of Radioactive Waste in Universities

*Kazuya Idemitsu¹ (1. Kyushu Univ.)

[2K_PL03] Current Status of Radioactive Waste Generated from Research, Medical, and Industrial Facilities and Activities toward Disposal Project

Minoru Okoshi¹, Hiromitsu Haba², Satoshi Hukutani³, Akihiro Sakai⁴, Chair: Kazuya Idemitsu⁵
(1. JRIA, 2. RIKEN, 3. Kyoto Univ., 4. JAEA, 5. Kyushu Univ.)

Room L

Planning Lecture | Technical division and Network | Fusion Engineering Division

[2L_PL] Nuclear Fusion Development by Private Sector

Chair: Yuji Hatano (Univ. of Toyama)

1:00 PM - 2:30 PM Room L

[2L_PL01] The Global Private Fusion Industry: Latest Trends and the Overview

*Shutaro Takeda¹ (1. Kyoto Univ.)

[2L_PL02] Challenge of Kyoto Fusioneering Ltd. toward Practical Fusion Energy Business

*Satoshi Konishi¹ (1. Kyoto Fusioneering)

[2L_PL03] Advanced laser research for high-repetition laser fusion demonstration

*Yoshinori Tamaki¹ (1. Hamamatsu Photonics)

[2L_PL04] Our challenge for the realization of laser-based fusion reactors

*Kazuki Matsuo¹ (1. EX-Fusion)

[2L_PL05] Discussions

Planning Lecture | Board and Committee | Board of Directors

[2A_PL] Contribution of "Knowledge" of the Atomic Energy Society of Japan to "Energy well-being"

Chair: Yuichi Niibori (Tohoku Univ.)

Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room A

[2A_PL01] How can nuclear knowledge contribute to society?

*Ekou Yagi¹ (1. Osaka Univ.)

[2A_PL02] What I think now about nuclear power generation in Japan: from an external perspective

*Tatsuhiko Kamisato¹ (1. Chiba Univ.)

[2A_PL03] Discussion

Akira Yamaguchi¹, Yoshitaka Nishino², Ekou Yagi³, Tatsuhiko Kamisato⁴, Chair: Yuichi Niibori⁵ (1. Utsunomiya Univ., 2. Tsukuba Univ., 3. Osaka Univ., 4. Chiba Univ., 5. Tohoku Univ.)

理事会セッション

「エネルギーの Well-being」への原子力学会の「知」の貢献
 Contribution of "knowledge" of the Atomic Energy Society of Japan to "Energy Well-being"

(1) 学会の「知」を社会に活かすために

(1) How can nuclear knowledge contribute to society?

*八木絵香 大阪大学

1. 原子力発電を取り巻く諸状況、変わったことと、変わらないこと

二酸化炭素排出を実質ゼロにするカーボンニュートラルへの転換が注目を集める中、原子力発電を再評価する動きが生まれている。また原子力発電所の「即時」撤廃を望む声は、10年前と比較すれば弱まりつつある。一方で山口氏が指摘するように、原子力発電の価値に対する認識は、原子力の専門家と一般社会の間では隔たっており、特に原子力発電所の再稼働については否定的な意見もまだまだ根強い。

2. 気候変動問題と脱炭素化技術の日本での開発/普及推進戦略における ELSI の確立

筆者は現在、JST 社会技術研究開発センターの研究プロジェクト「気候変動問題と脱炭素化技術の日本での開発/普及推進戦略における ELSI の確立 (研究代表者: 国立環境研究所 江守正多氏)」¹⁾に関わっている。

このプロジェクトでは、日本の気候変動対応戦略において開発・普及が推進されている脱炭素化技術(含む原子力)等を評価する枠組みとして、S+3E に付加する要素として、ELSI (Ethical, Legal and Social Implications/Issues) の観点を追加することを目指している。2021 年度においては、気候変動問題に限定せず個別具体の社会課題に向き合い、未来社会のヴィジョンを描き、日本社会の各分野におけるトランジションのリーダーとなりうる人たち(本研究では「フロントランナー」と呼んでいる)へのインタビュー、およびフロントランナーを参加者としたワークショップを通じて、脱炭素化技術の ELSI のあり方を検討している。

3. 社会課題に向き合い未来社会のヴィジョンを描く中で、原子力はどのように位置付けられるのか

インタビューや WS の参加者には、自らの活動の背景や理念に照らし合わせれば、原子力技術に親和的ではない方を少なからず含んでいる。そのため、福島第一原子力事故の被害に引きつけて、原子力発電を使わない、可能な限り再生エネルギー100%に移行する方が望ましいという意見が強く提示されている。しかし同時に提示され、そして強く共有される考え方は「特定の技術(この場合、再生可能エネルギー)」に過度に依存することも望ましくなく、一定程度、原子力発電を許容する必要があるというものである。場合によっては、新型炉も含めた研究開発について、そこからの新しい技術開発の可能性も含めて、否定的ではない意見も提示される。その意味で原子力発電のプレゼンスは、社会課題に向き合い未来社会のヴィジョンを描こうとするフロントランナーの中では、一定程度浮上しているという言い方もできよう。

一方で同時に提示される視点は、強く原子力専門家への猛省を促すものでもある。それは端的に言えば、福島第一原子力発電所の被害の記憶もさることながら、それにより失われたその地域の文化や伝統、そして言語化されていないが故に、場合によっては失われたことさえも社会的記憶の中から滑り落ちてしまっている様々な「価値」を奪い取る原子力技術への禁忌である。そのような被害をうむ可能性がなるべく少ないものを選びたい(つまり、原子力発電を使いたくない)という考えもまた、強く共有されているのである。

4. 「S+3E+ELSI」を考える

企画セッション当日は、山口氏の「エネルギーの選択においてより高度な S+3E を定量化することが重要である」という指摘を踏まえつつ、本稿に一部掲載したフロントランナーたちの考えを、具体的な発言を引用しながら紹介し、S+3E を ELSI という概念で拡張することの可能性について議論したいと考えている。

参考・引用文献

- 1) <https://www.jst.go.jp/ristex/rinca/projects/jpmjrx20j1.html> (2022 年 2 月 9 日現在)
- 2) 八木絵香 (2015) 学会の「知」を社会で活かすために, 日本原子力学会誌, 時論, Vol.57, No.4

Ekou YAGI¹ ¹ Center for the Study of CO^{} Design, Osaka Univ.

理事会セッション

「エネルギーの Well-being」への原子力学会の「知」の貢献
Contribution of "knowledge" of the Atomic Energy Society of Japan to "Energy Well-being"

(2) 日本の原子力発電についていま考えること:学会外の視点から

(2) What I think now about nuclear power generation in Japan: from an external perspective

*神里 達博¹¹ 千葉大学大学院国際学術研究院

1. 「311 後」の日本

2011 年の東京電力福島第一原子力発電所の事故から、11 年の時が過ぎた。その事故処理への対応は今日まで、絶えることなく続いている。避難者も、事故直後と比べればかなり減ったものの、今年 1 月の数字で 2 万 7 千の人々が依然として故郷に戻れずにいる。事故は、いまだ解決していない。あの事故を「歴史的事実」として捉えることができる段階に、私たちはまだ至っていないのだ。

しかし、社会的にこの事故のことが語られる機会は、とても少なくなった。昨年の「10 年目」という節目にあっても、社会的な注目は決して大きかったとはいえないだろう。それはなぜだろうか。

2. 事故の「否認」

一つには、世界が COVID-19 というとてつもないリスクに見舞われたことが影響しているだろう。2022 年 2 月上旬の段階で、全世界で合計 4 億人が感染、死者は 576 万人にのぼり、この病気のために一日に 1 万人以上が亡くなることもしばしばである。

言うまでもなく、社会経済的なリソースや政治的なアジェンダは、有限である。従って一つの問題が席卷すれば、他の問題への関心は低下し、対応はおろそかになる。人間の認知そのものも、同じような性質を持っている。この 2 年間は確かに、原子力についての議論は、コロナの陰に隠れていたのは間違いない。

しかし、問題はそれだけだろうか。COVID-19 以前から、事故への関心は薄くなっていたのではないだろうか。そもそも、この社会は総体として、あの事故を直視し、向きあってきたといえるのか。直感的な言い方で恐縮だが、事故直後から一年ほどの時期を除けば、この社会は、事故が起きたこと自体を否認しようとしてきたように見えるのだ。ここで言う「否認」とは、フロイトが心の防衛機制として語ったそれであり、圧倒的な事実が目の前にありながら、そのことを認めない態度のことを指す。ただし、ここで指摘したいのは、個人としてではなく、集合的に事故そのものを否認しているようにも見える、ということである。

3. エネルギー問題の難しさ

このことは、この社会が結局のところ、原子力発電という技術を今後、どうするつもりなのか、という根本的な議論を進める上で、大きな障害になるだろう。しかし、原子力という技術は、非常に重大なテクノロジーであり、当然ながら「そっとしておけば、いずれどうにかなる」という類いの問題ではない。また逆に、関係者が奮闘すれば解決できるというものでもない。それは技術的かつ政治的であるのみならず、共同体的であり、また歴史的な問題なのである。従って本来的に、社会全体の議論を避けては通れないのだ。

だがさらにいえば、人類社会は適切にエネルギー問題と向き合ってきたのか、ということも考えなくてはなるまい。実は、エネルギーに関する議論は、日本以外でも、しばしば認識がねじ曲がり、理性的な議論が阻害されるケースが散見される。エネルギーを巡る困難は、日本だけが抱える「十字架」ではないのだ。

そこで本発表ではこのような、エネルギー問題に伴いがちな「歪み」について確認してみたい。それは専門家ならば免れるというものではないし、素人の「常識」が正しいというわけでもない。このような私たち自身の精神のあり方を自覚することが、社会的な議論を進めるためのなんらかのヒントになれば幸いである。

*Tatsuhiro KAMISATO¹¹ Graduate School of Global and Transdisciplinary Studies, Chiba University

(Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room A)

[2A_PL03] Discussion

Akira Yamaguchi¹, Yoshitaka Nishino², Ekou Yagi³, Tatsuhiro Kamisato⁴, Chair: Yuichi Niibori⁵ (1. Utokyo, 2. Tsukuba Univ., 3. Osaka Univ., 4. Chiba Univ., 5. Tohoku Univ)

With the aim of confirming the direction of the efforts of AESJ, this session will focus on "Energy well-being", receive lectures from inside and outside the society, and hold a comprehensive discussion. This is important in considering the roles that should be played in future AESJ, and also in communicating the basic stance to those who are considering joining AESJ.

[2B_PL] Discussion on the review of simplified shielding calculational data and implementation of the new point-kernel integration code

Chair: Yukio Sakamoto (ATOX)

Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room B

[2B_PL01] Positioning of simplified calculation method in shielding design and its engineering issues

*Yoshihiro Hirao¹ (1. NMRI)

[2B_PL02] Development goals and tasks of JPKG2022, a simplified shielding calculation code

*Fumiyoshi Nobuhara¹ (1. TNS)

[2B_PL03] Photon deep penetration calculations including photonuclear reaction for compilation of buildup factor data

*Seiki Ohnishi¹ (1. NMRI)

[2B_PL04] Development of the new point-kernel integration code and its demonstration

*Satoshi Tamura¹ (1. V.I.C.)

放射線工学部会セッション

簡易遮蔽計算法のレビューで得られた知見と計算コードの実装

Discussion on the review of simplified shielding calculational data and implementation of the new point-kernel integration code

(1) 遮蔽設計における簡易計算法の位置付けと工学的課題

(1) Positioning of simplified calculational method in shielding design and its engineering issues

*平尾 好弘

海技研

1. はじめに

放射線の遮蔽設計又はその妥当性確認において、簡易線量計算を適用できる遮蔽体系は、バルク透過、ダクト（又は迷路）ストリーミング、スカイシャインと大きく分けられる。我々は現在、ICRP2007年勧告の法令取入れを踏まえて、放射線施設を対象に γ 線のバルク透過線量計算（以下、バルク遮蔽計算という。）用データの見直しを行うとともに、その妥当性を確認する目的でバルク遮蔽計算コードを開発している[1]。本発表ではまず、放射線施設のバルク遮蔽計算法が適用される範囲の全体を示して、我々が見直してきた部分を明らかにする。それによって、本セッションを通じて紹介する見直し活動の背景や視程を理解する助けになる。具体的な見直しの成果と得られた知見については、セッションの他の講演で紹介する。

次に、実務で用いられる簡易計算の位置づけについて述べる。それには利点があり、単純にリアルシミュレーションにとって代えられるものでないという示唆である。最後に、簡易計算の工学的課題の最たるものである安全尤度の決定について述べる。放射線工学だけでは解決できない課題であり、皆が責任者として向き合えないと先に進まないという示唆である。

2. 放射線施設に対するバルク遮蔽計算法の適用範囲と今回見直した部分

遮蔽計算実務マニュアル[2]を参考に、放射線施設に対するバルク遮蔽計算法の適用範囲の全体を表1にまとめた。また今回の活動で見直した部分を太字で示した。

放射線施設の線源は大きく分けて、RI核種と放射線発生装置（ $\Rightarrow$ 加速器）である。RI核種の場合、放出される放射線として光子(γ/X 線)、 β 線、 β^+ 線、中性子に分けて線量率を評価する。このうち、主に γ 線を放出する核種、あるいは β^+ 線の消滅 γ 線が今回の見直しの射程である。線量計算法としては表1の(1)、(2)又は(3)に該当する。その他の β 線や中性子を放出する核種については、今後見直しを行うべき課題である。RI核種の放射線データはICRP 107を参照することし、計算対象の γ 線エネルギーの下限はICRP 116記載の線量換算係数の下限に相当する10keVとした。

一方、放射線発生装置については、一般によく利用される医療用加速器としてリニアックが主な対象であり、研究用や特殊用途の加速器は考慮していない。この場合、加速した電子をターゲットに衝突させて出る制動X線の線量率を評価する。新規に開発した遮蔽計算コードにおいては、制動X線のエネルギースペクトルを与えると、離散化した各エネルギー群の等方点線源を仮定した遮蔽線量計算が実行される。今回、高エネルギーX線の光核反応で発生する光中性子とその捕獲 γ の線量寄与を計算できるように見直した。 γ 線エネルギーの上限は、最大加速エネルギー25MeVのリニアックにも適用できるように30MeVとした。

あえて今回の見直しが、原子力施設に関連して影響する部分をあげるとすれば、主に γ 線の線量計算、特に表1の(1)ということになり、 β 線（電子）を扱うケースは排出物や緊急時の評価に限られる。

以上、線量計算法の見直しについては、既に確立された各種の計算法があるため、その考え方を踏襲する形で、部分的な計算法の拡張、又は遮蔽計算用データの再計算を実施した。

表 1. 簡易遮蔽線量計算法の適用範囲 (RI 核種の取扱施設及び放射線発生装置)

放射線発生源(線源)	放射線	二次放射線	エネルギー分布	計算条件の与え方(線源、遮蔽体)	線量計算方法
放射性同位元素 (RI核種)	光子 (γ /X線)	—	単色(特性X線)、または連続エネルギー分布を離散化して、エネルギー群に分割(各群の代表エネルギーと光子発生量で線源条件を指定)	・線源強度 ・光子のエネルギーと発生割合 ・遮蔽体の線量ビルドアップ係数 ・遮蔽体の減衰係数 ・実効線量換算係数	(1)線量ビルドアップ係数を用いる計算法
		β線 (β-線)	—	・線源強度 ・RI核種の線量率定数 ・遮蔽体の線量透過率	(2)RIの線量率定数、及びRIに対する線量透過率を用いる計算法
		—	—	・線源強度 ・光子のエネルギーと発生割合 ・遮蔽体の線量透過率 ・実効線量換算係数	(3)光子の線量換算係数、及び単色光子に対する線量透過率を用いる方法
	β線 (β-線)	—	単色(内部転換電子、オージェ電子)	・強度 ・β線エネルギー	(4)遮蔽体におけるβ線の飛程計算 β線が遮蔽体を通り抜けられるか計算する。通例、途中で停止するため、線量計算は行われない。
	—	—	連続(崩壊β線)	・強度 ・β線最大エネルギー	(4)遮蔽体におけるβ線の飛程計算
	制動放射線 (X線)	連続	—	・元のβ線スペクトル ・元のβ線(最大)エネルギー ・制動放射線の線量率定数 Γ_{20} (Ca比) ・制動放射効率比 $K_{20}(Z)$ ・β崩壊分岐比 ・遮蔽体の制動放射線透過率	(5)制動放射線の遮蔽計算 RI核種がβ線とともにγ線を放出する場合、γ線の寄与を支配的とみなして制動放射を無視する例がある。結果的に、純β線核種が制動放射の主な計算対象となる。
	陽電子線 (β+線)	—	連続	・強度 ・β+線最大エネルギー	(4)遮蔽体におけるβ+線の飛程計算
	—	制動放射線 (X線)	連続	—	(5)ただし、β+線による制動放射は、一般に消滅γ線と比べて寄与が小さく無視される。
	—	消滅γ線	単色	消滅γ線(0.511MeV、2本)	(1)、または(3)
	中性子	—	連続(自発核分裂、 (α, n) 反応)	(省略)	(1)～(5)
RI取扱施設 (密封又は非密封線源)	取り扱われるRI核種による	—	上記のとおり、RI核種から放出される放射線の遮蔽線量方法に準ずる。	(省略)	(1)～(5)
	RI核種によらない。放射線の種類によらない。	—	線量率が与えられるため、放射線やエネルギー分布によらない。	・線源から特定の距離における吸収線量率、または実効線量率(線量率の空間分布が与えられる場合、最大値とその距離) ・遮蔽体の線量透過率(別途、線源の核種・エネルギー情報から線量透過率を求める場合もある)	(6)距離の逆自乗則による透過線量の幾何減衰計算
放射線発生装置 (加速器)	電子線	—	連続想定(空気等で散乱して分布)	遮蔽体に対する飛程計算を行う。遮蔽体を通り抜ける確率は低いため、遮蔽線量を評価する例は殆どない。	(5)
	電子線のターゲット衝突で発生する制動放射線(X線)	連続	—	・ターゲットから特定の距離における水の吸収線量率 ・電子線出力のうち、制動放射線の線量率になる割合 ・電子線最大エネルギー(≡制動放射線の最大エネルギー仮定) ・遮蔽体の線量透過率 ・対抗板がある場合、その線量透過率	(6)
	同様に発生する動放射線(X線)及び遮蔽で発生する光中性子と捕獲γ線	連続	—	・制動放射線による利用線束エネルギー分布 ・遮蔽体の線量ビルドアップ係数。光中性子とその捕獲γのために準備された擬似ビルドアップ係数を含む。 ・遮蔽体の減衰係数 ・実効線量換算係数	(1)利用線束エネルギー分布を、適当なエネルギー群の光子発生量に離散化し、各群でビルドアップ線量計算を行い最後に積分する。

3. 遮蔽実務における簡易計算の位置付け

実務に係るステークホルダに目を向けると、遮蔽の専門家の多くは事業者(申請者)側となるが、例えば

放射線施設の多様性を考えると、申請者のレベルは千差万別である。一方、安全審査は規制当局や自治体、あるいは市民や関心団体の関与があって成り立つため、遮蔽計算の非専門家の立場になって実務が進められなければ、確実且つスムーズな認可は期待できない。私見だが、実務の目指す所とは、計算評価の不確実さ・曖昧さを極力排除してミスが入り込む余地をなくし、双方に納得と理解をもたらすことと考える。

関係者間のレベルギャップを埋めるために、遮蔽計算実務マニュアルのようなガイダンスがあり、研究と前例の積み重ねに基づいて確立された手続きによる実務の効率化・標準化が意図されている。そこで重要なのは、ガイダンスに沿って評価された結果を独立して確認すると、誰がやっても同じ結果になるという事実である。いかに精緻な計算であっても、プロセスを突き合わせて確認できなければ、ただ相手を信用するしかない所が出てきて、ミスや誤認が入り込む余地が生まれる。自分の手でプロセスを含めて結果を確認したというコミットメントが信頼度を格段に上げ、確実な法令遵守に安心をもたらすと信ずる。以上、安全性評価の判断の基盤となる実務計算のあり方は次のようにまとめられる。

- ・手法とその適用範囲が明確であること
- ・計算パラメータ・データは出所が明確且つ入手可能であり、誰でも再現できること
- ・できるだけ簡素で、プロセスをフォローできる位の手続きと情報量であること
- ・同じ問題なら誰が計算しても同じ結果が得られること

これらをよく満たす手続きが簡易計算であり、遮蔽計算用データ集[3]等を参照して行われる手計算や表計算も含まれる。工学一般、例えば土木、建築、船舶等の強度や水理計算において、詳細計算の他に、簡易計算による安全性評価のルートが広く活用されているのも同様の理由によるもの考えられる。

4. 実務で用いられる簡易遮蔽計算に係る工学的課題

遮蔽計算の工学的な目標としての設計最適化・自動化を進めていく上で、物理現象を計算機で精緻にシミュレーションするだけでは解決できない課題が残されてきたように思われる。その最たるものが安全(評価)尤度の決定である。

簡易計算に対する疑義の一つは、尤度が任意の安全係数の形で与えられ、その決定の根拠や十分性の判断が外部に任されている点である。その結果、過度に保守的な評価が前例として与えられると、後にそれを合理的に見直す際の障壁になることもある。理由はどうであれ、受け入れ側にとって尤度を小さくすることは慎重にならざるを得ず、結果的に見直しのコストと設計の保守性が天秤にかけられることもありうる。

安全尤度を決定する根拠としては、次のような情報が考えられる。

- ・遮蔽ベンチマーク実験やモニタリングの測定誤差、またはベンチマーク解析における計算誤差
- ・施設の供用期間中に想定される環境・体系等の変化、及びそれらを包絡する遮蔽条件
- ・新知見に基づく法令改定等による、線量概念・基準値・基礎的データの変化

今回の見直しでは、簡易計算用データの作成に特定のモンテカルロ法輸送計算コードを用いており、ベストエスティメットの解であるが故に測定値より低い可能性もある。しかし、非安全側の評価を避けたくとも、そのための情報、例えば特定の材料・厚さ・エネルギーに対する当該コードの誤差の参考値は入手できず、一部を除いて計算の段階では尤度を考慮していない。

一方、今回の見直しは法令改定に係わり、線量換算係数の改訂で線量値に変化が現れる。図1と図2に、それぞれ MeV 領域と 100keV 未満のγ線を放出する RI 核種の実効線量透過率の遮蔽厚さによる変化、及び右の縦軸で今回(ICRP116)と従来(ICRP74)の比を示す。今回の見直しでは100keV未満の低エネルギー部に線量換算係数の変更があり、図2の方が図1より透過率の従来比が少し高めに現れる。それでも従来との差は僅かであり、設計時に多少なりとも尤度をとっていれば、既存施設に対して安全性の再確認が要請されたとしても吸収できるレベルであろう。

結局、安全尤度の決定とは、放射線工学だけでなく、社会経済的な観点も含むリスク評価を行って安全目標を線量値又は線量変化量として定量化することに等しい。不確実さの発生と程度を総合的に解釈して詰め込んだ代表値のようなもので、個人の考え方、立場、時代によっても変化する。計算技術の成熟とともに尤度は小さく見直される傾向にあるが、果たしてそれでリスクを十分にカバーできるのか、限られた規制者とその支援者だけでなく、広く関係者の継続的な合議が求められる所である。

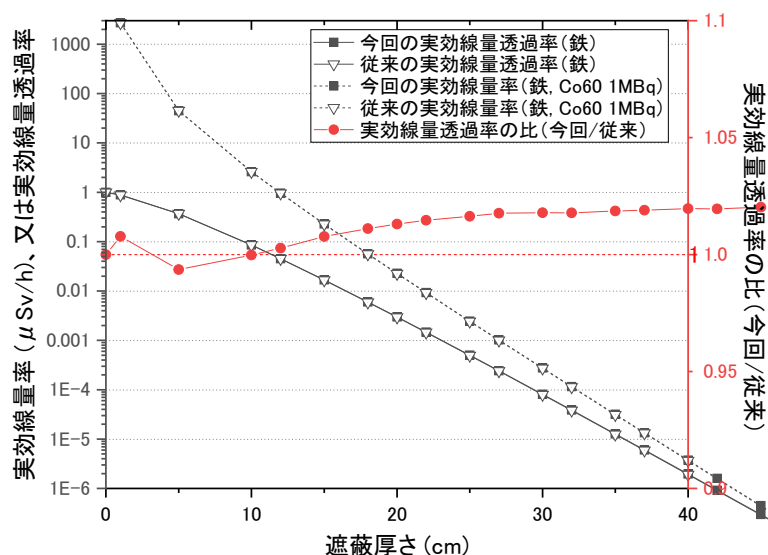


図 1. 主に MeV 領域の γ 線を放出する RI 核種の実効線量透過率の例 (^{60}Co , 鉄遮蔽)

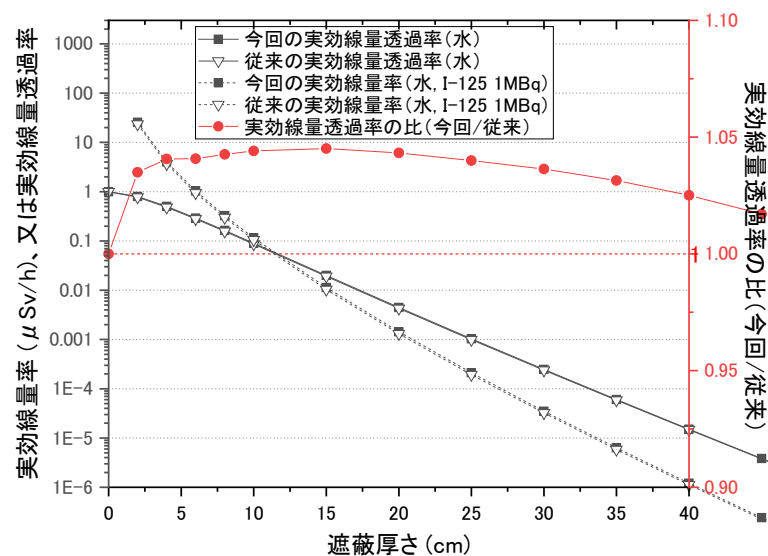


図 2. 主に 100keV 未満の γ 線を放出する RI 核種の実効線量透過率の例 (^{125}I , 水遮蔽)

5. おわりに

職務で安全審査のサポートをした経験、及び今回の見直し活動での議論をもとに、遮蔽に係る実務と簡易計算についての所感を述べた。最近の ICRP/ICRU レポートを読むと、定量的なデータが細かい条件に分けて大量に示される一方で、簡素化の議論が抜けていることに懸念を覚える。認可の予見性や透明性に資する方向の活動と展開を考えておられる諸兄姉の参考になれば幸甚である。

参考文献

- [1] 平尾他, γ 線簡易遮蔽線量計算法の適切な見直しに関する研究, 2021 年春の年会 1D04 (2021).
- [2] 公益財団法人原子力安全技術センター, 放射線のしゃへい計算実務マニュアル 2015 (2015).
- [3] 公益財団法人原子力安全技術センター, 放射線施設の遮蔽計算実務 (放射線) データ集 2015 (2015).

謝辞

本研究は、放射線安全規制研究戦略的推進事業費 (20317593) の助成を受けて実施された。本研究の議論と成果の多くは、放射線工学部会簡易遮蔽計算コードレビューWG メンバーの協力による。

*Yoshihiro Hirao

National Maritime Research Institute, Japan

放射線工学部会セッション

簡易遮蔽計算法のレビューで得られた知見と計算コードの実装

Discussion on the review of simplified shielding calculational data and implementation of the new point-kernel integration code

(2) 目指すべき簡易遮蔽計算コード JPKG2022 の開発目標と課題

(2) Development goals and tasks of JPKG2022, a simplified shielding calculation code

*延原 文祥

¹ 東京ニュークリア・サービス

1. 緒言

国内法令への ICRP 2007 年勧告 (ICRP Pub.103) 取り入れに伴う外部被ばく線量を計算できる点減衰核積分コード JPKG2022 の開発を進めている。簡易遮蔽計算コードの見直しに係る課題の調査・検討し、現代の計算環境や最新の知見を反映していくための作業会として、簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ (以下、WG と呼ぶ。) が設立されており、点減衰核積分コードの新規作成に関する企画立案・調査等の作業を行った。同 WG での調査・検討内容を踏まえ、簡易遮蔽計算コード JPKG2022 の仕様を決定すると共に課題の整理を行うことを、開発目標としている。

2. 簡易遮蔽計算コードレビュー活動の成果とコード開発基本目標

第 1 期 WG 活動(平成 28 年～29 年の 2 年間)では、簡易遮蔽計算コードの利用と開発に関する、文献調査と部会アンケートを実施し、簡易遮蔽計算の利用場面・目的に応じ、設計者／レビューなどの現場ニーズ及び関連発表の傾向等を整理した。

国内の簡易遮蔽計算コード利用状況調査では、最近モンテカルロ計算コードの利用割合が増えてきつつあるが、迅速性や説明性の観点 (過去実証例による妥当性確認行為を重要視)、設計時フィジビリティスタディで利用されているという状況が伺えた。直近 5 年程度の国際学会発表調査では、東電福島事故後の環境線量評価の逆推定問題など広く活用されていたが、昨今の線量計算コードの主流は、モンテカルロ計算コードであり、点減衰核積分コードはそれと比較して少ない。国内調査において、コード開発元が不確かで、バージョンアップしない、メンテナンスできない状況を改善していくことが重要である。また、最新技術と知見に基づく安全解析コードを日本独自に開発することを通じて基盤技術を支える人材育成をすることが急務であるとの指摘があり、コード開発を実行していくこととした。

許認可解析に用いる場合の品質要求として、検証・妥当性確認(Verification & Validation)が適切に実施され、査読有の論文誌掲載や、国際的な専門家レビュー受けた公開論文の必要性が指摘された。

ニーズ調査では、従来コードのユーザーは原子力発電所や核燃料サイクル施設向けを主としてメーカ・エンジニアリング会社を想定していたが、放射性同位元素取扱施設や加速器施設といった医療分野を含む、所謂「放射線施設」の幅広いユーザを対象とすることで需要が広がるとの指摘があった。

以上を元にしたコード開発の基本目標は下記とした。

1) ICRP Pub.103 取り入れに伴う ICRP Pub.116 に示された外部被ばく線量換算係数を利用できる点減衰核積分コード(QAD 相当)を作成する。即ち、線源は光子 (ガンマ線・X 線) とする。2) コードの核心部分はオープンソースとし、今後の維持・改良が可能な形のライセンス形態にする。3) 現在の最新知見や技術を勘案した、適用範囲拡張を行う。4) 体系描画(プレ)や線量コンター結果描画(ポスト)開発についても開発課題に含める。

設計現場で使いやすく、迅速に算出できるコードにするため、コードの要求仕様を決定し、WG 平成 29 年度活動報告書[1]にまとめ、開発時の討議材料とした。

3. 目指すべきコード機能とデータ整備

3-1. コード機能について

具体的なコード機能は下記のとおりとした。①点減衰コード（バルク透過、1回散乱）で統一的に使用可能とする。②入力ファイルの書式は、ユーザが見ただけで分かりやすい表示とする。例えば、パラメータ名=パラメータというような書式（例：YML 形式など）にする。③線源メッシュ作成を自動化する。④幾何形状は、Combinatorial Geometry(=CG 形式)とし、体系と線源の座標移動・座標変換を可能とする。⑤計算できる線量の種類を増やすと共に、ユーザによる各種データ追加も可能な作りとする。⑥光子のエネルギスペクトルでなく核種名を入れることで、計算可能にする。⑦メッシュタリ機能を追加する。⑧許認可向け解析レポートが出力されるようにする。⑨有限補正斜め遮蔽・多重層遮蔽に適用できるようにする。

本コードの機能の詳細については、講演(4)を参照頂きたい。

3-2. データ整備について

本コード同梱データとして、①光子に対する減衰係数(μ/ρ)、②線量換算係数（ICRP Pub.116 等）、③ビルドアップ係数(以下 BF)、④(標準)物質組成ライブラリと⑤核種ライブラリ（核種ガンマ線スペクトルデータ）を整備する。

3-3. 計算線量の選定

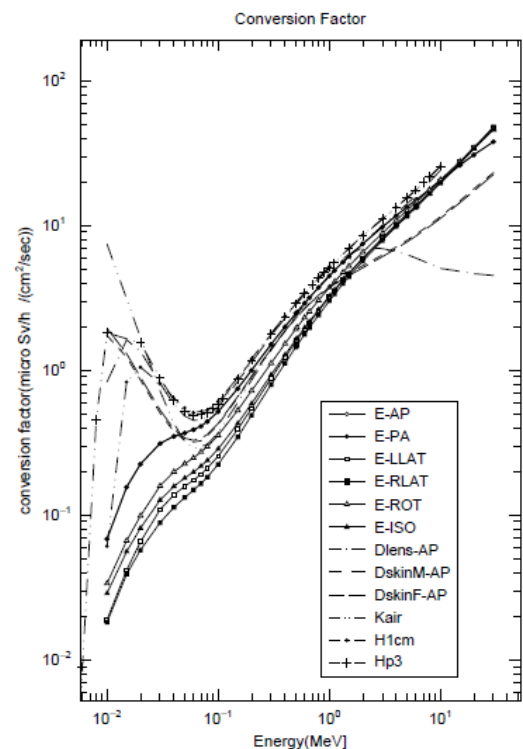
計算線量の選定は、WG での必要性調査や規制庁安全研究専門委員会コメントを踏まえ、ICRP Pub.116[3]に含まれる線量換算係数(実効線量、水晶体及び皮膚の吸収線量)に加え、輸送法令で使用される 1cm 線量当量率 $H^*(10)$ [4]、目の水晶体の線量限度の見直しに伴い必要性があると指摘された 3mm 線量当量 $H_p(3)$ [5]と過去コードとの連続性並びに物理量標準である空気カーマ[4]を選定した。

計算可能な 12 種類の線量一覧を表 1 に示し、線束－線量換算係数値を図 1 に示す。

実効線量の照射体系は、燃料サイクル施設等の敷地境界線量評価及び東電福島事故における線量環境を勘案すると、現行法令で要求されている AP 照射(前方照射)以外に ISO 照射や他の照射体系での現実的評価が求められることもあり 6 方位(AP,PA,LLAT,RLAT,ROT,ISO)のデータを整備する。

表 1 計算可能な線量

No.	データ	性別	照射形状
1	E(AP) ^{*1}	共通	AP
2	E(PA) ^{*1}	共通	PA
3	E(LLAT) ^{*1}	共通	LLAT
4	E(RLAT) ^{*1}	共通	RLAT
5	E(ROT) ^{*1}	共通	ROT
6	E(ISO) ^{*1}	共通	ISO
7	水晶体 ^{*1}	共通	AP
8	皮膚 ^{*1}	男性	AP
9	皮膚 ^{*1}	女性	AP
10	空気カーマ Kair ^{*2}	共通	—
11	1cm 線量当量 $H^*(10)$ ^{*2}	共通	—
12	3mm 線量当量 $H_p(3)$ ^{*3}	共通	—



*1 : ICRP Pub.116／*2 : ICRP Pub.74／*3 : IEC 62387

図 1 線束－線量換算係数

3-4. エネルギー範囲と遮蔽厚適用範囲

エネルギー範囲は、ICRP Pub.116 数表のエネルギー下限である 10keV から 30MeV(PET 施設での使用を想定したエネルギーとして原子力規制庁より助言のあったエネルギー)までとする。線量の中で、文献数表中に 10MeV を超えるデータが存在しない場合(空気カーマ、1cm 線量当量、3mm 線量当量)は、10MeV 迄のデータを整備する。

エネルギー点は、詳細なガンマ線の断面積構造を模擬できるよう 37 点(1.0E-2, 1.5E-2, 2.0E-2, 3.0E-2, 4.0E-2, 5.0E-2, 6.0E-2, 8.0E-2, 1.0E-1, 1.5E-1, 2.0E-1, 3.0E-1, 4.0E-1, 5.0E-1, 6.0E-1, 8.0E-1, 1.0E+0, 1.022, 1.25, 1.5E+0, 2.0E+0, 2.044, 3.0E+0, 4.0E+0, 5.0E+0, 6.0E+0, 7.0E+0, 8.0E+0, 9.0E+0, 1.0E+1, 1.2E+1, 1.4E+1, 1.6E+1, 1.8E+1, 2.0E+1, 2.4E+1, 3.0E+1)を基本とし、K-X 線などの特性 X 線エネルギーの計算に対応できるよう、特性 X 線前後のデータ点を追加する。質量減衰係数、BF の双方で共通のエネルギー点の整備を行う。

整備するエネルギー範囲における新旧の鉛の質量減衰係数の対比を図 2 に示す。

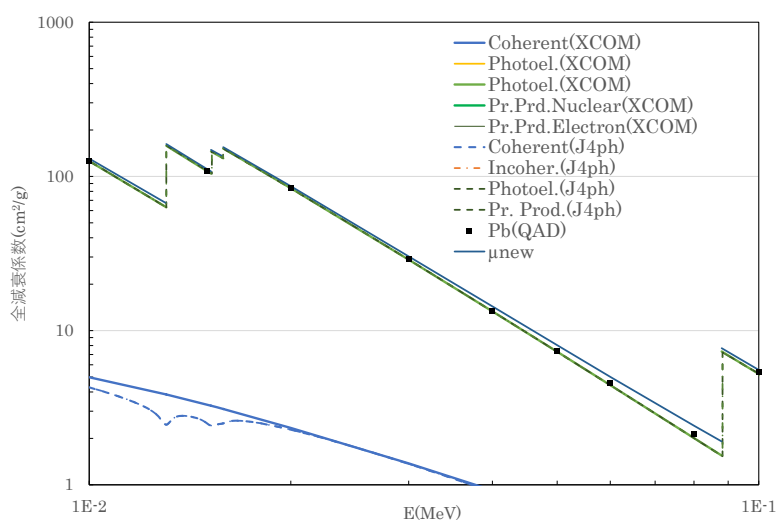


図 2 鉛におけるデータ整備点の減衰係数比較

遮蔽厚適用範囲は、BF 算出にモンテカルロ計算コードを用いることから、実用上の利用範囲を勘案し、80 mfp までとした。

3-5. ビルドアップ係数整備と光中性子問題

JPKG2022 コードの BF は、モンテカルロ計算コードで算出した線量と XCOM データベースの減衰係数[6]から算出する直接線線量の比とする。

ガンマ線エネルギー代表点における鉄、鉛、コンクリートの BF を図 3 に示す。

BF データ格納フォーマットは、従来コードでは GP 近似式[7]で計算する手法を採用しており、フィッティングパラメータを格納していたが、本コードでは開発期間 2 年と短い時間的制約下で実施することから数表形式で与える方式とし、GP 近似式によるフィッティングは今後の課題とした。

点減衰核コードでは、線源と評価点を結ぶ線が遮蔽壁を斜めに横切る場合、斜め入射の BF を用いないと非保守側の結果を与える恐れがあり、斜め入射に対するデータを整備する予定である。

ガンマ線エネルギーが中性子発生のしきいエネルギー(W-183 では 6.2MeV、同位体により異なる)を超える場合には、光中性子を考慮する。従来は考慮していなかったことから、今回整備において、光中性子による線量(2 次ガンマ線含む)という新たな量をどのように表現すべきかについて討議と検討を行い、点減衰核コードのデータという観点から **光中性子 BF** として定義した。

理由は、ガンマ線線量計算式との整合上、WG において、中性子線量及び 2 次ガンマ線の BF が GP 近

似式に適用可能である指摘が挙げられたことから、将来的には GP 近似式でフィッティングしてパラメータ整備ができることを想定している。

光中性子発生時に 1 次ガンマ線を分離して知りたいニーズが提起された。しかしながら、通常のモンテカルロ計算では、1 次ガンマ線と 2 次以降のガンマ線は不可分である。光中性子を発生させない計算を別途行うことで分離する検討を現在実施している。本件については講演(3)を参照頂きたい。

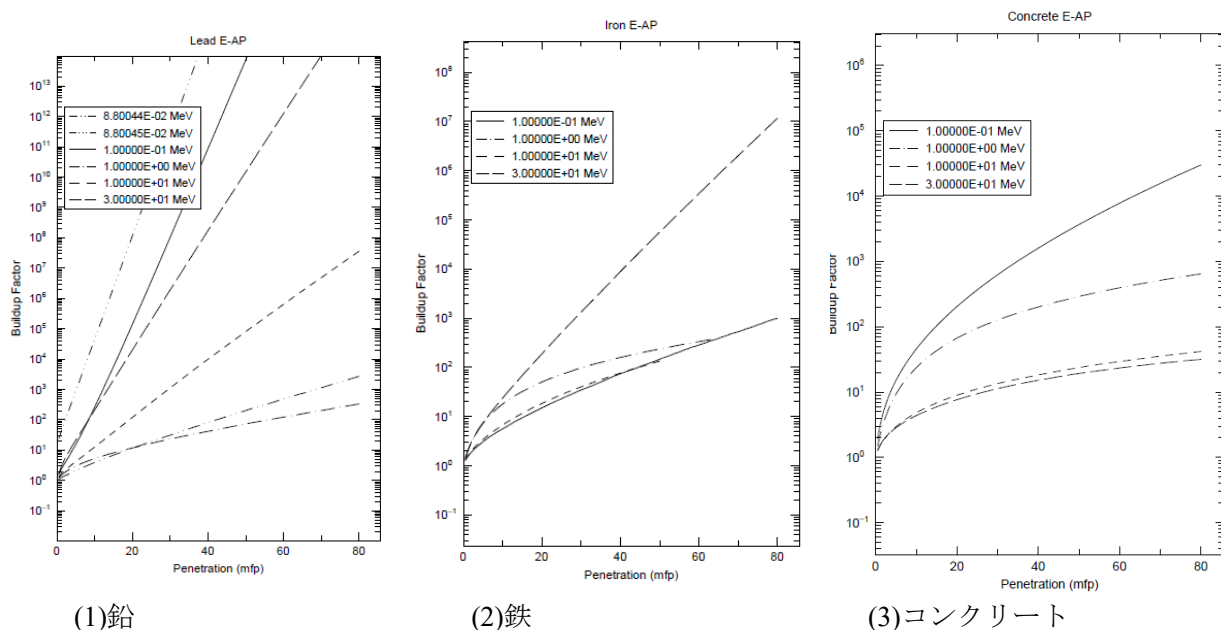


図 3 材質毎 BF

3-6.遮蔽体

WG 平成 29 年度活動報告書[1]に挙げられた遮蔽体の内、優先度の高と中の 13 種類の遮蔽体に対するデータを整備し、その一覧を表 2 に示す。これらの遮蔽体について、BF 物質名を指定することで迅速な深層透過計算が可能になる。従来コードでは整備・内蔵されなかった、優先度中分類のパイレックスガラス、アクリル樹脂、ポリエチレン、土壌が整備されることで、BF 指定における選択の悩みが解消される。

