

特集 創立 60 周年を迎え、学会は何をなすべきか II

会長あいさつ

1 創立60周年を迎え、未来を切り開こう！

駒野康男

これまでをふりかえり、今後を展望する

4 福島第一原発事故と日本物理学会の研究者の活動

日本物理学会 伊藤好孝

6 炉物理の使命 ～師匠と弟子の対話～

炉物理部会 千葉 豪, 山本章夫

9 核融合工学のこれまでと、これから

核融合工学部会 笠田竜太

これまでを振り返り、今後を考える

同 片山一成

13 1F 事故前後における大学での核燃料研究と人材育成

核燃料部会 宇埜正美

商用軽水炉燃料開発のこれまでとこれから

同 草ヶ谷和幸

17 放射性廃棄物の処分等の実施に向けて

バックエンド部会 田辺博三

地層処分の今後の課題に関する一考察

同 若杉圭一郎

22 コミュニケーションのある熱水力ロードマップによる展望

熱流動部会 中村秀夫

Made in Japan の熱水力

～偉大な飛躍を目指して～

同 三輪修一郎

28 未来の若者につなぐ放射線計測研究

放射線工学部会 高橋浩之

放射線挙動・遮へい分野への期待

同 萩原雅之

32 改めて考える“人間中心の設計”

ヒューマン・マシン・システム研究部会 佐相邦英

運転操作でのロボットとの協調

同 五福明夫

36 「加速器・ビーム科学」と「原子力」

加速器・ビーム科学部会 林崎規託

加速器物理学の研究から始める原子力学への教育展開

同 坂本文人

40 日本原子力学会における社会・環境部会の意義

社会・環境部会 土田昭司

“社会系”の悲哀を超えて

同 菅原慎悦

45 国民世論調査から見える原子力平和利用の課題

保健物理・環境科学部会 占部逸正

若手有志による放射線防護基準の検証：福島事故後の緊急時作業員線量限度を巡って

同 荻野晴之

51 共通基盤的なデータの必要性

核データ部会 深堀智生

核データ測定 -これまでとこれから

同 片淵竜也

55 異床同夢

材料部会 阿部弘亨

先進材料の可能性を押し上げる加工技術

同 能登裕之

- 59 日本の原子力発電所の安全確保
原子発電部会 決得恭弘
原子力の安全性向上のための技術開発
同 後藤圭太
- 63 日本の再処理の歴史を振り返る
再処理・リサイクル部会 大塔容弘
これからの日本の再処理のあり方
同 秋山大輔
- 68 沸騰現象シミュレーションの来し方行く末
計算科学技術部会 切刀資彰
総合工学の視点からの原子力工学への
貢献 同 笠原直人
- 72 ロードマップのローリングを通じた水化学の
これから 水化学部会 河村浩孝
水化学基礎研究のこれから 同 室屋裕佐
- 76 原子力安全部会の 10 年間の活動を
振り返る 原子力安全部会 阿部清治
原子力発電の安全性向上の取り組み
同 谷川純也, 津村真吾
原子力安全の中の廃棄物処分安全
同 前田敏克
安全研究と意思決定の健全な関係
同 村上健太
- 82 原子力学会設立 60 周年によせて
一積み残し課題への対応一
新型炉部会 柳澤 務
新型炉分野の将来に向けて 同 市川健太
- 87 リスク部会の設立とその意義について
リスク部会 牟田 仁
リスクの理解, 共有のための部会活動に
ついて 同 河合勝則
- 91 今後の世界の原子力開発動向について
海外情報連絡会 橋 幸男

- 93 学生連絡会の活動を通して学んだこと
学生連絡会 村本武司
- 95 シニアネットワーク (SNW) 連絡会の歩みと
新たな展開に向けて
シニアネットワーク連絡会 (SNW)
石井正則, 早野睦彦
- 97 3Sの協働プラットフォームとしての
原子力学会への期待
核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会
宇根崎博信
- 99 倫理委員会を持たない倫理的な学会を
目指して 倫理委員会 大場恭子
- 101 こたえはダイバーシティと共にある
ダイバーシティ推進委員会 岡田往子
- 103 スコープを拡大し, 読みやすさを追求してきた
編集委員会(学会誌) 佐田 務

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会

- 105 福島第一原子力発電所廃炉検討委員会
の取り組み 宮野 廣

福島特別プロジェクト

- 110 福島特別プロジェクトの活動
佐藤修彰, 三倉通孝, 布目礼子

福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会

- 112 福島復興・廃炉推進に貢献する
学協会連絡会の取り組み
一被ばくとリスクコミュニケーション,
トリチウム水, 燃料デブリ取り出し一
宮原 要, 中山真一