表 2 整備する遮蔽体一覧

優先度高	コンクリート、水、タングステン、空気、鉄、鉛
優先度中	炭素、アルミニウム、銅、パイレックスガラス、アクリル樹脂、ポリエチレン、土壌

*: 赤字は本コードで新たに対応した内容

3-7.点減衰核コード適用範囲拡張状況

点減衰核コード適用範囲拡張状況を確認する為、本コードで整備した BF と従来コードの適用範囲の比較を表 3 に、機能比較を表 4 に示す。適用範囲が拡張され、多くの機能が追加されていることが理解頂けると考えている。

1mfp 未満の薄い遮蔽体での BF については、最新知見反映を行い、0.5mfp の係数を整備し、QAD-IE コード[8]で提案されたフィッティング式を取入れた。

点減衰核コードでは無限媒質中の BF を用いており、保守側な結果となっていることから、合理的な線量を算出する機能として、有限媒質/無限媒質比を整備すること、遮蔽体が多重層となる場合のデータ整備があるが、そちらは今後の拡張課題とした。

表3 従来コードと本コードにおけるガンマ線 BF 適用範囲比較

	(1)QAD-CGGP2/ (2)QAD-CGGP2R	QAD-IE	JPKG2022
BF データ	照射線量 R	R, E(AP)	全線量
算出線量	(1)ICRP Pub.51 R, K, H1cm, H3mm H(0.07) (2) ICRP Pub.74 R, K, E(AP), H*(10)	ICRP Pub.74 R, K, E(AP), H*(10)	ICRP Pub.116 E(AP, PA, ISO, RLOT, LLOT, Dskin(AP), DlensM, DlensF ICRP Pub.74 K, H*(10) IEC62387 Hp(3)
エネルギー範囲			
線量換算係数	0.01～10MeV	0.01～10MeV	0.01～ 30MeV
減衰係数	0.01～30MeV	0.01～30MeV	0.01～ 30MeV
BF	0.015～15MeV	0.015～15MeV	0.01～ 30MeV (一部 10MeV 迄)
計算範囲	40mfp 迄	100mfp 迄	80mfp 迄
コード引用文献	ORNL RSIC CCC-493 JAERI-M 90-110	AESJ2006 秋の年会 E57	今後
BF 引用文献	ANS-6.4.3 DLC- 129/ANS643(1993)	AESJ-SC-A005:2013	今後

*: 赤字は本コードで新たに対応した内容

表4 従来コードと本コード機能比較

	(1)QAD-CGGP2/ (2)QAD-CGGP2R	QAD-IE	JPKG2022
核種指定	無	無	有 ICRP Pub.107
斜め入射	無	無	有 E(AP)のみ
光核中性子対応	無	無	有(有りと無し双方可)
GUI(プレ&ポスト)	無	無	計算条件入力補助(GUI) 体系描画 メッシュタリ等結果出力

*: 赤字は本コードで新たに対応した内容

4. 今後の課題について

活用対象範囲として、医療分野を含む放射線施設向けを含めるため、ガンマ線エネルギー上昇などの適用範囲拡張を行う過程で新機能作成や新たな研究課題に取り組み、最新知見を反映する方針で進めている。本コードは、今後、オープンソースコードとしてリリースする予定である。

3-7.節に記載した点減衰核コードの適用範囲拡張については、人、予算、期間との兼ね合いであるが、整備を進めていけたらと考えている。

コード添付サンプル問題を用いた検証を実施予定であるが、過去実験データや解析コードの結果との比較

を通じた検証及び妥当性確認(Verification & Validation)について、今後、WG での課題として取り組んでいく予定である。

上のような「放射線施設」のニーズは、大きな1つの施設ではなく、規模は小さいが非常に多くの施設で存在する。他に例えば、 β 核種による制動放射線の計算や中性子の計算などが挙げられる。エネルギーや医療の分野における原子力・放射線の活用は、21世紀の重要なテーマの一つである。原子力分野・放射線分野の幅広い課題に挑戦してくれる人材が、こうした新たな課題と一緒に挑戦してくれることを願うものである。

5. 参考文献

- [1] 日本原子力学会放射線工学部会簡易遮蔽解析コードレビューWG, 平成29年度簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ活動報告書, 日本原子力学会放射線工学部会, 平成30年8月,
http://www.aesj.or.jp/~rst/H29_WG_report.pdf
- [2] 日本原子力学会放射線工学部会簡易遮蔽解析コードレビューWG, 令和元年度簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ活動報告書, 日本原子力学会放射線工学部会, 令和3年1月,
http://www.aesj.or.jp/~rst/R1_WG_report.pdf
- [3] ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5)
- [4] (社)日本アイソトープ協会, 外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数, ICRP Publication 74
- [5] IEC 62387:2012, Radiation protection instrumentation - Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation, TC 45/SC 45B
- [6] M. J. Berger and J. H. Hubbell, XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer, NBSIR 87-3597, National Bureau of Standards (1987). NIST, "XCOM: Photon Cross Sections Database" (Last update: November 2010);
<https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>
- [7] Y. Harima, An Historical Review and Current Status of Buildup Factors Calculations and Applications", Radiat. Phys. Chem. Vol.41 (1993).
- [8] 吉田至孝他, ガンマ線遮へい計算コード QAD の改良, 2006 秋の年会 E57

謝辞

本研究は、放射線安全規制研究戦略的推進事業費(20317593)の助成を受けたものである。本研究の議論と成果の多くは、放射線工学部会簡易遮蔽計算コードレビューWG メンバーの協力による。

*Fumiyoshi Nobuhara¹, Yoshihiro Hiraoi² and Seiki Ohnishi²

¹Tokyo Nuclear Services. Co. LTD., ²National Maritime Research Institute, Japan

放射線工学部会セッション

簡易遮蔽計算法のレビューで得られた知見と計算コードの実装

Discussion on the review of simplified shielding calculational data and implementation of the new point-kernel integration code

(3) ビルドアップ係数のための光核反応を考慮した深層透過計算

(3) Photon deep penetration calculation including photonuclear reaction for buildup factor data

*大西 世紀

海技研

1. 背景

現在、近年の新たな知見を取り入れた点減衰核積分法に基づく簡易遮蔽計算コードを開発中であり、光中性子の効果を取り入れがその課題の一つとなっている。本発表ではこの点減衰核積分法で用いる γ 線ビルドアップ係数の計算方法とその結果について述べる。

2. 計算条件

ビルドアップ係数の計算では、光子線源が中心に置かれた半径 100 平均自由行程(mean free path, mfp)相当の球体系を用い、80 mfp まで 1 mfp 間隔の位置で線量を評価した。核データは電子、中性子、光子原子反応には AceLibJ40[1]を用い、光子原子核反応には ENDF/B-VII[2]、IAEA/PD-2019[3]を(同核種が収録されている場合は記述順に優先)使用した。光核ファイルへの対応状況から輸送計算コードには MCNP6.2[4]を採用し、mfp ごとに薄い球殻を配置し、飛程長エスティメータで線量を計算した。フラックスから線量への換算には ICRP Pub.116[5]の換算係数を用いている。遮蔽材料には混合物/化合物 (アクリル、空気、普通コンクリート、ポリエチレン、珪ホウ酸ガラス、土、水) 及び単元素 (Al, C, Fe, Cu, Pb, W) を選定した。

3. 分散低減

80mfp に渡る γ 線深層透過問題では、試行粒子数を適切に管理しなければタリーへ粒子が到達せず、十分な統計的収束が期待できない。このため分散低減(Variance Reduction, VR)法が必須となる。光中性子の発生を考慮した場合、深部で減衰カーブに変曲点が出る等の問題があり、単純に指数的に Weight Window (WW) 下限値を変化させるだけでは十分な効果が得られない。また今回の計算では対象とするタリーが計算体系のほぼ全体であるため、対象タリーが 1 つに限られる MCNP の WW Generator 機能も有効に動作しない。さらに既存の随伴線束計算による分散低減コードは光核反応に対応していないため使用できない。このような条件下で大量の計算ケース(材料数×線源エネルギー数)の分散低減パラメータを設定する必要がある。

3-1. 反復 WW 法

そこで当計算では適当なヒストリ数で反復計算を実施し、各球殻セルの粒子数が均一に近くなるように WW を調整する手法を採用した。この方法は適切なパラメータを得るまでの計算時間は長くなるものの、安定的に全タリーを平均的に最適化できるという利点を持つ。図 1 に得られた WW 下限値の一例を示す。

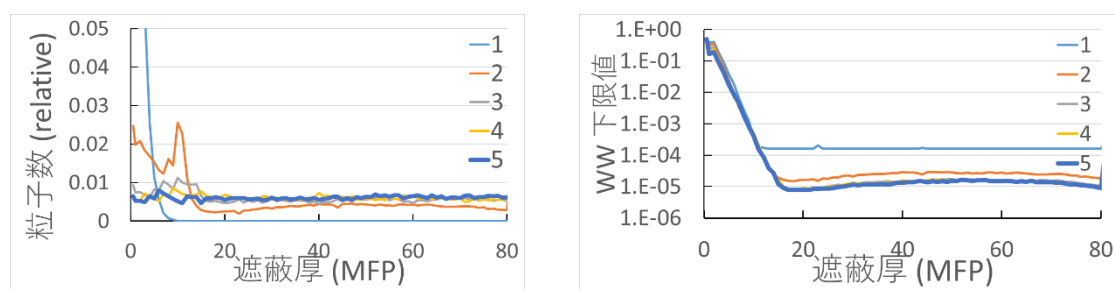


図 1. 8MeV 光子線源設置時の鉛球内 WW 下限値及び試行粒子数分布

(左：光子粒子数、右：光子 WW 下限値、図中の凡例の番号は反復回数を示す)

3-2. 光核反応バイアス

光核反応による中性子発生断面積は閾エネルギー近傍では著しく小さいため、中性子線量をモンテカルロコードで評価する場合には(平均値を保存しながら)バイアスを適用し、十分な数の試行粒子を生成する必要がある。MCNP では PHYS:P カードで衝突事に光核反応を起こすようにバイアスを掛けることができるが、この設定だけでは衝突で発生した光中性子のウェイトが小さく、発生中性子の輸送が即時打ち切られるため WWN カードで WW 下限値を適切な値に設定する必要がある。

3-3. 捕獲ガンマ線バイアス

水素・金属混合材料では、重水素原子の光核反応閾値が小さい(2.2MeV)ため、入射光子エネルギーが比較的低い場合でも中性子が発生する。この中性子が金属原子に捕獲されると 6MeV 以上の捕獲 γ 線が発生するため、線源よりも遥かに高いエネルギーを持った二次光子が発生し得る。分散低減パラメータ決定時にはこのような粒子も考慮する必要があるため、PIKMT カードで二次光子が十分な頻度で発生するようバイアスを掛けた。

4. 計算結果

中性子発生量が少ない例として、3MeV 光子線源に対する水体系での線量分布を図 2 に、発生量が多い例として 8MeV 光子線源に対する鉛体系での線量分布を図 3 に示す。いずれも統計誤差 5%未満の良好な収束を確認している。

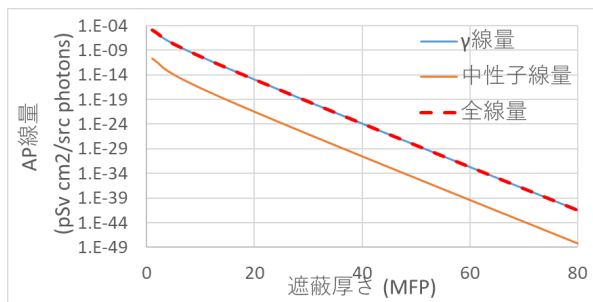


図 2 3MeV 光子線源に対する水球内線量分布

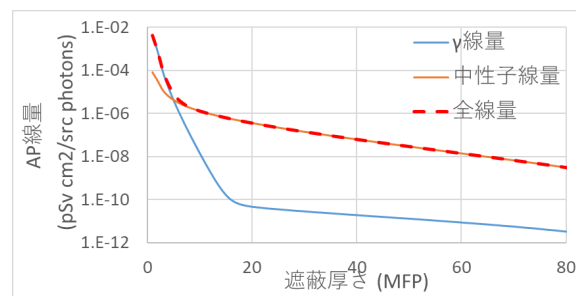


図 3 8MeV 光子線源に対する鉛球内線量分布

5. まとめ

光核反応を考慮した γ 線深層透過計算を実施し、遮蔽体内部での線量分布を計算した。光核反応閾値近傍の中性子発生断面積が小さいエネルギー領域においても十分に良好な統計精度を有する結果を得ることができた。これらの計算結果はビルドアップ係数として整備され、簡易計算コードで実用に応用される予定である。

参考文献

- [1] T. Sato, et al., “Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52”, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013)
- [2] M. B. Chadwick, et al., “ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology”, Nucl. Data Sheets 107, 12, (2006).
- [3] T. Kawano, et al., “IAEA Photonuclear Data Library 2019”, Nucl. Data Sheets 163 (2020).
- [4] C.J. Werner, et al., “MCNP6.2 Release Notes”, Los Alamos National Laboratory, report LA-UR-18-20808 (2018).
- [5] N. Petoussi-Henss, et al., “Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures”, ICRP, ICRP Publication 116, (2010).

謝辞

本研究は、放射線安全規制研究戦略的推進事業費（20317593）の助成を受けたものである。本研究の議論と成果の多くは、放射線工学部会簡易遮蔽計算コードレビューWG メンバーの協力による。

*Seiki Ohnishi

National Maritime Research Institute, Japan

放射線工学部会セッション

簡易遮蔽計算法のレビューで得られた知見と計算コードの実装

Discussion on the review of simplified shielding calculational data and implementation of the new point-kernel integration code

(4) 簡易遮蔽計算コードの開発とデモンストレーション

(4) Development of the new point-kernel integration code and its demonstration

*田村 智志

Visible Information Center

1. はじめに

本発表では、現在開発中の点減衰核積分コード JPKG2022 (図 1) の機能について述べ、実際にデモンストレーションを行う。

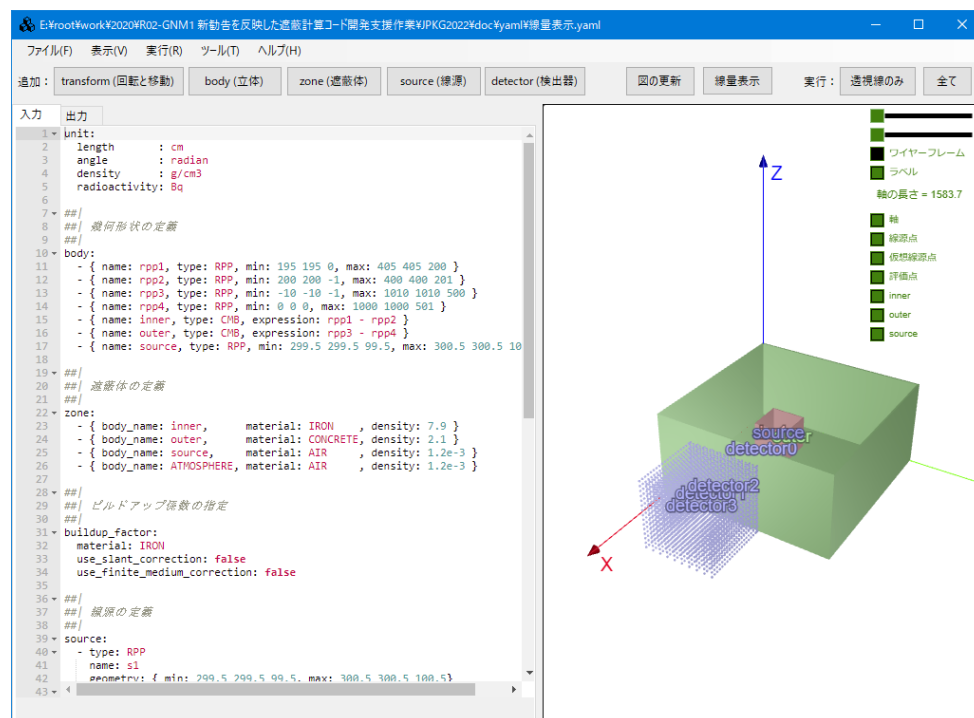


図 1 JPKG2022 の画面

2. JPKG2022 の計算機能

2-1. 立体

遮蔽体の立体形状として利用できるのは、基本立体として 9 種類 (任意方向の直方体、xyz 軸に平行な直方体、くさび型、円柱、楕円柱、円錐台、球、楕円球、楕円トーラス)、および、それらの任意の組み合わせ (和集合および差集合、共通部分) である (図 2)。組み合わせ立体の例として、3 つの立体 A, B, C に対して、「A から B をくりぬいたもの」と C との共通部分を指定したい場合、「 $(A - B) \& C$ 」という式を用いればよい。

遮蔽体が設定されていない残った領域 (主に空気がある領域) に対しては、ATMOSPHERE というキーワードを使用することで、一括して 1 つの立体として扱うことができる。

構築した体系は、3 次元表示して確認することができる。図 1 のウィンドウ右側がその表示部である。図 2 もこの機能で表示したものである。

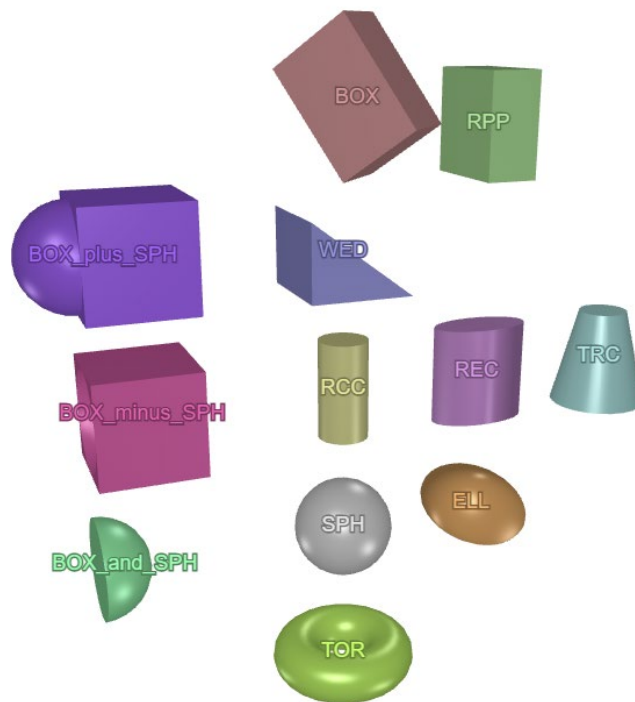


図 2 使用可能な立体（右の 9 つが基本立体、左の 3 つが組み合わせ例）

2-2. ビルドアップ係数

ビルドアップ係数は、13 種類の物質および 12 種類の線量に対応している（表 1）。JPKG2022 の機能として、ビルドアップ係数に関するものを表 2 に示す。

表 1 使用できる物質と線量

物質	Carbon, Aluminium, Iron, Copper, Tungsten, Lead, Air, Water, Concrete, Pyrex Glass, Acrylic Resin, Polyethylene, Soil
線量	E(AP), E(PA), E(LLAT), E(RLAT), E(ROT), E(ISO), 水晶体, 皮膚（男性）, 皮膚（女性）, 空気カーマ, 1cm 線量当量 H*(10), 3mm 線量当量 Hp(3)

表 2 JPKG2022 におけるビルドアップ係数

二次粒子の線量計算	光核反応による中性子および二次ガンマ線のビルドアップ係数が整備され使用できる。
有限媒質補正	現状のビルドアップ係数は無限媒質に対して整備されている。これを有限媒質にも対応する。（データ整備は将来の課題。）
薄い遮蔽材対応	0～1mfp の薄い遮蔽材に対してもビルドアップ係数を計算できる。
二重層補正	特定の遮蔽材の組み合わせが現れた場合、対応処理をしたビルドアップ係数を使用する。
斜め入射補正	スラブに対して斜めにガンマ線が入射した場合に、入射角度に応じてビルドアップ係数を補正する。

2-3. 線源

線源形状は 5 種類（点、直方体 2 種、球、円筒）が使用できる。点線源以外の形状の場合、線源体積の分割範囲などを指定できる（例えば球を半球にするなど）。線源の個数は任意である。

線源強度の指定は、核種名を与えるほか、エネルギーを直接指定することもできる。

3. 計算結果の可視化機能

評価点には、点・1次元・2次元・3次元グリッドの4種類がある。点以外の3種類については、JPKG2022上で可視化できる。

3-1.1 1次元グリッド

1次元グリッドの場合は、図3のようにグラフ形式で計算結果を表示する。

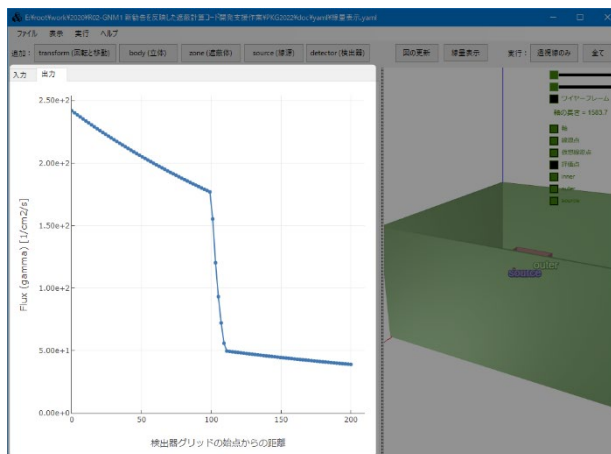


図3 1次元グリッド検出器の可視化

3-2.2 2次元および3次元グリッド

2次元・3次元の場合はスライス形式で表示できる（図4）。3次元の場合、スライスの位置は自由に移動できる。

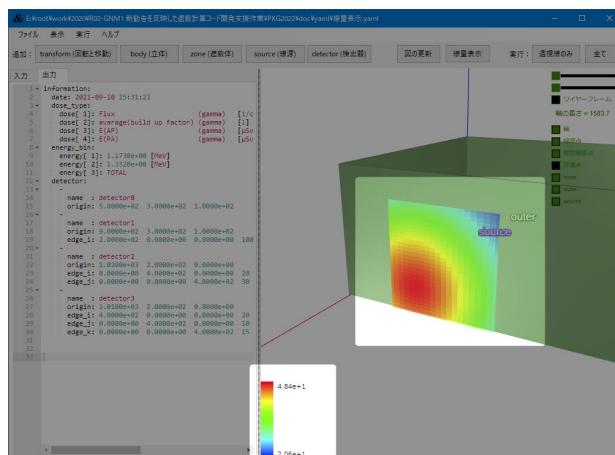


図4 2次元・3次元グリッド検出器の可視化

謝辞

本研究は、放射線安全規制研究戦略的推進事業費（20317593）の助成を受けたものである。本研究の議論と成果の多くは、放射線工学部会簡易遮蔽計算コードレビューWGメンバーの協力による。

*Satoshi Tamura

Visible Information Center, Inc.

Planning Lecture | Technical division and Network | Subcommittee on Particle Accelerator and Beam Science

[2C_PL] Polymer Material Development and Application in Quantum Beam Science

Chair: Kai Masuda (QST)

Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room C

[2C_PL01] Application of Ion Beam to Radiation-induced Graft Polymerization

*Akira Taniike¹ (1. Kobe Univ.)

[2C_PL02] Development of Functional Material and Evaluation Method by Quantum Beams

*Noriaki Seko¹ (1. QST)

[2C_PL03] Application of Solid State Nuclear Track Detectors for Laser-driven Ion Acceleration Experiments

*Masato Kanasaki¹ (1. Kobe Univ.)

加速器・ビーム科学部会セッション

量子ビーム科学における高分子材料の展開

Polymer Material Development and Application in Quantum Beam Science

イオンビームの放射線グラフト重合法への応用

Application of Ion Beam to Radiation-induced Graft Polymerization

*谷池 晃

神戸大学

放射線グラフト重合は基板高分子材料（ポリマー）を放射線で照射し、内部に生成したラジカルを起点にして別のポリマーを接ぎ木（グラフト）する方法である。本手法で、放射線照射後単量体（モノマー）をグラフト重合することによって行う。この時、機能を持ったモノマーをグラフト重合することによって、機能性高分子材料を作製することができる。

放射線グラフト重合法に用いる放射線は電子ビームが一般的であるが、我々のグループではイオンビームを用いた研究を行ってきた。イオンビームはポリマー中の飛程が短く、LET が大きいので、試料中の局所的な部分にエネルギーを与えることができ、ポリマー中に生成するラジカルの密度が大きくなる。また、イオンビームは同程度のエネルギーの電子ビームに比べて発散が小さいので、低線量で高密度のグラフト鎖が局所的に導入することができる。

ポリマーを放射線で照射すると、水素が放出されラジカルが生成される[1]。そのラジカルは電子スピン共鳴（ESR）装置を用いて、ラジカルの種類と個数を測定することができる。グラフト重合反応が起こるラジカル種はアルキルラジカルであり、アリルラジカル、ペルオキシラジカルではグラフト反応は起こらない。十分に大きなイオンフルエンスの場合、ペルオキシラジカルが増加し、グラフト重合できない領域ができることがわかった[2]。

実験は神戸大タンデム加速器施設で行っている。基板としてポリエチレン、モノマーはアクリル酸を用いて研究を進めている。カットしたポリエチレンシートを照射ホルダーに設置し、容器を真空にして、ポリエチレン試料をイオンビームで照射する。グラフト重合は、

- ①真空中から取り出してモノマー溶液に浸潤し、グラフト重合反応を行う。
- ②イオンビーム照射後容器内にモノマーを導入し、低圧力の気相で反応させる。
- ③イオンビーム照射時に容器内にモノマーを導入し、真空中で反応させる。

の方法で行っている。グラフト鎖の導入具合は、反応前後の試料重量を測定し、増加重量を基板ポリマー重量で割ったグラフト率で評価している（重量法）。①の方法は十分なグラフト率が得られ、複数回の照射・重合反応も可能である[3][4]。ただ、グラフト鎖導入の微小な位置制御は困難である。現在主に行っている②③の手法の場合はグラフト鎖の導入量が小さいので、重量法で評価することが困難である。そこで、加速器を用いて RBS 分析を行い、酸素の密度を測定することで、グラフト率に対応した量で評価できないか検討中である。

また、イオンビームグラフト重合法の応用として、レントゲンの撮影の様に診断へ応用することができないか検討した。イオンビームが貫通する程度の分析試料をポリエチレンに重ねて照射する。ポリエチレンをグラフト重合し、着色することでポリエチレンを観測する。イオンビームが貫通する程度の試料にしか対応できないが、試料内部の空孔の観測が可能であった[5]。

本講演では、イオンビームグラフト重合法に関するこれまでの成果の概要と、最近の研究結果について報告するとともに、今後の展望についても述べる。

[1] A. Taniike, et al., J. Appl. Phys., Vol. 92, 11, pp. 6489-6494 (2002).

[2] A. Taniike, et al., Nucl. Inst. Meth. B, 331, pp. 191-195, (2014).

[3] A. Kitamura, et al., Radiat. Phys & Chem., Vol. 69, pp. 171-178 (2004).

[4] A. Taniike, et al., Nucl. Inst. Meth. B, 269, pp. 3237-3241 (2011).

[5] A. Taniike, et al., Physics Procedia 80, pp. 151-154 (2015).

*Akira Taniike

Kobe Univ.

加速器・ビーム科学部会セッション

量子ビーム科学における高分子材料の展開

Polymer Material Development and Application in Quantum Beam Science

(2) 量子ビームを活用した材料創製と評価

(2) Development of Functional Material and Evaluation Method by Quantum Beams

*瀬古 典明, 植木 悠二, 保科宏行

量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所

1. はじめに

量子ビームを高分子に照射すると、分解、架橋が起こる。そして、機能のあるモノマーと接触させればその機能を持った高分子側鎖が形成される。高分子鎖同士が絡まれば架橋、伸長すればグラフト重合となる。これらは、同時に起こるので、細かなことを言わなければ、いずれの反応も分けて考えることはなく利用できる。私たちはこれまでに、分解、架橋、ちょっと工夫してグラフトが同時に起こる現象を利用して、様々な機能性材料を開発してきた。本発表では、量子ビーム技術を巧みに利用して材料を開発してきた成果とその評価法について紹介する。

2. 架橋・グラフト重合

2-1. ブリード抑制効果

これまでに放射線グラフト重合法を活用して、低摩擦性を示すシリコーンゴム（以下、シリコン）の表面改質に取り組んできた。シリコンは耐熱性、耐候性など優れた特性をもつことから汎用材料や特殊部材など、広範にわたり利用されているが、従来のシリコンは、ゴム内部の低分子成分が表面にしみ出やすく、その滲出成分が他部材を汚染することが問題の一つとなっていた。そこで、ゴムの表面層のみの架橋密度を高め、撥水成分のしみ出しを抑えることが可能なバリア層を形成させ、ゴムの柔軟性とブリード抑制効果を兼ね備えることができれば、新たなシリコンを開発できるという着眼で研究を進めた。まず、電子線架橋により形成したシリコン表面層の効果を調べるため、熱架橋と電子線照射による架橋を複合的に活用するというアプローチにより検討を進めた。初めに、未架橋のシリコン、熱架橋剤、及び電子線架橋助剤をよく混ぜ合わせ、次いで、混ぜ合わせた原料を加熱して、熱架橋剤によりゴム全体に大きな網目構造を形成させた。最後に、ゴム表面に電子線を照射して、ゴム表面層のみの架橋密度を向上させて表面バリア層を形成させるという、3つの工程で実施した。Fig.1 に線量が及ぼすシリコンの膨潤率、及びゴム表面硬度への影響を示す。線量の増加に伴い、膨潤率は低下し、その一方で、表面硬度は向上した。これは、ゴム表面層に形成された架橋層の硬化によるものであり、線量が増加するにつれて表面架橋層の架橋密度が増加したためと考えられる。また、電子線の加速電圧を変化させることにより、表面架橋層の厚みを自在に制御することがわかった。特に、電子線の浸透深さが 100 μm 程度となる加速電圧 90 keV の電子線を用いた場合は、ゴム内部が柔らかく、表面が硬い新しいシリコンを作ることができた。さらに、表面架橋層による滲出成分抑制効果について接触角を調べることで評価した結果、未照射のシリコンの接触角が 72° であったのに対し、表面架橋型シリコンは 55° となり、大幅に改善できたことがわかった。また、電子線照射後の表面バリア層の硬さは、電子線照射前の 1.3 倍に向上し、従来品の約 4 倍の引張力の耐性に向上させることができた。

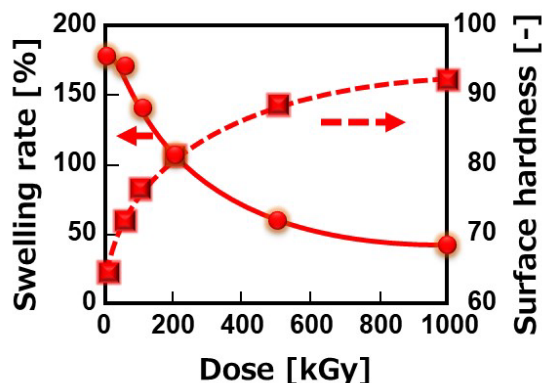


Fig. 1 Effect of irradiation dose on swelling rate and surface hardness of surface crosslinked silicone rubber.

2-2. 繊維状素材の吸着効果

量子ビームを用いたグラフト重合は、汎用の素材の特性を保持したまま、目的の機能を付与できる特長を有している。その利点を活用し、比表面積の大きい細い繊維状素材を基材として適用すれば、粒子状素材と比較して対象物を高速に取り除くことができる。吸着材として利用する場合、材料には高速通液のほか、対象物に対して選択性が高く、高容量であることが求められる。我々はこれまでにこの特長を活かし、対象となる金属に対して選択性のある低分子の吸着官能基を繊維に固定化した様々な吸着材を開発してきた。

一般に低分子化合物の吸着選択性は、グラフト重合により高分子基材に固定化しても、そのまま性質を保持できると言われている。しかしながら、クラウンエーテルのように、吸着基自体が大きい場合、固定化することで自由度に制限が出て、アフィニティーが著しく低下することがある。そこで、私たちはアフィニティーを維持した高分子吸着材を開発するため、溶媒抽出剤の選択性が高いという性能に着目した。溶媒抽出剤は、原子力産業で多く使われており、油及び水中で安定な構造をとる必要があり、構造上余計な側鎖が含まれていないケースが多い。一方、側鎖がないと結合部位が少ないため、グラフト重合には極めて不利である。それは、グラフト重合に利用できるモノマーには、基材と化学結合するビニル基などの結合部位を有していることが望ましいからである。ここで、私たちは、溶媒抽出剤として有望な 2-エチルヘキシル 2-エチルヘキシルホスホネート (EHEP) の長鎖アルキル基に着目し、この部位を利用した固定化法を検討した。まず、このアルキル鎖と高分子基材を固定化するため、基材側の足場となる側鎖に疎水性の高いメタクリル酸オクタデシルをグラフト重合により高分子化し、EHEP の長鎖アルキル基との疎水性相互作用による固定化を図った。その結果、EHEP の欠落がない状態で固定化できたことに加え、EHEP がもつ初期の吸着選択性を維持できることがわかった。得られた EHEP 型の吸着材を用いた評価では、希土類元素の一つである Dy の選択性を向上させることが可能となった。

次に、使用済燃料の再処理工程で発生する廃溶媒中の核燃料物質 (Th、U) を分離する目的で、予め対象金属を吸着材中に吸着させた状態で架橋重合させ、金属に適した鑄型構造を取り入れた吸着材の開発を進めた。例えば、酸性水溶液中に溶存する Th を対象にした高選択な吸着材の開発では、吸着材の骨格となるグラフト鎖と吸着基の両機能を備えた 2-ヒドロキシエチルメタクリル酸リン酸をモノマーとして選定し、このモノマー溶液中にトリウムイオンと 5%ジビニルベンゼンを混合させた状態でγ線を照射した。重合後は、高分子鎖中に取り込まれた Th を酸で抽出した後、Th(IV)/U(VI)の共存溶液で評価した。その結果、対象とする酸性条件下で Th(IV)は U(VI)に対して 10 倍の選択性を有することがわかった。また、同様の手法により吸着基と架橋密度を制御することで、Cu と Pb を分離できる結果も得られている (Fig.2)。

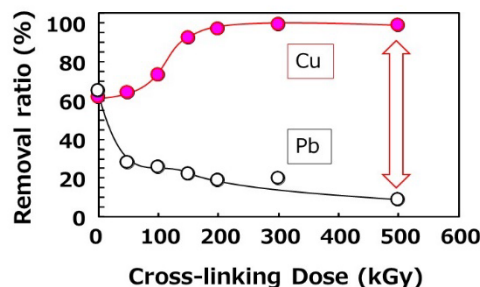


Fig. 2 Removal ratio of Cu^{2+} and Pb^{2+} from crosslinked amine-type adsorbents of various degrees.

3. グラフト鎖と吸着構造の評価

Cr(VI)を対象にした吸着材開発において、吸着基としてアミド型誘導体を選定することで、Cr(VI)六価クロムを吸着除去するだけでなく、吸着材内で無害な Cr(III)に還元させることができた結果がある。この吸着材の構造を把握するためには、汎用の分析機器では得られる情報が少ないことから、Cr(VI)を連続して通液しながら吸着している状態で、放射光 XAFS を用いて吸着時のその場観察を行った。その結果、Cr の価数が徐々に変化し、吸着 1 時間以内に還元されていることを突き止めることができた。

そのほか、福島復興に貢献するために開発した Cs 捕捉用の吸着材開発において、Cs の選択性を評価する手段として、Cs のポジトロン放出核種である Cs-127 を製造し、PET 撮像により評価した結果についても併せて紹介する。

*Noriaki Seko, Yuji Ueki and Hiroyuki Hoshina

QST Takasaki.

加速器・ビーム科学部会セッション

量子ビーム科学における高分子材料の展開

Polymer Material Development and Application in Quantum Beam Science

レーザー駆動イオン加速研究における固体飛跡検出器の利用

Application of Solid State Nuclear Track Detectors for Laser-driven Ion Acceleration Experiments

*金崎 真聡

神戸大学大学院海事科学研究科

1. はじめに

CR-39 に代表されるエッチング型固体飛跡検出器は、中性子個人被ばく線量計や宇宙線計測用素子として用いられている。特に、X 線や電子線に感度を示さず混成場においてもイオンのみを検出可能であるという特性を生かして、レーザー駆動イオン加速研究に幅広く適用されている。高強度レーザーと物質の相互作用によるレーザー駆動イオン加速研究では、近年、レーザーの高強度化やターゲットの改良に伴い、100 MeV に迫る陽子線や高エネルギー重イオンの加速に成功している。理論研究においては、様々なイオン加速メカニズムが提唱されており、例えば、固体薄膜を利用するシース場加速では、従来型加速器では到達不可能な $\text{MV}/\mu\text{m}$ ($=\text{TV}/\text{m}$) 程度の加速電場が生成するとされている[1]。その他、放射圧や衝撃波による加速メカニズムを利用すればサブ GeV 級のイオン加速が可能とされており、レーザー駆動イオン加速による加速器装置の大幅な小型化、省エネルギー化が期待される[2,3]。

その一方で、レーザー加速イオンの計測手法については、未だ確立されたものが少ない。これは、レーザープラズマ中でイオンとほぼ同時発生する高エネルギー電子線や X 線が検出器に対して深刻なノイズとなり、通常の加速器ビーム診断等に用いられる検出器の多くが適用困難となるためである。加えて、発生するイオンのエネルギースペクトルは加速器のように単色ではなく幅広い白色スペクトルであること、使用するターゲット物質によっては複数のイオン種が同時加速されることも一因である。しかしながら、より高エネルギーかつ高品質なイオンビーム発生のためには、加速メカニズムを明らかにすることが重要であり、そのためには、加速されたイオンのエネルギースペクトルや空間分布を高精度に評価する必要がある。

2. 固体飛跡検出器を用いたレーザー加速イオン計測

レーザー加速イオン計測において重要なことは、エネルギースペクトルを明らかにすることとイオンの空間分布を明らかにすることである。即ち、イオンのエネルギースペクトルを二次元的に計測する必要がある。そこで、一つ一つのイオンの飛跡を化学エッチング処理により、エッチピットとして光学顕微鏡下において観察可能な程度に拡大するエッチング型固体飛跡検出器は、エッチピットの分布からイオンの空間分布を明らかにできるだけでなく、エッチピット開口部形状からそれぞれのイオンに対して入射エネルギー等の情報を得ることができるため、先述のように、レーザー加速イオン計測に幅広く適用されており、最も信頼性の高い検出器として利用されている[4]。

例えば、レーザー加速陽子線の計測には、エッチング型固体飛跡検出器の中で最も感度が高いポリアリルジグリコールカーボネート（商品名：CR-39）に階段状のエネルギーフィルターを組み合わせた計測が実施されており、高精度なエネルギースペクトル計測に成功している[5]。また、CR-39 と適切な散乱体を積層したスタック型検出器が開発されており、特に高エネルギー陽子線の発生が期待される水素クラスターターゲットを用いたイオン加速実験に用いられている。また、固体薄膜であるグラフェンを用いたイオン加速実験では、閾値の異なる検出器を組み合わせた計測が行われている。グラフェンは炭素のみから構成されているが、加速されるイオンは炭素イオンのみではなく、表面に不純物として付着している水に由来する陽子線や酸素イオンも同時に加速される。そこで、最大 20 MeV の陽子線飛跡をエッチピットとして可視化するタイプの CR-39 に加え、炭素イオンより重いイオンにのみ感度を示すポリカーボネートと酸素イオンより重いイオン

にのみ感度を示すポリエチレンテレフタレートを組み合わせた計測が行われ、複数のイオン種が同時に加速される場において、陽子や酸素イオンに比べて炭素イオンが優位に加速されていることが示された[6]。

一方で、写真フィルム的一种であり、放射線の飛跡を現像によって可視化する原子核乾板もレーザー加速イオン計測に適用されている。原子核乾板はエッチング型固体飛跡検出器と異なり、電子線の飛跡も可視化されることから、レーザー駆動イオン加速実験に適用するためには、その感度を調整する必要がある。これまでに、現像条件により感度を調整することで、水素クラスターターゲットから加速された陽子線のエネルギースペクトル取得に成功しており、CR-39 による計測結果と良い一致を示している[7]。また、CR-39 では計測不可能な数百 MeV 級の陽子線の飛跡も可視化されることから、原子核乾板と散乱体を積層したエマルジョンクラウドチャンバーを用いたレーザー加速陽子線計測手法も開発中である。

本発表では、固体飛跡検出器の基本特性を説明するとともに、レーザー駆動イオン加速実験における固体飛跡検出器の適用例をいくつか紹介する。

参考文献

- [1] A. Macchi et al., Rev. Mod. Phys. 85, 751 (2013).
- [2] A. Higginson et al., Nat. Commun. 9, 724 (2018).
- [3] R. Matsui et al., Phys. Rev. Lett. 122, 014804 (2019).
- [4] M. Kanasaki et al., (2020) Progress in Ultrafast Intense Laser Science XV. Topics in Applied Physics, 136. Springer, Cham.
- [5] M. Kanasaki et al., High Energy Density Phys. 37, 100852 (2020).
- [6] T. Hihara et al., Sci. Rep. 11, 16283 (2021).
- [7] T. Asai et al., High Energy Density Phys. 32, 44-50 (2019).

*Masato Kanasaki

Kobe Univ.

Planning Lecture | Board and Committee | Standards Committee

[2D_PL] Organizing the roles and relationships in codes and standards

Interorganizational cooperation to use risk information

Chair: Akio Yamamoto (Nagoya Univ.)

Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room D

[2D_PL01] The role of the AESJ standards in hierarchy of codes and standards

*Yoshiyuki Narumiya¹ (1. SC)

[2D_PL02] Role of the Japan Electric Association in the Standards for Nuclear Power Plant Operations

*Hiroaki Abe¹ (1. UTokyo)

[2D_PL03] Collaboration among the stakeholders on codes and standards

*Kenta Murakami¹ (1. UTokyo)

[2D_PL04] Discussion on specific future efforts

Akio Yamamoto¹, Yoshiyuki Narumiya², Hiroaki Abe³, Kenta Murakami³, Keiji Matsunaga⁴, Haruko Sasaki⁵, Yasunori Yamanaka⁶ (1. Nagoya Univ., 2. SC, 3. UTokyo, 4. TOSHIBA ESS, 5. NRA, 6. ATENA)

標準委員会セッション

規格基準類における役割と関係の整理 —リスク情報の活用に向けた組織間の連携—

Organizing the roles and relationships in codes and standards

- Interorganizational cooperation to use risk information -

(1) 規制基準、民間ガイドとの関係における標準の役割

(1) The role of the AESJ standards in hierarchy of codes and standards

*成宮 祥介¹¹標準委員会

1. はじめに

学協会の規格・標準が制定され活用されてから、およそ 20 年が経過している。この間、3 つの学協会（日本機械学会、日本電気協会、日本原子力学会を指す。以下、学協会）から数多くの規格・標準が制定、発行されてきた。日本原子力学会標準委員会では、原子力施設の安全性・信頼性を高い水準の技術に基づき効果的かつ効率的に確保する観点から、これまでに延べ 103 件の標準（うち、英語版は 5 件）と 10 件の技術レポートを発行している。しかし、原子力施設の安全には、学協会規格だけでなく、規制基準と、さらに ATENA、JANSI、NRRC などの民間ガイドと学協会規格との整合の取れた関係が必要であると考え。本稿では、基準、規格、ガイドの間の階層構造の関係性の意義をあらためて検討し、今後の規格基準の望ましい関係性を描き、その中で原子力学会標準の役割を明確にする。

2. 法令と学協会規格の関係性

2-1. 原子力の法令体系

憲法を頂点として法律、規則、命令という階層構造をなしていることは、広く理解されている。これは、頂点には根本規範が、底辺には具体的執行行為があるという形態上の構成構造であるとの解釈もできる。社会における諸活動の複雑さから、憲法やいくつかの法律だけでは行動規範として不十分であり、詳細なルールを決める必要性があった、という局面もあると考える。同様に、原子力の法令、規格などの構造は、原子力基本法 の精神にのっとり、原子力規制に必要な法律、そして規則などが定められている。

2-2. 学協会規格の構造

一方、学協会は、研究、開発、製造、管理などの現場の状況を的確に議論に反映できる専門家が集い、最新の知見・技術を結集できるものとして規格を策定している。平成 30 年に原子力関連学協会規格類協議会が発出したステートメント[1]によると学協会規格の意義は次のように述べられている。

- ① 学協会規格協議会を構成する各委員会は、学協会規格策定プロセスの公平、公正、公開の原則の下、参画する委員のコンセンサス及び公衆審査を経て学協会規格を策定することとしており、これを安全性向上に役立てることは我が国の共通の利益と考えています。
- ② 各学協会は、それぞれの分野における専門家の集団であり、我が国の最高レベルの学術的知見と技術を結集し、最新の知見を学協会規格に適時かつ適切に反映しており、最新レベルの学術的知見・技術の活用において中心的な役割を果たしています。
- ③ 学協会規格は安全性向上に資する知恵の体系であり、規制は、学協会規格の迅速な利用により安全規制の高度化を図ることができ、また産業界は、現場の状況等を適切に反映した学協会規格の活用により効果的かつ効率的に自主的安全性を向上させることができます。

学協会規格の構造において、二層構造の考えが示されている。たとえば、原子力学会標準委員会の標準には、基準と指針の二種類を設定している。「基準」は原子力安全確保にかかる活動を適切に実施するために必要な要求事項、実施方法等を規定し、「指針」は要求事項を定める段階にないもの、と説明[2]されている。また、電気協会には JEAC（電気技術規格）と JEAG（電気技術指針）が制定[3]されている。

3. 規格構造において重視すべき点

3-1. 規格間の関係

本稿では、これらの階層構造の形に注目するのではない。原子力に限らず一般的な法体系を描く際に、ピラミッド型で下位の規定が上位の規定に従った形式で表現されることは多い。「上位」「下位」という静的な概念ではなく、重要な点は相互に影響しあう要素がある、という点である。IAEA の Safety Standards は Wheel チャート[4]の形式で基本原則 SF-1 を中心に径方向に要求、ガイドと並べられている。これにならい「径方向の関係」と呼ぶこととする。そして学協会規格が扱う専門分野は広く多岐にわたるが、それらが完全に独立して、研究、開発、管理などの現場で進められていることはない。たとえば、リスク評価は計算するために行っているわけではなく、その結果からの知見を用いて設計や管理に活用することを目的とし、逆に設計や管理の実態を入力条件としてリスク評価を行っている。また、配管などの腐食管理においては、設計における材料管理はもとより、水化学管理、システムの運転管理など多くの使用状況を踏まえて設定されており、必要な事項を学協会規格などに規定している。このような関係をここでは「周方向の関係」と呼ぶ。

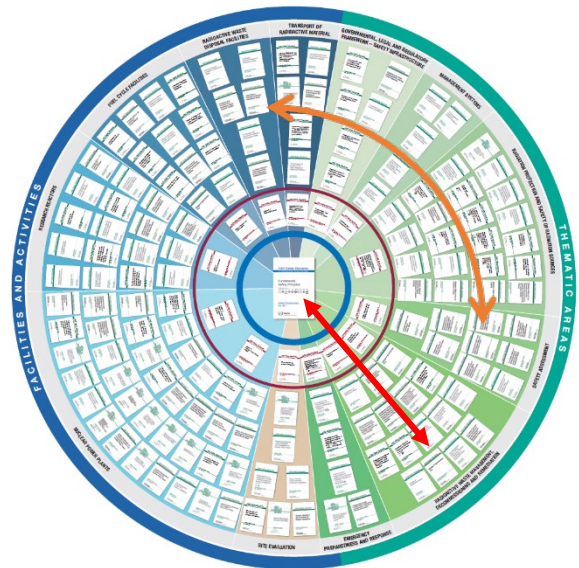


図1. IAEA 安全基準ホイールチャート

本稿でこの2つの関係性から、より有効で効率的な学協会規格の在り方を考える。なお具体的な例示を原子力学会の標準に則り説明する。ここで原子力学会は規格と称せず「標準」という表現を用いている。これは、規範的な規格のみならず、より基本的な概念や考え方で含めて議論の対象とするためである[5]。

3-2. 径方向の関係

まず「径方向の関係」について考察する。標準には大きくみて、次の2つのパターンに分けられる。

- ・仕様規定として方法を規定している標準（例：水化学管理指針）
- ・基本的な考え方や手順を規定している標準（例：リスク情報を活用した統合的意思決定(IRIDM)実施基準）。

原子力学会の標準も含めて、学協会規格は、公平、公正、公開の原則に基づき議論し公衆審査を経て発行するものであり、学界、事業者、産業界だけでなく、規制の意見や見解も反映していくものである。学協会が規格策定において原則としている「公平」にその精神が表現されている。公平な関係性の中で、規制基準と学協会規格との関係は、原子力事業が許可認可の仕組みに基づくものであることから、重要である。規制委員会は、性能規定化された規制要求に対する容認可能な実施方法として学協会規格をあらかじめ評価することは規制審査の効率化に役立つ[6]としている。このことは、学協会規格の中から規制要求の仕様として使えたと規制機関が判断するものを「技術評価」により用いる、ということと理解する。ここで誤解があってはならないことは、規制機関の技術評価にならなければ学協会規格として成立しないということではないことである。規制委員会の文面にも学協会規格を性能的な規制基準の仕様として定めることは記載されていない。そして、たとえば電気協会の原子力規格委員会の説明[3]にも、国が技術的な妥当性を評価したうえで規制に活用することがある、と記載されている。

しかし、規制基準の要求事項を全く無視して学協会規格を作成することは学協会規格策定の原則に反するものである。規格標準の対象とする活動により規制要求との距離が異なるので、必ずしも、すべての規格が規制との直接的な受け皿になる必要はないが、原子力安全の基本的な規範を規定している規制基準は内容を十分に理解し規格策定をすることは言うまでもない。

以上より、規制基準の「径方向の関係」と学協会規格のそれとは、それぞれ独立して存在すべきものであり、規制基準の下位に位置付けられる受け皿としての役割を学協会が担っているわけではない。とくに原子

力学会の標準は、原子力安全の基本的な考え方も含めていることから、具体的な方法などを規定している学会標準、他の学協会規格、さらに規制基準にも影響を与えるものである。たとえば、技術レポートとして発行している「原子力安全の目的と基本原則」[7]は規制機関、事業者、研究機関、プラントメーカー等、すべての関係組織とその活動が対象である。また検査制度や継続的安全性向上の議論で取り上げられている IRIDM 標準[8]は、全ての組織が行う意思決定において共通的に用いることのできる標準である。

ただし、実際の活動には、基本的な考え方や共通的な手順を規定した標準では不足することがある。必要に応じて具体的な活動を規定した規格が必要となる。これについては、水化学管理指針（PWR 一次系、PWR 二次系、BWR）の標準があり、それを受けて具体的な分析方法の標準を配している構成になっていることが例である。また、未だ標準委員会で議論を進めているものであるが、“原子力施設の廃止措置の基本安全基準”を定め、それを受けて廃止措置計画の策定や安全評価などの標準を制定していく構想が示されている。さらに、PRA（確率論的リスク評価）の標準については、2017 年から基本的な要件を規定した基準と具体的な方法を規定した指針に分けることが検討されてきている。これは PRA の特徴として、目的に応じたパラメータ設定や条件設定を柔軟に行うことがあり、唯一の方法を規定し、それ以外を認めないこととしてしまうと、様々な目的への PRA 活用を阻害してしまうおそれがあると考えたからである。現在、標準委員会でレベル 1 PRA 標準の改定の議論が進んでいるが、その完成により、新しい発想の方法論を標準化できることに期待する。このように、規格の「径方向」の階層構造には、実務の経験や目的を直接かつ柔軟に規定化できるという利点もある。

3-3. 周方向の関係

周方向、つまり分野間およびテーマ間の関係について考察する。たとえば、リスクインフォームドの耐震設計については、電気協会の原子力規格委員会耐震設計分科会にて JEAC4601 の改定として議論されている。しかし、ここで言う「リスクインフォームド」とは、地震 PRA の結果を使い耐震設計の妥当性を判断することではなく、地震 PRA から得られる地震ハザード評価や設備 fragility 評価からの知見を耐震設計プロセスの適所の判断に用いること、さらにプラント全体のシステム設計への考慮も含む。そのような活動を行うには、原子力学会から地震 PRA の専門家も参加し規格を議論するか、あるいは耐震設計分科会と地震 PRA 作業会から少人数参加の WG を設け、地震に耐えられる設計だけでなく耐震安全を達成するための議論を行う、といった連携活動が必要であると考ええる。これには地震工学会と原子力学会標準委員会が協働で作成した「地震安全の基本的考え方」がベースになる。重要なことは PRA 標準を渡して説明し使うことを求めることではなく、両者（この場合は PRA 標準と耐震設計技術規程）の融合を如何なるコミュニケーションで進めるか、ということになる。

4. 原子力学会標準の役割

径方向と周方向の両方で、規制基準と規格の連携が重要であることを、上記で示した。これらが具現化されていけば原子力施設の安全確保、信頼性向上に繋がっていくと考えるが、標準は其中で更に重要な役割を果たすことができる。先に述べたように標準は基本的な考え方についても記載している。そのことから、径方向にも周方向にも、共通的な基盤として用いることができる。上述の、基本安全原則や IRIDM 標準は径方向にも周方向にも、基盤的役割を担えるものである。たとえば、IRDM 標準を受けて、リスクインフォームドの保守管理規程を策定することも有効である。PRA の結果から保守管理の方法を改良したとして、その成果を監視し問題が発生、あるいは予想した成果が出ない場合には改善策を検討する際に IRIDM のプロセスを適用する、という内容が考えられる。ただし、このような内容は個々の施設で決めたほうが良いということであれば学協会規格ではなく、民間ガイドラインを活用することも可能と考える。今回の標準委員会企画セッションでは別稿で事業者から民間ガイドラインの説明があるため、本稿では触れないが、学協会規格と民間ガイドラインとの間で十分なコミュニケーションが行われた上での分担で進めていけば、全体として使いやすいものとなると考える。

2020 年 10 月 13 日に開催された米国 NRC の Standards Forum (Webinar) では、「RIPB（リスクインフォームド・パフォーマンスベースド）における規格基準の調和」[9]というテーマが議論されている。複数の規格策定組織 (Standards Development Organizations : SDO) の関与の必要性が提案されており、我が国においても、

リスクインフォームドの取り組みや活動の基礎となる品質マネジメントなどの効果的な実現に、学協会の協働が必要であると考えます。

5. まとめ

学協会規格構造と規制基準の構造を、階層的な視点から分析した。そして、今後必要になる「連携」について必要な取り組み事項としてコミュニケーションを挙げた。さらに原子力学会の標準は、技術的な基盤として活用することができることも示した。1F事故後の10年を経て、今後その先の10年、20年を考えると、技術基盤を提示していく役割を担う学協会規格策定の会議体が協働していくことが、必須である。

参考文献

- [1] 原子力関連学協会規格類協議会“原子力安全の向上に向けた学協会活動の強化～事業者の自主的安全性向上の取り組みを前提とする検査制度見直しを踏まえて～”平成30年3月8日
- [2] 日本原子力学会“標準委員会の活動基本方針”平成30年6月6日
- [3] 日本電気協会ホームページ“電気技術規定・電気技術指針” <https://nusc.jp/jeacinfo.html>
- [4] IAEA, “Safety Standards” <http://ns-files.iaea.org/standards/safety-standards-wheel-poster.pdf> (2022年2月6日)
- [5] 日本電気協会、第7回原子力規格委員会シンポジウム講演資料 p.23、“標準委員会の規格策定に向けた取り組みと今後の戦略” https://nusc.jp/jea_sympo7.pdf (2022年2月6日)
- [6] 原子力規制委員会“原子力規制委員会における民間規格の活用について”平成30年6月6日 <https://www.nsr.go.jp/data/000234253.pdf> (2022年2月6日)
- [7] 日本原子力学会“原子力安全の基本的考え方について 第I編 原子力安全の目的と基本原則 (AESJ-SC-TR005:2012)”
- [8] 日本原子力学会“原子力発電所の継続的な安全性向上のためのリスク情報を活用した統合的意思決定に関する実施基準：2019, (AESJ-SC-S012：2019)”
- [9] NRC, 2020 Standards Forum “Harmonization of Codes and Standards under Unified Risk-Informed and Performance-Based Principles” <https://www.nrc.gov/docs/ML2028/ML20282A560.pdf> (2022年2月6日)

*Yoshiyuki Narumiya¹

¹Standard Committee

標準委員会セッション

規格基準類における役割と関係の整理 ―リスク情報の活用に向けた組織間の連携―

Organizing the roles and relationships in codes and standards

- Interorganizational cooperation to use risk information -

(2) 学協会規格の体系における電気協会の取組

(2) Role of the Japan Electric Association in the Standards for Nuclear Power Plant Operations

*阿部弘亨^{1,2}¹ 東京大学 ² 日本電気協会原子力規格委員会幹事

1. はじめに

日本電気協会では、原子力発電の保安及び関連する公衆の安全に資するため、1966年に電気技術基準調査委員会 原子力専門委員会を発足させ、2000年に原子力規格委員会（現委員長：東京大学 越塚誠一）へと改組させ、民間規格の策定活動を行っている。電力会社、メーカー、学術機関等、すべてのステークホルダーからの参画を得てこれまでに規定（JEAC）28規格、指針（JEAG）31規格を策定した実績を有する（2021年11月現在）。本稿では、日本電気協会原子力規格委員会（以降、電気協会と略す。）の取り組みについて、その考え方、位置づけとリスク情報活用等について報告する。

2. 電気協会における規格策定の基本的考え方

原子力発電にかかる安全要求を図1に示されるような階層構造で考えることは良く知られている。最上位の安全原則は国の法律に該当し、基本原則を規定する。この原則に基づき種々の機器等の機能に対して求められる機能要求があり、これを適えるための性能規定がある。さらに仕様規定は要求される性能を達成するための具体的な仕様であり、さらに容認可能な実施方法によって構成される。そして上層を規制監督庁が、下層を民間規格等が担う。

電気協会は、この階層構造の中で主として仕様規定および容認可能な実施方法に相当する規格を策定してきた。中にはJEAC4111のように性能規定に該当する規格もある。

原子力発電は従前より非常に広範な分野にまたがる総合工学であったが、福島第一原子力発電所事故以降急激にその範囲は広がっている。電気協会では、この広範かつ総合的な工学分野を、安全設計、構造、原子燃料、品質保証、耐震設計、放射線管理、運転・保守の7つの分科会に分け、規格の策定活動を行っている。2020年の実績では、規格委員会および傘下の分科会、検討会を含めた委員会の開催実績は計175回、委員延べ数932名、常時参加者数102名（規制庁は含めず）となっており、ボランティアベースの活動にもかかわらず非常に大型でかつ活発といえる。

電気協会は、このような大きな組織体を支障なく運営し、公平、公正かつ効率的に規格策定をするために以下の原則に則って活動している。

- I. 公衆の安全・健康・福祉のために活動し、これらを最優先に考えて知識及び技術を用いる。
- II. 専門家として事実を尊重し、公平・公正に判断し、偏見なく忠実かつ正直に活動する。自己の専門能力の限界を正しく認識し、能力を適切に発揮することによって公衆に危害を与えないように努める。関係者の利害関係の相反の回避に努める。
- III. 専門能力及び委員会の名声を向上させるよう努め、委員としての名誉を汚す行動を慎む。

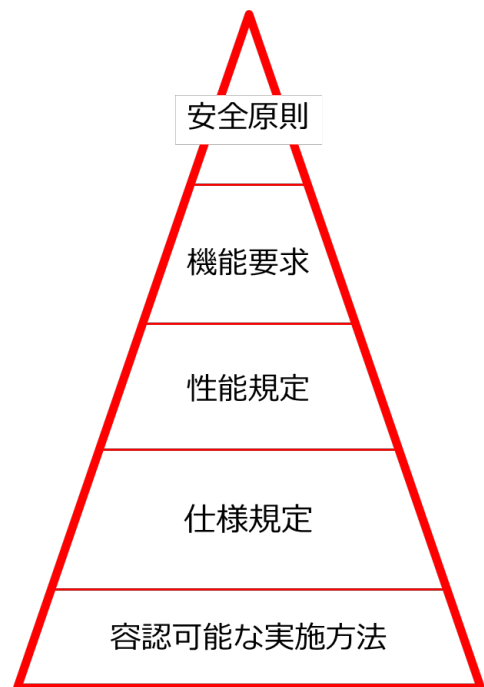


図1. 安全要求の階層構造

IV. 自らの専門能力の向上、他の関係者への知識の普及、及び円滑な世代交代に向けた人材育成に努める。

さらに上記の原則に基づき、規格の公平性、公正性、公開性の一層の強化を図るため、以下の項目を重要視し組織の改善活動を行っている。

- ・安全性向上を図る規格の制改定
- ・ステークホルダーとのインターフェイス
- ・検査制度見直しへの対応
- ・規制による技術評価への対応
- ・最新知見の迅速な反映
- ・公平性、公正性、公開性の一層の強化
- ・ピアレビューの導入
- ・技術倫理の徹底
- ・誤記をなくすための取り組み

3. 外部組織との関係性

尚、上記の基本的な考え方や重要視項目については独自のものだけではなく、様々な機関との相互作用によって年月をかけて醸成されたものである。特に最近では、原子力関連学協会規格類協議会、機械学会、原子力学会、電気協会の連名で以下のステートメントを発している。（以下、ステートメントという。）

- ・「原子力安全の向上に向けた学協会活動の強化」（2012年3月29日）
- ・「原子力安全の向上に向けた学協会活動の強化～事業者の自主的安全性向上の取組みを前提とする検査制度見直しを踏まえて～」（2018年3月8日）

電気協会は学協会規格類協議会ステートメントに沿った規格策定活動を進めており、規制当局及び事業者のニーズの把握を今後更に積極的に進めている。

当日は電気協会の規格策定活動の全体像、他機関との相互作用について概観し、規格の質向上に向けた取り組み、リスク情報活用に関する活動について報告する。

* Hiroaki ABE^{1,2}

¹The University of Tokyo

²Secretary of Nuclear Standards Committee, The Japan Electric Association

標準委員会セッション

規格基準類における役割と関係の整理 —リスク情報の活用に向けた組織間の連携—

Organizing the roles and relationships in codes and standards

- Interorganizational cooperation to use risk information -

(3) 学協会とステークホルダーの連携事例

(3) Collaboration among the stakeholders on codes and standards

*村上 健太

東京大学

原子力学会標準委員会が 2020 年に発刊したリスク情報活用の基本理念に関する標準は、様々な学協会規格やガイド類で引用され始めている。本稿では、既設炉の安全性向上における重要課題を取り上げて、リスク情報活用に関する規格類の連携の状況を分析し、良好事例と課題を抽出し、知識の標準化という観点からステークホルダーの連携に関する私見を述べる。

キーワード：Integrated risk-informed decision-making, 長期運転, 新知見, オンラインメンテナンス

1. はじめに

本稿では、リスク情報の活用という観点から原子力業界にとって重要な四つの事例を取り上げて、規格類の策定においてどのように学協会が連携したかを振り返る。事例をもとに、組織間の役割分担について議論するだけでなく、リスク情報を活用した統合的な意思決定 (Integrated risk-informed decision-making) の理念に基づき、ステークホルダーの分析や、標準化において重視すべき要素の抽出を試みる。

2. リスク情報活用の基本理念の標準化

日本原子力学会標準委員会(AESJ)では 2016 年にシステム安全専門部会の下に統合的安全性向上分科会を設置し、リスク情報を活用した意思決定プロセスの標準的な実施基準を検討し、2020年に「原子力発電所の継続的な安全性向上のためのリスク情報を活用した統合的意思決定に関する実施基準」(IRIDM 標準)を発刊した。この分科会は従来の定期安全レビュー分科会を改組して構成されたが、リスク評価の専門家が委員や常時参加者として拡充されると共に、標準内のリスク評価に関する部分についてリスク専門部会の下に置かれた PRA 品質確保分科会が分担する形で制定された。これは AESJ 内部における連携の良好事例である。

IRIDM 標準は、業界内で確立されている良好事例を包絡する形で取り纏めたものというより、国際的なリスク情報活用の動向を把握して、先見性を持って幅広いステークホルダーの拠り所となるものを規定することに努めたものである。INSAG25 や IAEA-GSR part 2, 米国の良好事例等がレビューされ、どのように国内の業務慣習と調和させられるか検討した。使用者を原子力事業者に限定せず、規制機関やプラントメーカが主語となっても本文規定が成立することを確認した。INSAG25 が解決することが難しい複雑な問題を主たる対象としているが、IRIDM 標準はあらゆるリスク情報活用に適用することを目指した。最初はドラフト執筆者の間でイメージを共有することに苦労したが、相互に意見を交換しながら合意点を探る作業を繰り返して完成させた。

同時期に日本電気協会原子力規格委員会(JEA)ではマネジメントシステム規定 (JEAC4111) 等の改訂が行われていた。ここでは、単に品管規則の改訂を反映させることなく、GSR-part 2 の制定に至った議論等をレビューして必要な項目を日本のマネジメントシステムに織り込むことが目標とされていた。AESJ と JEA の間で公式の意見交換は行われなかったものの、個人レベルでは相互に検討内容を共有することができた。これは、コアメンバーが原子力安全推進協会(JANSI)に集中していたこととも関係している。

なお、IRIDM 標準は意思決定プロセスの標準であり、PRA の結果は判断材料の一部である。ISO9001 や ISO31000 の文脈においてリスクは「不確かさの影響」と定義されており、具体的な問題に対して不確かさの影響を織り込みながら判断を行う方法論が規定されている。INSAG25 において判断材料はキーエレメントと

呼ばれており、その一番目は「規制規則や規格基準類」である。事業者と規制機関は、それぞれ意思決定を積み重ねることによって業界規格や規制基準を築き上げてきたとのことであり、IRIDM プロセスは互いに相手の意思決定を尊重し合うことを前提としている。そのうえで、判断が難しい問題を解決するためのプロセスをIRIDM 標準は丁寧に規定している。

3. 長期運転を実現するための学協会の連携

AESJ システム安全専門部会は2020年に長期運転体系化タスクを設置し、将来的な長期運転（60年超運転も含む）の実現のために必要な標準類が整備されているかの検討を行った。この検討の発端はPLM分科会の所掌する「原子力発電所の高経年化対策実施基準」（PLM 標準）において、IAEA-SSG48相当のマネジメントの考え方を取り込むべきではないかとの議論である。PLM 標準は、JEA のマネジメントシステム規定（JEAC4111）及び保守管理規定（JEAC4209）と併用されるため、マネジメントの考え方をPLM 標準に織り込むためには電気協会との意見交換が不可欠であった。そこで、JEA 品質保証分科会、JEA 運転・保守分科会、AESJ PLM 分科会、AESJ 統合的安全性向上分科会から参加者を募って、計6回の議論を行った。

AESJ 側は国内の長期運転関係の規制規則類及びそれに対応する民間規格や事業者ガイドを網羅的に調査し、それをIAEA が推奨する定期安全レビュー型の長期運転体系と対比させて、過不足を検討する作業を実施した。これは米国のIRRS ミッションにおいてUSNRC がライセンスリニューアル制度の妥当性を説明した手法りに倣ったものである。一方、JEA からは大詰めを迎えていたJEAC4201、JEAC4209、JEAG4210の改定作業において国際標準等を（ドラフトの段階のものも含め）どのように織り込んだか丁寧にご紹介頂いた。

IAEA-SSG48 は、経年劣化の評価と施設管理の両方の側面を含む国際標準であり、日本ではPLM 標準とJEAC4209の両方に、その内容が分散して標準化されている。分散していることの問題は一定程度認められるものの、これらの規格はどちらもエンドース経験があり、業務慣行を考えると両者を統一した標準を作るような改定は弊害が大きいと判断された。したがって、タスクではプラントが長期運転の期間を踏まえても技術基準規則のすべての項目を満足していることを合理的に示すために必要な方策を提言するに留まった²⁾。

JEA と AESJ の共同作業の結果、具体的な提言には盛り込まれないものの明らかになったことも多くある。まず、能動的な意見交換を行うには、対等な立場は意識するものの、いずれかの機関が目的意識（例えば標準改定に必要な情報収集）をもって強いイニシアティブをとる必要がある。長期運転という観点で網羅的に規格類やガイドを確認していったところ、被引用側が認識していない引用関係も発見された。引用関係や参考図書としての言及に関する情報を一元的に把握する仕組みには検討の余地がある。「体系化」と大上段に構えると相互に警戒感が生まれるので、まずは「勉強会」的なアプローチから始めるのも一案である。

こうした学びも踏まえて、長期運転に関係した米国の取り組みを網羅的に理解して標準に取り込むための「第二期長期運転体系化タスク」がシステム安全部会によって承認され、今年から活動を開始している。

4. 新知見の反映とリスクマネジメント

ISO-9001 においてリスクは「不確かさの影響」と定義されており、「期待されていることから、好ましい方向又は好ましくない方向に乖離すること」と説明されている。既設炉の安全にかかる問題を解くには、許認可取得時の知見に照らして安全とされた判断された問題を再び取り上げ、運転期間中に得られた新しい知見によって不確かさを再評価し、安全性が検証された範囲を再設定するというプロセスである。必ずしもPRAを利用する訳ではないが、IRIDM 標準のプロセスに従うことで、効率的に処理することができる。特に、原子力発電所の高経年化対策実施基準（PLM 標準）や経年劣化予測に使用される規格類の改訂においては、IRIDM プロセスを意識することが有用である。

IRIDM 標準はINSAG27 が推奨する構造を意識しながらコミュニケーションや文書化、専門家や第三者の活用に係る要件等を規定している。INSAG27 は堅牢で深層的なステークホルダー構造を活用して安全性を向上させることを提案している。この構造の主要なサブシステムは産業界及び規制機関におけるピアレビューであるが、例示されたステークホルダーには非政府組織及び「原子力に特別な関心を寄せるグループ」も含まれる。これらステークホルダーからの挑戦(Challenge)に対してきちんと説明責任(Accountability)を果たすことは、組織文化の特徴を踏まえながら着実に安全性を向上させるために大切である。例えば、米国における

原子炉監視プロセスの導入に当たっては、このカテゴリーに分類される専門家が大きな貢献を果たした。

原子炉圧力容器の照射脆化管理は長期運転のために重要な項目の一つだが、対象機器が重要であることに加え、劣化現象自体が材料科学や固体物理学の研究テーマとして興味深いこともあり、幅広い関係者から注目を集めている。原子力業界に批判的な学者の中には、電気協会の原子炉構造材の監視試験方法 (JEAC-4201) の制定根拠を問い合わせたり、そこに記載されている中性子照射による関連温度移行量の予測式を批評する論文を執筆したりする方もおり、その知見が行政訴訟に繋がっている。事業者団体である電気協会が所掌する規格であることも、JEAC4201 を批判しやすい状況を作ることに一役買っているのかもしれない。

現在進行中の JEAC4201 の改訂は、日本におけるステークホルダーインボルブメントの良好事例になる可能性を秘めており、その発刊に大きな期待を寄せている。この規格は最新の監視試験データと研究成果に基づいて改訂が進められている。これまで同様 JEAC4201 に採用される関連温度移行量の評価式は電力中央研究所 (電中研) の研究成果に基づいているが、今回の改訂プロセスには様々な工夫が見られる。電中研の研究結果はこの分野でもっとも権威ある学術雑誌の一つに査読付き論文として掲載されており³⁾、そこに至るまで何度か学会発表も経ている。また、電中研式を外部評価する委員会が溶接協会に設置され、国内の著名研究者たちによるレビューを受けている⁴⁾。更に、材料研究の性格の強い電中研式をエンジニアが使いやすくなるための改訂が JEA の検討会において提案され、その妥当性が JEA で工学的な観点から審議されるという手順を踏んでいる。

著者は材料照射の専門家でもあるので、JEAC4201 の制定プロセスには迅速性に欠けるのではないかというもどかしさを感じたこともある。しかし、辛辣なコメントを受け付けつつ慎重に定式化を行ったことは、ステークホルダーに対する説明責任を真摯に受け止めていることの証左であり、高く評価するべきだと考える。規格発刊後にこの規格の制定に至る意思決定プロセスがレビューされ、教訓が共有されることを強く期待している。AESJ 側ではその教訓を分析して、IRIDM 標準や PLM 標準の改訂に生かしたい。

5. オンラインメンテナンスの実現に向けた取り組み

オンラインメンテナンス (OLM) の実現は、原子力業界において期待されているリスク情報活用の代表例である。JEAG4210 には「発電用原子炉施設の安全性、電力の供給信頼性を確保しつつ、経済性も考慮した保守管理を実施するためには、『(IRIDM 標準 注 本文中では正式名称)』のプロセス等を参考にリスク情報を活用した意思決定をすることを推奨する」と明記されている。また機械学会の最新の研究報告書の内容も反映している。これらは関連規格及び最新知見の迅速な反映に関する良好事例である。

JEAG4210 の改訂は、新検査制度の導入にも対応している。新検査制度の導入にあたっては複数の規制規則が改訂されたが、OLM との関係で保安規定の審査基準の変更は注目に値する。従来の規制基準 (原規技発第 1306198 号) では、保守管理と運転上の制限に関する記載の両方において「予防保全を目的とした保全作業について、やむを得ず保全作業を行う場合には、法令に基づく点検及び補修、事故又は故障の再発防止対策の水平展開として実施する点検及び補修等に限ることが定められていること」と規定されており、いわゆる OLM を認めないことが明示されていた。現在の審査基準 (原規規発第 1912257 号-4) は、当該箇所の表現が「LCO が設定されている設備等について、予防保全を目的とした保全作業をその機能が要求されている発電用原子炉の状態においてやむを得ず行う場合には、当該保全作業が限定され、原則として AOT 内に完了することとし、必要な安全措置を定め、確率論的リスク評価等を用いて措置の有効性を検証することが定められていること」と変わっている。やむを得ずという表現は残っているものの、表現自体はかなり緩和されており、規制への説明次第では状態監視保全を中核に据えた施設管理が認められる余地があるように読める。

保守管理指針は機械学会の研究成果に基づいて炉心損傷頻度の増分と格納容器機能喪失頻度の増分を判断基準に設定し、基準を満たす機器の OLM を推奨している。同様の数値目標は IRIDM 標準の附属書内でも使用されており数値自体に問題はない。しかし、このアプローチでは規制規則類の要求を満たさない (つまり、保安規定を改定して OLM を導入することが審査基準における「やむを得ない」状態であると見なせない) ので、JEAG4210 の記載は IRIDM 標準の要求事項を満足していない。

現行の規制要求下で“OLM 的な活動”を実現するのは容易でないものの、様々なキーエレメントの組み合わせを考えれば可能性が見えてくる。まず、限界を決めずに安全上重要な機器の可用性を常時モニタリング

する手段を検討する。次に、モニタリングの信頼性を踏まえて、その機器が技術基準規則を満たした状態を維持できる「一定の期間」を大幅に延長した保安規定案を策定する。更に、可用性は損なわれていないものの、その前兆の可能性がある状態を自主的に定義する。一定の期間の延長する機器については、長期間の連続運用経験が乏しいことを踏まえて、トラブルの前兆の可能性を検知した際には AOT 内で保全が完了できることを事前に確認しておく。また、当該機器を停止した場合のリスク増分も予め評価する。加えて、時間基準保全から状態監視保全へ切り替えることによる組織やセキュリティ面での考察も行い、複数の確度から公衆安全への影響を評価すると共に、対策コストや作業に伴う従業員被ばく等も算出する。そして、すべてのキーエレメントを統合して選択肢の優劣を判断する。JEAG4210 は、OLM の利点として「保全作業の実施時期を分散することで、作業量の平準化による作業品質の向上及び作業間の調整ミスによる安全機能の喪失防止が期待できること」等を例示しているので、これらの良い影響は組織に関する考察の項目で適切に組み込むことができる。これらを纏めると、“OLM 的な活動”による稼働率向上を実現するには、米国流のアプローチをそのまま輸入するのではなく、時間基準保全という炉規則の建付けを尊重したうえで、機器のモニタリングを主役とした施設管理の優位性を多基準分析で示すことが必要である。

この事例は、規格類においてデリケートな問題を扱う場合、相互に新刊状況を把握して引用し合うだけでは不十分であり、執筆者同士の緊密なコミュニケーションが必要であることを示唆している。AESJ 統合的安全性向上分科会には施設管理の専門家が限られており、OLM 実施において何がボトルネックになりそうかをイメージしながら標準を書き上げるにはやや力不足であったように思う。AESJ では IRIDM 標準の改定の際に今回の教訓をどのように取りこむか検討する必要がある。JEA 運転・保守分科会の事情は良く分からないが、エンドース経験のある図書の構成や内容を大きく変えることを躊躇する気持ちは想像に難くない。しかし、既存の原子力施設を効率的に運用するための障害となっている問題に正面から取り組むためには、意識的に学協会の壁を取り払う必要があるのは明白である。

6. 学協会規格とステークホルダーの役割分担に関する私見

政策的な意思決定におけるリスク情報の活用をめぐる議論では、伝統的に「知識の生産者は誰か」という問いが重要視されてきた。すなわち、検証可能性の観点から、原子力プラントという「実験室」でのみ取得可能なデータ（例えば、機器の故障率）を利用して政策的な意思決定を行うことには慎重であるべきだという考え方である。この古い問題は、品質マネジメントシステムに関する規制要求によってある程度まで解決することができる。また、PRA をフォルトツリー解析 (FTA) と混同した議論は、きちんと修正する必要がある。PRA は事故進展シナリオの予測に関する多様な知見を統合して形作られてきた安全評価技術であり、事業者の「実験室」から得られた情報だけで作られるのではない。また、確率論を採用することで、不確かさの大きな知見も無視せずに取り込むことができるという利点がある。したがって、PRA に関連した標準は幅広いステークホルダーが獲得した、十分に成熟したものだけではない先導的な研究成果を持ち寄って作るべきである。したがって、原子力の専門家集団である AESJ が先見性をもってリスク評価やリスク情報活用の標準化に取り組むのは適当である。

一方、AESJ 標準の中には、関与するステークホルダーが限定的なものや、原子力業界における良好な慣習を丁寧に文書化したものも存在する。当然のことであるが、標準活動を通じて蓄積した知識が共有され、より不確かさが小さな知識基盤が構築されることで、ステークホルダー全員の意思決定プロセスが合理化される。貢献度の大きなステークホルダーにとっては、自身の慣行が標準化されるので、より大きな利益を享受することが期待される。こうした標準策定の基本的な理念に立ち返って、“学会標準”として位置付けるべきものを再考したい。

JEA は業界団体であり、JEA 規格類の性格は学会標準とは少し異なると思われる。その多くは合理的に規制基準を満足するという目的のために制定されているが、より広いステークホルダーの関心を集めるものもある。例えば、原子炉圧力容器の監視試験結果は事業者だけしか取得できない知見だが、多くのステークホルダーの関心が向けられる情報である。事業者の「実験室」から得られた知見が主役となって作られる規格の管理を業界団体に委ねることは理にかなっている。この場合も、規制機関のみを主要なステークホルダーとみなしてその動向に迅速に対応するのか、より幅広いステークホルダーのチャレンジに応えるために慎重

に制定するのかを区別する必要がある。前者は業界団体のガイドラインに、後者は厳格なデュープロセスを経た規格基準に、より相応しいと考える。規制規則類の大改革から 10 年が経過するのを契機に JEA 規格を徹底的に棚卸して、迅速性とステークホルダーの観点からエフォートを再分配することが必要だと考えている。

著者は JSME 規格の策定プロセスに関与したことがないので、その位置付けについて前記二団体ほど強い意見は持たないが、学会規格という意味では原子力学会に近い位置づけだと認識している。海外組織（特に ASME）との関係や、他業界（例えば火力発電）との関係において、AESJ 標準との役割分担が見出せるだろう。知識の生産と利用という観点では、AESJ が対象とする分野よりも成熟した技術や慣行を規格化する傾向が強いのが特徴である。その多くがエンドース経験を有するものであるという特徴を踏まえると、業界規格との違いを再考するべき時期に来ているのかもしれない。

なお学会活動は個人の資質に基づいて行われるものである。一方、知識は組織の活動の中で育まれるという性質もあり、学会標準の策定活動では偏りを防ぐ等の目的から委員の所属バランスを考慮するが、個人を重視する原則は維持されている。現在、原子力規制庁は委員として標準策定に関与しない方針を採っているが、これでは他のステークホルダーの努力に対する“タダ乗り”になる懸念もある。規制エンドースのような厳格なプロセスは経ていないかもしれないが、事業者やメーカ等も組織内で検討を行ったうえで学会標準の使用可否を判断している。原子力安全に関する知識基盤の構築には多様なステークホルダーが関与していることを踏まえ、規制機関は標準活動に対するポジションを定期的に見直すべきである。

規制基準の大変更から 10 年が経過し、標準活動は変換点を迎えている。業者と規制機関がそれぞれ積極的にガイドを発行することを、環境変化に対応したアジャイルな活動だと前向きにとらえたい。役割分担に関する原理原則に基づいた議論を深化させることに加え、販売数を含む利用実態の丁寧な調査が必要ではないか。業界規格の場合は特に、各事業者のマネジメント文書内での引用件数が大切である。既にマネジメント文書に織り込まれた規格で、今後も変更が予想されないものは廃刊にすればよい。例えば、AESJ の原子力発電所の定期安全レビュー実施基準は、経過措置 PSR という規制上の位置づけは存在したものの、各社における引用状況を調査したうえで廃刊することができた。会議の運営、草稿のバージョン管理、投票、転載許諾の取得など、標準策定プロセス自体をデジタル化すれば、関係者のエフォートを技術的な内容の向上に集中させることができる。現在、規格類評議会において規格基準の策定活動に関するピアレビューが実施されている。一巡した段階で得られた教訓を総ざらいしたうえで、幅広いステークホルダーを巻き込んで思い切った投資を行い、デジタル化を進めることはできないか。最後に、効率化を言い訳にして怠慢に陥ることがないように、関係者がリーダーシップを発揮しあうべきことも強調しておきたい。コードエンジニアの価値と責務を標準策定者自身が高く評価することこそ、役割分担と効率化の議論の土台となるべきである。

付記

著者は日本原子力学会(AESJ)と日本電気協会(JEA)の双方で規格類に関係した幾つかの委員会に所属しているが、本稿は著者個人の意見を述べるものであり、いずれかのグループの意見を代表したものではない。

参考文献

- 1) U. S. Nuclear Regulatory Commission. <https://www.nrc.gov/docs/ML1125/ML112510453.pdf>
- 2) 日本原子力学会 システム安全専門部会 資料 STC-56-04-4, 2021 年 8 月 4 日
- 3) Y. Hashimoto, Journal of Nuclear Materials, 553 (2021) 153007.
- 4) 日本溶接協会 原子力研究委員会 IET 小委員会 <http://www.jwes.or.jp/mt/kenkyu/ae/pdf/iet20220106.pdf>

*Kenta Murakami The University of Tokyo

(Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room D)

[2D_PL04] Discussion on specific future efforts

Akio Yamamoto¹, Yoshiyuki Narumiya², Hiroaki Abe³, Kenta Murakami³, Keiji Matsunaga⁴, Haruko Sasaki⁵, Yasunori Yamanaka⁶ (1. Nagoya Univ., 2. SC, 3. Utokyo, 4. TOSHIBA ESS, 5. NRA, 6. ATENA)

これまでの当委員会の活動から、規制基準、学協会規格及び民間ガイドの関係に着目し、原子力安全に関わる関係者（規制、事業者、学協会等）の技術基盤を、どのような体制・仕組みで整備していくかの具体的な議論が必要になっている。具体的な規格類の例として、リスク情報を活用した統合的意思決定により多面的な分析を駆使して俯瞰的に判断し、対応策を実施することが挙げられる。そこで、組織間の連携の課題としてリスク情報活用に向けた活動や規格類の開発への取組に焦点を当て、当委員会に加えて、規格策定に係る日本電気協会及び日本機械学会、さらに規制当局及びATENAを交えて意見交換を行い、今後の規格基準類の整備に役立てる。

Planning Lecture | Joint Session | Research Committee for Mechanistic Simulation Method related to Severe Accident of Nuclear Reactors

[2E_PL] Recent Technology Trends in Severe Accident Simulations and Experiments

Chair: Koji Morita (Kyushu Univ.)

Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room E

[2E_PL01] Current Status and Issues Related to Detailed Analysis of Severe Accident

*Susumu Yamashita¹ (1. JAEA)

[2E_PL02] Experimental Programs toward Understanding Reactor Pressure Vessel Failure Mechanism at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

*Hiroshi Madokoro¹ (1. JAEA)

[2E_PL03] SARNET Activities and Study on Core Damage during SA at INSS

*Koji Nishida¹ (1. INSS)

「原子炉における機構論的限界熱流束評価手法」研究専門委員会、熱流動部会合同セッション

シビアアクシデント解析・実験の最新技術動向

Recent Technology Trends in Severe Accident Simulations and Experiments

(1) シビアアクシデント詳細解析の現状と課題について

(1) Current Status and Issues Related to Detailed Analysis of Severe Accident

*山下 晋¹, 吉田 啓之¹

¹ 日本原子力研究開発機構

1. 諸言

原子炉過酷事故（Severe Accident : SA）解析コードの開発や改良及び現実的な数値解析への要求の高まりが、より複雑で詳細なモデリングを先導している状況にある。従って、SA 時に起こり得る各種事象について詳細な解析が可能な機構論的数値解析手法（詳細解析コード）の役割は重要である。JAEA では、SA 時の制御棒、燃料棒といった炉内構造物の溶融物挙動及びそれらの水蒸気酸化反応、共晶反応といった個別要素過程を詳細に解析するコードとして JUPITER (JAEA Utility Program for Interdisciplinary Thermal-hydraulics Engineering and Research)を開発している。本報では、詳細解析コード JUPITER の概要、開発状況、解析例について報告する。

2. 背景

SA 解析コードは大きく分けて、Integral codes, Detailed codes, Dedicated multi-dimensional code system（以下 Dedicated codes）に分類される[1]。Integral codes は前述の MAAP[2], MELCORE[3], ASTEC[4], THALES-2[5]といった SA 時に発生する現象である炉心溶融から FP の拡散に至るまで包括的に解析するコードが該当する。Detailed codes は Integral code のベンチマーク等に用いられる比較的詳細なコード（例えば、ATHLET-CD[6], COCOSYS[7], SAMPSON[8], etc）が該当する。コンピュータの発達により、ATHLET-CD 及び COCOSYS を組み合わせることで SA の全体解析も選択肢となりつつあるようである。Dedicated codes は、SA 時に起きる各事象における単一事象或いはその一部に着目した専用コードである。Dedicated codes については、Navier-Stokes 方程式や熱伝導方程式を用いる CFD コードを指す（例えば、Fluent, STAR-CD, ABAQUS, etc）。SA 解析コード全体の予測性能を向上させるためには、専用コードによる解析・評価が重要であり、その重要性はコンピュータハードウェアの発達に伴い増している。

Integral codes である既存の SA 解析コードにおいて、燃料溶融・破損進展は簡素化モデル¹で必要十分とのコンセンサスが得られていたが、東京電力福島第一原子力発電所（1F）事故において、簡素化モデルでは扱うことのできない事象（非典型的な事象：水蒸気枯渇条件下での酸化、溶融事象など）が起きたことが示唆された。故に、簡素化モデルに基づく SA 解析コードでは不確かさが多く、そのまま 1F 解析に用いることは適していないといえる。また、モデルの高度化においても、調整パラメータや経験的な設定項目を含む簡素化モデルをそのまま高度化することは難しい。そこで JAEA では、このような不確かさの低減を目的として、過酷事故時の炉心溶融物の移行挙動及びジルカロイの水蒸気酸化などの個別事象を機構論的に推定することを目的として、独自の Dedicated code である JUPITER[9]を開発している。本企画セッションでは、JUPITER の概要、開発状況、妥当性検証計画を紹介し、まとめと解決すべき課題、今後の展開について述べる。

3. 詳細解析コード JUPITER

非典型的な事象や炉内構造物の溶融移行挙動の詳細な挙動予測に対応する詳細な解析を実現するために、流れの支配方程式として Navier-Stokes 方程式並びに熱伝導方程式で構成される数値流体力学（CFD :

¹ 簡素化モデルでは、燃料破損・溶融要素過程に調整パラメータ（制御棒溶融程度、共晶開始温度、等）が導入されており、ユーザーが従来知見に基づき経験的に設定している。

Computational Fluid Dynamics) 的手法に基づく多相多成分詳細熱流動解析コード JUPITER を開発した。JUPITER は、Dedicated codes に分類され、単相流だけでなく多相多成分流体解析に対応し、気液二相流の直接解法としてしばしば用いられている一流体モデルにより構築され、自由界面の分裂・合体などの大変形を伴う挙動に対して機構論的な解析が可能である。1F 事故後、SA 時の炉心熔融物移行挙動の予測を目的として開発を開始し、近年では、経産省事業[10]などを通じて、水-ジルコニウム反応モデル、共晶反応モデル、酸化膜現象モデル、水素吸蔵モデルなどの非典型的な事象に関連した解析モデルを導入した。また、直交等間隔格子を用いて離散化されているため、並列化効率が高く大規模計算に適している。

JUPITER は、原子炉過酷事故における非典型的な事象を扱うことを目的として開発されているため、SA 解析コードでは解析が困難な詳細な炉心内の熱流動及び炉心熔融挙動などを機構論的に解析するコードとして位置づけられる。従って、既存 SA 解析コードのように予め決められた事故進展解析からのずれの評価を行うことを目的の一つとしている。このような詳細な結果を参照解とすることにより、SA 解析コードの各種物理モデルの予測精度向上や過酷事故緩和措置対策への貢献をすることができると考えられる。

4. 解析例

JUPITER の解析例として、SUS-Zry 共晶熔融試験解析[11]、熔融金属狭隘流路移行挙動試験解析[12]を実施した。SUS-Zry 共晶熔融試験解析では、SUS-Zry 界面での共晶反応領域厚さの形状及び時間変化を実験結果と比較し、一致した結果を得た。熔融金属狭隘流路移行挙動試験解析では、図 1 左に示すように、炉内構造物である燃料支持金具とチャンネルボックスからなる流路を簡略模擬した試験体系で解析を実施した。解析対象領域（図 1 右）の青破線、緑破線、赤破線領域は、実際の燃料支持金具及びチャンネルボックスからなる流路（中央）のそれぞれの色の流路部分に対応している。

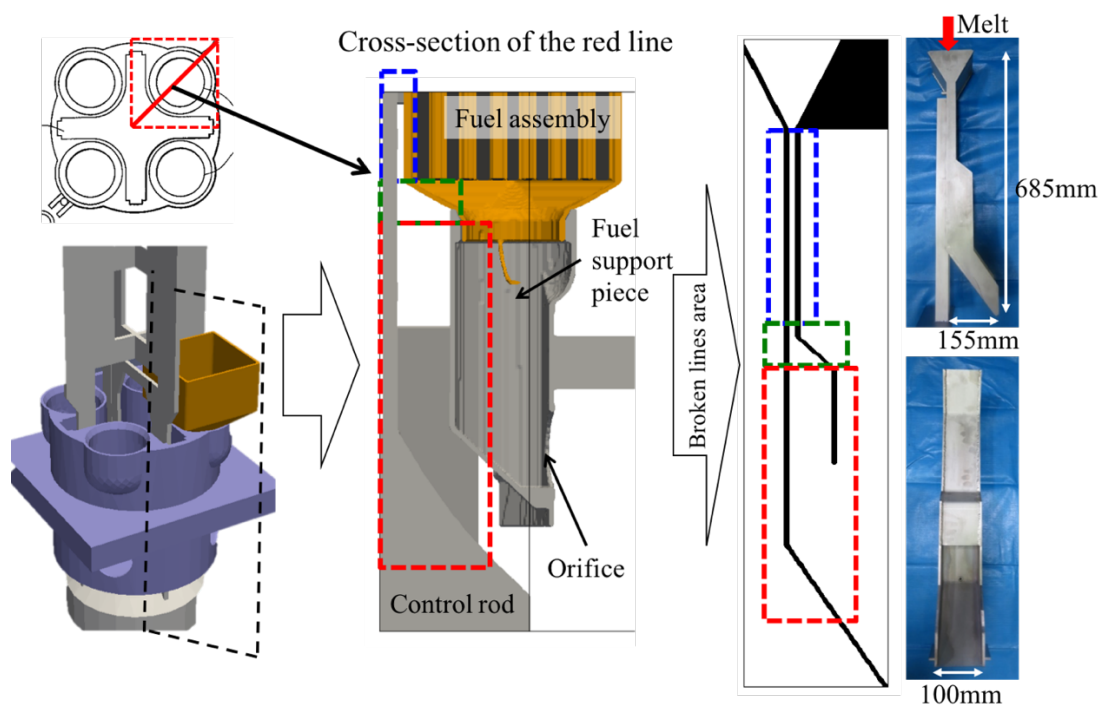


図 1 簡略模擬試験体系。左：対象領域、中央：断面図、右：簡略模擬試験体系

図 2 は流入部分（図中 A）から流出部分（図中 B）までの熔融物の移行時間と狭隘流路中の熔融物の流動挙動解析結果を実験結果と並べて比較したものである。実験では内部は観察することはできないが、流入開始後 0.23 秒後に熔融物の先端が確認できた。解析結果では、流入開始後 0.25 秒で先端が確認できたことから、熔融物の移行挙動に関する解析手法の妥当性を確認することができた。解析においては、1 秒後に流路内部で熔融物が凝固（茶色部分）していることが確認できる。実験においても、実験後の流路内部の調査により一部が凝固していることが確認されている。

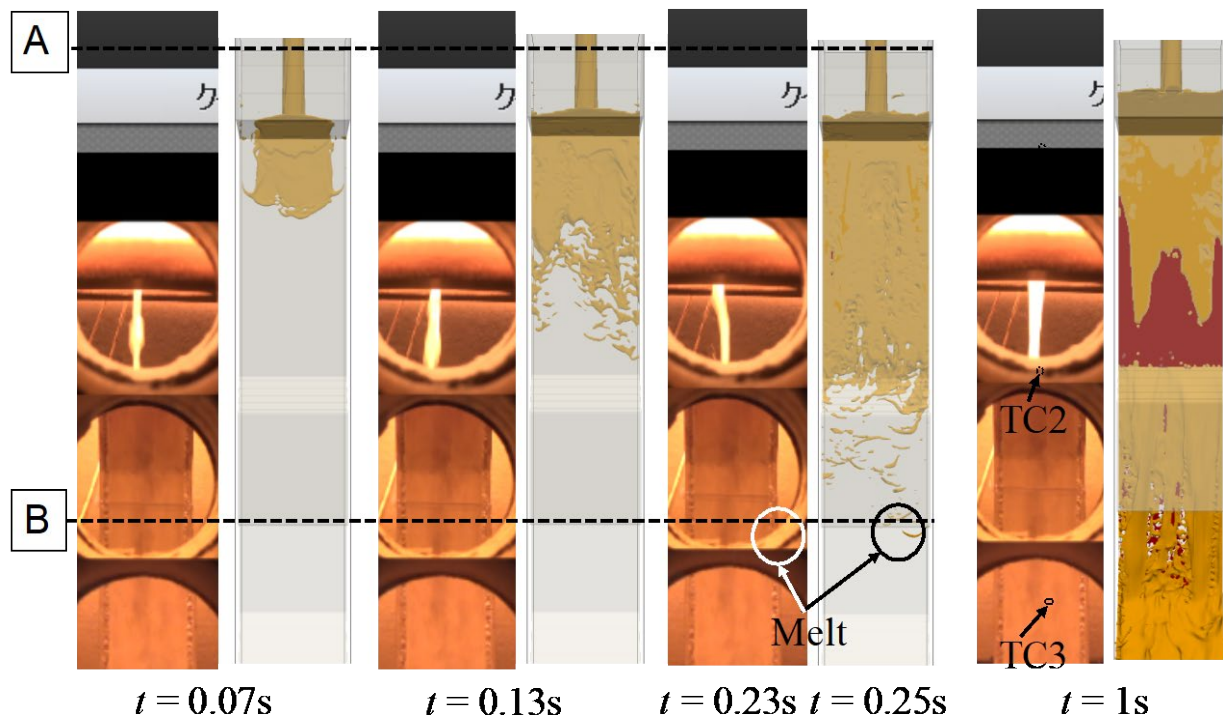


図2 模擬狭隘流路中の溶融金属落下挙動

現在、この他に水蒸気酸化反応モデルに係わる解析機能（水素生成、酸化膜の成長/減少、水素吸蔵モデル）の妥当性検証を進めている。

5. 結言

SA 時における炉内構造物の溶融挙動に係わる各種事象の詳細解析を目的とした詳細解析コード JUPITER の開発状況を紹介した。SA 解析のような炉心溶融から格納容器下部へのデブリの堆積のような一貫した解析は現状の計算資源では実現困難ではあるが、個別の要素過程のみに着目することにより、圧力 Poisson 方程式の反復計算を伴う流動を考慮した現象（数秒～数十秒間）であれば機構論的解析は比較的現実的な規模である。しかしながら、SA 事象の時間スケールは数時間～数十時間の長時間にわたるため、並列計算に対する高速化だけでなく数値解析アルゴリズムに対する高速化や工夫が必要となる。今後は、V&Vの拡充、ユーザーフレンドリーな入出力機構の整備に加え、より現実的な問題に適用するために、熱構造連成解析への適用、高速化、解析アルゴリズム、物理モデルの改良・開発に取り組んでいく予定である。

参考文献

- [1] Informing Severe Accident Management Guidance and Actions for Nuclear Power Plants through Analytical Simulation, NEA/CSNI/R(2017)16.
- [2] Fauske and Associates, “MAAP4 Modular Accident Analysis Program for LWR Power Plants User’s Manual,” (1994–2005), Project RP3131-02.
- [3] R. O. Gauntt, R. K. Cole, C. M. Erickson, et al., “MELCOR Computer Code Manuals, Version 1.8.5 May 2000,” NUREG/CR-6119, 2, Rev.2, SAND2000-2417/1, (2000).
- [4] P. Chatelard et al., “ASTEC V2 severe accident integral code main features, current V2.0 modelling status, perspectives”, Nucl. Eng. Des., vol.272 (2014), pp. 119-135.
- [5] M. Kajimoto, K. Muramatsu, N. Watanabe, M. Funasako, T. Noguchi, “Development of THALES-2, a computer code for coupled thermal hydraulics and fission product transport analysis for severe accident at LWRs and its application to analysis of fission product revapourization phenomena”, Proc. Int. Topical Mtg. on Safety of Thermal

Reactors, Portland, USA, Jul. 21-25, 200-208 (1991).

- [6] GRS, “ATHLET-CD short description”, <http://www.grs.de/en/simulation-codes/athlet-cd>.
- [7] H.-J. Allelein, S. Arndt, W. Klein-Hessling, S. Schwarz, C. Spengler, G. Weber, “COCOSYS: Status of development and validation of the German containment code system”, Nucl. Eng. Des. Vol.238 (2008), pp. 872-889.
- [8] H. Ujita, N. Satoh, M. Naitoh, M. Hidaka, N. Shirakawa, M. Yamagishi, “Development of severe accident analysis code SAMPSON in IMPACT project,” J. Nucl. Sci. Technol. 36, 1076–1088 (1999).
- [9] S. Yamashita, T. Ina, Y. Idomura, H. Yoshida, “A numerical simulation method for molten material behavior in nuclear reactors”, Nucl. Eng. Des. (2017) vol. 332, pp. 301-312.
- [10] METI. Report of advanced multi-scale modeling and experimental tests on fuel degradation in severe accident conditions. Research project report (2017).
- [11] P. Chai, S. Yamashita and H. Yoshida, "Development and validation of the eutectic reaction model in JUPITER code", Annals of Nucl. Ener., vol. 145, (2020).
- [12] S. Yamashita, K. Tokushima, M. Kurata, H. Yoshida, “Development of numerical simulation method for melt relocation behavior in nuclear reactors: validation and applicability for actual core structures”, Mech. Eng. J. vol. 4, (2017), pp. 1-13.

*Susumu Yamashita¹ and Hiroyuki Yoshida¹

¹Japan Atomic Energy Agency

「原子炉における機構論的限界熱流束評価手法」研究専門委員会、熱流動部会合同セッション

シビアアクシデント解析・実験の最新技術動向

Recent Technology Trends in Severe Accident Simulations and Experiments

(2) 福島第一原子力発電所における原子炉圧力容器破損メカニズムの解明に向け

た取り組み

(2) Experimental Programs toward Understanding Reactor Pressure Vessel Failure Mechanism
at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

*間所 寛¹, 永江 勇二¹

¹ 日本原子力研究開発機構

1. 緒言

東京電力福島第一原子力発電所（1F）事故から 11 年が経過し、内部調査や数値解析によって事故時の各号機の挙動が徐々に明らかになってきている。しかしながら、OECD/NEA の枠組みで実施された原子炉過酷事故解析コード（SA コード）による 1F 事故進展解析ベンチマークプロジェクト BSAF [1]では、解析コードやユーザーによる不確かさが大きい結果となり、SA コードの精緻化が必要である。特に、原子炉圧力容器（RPV）下部ヘッドの破損から燃料デブリのペデスタル底部への流出に関しては、不確かさが大きく、モデルの高度化は喫緊の課題となっている[2]。

1F2 号機の格納容器（PCV: Primary Containment Vessel）内部調査結果[3][4]によると、ペデスタル下部構造物に目立った損傷が見られないことから、RPV 下部ヘッドから流出した燃料デブリは熔融金属主体であり、燃料酸化物の多くが未熔融であった可能性が指摘されている。下部ヘッド内部に堆積した燃料デブリのうち、酸化物成分は固体のまま、主に融点の低い金属成分が熔融し、金属主体の固液混合熔融プールが形成され、材料間の反応によって下部ヘッドが破損した可能性がある。

本報では、下部ヘッド熔融プールの熱的挙動に着目した LIVE（Late In-Vessel Phase Experiments）試験[5][6]及び、下部ヘッド構造材と燃料デブリの材料間反応による下部ヘッド破損挙動に着目した ELSA（Experiment on Late In-vessel Severe Accident Phenomena）試験[7][8]について報告する。

2. 背景

2-1. 1F2 号機の事故進展[9][10]

地震発生時、2 号機は直ちに制御棒が挿入され、設計通り自動で原子炉が停止した。2 号機は地震により外部電源をすべて失い、復水器などは使用できない状況ではあったものの、非常用ディーゼル発電機が自動起動したことで、原子炉隔離時冷却系（RCIC: Reactor Core Isolation Cooling system）を起動することができた。RCIC の手動起動と原子炉水位高による自動停止を繰り返すことで津波襲来前まで原子炉水位が制御された。3 回目の RCIC 手動起動直後に津波が襲来し全電源喪失に陥った後も約 3 日間にわたって RCIC が動き続けたことにより、注水が続けられ、燃料の冷却が継続された。RCIC の機能喪失（3 月 14 日 13 時 25 分に RCIC の停止を確認）以降、崩壊熱により水位が低下した。燃料頂部のあたりまで水位が低下した際、主蒸気逃がし安全弁（SRV: Safety Relief Valve）を手動で開操作（3 月 14 日 18 時頃）し RPV が急速に減圧された。これにより、減圧沸騰が生じ、水位がさらに低下し、短時間で燃料が露出した状態になったと考えられる。消防車による海水注入が 3 月 14 日 19 時 54 分に開始されたが、注入量程の炉心水位の変化は無く、高温に晒された機器・配管のシール部等の損傷部からリークがあったと考えられる。このため、SRV 手動開操作後の炉心は冷却されにくい状態となり、炉心燃料は崩壊熱により昇温していったと考えられる。

3 月 14 日 18 時以降の RPV 及び PCV 圧力並びに線量率の変化を図 1 に示す。3 月 14 日 19 時 30 分頃から 3 月 15 日 1 時 30 分頃にかけて、3 度の RPV 圧力上昇が確認されている。第 1 圧力上昇は、高温の炉心に水

蒸気が供給されたことで、燃料被覆管 (Zr 合金) と水 (水蒸気) の反応が起こり、水素が発生したためと考えられる。炉心から下部プレナムへの大規模な炉心燃料移行は第 2 圧力上昇で生じ、移行した燃料デブリは下部プレナムに存在していた冷却水によって冷却され固化したと推定される。第 3 圧力上昇は、SRV が閉となったことによって生じた。

3 月 15 日 2 時 20 分頃に RPV 圧の微増が観測されている。この時刻までの圧力履歴を勘案すると、これが炉心から下部プレナムへの最終スランピングであったと考えられる。なお、

この時刻以降、ドライウェル (D/W: Dry Well) 格納容器雰囲気モニタ (CAMS: Containment Atmosphere Monitoring System) の信号増加が顕著となっている。これは、RPV 内で発生した高温のガスが SRV に流れたことにより、主蒸気配管と SRV ハウジングの連結部等のシール機能が低下したことで、RPV から D/W への直接漏洩が増加したためと考えられる。3 月 15 日 4 時 10 分頃から RPV 圧力の微減が観測されている。これは、下部プレナム内での液相水の枯渇によって蒸気発生量が低下したためと考えられる。固化した燃料デブリは崩壊熱によって昇温し、融点の低い金属成分が、融点の高い酸化物成分に先行して溶融し、固体状態の酸化物成分の隙間を埋めるように溶融プールを形成したと推定される。PCV 内部調査の結果から、ペDESTAL 下部構造物に目立った損傷が見られないため、RPV 下部ヘッド破損後にペDESTAL 内部に流出した燃料デブリは金属成分が主であると考えられている。したがって、下部ヘッド内部に形成された金属成分主体の固液混合溶融プールにより下部ヘッドが破損したと考えられる。3 月 15 日 7 時 20 分から 11 時 20 分にかけては圧力及び CAMS の測定値が無いため、RPV 下部ヘッド破損タイミングの推定は困難である。一方、3 月 15 日 8 時 25 分頃に 2 号機原子炉建屋から白煙の放出が観測されていること、また、8 時 30 分から 10 時 20 分にかけて正門前線量が有意に上昇していることから、3 月 15 日 8 時 25 分以前には RPV 下部ヘッド破損が生じ、燃料デブリはペDESTAL 底部まで移行していた可能性がある。

2-2. RPV 破損

RPV 下部ヘッドの破損は、構造材に熱的負荷と機械的負荷が複合的にかかることに起因する。図 2 に、RPV 下部ヘッドの破損メカニズムを模式図で示す。下部ヘッド内部の溶融プールから構造材への伝熱により、構造材温度が融点に達すると熱的負荷により破損する。融点以下においても、下部ヘッドに堆積する溶融物の自重による荷重や熱荷重等でのクリープ変形、塑性変形、座屈等によって破損に至る。また、互いに接触している材料間の相互作用によって低融点共晶物が形成され、容器温度が本来の融点に達する前に材料間の反応により溶融温度が低下することで損傷を受ける。より低い温度で容器壁のアブレーションが生じ、容器壁が薄くなったところに応力集中が発生する。したがって、熱的負荷と機械的負荷を分離することはできず、材料間反応を加味した複合的な影響を同時に考慮する必要がある。

沸騰水型原子炉 (BWR: Boiling Water Reactor) の RPV 下部ヘッドには、制御棒駆動装置 (CRD: Control Rod Drive) ハウジング、移動式炉心内計装配管、ドレイン配管等の貫通部や、それらを接合するための溶接部、RPV 自体を組み立てるための溶接部が存在する。金属溶融プールの温度分布を考慮した上で、下部ヘッド周

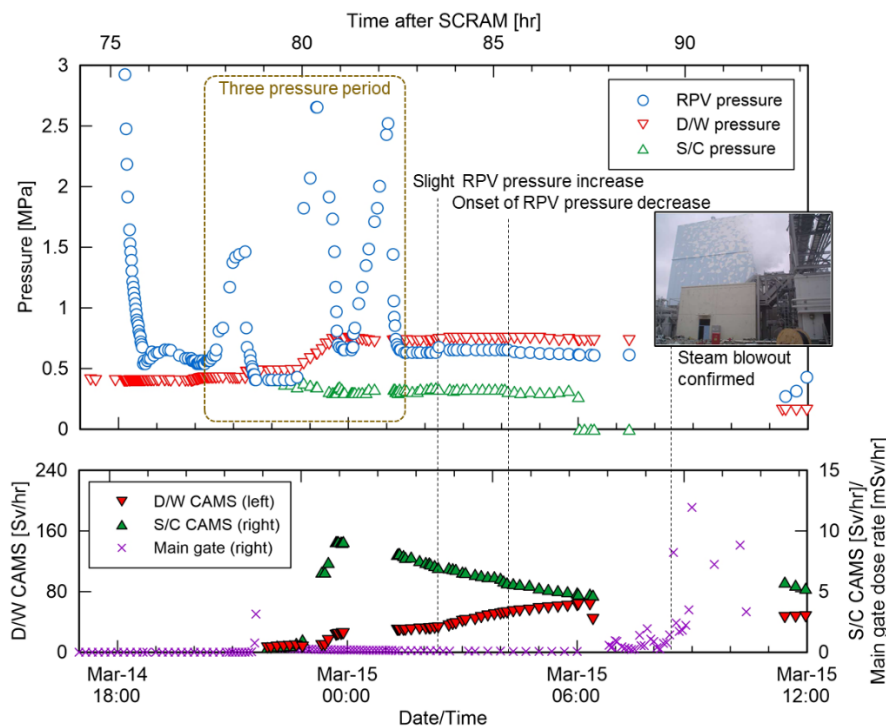


図 1 事故時における 2 号機の圧力及び線量率

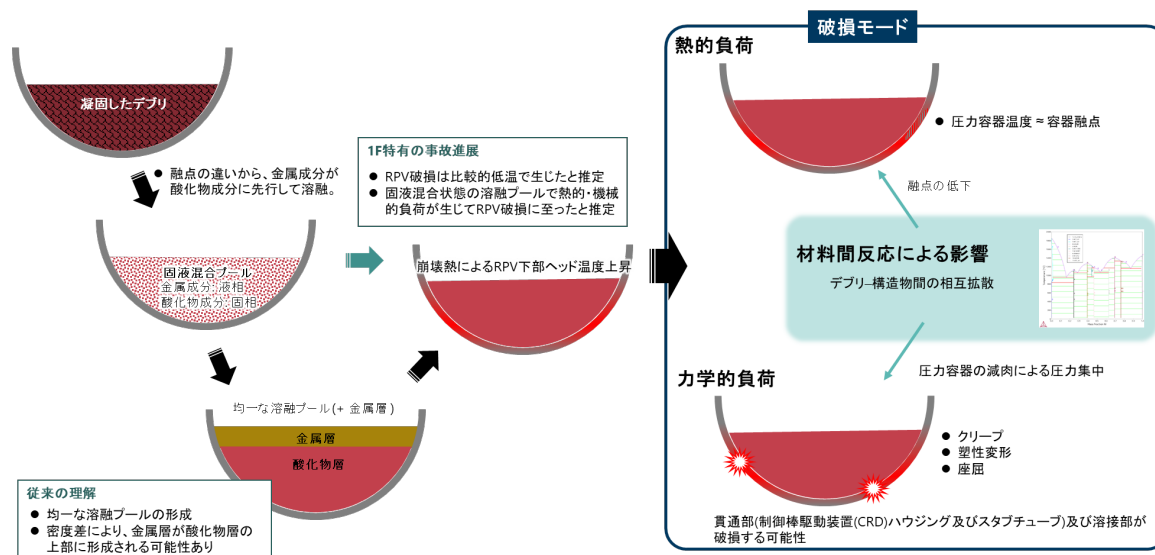


図 2 RPV 下部ヘッド破損メカニズムの概念図 [5]

辺の材料の組み合わせが、金属溶融プールとどのように反応するかを検証すること、構造的脆弱部を特定することにより RPV 下部ヘッドの破損メカニズムを解明できると考えている。また、PCV 内部調査の結果、上部タイプレート落下、CRD 下端にはデブリと思われる付着物が確認されている。これらは、RPV 下部ヘッドの破損メカニズムを解明する上で、破損位置情報を示す重要な情報である。

3. 試験

3-1. LIVE 試験

RPV 下部ヘッド破損メカニズムの解明には、下部ヘッド溶融プールの熱的挙動の把握が必要である。単一液相プールの熱的挙動に着目した試験は SIMECO [11]、LIVE [12]、COPO [13]、ACOPO[14]、BALI[15]、COPRA[16]等、数多く実施されているが、固液混合溶融プールに着目した試験は少なく、実験データの拡充が不可欠である。そこで、カールスルーエ工科大学 (KIT: Karlsruhe Institute of Technology) における LIVE 試験装置[12]を用いて、下部ヘッドにおける溶融プール形成過程及び伝熱挙動に関する試験を実施した。燃料デブリの酸化物成分及び金属成分を模擬するため、融点の異なる 2 種類の模擬物質 (セラミック及び硝酸塩 (融点: 220~222 °C)) を用いた。1F 実機と 1:5.5 スケールとなる LIVE 試験装置に、模擬物質を固体粒子状態で装荷して実験を行った。崩壊熱は容器内部に設置した 8 層のヒーターで模擬した。試験装置上部は断熱条件、側部は空気による自然対流条件とした。固体状態で

表 1 LIVE 試験条件 [6]

	LIVE-J1	LIVE-J2		
		Phase 1/2	Phase 3	Phase 4
初期条件	セラミック 245 kg 硝酸塩 80 kg	J1 の最終状態	硝酸塩+219 kg	←
熱出力	10 kW	7 kW /10 kW	10 kW	←
プール高さ	可変	~0.28 m	~0.43 m	←
上部境界	断熱	←	←	←
側部境界	空気	水	←	空気
試験条件	過渡	定常	←	過渡

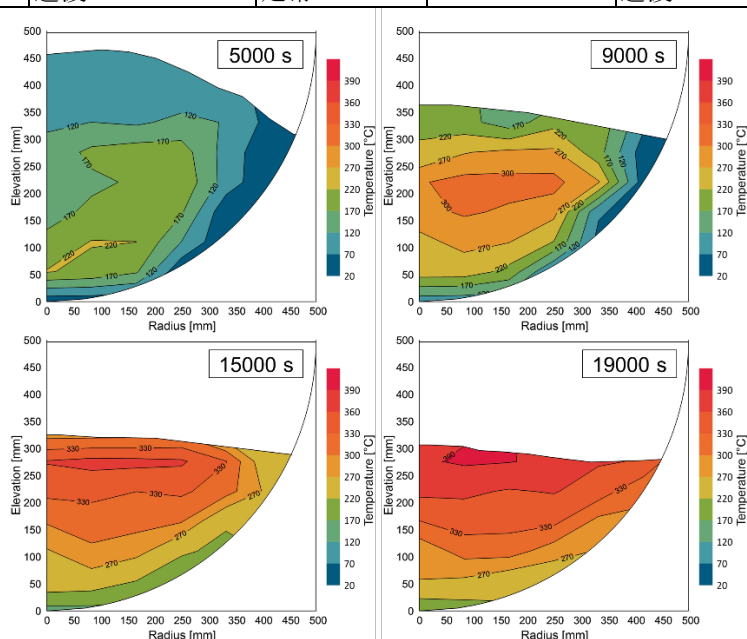


図 3 LIVE-J1 試験における温度分布 [5]

配置した模擬物質は、下部から硝酸塩の溶融が開始し、溶融プールは次第に上部及び水平方向に発達した (図 3)。表 1 に示すように、外部冷却条件及び硝酸塩を追加した試験 (LIVE-J2) も実施し、数値解析モデルの妥

当性確認に用いられるデータとした。

燃料デブリが単一液相の場合、容器側部への熱的負荷がかかることは従来知見であり、異なる Pr 数（硝酸塩 $\sim 10^1$ 、熔融金属 $\sim 10^1$ ）であっても側部への熱伝達と同様であることが示されている [17]。本研究では、固液混合状態においても対流による水平方向の熱伝達は発達し、容器側部への熱的負荷がかかることを示した。今後、数値解析と組み合わせることによって、1F における RPV 破損メカニズムの推定に資するものとする。

3-2. ELSA 試験

過酷事故における下部ヘッド破損や材料間反応に係る現在の知見は、スリー

マイル島原子力発電所（TMI-2: Three Mile Island, Unit 2）事故後に数多く実施された実験及びモデリングによって整備されており、加圧水型原子炉（PWR: Pressurized Water Reactor）型に関するものが中心となっている [18]。代表的な試験としては、LHF[19]、OLHF[20]、FOREVER[21]、RASPLAV[22]、MASCA[23]等が挙げられる。貫通管を考慮した試験は、OLHF-4[20]及び FOREVER-3[21]のみであり、貫通管が数多く存在する BWR 型下部ヘッドの破損に関する知見は未だ十分とは言えない。1F における下部ヘッド破損メカニズムの解明には、貫通管や材料間反応の影響を考慮する必要がある。そこで、下部ヘッドに多数存在する CRD 及びその溶接部と燃料デブリの金属成分との反応に着目した ELSA 試験を実施した。

BWR 型 RPV 下部ヘッドには CRD が多数存在し、ハウジングやその固定に用いるスタブチューブには、ステンレス鋼及び Ni 合金がそれぞれ使用されている。過酷事故時には、炉心から移行してきたステンレス鋼の制御棒材、 B_4C 、Zr 合金のチャンネルボックス材や燃料棒被覆管材等の金属物質が RPV 下部ヘッド構造材と反応、溶融する可能性がある。特に 1F 2 号機では、燃料デブリのうち、酸化物成分の多くが未溶融であったと考えられ、ステンレス鋼や Zr 合金を主成分とする金属成分による RPV 下部ヘッド破損が考えられる。そこで、過酷事故時の RPV 下部ヘッド破損挙動を理解するために、CRD 構造物の一部を模擬した試験体を用いて溶融金属物質の流出挙動に着目した試験を実施し、その場観察を行った。

日本原子力研究開発機構（JAEA: Japan Atomic Energy Agency）が所有する LEISAN（Large-scale Equipment for Investigation of Severe Accidents in Nuclear reactors）装置（図 4）を用いて、RPV 下部ヘッドの CRD 構造物を模擬した試験体に模擬金属デブリを装荷し、Ar 雰囲気下で炉内温度 1800 °C まで徐々に昇温した。装荷する模擬金属デブリ形状について、ステンレス及び Zr の単体試料片を装荷した条件（ELSA-0）と、共晶組成の低融点 SUS304-Zr 合金を装荷した条件（ELSA-1）の 2 種類の試験を実施した。試験中の溶融の様子は炉上部からその場観察した。試験後に試験体を切断及び断面観察を行い、CRD 構造部の SEM/EDS 分析を実施した。

試験結果では、CRD 構造材は単体の融点よりも低い温度（約 1100 °C $\sim$ 1200 °C）で金属デブリと反応して溶融、破損することを試験的に示した。また、CRD 内部に溶融物が流入する様子が観察され、SA 時における下部ヘッドの破損では CRD 構造物が優先的に破損することが推測された。試験体断面の組織観察及び状態図の比較から、CRD のハウジング及びスタブチューブがそれぞれ溶融金属デブリ中の Zr との Zr-Fe、Zr-Ni 共晶反応を起こし、溶融・破損する可能性があることを示した（図 4）。

4. 結言

1F 事故特有の下部ヘッド破損メカニズムの解明に向けた JAEA における実験的取り組みを報告した。固液混合溶融プールの伝熱に係る知見及び下部ヘッドにおける材料間反応の知見を拡充した。今後は、さらなる実験データの拡充を図るとともに、機構論的な詳細モデルを用いた数値解析を用いて事故時の下部ヘッド破損メカニズムの推定に資するものとする。また、マクロスケールな SA コードにおけるモデルの改良に資す

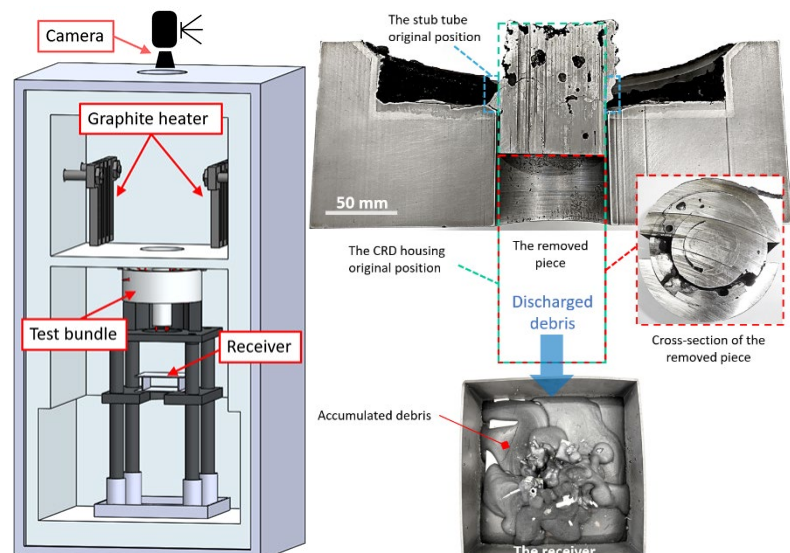


図 4 LEISAN 装置（左）と試験後の ELSA-1 試験体（右） [7]

る情報としてまとめ、将来炉への反映も見据えていきたい。

参考文献

- [1] M. Pellegrini et al., “Main Findings, Remaining Uncertainties and Lessons Learned from the OECD/NEA BSAF Project,” *Nucl. Technol.* **206**(9), pp 1449–1463 (2020).
- [2] W. Klein-Heßling et al., “Conclusions on severe accident research priorities,” *Ann. Nucl. Energy* **74**, pp.4–11 (2014).
- [3] Tokyo Electric Power Company Holdings, “Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2 Primary Containment Vessel Internal Investigation Results,” http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2018/images/handouts_180201_01-e.pdf (2018)
- [4] Tokyo Electric Power Company Holdings, “Locating Fuel Debris inside the Unit 2 Reactor Using a Muon Measurement Technology at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station,” https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2016/images/handouts_160728_01-e.pdf (2016)
- [5] H. Madokoro et al., “LIVE-J1 experiment on debris melting behavior toward understanding late in-vessel accident progression of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station,” *Proc. The 19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-19)* (2022).
- [6] 間所寛ほか, 日本原子力学会 2021 年秋の大会, 2J08.
- [7] T. Yamashita et al., “BWR lower head penetration failure test focusing on eutectic melting,” *Ann. Nucl. Energy* (in print).
- [8] 佐藤拓未ほか, 日本原子力学会 2021 年秋の大会, 2J13.
- [9] 山下拓哉, エネルギーレビュー 2021 年 4 月号
- [10] debrisWiki, <https://fdada-plus.info/>
- [11] B. R. Sehgal et al., “Assessment of reactor vessel integrity (ARVI),” *Nucl. Eng. Des.* **235** (2–4), pp. 213–232 (2005).
- [12] X. Gaus-Liu et al., “In-vessel melt pool coolability test - Description and results of LIVE experiments,” *Nucl. Eng. Des.* **240** (11), pp. 3898–3903 (2010).
- [13] O. Kymäläinen et al., “Heat flux distribution from a volumetrically heated pool with high Rayleigh number,” *Nucl. Eng. Des.* **149** (1–3), pp. 401–408 (1994).
- [14] T. G. Theofanous et al., “The first results from the ACOPO experiment,” *Nucl. Eng. Des.* **169** pp. 49–57 (1997).
- [15] J. M. Bonnet, “Thermal Hydraulic Phenomena in Corium Pools : the BALI Experiment,” *Proc. The workshop on severe accident research held in Japan (SARJ-98), JAERI-Conf 99-005* (1999).
- [16] Y. P. Zhang et al., “The COPRA experiments on the in-vessel melt pool behavior in the RPV lower head,” *Ann. Nucl. Energy* **89**, 19 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.11.013>.
- [17] R. R. Nourgaliev et al., “Effect of fluid Prandtl number on heat transfer characteristics in internally heated liquid pools with Rayleigh numbers up to 10^{12} ,” *Nucl. Eng. Des.* **169** (1–3), pp. 165–184 (1997).
- [18] OECD/NEA, “Safety Research Opportunities Post-Fukushima. Initial Report of the Senior Expert Group,” NEA/CSNI/R(2016)19 (2017).
- [19] T. Y. Chu et al., “Lower head failure experiments and analyses,” “Sandia National Laboratories, NUREG/CR-5582, SAND98-2047 (1999).
- [20] OECD/NEA, “Lower head failure project final report,” Sandia National Laboratories, NEA/CSNI/R(2002)27, 2002
- [21] B. R. Sehgal et al., “Experiments on in-vessel melt coolability in the EC-FOREVER Program,” *Nucl. Eng. Des.* **236** (19–21), 2199–2210 (2006).
- [22] V. G. Asmolov, “Latest findings of RASPLAV project,” *Proc. Workshop on in-vessel core debris retention and coolability, Garching bei München, Germany: Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA)*, pp. 89–110 (1999).
- [23] OECD/NEA “Main Results of the MASCA1 and 2 Projects,” NEA/CSNI/R(2007)15 (2007).

*Hiroshi Madokoro¹ and Yuji Nagae¹

¹Japan Atomic Energy Agency

「原子炉における機構論的限界熱流束評価手法」研究専門委員会、熱流動部会合同セッション

シビアアクシデント解析・実験の最新技術動向

Recent Technology Trends in Severe Accident Simulations and Experiments

(3) SARNET の活動状況と INSS での SA 時炉心損傷に関する研究

(3) SARNET Activities and Study on Core Damage during SA at INSS

*西田 浩二

原子力安全システム研究所

1. 緒言

本報では欧州の Sever Accident Research Network(SARNET)の活動状況と原子力安全システム研究所(INSS)で実施しているシビアアクシデント (SA) 時の炉心損傷に関する研究について紹介する。

2. SARNET の活動状況

SARNET は Nuclear Generation II & III Alliance (NUGENIA)の SA 技術分野の活動を象徴する研究ネットワークである。NUGENIA は安全で信頼性、競争力のある第2、第3世代原子炉の核分裂技術を実現するために活動している枠組である。欧州を中心に、産業界、研究開発機関、大学、規制機関等が参加しており、各機関の連携推進、知識基盤の構築、研究開発成果の実用化がミッションである。

NUGENIA の技術分野は表1に示す8技術分野[1]であり、SA技術分野には表2に示す6研究テーマ[2]がある。SA技術分野では、①試験及び解析結果のデータベース化・管理、②研究の優先順位付け、新規の研究プログラムの検討、③SA解析コード ASTEC の開発、検証、教育講座による人材育成等を実施している。原子炉容器内、原子炉容器外のコリウム冷却、水素爆発リスクを含む格納容器挙動、ソースターム等、各機関が協調しながら SA 全体の研究をしている。

3. SA 時炉心損傷に関する研究

SA の社会への影響を考慮し、深層防護の観点から、放射性物質の原子炉容器内閉じ込めに最大限努力すべきと考える。そのためには炉心損傷の事象解明、最確予測が可能な過酷事故解析コードが必要と考え研究を開始した。

炉心損傷に関する技術調査と共に、SA解析コード MAAP5を用いてリロケーションに着目して解析モデル等を検討している。SDF1-4試験[3]の流路面積の測定値と MAAP5 の解析値の比較を図1に示す。上方で解析値は測定値を過少評価するが、Ag-In-Cd が U-Zr-O より下方にリロケーションする試験結果及び流路面積をある程度再現している。今後、他の試験を含めて総合的に検討し、リロケーションモデル等を高度化する予定である。

参考文献

[1] <https://snetp.eu/nugenia/>. [2] <https://snetp.eu/technical-area-2-severe-accidents/>. [3] D.A. Petti, et al., NUREG/CR-5163 (1989).

*Koji Nishida Institute of Nuclear Safety System

表1 NUGENIA の技術分野[1]

技術分野 (TA)	
TA1	原子炉安全とリスク評価
TA2	過酷事故
TA3	原子炉運転改良
TA4	システム、構造物、機器の健全性評価
TA5	放射性廃棄物、使用済み燃料の管理、廃炉
TA6	革新的軽水炉設計と技術
TA7	燃料要素
TA8	検査と資格の欧州ネットワーク

表2 TA2 の研究テーマ[2]

研究テーマ
原子炉容器内コリウム/デブリの冷却性
原子炉容器外コリウム相互作用と冷却性
水素爆発リスクを含む格納容器挙動
ソースターム
環境影響及び危機管理
過酷事故シナリオ

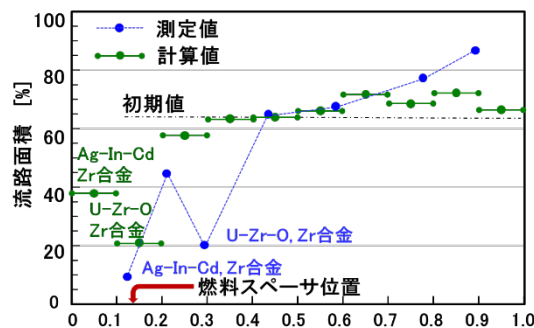


図1 流路面積の比較

Planning Lecture | Technical division and Network | Health Physics and Environment Science Division

[2F_PL] Current and future perspectives of collaborative activities of academic society on radiation protection

Chair: Makoto Hashimoto (JAEA)

Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room F

[2F_PL01] Overview of the Umbrella Project, a Newly Established Platform for the Field of Radiation Protection

*Reiko Kanda¹ (1. QST)

[2F_PL02] Study on individual dose registry system for occupational exposure

*Michio Yoshizawa¹ (1. JAEA)

[2F_PL03] Efforts to train and secure on radiation protection experts in nuclear emergencies

*Chie Takada¹ (1. JAEA)

[2F_PL04] Activities of the Working Group on Effective Dose and Operational Quantities

*Michiya Sasaki¹ (1. CRIEPI)

保健物理・環境科学部会セッション

放射線防護に関する学会連携活動と今後の展開

Current and future perspectives of collaborative activities of academic society on radiation protection

(1) 放射線防護アンブレラ事業の概要

(1) Overview of the Umbrella Project, a newly established platform for the field of radiation protection

*神田 玲子¹

¹ 量子科学技術研究開発機構 放射線医学研究所

1. 緒言

原子力規制委員会は、平成 29 年度から「放射線安全規制研究戦略的推進事業」として、①放射線源規制・放射線防護による安全確保のための根拠となる調査・研究を推進するための事業と、②規制活動及び研究活動の土台となる放射線防護研究関連機関によるネットワーク構築を支援するための事業を開始した。本発表では、この取り組みで採択された標題のネットワークの 5 年間の活動を概説する。

2. アンブレラ事業の概要

2-1. 目的

アンブレラ事業は、放射線防護の喫緊の課題の解決にふさわしいネットワークをつくりながら、放射線防護のアカデミアと放射線利用の現場をつなぐことを目的としている。そのため、放射線防護関連学会等の連合体である「放射線防護アカデミア」、緊急時対応人材の確保をめざす「緊急時放射線防護検討ネットワーク」、職業被ばくの国家線量登録制度構築を目指す「職業被ばくの最適化推進ネットワーク」が独自に活動しつつ、一つ傘の下で連結し、参加機関の代表者から構成される代表者会議が意思決定する体制で活動を行った。

2-2. 成果

活動に当たっては、課題解決案を国等に提案するのみならず、合意形成や施策の実施にアカデミアとして協力すること、常日ごろから情報や問題意識を共有する環境を整備することを目標にしている。そのための体制整備や意思決定のルール作りもこの事業の成果と考えている。また 5 年間の間に本事業内での検討結果を、誌上発表（16 編。2 編の原著論文を含む）、口頭発表（17 件）、審議会等での報告（10 件）を行った。また報告会（10 回）や学会での企画セッション（10 回）を開催し、ステークホルダーとの対話を行った。

2-3. 放射線防護アカデミアの活動の総括

異なる専門性や関心を持つ学会同士が連携して検討を行うプロセスとして、①学会ごとの検討結果を一本化する、②各学会からの派遣メンバーで検討部隊を組織する、といった二通りの方法がある。「放射線安全規制研究の重点テーマの提案」と「事故予防や緊急時対応に関する提言のとりまとめ」は①のプロセスを採用し、「低線量リスクのコンセンサスのとりまとめ」と「線量の新概念の国内導入に関する検討」は②のプロセスで実施した。また学会が共同して放射線防護人材の実態調査を行い、専門家が 10-20 年前に比べて 2 割ほど減少し、高齢層側にシフトしていること、40-50 代が減少していることを明らかにした。人材の枯渇化に関しては、本事業内で根本的解決策を実施することは難しいが、若手の国際的機関のイベントへの派遣、若手が企画するイベントへの支援、キャリアアップやすそ野拡張につながる Webinar の開催等を行った。また国際動向報告会を放射線防護の問題意識を共有し深く掘り下げる場として定着させた。

2-4. 放射線防護アカデミアの今後について

代表者会議では、本事業内でアカデミアが行った各活動を振り返り、その結果、学会が連携して行う検討や調査および Webinar の企画・開催が特に有意義であり、今後も継続すべきだとの結論を得た。現在は、これらの活動が行える緩やかな連合体の設立に向けて、参加を希望する団体との意見聴取を行っている。

*Reiko Kanda¹

¹National Institute of Radiological Sciences, National Institutes for Quantum Science and Technology

保健物理・環境科学部会セッション

放射線防護に関する学会連携活動と今後の展開

Current and future perspectives of collaborative activities of academic society on radiation protection

(2) 職業被ばくの線量登録管理制度の検討

(2) Study on individual dose registry system for occupational exposure

*吉澤 道夫¹, 神田 玲子², 浅野 智宏³, 飯本 武志⁴, 岡崎 龍史⁵, 百瀬 琢磨¹, 渡部 浩司⁶

¹原子力機構, ²量研, ³放影協, ⁴東京大学, ⁵産業医科大, ⁶東北大学

1. 緒言

平成 29 年度から開始されたアンブレラ事業の課題解決型ネットワークの一つとして、職業被ばくの線量登録管理制度について検討グループで検討してきた。この検討結果を報告する。

2. 検討の背景と目的

我が国では、放射線作業者の全ての職業被ばくの線量（個人線量）を登録管理する制度が原子力分野を除き整っていない。このため、日本学術会議から提言「放射線作業者の被ばくの一元管理について」が 2010 年に出された。しかし、その後具体化が進んでいない。そこで、国家線量登録制度検討グループを設置し、大学、原子力、医療分野のメンバーで検討を進めた。学術会議の提言が実現しなかった要因として、広くステークホルダーを巻き込んだ議論になっていなかったこと、特に国と事業者の両方に支持されなかったことが大きい。このため、本検討グループでは、実現可能性のある合理的方法を提案し、ステークホルダーと議論を行い、具体的な解決策を提示することを目的とした。

3. 検討内容

検討グループでは、複数の制度案とそれらの展開を学会等のステークホルダー会合で報告し、意見を求めながら検討を進めた。原子力分野は制度が確立していることから、主な議論の対象は、医療分野と大学関係である。検討グループでは、①国家線量登録機関による中央一括管理（学術会議が提言した全作業者を対象とした理想的な制度）、②事業者設置機関による一括管理（全作業者対象）、③事業者設置機関による管理（複数事業所で作業する、一定線量以上の被ばく線量のある者を対象）、④業界・分野別の管理 の 4 つの制度案とその展開を検討した。検討の結果、分野別に状況・課題がかなり異なる（原子力分野は新しい制度を必要としていない、医療分野は当面は線量計着用などの線量管理上の課題が多い状況であるが、被ばく線量の把握状況等を踏まえると線量登録管理制度の必要性は高い、大学関係は被ばく線量が低く線量管理よりも記録の合理化が優先課題である）ことから、まず制度が未確立の分野（特に異動が多く、被ばく前歴の把握が十分ではない医療分野）が特徴にあった制度を構築し、将来的に全分野統一的な制度を目指すアプローチがよいとの結論を得た。ただし、将来の全分野の一元管理を目指すため、個人識別番号の付与、登録する線量の標準化、個人情報管理（事前同意等）などを共通化しておくことが重要である。また、業界・分野別の制度について、特に医療分野を前提として具体的な線量登録フローを検討した。このフローは、個人識別情報付与から線量測定サービス機関を活用した線量の登録、登録された線量の照会までを含むものである。

3. 結言

制度構築を実現するには、ステークホルダーでの具体的な検討の推進が必要である。先行制度発足の経緯を踏まえると、制度実現（特に医療分野）には、国と業界・分野の両方が線量登録管理制度構築の必要性を認識し、検討を進めることが重要である。大きな課題は費用であり、制度設計においてコストダウンの検討が重要である。これらを踏まえ、今後も医療分野、大学関係、線量登録・測定関係機関などが集まるネットワークを形成し、制度の検討状況等について情報共有・意見交換を行い、推進へのアクションを継続的に行っていく必要がある。

*Michio Yoshizawa¹, Reiko Kanda², Tomohiro Asano³, Takeshi Iimoto⁴, Ryuji Okazaki⁵, Takumaro Momose⁶ and Hiroshi Watabe⁶

¹IAEA, ²QST-NIRS., ³REA, ⁴Tokyo Univ., ⁵UOEH, ⁶Tohoku Univ.

保健物理・環境科学部会セッション

放射線防護に関する学会連携活動と今後の展開

Current and future perspectives of collaborative activities of academic society on radiation protection

(3) 原子力緊急時の放射線防護に関する専門家の育成・確保の取り組み

(3) Efforts to train and secure on radiation protection experts in nuclear emergencies

*高田千恵¹, 中野政尚¹, 宗像雅広¹, 吉田忠義¹, 横須賀美幸¹,
山田純也¹, 前田英太¹, 渡邊裕貴¹, 富岡哲史¹, 百瀬琢磨¹

¹ 日本原子力研究開発機構

1. 緒言

万一の原子力緊急事態発生時、放射線防護分野の専門家には各所で専門性を活かした適切な情報発信・支援・指導・助言等を行うことが望まれる。「緊急時放射線防護検討ネットワーク（以下、「NW」という。）」では、必要な知識・スキルを持った専門家の育成・確保に向けた取り組みを行った。

2. 取り組みの成果

2-1. 現状・課題の整理

検討会・アンケート・個別の意見聴取・学会でのシンポジウム等により、大学教員、電力事業者、研修事業や放射線測定機器販売等を行う民間企業等からの意見を収集し、本件に係る現状・課題の整理を行った。その結果、国内の専門家の数自体が減少しており年齢層による凹凸もあること、組織・個人が自主的な取り組みとして万一の緊急時に向けた知識・スキルを身に付けるための資源（予算・人員等）の余裕がなく、NW活動の継続的な維持・発展のためには資金の確保が不可欠であることなどが挙げられた。

2-2. 分野別ネットワークでの課題解決の取り組み

NW 活動の1サンプルとして、環境モニタリング分野の専門家で構成したサブネットワークにおいて、茨城県東海・大洗地区の4つの事業所における環境放射線モニタリングデータを収集・統合して福島第一原発事故による環境影響を検討し、その結果を発表した^{*1)}。

2-3. 「原子力緊急事態対応ガイド」（以下、「ガイド」という。）案の作成，教育の試行

緊急時に向けた自己研鑽の情報源とすることを目的としたガイド案を作成した。このガイドは原子力緊急事態の対応に関わる全ての専門家を対象とした「共通編」と、専門分野別の「緊急時モニタリングセンター（EMC）活動者編」「避難退域時検査活動者編」で構成し、各々、①専門家に求められる役割と必要なスキルと②スキルの獲得・維持に必要な教材等の情報をまとめている。また、人材育成方法の検討の一助とすべく、このガイド案をテキストとした Web ベースの教育を30歳代半ば頃までの若手を対象に試行し、合計で約150名の参加を得た。

2-4. NW のあり方の検討

将来にわたり有効性の高いNW活動が確実に継続されることを目指し、NWの理想的なあり方を検討した。NWには、関係する機関・団体間の連携だけでなく中核としての役割をもつ機関が不可欠であり、わが国の現状を考慮すると中核機関には国による新たな支援（事業委託等）が必要であると整理された。

3. 結言ー今後の取り組み

原子力機構では現在、今後、将来にわたって持続可能なNW活動が継続されることを目指し、緊急時支援・研修センター（NEAT）を中心とし機構内の各研究拠点の放射線管理部署及び放射線防護関連の研究部署、QSTや電力事業者等の指定公共機関と協調した取り組み、学会との連携等について準備・検討を進めている。

*1) 中野ら、茨城県東海・大洗地区における福島第一原子力発電所事故後の環境放射線モニタリングデータの共有と課題検討活動、保健物理 Vol.55-2, P102-109, 2020

*Chie Takada¹, et.al

¹Japan Atomic Energy Agency

保健物理・環境科学部会セッション

放射線防護に関する学会連携活動と今後の展開

Current and future perspectives of collaborative activities of academic society on radiation protection

(4) 実効線量と実用量に関する WG の活動

(4) Activities of the Working Group on Effective Dose and Operational Quantities

*佐々木 道也¹, 保田 浩志², 床次 眞司³, 細井 義夫⁴, 橋本 周⁵, 岩岡 和輝⁶, 神田 玲子⁶

¹電中研, ²広島大学, ³弘前大学, ⁴東北大学, ⁵原子力機構, ⁶量研

1. 緒言

令和 2 年度のアンブレラ事業において、アンブレラ代表者会議の直下に、放射線に関わる量に対する正しい理解に向けたとりまとめと提言を目的とした WG を組織することが決定され、実効線量・実用量の新概念が与える影響、緊急時に用いる吸収線量と実効線量、シーベルトと発がんリスクに関する誤解など、放射線防護アカデミア全体にかかわるテーマを扱う「実効線量と実用量に関する WG」(線量 WG) が設置された。本発表では、線量 WG の 2 年の活動と今年度とりまとめた課題と提言について紹介する。

2. 実効線量と実用量に関する WG の活動

2-1. Webinar の開催

関係者(専門家、実務者、規制当局)の共通理解を深めるため、実効線量と実用量に関する計 5 回の webinar を令和 2 年度に開催した。この webinar では、線量の歴史、リスク評価、国外動向、生物影響、コミュニケーション等様々な情報が改めて示され、課題が共有された。

2-2. 課題と提言の取りまとめ

今年度は、昨年度までに整理された情報、あるいは新たな情報をふまえて背景と現状を今一度整理して将来的な具体的アクションに結び付けるための提言を検討した。平成 31 年度の国際動向報告会、令和 2 年度のアンブレラ事業参画学会の調査や提言、他団体からの情報等を踏まえつつ、最近の主な動きとして、ICRU 報告書 95[1]、ICRP 刊行物 147[2]、及び ICRP 論文[3]についても内容を整理し、現状と課題に加えた。また、提言の検討にあたって、(1)関連学会及び規制関連省庁に対しては、新実用量を取入れる場合に必要な検討や準備を、(2)研究開発機関、専門家に対しては、規制ニーズのある研究と国際機関に対して日本から提供可能な情報(粒子線の RBE など)の観点を、そして(3)放射線管理・医療の実務者に対しては実務的課題の整理に結び付くよう心掛けた。提言は、①実効線量の取扱い、②放射線管理で用いる線量、そして③リスクの説明を対象としており、内容の詳細は当日紹介する。

3. 結言

参考文献[1]~[3]により、ICRP2007 年勧告前後から指摘されていた課題は対応されたもの、引き続き残っているものがある。現時点では、国際的な基準化及び国内への取入れ、現場適用等に対する課題の洗い出しは十分なレベルに達していない。我が国では 2007 年勧告の国内法令取入れが検討中である一方で、水晶体の新しい線量限度が法制度化され、また国際的には ICRP が次期主勧告の検討に着手した。しかし、線量は医療では日々患者への説明に使われ、緊急時への備えは着実に進めなくてはならないのも事実である。国際的なコンセンサス、国際動向、方向性を考慮しつつも、新しい実用量については、我が国の実状等も踏まえて社会に普及させるタイミングを検討する必要があると考えられる。

参考文献

[1] ICRU Report 95, J. ICRU 20(1) (Sage Publishing, Thousand Oaks, CA) (2020).

[2] ICRP Publication 147. Ann. ICRP 50(1) (2021).

[3] Clement et al., J. Radiol. Prot. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac1611> (2021).

*Michiya Sasaki¹, Hiroshi Yasuda², Shinji Tokonami³, Yoshio Hosoi⁴, Makoto Hashimoto⁵, Kazuki Iwaoka⁶ and Reiko Kanda⁶

¹CRIEPI, ²Hiroshima Univ., ³Hiroshima Univ., ⁴Tohoku Univ., ⁵JAEA, ⁶QST-NIRS

Planning Lecture | Technical division and Network | Committee on Nuclear Non-Proliferation, Safeguards and Security

[2G_PL] Application of artificial intelligence in the field of nuclear security and its challenges

Chair: Hironobu Unesaki (Kyoto Univ.)

Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room G

[2G_PL01] Application of machine learning models on the technologies related to nuclear forensics and first response for nuclear and radiological terrorism

*Yoshiki Kimura¹ (1. JAEA)

[2G_PL02] Proposal, development, and implementation of detection methods by combining image deep learning and natural language processing

*Kazuyuki Demachi¹ (1. UTokyo)

[2G_PL03] How can AI be used in the operation and management of important social infrastructure?

*Atsuhiro Tanaka¹ (1. NEC)

核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会セッション

核セキュリティ分野における人工知能技術の応用と課題

Application of artificial intelligence in the field of nuclear security and its challenges

(1) 核鑑識及び核・放射線テロ現場初動対応関連技術における機械学習モデルの

応用

(1) Application of machine learning models on the technologies related to nuclear forensics and first response for nuclear and radiological terrorism

*木村 祥紀¹¹JAEA

1. はじめに

日本原子力研究開発機構核不拡散・核セキュリティ総合支援センター（ISCN）では、不法移転やテロ事案などの現場から規制外の核物質及びその他放射性物質を押収し、押収されたそれらの物質の起源や履歴などを特定することで法執行機関による捜査活動を支援する技術的手段である「核鑑識」に関連した技術開発を進めている。核鑑識のプロセスは不法移転やテロ事案の現場における初動対応から、ラボでの分析及び分析データの解析を含み、それらに関連する技術的課題も多岐にわたる。ISCN では、核鑑識プロセスに関連する様々な技術的課題の解決を目的として、機械学習モデルを応用した新しい核鑑識技術の開発を行っている。本講演では、核セキュリティ分野における人工知能技術の応用例として、核・放射線テロ現場初動対応を含む核鑑識関連技術における機械学習モデルの応用に関する研究とその成果、今後の展望を紹介する。

2. 核鑑識における技術的課題と機械学習モデルの適用

近年、人工知能に関する中心的技術として様々な分野に応用されている機械学習は、サンプルデータから規則性などを学習し、解析の目的となるタスクを実現するモデルを構築する手法であるが、目的となるタスクやデータの種類・量などに応じて適切な機械学習モデルを選択することが非常に重要となる。ISCN では、機械学習モデルを応用した核鑑識技術開発に際し、核鑑識プロセス全体の評価と、それに基づいて機械学習モデルの潜在的なニーズを検討した。これらの評価に基づき、現在、核鑑識における技術的課題の解決に資する技術の実現を目標として、以下に関する技術開発を進めている。

- ① 深層ニューラルネットワークモデルによる放射性核種判定アルゴリズムの開発
- ② 深層距離学習モデルによる核物質表面パターン解析技術の開発
- ③ 核鑑識分析データの解釈における従来型機械学習モデルの応用に関する研究

3. 機械学習モデルを応用した核鑑識技術開発

3-1. 深層ニューラルネットワークモデルによる放射性核種判定アルゴリズムの開発

規制外の核物質及びその他放射性に関するテロ事案等の現場初動対応では、はじめに原因となる放射性核種の特定制が必要不可欠となる。これらの現場初動対応は放射線測定の実験家ではない法執行機関を中心に実施されることが想定され、そのため持ち運びがしやすい携帯型の検出器で迅速かつ高精度な核種判定が自律的に可能となる技術が必要となる。本研究では、携帯型検出器で測定したガンマ線スペクトルの解析に深層ニューラルネットワーク（DNN）モデルを応用した核種判定アルゴリズムの基礎技術を開発した[1]。本アルゴリズムでは、DNN モデルによる解析で推定した測定ガンマ線スペクトルの解析対象エネルギー領域における計数寄与率に基づいて核種判定を行う。本アルゴリズムの性能を、高エネルギー分解能の HPGe 検出器及び低エネルギー分解能の CsI(Tl)検出器でそれぞれ測定したガンマ線スペクトルのテストデータで評価した結果、非常に高い核種判定性能を達成できることが確認された（図 1, 表 1）。本アルゴリズムにおいて、DNN

モデルの学習は検出器シミュレーションで構築した模擬スペクトルで行っており、同様の手法で様々なタイプの検出器に応用可能な核種判定アルゴリズムを開発することができる。また、本アルゴリズムでは核種判定の結果だけでなく、DNN モデルによる計数寄与率の推定値をもとに初動対応者による結果の解釈を非常に容易に行うことができる。さらに、計数寄与率は核種判定だけでなく、現場における濃縮度に基づいたウランの分類推定といった用途にも応用可能である。

表 1: 核種判定アルゴリズムの性能評価結果

Detector	Model	Precision	Recall	F-score
HPGe	FC-ANN	1.000	0.880	93.62
HPGe	CNN-19	1.000	1.000	100.0
HPGe	Conventional ($3\sigma^*$)	0.735	1.000	84.75
CsI(Tl)	FC-ANN	0.722	0.520	60.47
CsI(Tl)	CNN-19	0.958	0.920	93.88
CsI(Tl)	Conventional ($3\sigma^*$)	0.882	0.600	71.43
CsI(Tl)	Conventional ($2\sigma^*$)	0.667	0.800	72.73

* 従来法（ライブラリ比較法）におけるピーク検知閾値

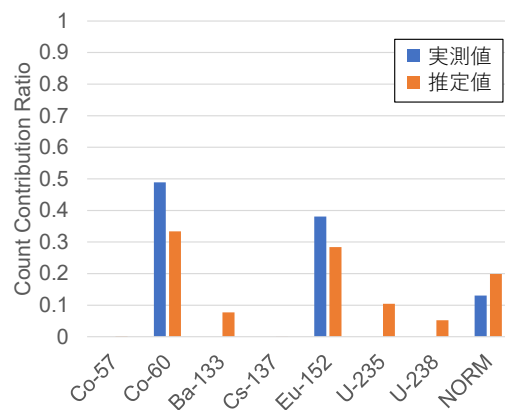


図 1: DNN モデルによる計数寄与率の推定例
(CsI(Tl)検出器, $^{60}\text{Co}+^{152}\text{Eu}$)

3-2. 深層距離学習モデルによる核物質表面パターン解析技術の開発

核鑑識分析では、規制外の核物質等の起源や履歴を特定するために、様々な側面から物質の特性を分析し、分析で得られたデータをもとに試料の異同識別解析を行う。本研究では、核鑑識分析における異同識別解析に関する技術的課題のひとつである顕微鏡画像データの解析に資する技術として、機械学習モデルを用いた核物質表面パターン解析技術の開発を進めている。核物質表面の微細パターンや粒子形状などの微細構造は電子顕微鏡による撮影で得ることができる物質特性であるが、定量的な分析をすることが難しく、特に表面パターンは客観的な解析が難しい。本研究では、画像解析分野で実績のある畳込ニューラルネットワーク (CNN) モデルを用いた深層距離学習により、表面パターンから試料を異同識別解析する技術を実現した [2]。本技術では、表面パターンを効果的に識別するための特徴量を抽出するモデルを距離学習により構築し、特徴量空間における距離に基づいて試料を分類する (図 2)。電子顕微鏡で撮影したウラン精鉱試料の画像データにより本技術の分類性能を評価した結果、高い性能で試料の異同識別が可能であることを確認した。また核鑑識分析においては、既知試料への分類だけでなく、分析試料が未知試料であるかどうかの判断もまた非常に重要となる。本技術では、深層距離学習モデルを用いることで、特徴量空間における既知試料からの距離に基づいて、高い性能で未知試料を検知することも可能である。

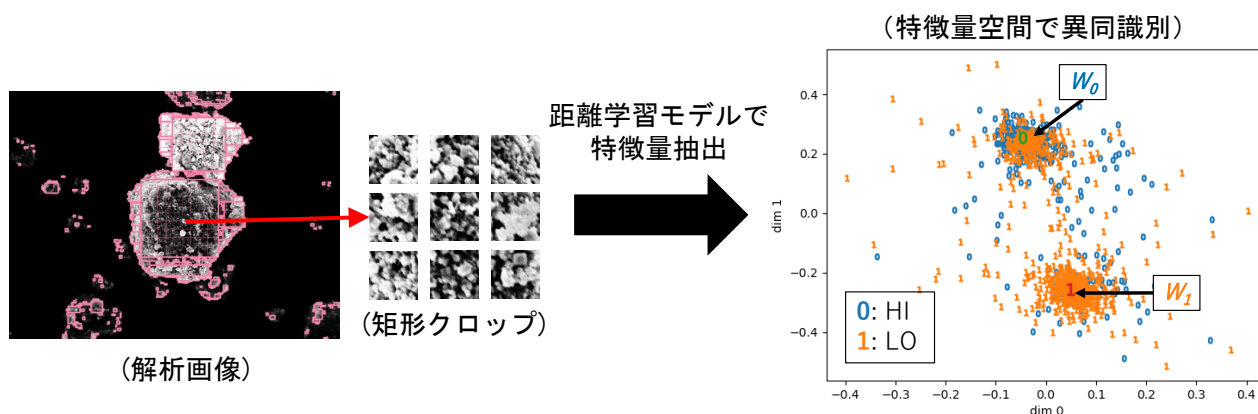


図 2: 深層距離学習モデルによる表面パターンに基づく異同識別解析 (イメージ)

4. まとめと今後の課題

核鑑識においては、押収物質の起源や履歴といった分析結果が犯罪証拠やその後の裁判資料として利用される可能性があることから、機械学習モデルを用いて得られた分析結果の説明・解釈が重要となる。近年様々な分野で応用が進められている機械学習モデルのひとつであるニューラルネットワークモデルは、結果の解釈が非常に困難であることが知られており、解釈性の高い機械学習モデルを応用した技術や、機械学習モデルによる結果の解釈を支援する技術の開発が今後の課題として挙げられる。

サンプルデータから規則性などを学習することで解析の目的となるタスクを高い性能で実現する機械学習モデルを応用することで、核鑑識における様々な技術的課題を解決する新しい技術を実現することが可能であることを、具体的な研究開発の成果を交えながら紹介した。これらの技術は核鑑識プロセスと機械学習モデルの潜在的なニーズ評価に基づいて研究開発が進められているものであるが、核鑑識を始めとした核セキュリティ分野においては依然多くの技術的課題が存在しており、それらの解決方法として機械学習モデルの応用可能性は非常に高いものであると考えられる。

謝辞

本稿で示した成果の一部は文部科学省核セキュリティ強化等補助金事業及び科学研究費補助金(18K04646)によるものです。

参考文献

- [1] Y.Kimura, K.Tsuchiya., submitted, *Radioisotopes*.
- [2] Y.Kimura, T.Murai, presentation in *Workshop: Application of AI to Nuclear Forensics* (2021).

*Yoshiki Kimura¹

¹JAEA.

核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会セッション

核セキュリティ分野における人工知能技術の応用と課題

Application of artificial intelligence in the field of nuclear security and its challenges

(2) 画像深層学習と自然言語処理を融合した検知手法の提案・開発・実装

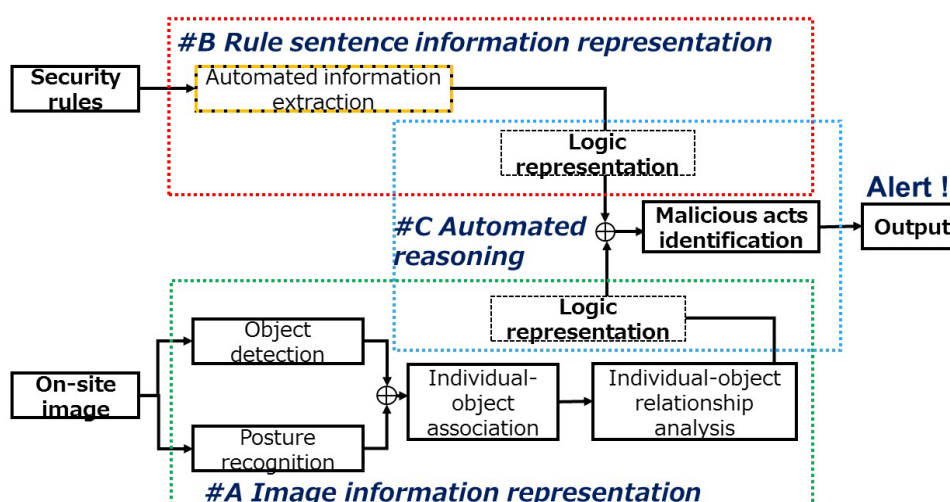
(2) Proposal, development, and implementation of detection methods by combining image deep learning and natural language processing

*出町 和之¹, 陳 実¹¹ 東京大学

近年、窃盗や万引きなどの犯罪行為を画像深層学習を用いて検知する技術がさまざまに開発されてきている。しかしその多くは正常／正常からの逸脱に対する二値判定であり、複雑な状況（シーン）となり得る核物質の盗取や妨害破壊行為などの違反行為に対する検知へ適用するには複数種類の二値判定を複雑に組み合わせたプログラミングが必要となる。

一方、核物質の盗取や妨害破壊行為などの違反行為を禁じるルールは、文として定義することが可能である。もし、画像に映る複雑な状況をこれらルール文書と直接比較することで違反行為の有無を判定することができれば、複雑な判定プログラムを作成する必要がなくなり利便性が格段に向上すると期待できる。しかしそのためには、画像深層学習と自然言語処理という異なる2つの深層学習同士のインターフェイスが必要となる。東大・出町研では3種のアルゴリズムを提案・開発・実装し、このインターフェイスを実現した。

1 つめのアルゴリズムは「#A 画像情報の論理表現化」であり、監視カメラなどで撮影された状況を物と人の位置関係に基づき論理表現化するものである。ビッグデータに依存するAI手法の主流とは異なり、非AI画像解析とAI画像解析との融合により少ない教師データでの学習と時間短縮を実現した。2 つめは「#B 安全文章情報の論理表現化」であり、形態素解析と関係性抽出により文意を論理表現へと変換した。3 つめは「#C 自動判定」アルゴリズムであり、#A と#B の出力である論理表現同士の一致・不一致を判定して作違反行為の有無を自動検知する。以上の3つのアルゴリズムは自動計算プログラムとして実装済みである。この発表ではこれら3つのアルゴリズムについて詳細を解説する。



図：画像深層学習と自然言語処理の融合による違反行為検知アルゴリズム

*Kazuyuki Demachi¹ and Shi Chen¹¹The University of Tokyo

核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会企画セッション

核セキュリティ分野における人工知能技術の応用と課題

Application of artificial intelligence in the field of nuclear security and its challenges

(3) 重要インフラ管理のために我々はどうのように AI を活用できるのか？

(3) How can AI be used in the operation and management of important social infrastructure?

*田中 淳裕¹¹NEC セキュアシステム研究所

1. はじめに

重要インフラの運用管理に AI 技術が使われ始めている[1, 2]。これはセンサーデータにより設備の稼働状況をモニタリングし大量のデータ処理を AI に行なわせることで、短時間で正確なモニタリングが可能となるという期待に基づいている。データ量の増大への対処はコンピュータプログラムが得意とすることであり、確立された手法（統計値の算出、外れ値による正常・異常の判断等）の利活用として導入が進められている。また最近では深層学習（DNN: Deep Neural Network）という手法を用いることで、従来技術では検出できなかったような微小な変化を初期段階で検出し、運用管理に活かす試みもなされている[3]。

このように AI 技術への期待感が高まる中で、重要インフラに AI を適用する際には、AI が認識する際の特徴（認識のクセ、バイアス）を理解し、認識バイアスへの対処が必要になると考える。以下では AI 利活用に潜むリスクについて、視覚情報処理における例を取り上げ今後の AI 活用における指針を議論する。

2. 視覚情報処理における誤認識

2-1. 錯視 --- 人間による誤認識

AI による認識のクセを議論する前に、人間が良く引き起こす誤解・誤認識について簡単に紹介する。最も有名な例がエッシャーやペンローズによるだまし絵であろう[4]。二次元の図として描かれた一見もつもらしい構造物がいくつも知られている。ただし実際に三次元の構造物を作ろうとしても物理制約を満たしていないために作ることができない（図 1: ペンローズの階段）。また視覚より得られた二次元情報をもとに三次元の物体を脳内で再構築するという人の認識のクセを活用することで、何度回転させても「右しか向かない矢印」を構成することが可能であることも知られている[5]。

人がどういう場合に誤解するのか、騙されるのかを事前に洗い出しリスクを特定することは、重要な決定を行う際に不可欠であり、組織的な対処策を構築することが必要とされている。

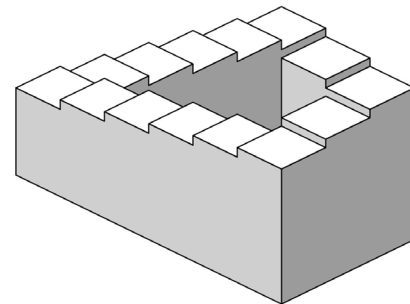


図 1: ペンローズの階段
(Wikipedia より)

2-2. 認識 AI による誤認識

画像認識 AI が騙される例は Goodfellow らの研究[6]により指摘された。人間には気が付かれないレベルのノイズを入力画像に加えることで、画像認識 AI が人とは全く異なる認識をしてしまう。図 2 はパンダの画像にノイズを乗せることで、高い信頼度でテナガザル (gibbon) と AI が誤認識した例である[7]。

この研究をきっかけとし、認識 AI に対する攻撃 (Adversarial Examples; 敵対的入力) の研究が進められている。もし仮に敵対的入力が悪用されると、例えば道路の制限速度を誤認識させるように交通標識を汚す攻撃など、社会インフラに大きな影響を及ぼすような事態になることも予想される。

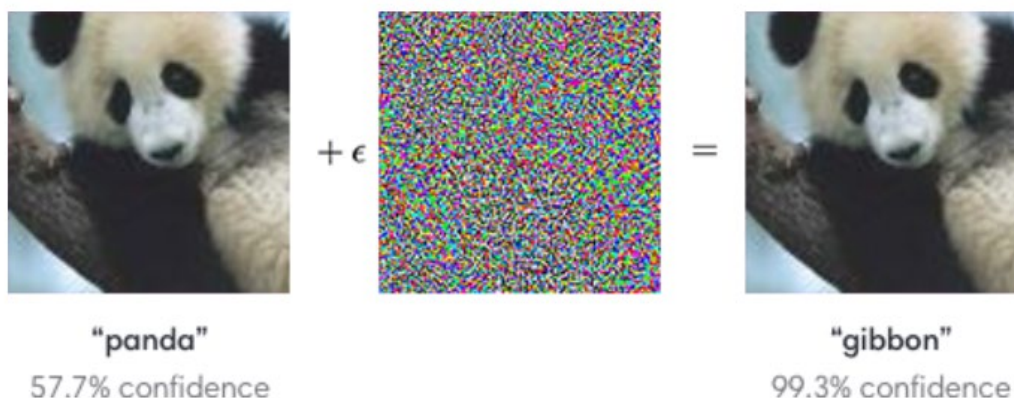


図 2: 敵対的入力による誤認識の例 [7]

3. AI 活用に向けて

人間の認識にはクセがあり誤認識をすることが知られている。同様に AI も誤認識をすることを、敵対的入力は我々に教えてくれた。深層学習 DNN はラベル付けされた正解データを大量に学習させることにより、従来不可能であった分類問題（例えば早期の異常検知等）への応用が期待されている。一方で詳細な動作原理に関しては未解決な部分も多く、信頼性を上げるための研究が盛んに進められている[8]。

AI を用いてシステムの信頼性を向上するためには、AI の認識の特徴を理解することで誤認識が起こり得るシーンを特定するとともに、他の手段で誤認識が起きたことを判別し、更に補間する手段を準備することが必要である。新しい技術の導入は一朝一夕に行うことはできない。多様な知見・経験を持つ有識者とともに、多方面からの検証活動を行いながら AI の導入を進めていきたい。

参考文献

1. 棗田昌尚、落合勝博、朝倉敬喜、林司、インバリエント分析技術の大規模物理システムへの適用－原子力発電所の監視への適用を例に－、情報処理学会 (IPSJ) デジタルプラクティス、Vol.6, No.3, pp. 207-214, 2015 年 7 月。
2. 相馬 知也、インバリエント分析による火力発電プラントの状態監視：見えなかった状態の可視化によるメンテナンスの効率化、保全学、2020 年 10 月, pp.14-17。
3. 吉永 直生、外川 遼介、網代 育大、時系列データ モデルフリー分析技術、NEC 技報、Vol.72, No.1, 2019 年 10 月。
4. 杉原厚吉、エッシャー・マジック --- だまし絵の世界を数理で読み解く、東京大学出版会、2011 年。
5. Kokichi Sugihara, 「立体錯視の世界」第 1 回「右しか向かない矢印」、YouTube, <URL: <https://youtu.be/qTFofXh9rE0>>
6. I. J. Goodfellow, J. Shlens, and C. Szegedy, Explaining and harnessing adversarial examples. In 3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015, San Diego, CA, USA, May 7-9, 2015.
7. Attacking Machine Learning with Adversarial Examples, <URL: <https://openai.com/blog/adversarial-example-research/>>, 2017 年 2 月
8. 森川 郁也、機械学習セキュリティ研究のフロンティア、通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol.2021, No.1, p. 37-46, 2021 年 7 月。

*Atsuhiko Tanaka¹

¹Secure Systems Research Labs., NEC Corporation

Planning Lecture | Over view Report | Research Committee on Fission Product Behavior Related to Decommissioning Work of Fukushima Daiichi NPP

[2H_PL] Activity Reports of Research Committee on Fission Product Behavior Related to Decommissioning Work of Fukushima Daiichi NPP

Chair: Junichi Takagi (TOSHIBA ESS)

Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room H

[2H_PL01] Aims and policy of activities of this research committee

*Shuhei Miwa¹ (1. JAEA)

[2H_PL02] Estimation of dose rate distribution in PCV and future challenges

*Keisuke Okumura¹ (1. JAEA)

[2H_PL03] Behavior of FP suggested by radioactive contamination of waste

*Yoshikazu Koma¹ (1. JAEA)

[2H_PL04] Activity status of extended committee members

*Yoichi Wada¹ (1. Hitachi)

総合講演・報告 「福島第一原子力発電所廃炉に係る核分裂生成物挙動」研究専門委員会

「1F 廃炉に係る FP 挙動」研究専門委員会活動報告

Activity Reports of Research Committee on Fission Product Behavior Related to Decommissioning
Work of Fukushima Daiichi NPP

(1) 研究専門委員会の目的と活動方針

(1) Aims and policy of activities of this research committee

*三輪 周平

JAEA

1. 本研究専門委員会設置の経緯

2017 年度～2020 年度の 4 年間で開催された「シビアアクシデント（SA）時の核分裂生成物（FP）挙動」研究専門委員会では、福島第一原子力発電所（1F）事故における FP 挙動を調査し、FP 炉内分布や環境放出量評価における新たな技術課題を整理した。具体的には、①実機データ評価によるプラント内外の FP 分布の概要把握、②ベンチマーク評価による SA 解析コードの技術課題及び廃炉時の FP 解析への拡大のための技術課題の明確化、そして③FP 放出、移行挙動に係る基礎データの精査による重要実験課題の選定、を行った。この活動を通じて FP 挙動に関する情報の共有化が可能となり、共通技術基盤上に新たな技術者集団を構築できた。この成果は、今後 40 年超とされる長期にわたる廃炉作業等のための技術継承に資することを目的として、技術報告書としてまとめられた[1]。

しかし、上記の研究専門委員会の成果は事故時の FP 挙動を理解し、1F 事故時の FP 挙動を予測するためには有益であるが、格納容器内の FP 分布の把握、廃炉作業の進展に伴う FP の移行及びその廃炉作業への影響など、将来にわたる FP 挙動を予測するにはまだ十分とはいえない。そこで、「1F 廃炉に係る FP 挙動」研究専門委員会を設置し、1F 廃炉、さらに軽水炉の安全性向上の取組に資するための調査・検討をさらに進めることとした。

2. 本研究専門委員会の目的

本研究専門委員会では、「SA 時の FP 挙動」研究専門委員会で抽出された技術課題をもとに、以下を目的とした調査・検討を実施し、最終的には FP 挙動に係る研究開発のロードマップを作成することを目指す。

- ① これまでの成果を廃炉期間中の FP 挙動（FP 分布把握、廃炉作業までの FP 移行、廃炉作業への影響など）を予測可能な技術に高めることにより、主に事故後を対象とした 1F 事故事象の把握と廃炉作業に貢献する。
- ② 1F 事故事象の把握で得た情報をソースタームの予測技術の向上に反映させ、原子炉安全の一層の向上に繋げることにより、主に事故時を対象としたソースターム予測技術の向上に貢献する。

3. 本研究専門委員会の活動方針

先ず、1F 廃炉や軽水炉の安全性向上に向けて取組がなされている以下の 4 つのテーマについて幅広く調査し、「SA 時の FP 挙動」研究専門委員会で抽出された技術課題との整合を図りつつ、新たな技術課題の抽出・整理を行い、その解決に向けた大きな道筋を示す。

- (1) 1F 廃炉作業／東京電力・国際廃炉研究開発機構（IRID）の取組：事故後に公開された 1F 廃炉に係る現場の直接的な情報・データを改めて俯瞰し、課題抽出に必要な情報の再収集、整理を図る。
- (2) 1F 廃炉作業／JAEA/廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）の取組：CLADS が公開している「基礎・基盤の全体マップ」から課題を調査・整理し、解決方針案等を抽出する。
- (3) ロードマップ・海外研究：国内外の各種委員会等で発行されている各ロードマップ、Phenomena Identification Ranking Table（PIRT）を整理し、FP 挙動に関する課題、優先度を抽出する。

- (4) ソースターム予測技術：シビアアクシデント技術評価委員会等における新たな知見や情報を整理し、1FにおけるFP挙動に関する課題を整理する。

これらの検討により抽出された技術課題等をもとに、必要な研究開発や技術を検討し、ロードマップを作成して技術報告書として取りまとめる。

これらの検討を進める際には以下を留意する。

- ・ 議論を深めることを重要視し、先ずは若手を含めた「拡大幹事会」において上記(1)～(4)の調査を進め、委員会全体で議論や課題の特定を行う。課題解決策の検討の段階でワーキンググループを構成して調査を進める。
- ・ 計10部会からの委員による、専門分野を跨ぐ多面的なFP挙動の議論・検討を行う。

参考文献

[1] 「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会, “シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動”, 原子力学会技術報告書 (2021).