24 From Editors

116 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 2019・
2020 年度代議員決定, 第 51 回 (2018 年度)
日本原子力学会賞受賞一覧, 各部会部会賞一覧,
2018 年度 JNST 賞受賞一覧, 新規フェロー一覧,
2018 年度フェロー賞受賞者一覧, 2019 年度シ
ルバー・永年会員の表彰, 英文論文誌
(Vol.56, No.4) 目次, 主要会務, 編集後記, 編
集関係者一覧

2019

会長あいさつ

創立 60 周年を迎え、未来を切り開こう！



第 40 代会長 駒野 康男

MHI NS エンジニアリング株式会社

日本原子力学会は、今年の 2 月 14 日に、創立 60 周年を迎えました。

この間、学会設立の趣旨に沿って、原子力の平和利用に関する学術および技術の進歩を図り、我が国の原子力研究開発の発展に寄与するとともに、会員相互の啓発に努めてきました。現在は 19 部会、5 連絡会、8 支部、13 常置委員会、福島・廃炉関係 3 組織、原子力学会員約 6,700 名、賛助会員約 210 社を擁しています。

10 年前の 50 周年当時は、地球温暖化排出抑制等より原子力発電推進の後押しがあり、原子力カルネッサンスと呼ばれる時代で、新設の計画／建設も進められ、将来国内の原子力の発電比率の増加を目指すという状況にありました。しかしながら、この 10 年の間に、2011 年 3 月に東電福島第一原子力発電所の事故が起こり、わが国の原子力安全に対する信頼は失墜し、原子力をとりまく環境は厳しいものへと大きく変化しました。また、この事故は、原子力に関わる「学」を担う当学会のあり方を、改めて問う機会ともなりました。

一方、地球温暖化による影響とも考えられるような昨今の長期的な猛暑や豪雨等による自然災害の増加、昨年 9 月 6 日の北海道胆振東部地震による北海道全域停電の経験による電力の安定化の重要性、電力料金の高騰化の継続、世界情勢が不確実性を増す中での国家のエネルギーセキュリティ強化の重要性、そして技術の国産自立化を考えますと、やはり、原子力はこれらの面で大きな役割を果たす能力をもつものと考えます。

この特集号では、各分野ごとに、これまでを振り返り今後の展望をのべることとなりますが、60 周年を機に、次の 10 年は、原子力の信頼回復と新たな未来を切り開く、原子力再興の時期になればと思います。そのためには、本会としては、以下のような役割を担っていくことが重要と考えます。

1) 福島復興への寄与および原子力の信頼回復への貢献

福島復興への寄与とともに、事故炉廃炉が安全かつ円滑に進むように技術的・専門的な貢献を行うことが当学会として重要な責務であります。福島特別プロジェクトや福島第一原子力発電所廃炉検討委員会を通じその活動を行うとともに、福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会(36 学協会参加)を通じ、本件における的確な情報発信や提言、技術協力等を引き続き行っていく必要があります。

さらに、信頼回復のために、継続的な安全性向上において学術的に寄与することとともに、国民・地域社会から信頼される技術情報の発信を行っていく必要があります。また、安全性向上の定量化や社会と共有できる指標を確立することで、安心をもってもらえるような活動を支援することも大切です。是非とも、社会からの信頼を得て、東日本大震災の際の女川発電所のように、大きな自然災害が発生した場合、原子力発電所が一番安全な場所であると住民が安心感をもつ施設となればと考えます。

2) 原子力や放射線の学術・技術進展による環境保全や社会発展への寄与

本会は、公衆の安全をすべてに優先させ、原子力および放射線の平和利用に関する学術および技術の進歩を図り、その成果の活用と普及を進め、もって環境の保全と社会の発展に寄与することを目的として活動することとします。

原子力発電の比率を将来にわたり適切な規模に維持するために、安全を最優先に考えながら、再稼働や寿命延長への技術支援、次世代炉の具体化に向けた検討や提言の実施、将来炉の研究開発、核融合技術等の進展に寄与していきます。また、廃止措置が進展するなか廃棄物低減や廃棄物の安全な処理・処分も含めたサイクル全般への寄与も行っています。

太陽光や風力等の変動型の再生可能エネルギーとの共存や地球環境問題の視点からの提言、さらに、教育や放射線利用のインフラとしての研究炉やRI／核燃施設の在り方への提言も行っています。