* Shuhei Miwa

JAEA

総合講演・報告「福島第一原子力発電所廃炉に係る核分裂生成物挙動」研究専門委員会

「1F 廃炉に係る FP 挙動」研究専門委員会活動報告

Activity Reports of Research Committee on Fission Product Behavior Related to Decommissioning
Work of Fukushima Daiichi NPP

(2) PCV 内線量率分布推定と今後の課題

(2) Estimation of dose rate distribution in PCV and future challenges

*奥村 啓介

日本原子力研究開発機構(JAEA) 廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)

1. PCV 内線量率分布推定の目的と概要

2011 年 3 月の福島第一原子力発電所（1F）の事故後、東京電力ホールディングス（東電 HD）及び国際廃炉研究開発機構（IRID）を中心として、主に炉内状況把握を目的とした 1F 事故進展解析や原子炉格納容器（PCV）の内部調査が実施されてきた。IRID による事故進展解析では、MAAP と SAMPSON コードが利用され、PCV 内の燃料デブリ分布や核分裂生成物（FP）の分布の推定がなされた[1]。また、PCV の内部調査では、遠隔操作ロボット等によるカメラ映像の取得、宇宙線ミュオンによるイメージング、汚染物等の採取と分析、温度や水位の確認、小型センサーによる線量率測定などが行われ、得られたデータは東電 HD や IRID のホームページなどで公開されている。

1～3 号機に対する内部調査では線量率も実測されているが、同じ号機であっても調査時期、計測場所、水位などの条件が異なっている。そこで、JAEA では、過去の内部調査で得られた時間的にも空間的にも断片的な情報を活用し、現在または将来における PCV 内の連続的な線量率分布を予測する手法の開発を進めてきた。これは、東電 HD や IRID により得られた事故進展解析の結果（燃料デブリ分布、FP 分布）、内部調査の結果（カメラ映像、線量率実測値、水位）、汚染水等のサンプリング分析値（Cs 濃度、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比）などの情報と、事故前の炉内燃料や構造材の燃焼・放射化計算、調査時期または評価時期までの核種崩壊生成計算などの理論計算を組み合わせ、破損および汚染された 1F の 3 次元 PCV モデルを計算機上に構築し、PCV 内の線量率分布を PHITS コード[2]による放射線輸送モンテカルロシミュレーションにより予測するものである[3,4]。2 号機に対するモデルと解析結果の例を図 1 に示す。

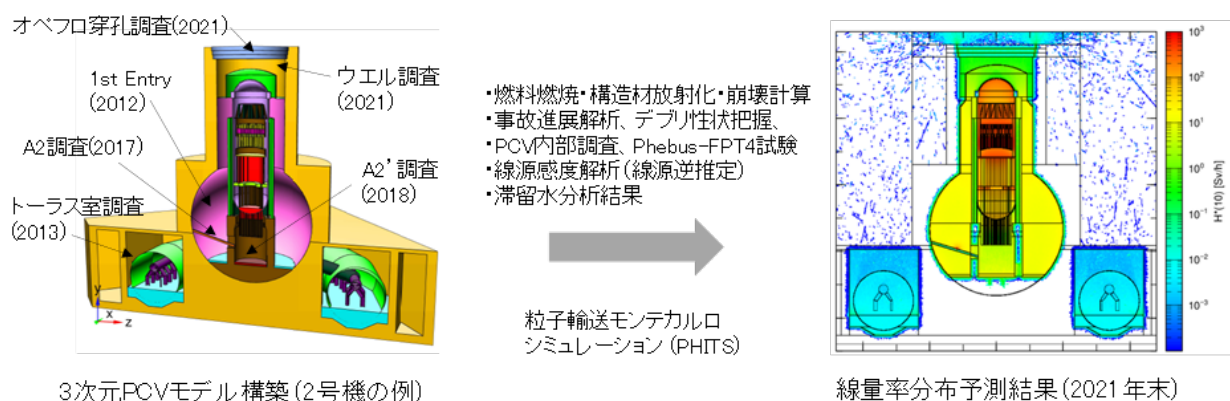
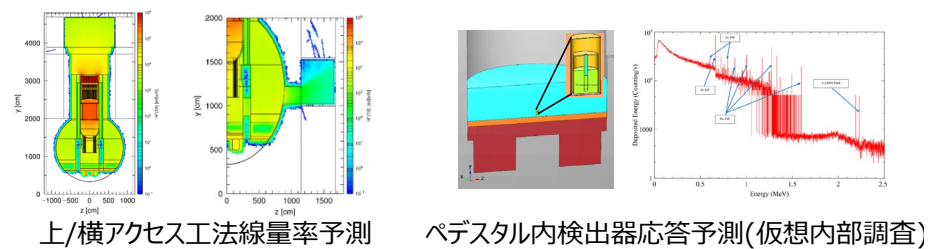


図 1 格納容器内線量率分布推定（2 号機の例）

事故進展解析による Cs 分布（初期設定）は不確かさが大きいいため、内部調査により線量率実測値が得られた場合には、線源感度解析に基づく逆推定により Cs 濃度分布を過去の調査結果を含めて実測値と合うように修正している。逆に言えば、内部調査による線量率の測定位置に対して線源感度が無い領域では、得られている線量率の信頼性は初期値として利用した事故進展解析による FP 分布の精度に強く依存することになる。

圧力容器の内部などがこれにあたる。本解析のこれまでの主な用途は、事故進展解明というよりは、燃料デブリ取り出しを想定したケーススタディであり、図2に示すような廃炉工法模擬計算による線量率分布変化の予測や燃料デブリ検知のための検出器応答計算を行って、内部調査への提言などに利用している[3,5]。



2. 今後の課題

2021年5月末に、東電HDにより2号機の原子炉

図2 廃炉工程模擬計算（左）とデブリ検知検出器応答計算（右）

ウエル調査が行われた。この調査が行われるまで、ウエル内の線量率はおおよそ40 Sv/h程度と予測していた。しかし、実測された線量率は、ウエル内平均でおよそ0.4 Sv/hと予想外に低いものであった。このため、6月にはJAEAと東北大学が協力して種類の異なる複数の線量計を用いて、2回目の調査が行われたが、前回とほぼ同様な結果が得られた。カメラ映像も鮮明であったことから、1 Sv/h以下の線量率であることは間違いないことが確認された。この実測結果を線量率分布に反映するため、原子炉ウエル内のみならずドライウエル上蓋内側のCs濃度まで下方修正することが余儀なくされた。事故時におけるCsの移行経路としては、「RPVフランジ隙間→PCVフランジ隙間→原子炉ウエル→シールドプラグ隙間→オペフロ」と考えられているが、未だ内部調査が入っていないRPV内からPCV上部までの広範囲な線量率分布予測にも影響することから、原子炉ウエル内の線量率を再現できるような事故進展解析が望まれる。

2号機では、原子力規制庁によりシールドプラグ1段目と2段目の隙間に高濃度のCs汚染が存在する可能性が指摘され、2021年12月にはオペフロ穿孔調査が実施された。図3は、新たに穿孔された13カ所での線量率の測定結果[6]をオペフロ表面で規格化し、深さ方向への依存性を見たものである。

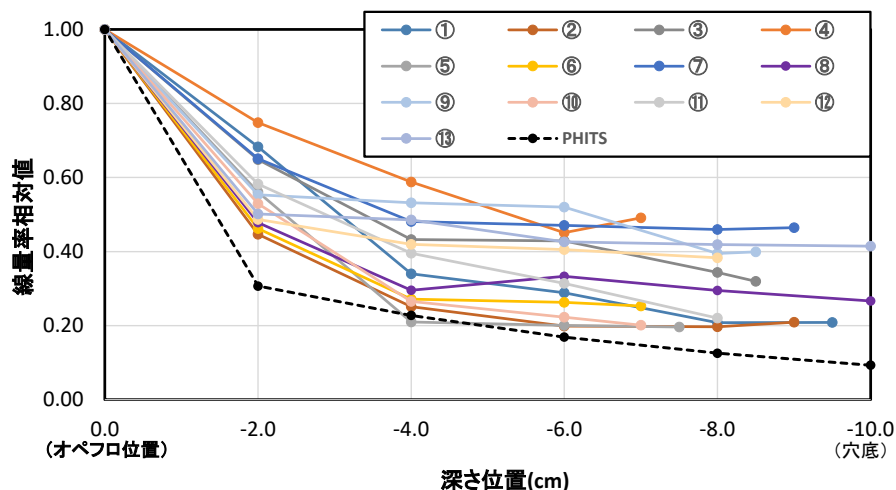


図3 2号機オペフロ穿孔調査による線量率深さ方向相対分布

オペフロ表面から4 cm程度までは線量率の減少傾向が見られ、その後は大きく変化していない。このような傾向は、表面から61 cm下方にあるCs汚染源では説明することは困難であり、むしろオペフロ表面の汚染源を仮定したPHITSによる穿孔模擬計算の結果（黒破線）に傾向が近い。このため、シールドプラグ隙間における高濃度Cs汚染の有無は未だ判断しないで、当面は両方の可能性の検討を続けることとしている。

2号機では、ミュオンイメージングや事故進展解析の結果から、大部分の熔融燃料がRPV内に残存していると推定されており、上アクセスによる燃料デブリ取り出しは必須と考えられる。よって、シールドプラグ

から、原子炉ウエル、PCV 内上部、RPV 内までの経路における FP 分布の精度向上は重要であり、内部調査を入れにくい場所でもあることから、FP 挙動を含む事故進展解析の高精度化に期待している。

参考文献

- [1] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)、一般財団法人 エネルギー総合工学研究所(IAE), “平成 26 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 (事故進展解析及び実機データ等による炉内状況把握の高度化) 最終報告”, 平成 28 年 3 月.
- [2] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, et al., “Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02”, J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), pp.684-690 (2018).
- [3] 日本原子力学会「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会, pp.116-121, (2021 年 5 月).
- [4] K. Okumura, E. S. Riyana, W. Sato, et al., “A method for the prediction of the dose rate distribution in a primary containment vessel of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station,” Progress in Nuclear Science and Technology, 6, pp.108-112, (2019).
- [5] E.S. Riyana, K. Okumura, K.Terashima, “Calculation of gamma and neutron emission characteristics emitted from fuel debris of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station,” Journal of Nuclear Science and Technology, 56, pp.922-931 (2019).
- [6] 東京電力ホールディングス株式会社, “2 号機オペフロ内シールドプラグ穿孔部調査について”, 2021 年 12 月 21 日, 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 (第 27 回), 資料 5-1.

*Keisuke Okumura, Japan Atomic Energy Agency

総合講演・報告 「福島第一原子力発電所廃炉に係る核分裂生成物挙動」研究専門委員会

「1F 廃炉に係る FP 挙動」研究専門委員会活動報告

Activity Reports of Research Committee on Fission Product Behavior Related to Decommissioning
Work of Fukushima Daiichi NPP

(3) 廃棄物の汚染状態から見る FP の挙動

(3) Behavior of FP suggested by radioactive contamination of waste

*駒 義和^{1,2}¹JAEA, ²IRID

1. 廃棄物の放射化学分析

放射性廃棄物を適切に管理する上で廃棄物の性状に関する情報が重要であり、処分方策を検討するために、長半減期の核種を含む核分裂生成物 (FP) の分析データが蓄積されてきている。FP の挙動は、廃棄物が含有する放射能の推定や決定に対して有用であり、着目して検討を進めている。廃棄物の放射化学分析では汚染の結果を調べるので、結果からその過程を導いていく、いわゆるバックワードからのアプローチを行うこととなる。これまでに得られたデータを引用して、FP の挙動を示唆する知見を概説する。

2. 分析データ

廃炉・汚染水対策事業に基づいて福島第一原子力発電所 (1F) において採取された試料を茨城地区の施設に輸送し、分析が進められている。瓦礫類、汚染水や水処理二次廃棄物を分析して得られたデータはデータベースに収録、公開されている^[1]。種々の核種の挙動を考察する上で、基準とする核種を定め、相対的な濃度を用いると便利であり、さらに濃度比をソースタームにおける比により規格化すると (以下、輸送比と呼ぶ) ふるまいを議論しやすい。輸送比 T は次式により算出した^[2]。

$$T_X = \frac{N_{X, \text{Sample}}/N_{X, \text{Source}}}{N_{\text{Ref, Sample}}/N_{\text{Ref, Source}}} = \frac{c_{X, \text{Sample}}/c_{\text{Ref, Sample}}}{A_{X, \text{Source}}/A_{\text{Ref, Source}}}$$

ここで、 N は原子数、 c は濃度 (Bq/kg, Bq/cm² ...)、 A は放射能 (Bq)、 X は対象とする核種、Ref は指標核種、Sample は分析した試料、Source はソースタームを表す。

3. 放射性核種の移行過程

放射性核種がソースタームから移行する過程に関して、移行の形態は重要な因子である。環境試料では、オートラジオグラフィにより放射性粒子を同定してキャラクタリゼーションが行われている^[3]。1F の廃棄物については、コンクリート片のイメージングプレート撮影のデータが報告されている^[4]。3号機の1階において遠隔重機により2014年に採取された試料のイメージを図1に示す^[5]。試料の表面が平坦ではなく影が生じたが、数多くの斑点が観察され放射性粒子の付着が認められる。大気汚染の分野では粒子状物質の分布を統計的に取り扱っており、1Fでの放射性物質の汚染に対しても同様の手法の適用が考えられる。瓦礫試料への核種の輸送比を計算すると、その頻度分布は対数正規分布様を呈し、これを仮定することにより分布の不確実性を定量的に評価する試みがなされている^[6]。

損傷した燃料に含まれる放射性核種は、冷却水へも移行している。汚染した水は、構造物を二次的に汚染するとともに、水を除染した後はスラリーや吸着材が廃棄物として生じることから、水の分析も重要である。建屋地下滞留水中の¹³⁷Cs濃度の推移を図2に示す。汚染水の除染処理が始められてから1年ほどは希釈の効果が見られる。1から4号機の水が集められる集中廃棄



図1 1号機原子炉建屋1階で採取されたコンクリート片 (3RB-AS-R9-1) の外観 (左) とオートラジオグラフィ像 (右) の例

物処理施設ではおおよそ 10^4 から 10^5 Bq/cm³ で推移するが、水位の低減に伴う濃度の増減が見られる。タービン建屋にあっては、いずれも2020年中に床が露出するに至り、汚染水が取り除かれた。水への核種の移行は、事故が発生した際の一時の移行と、燃料デブリからの継続的な溶出を考慮すべきである^[7]。

4. 元素の性質に基づく挙動の違い

損傷した燃料からの放射性核種の移行は元素の性質による影響を受ける。土壌への輸送比は、おおよそ I、Te、Cs、Ag~Sb、Tc、Ru、Ba~Sr、Nb、Pu の順となる^[2]。Cs に比べて I は優先的に放出されており、Se は同等である。

これら核種の放出は、運転中に燃料棒内の低温部へ移動したことが寄与したとみられる。揮発性との関係がうかがわれることから、距離との相関に着目すると、分析データが多い

Sr の輸送比は、発電所の中、1-2 号機スタックから西北西 500 m の地点においておおよそ 0.001 であり、所外では値のばらつきが大きいものの幾何平均は 0.0015 であった^[2]。環境中を粒子状で移行した場合、距離が組成へ与える影響は小さいことがうかがわれる。

また、水への輸送比は、Se、I、H、Sr、Ni、Pu の順であった^[2]。Se と I が Cs に比べて水に移行しやすく、運転中の燃料棒内低温部への移動と水溶性化学種の生成が相まって現れたものと考えられる。³H と ⁹⁰Sr の輸送比は徐々に増加する傾向を示し、Cs に対して初期の一時移行における挙動が異なる可能性がある。

5. 今後の課題

廃炉に伴って放射性廃棄物は増加しており、今後燃料デブリの取り出しが本格化しソースタームに近い領域から廃棄物が発生すると、異なる核種の組成が観察される可能性がある。高放射性である試料の入手と分析には困難さが増すと見込まれ、対策を講じて着実に分析を進める必要がある。また、分析データを元にして、FP の汚染挙動を表現するモデルを構築し、廃棄物の放射能濃度決定のみならず、廃炉の実用的、基礎的研究に役立てることが期待される。

謝辞

この発表は、平成 30 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分にに関する研究開発）」で得られた成果の一部を含む。

参考文献

- [1] JAEA, “福島第一原子力発電所事故廃棄物に関する分析データ集 (FRAnDLi).” <https://frandli-db.jaea.go.jp/FRAnDLi/>
- [2] Y. Koma et al., Nuclear Materials and Energy, 10, 35–41 (2017).
- [3] T. Ohnuki et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 56(9-10), 790-800 (2019).
- [4] IRID, JAEA, “試料の分析結果,” 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議（第 56 回）, 平成 30 年 7 月 26 日.
- [5] IRID, “平成 30 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分にに関する研究開発）」2020 年度最終報告,” 令和 3 年 10 月. <https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2021/12/2020010kotaihaikibutuev2.pdf>
- [6] D. Sugiyama et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 58(4), 493–506 (2021).
- [7] A. Shibata et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 53(12), 1933–1942 (2016).

*Yoshikazu Koma^{1,2}

¹ Japan Atomic Energy Agency, ² International Research Institute for Nuclear Decommissioning.

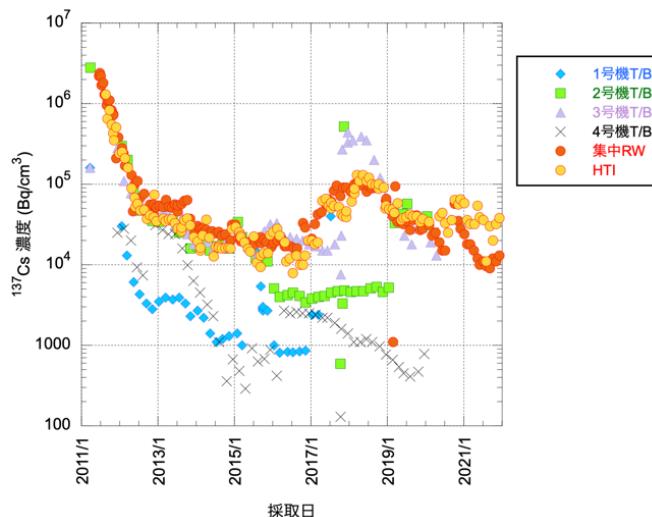


図2 1から4号機のタービン建屋 (T/B) と集中廃棄物処理施設のプロセス主建屋 (集中RW)、並びに同 高温焼却炉建屋 (HTI) 汚染水中の ¹³⁷Cs 濃度の推移

総合講演・報告 「福島第一原子力発電所廃炉に係る核分裂生成物挙動」研究専門委員会

「1F 廃炉に係る FP 挙動」研究専門委員会活動報告

Activity Reports of Research Committee on Fission Product Behavior Related to Decommissioning Work of Fukushima Daiichi NPP

(4) 拡大幹事会活動状況

(4) Activity status of extended committee members

*和田 陽一

日立・研開

1. 拡大幹事会

2020 年度まで活動を行った「シビアアクシデント(SA)時の核分裂生成物(Fission Products, FP)挙動」研究専門委員会では、3つのワーキンググループの下に、FP 挙動実験、FP 挙動評価、および実機データ評価・課題抽出のそれぞれの技術調査、FP 挙動に関する技術の共有、福島第一原子力発電所の FP 関連データの収集、評価に係る活動を行い、その4年間にわたる活動の成果を技術報告書としてまとめた[1]。

「1F 廃炉に係る FP 挙動」研究専門委員会では、①1F 事故事象の把握と廃炉作業への貢献、並びに②ソースターム予測技術の向上への貢献、という2つの目標の下に2021年6月に活動を開始した。その中で、前研究専門委員会の反省を踏まえ、幹事会および研究専門委員会全体会議での議論を経て、検討すべき技術課題の抽出と絞り込みを行うために担当幹事を中心とした「拡大幹事会」を設置することとした。本研究専門委員会の活動期間の前半は拡大幹事会により技術課題の選定を行い、後半に技術課題に応じていくつかのワーキンググループを設置して拡大幹事会で抽出された技術課題に関するロードマップ等を検討する方針とした。

2. 活動状況

拡大幹事会の活動状況を以下に報告する。本研究専門委員会内には4つの拡大幹事会を設置した。それぞれ、①東京電力ホールディングス（株）（東京電力）/技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)、②（国研）日本原子力研究開発機構(JAEA)/廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)、③ロードマップ・海外研究、および④ソースターム予測技術、の4テーマである。各拡大幹事会は担当幹事を含めて4、5名程度の人数での調査・検討を行い課題の抽出を図る。図1に拡大幹事会の構成を示す。各拡大幹事会の中に2～3の調査対象があり拡大幹事が分担して調査を進めている。

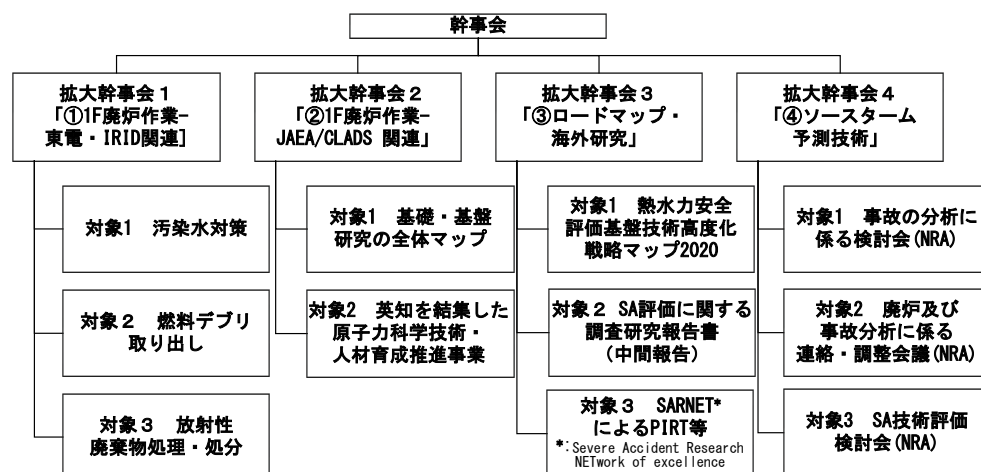


図1 拡大幹事会と調査対象

拡大幹事会1は1F 廃炉作業の内、東京電力/IRID 関連の調査を行っている。本研究専門委員会の2つの目

標を達成するためには 1F 現場情報の取得が大前提との考えの下、公開されている直接的なデータを俯瞰し、情報の収集・整理を行っている。具体的には汚染水対策、燃料デブリ取り出し、および放射性廃棄物処理・処分の 3 つの課題に対し東京電力ホームページ[2]、国の委員会等の公開データ、IRID の研究開発成果を調査し 1F での FP 挙動に関する情報を収集し、1F 廃炉を実現するための技術課題を探っている。

拡大幹事会 2 は 1F 廃炉作業の内、JAEA/CLADS 関連の調査を行っている。調査対象は CLADS における①基礎・基盤研究の全体マップ[3]、並びに②英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業[4]である。CLADS では廃炉作業に向けた基礎・基盤研究を進めており、汚染水対策から処理・処分・環境回復までの廃炉全体工程を俯瞰して解決すべき課題を全体マップとしてまとめている。FP は燃料デブリ取り出しにおける炉内状況把握の一項目として FP の状況把握が挙げられ課題の詳細や関連研究が記載されている。この全体マップと関連研究としての上記推進事業の中から、本研究専門委員会の対象範囲に関連した課題を整理する。

拡大幹事会 3 はロードマップ・海外研究を対象としている。1F 事故の後、軽水炉研究開発、安全研究等において課題を示したロードマップや Phenomena Identification and Ranking Table (PIRT)が改訂されている。本拡大幹事会では各ロードマップや PIRT を対象に 1F 前後での変更点等を整理し、重要な FP 挙動とその優先度を整理する。調査対象は、①熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ 2020[5]や②SA 評価に関する調査研究報告書などの国内の報告書やロードマップの他、③海外のロードマップ・PIRT 等を対象として技術課題の抽出を行う。

拡大幹事会 4 はソースターム予測技術に関するものであり、①事故分析に係る検討会（原子力規制委員会 (NRA)）[6]、②廃炉及び事故分析に係る連絡・調整会議 (NRA) [7]、および③SA 技術評価検討会 (NRA) [8] の調査を行いロードマップに反映すべき課題の抽出を行っている。1F 事故分析結果、現地調査結果に基づき課題を抽出し、予測技術向上に調査結果を反映するための提案を行っていく。一例として、1～3号機のシールドプラグの汚染がある。今後更に調査を続け、ソースタームに及ぼすシールドプラグ汚染の影響の重要性を検討していく。

以上に述べたように 4 つの拡大幹事会を推進している。拡大幹事会での調査・検討結果を本研究専門委員会内で更に議論し、抽出された技術課題についてのワーキンググループ活動により 2 つの目標を実現するための FP 研究ロードマップ等の策定につなげていく。

[参考文献]

- [1] 日本原子力学会「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会、「福島第一原子力発電所における核分裂生成物の短期/長期挙動」、日本原子力学会技術報告書、ISBN 978-4-89047-179-9 (2021/5) .
- [2] 東京電力ホームページ、福島への責任、公表資料、会議体等資料、中長期ロードマップの進捗状況、
https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/index-j.html.
- [3] 廃炉環境国際共同研究センターホームページ、廃炉技術研究、基礎・基盤研究の全体マップ、
<https://clads.jaea.go.jp/jp/rd/map/map.html>.
- [4] 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業、<https://www.kenkyu.jp/nuclear/>
- [5] 日本原子力学会熱流動部会「熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ検討」ワーキンググループ、熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ 2020、http://www.aesj.or.jp/~thd/committee/TH-RM-2020/TH-RM_2020.pdf.
- [6] 原子力規制委員会、東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会、
https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/youushikisya/jiko_bunseki01/index.html.
- [7] 原子力規制委員会、福島第一原子力発電所廃炉及び事故分析に係る連絡・調整会議、
https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/youushikisya/1F_tyosei/index.html.
- [8] 原子力規制委員会、シビアアクシデント技術評価検討会、
https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/youushikisya/gh_severe_accident/index.html.

*Yoichi Wada

Hitachi

Planning Lecture | Over view Report | Research Committee on Feasibility of Nuclear Fuel Cycle

[2I_PL] Recommendations from Research Committee on Feasibility of Nuclear Fuel Cycle

How to making opportunities joining the discussion together with "non-experts" persons ?

Chair: Isamu Sato (TCU)

Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room I

[2I_PL01] About "Research Committee on Feasibility of Nuclear Fuel Cycle"

*Isamu Sato¹ (1. TCU)

[2I_PL02] Recommendations from the Research Committee

*Akira Sato¹ (1. MHI)

[2I_PL03] Consideration of "Opportunities to discuss" based on the opinions from the study session at YGN

*Naoto Hagura¹ (1. TCU)

[2I_PL04] Comprehensive discussion

総合講演・報告「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会

「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会からの提言

～専門外の方を含めた議論の場を作るには～

Recommendations from Research Committee on Feasibility of Nuclear Fuel Cycle

-How to make opportunities joining the discussion together with "non-experts" persons ?-

*佐藤 勇¹、*佐藤 聡²、羽倉 尚人³¹ 東京都市大学(研究専門委員会主査)、² 三菱重工、³ 東京都市大学

1. 原子力の現状について

原子力業界は、2000 年代初頭の「原子力カルネッサンス」、2011 年の東日本大震災とともに生じた福島第一原子力発電所事故(1F 事故)を経て、今後のエネルギー産業として、今まさに岐路に立っている。最近では、地球規模の課題である気候変動問題に対して、2015 年に合意されたパリ協定での目標達成のため、全世界的にカーボンニュートラルの実現に向けた活動が活発化している。具体的には、化石燃料の使用の制限、再生可能エネルギーの普及、等の動きがあり、原子力発電の利用もそのオプションの 1 つとして掲げられている。特に、小型モジュール炉(SMR)への世界の注目が著しい。

このような背景において、1F 事故・政策の不透明さを踏まえた原子力産業に対する(反省も含めた)総括が明確になされないまま、これまでと大きな変化がみられない原子力政策路線を推進することに対する社会受容が困難になっている状況がある。一方で、1F の廃炉に対する取組を第一優先で行っていく必要があることは地域及び社会からの強い求めであるが、原子力発電のメリットである燃料増殖・利用を可能とする核燃料サイクルは、今後どのような路線に向かうのか、1F や通常炉の廃止措置から発生する放射性廃棄物の最終的な処理・処分はどのようにしていくか、などの検討を行うことが必要である。

2. 本研究専門委員会の設立趣旨と本セッションでの目的

「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会では、「核燃料サイクル」に関して、どのような観点に目を向け、どのようなシナリオを描けば、現代社会に適合する産業となっていく見通しが得られるのか、あるいは、得られないのか、産業界および大学、研究機関に属するメンバーの間で検討してきた。そして、まずは既定路線の「核燃料サイクル」ではなく、これを離れた新たな「燃料サイクル」を広く議論していくべき、という前提に行きついている。最終的には、「核燃料サイクルの成立性に対する提言」としてまとめ、社会に発信していくことを主な目的としている。

本研究専門委員会では、これまでの同種の委員会とは異なり、「立場を離れた個人の意見」を尊重することを念頭に置いた。そのため、議論の集約は困難を極め、結果として「議論含み」の提言としてまとめることとなった。また、2021 年 6 月 4 日(金)、当委員会の主催で行われたワークショップ「社会のための燃料サイクルとは何か」では、パネラー及び参加者(日本原子力学会会員)から当該「提言」(案)に対して様々な「ご意見」を頂戴し、後段で紹介する「核燃料サイクルの成立性に対する提言」を策定した。このような経緯のため、当委員会で検討してきた内容が本当の「実社会」に開示され、活用される際には、「決めごと」の扱いではなく、「議論を継続していく事柄」として認識していただきたい。そして、本セッションの副題にあるように、「専門外の方を含めた議論の場を作るには」どのような活動を継続していくべきかという命題にこたえる取り組みとして、今回の企画セッションで若い世代との議論を企画した。

*Isamu Sato¹, *Akira Sato², *Naoto Hagura³¹TCU, Chairman, ²MHI, ³TCU

3. 本研究専門委員会の活動概要

本委員会は、井上正前主査によって2017年4月に設立され、新型コロナウイルスによる活動への影響を乗り越え、5年間活動を経て、以下の手順で「核燃料サイクルの成立性に対する提言」を創出した。

- (1) 各分野の専門家・事業者から講演聴講などにより最新情報を収集し、核燃料サイクルを取り巻くフロントエンド、燃料サイクルの候補シナリオ、再処理および高速炉開発における現状と課題を委員間で共有した。また、核燃料に関する諸量(ここでは、「ウラン必要量や使用済燃料蓄積量など」を意味する)に関しては定量的な検討を行い、これに関しても情報を共有した。
- (2) (1)で共有された状況に対して、どのような「論点」で検討していくべきか、「委員各個人として」の考えを抽出し、互いの「論点」の関係性に関して議論を重ねた。
- (3) (2)の「論点」に基づきシナリオプランニングの手法を適用して、提言の骨格を得るとともに、もともとの「論点」との紐づけを改めて行いながら提言の文章化を進めた。
- (4) (3)に対して、委員間の合意を得るための議論を重ねた。また、ワークショップを開催して、パネラー及び学会員の皆様の意見も可能な限り、提言に取り込んだ。そして、結果的に「議論含み」の提言とした。

4. 核燃料サイクルの成立性を調査・評価するための「論点」

2017～2018年度の本研究専門委員会第一期では、各分野の専門家・事業者から講演を聴講し、核燃料サイクルを取り巻くフロントエンド、燃料サイクルの候補シナリオ、再処理及び高速炉開発における現状と課題を委員間で共有し、これらを基にどのような「論点」で検討していくべきか、「委員各個人として」の考えを抽出した。すなわち、委員はそれぞれの原子力業界としての立場があるわけであるが、この立場にとらわれず検討し、51件の核燃料サイクルの成立性を定量的に調査・評価するための「論点」を得た(この一部を表1に示す)。

表1 核燃料サイクルの成立性を調査・評価するための「論点」(一部)

論点	キーポイント	大分類	小分類
2050年の世界を想定した時、原子力はどのくらいの電源比率(発電量)であるべきか(3E+Sの観点で)。	電力比率	1. 電源比率	1. 実力評価
今後見据えての原子力と再生可能エネルギー利用の適値は？ FITが切れたときの再生可能エネルギーの利用は？	原子力v.s. 再生可能エネルギー	1. 電源比率	1. 実力評価
軽水炉サイクルの行く末が見えてくれば、高速炉サイクルの議論ができるようになる。 まずは10～20年後の軽水炉サイクル+Puサーマルの成立性を議論。	LWRサイクル+Puサーマルの成立性	2. シナリオ検討	1. 実力評価
学会として、想定される核燃料サイクルを合理的に定義し、それを技術的及び経済的に評価。 将来実現に向けての課題は何でをまた、どれだけ想定できるか。 現状と将来といってもいくつか考えられるので、これまでに想定されたケースでまず一度評価結果を整理して。それをきちんと現段階で再評価し、提示できる核燃料サイクルの選択肢を提示、成立性を技術的、経済的な観点から評価してはどうか。	技術的・経済的に合理的なサイクル	2. シナリオ検討	1. 実力評価
その世界(2050年断面での電源比率)が仮に2100年まで続くとしたら、燃料サイクル(再処理)は必要か？必要だとしたらいつ頃どの程度必要か？	世界の継続性	2. シナリオ検討	2. ニーズ
廃棄物の観点：直接処分した時に何が本質的な課題となるか(コストか、被ばくか)。	廃棄物直接処分	4. 開発	1. 意義
国際協力を含めたとしても、自国で開発する意義は何か？軽水炉は米国から輸入し、改良を重ねている。	自国開発の意義	4. 開発	1. 意義
再処理に必要な知見を照射済燃料を用いた実験によって実験室レベル・工学レベルで得るための施設・設備の老朽化が著しい。産官学が乗り入れが容易な施設・組織は必要ないか。	照射後試験施設の必要性	5. 研究	1. 基盤
我が国には一杯研究施設があった、ある。それが有効に利用されてこなかった理由は何か。	施設の有効活用	5. 研究	1. 基盤
大学、研究機関の技術研究力、開発力の大幅な低下(原因とまだ立て直せるならあるべき方向)	開発力の低下	5. 研究	1. 基盤
継続的な原子力エネルギー利用のため、また研究開発の沈滞を防いで専門家とそれを目指す若者の意欲を守るためには、原子力施設のスクラップアンドビルドを説得力あるコストと期間で完了することが不可欠である。	Scrap&Buildの技術的・制度的方策	5. 研究	1. 基盤
課題の「核燃料サイクルの成立性を定量的に調査・評価するための「論点」」ですが、ウラン資源の観点から、地球温暖化の観点から、等々、と言っても未来のことを予測することは不可能なので、人によって意見は異なるのが常であり、それが合っている、間違っているということはできないと思います(反原子力の人間を説得するための成立する要件を将来に求めても、それは考え方の問題になってしまい、トランス・サイエンスです)。 ただ、逆に、核燃料サイクルが成立するために必要な条件として、やはり「人材」は重要な項目だと思います。現在の所属や立場、目先の欲(金儲け?)から離れて、原子力利用が将来の人類にとって必要不可欠と本心から思い、他人から非難されても、ぐっとこらえて原子力技術の維持・革新にコツコツ取り組む人材がいなくては原子力利用自体の成立性がそもそもないと思います。	人材	6. リソース	1. 人材育成
大学の研究、人材育成はどうすべきか(最近の大学人のはやりの言葉、リスクマネジメント、レジリエンス、グレイデッドアプローチ すべてこれ前向きの技術開発の言葉ではない)	大学における研究と人材育成	6. リソース	1. 人材育成
1F廃棄物(そこにある危機)の処理の行方 これが決まらずSF,HLWの処分を先に決められるか(対国民目線)	1F廃棄物問題	7. 外乱	

5. 「核燃料サイクルの成立性に対する提言」

核燃料サイクルの成立性を調査・評価するための「論点」に対して、シナリオ検討（原子力発電容量は現行の想定）、シナリオ検討（同、上振れ）、シナリオ検討（同、下振れ）、研究・開発及び人材育成の分野に分け、小グループでの議論を重ね、「論点」に関する合意形成を図った。その際、原子力発電にかかわる諸量評価に関しては日本原子力研究開発機構の西原委員が実施したもの[1]を参照し、定量的な情報を得た。これをもとに、見直し・改廃を行った「論点」をシナリオプランニングの手法で課題の軽重・緊急性について分析し、「核燃料サイクルの成立性に対する提言」(案)を創生した。さらに、この「提言」(案)に対し、前述ワークショップにおけるパネラー及び参加者からの様々な「ご意見」を加味したうえ、委員間で議論を重ね、以下のような、前述、議論含みの「核燃料サイクルの成立性に対する提言」を得た。

- (1) 我が国として、原子力の役割に応じた新たな燃料サイクルおよびその政策決定の仕組みを構築しなければならない。
- (2) 政府は、その政策決定の根拠となる評価基準を明確にし、常に改良ないしは新しい技術の導入が可能なくみを構築すべきである。
- (3) 原子力に携わる我々産官学は、政策に基づき、開発から実用化まで一貫した体制を確立し、そのための資源(施設、人材)を長期的に整備しなくてはならない。
- (4) 我が国は、人材育成および技術革新のために基礎基盤の研究開発能力を維持、成長させる必要がある。
- (5) これらの必要性は、2050 年付近に原子力発電が必要とされている場合も、そうでない場合も存在する。

5. 原子力学会 2022 年春の年会企画セッション「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会からの提言 ～専門外の方を含めた議論の場を作るには～

今後、この「提言」について、様々な方々と議論していく必要があるが、まず、これからを担う若手の方々との議論を行うことを試みることにした。原子力学会若手連絡会では近年、若手勉強会という場を頻繁に設け、原子力業界の若手（40 歳未満）を中心としつつも、学会の枠に囚われずに原子力・放射線利用に関する議論が活発に行われている。そこで、本委員会では若手有志と共同で勉強会を企画し、2022 年 2 月 19 日(土)オンラインにて「第 25 回 YGN 若手勉強会 健全な「核燃料サイクル」に必要なものとは何だろう」を開催し、議論を行った。

本企画セッションでは、以下のように、本委員会の設立趣旨・活動概要及び「提言」について委員から説明を行うとともに、若手勉強会という議論の場を様々な方に入っていただき議論する場の良好な一つの事例として取り上げ、今回行われた若手勉強会での議論を紹介する。これらをもとにして、総合討論を行い、委員会の認識と若手の方々の認識を比較・検討したい。ここで得られた成果を当該委員会後継の組織における活動の指針としていくことを考えている。

報告内容

- (1) 「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会について (主査：佐藤 勇(都市大))
- (2) 「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会からの提言 (幹事委員：佐藤 聡(三菱重工))
- (3) 若手連絡会での勉強会で寄せられた意見を踏まえた「議論の場」の検討 (羽倉尚人(都市大))
- (4) 総合討論

参考文献

- [1] 西原健司、「幅広い原子力発電利用シナリオの諸量評価」、原子力機構報告書、JAEA-Data/Code 2020-005 (2020)。

総合講演・報告「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会

「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会からの提言

～専門外の方を含めた議論の場を作るには～

Recommendations from Research Committee on Feasibility of Nuclear Fuel Cycle

-How to make opportunities joining the discussion together with "non-experts" persons ?-

*佐藤 勇¹、*佐藤 聡²、羽倉 尚人³¹ 東京都市大学(研究専門委員会主査)、² 三菱重工、³ 東京都市大学

1. 原子力の現状について

原子力業界は、2000 年代初頭の「原子力カルネッサンス」、2011 年の東日本大震災とともに生じた福島第一原子力発電所事故(1F 事故)を経て、今後のエネルギー産業として、今まさに岐路に立っている。最近では、地球規模の課題である気候変動問題に対して、2015 年に合意されたパリ協定での目標達成のため、全世界的にカーボンニュートラルの実現に向けた活動が活発化している。具体的には、化石燃料の使用の制限、再生可能エネルギーの普及、等の動きがあり、原子力発電の利用もそのオプションの 1 つとして掲げられている。特に、小型モジュール炉(SMR)への世界の注目が著しい。