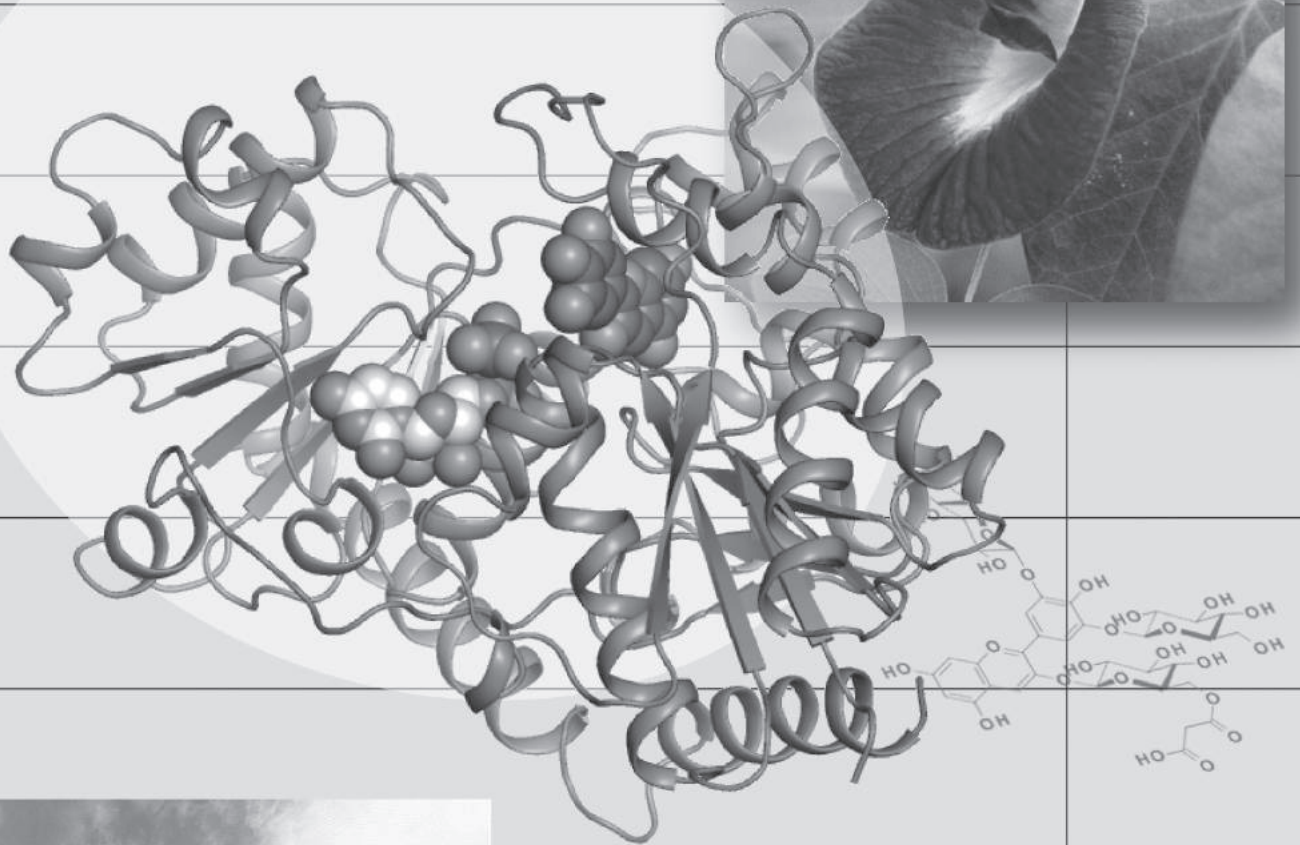
また、放射線利用としては、半導体加工／滅菌／検査等の工業的利用、医療・医学利用、農業利用(日本の経済規模約4兆円)と有効活用されていますが、社会に役立つ放射線の更なる有効活用に対する学術および技術の進歩を図るとともに、放射線への理解活動の推進(オープンスクールや教科書チェック等)も行っていく必要があります。

3) 人材育成/研鑽の場の提供

広く国内外の知見・経験の情報の共有化を図り、専門家集団として学術や技術の向上を主導することにより、社会におけるさまざまな場での議論の際にベースとなる知見や、あるいは産業界への実装をめざした知見を提供することとします。また、学会内では常に自己研鑽を図り、日本の将来を託す次世代の若人の教育・育成の場の提供および支援を、他機関とも協力の上、実施したいと思います。所属にとらわれないオールジャパンの組織として、原子力再興に向けた努力をすべきであり、その面で学会活動を通じたネットワーク構築やそれによる俯瞰的な統合知の追求と、それをふまえた技術の進化を行う場としても、本会は大きな役割を担うものと考えます。

(2019年1月11日記)

これまでをふりかえり，今後を展望するⅡ 創立60年を迎え，学会は何をなすべきか



日本原子力学会は今春に，創立60年を迎えます。これを機に本誌では原子力やそれをめぐる「学」のこれまでとこれからを総括し，これからの原子力のあるべき姿，それに向けた取組などについての指針を示すことをめざす特集を，前号に引き続いて企画します。（上の写真は原子力機構（当時）と農研機構が，植物の花や果実の発色を担うアントシアニン色素をつくる酵素「Ct3GT-A」の立体構造を明らかにしたもの＝量子科学技術研究開発機構提供。下の写真は東京電力ホールディングス株式会社2018年10月発行の「はいろみち」より）



福島第一原発事故と日本物理学会の研究者の活動

日本物理学会 伊藤 好孝

I. はじめに

日本物理学会は、現在約 17,000 人の会員を擁し、広く国内外の物理学の研究者、教育者、技術者、および大学院生による研究発表、知識交換、会員相互・関連団体との連携協力を行なっている。またこれまでに、13 名の会員がノーベル賞(物理学 11, 化学 2)を受賞している。日本物理学会では、理事会の活動として、「福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会」への参画や、後述する「放射線測定データアーカイブズ」活動、また年 2 回の物理学会の中で理事会あるいは会員自身の企画による様々なシンポジウム・講演が行われてきた。これらの活動については、4 年前の本誌の特集「いま問われる「知の統合」」において兵頭俊夫氏(第 70 期物理学会会長)による報告「東日本大震災・原子炉事故への日本物理学会の取り組み」¹⁾、2 年前の本誌の特集「福島原発事故に対する各学会の取組み」における藤井保彦氏(第 71・72 期会長)による報告「日本物理学会の取組み」²⁾に詳述があるのでそちらも参照されたい。また日本物理学会ホームページ下に本学会の活動を紹介するポータルサイト³⁾を 2016 年 11 月にオープンしているので、あわせてご覧頂きたい。本稿では、それ以降の活動を中心に、福島第一原発事故に関わる物理学会および本学会会員の活動について振り返りたい。なお、筆者は物理学会現理事ではなく、本稿は物理学会理事会とは無関係な筆者個人の原稿であることを断っておく。

II. 本学会主催の講演・シンポジウム

本学会では事故直後から公開講演会やシンポジウムを開催し、会員同士の議論や情報の展開、一般の啓蒙などに努めてきた。事故直後の 2011 年 6 月 10 日にはシンポジウム「物理学者から見た原子力利用とエネルギー問題」を開催、毎年一般向けに行なっている公開講座の枠では、「放射線を知る～基礎から最先端まで～」(2012 年 11 月 3 日)を開催して啓蒙活動を行った。毎年 2 回行われている年次大会や秋季大会の中でも「物理と社会シンポジウム」を中心に理事会や有志による企画シンポジウム「福島原発事故から 1 年：これまでとこれから」や「3 年後の福島～今どうなっているのか～」などが行われている。

III. 「福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会」活動

本連絡会は、「東京電力福島第一原子力発電所事故に関連する活動について、学協会が相互に情報交換を行い連携協力することにより、福島復興と廃炉推進に貢献する活動の一層の効果的・効率的な実施・推進を図ることを目的として、日本原子力学会の呼び掛けにより 32 学協会が賛同して 2016 年 5 月 20 日に設立され」た(連絡会 HP より引用)⁴⁾。日本物理学会では、2015 年 12 月 21 日の準備会から参画し、2017 年以降も全体会やワークショップへ会員 2 名が参加して、情報交換や物理学者の立場からの意見を発信してきた。物理学者コミュニティは、廃炉工程に直接関わるような研究や技術を持ち合わせていないが、原子核物理、放射線計測など源流にあたる分野であり、現在でも中心的な研究課題のひとつであることから、放射線計測技術やシミュレーションなど基礎的な課題での連携や人材育成の点で貢献ができるのではないかと、との議論や、原子力工学分野とは独立の専門家集団として基礎科学に近い立場から社会へ情報を発信する役割を持っているのではないかと、との意見交換を行なった。本連絡会は、全く異なるコミュニティが福島原発事故について学術が果たせる役割の交流の場として、今後長期にわたる廃炉作業の中で重要となってゆくはずである。

IV. 「放射線測定データアーカイブズ」活動

東京電力福島第一原子力発電所事故直後から、様々な立場の人々によって種々の放射線測定が行われた。特に事故当初の測定データは、炉内事象や初期被ばくの推定に重要な手がかりとなっている。以降、現在に至るまで、様々な分野の研究者たちがそれぞれの専門性を生かした測定を現地で行い、事故による放射性物質の環境への放出と動態を明らかにしてきた。これらの貴重な測定データは研究者は元よりあらゆる人々に共有され、後世に残されるべきである。日本物理学会は日本アーカイブズ学会と合同で、放射線測定データのアーカイブを作成する活動に主導的役割を果たしてきた(第 69 期：斯波弘行会長、伊藤好孝理事(当時))。2013 年 11 月 1 日には、日本物理学会会長と日本アーカイブズ学会両学会長両名