このような背景において、1F 事故・政策の不透明さを踏まえた原子力産業に対する(反省も含めた)総括が明確になされないまま、これまでと大きな変化がみられない原子力政策路線を推進することに対する社会受容が困難になっている状況がある。一方で、1F の廃炉に対する取組を第一優先で行っていく必要があることは地域及び社会からの強い求めであるが、原子力発電のメリットである燃料増殖・利用を可能とする核燃料サイクルは、今後どのような路線に向かうのか、1F や通常炉の廃止措置から発生する放射性廃棄物の最終的な処理・処分はどのようにしていくか、などの検討を行うことが必要である。

2. 本研究専門委員会の設立趣旨と本セッションでの目的

「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会では、「核燃料サイクル」に関して、どのような観点に目を向け、どのようなシナリオを描けば、現代社会に適合する産業となっていく見通しが得られるのか、あるいは、得られないのか、産業界および大学、研究機関に属するメンバーの間で検討してきた。そして、まずは既定路線の「核燃料サイクル」ではなく、これを離れた新たな「燃料サイクル」を広く議論していくべき、という前提に行きついている。最終的には、「核燃料サイクルの成立性に対する提言」としてまとめ、社会に発信していくことを主な目的としている。

本研究専門委員会では、これまでの同種の委員会とは異なり、「立場を離れた個人の意見」を尊重することを念頭に置いた。そのため、議論の集約は困難を極め、結果として「議論含み」の提言としてまとめることとなった。また、2021 年 6 月 4 日(金)、当委員会の主催で行われたワークショップ「社会のための燃料サイクルとは何か」では、パネラー及び参加者(日本原子力学会会員)から当該「提言」(案)に対して様々な「ご意見」を頂戴し、後段で紹介する「核燃料サイクルの成立性に対する提言」を策定した。このような経緯のため、当委員会で検討してきた内容が本当の「実社会」に開示され、活用される際には、「決めごと」の扱いではなく、「議論を継続していく事柄」として認識していただきたい。そして、本セッションの副題にあるように、「専門外の方を含めた議論の場を作るには」どのような活動を継続していくべきかという命題にこたえる取り組みとして、今回の企画セッションで若い世代との議論を企画した。

*Isamu Sato¹, *Akira Sato², *Naoto Hagura³¹TCU, Chairman, ²MHI, ³TCU

3. 本研究専門委員会の活動概要

本委員会は、井上正前主査によって2017年4月に設立され、新型コロナウイルスによる活動への影響を乗り越え、5年間活動を経て、以下の手順で「核燃料サイクルの成立性に対する提言」を創出した。

- (1) 各分野の専門家・事業者から講演聴講などにより最新情報を収集し、核燃料サイクルを取り巻くフロントエンド、燃料サイクルの候補シナリオ、再処理および高速炉開発における現状と課題を委員間で共有した。また、核燃料に関する諸量(ここでは、「ウラン必要量や使用済燃料蓄積量など」を意味する)に関しては定量的な検討を行い、これに関しても情報を共有した。
- (2) (1)で共有された状況に対して、どのような「論点」で検討していくべきか、「委員各個人として」の考えを抽出し、互いの「論点」の関係性に関して議論を重ねた。
- (3) (2)の「論点」に基づきシナリオプランニングの手法を適用して、提言の骨格を得るとともに、もともとの「論点」との紐づけを改めて行いながら提言の文章化を進めた。
- (4) (3)に対して、委員間の合意を得るための議論を重ねた。また、ワークショップを開催して、パネラー及び学会員の皆様の意見も可能な限り、提言に取り込んだ。そして、結果的に「議論含み」の提言とした。

4. 核燃料サイクルの成立性を調査・評価するための「論点」

2017～2018年度の本研究専門委員会第一期では、各分野の専門家・事業者から講演を聴講し、核燃料サイクルを取り巻くフロントエンド、燃料サイクルの候補シナリオ、再処理及び高速炉開発における現状と課題を委員間で共有し、これらを基にどのような「論点」で検討していくべきか、「委員各個人として」の考えを抽出した。すなわち、委員はそれぞれの原子力業界としての立場があるわけであるが、この立場にとらわれず検討し、51件の核燃料サイクルの成立性を定量的に調査・評価するための「論点」を得た(この一部を表1に示す)。

表1 核燃料サイクルの成立性を調査・評価するための「論点」(一部)

論点	キーポイント	大分類	小分類
2050年の世界を想定した時、原子力はどのくらいの電源比率(発電量)であるべきか(3E+Sの観点で)。	電力比率	1. 電源比率	1. 実力評価
今後見据えての原子力と再生可能エネルギー利用の適値は？ FITが切れたときの再生可能エネルギーの利用は？	原子力v.s. 再生可能エネルギー	1. 電源比率	1. 実力評価
軽水炉サイクルの行く末が見えてくれば、高速炉サイクルの議論ができるようになる。 まずは10～20年後の軽水炉サイクル+Puサーマルの成立性を議論。	LWRサイクル+Puサーマルの成立性	2. シナリオ検討	1. 実力評価
学会として、想定される核燃料サイクルを合理的に定義し、それを技術的及び経済的に評価。 将来実現に向けての課題は何でをまた、どれだけ想定できるか。 現状と将来といってもいくつか考えられるので、これまでに想定されたケースでまず一度評価結果を整理して。それをきちんと現段階で再評価し、提示できる核燃料サイクルの選択肢を提示、成立性を技術的、経済的な観点から評価してはどうか。	技術的・経済的に合理的なサイクル	2. シナリオ検討	1. 実力評価
その世界(2050年断面での電源比率)が仮に2100年まで続くとしたら、燃料サイクル(再処理)は必要か？必要だとしたらいつ頃どの程度必要か？	世界の継続性	2. シナリオ検討	2. ニーズ
廃棄物の観点：直接処分した時に何が本質的な課題となるか(コストか、被ばくか)。	廃棄物直接処分	4. 開発	1. 意義
国際協力を含めたとしても、自国で開発する意義は何か？軽水炉は米国から輸入し、改良を重ねている。	自国開発の意義	4. 開発	1. 意義
再処理に必要な知見を照射済燃料を用いた実験によって実験室レベル・工学レベルで得るための施設・設備の老朽化が著しい。産官学が乗り入れが容易な施設・組織は必要ないか。	照射後試験施設の必要性	5. 研究	1. 基盤
我が国には一杯研究施設があった、ある。それが有効に利用されてこなかった理由は何か。	施設の有効活用	5. 研究	1. 基盤
大学、研究機関の技術研究力、開発力の大幅な低下(原因とまだ立て直せるならあるべき方向)	開発力の低下	5. 研究	1. 基盤
継続的な原子力エネルギー利用のため、また研究開発の沈滞を防いで専門家とそれを目指す若者の意欲を守るためには、原子力施設のスクラップアンドビルドを説得力あるコストと期間で完了することが不可欠である。	Scrap&Buildの技術的・制度的方策	5. 研究	1. 基盤
課題の「核燃料サイクルの成立性を定量的に調査・評価するための「論点」」ですが、ウラン資源の観点から、地球温暖化の観点から、等々、と言っても未来のことを予測することは不可能なので、人によって意見は異なるのが常であり、それが合っている、間違っているということはできないと思います(反原子力の人間を説得するための成立する要件を将来に求めても、それは考え方の問題になってしまい、トランス・サイエンスです)。 ただ、逆に、核燃料サイクルが成立するために必要な条件として、やはり「人材」は重要な項目だと思います。現在の所属や立場、目先の欲(金儲け?)から離れて、原子力利用が将来の人類にとって必要不可欠と本心から思い、他人から非難されても、ぐっとこらえて原子力技術の維持・革新にコツコツ取り組む人材がいなくては原子力利用自体の成立性がそもそもないと思います。	人材	6. リソース	1. 人材育成
大学の研究、人材育成はどうすべきか(最近の大学人のはやりの言葉、リスクマネジメント、レジリエンス、グレイデッドアプローチ すべてこれ前向きの技術開発の言葉ではない)	大学における研究と人材育成	6. リソース	1. 人材育成
1F廃棄物(そこにある危機)の処理の行方 これが決まらずSF,HLWの処分を先に決められるか(対国民目線)	1F廃棄物問題	7. 外乱	

5. 「核燃料サイクルの成立性に対する提言」

核燃料サイクルの成立性を調査・評価するための「論点」に対して、シナリオ検討（原子力発電容量は現行の想定）、シナリオ検討（同、上振れ）、シナリオ検討（同、下振れ）、研究・開発及び人材育成の分野に分け、小グループでの議論を重ね、「論点」に関する合意形成を図った。その際、原子力発電にかかわる諸量評価に関しては日本原子力研究開発機構の西原委員が実施したもの[1]を参照し、定量的な情報を得た。これをもとに、見直し・改廃を行った「論点」をシナリオプランニングの手法で課題の軽重・緊急性について分析し、「核燃料サイクルの成立性に対する提言」(案)を創生した。さらに、この「提言」(案)に対し、前述ワークショップにおけるパネラー及び参加者からの様々な「ご意見」を加味したうえ、委員間で議論を重ね、以下のような、前述、議論含みの「核燃料サイクルの成立性に対する提言」を得た。

- (1) 我が国として、原子力の役割に応じた新たな燃料サイクルおよびその政策決定の仕組みを構築しなければならない。
- (2) 政府は、その政策決定の根拠となる評価基準を明確にし、常に改良ないしは新しい技術の導入が可能なくみを構築すべきである。
- (3) 原子力に携わる我々産官学は、政策に基づき、開発から実用化まで一貫した体制を確立し、そのための資源(施設、人材)を長期的に整備しなくてはならない。
- (4) 我が国は、人材育成および技術革新のために基礎基盤の研究開発能力を維持、成長させる必要がある。
- (5) これらの必要性は、2050 年付近に原子力発電が必要とされている場合も、そうでない場合も存在する。

5. 原子力学会 2022 年春の年会企画セッション「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会からの提言 ～専門外の方を含めた議論の場を作るには～

今後、この「提言」について、様々な方々と議論していく必要があるが、まず、これからを担う若手の方々との議論を行うことを試みることにした。原子力学会若手連絡会では近年、若手勉強会という場を頻繁に設け、原子力業界の若手（40 歳未満）を中心としつつも、学会の枠に囚われずに原子力・放射線利用に関する議論が活発に行われている。そこで、本委員会では若手有志と共同で勉強会を企画し、2022 年 2 月 19 日(土)オンラインにて「第 25 回 YGN 若手勉強会 健全な「核燃料サイクル」に必要なものとは何だろう」を開催し、議論を行った。

本企画セッションでは、以下のように、本委員会の設立趣旨・活動概要及び「提言」について委員から説明を行うとともに、若手勉強会という議論の場を様々な方に入っていただき議論する場の良好な一つの事例として取り上げ、今回行われた若手勉強会での議論を紹介する。これらをもとにして、総合討論を行い、委員会の認識と若手の方々の認識を比較・検討したい。ここで得られた成果を当該委員会後継の組織における活動の指針としていくことを考えている。

報告内容

- (1) 「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会について (主査：佐藤 勇(都市大))
- (2) 「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会からの提言 (幹事委員：佐藤 聡(三菱重工))
- (3) 若手連絡会での勉強会で寄せられた意見を踏まえた「議論の場」の検討 (羽倉尚人(都市大))
- (4) 総合討論

参考文献

- [1] 西原健司、「幅広い原子力発電利用シナリオの諸量評価」、原子力機構報告書、JAEA-Data/Code 2020-005 (2020)。

総合講演・報告「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会

「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会からの提言

～専門外の方を含めた議論の場を作るには～

Recommendations from Research Committee on Feasibility of Nuclear Fuel Cycle

-How to make opportunities joining the discussion together with "non-experts" persons ?-

*佐藤 勇¹、*佐藤 聡²、羽倉 尚人³¹ 東京都市大学(研究専門委員会主査)、² 三菱重工、³ 東京都市大学

1. 原子力の現状について

原子力業界は、2000 年代初頭の「原子力カルネッサンス」、2011 年の東日本大震災とともに生じた福島第一原子力発電所事故(1F 事故)を経て、今後のエネルギー産業として、今まさに岐路に立っている。最近では、地球規模の課題である気候変動問題に対して、2015 年に合意されたパリ協定での目標達成のため、全世界的にカーボンニュートラルの実現に向けた活動が活発化している。具体的には、化石燃料の使用の制限、再生可能エネルギーの普及、等の動きがあり、原子力発電の利用もそのオプションの 1 つとして掲げられている。特に、小型モジュール炉(SMR)への世界の注目が著しい。

このような背景において、1F 事故・政策の不透明さを踏まえた原子力産業に対する(反省も含めた)総括が明確になされないまま、これまでと大きな変化がみられない原子力政策路線を推進することに対する社会受容が困難になっている状況がある。一方で、1F の廃炉に対する取組を第一優先で行っていく必要があることは地域及び社会からの強い求めであるが、原子力発電のメリットである燃料増殖・利用を可能とする核燃料サイクルは、今後どのような路線に向かうのか、1F や通常炉の廃止措置から発生する放射性廃棄物の最終的な処理・処分はどのようにしていくか、などの検討を行うことが必要である。

2. 本研究専門委員会の設立趣旨と本セッションでの目的

「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会では、「核燃料サイクル」に関して、どのような観点に目を向け、どのようなシナリオを描けば、現代社会に適合する産業となっていく見通しが得られるのか、あるいは、得られないのか、産業界および大学、研究機関に属するメンバーの間で検討してきた。そして、まずは既定路線の「核燃料サイクル」ではなく、これを離れた新たな「燃料サイクル」を広く議論していくべき、という前提に行きついている。最終的には、「核燃料サイクルの成立性に対する提言」としてまとめ、社会に発信していくことを主な目的としている。

本研究専門委員会では、これまでの同種の委員会とは異なり、「立場を離れた個人の意見」を尊重することを念頭に置いた。そのため、議論の集約は困難を極め、結果として「議論含み」の提言としてまとめることとなった。また、2021 年 6 月 4 日(金)、当委員会の主催で行われたワークショップ「社会のための燃料サイクルとは何か」では、パネラー及び参加者(日本原子力学会会員)から当該「提言」(案)に対して様々な「ご意見」を頂戴し、後段で紹介する「核燃料サイクルの成立性に対する提言」を策定した。このような経緯のため、当委員会で検討してきた内容が本当の「実社会」に開示され、活用される際には、「決めごと」の扱いではなく、「議論を継続していく事柄」として認識していただきたい。そして、本セッションの副題にあるように、「専門外の方を含めた議論の場を作るには」どのような活動を継続していくべきかという命題にこたえる取り組みとして、今回の企画セッションで若い世代との議論を企画した。

*Isamu Sato¹, *Akira Sato², *Naoto Hagura³¹TCU, Chairman, ²MHI, ³TCU

3. 本研究専門委員会の活動概要

本委員会は、井上正前主査によって2017年4月に設立され、新型コロナウイルスによる活動への影響を乗り越え、5年間活動を経て、以下の手順で「核燃料サイクルの成立性に対する提言」を創出した。

- (1) 各分野の専門家・事業者から講演聴講などにより最新情報を収集し、核燃料サイクルを取り巻くフロントエンド、燃料サイクルの候補シナリオ、再処理および高速炉開発における現状と課題を委員間で共有した。また、核燃料に関する諸量(ここでは、「ウラン必要量や使用済燃料蓄積量など」を意味する)に関しては定量的な検討を行い、これに関しても情報を共有した。
- (2) (1)で共有された状況に対して、どのような「論点」で検討していくべきか、「委員各個人として」の考えを抽出し、互いの「論点」の関係性に関して議論を重ねた。
- (3) (2)の「論点」に基づきシナリオプランニングの手法を適用して、提言の骨格を得るとともに、もともとの「論点」との紐づけを改めて行いながら提言の文章化を進めた。
- (4) (3)に対して、委員間の合意を得るための議論を重ねた。また、ワークショップを開催して、パネラー及び学会員の皆様の意見も可能な限り、提言に取り込んだ。そして、結果的に「議論含み」の提言とした。

4. 核燃料サイクルの成立性を調査・評価するための「論点」

2017～2018年度の本研究専門委員会第一期では、各分野の専門家・事業者から講演を聴講し、核燃料サイクルを取り巻くフロントエンド、燃料サイクルの候補シナリオ、再処理及び高速炉開発における現状と課題を委員間で共有し、これらを基にどのような「論点」で検討していくべきか、「委員各個人として」の考えを抽出した。すなわち、委員はそれぞれの原子力業界としての立場があるわけであるが、この立場にとらわれず検討し、51件の核燃料サイクルの成立性を定量的に調査・評価するための「論点」を得た(この一部を表1に示す)。

表1 核燃料サイクルの成立性を調査・評価するための「論点」(一部)

論点	キーポイント	大分類	小分類
2050年の世界を想定した時、原子力はどのくらいの電源比率(発電量)であるべきか(3E+Sの観点で)。	電力比率	1. 電源比率	1. 実力評価
今後見据えての原子力と再生可能エネルギー利用の適値は？ FITが切れたときの再生可能エネルギーの利用は？	原子力v.s. 再生可能エネルギー	1. 電源比率	1. 実力評価
軽水炉サイクルの行く末が見えてくれば、高速炉サイクルの議論ができるようになる。 まずは10～20年後の軽水炉サイクル+Puサーマルの成立性を議論。	LWRサイクル+Puサーマルの成立性	2. シナリオ検討	1. 実力評価
学会として、想定される核燃料サイクルを合理的に定義し、それを技術的及び経済的に評価。 将来実現に向けての課題は何でをまた、どれだけ想定できるか。 現状と将来といってもいくつか考えられるので、これまでに想定されたケースでまず一度評価結果を整理してみる。それをきちんと現段階で再評価し、提示できる核燃料サイクルの選択肢を提示、成立性を技術的、経済的な観点から評価してはどうか。	技術的・経済的に合理的なサイクル	2. シナリオ検討	1. 実力評価
その世界(2050年断面での電源比率)が仮に2100年まで続くとしたら、燃料サイクル(再処理)は必要か？必要だとしたらいつ頃どの程度必要か？	世界の継続性	2. シナリオ検討	2. ニーズ
廃棄物の観点：直接処分した時に何が本質的な課題となるか(コストか、被ばくか)。	廃棄物直接処分	4. 開発	1. 意義
国際協力を含めたとしても、自国で開発する意義は何か？軽水炉は米国から輸入し、改良を重ねている。	自国開発の意義	4. 開発	1. 意義
再処理に必要な知見を照射済燃料を用いた実験によって実験室レベル・工学レベルで得るための施設・設備の老朽化が著しい。産官学が乗り入れが容易な施設・組織は必要ないか。	照射後試験施設の必要性	5. 研究	1. 基盤
我が国には一杯研究施設があった、ある。それが有効に利用されてこなかった理由は何か。	施設の有効活用	5. 研究	1. 基盤
大学、研究機関の技術研究力、開発力の大幅な低下(原因とまだ立て直せるならあるべき方向)	開発力の低下	5. 研究	1. 基盤
継続的な原子力エネルギー利用のため、また研究開発の沈滞を防いで専門家とそれを目指す若者の意欲を守るためには、原子力施設のスクラップアンドビルドを説得力あるコストと期間で完了することが不可欠である。	Scrap&Buildの技術的・制度的方策	5. 研究	1. 基盤
課題の「核燃料サイクルの成立性を定量的に調査・評価するための「論点」」ですが、ウラン資源の観点から、地球温暖化の観点から、等々、と言っても未来のことを予測することは不可能なので、人によって意見は異なるのが常であり、それが合っている、間違っているということはできないと思います(反原子力の人間を説得するための成立する要件を将来に求めても、それは考え方の問題になってしまい、トランス・サイエンスです)。 ただ、逆に、核燃料サイクルが成立するために必要な条件として、やはり「人材」は重要な項目だと思います。現在の所属や立場、目先の欲(金儲け?)から離れて、原子力利用が将来の人類にとって必要不可欠と本心から思い、他人から非難されても、ぐっとこらえて原子力技術の維持・革新にコツコツ取り組む人材がいなくては原子力利用自体の成立性がそもそもないと思います。	人材	6. リソース	1. 人材育成
大学の研究、人材育成はどうすべきか(最近の大学人のはやりの言葉、リスクマネジメント、レジリエンス、グレイデッドアプローチ すべてこれ前向きの技術開発の言葉ではない)	大学における研究と人材育成	6. リソース	1. 人材育成
1F廃棄物(そこにある危機)の処理の行方 これが決まらずSF、HLWの処分を先に決められるか(対国民目線)	1F廃棄物問題	7. 外乱	

5. 「核燃料サイクルの成立性に対する提言」

核燃料サイクルの成立性を調査・評価するための「論点」に対して、シナリオ検討（原子力発電容量は現行の想定）、シナリオ検討（同、上振れ）、シナリオ検討（同、下振れ）、研究・開発及び人材育成の分野に分け、小グループでの議論を重ね、「論点」に関する合意形成を図った。その際、原子力発電にかかわる諸量評価に関しては日本原子力研究開発機構の西原委員が実施したもの[1]を参照し、定量的な情報を得た。これをもとに、見直し・改廃を行った「論点」をシナリオプランニングの手法で課題の軽重・緊急性について分析し、「核燃料サイクルの成立性に対する提言」(案)を創生した。さらに、この「提言」(案)に対し、前述ワークショップにおけるパネラー及び参加者からの様々な「ご意見」を加味したうえ、委員間で議論を重ね、以下のような、前述、議論含みの「核燃料サイクルの成立性に対する提言」を得た。

- (1) 我が国として、原子力の役割に応じた新たな燃料サイクルおよびその政策決定の仕組みを構築しなければならない。
- (2) 政府は、その政策決定の根拠となる評価基準を明確にし、常に改良ないしは新しい技術の導入が可能なくみを構築すべきである。
- (3) 原子力に携わる我々産官学は、政策に基づき、開発から実用化まで一貫した体制を確立し、そのための資源(施設、人材)を長期的に整備しなくてはならない。
- (4) 我が国は、人材育成および技術革新のために基礎基盤の研究開発能力を維持、成長させる必要がある。
- (5) これらの必要性は、2050 年付近に原子力発電が必要とされている場合も、そうでない場合も存在する。

5. 原子力学会 2022 年春の年会企画セッション「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会からの提言 ～専門外の方を含めた議論の場を作るには～

今後、この「提言」について、様々な方々と議論していく必要があるが、まず、これからを担う若手の方々との議論を行うことを試みることにした。原子力学会若手連絡会では近年、若手勉強会という場を頻繁に設け、原子力業界の若手（40 歳未満）を中心としつつも、学会の枠に囚われずに原子力・放射線利用に関する議論が活発に行われている。そこで、本委員会では若手有志と共同で勉強会を企画し、2022 年 2 月 19 日(土)オンラインにて「第 25 回 YGN 若手勉強会 健全な「核燃料サイクル」に必要なものとは何だろう」を開催し、議論を行った。

本企画セッションでは、以下のように、本委員会の設立趣旨・活動概要及び「提言」について委員から説明を行うとともに、若手勉強会という議論の場を様々な方に入っていただき議論する場の良好な一つの事例として取り上げ、今回行われた若手勉強会での議論を紹介する。これらをもとにして、総合討論を行い、委員会の認識と若手の方々の認識を比較・検討したい。ここで得られた成果を当該委員会後継の組織における活動の指針としていくことを考えている。

報告内容

- (1) 「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会について (主査：佐藤 勇(都市大))
- (2) 「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会からの提言 (幹事委員：佐藤 聡(三菱重工))
- (3) 若手連絡会での勉強会で寄せられた意見を踏まえた「議論の場」の検討 (羽倉尚人(都市大))
- (4) 総合討論

参考文献

- [1] 西原健司、「幅広い原子力発電利用シナリオの諸量評価」、原子力機構報告書、JAEA-Data/Code 2020-005 (2020)。

(Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room I)

[2I_PL04] Comprehensive discussion

「核燃料サイクルの成立性」研究専門委員会では、「核燃料サイクル」に関して、どのような観点に目を向け、どのようなシナリオを描けば、現代社会に適合する産業となっていく見通しが得られるのか、あるいは、得られないのかを検討し、その結果を「核燃料サイクルの成立性」に対する「提言」としてまとめるとともに、原子力学会会員向けのワークショップにおいて紹介、ご意見を頂いている。

本企画セッションでは、この「提言」について、原子力学会若手の方々の意見をもとに広く議論を行い、その成果を当該委員会後継の組織における活動の指針としていく。

Planning Lecture | Technical division and Network | Senior Network (SNW)

[2J_PL] How did the Decarbonization Movement worldwide affect on the students' way to think the energy-mix and nuclear energy?

Chair: Mikio Sakurai (SNW)

Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room J

[2J_PL01] A consideration on what was changed in the students' way to think the nuclear energy through SNW dialogs with students and questionnaire surveys

*Kazuhiko Wakasugi¹ (1. SNW)

[2J_PL02] The Tendency shown in Dialog Meetings on the Carbon Neutral and Energy in Nagasaki Univ. and Kyutech

*Kenichi Matsunaga¹ (1. SNW)

[2J_PL03] On Carbon Neutral and Energy from the student Viewpoint

*Tomohiro Okamura¹ (1. Tokyo Tech)

[2J_PL04] Panel Discussion with Students

シニアネットワーク連絡会セッション

世界的な脱炭素気運と学生の意識変化について

How did the Decarbonization Movement worldwide affect on the students' way to think the energy-mix and nuclear energy?

(1) 対話会等を通じての学生の意識調査結果の一考察

(1) A consideration on what was changed in the students' recognition on the nuclear energy through SNW dialog with students and questionnaire surveys.

*若杉 和彦¹ 西村 章²

¹シニアネットワーク (SNW) ²東工大

1. 緒言

カーボンニュートラル（以下 CN）は地球温暖化対策であり、高齢のシニアより今の若者により重大な影響を及ぼす。このことを今の学生は正確に理解しているのだろうか。学生の意識調査の主眼はここにある。いま脱炭素気運が世界に広がっている。日本もこれに乗り遅れないため各種の対策が講じられており、二酸化炭素排出削減のため将来どのエネルギーを選択するかが主要なポイントである。エネルギーの確保は食料と同じで国の死活にも関わる重要課題である。日本のエネルギー自給率は約 10%であり、食料自給率約 30%と比べてはるかに少ないが、これを知っている学生は少ない。つまり、毎年消費するエネルギーの 90%を海外から買わなければ日本は立ち行かない。毎日約 400 万バレルの石油を消費して、年間約 7 兆円を石油生産国に支払っている。毎年海外からこれだけの石油を買える経済力を維持するにはどうするか。エネルギー確保は、単に技術的な問題だけでなく、国の経済も絡む重大問題である。

ここでは、SNW が主宰している「学生とシニアの対話会」の事後学生アンケートに示された原子力やエネルギーに対する意識、さらに最近大学連合^{*1}が行った「CN 等、エネルギー動向に関するアンケート」の結果をまとめ、大学生等の意識や意見の傾向を報告し、今後のための課題に触れる。

(*1 国際原子力人材育成大学連合ネットワーク、JUNET-GNHRD)

2. 世界的な脱炭素気運と日本のエネルギー政策について

2021 年 11 月英国で開催された COP26 では、200 国が参加して地球平均気温の上昇を 1.5℃に抑えるよう努力することとし、46 カ国が脱石炭に賛同した（日本は「段階的削減」）。また、日本、EU、英国、米国は 2050 年 CN 達成を、中国は 2060 年 CN 達成をそれぞれ公表した。脱炭素対策を実行しなければ 2100 年に平均気温は 5.7℃上昇して世界は壊滅的になると予測されている。最近では再エネ活用による電力コスト増大と経済への悪影響を評価して、CN を最も声高に主張する EU でさえ原子力回帰の動きを見せている。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は、2018 年に「1.5℃温度上昇」対策は原子力なしでは達成不可能」とし、国際エネルギー機関 (IEA) は 2021 年に「2050 年 CN 実現のためには世界の原発規模を現在の 2 倍必要」とそれぞれ公表している。

一方日本の第 6 次エネルギー基本計画では、2030 年に再エネ 36~38%、原子力 20~22%を目標とし、2050 年 CN 達成のため、今後のエネルギー政策の道筋を示している。即ち、再エネを主力電源化として最優先し、原子力は必要規模を活用するものの、可能な限り依存度低減を図るとした。2019 年現在の発電割合は、火力 76%、原子力 6%、再エネ 10%、水力 8%であり、今後強力なイノベーションを実現しなければ CN は達成不能と考えられる。具体的には、非化石電源（原子力、再エネ）利用拡大に必要な技術革新（蓄電システム、炭素の回収貯蔵、原発の次世代化等）や水素社会の実現等を目指さなければならない。特に再エネ主力電源化には、太陽光や風力による不安定電源を補完するバックアップ電源（火力と揚水発電）と系統構築に多額のコストがかかる。このため国民は 2012 年から「再エネ賦課金」を電気代に加えて毎月支払っており、その額が 2050 年には累積 94 兆円にのぼる。これは 1 年間の国家予算約 100 兆円のレベルである。

原発の持続的活用には、今の嫌原子力の世論を改めて社会的受容性を改善する必要がある、将来的には核燃料サイクルの確立が課題になっている。2030 年の目標を確保するには、原発 27 基が再稼働していなければならないが、2022 年 1 月現在 10 基しか再稼働していない。原発は寿命 40 年と法令で決められているので、順次停止して 2050 年にはほとんどの原発が停止する。過去の経験から、原発新設には地元の合意や許認可等

に 10 数年の年数が必要と予測されるので、原発の新增設計画を今から国のエネルギー政策に組み込まなければ政策そのものが絵に描いた餅になる。核燃料サイクルについては、最近高速炉の開発を米国の開発計画に参加する形で継続させようとしている。再処理施設の稼働や高レベル放射性廃棄物処分等、原子力の開発は多岐にわたり、技術的にも多くの研究開発分野がある。学生が原子力を社会的な役割も含めて正しく理解し、積極的にこの分野に参画してくれることを期待したい。

3. エネルギーや原子力に対する学生の意見

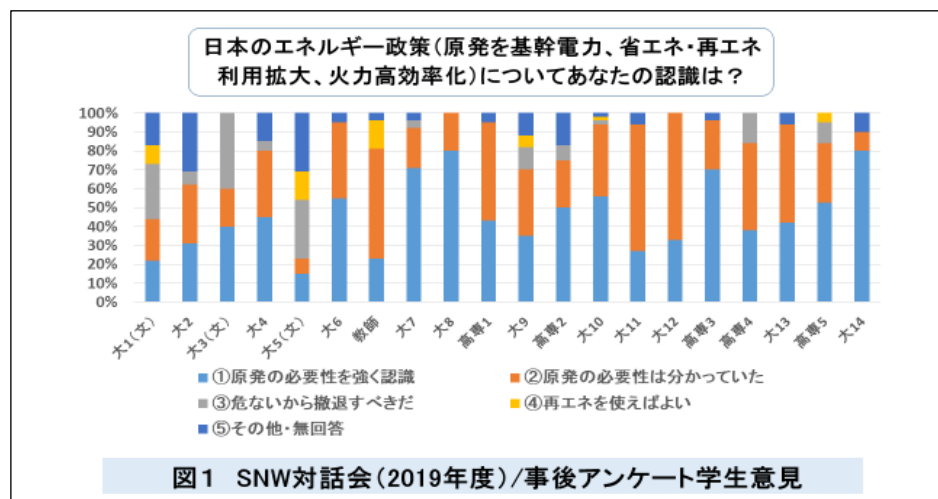
(1) 「学生とシニアの対話会」事後アンケート

SNW は、会員の知識と経験を活かし、エネルギーと環境問題に対する原子力の役割について社会に発信・提言するとともに、「学生とシニアの対話会」を通して人材育成に貢献する目的で活動している。対話会は 2005 年に活動を開始し、2020 年までの 16 年間に毎年 12～21 回開催し、全国の大学生等約 6,600 名と対話してきた。平均的な対話会では、エネルギーや原子力を環境問題に絡めてシニアが 1 時間講演し、その後学生 5～6 名のグループに分かれて直接学生と Q&A を行い、終了後対話で学生が得た成果や意見を事後アンケートにまとめて集計・評価している。図 1 は 2018 年度に実施した対話会（大学 14 校、高専 5 校等）の事後アンケートの例であり、エネルギー基本計画に示された日本のエネルギー政策について、原子力発電等に対する学生の意見を学校別（大学又は高専、(文) は文系を示す）に集計したものである。当時は CN 対策がまだ広く議論されていないが、原子力発電の役割に対する学生の認識が良く汲み取れる。学生の大半が、「①原発の必要性を強く認識」又は「②原発の必要性は（もともと）分かっていた」の認識を示したが、特に文系（教育系等）では対話会参加学生の略略 3 割が「(原発は) 危ないから撤退すべきだ」の認識を示した。学生のこの認識は、他の年度に実施した対話会でも同様の傾向が見られ、理系の学生は原子力発電の役割を肯定的に強く認識しているが、文系の学生の中には否定的な認識を持つ者も多数いることが分かった。

(2) 大学連合の「CN 等、エネルギー動向に関するアンケート」

大学連合を構成する 18 大学の学生に対して、国際的な CN 対策に絡めた今後のエネルギー動向に関する認識についてアンケートを依頼し、82 名の回答を得て集計・調査した。アンケート調査結果の一例を図 2 および図 3 に示す。図 2 は、原子力発電に関する次の設問に回答し、その「理由」も記載した学生 49 名の意識である。「原子力発電に対して伺います。第 6 次エネルギー基本計画では、原子力については、安全性の確保を大前提に必要な規模を持続的に活用していくとしつつ、可能な限り原発依存度を低減するとしています。これに対してあなたの認識はどれですか？その理由は？」また、図 3 は CN 達成に関する次の設問に対する学生 47 名の意見である。「2050 年 CN 達成には各国とも多くの課題や問題を抱えています。島国日本がいま採るべき方策は何かについてあなた自身の意見を聞かせて下さい。」なお、学生の認識又は意見は次の 6 項目から選定してもらうこととした。① エネルギー環境政策への関心、② 地球規模リスク、国家的リスクに対する意識、③ 自分の将来像、将来進路に対する意識変化、④ エネルギー安全保障に対する認識、⑤ 環境政策と国民コスト負担に対する意識、⑥ その他、SDG s などへの関心。

図 2 と図 3 から、エネルギー環境政策に対する学生の意識が高いことは、CN が地球温暖化問題に直接関係するので当然と考えられるが、エネルギー安全保障に対する意識や意見の多いことは注目に値する。CN 対策の議論が世界的に広がる中で、国内では原子力発電が安全性のみの議論に留まりやすい傾向を超えて、日本の国としてのエネルギー安全保障まで学生の意識と視野が広がったように感じ



られ、大変意義深いことと思われる。ただし、アンケート回答者のほとんどが理系で原子力を比較的理解していたことが背景にあると考えられる。

アンケート調査には、放射線・放射能に対する意識、CN 達成のためのエネルギー選択、2050 年 CN 達成の実現性等に関する設問も含めており、最近の SNW 対話会アンケートとも比較して口頭発表したい。

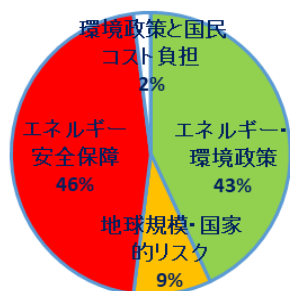


図2 原子力発電を必要とした理由・背景

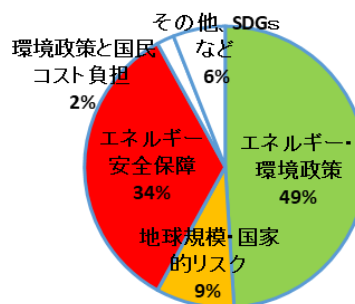


図3 日本の脱炭素方策に意見・提案を述べた理由・背景

4. まとめと感想

世界的な脱炭素気運が広まり、CN 実現のために原子力への期待が高まっている。この動きの中で大学生等がエネルギー・原子力に対してどのような意識や意見を持っているかを、SNW 対話会の事後アンケート及び大学連合 18 大学学生アンケートの結果から調査した。一般に学生は将来のエネルギー確保のための原子力の役割を肯定的に理解しており、特に大学連合の理系学生は国のエネルギー安全保障の観点まで視野を広げているのは大変意義深いことと言える。一方文系（教育系）学生の多くが原子力の役割を理解しているものの、危険性を懸念する傾向も見られた。

国内では東電福島原発事故以来、嫌原子力の世論に阿るエネルギー政策のままに留まっている。一方海外では地球温暖化阻止の CN 達成を目標とする気運が盛んであり、ドイツ等一部の国を除いて大多数の国々が温室効果ガスを排出しない原子力発電への期待を示している。将来のエネルギーの選択は電力コストに反映され、電力コストは国の経済に直接影響する。中国経済を利する同国製太陽光パネルを大量に使い、高い再エネ賦課金を支払って、さらに再エネを拡大させようとするエネルギー政策は国益に適うのだろうか。

世界的な脱炭素気運は理想的なコンセプトであろうが、実情では各国ともにそれぞれ国情に応じた重い課題に向き合うことになった。島国日本はエネルギー資源に乏しいばかりでなく、ヨーロッパのようなエネルギー流通網がない。また、資源争奪の国際環境の中で中国やインド等アジアの強国とも共存していかなければならない。エネルギーは、食料と同様国の安全保障に直結する重要因子であり、その継続的確保は CN 達成の前提条件になるであろう。今 20 歳台の学生は 2050 年には社会を支える中核になる。その時困らないように、CN を見据えた日本のエネルギー政策を、原子力を含めて公正に且つ真剣に考えてほしい。SNW「学生とシニアの対話会」は、将来に備える知識と知恵の伝承に少しでも寄与することを期待して活動している。

*Kazuhiko WAKASUGI¹ and Akira NISHIMURA²

¹Senior Network (SNW), ²Tokyo Institute of Technology

シニアネットワーク連絡会セッション

世界的な脱炭素気運と学生の意識変化について

How did the Decarbonization Movement worldwide affect on the students' way to think the energy-mix and nuclear energy?

(2) 長崎大、九州工大でのカーボンニュートラルとエネルギーの対話から

(2) The Tendency shown in Dialog Meetings on the Carbon Neutral and Energy in Nagasaki Univ. and Kyutech

*松永 健一¹

¹シニアネットワーク連絡会

1. はじめに

最近、シニアネットワーク連絡会 (SNW) の「学生とシニアの対話」に、2050 年カーボンニュートラル (CN) のテーマが多くなる傾向にある。2020 年 10 月に菅前総理が「2050 年 CN 宣言」を行って以降、電力会社などが CN に向けたロードマップを公表することにより、具体的な議論がされ始めたことが、学生の意識の変化に影響しているものと考えられる。特に、九州は、再エネの導入が早く、原発の再稼働を果たしているため、国の 2030 年脱炭素化目標を既に達成している地域であり、再エネの課題が先行して顕在化している地域でもある。日本の脱炭素をリードする立場にある九州における大学・高専の学生の意識の変化を、この地域の電力会社の取組みを併せて分析し議論しておくことは、SNW の対話の方向性を見出す観点からも重要である。一方、本年 1 月開催の「原子力総合シンポジウム」(日本学術会議主催)において、日本原子力学会会長、専門家集団として社会とのコミュニケーションや人材育成に果たすべき役割を考えていく必要性を改めて強調し、高レベル廃棄物の資源化に取り組んできた藤田元会長は、青森県内の女性達との意見交換の経験から、歯科材料やアクセサリにも使われるパラジウムの抽出・再生利用に注目が集まったことに触れ、「まずは相手の関心のある話題から広めていってはどうか」ということや、相手の立場からのコミュニケーション活動を提唱した。この観点からも、SNW の果たす社会的役割は大きいのではないかと。

2. 九州の大学・高専における学生の意識変化

九州の大学・高専における学生の意識変化を最近の対話テーマの選択傾向から分析した。2019～2021 年度における長崎大 (A 校)、九州工大 (B 校) 及び北九州高専 (C 校) の「対話テーマ」を、原子力と非原子力、「夢のある将来テーマ」であるか否かで分けて、学生の希望度 (テーマ毎の参加数で重みづけ) を比較した。A 校と B 校の希望度を表 1 に示す。原子力は廃棄物・廃炉、原発 (再稼働、安全、環境影響、課題・解決策、今後) など、非原子力は再エネ、非原発発電方式 (経済性、安全、環境影響、今後)、2050 年 CN、働き方などが主なテーマである。

(1) 2019～2021 年度の原子力の比率は、A 校 : 開催なし→50%→53%、B 校 : 100%→84%→17%、C 校 : 100%→90%→84%であった。原子力は減少傾向にあり、B 校では 2021 年度に急減した。B 校で原子力が激減したのは、再エネの主電源化と 2050 年 CN に希望が集中したこと、他、「働き方」が初登場したことによる (表 1 参照)。

(2) 「夢のある将来テーマ」は、2021 年度に初出しており、A 校の原子力 (50%) のうち 13%が水素製造高温ガス炉と SMR、非原子力 (47%) のうち 13%が宇宙太陽光であり、B 校の原子力 (17%) のうち 9%が SMR であった。

(3) また、2021 年度の B 校において非原子力 (83%) のうち 20%が「働き方」であることが特筆される。進学や就職を前にして、人生の先輩としてのシニアの経験にかなりの関心が集まり、対話が盛り上がったものである。2050 年 CN へ向けての取組みが、自身の仕事や社会の在り方に影響を与えることへの不透明感があるようである。

(4) 2050 年 CN へ向けての非原子力の取組みが話題となっている一方、2050 年 CN へ向けての原子力の取組みが話題となっていないようである。再エネの不安定性に対する火力発電の役割や火力発電のフェードアウト

ウトが議論されているのに、原発（新型軽水炉）の出力調整能力を気にする学生はいないのであるだろうか。2021年度の学生の意識の変化を踏まえて、2050年CNへ向けての原子力の役割を、真正面から議論すべきであろう。

一方、九州の電力事情が、学生の意識変化に影響しているであろうか。九電は、原子力（35%）＋再エネ（23%）＝58%の電源比率であり、国の2030年脱炭素化目標を既に達成している国内のトップランナーである。2050年CNビジョンでは、「九州から日本の脱炭素をリードする」としており、需要側での電化を、現状の23%から引き上げて電力需要を増大しながら、電力の脱炭素化を図ることで2050年CNを達成しようとしている。この挑戦が、九州地区の大学・高専の学生の意識変化に影響している可能性は否定できない。

表1 対話テーマの学生希望度（テーマ毎の参加数で重みづけ）

		2019年度	2020年度	2021年度
長崎大	原	開催なし	(50%) HLW、原発（安全、福島復興）、放射線教育	(53%) HLW、原発（安全、再稼働）【夢】水素製造高温ガス炉、SMR（うち13%）
	非		(50%) 地球温暖化、SDGs、再エネ、火力、蓄電、パリ協定	(47%) 2050年CN、脱炭素【夢】宇宙太陽光（うち13%）
九州工大	原	(100%) HLW、原発（安全、事故、今後）	(84%) HLW、原発（安全、再稼働、課題、今後、経済性など）	(17%) 原発（安全）【夢】SMR（うち9%）
	非	(0%)	(16%) 再エネ、非原発方式（経済性、安全、環境影響、今後）	(83%) 再エネの主電源化、2050年CN、働き方

原：原子力関係、非：非原子力関係、【夢】：夢のある将来テーマ

最後に、今後増えると予想されるCNに対する関心項目（2021年度北九州高専）を図1に示す。温暖化・エネルギー資源、政策・動向、脱炭素化設備・コストへの関心が高い反面、原子力・再エネの2050年CNに対する役割への関心が低いようである。

また、2021年度に初めて「働き方」が対話テーマとなった。相手の立場からのコミュニケーション活動を目指して、人生の先輩としてのシニアの役割を果たしたいものであり、2050年CNに向けて原子力発電の役割を、真正面から語りたいものである。

九州地区の大学・高専における2019～2021年度の学生の意識変化を調査・分析した結果から、それらが求められているように思われる。

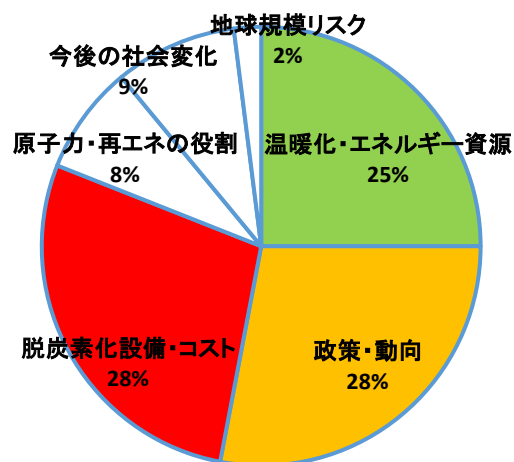


図1 カarbonニュートラルの関心項目
(2021年度北九州高専)

*Kenichi MATSUNAGA¹ ¹Senior Network

シニアネットワーク連絡会セッション

世界的な脱炭素気運と学生の意識変化について

How did the Decarbonization Movement worldwide affect on the students' way to think the energy-mix and nuclear energy?