による共同声明「福島第一原発事故に関わる放射線測定データの保全と後世へのアーカイブ化を」⁵⁾を発表し、測定データの確保と共有をいち早く訴えている。この活動は、2013年以降日本学術会議(第22期)総合工学委員会原子力事故対応分科会の「原発事故による環境汚染調査に関する検討小委員会」下の「初期被ばく関連データ発掘・収集ワーキンググループ」へと合同し、「東京電力福島第一原子力発電所事故に関する放射線・放射能測定データアーカイブワーキンググループ」(委員長:伊藤好孝(名大), 幹事:高橋知之(京大))の結成につながり、放射線・放射能測定データに関するメタデータ情報の収集とそのメタデータベース「RADARC311」の構築を進めてきた。2017年春には、測定日時や測定地点などのメタデータ情報から測定データの内容や所在の情報を検索できる検索システムを構築し、窓口サイト⁶⁾から利用可能な準備を行なっている。2019年現在、登録されているメタデータレコード数は、民間の測定データを含むインターネット上公開データ260件(2011年測定分のみ)、2013年に学協会経由で研究者対象に行なったアンケート調査結果39件、報道向け資料として東京電力のホームページに公開されていた福島第一原発サイトでの測定データ、および新学術領域「福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究」の支援を受けた研究成果の一部122件である。今後このメタデータ検索システムの一般公開を目指した手続きを進めて行くことになるが、1)研究者と一般個人測定データの混在する中、データの質の保証をどうするか、2)個人情報や機びんな情報の保有・公開の問題、3)データ本体の収集・譲渡に関わる著作権の問題、等を解決してゆく必要がある、人文社会学専門家の協力も重要となるだろう。

V. 物理学者個人の活動

ここまで紹介した物理学会理事を中心とした活動だけでなく、物理学者個人の活動は事故直後より際立っている。原子核物理学者を中心とした最初期の甲状腺被ばくスクリーニング活動への参画や、その後の土壌2,200箇所の系統的調査などへの貢献など事故直後の活動、また安価に手に入る放射線測定器が普及して、市民自身による放射線測定が浸透し始めた状況のもと、放射線やその測定、さらにそのデータの理解に必須となる確率・統計の基礎知識など、書籍やSNSを通じた情報発信に加え、福島現地でのワークショップなどを通じて、様々な啓蒙活動に貢献している。一方、普段の基礎研究の直接的な応用例としては、天文研究や素粒子実験で培われた大規模測定データに対する統計的な解析での協力や、様々な放射線測定技術の開発があげられる。後者の例として、ガンマ線天文衛星のために開発されたガンマ線コンプトンカメラを転用したガンマ線可視化技術⁷⁾、原子核乾

板などによる宇宙線ミュオン透視を用いた炉心燃料の透視⁸⁾がある。これ以外にも様々な開発が研究者個人ベースで行われている。これらの貢献は基礎科学からの成果として特筆すべきであろう。

VI. さいごに

最後に、筆者の個人的な考えであるが、物理学者が原子力開発や原子力政策にもっと主体的に関わり、物理学者のもつ独立な立場や、自主や自由を第一に考える風土からコミットし続けることの重要性について述べたい。

福島原発事故当時、プラントの状況や放射性物質放出の状況について正確な情報を持ち、大統領にブリーフィングを行なった米国エネルギー省長官は、ノーベル物理学賞受賞者スティーブン・チューであった。一方、日本での原子力発電の導入の議論が始まった昭和30年代当時、国の原子力政策を諮問する原子力委員会初代委員として、ノーベル物理学賞を受賞して間もない湯川秀樹が就任した。湯川は日本学術会議が掲げた原子力三原則「自主・民主・公開」に基づいて、国産原子力技術の熟成を十分に待ってから導入すべきとしたが、海外の既成プラントを購入して早急に導入を図る考えと衝突し、健康を害して1年余りで辞任することとなった⁹⁾。その後、物理学者のコミュニティは、この問題と距離をおく関係になっていったようである。それから50余年が過ぎ、原発事故が不幸にして起こってしまった後のこの時代において、物理学者が自身の持つ使命と能力をふたたび認識して、できることに取り組んでいくことには意味があるだろう。少なくともその努力については意見の相違を超えてencourageして行くべきだろう。

— 参考文献 —

- 1) 兵頭俊夫, ATOMOS, Vol.57, No.3(2015)158.
- 2) 藤井保彦, ATOMOS, Vol.59, No.4(2017)38.
- 3) http://www.jps.or.jp/public/fnpp_act/index.php
- 4) <http://www.anfurd.jp/>
- 5) https://www.jps.or.jp/public/fnpp_act/statement.php
- 6) <http://www.radarc.311.jp>
- 7) <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20121115/>
- 8) 森島邦博, 日本写真学会誌, 2016, 79巻, 1号, P42-47.
- 9) https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~yhal.oj/index_files/Genshiryokulin.pdf

著者紹介



伊藤好孝(いとう・よしたか)

日本物理学会(第68・69期理事), 京都大学理学研究科卒。東京大学宇宙線研究所, 名古屋大学太陽地球環境研究所を経て2015年から同宇宙地球環境研究所教授。専門分野は宇宙線, ニュートリノ・暗黒物質。

これまでをふりかえり、今後を展望する(炉物理部会)

炉物理の使命～師匠と弟子の対話～

Mission of Reactor Physics ; a Dialog between a Sensei and a Disciple

千葉 豪, 山本 章夫
Go Chiba, Akio Yamamoto

KEYWORDS: reactor physics

序

原子力工学を志すことを決め、また、原子力工学の基本中の基本である原子炉物理分野の研究室を希望することとしたのが今を遡ること20年。学生の頃にはフランス・スーパーフェニックスの廃炉決定やJCO事故などがあり、社会人となって実務に携わるようになってからは、原子力ルネッサンスなどという時期もあったが、東日本大震災での福島第一原子力発電所の事故から始まる商業炉の稼働停止、もんじゅの廃炉決定という流れの中で、私は、「原子力工学という分野に身を捧げることが人類の幸福に繋がるのだろうか」「そもそも原子力工学という分野は将来的には人類に受け入れられないのではないだろうか」といった迷いの中にあった。

そんなとき、私は雑踏の中で久しぶりに「師匠」に出会った。師匠は「原子炉物理の分野においてその人を知らない人はモグリ」と言われる世界的に活躍する人物であり、炉物理の面白さ、学術体系としての深さを、我々、一般炉物理民に身をもって示してくれる、皆の「師匠」であった。

「師匠、ご無沙汰しております。先日発表された予測子-修正子法に基づく燃焼計算に対する一般化摂動理論に関する論文はよく理解できていませんが、いつかしっかり読み込んで勉強しておきたいと思っています。」

「やあやあ、元気だったかね。私の論文を読んでくれて有難う。『いつかしっかり読みたいと思う』と言いながら、結局読み込まない、というパターンはよくあるけれども、君はしっかりやってくれるようで嬉しいよ。」

「…。」

うまい切り返しが浮かばず、気まずい沈黙が流れそうになったとき、師匠がとりあえず話を続けてくれた。

「まあ、そういう皮肉は置いておこう。ところで最近の調子はどうかね。」

こういうときは決まり文句ということで

「まあまあ、元気にやっています。」

と返すわけだが、師匠は私の表情に潜む陰に気づいたようであった。

「君が悩んでいるであろうことは何となく分かるよ。ちょうどお昼の時間だから、その辺でご飯でも食べようか。」

ということで、近くの定食屋での昼食ということになったのであった。

「炉物理」から「原子炉の物理」へ

私が原子炉物理の研究室を志望したのは、炉物理は原子力工学の基本中の基本、つまりは「中心」であり、ある意味、花形と感じた、ということもあった。ところが実際には、「完成してやることがない」「絶滅危惧種」「大事だけどそんなに人はいらぬよ」という見方をされることが多々あった。「大事だとは言ってくれているのだけれど、でも何か重要とは思われてない気がするんだよね」と感じてしまう状況について、メニュー表を眺める師匠に聞いてみることにした。

「炉物理って、他の分野の人からは『もうやることのないんじゃないの』などと言われることがあるんですけど、どうなんでしょうか。」

「30年以上前、私が学生のころからそういう話はあったね。では、そのころと現在の状況を比べてみるとどうだろうか。一例として、炉心設計の分野を考えてみよう。当時は、三次元の炉心を径方向二次元、軸方向一次元でモデル化する合成法、燃料集合体を平均化し、一つのメッシュで扱う粗メッシュ計算が主流だった。現在では、燃料棒や制御棒といった燃料集合体内部の構造をそのまま取り扱い、なおかつ三次元で計算が可能になりつつある。よく、『計算機が速くなっただけでしょ』と言われるけど、それだけではない。高効率の収束加速アルゴリズムなどの新手法が開発されたことが大きな要因。結局、『やることのないように見えていた』だけで、今振り返ると課題は山積していたといえるね。ほかの分野でも同じ間いがなされ続けているのではないだろうか。例えば安全の分野でも、『動力炉は動いているでしょ。基礎的な安全の研究をやる意義はあるの?』と問われ続けた結果、安全研究が縮小し、それが福島第一事故の遠因になった側面もあるのではないかな。むしろ『やることか

原子核分裂反応を主とした中性子と原子核の相互作用を中核とする学術分野において、原子力システムで発生する様々な物理現象を深く理解し、安全に制御することにより、人類社会の健全かつ持続的な発展に寄与する。
[1] 人類社会に対する核燃料物質の資源価値を最大化し、客観的な指標とともに人類社会にとって最善な原子力利用のあり方を提示する。
[2] 安全性の向上を最優先とすることを前提に、原子力利用のライフサイクルを通じたエネルギー安全保障性・環境調和性・経済性を向上させる利用方法を追求する。
[3] 原子力システムで生じるミクロレベルからマクロレベルに至る様々な物理現象を対象とし、その理解の精度を高める。
[4] 原子炉が原子炉たる理由を説明できる唯一の学術分野であることを念頭に、学術及び技術分野としての炉物理を発展させながら後世に引き継いでいく。
[5] 人類社会にとって有益な原子核反応の活用方法を追及する。