(3) 若者から見たカーボンニュートラルとエネルギーについて

(3) On Carbon Neutral and Energy from the student Viewpoint

—カーボンニュートラルに向けた原子力分野におけるエネルギー評価研究—

- Energy assessment research in the field of nuclear toward carbon neutral -

*岡村 知拓¹

¹ 東京工業大学

1. はじめに

現在、先進国を中心に 2050 年カーボンニュートラルが目標として定められている。EU タクソノミーの議論に見られるように、原子力発電は実用段階にある脱炭素化の選択肢として議論されている。一方で、2050 年カーボンニュートラルを実現するためには再生可能エネルギーと原子力エネルギーの協奏は非常に重要なファクターである一方、その方向性や未来像は社会的に共有されていない。また、原子力産業においても、小型モジュール炉や先進的な核燃料サイクル技術の研究開発が進められているものの、それら技術の導入によって社会や原子力産業がどのように拓かれるか明確なビジョンは示されていない。

エネルギーや原子力政策の立案・新技術の社会実装の判断においては、その政策や技術導入によって拓かれる「現在から将来までの未来像」をできる限り高い解像度で描き、それが社会にとって価値あるものかを議論することが重要である。特に学生をはじめとする若者世代は、自分達が近い将来経験するであろうエネルギーの未来像を具体的に描きたいと望んでいる。その目的に適した手法として、エネルギーや原子力業界の将来シナリオを定量的かつ多面的に表現するための方法：「エネルギー評価研究」があり、筆者はその研究を行っている。

2. エネルギー評価研究

西原らによって、エネルギー評価研究の検討フローが提案されている（図 1）。それによると下記の 4 ステップでの検討が必要であるとしている。

I. 調査・モデル化：各エネルギー源の S+3E（安全、安定供給、経済性、環境）等を調査およびモデル化

II. 諸量評価：モデルを基に計算システムに構築し、シナリオを計算

III. 性能評価：様々な評価手法を研究し、各電源を多面的に評価

IV. 社会実装・発信：持続可能性や公平性等の社会的因子を盛り込み、政策、技術導入、規制等に応用

エネルギー評価研究では、一側面からの評価ではなく多面的な評価が重要であり、それには各エネルギー源における貢献に加え、自然科学と社会科学を結節させた分野横断的なアプローチが必要であるとしている。

原子力分野におけるエネルギー評価研究は、「核燃料サイクルシミュレーション」という分野で行われてきた。昨今ではゼロカーボン社会を見据えて、同分野は欧州を中心に活性化してきており、若手研究者や学生を多く抱えている。本発表では原子力分野におけるエネルギー評価研究の動向をはじめ、同分野の研究を行っている筆者が考える原子力分野にお

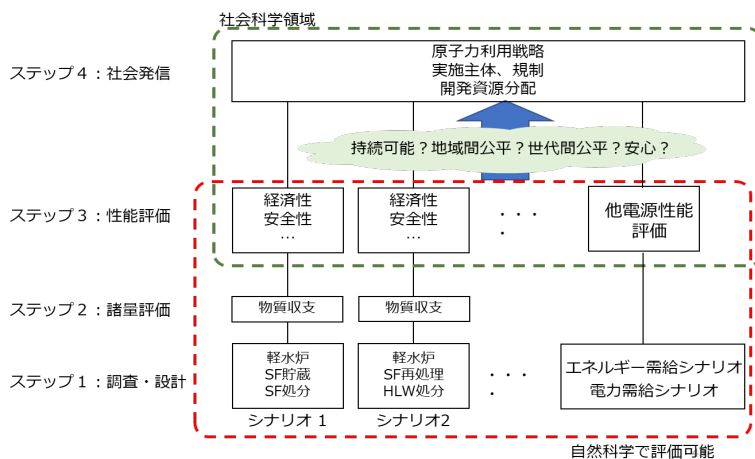


図 1 エネルギー評価研究の概要^[1]

けるエネルギー評価研究の重要性について述べる。

参考文献

[1] 西原健司, ZC 研コロキウム資料, (2021).

*Tomohiro OKAMURA ¹Tokyo Institute of Technology

シニアネットワーク連絡会セッション

世界的な脱炭素気運と学生の意識変化について

How did the Decarbonization Movement worldwide affect on the students' way to think the energy-mix and nuclear energy?

(4) 学生を交えたパネルディスカッション

(4) Panel Discussion with Students

*櫻井 三紀夫¹ 岡村 知拓²

¹シニアネットワーク連絡会 ²東京工業大学

1. はじめに

シニアネットワーク(SNW)が注力してきた「学生とシニアの対話」において、最近では脱炭素、カーボンニュートラル(CN)への関心が強く、対話のテーマに取り上げられることが多くなっている。これは、CNが世界的なエネルギー環境問題の重要テーマであることと共に、学生自身にとって近い将来の自分の仕事、社会の在り方に深い関係があるからであろう。

一方、SNWにとっても、これが原子力の理解促進を図る絶好の機会と捉えられ、社会や若い世代に向かって発信を強める大事な局面と認識されている。

以上のような背景から、この企画セッションでは、CNが学生にどのように受け取られ、どのような対応をしようとしているかのアンケート調査を行い、学生とのパネルディスカッションを実施して、脱炭素気運が学生にどのような意識変化を齎しているかを把握したいと考えている。

2. パネルディスカッション

パネルディスカッションにおいては、学生世代の若者がエネルギー・環境・SDGsなどに対してどういう認識をしているか、どういう行動を取ろうとしているか、という観点から、以下の6項目に焦点を当てて、対話を進める考えである。

- 1) エネルギー環境政策への関心
- 2) 地球規模リスク、国家的リスクに対する意識
- 3) 自分の将来像、将来進路に対する意識変化
- 4) エネルギー安全保障に対する認識
- 5) 環境政策と国民コスト負担に対する意識
- 6) その他、SDGsなどへの関心

セッション前半の学生アンケート結果の分析・評価と、後半のパネルでの議論を通して、学生の意識変化を浮き彫りにし、SNWの今後の原子力理解活動に反映させていきたいと考える。

3. まとめ

脱炭素やカーボンニュートラルの動きは、期待と疑問が交錯して、学生達の意識にも迷いを生じさせていると見受けられるし、技術的・社会的にも大きな難しさを伴っている。100%達成することは困難だろう。

しかし、この気運の中で、文系・理系の学生同士が分野を跨いで原子力への理解を深める活動をおこなったり、国レベルで適切な政策運営・社会活動がなされれば、カーボンニュートラルはかなり良いところまで到達できる可能性があるのではなからうか。脱炭素の目標に含まれる疑問点・課題を打開するための努力や技術開発を続けることによって、新技術・新ルールが見出され、大きく発展する可能性もある。

若い世代の人達には、問題点をきちんと見出して正しく解決する意識と力量を養って、カーボンニュートラルを端緒にした将来像の構築を行い、その構想の中に自らの夢・活動の場・モチベーションを見出して貰えたら良いな、と思います。

ご活躍を祈り、期待します。

*Mikio SAKURAI¹ and Tomohiro OKAMURA²

¹Senior Network (SNW) ²Tokyo Institute of Technology

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

[2K_PL] Current Status of Radioactive Waste Generated from Research, Medical, and Industrial Facilities and Activities toward Disposal Project

Chair: Kazuya Idemitsu (Kyushu Univ.)

Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room K

[2K_PL01] Current Status of Radioactive Waste Management in JRIA

*Minoru Okoshi¹ (1. JRIA)

[2K_PL02] Current Status of Radioactive Waste in Universities

*Kazuya Idemitsu¹ (1. Kyushu Univ.)

[2K_PL03] Current Status of Radioactive Waste Generated from Research, Medical, and Industrial Facilities and Activities toward Disposal Project

Minoru Okoshi¹, Hiromitsu Haba², Satoshi Hukutani³, Akihiro Sakai⁴, Chair: Kazuya Idemitsu⁵ (1. JRIA, 2. RIKEN, 3. Kyoto Univ., 4. JAEA, 5. Kyushu Univ.)

バックエンド部会セッション

研究施設等廃棄物の現状と埋設事業へ向けた取り組みについて

Current Status of Radioactive Waste Generated from Research, Medical, and Industrial Facilities
and Activities toward Disposal Project

(1) RI 協会における廃棄物管理の現状について

(1) Current Status of Radioactive Waste Management in the Japan Radioisotope Association

*大越 実¹¹公益社団法人 日本アイソトープ協会

1. 概要

日本アイソトープ協会（以下「協会」）は、「放射性同位元素等規制法（RI 法）」、「医療法」、「臨床検査技師等に関する法律（臨検法）」、「医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保に関する法律（薬機法）」のもとで RI または放射線発生装置を利用している全国の事業所で発生する放射性汚染物（以下「RI 廃棄物」）の集荷、貯蔵及び処理業務を実施している。また、(国研) 日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」）が計画を進めている埋設処分施設の運用開始後には、協会が管理している RI 廃棄物の処分を原子力機構に委託することとしており、そのために必要な廃棄体化方法の検討等を実施している。

2. 集荷の現状

協会は、集荷を希望する事業所にあらかじめ廃棄物容器を貸与する。事業所では、RI 廃棄物の種類に応じて廃棄物容器に区分・収納した上で、保管廃棄施設で一時保管する。協会は、原則 1 年に 1 回地域別年間集荷計画に従って、集荷依頼のあった事業所を訪問し、集荷する。集荷対象事業所数は約 2,320 施設である（2020 年末現在）。年間平均集荷本数は約 7 千本（200L 容器換算、2016～2020 年度の 5 年間平均）であり、内訳としては、RI 法事業所が 58.2%（以下「研究 RI 廃棄物」）、医療法、臨検法と薬機法対象の事業所の合計が 41.8%（以下「医療 RI 廃棄物」）である。また、廃棄物の種類別では可燃物 6.7%、難燃物 30.4%、不燃物 11.3%、非圧縮性不燃物 8.5%、動物 1.0%、（以上固体廃棄物）、無機及び有機液体 2.4%、フィルタ 39.8%である。集荷に当たっては、当該集荷事業所への RI 供給実績データを用いて廃棄物の種類、区分、放射能レベルなどの内容確認を補完している。集荷した RI 廃棄物の貯蔵施設への輸送は、L 型または IP-2 型の輸送物として、専用積載車両で行っている。

3. 貯蔵及び処理の現状

集荷した RI 廃棄物は、その後の管理を効率的に実施する観点から、5 か所の廃棄物貯蔵施設にて貯蔵している。協会は、RI 廃棄物の集荷量と保管量の増大に対応するため、貯蔵能力の増強を適宜進めてきており、2020 年度末現在の貯蔵能力は 200L 容器換算本数で約 24 万本であり、約 15 万本相当の RI 廃棄物を貯蔵している。

集荷した RI 廃棄物の処理は、かずさ環境技術センターと滝沢研究所の 2 か所で実施している。かずさ環境技術センターでは、研究 RI 廃棄物のうち、可燃性固体廃棄物、不燃性固体廃棄物と液体廃棄物を小規模焼却施設（処理能力約 40kg/h）と仮焼炉（処理能力：固体廃棄物約 150 kg/h、液体廃棄物 500L/h）を用いて減容・安定化処理している。滝沢研究所では、医療 RI 廃棄物のうち、可燃性固体廃棄物を焼却処理設備（処理能力約 65kg/h）を用いて減容・安定化処理している。

4. 埋設処分に向けた取組

RI 廃棄物の埋設処分の実現に向けて、原子力機構と埋設処分施設への受入基準について意見交換を継続的に実施している。また、焼却処理と仮焼処理後の残渣を廃棄体化するための熔融処理方法について基礎的な試験を実施し、処理性能等を確認するとともに、その結果を基に熔融処理施設の基本設計を実施している。

*Minoru Okoshi¹¹ Japan Radioisotope Association.

バックエンド部会セッション

研究施設等廃棄物の埋設事業へ向けた取り組みについて

Current Status of Radioactive Waste Generated from Research, Medical, and Industrial Facilities
and Activities toward Disposal Project

(2) 大学における廃棄物管理の現状

-九大施設の廃止措置によって発生した廃棄物-

(2) Current status of waste management in universities

- Waste generated by decommissioning of Kyushu University facilities-

*出光 一哉¹¹九大

1.概要

九州大学（工学部等）施設の廃止措置について、廃止措置の方法と除染・廃棄物の発生量とその性状の概略を示す。今後の廃止措置に伴う廃棄物の低減への一助になることを期待する。

2. 九州大学工学部等（エネルギー量子棟）の廃止措置

2-1. 施設の概要

本施設は昭和42年3月18日付け使用承認された旧箱崎キャンパスにあった施設であり、令和2年9月23日付けで原子力規制委員会から廃止措置終了確認書の交付を受けた。建物内には、非密封の使用施設（8部屋）と貯蔵庫（2部屋）、廃棄施設（排気、排水）および密封線源使用施設があり、一部核燃料とRIの共用されたものがあつた。大学の移転に伴い施設の廃止を実施した。

2-2. 廃止措置の方法と発生廃棄物

保有していたRIおよび核燃料については、新設した施設（伊都キャンパス）に移送した。この中には、1.9トンの天然ウラン（未臨界実験装置燃料）や、Ra-Be中性子線源、Am-Be中性子線源、トリチウムターゲット等が含まれる。それ以外の少量の放射性物質（RI）は廃棄されアイソトープ協会に引き渡された。

施設の解体に関しては、特に核燃料物質による汚染除去に注意して、「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分安全規制に関する基準値について（第2次中間報告）」（平成4年度原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会）における「放射性廃棄物でない廃棄物」の考え方に従って実施した。核燃料物質と接触履歴のある設備・機器の解体においては、汚染拡大防止のためグリーンハウスを設置し、切断・分解して解体した。核燃料物質と接触履歴がある部分については、予め研削・はつりによる除去を行い、その後直接法および間接法により表面汚染密度の算出を行なった。除去物および汚染が除去できない物は放射性廃棄物とし、新施設で保管管理している。RIのみの汚染物については、RI廃棄物としてRI協会に引き渡された。なお、表面汚染密度がバックグラウンドの統計的変動（ σ ）の3倍を超えた場合に汚染があるとしている。

アイソトープ協会に引き渡された廃棄物は、可燃（50L）165本、難燃物（50L）340本、不燃物（50L）177本、不燃物（200L）58本、非圧縮性不燃物77本。液体（25L有機）31本、フィルタ（通常型）207L、フィルター（焼却型）2187Lであつた。核燃料廃棄物として新施設に保管している廃棄物は、可燃（200L）30本、難燃（200L）44本、不燃（200L）74本、粉粒体（200L）1本であつた。

2-3. 規制庁への報告

廃止措置を終えて規制庁に報告書を提出している。汚染検査結果の詳細は下記のサイトの資料で確認できる。

https://www.nsr.go.jp/disclosure/law_new/KKAN/320000262.html

* Kazuya Idemitsu¹

¹Kyushu Univ.

バックエンド部会セッション

研究施設等廃棄物の埋設事業へ向けた取り組みについて

Current Status of Radioactive Waste Generated from Research, Medical, and Industrial Facilities
and Activities toward Disposal Project

(3) パネルディスカッション 研究施設等廃棄物の

埋設事業へ向けた取り組みについて

(3) Panel Discussion: Current Status of Radioactive Waste Generated from Research, Medical, and Industrial
Facilities and Activities toward Disposal Project

*大越 実¹、*羽場 宏光²、*福谷 哲³、*坂井 章浩⁴、司会：*出光 一哉⁵

¹アイソトープ協会、²理研、³京大、⁴JAEA、⁵九大

1.概要

大学、医療、研究所等からの原子力・放射線研究施設等の廃棄物や廃止措置解体物発生が課題とされる中で、埋設事業が理解され、進展するためには、何が必要なのか、RI 利用研究、大学、医療等の研究施設等廃棄物発生者と埋設事業者が互いの課題と要望を意見交換し、より良い埋設事業へ向けた取り組みとはどうあるべきかについて討論を行う。

2. 討論テーマについて

2-1. 大学、研究所、RI 集積機関から埋設事業者へ要望・期待するもの

大学、研究所、RI 集積機関からの原子力・放射線研究施設等の廃棄物や廃止措置解体物発生にともなう課題と、埋設事業に向けた要望・期待するものについて討論する。

2-2. 埋設事業者から大学、研究所、RI 集積機関へ要望・期待するもの

埋設事業の進展のために大学、研究所、RI 集積機関に埋設事業者が要望・期待する事柄と、関連する課題について討論する。

2-3. 大学、研究所、RI 集積機関と埋設事業者との協力関係構築のために

上記の討論を踏まえ、大学、研究所、RI 集積機関と埋設事業者との協力関係構築のために何が必要か、今後の課題について討論する。

*Minoru Okoshi¹, *Hiromitsu Haba², *Satoshi Fukutani³, *Akihiro Sakai⁴, *Kazuya Idemitsu⁵

¹JRIA, ²RIKEN, ³Kyoto Univ., ⁴JAEA, ⁵Kyushu Univ.

Planning Lecture | Technical division and Network | Fusion Engineering Division

[2L_PL] Nuclear Fusion Development by Private Sector

Chair: Yuji Hatano (Univ. of Toyama)

Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room L

[2L_PL01] The Global Private Fusion Industry: Latest Trends and the Overview

*Shutaro Takeda¹ (1. Kyoto Univ.)

[2L_PL02] Challenge of Kyoto Fusioneering Ltd. toward Practical Fusion Energy Business

*Satoshi Konishi¹ (1. Kyoto Fusioneering)

[2L_PL03] Advanced laser research for high-repetition laser fusion demonstration

*Yoshinori Tamaki¹ (1. Hamamatsu Photonics)

[2L_PL04] Our challenge for the realization of laser-based fusion reactors

*Kazuki Matsuo¹ (1. EX-Fusion)

[2L_PL05] Discussions

核融合工学部会セッション

民間資金での核融合研究

Nuclear Fusion Development by Private Sector

(1) 世界の民間核融合業界で今何が起きているのか

(1) The Global Private Fusion Industry: Latest Trends and the Overview

*武田秀太郎¹¹ 京都大学総合生存学館

1. 本講演の目的

現在、核融合が国際的な耳目を集めている。気候変動への関心の高まりは世界的なサステナビリティ投資ならびにダイベストメント（化石燃料からの投資引き上げ）という潮流を生み、究極のグリーンエネルギー実現という夢に向けた民間投資が盛り上がりの機運を見せる。

本講演は、日進月歩の拡大を遂げる民間核融合業界につき、最新の IAEA [1]ならびに Fusion Industry Association 統計[2]に立脚することで、客観的かつ公平な現状分析を提供することを目的としている。（以降、特に断りのない限り、統計情報は参考文献[1],[2],[3]、特に[2]に基づき集計したものである。）

2. 誰が核融合実現を目指しているのか？

過去 20 年間核融合に取り組む民間企業数は増加の一途を辿り、特にここ数年はその勢いが加速している。自社で核融合炉を設計しエネルギーの商用化を志向する企業は現在世界に 25 社が存在するが、そのうち 17 社（68%）が過去 10 年間に設立されている。更にそのうち 14 社（56%）が過去 5 年間だけで設立されていることから、本領域におけるスタートアップ起業の勢いが増していることは明らかである（図 1）。

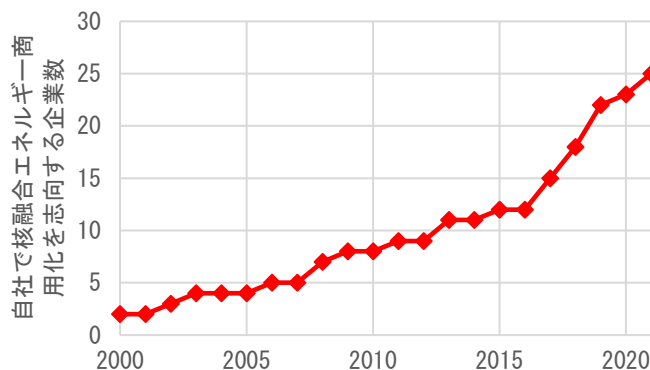


図 1 自社で核融合エネルギーの商用化を志向する企業数

これら民間企業が採用する最も一般的な技術的アプローチは磁気閉じ込め(56%)であり、次いで慣性磁気閉じ込め(20%)である（図 2）。具体的な技術的方式には多様性があり、それぞれ独自の技術的焦点を持っている。

¹ *Shutaro Takeda¹¹Kyoto University

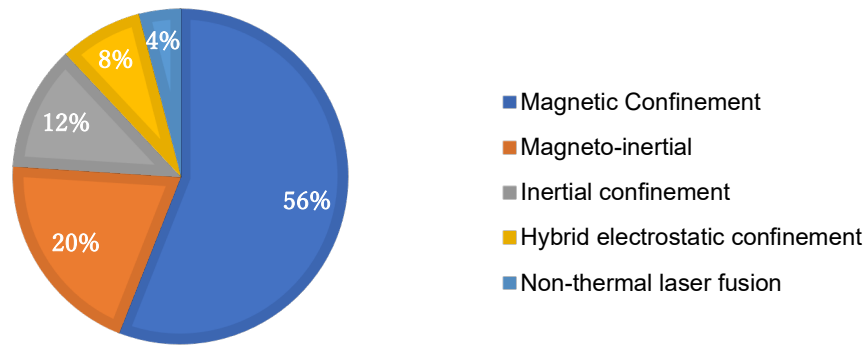


図2 民間核融合企業が採用する閉じ込め方式

また、一口に自社で核融合エネルギーの商用化を志向すると言ってもその主なターゲット市場は様々であり、発電(24社)から宇宙推進装置(11社)、水素製造(7社)まで複数のターゲット市場が想定されている(図3)。

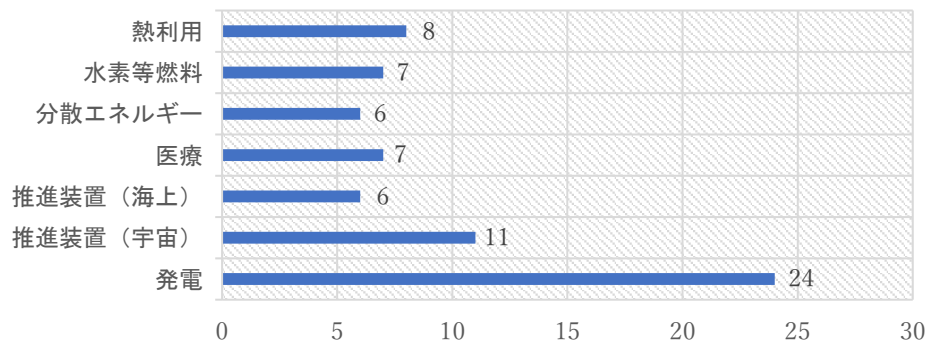


図3 各市場で商用化を目指す企業数

3. 誰が核融合に投資しているのか？

民間の核融合開発業者への投資額はここ数年指数関数的に伸長しており、ビル・ゲイツ、ジェフ・ベゾス、Googleといった著名投資家を筆頭に、世界の核融合ベンチャーへの累計投資額は2021年末時点で約5,000億円に達した。現在核融合への出資を公開している主たる企業は表1の通りである。

表1 核融合への出資を公表している主要投資家リスト

Addition Art Samberg Bezos Expeditions Breakthrough Energy Ventures Capricorn Investment Group (Jeff Skoll) Cenovus Energy Coral Capital Charles Schwab Chevron Technology Ventures David Harding (CEO of Winton Group) Dr Hans-Peter Wild (Owner of Capri Sun) Dusting Moskovitz Energy Impact Partners Eni Equinor GA Capital GIC Google	Grantham Foundation for the Environment IP Group Khazanah Nasional Khosla Ventures Kuwait Investment Authority Legal and General Lowercarbon Capital Lukasz Gadowski Mithril Capital (Peter Thiel) Oxford Sciences Innovation Reid Hoffman Sam Altman Temasek Venrock Vulcan Capital Wellcome Trust Y Combinator
---	--

これにより、核融合分野は、ITER や DEMO のような公的プロジェクトと、民間における先進要素技術の開発を2トラックで並走させる。さらに英国など、民間の核融合企業が公共の研究所と協力し、専門知識、施設、公共投資を活用できる方法を増やす国もある。こうした官民パートナーシップは既に数百億円の規模に達している。加えて米国・欧州の一部国家の規制当局は核融合発電プラントの設計を可能とする適切な規制フレームワークの議論を加速しており、制度面から民間核融合企業を支援している。

4. 彼らはいつの実現を目指しているのか？

興味深いことに、最新の聞き取り調査(2021 年)においては民間核融合企業の大半(24 社中 17 社)が、核融合発電は 2030 年代に (図 4)、核融合宇宙推進装置は 2030 年代または 2040 年代に実現すると考えている (図 5)。民間企業はいずれも野心的なタイムスケールで核融合を推進しており、最も差し迫った地球規模の問題の解決に核融合が貢献することを望んでいる。これら表明されたタイムスケールは、この成長産業に存在する各社の意欲とコミットメントを示すものである。

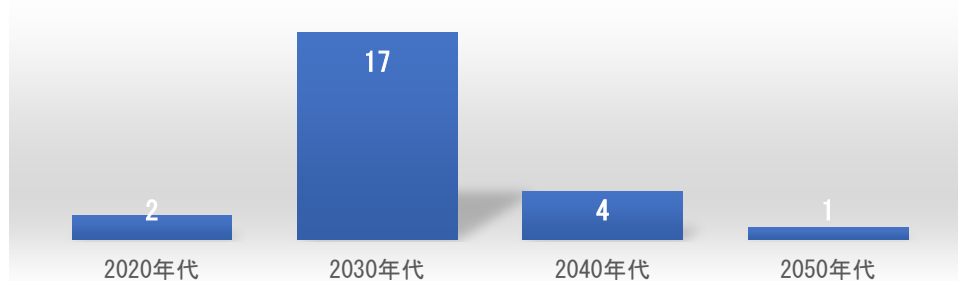


図 4 核融合による初送電を計画する年代 (数値：社数)

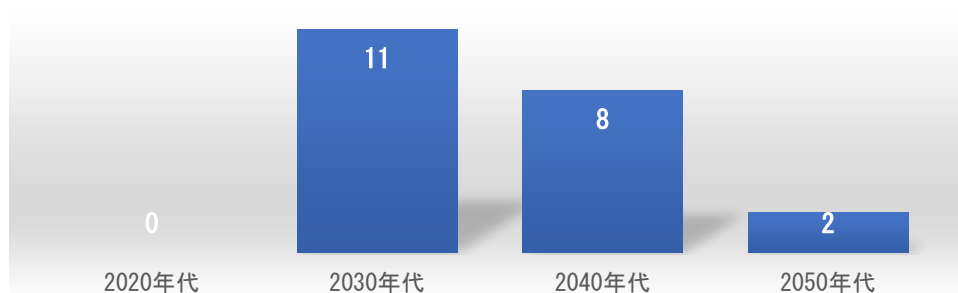


図 5 核融合による宇宙推進装置実用化を計画する年代 (数値：社数)

これら一連の統計は、世界の民間核融合企業が短期的かつ意欲的なマイルストーンを設定して技術開発と実証を繰り返すことで、環境意識の高い投資家への訴求に成功していることを示唆する。以下、我が国において民間の立場から核融合商用化を志向する各企業から、各社の取り組みを紹介する。

参考文献

- [1] IAEA (2020), The Fusion Device Information System (FusDIS). IAEA.
- [2] Fusion Industry Association (2021), The Global Fusion Industry in 2021. FIA.
- [3] Nuttall, W. J., Konishi, S., Takeda, S., & Webbe-Wood, D. (2020). Commercialising Fusion Energy. IOP Publishing Limited.

核融合工学部会セッション

民間資金での核融合研究

Nuclear Fusion Development by Private Sector

(2) 京都フュージョニアリング株式会社による核融合産業化

(2) Challenge of Kyoto Fusionengineering Ltd. toward Practical Fusion Energy Business

*小西哲之¹, 長尾昂¹¹ 京都フュージョニアリング (株)

1. 緒言

核融合エネルギーの実用化とその産業化を目指して 2019 年 10 月に設立された京都フュージョニアリング (KF) 社は、以後順調に組織、資金、研究開発活動を進展し、世界の核融合開発の推進に対してユニークな貢献を始めると同時に、核融合をわが国の次世代の重要な産業分野として構想している。本講演では、核融合工学の今後の展開においてスタートアップ企業が担う役割とその方法論について具体例に基づき報告する。

2. 核融合スタートアップとそのビジネスモデル

2-1. イノベーションと投資

前講演で報告されたように世界で核融合スタートアップ企業は多くの資金と人員を結集し、急速な展開を見せている。しかしよく誤解されることがこの投資のほぼすべては、近未来に核融合電力の売上によってその回収を目論んでいるのではない。これら企業に課せられた唯一最大の機能はイノベーションによる成長であり、独創技術に裏付けられた企業価値の拡大である。成功裏に展開する企業は計画した研究開発を着実に遂行して成果を上げ、さらなる事業の拡大を図って投資家の期待に応えている。着実に進展する ITER に対抗するのではなく、すでに 2000 年代初頭に基本的な設計を確定して建設に入った核融合技術が高い確度でその目標を達成するという期待を共有しているからこそ、既に始まった産業化競争において、最新技術への挑戦により市場競争を行い、社会全体の開発ポートフォリオの重要な一角を担う。リスクを制御した基幹計画に対し、リスク性先進技術に挑戦するのが現代的開発戦略におけるスタートアップ企業の使命である。

2-2. 京都フュージョニアリング社の特色

世界の多くの新たな核融合開発が反応の早期実現を主目的とする中で、KF 社はほぼ唯一、炉工学とエネルギープラント技術の確立に重心を置いている。特に重視するのはエネルギープラントとしての利用系、工学機器の設計とその総合的なサプライチェーンの構築である。具体的には高周波システム、ブランケットや燃料系が中心となるが、プラズマ形式によらず核融合の産業化を目指し、他の企業を工学技術により支援するビジネスモデルに特徴がある。核融合産業は高度技術によるモノづくり産業であり、今後 10 数年のうちに設計建設される実燃焼装置の設計、開発、製作段階で着実な工学技術は不可欠であり、その市場の選択はエネルギーの販売のはるか以前に始まっている。KF 社は独創技術で核融合の工学課題にソリューションを提供する一方、産業化のための素材や製造技術の TRL 向上を進め、サプライチェーン基盤の構築を目指している。

3. 今後の展開と核融合炉工学における意義

このように KF 社は核融合装置・プラントを軸にイノベーションとビジネス展開を進め、企業価値の拡大を図っている。次の課題はプラズマ形式によらないジェネリックな中規模総合技術実証システムの建設と運転である。世界の核燃焼実験計画に対しエネルギーと燃料の総合技術を TRL6 レベルでタイムリーに供給することを目指す。核融合炉工学は基礎学術の確実な進展の一方、産業化方策や課題は手付かずと言える。核融合エネルギーの実現に必要な次段階の「装置」は、単なる機械でなく、技術、人、設備、資金を短期間に結集し、組織化して技術を開発し運営するプロジェクト主体であり、残念ながら予算や人員が急速に変化しづらい既存組織に、その機能は期待しがたい。民間資金によるスタートアップが期待されるゆえんである。

*Satoshi Konishi¹ and Taka Nagao¹¹Kyoto Fusionengineering Ltd.

核融合工学部会セッション

民間資金での核融合研究

Nuclear Fusion Development by Private Sector

(3) 高繰り返しレーザー核融合実証に向けた先端レーザー研究

(3) Advanced laser research for high-repetition laser fusion demonstration

*玉置 善紀, 関根 尊史, 栗田 隆史, 渡利 威士

浜松ホトニクス株式会社

1. はじめに

浜松ホトニクスでは、レーザー核融合反応の連続的な発生に資するレーザーおよび周辺技術の開発、更にそれらの技術を産業用途に展開していく応用開発を行っている。近年、kW 級にもなる半導体レーザー (LD) の高出力化に代表されるように周辺技術の発展は目覚ましく、従来の単発動作のフラッシュランプ励起レーザーにも及ぶ 1 kJ 級のレーザー出力の繰り返し動作の LD 励起固体レーザーの実現見通しが得られるに至っている。このレーザー技術を活用することで、単発照射での核融合研究では困難であった大量のデータ取得からの統計的手法によるレーザー核融合研究が可能になると考えられる。本発表では、LD 励起として世界最高出力となるセラミクスレーザーの開発について報告する。

2. 小型レーザー核融合実験装置 TERU

我々は、レーザー核融合を連続に発生させそれらを計測・評価するための小型レーザー核融合実験装置 TERU を構築し(図 1)、これまでにレーザー誘起衝撃波による超高压発生に関する研究にて固体ターゲット内に 30 万気圧の高圧状態を発生させる実験に成功した。衝撃波の発生・制御に関する研究は、レーザー核融合ではターゲット燃料の温度と密度を高精度に制御する上で重要となり、レーザーの応用開発の面では超高压の付与により新奇材料の創生が期待されるなど、核融合と産業応用の両面で革新的な成果が見込まれる。

3. 世界最高出力 LD 励起レーザー HELIA

LD 励起レーザーとして世界最高となる 250 J 以上を出力するナノ秒パルスレーザーを開発した(図 2)。本レーザーは、レーザー加工など産業用途に使用できるシステムとして開発されており、レーザーのパルス波形や波長、エネルギーなどを可変できる機能を有している。これらのレーザー照射条件を変化させることができる特性は、レーザー核融合や衝撃波の研究においても有用である。開発したレーザーでは、世界最大級の Yb:YAG セラミクスをレーザー媒質とし、これを 100kW 超の高出力 LD モジュールで高強度かつ高い一様性に励起することでエネルギーを蓄え、そこにレーザー光が伝播し蓄えられたエネルギーを基に増幅するレーザー増幅器で構成(図 3)されており、極めて高いレーザーパルス出力を実現している。本開発は、将来の 1kJ 出力に向けたスケールアップの実証も兼ねて行われており、本発表では 1kJ 級 LD 励起レーザーの実現見通しについても報告する。

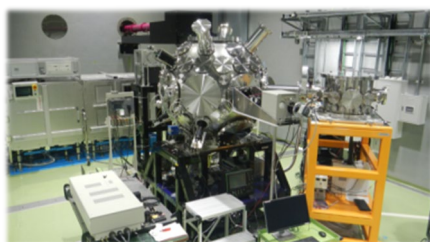


図 1 小型レーザー核融合実験装置
TERU.



図 2 250 J レーザシステム
HELIA.

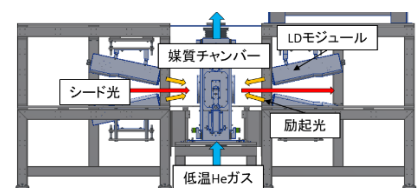


図 3 低温ヘリウムガス冷却式
レーザー増幅器の概略図.

*Yoshinori Tamaoki, Takashi Sekine, Takashi Kurita and Takeshi Watari

¹HAMAMATSU PHOTONICS K.K.

核融合工学部会セッション

民間資金での核融合研究

Nuclear Fusion Development by Private Sector

(4) レーザー核融合炉開発を加速する EX-Fusion 社の取り組み

(4) Our challenge for the realization of laser-based fusion reactors

*松尾 一輝¹, 森 芳孝^{1,2}, 増田晃一¹¹株式会社 EX-Fusion, ²光産業創成大学院大学

核融合発電は、発電時に二酸化炭素を排出せず、安定して大電力を供給することができるクリーンエネルギーとして、近年大きな注目を集めている。中でもレーザー核融合発電は、運転サイクルを制御することで負荷変動に対応することができるため、既存の発電システムを脱炭素化できるポテンシャルを有する。

日本のレーザー核融合研究は、エネルギー源の可能性を追求し、大学及び民間企業で進められてきた。大阪大学レーザー科学研究所では、チャープパルス増幅と呼ばれる 2018 年ノーベル物理学賞の対象となったレーザー技術を活用し、高速点火方式とよばれる高効率なレーザー核融合手法の研究を遂行してきた。最近の成果[1]は、米国のエネルギー高等研究計画局（ARPA-E）が 2020 年に出版した核融合研究の総括において、顕著な成果のひとつとして参照されている[2]。他方、光産業創成大学院大学では、浜松ホトニクス中央研究所産業開発研究センターにおいて、浜松ホトニクス株式会社、トヨタ自動車株式会社等と連携し、発電炉につながる連続運転システム原理実証を遂行してきた[3]。

EX-Fusion は、大阪大学レーザー科学研究所、及び光産業創成大学院大学の研究者により設立された。日本を拠点とするレーザー核融合エネルギーのスタートアップとして、民間資本を集め、開発リスクを取り、核融合エネルギーの商業化を実現するために必要な技術開発を加速していく。国内に存在する連続ターゲット供給レーザー照射に関する核融合関連技術[4]や、高繰り返しハイパワーレーザー技術等は、世界を先導している。これら要素技術を有するステークスホルダーと連携し、それらを統合することで独自技術を磨き、社会に受け入れられるレーザー核融合炉を実現する。

レーザー核融合の研究開発は 2021 年に跳躍期を迎えた。7 月の弊社設立に続き、8 月、米国のローレンスリバモア国立研究所では、レーザー核融合実験で 1.3MJ の核融合出力を観測し、50 年来の炉心プラズマのマイルストーンである核融合点火実証が眼前に迫った。この成果を受け、米国では、凍結していたレーザー核融合炉研究開発プログラムの再開が検討されている。更に、この 2 年間に、独、米、濠にレーザー核融合ベンチャーが設立されており、民間主導の研究開発も活性化しつつある。このように、今後は世界各国でレーザー核融合商用炉を目指して、これまでの基礎研究フェーズから開発研究フェーズに移行し、研究開発がさらに発展していくと予想される。

日本の強みは、世界に先駆け、レーザー核融合炉の基盤となる高繰り返しハイパワーレーザーが存在することである。例えば、浜松ホトニクス社は、2021 年 6 月に世界最大出力 250 ジュール半導体励起固体レーザー HELIA を整備した。大阪大学と量子科学研究技術開発機構は、革新的なパワーレーザーを中心とした多用途施設(J-EPoCH : Japan Establishment for a Power-laser Community Harvest)構想を提案している。これら高繰り返しハイパワーパルスレーザーは、レーザー核融合のみならず、レーザー加工、レーザープラズマ推進や、次世代半導体製造に必要とされる EUV 光源、重粒子線がん治療のためのレーザー加速イオン源など、多様なレーザープラズマ応用の研究開発の源泉でもある。EX-Fusion 社は、レーザー核融合炉を目指す過程において、国の新産業となりうるレーザー応用開発を支える企業でありたい。

- [1] K. Matsuo *et al.* *Phys. Rev. Lett.* 124, 35001 (2020)
 - [2] 米国の ARPA-E によってまとめられた核融合のサマリー (<https://arxiv.org/abs/2105.10954>)
 - [3] 森芳孝他、プラズマ・核融合学会誌 vol. 97, 352-364 (2021)
 - [4] Y. Mori *et al.* *Nucl. Fusion*. NF-104796.R1 (2021)
-

*Kazuki Matsuo¹, Yoshitaka Mori² and Koichi Masuda²

¹EX-Fusion Inc., ²The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries.

(Thu. Mar 17, 2022 1:00 PM - 2:30 PM Room L)

[2L_PL05] Discussions

脱炭素社会の実現という世界的な動きの中で注目を浴びている核融合研究においては、国際熱核融合実験炉（ITER）の建設が着々と進められ、またITERを補完・支援する「幅広いアプローチ（BA）」活動の下、JT-60SAの運転が始まろうとしている。これら国がけん引する大型プロジェクトに加え、脱炭素技術への投資の拡大を受けて、世界的に核融合の研究開発に携わるベンチャー企業が次々と創業している。

本セッションでは、海外における核融合のベンチャー企業の活動状況を俯瞰すると共に、日本で立ち上がっている先駆的核融合企業における研究開発について報告する。