図1 炉物理の Vision と Mission

ないのでは』という問いすらなされなくなった時がその分野の終焉なのかも。』

「そうなんですかね。とはいっても、大枠として、どのような方向性があるのでしょうか？ なかなかイメージがわかりません。」

「漫画バガボンドの中で、行く道を見失っていた剣士に、柳生新陰流師範の柳生石舟斎が『迷われたなら、まず師のところに戻らなければいかか』と諭す場面がある。これに倣って、原理原則に一度立ち戻るのもよいかもかもしれない。2017年に炉物理部会が研究開発ロードマップについて議論して、炉物理の Vision と Mission をまとめたのは知っているかい？」

「ええ、知っています。」

「Visionの中核的なメッセージは、『原子力システムで発生する様々な物理現象を深く理解し、安全に制御することで人類社会に貢献する』だ。炉物理、これを英語で言うと Reactor Physics だが、どうも中性子の輸送方程式を解き、実効増倍率を計算するという小難しいイメージが付きまとう。もちろん、これは炉物理の中核的な分野の一つだけど、それだけではまさに『やることがないんでは』という話になるだろう。そうではなく、我々が考えるべきは、『社会に貢献する、そのために様々な物理を深く理解し、安全に制御する』ことだ。Physics of Reactors, つまり原子炉の物理が我々の対象。実際、炉物理分野における課題の多くは核データ、熱水力、核燃料、水化学、原子力安全、リスクなど様々な学術分野との境界領域にあるのではないかな。アニメの攻殻機動隊でヒロインの草薙素子はこう言っている。『戦闘単位として、どんなに優秀でも同じ規格品で構成されたシステムは、どこかに致命的な欠陥を持つことになるわ。組織も人間も同じ。特殊化の果てにあるのは、ゆるやかな死…それだけよ。』これまでの炉物理研究が『特殊化の果てのゆるやかな死』、つまり炉物理研究のための特化された研究という隘路に入り込んでいなかったかどうか、真摯に反省し、また将来そうならないように、よく注意を払わないといけないね。」

原子炉物理の研究者・技術者としての思い

運ばれてきた日替わり定食を食べ始めたところで、私は師匠に話しかけた。

「さきほどのロードマップの話も含めて、炉物理のコミュニティが一体となり、他分野の専門家とも協力しつつ将来を切り拓いていこう、ということは分かりました。でも、そもそも大事なのはコミュニティを構成する個人個人の意識や努力ではないでしょうか。」

師匠はこの私の発言に対して一瞬手を止めたように見えたが、そのまま主菜を切り分け、口に運び、美味しくように食べ始めた。私は言葉を続けた。

「みんなで何かしようとか、こういう仕組みを作ろうとか、そもそもそれに加わる人たちがダメだったら、全然ダメですよ？」

これに対して師匠は一言。

「君はどうなの？」

そうなのである。いろいろなことで悩んだり、何かのせいにしたりしながら、最近の私は数年前から殆ど「動いて」いないのである。淡々と箸を進める師匠をぼんやりと眺めながら、私は少し頭の中を整理することとした。

私は原子力工学というよりも炉物理が好きでずっとやってきたわけだが、何が好きかという、炉物理という学術体系の中で、新しく何が理解できた、とか、「このことって、あのことと、こんな風に繋がるのか」と実感できたとか、そういうところであって、その積み重ねの中で、自分の成果が炉物理という分野を僅かでも広げる、進めることができれば幸せであった。そんな姿勢はこれからも変わらないだろうし、自分が知らない炉物理を学びながら炉物理という学術体系を整理し、先人たちの遺産(とあわよくば自分たちの世代が生みだした成果)を後世に引き継ぐことが自分の役割だと思っている。

とは言いながらも、飽きっぽい性格なので、いろいろ新しいことにも興味があるのも事実である。炉物理の知識や考え方を基にして、原子力安全に寄与し得る機構・機器や、新たな原子力システムを考案したり、さらには原子核反応の人類社会への活用を図るテーマにも取り組んだりしながら、炉物理の面白さを、身を持って示していければ、と思った。

原子炉物理がこれからも果たすべき役割

日替わり定食を早々に平らげた師匠は私にこう語りかけた。

「食が進まないようだね。何かもっと話したいことがあるのではないかね？」

自らの思索がちょうどよくまとまってきたところで、私は本題を切り出した。

「師匠、私は福島第一原発の事故のあと、自分がやって

きたこと、やろうとしていることが、本当に日本の人々、世界の人々に貢献するのか、正直なところ確信が持てません。]

師匠は、その問いの重さをしっかり確かめるようにしばらく沈黙し、次のように語り出した。

「あれだけ社会に対して深刻な影響を与えた事故を目の当たりにして、逆に、そういう疑問、戸惑い、問いを持たないとしたらそれこそ問題じゃないかな。私も繰り返し、自問自答しているよ。この重い問いへの答えは人それぞれ。これまでやってきたことに疑問を抱き、分野を変える人もいるだろうし、そうでなく、何らかの意義を見出して引き続きこの分野で頑張ろうと思っている人もいだろう。それぞれの選択は、その人にとっては正解で、どちらが正しいとか正しくないとかという議論にはなじまないだろうね。」

「いったん、原理原則に戻ってみよう。今、我々が使っているエネルギー源のルーツをたどっていくと、結局のところ原子核エネルギーに行き着く。ほとんどの再生可能エネルギーも化石燃料も、結局は太陽の核融合エネルギーが源だしね。1000年単位で今の文明社会を維持していこうとすると、結局何らかの形で原子核エネルギーを使わざるを得ないということになる。つまり、太陽の核融合エネルギーを源とする再生可能エネルギーか、それを地上で再現する核融合か、あるいは核分裂か、ということになる。再生可能エネルギーは、貴重な国産エネルギーだから最大限に活用するという方向で大多数の認識は一致しているだろうね。我々の使うエネルギーを再生可能エネルギーで全て賄えれば一番ハッピーで、これは目指すべき目標だけど、まだ見通しは立っていないと理解している。そうすると、核融合か、核分裂の利用が選択肢として残ることとなる。核融合はまだ時間を要するだろうから、安全性を最大限に追求した上で核分裂を利用するというのは選択肢の一つになるのではないかな。あと、こういう論理が社会から受け入れられるかどうかにも留意が必要だね。」

「炉物理は、核分裂を制御するという原子力安全の一丁目一番地の学術分野だ。もしも世界に炉物理がなかったら、核分裂エネルギーを利用することはできない。炉物理は原子力システムの利用とともに生まれ、仮に原子力システムがこの世からなくなるとしても、核分裂を発生させる核物質がなくなるわけではないので、最後まで残る分野の一つだろう。こういう意味で、炉物理分野の研究者・技術者は大きな使命を背負っているともできるね。」

原子力エネルギーの活用が選択されるのであれば、それに携わる人は必要である。原子力エネルギーの活用後の後始末も活用することと同じくらい大切である。そし

て、福島第一原子力発電所事故の完全な終息、すなわち福島の相双地方からあの事故の影響を可能な限り除去することは第一の重要課題である。また、そういった作業を誠実に完遂することで、福島・日本の復興に貢献することができる。そういう状況で、炉物理分野の研究者・技術者の使命は、決して小さいものではないと思った。

付

定食屋を出て、師匠の後ろ姿を見送りながら、私は考えた。

原子力工学の分野は、福島第一原子力発電所の廃止措置をはじめとして、今やらなければならないことが山積している。そのような状況で、自らのことは顧みず身を粉にしている人は本当に沢山いて、そのような人たちは私のように自らの悩みを表に出すような余裕はないだろう。また、私の悩みなどは、それこそ福島第一原子力発電所の事故の影響を受けた人たちのことを考えると、やはり表に出すべきものではないものかもしれない。ただ、私が弱い人間であることは避けられない事実であり、それはそれとして認めてもよいのだ、ということに師匠は伝えてくれたのだと思った。

揚げ足をとられることもあるだろう、偽善と言われることもあるだろう。そしてそのような指摘は間違っていないのだろう。

自分が信じられるものを信じられる限り追い求めていくこと、何よりもそれは自分のためであること、それらは否定しない。ただそれが、日本、世界の何かへの貢献に繋がっていくことも信じていたい。そんなことを思いながら、私は雑踏に消えゆく師匠の広い背中を見つめていたのであった。

— 参考文献 —

- 1)「原子炉物理分野の研究開発ロードマップ 2017年版 (RM2017)」日本原子力学会炉物理部会「炉物理ロードマップ調査・検討」ワーキンググループ、2017年10月。

著者紹介



千葉 豪 (ちば・ごう)

北海道大学 工学研究院
(専門分野/関心分野)原子炉物理, 核データ, 放射線輸送計算



山本章夫 (やまもと・あきお)

名古屋大学 工学研究科
(専門分野/関心分野)原子炉物理, 原子力安全

これまでをふりかえり、 今後を展望する(核融合工学部会)

核融合工学のこれまでと、これから

Past and Future of Nuclear Fusion Engineering

笠田 竜太
Ryuta Kasada

KEYWORDS: fusion nuclear engineering, fusion reactor

会誌から見た核融合工学のこれまでの60年

日本原子力学会の60年の歴史と、核融合研究開発の歴史はその期間においてほぼ一致していると言える。日本原子力学会誌(以降、学会誌)の10周年記念誌の特集では核融合に関する記述はないが、1979年の20周年記念誌の「わが国原子力研究の20年-その概観と展望-」において、わが国の核融合研究の黎明期(1959頃～)におけるプラズマ物理研究から、20周年当時における核融合炉炉心工学、核融合炉工学への展開の始まりについてまとめられている。

その後の核融合工学の展開について、過去の学会誌における核融合に関連して書かれた記事や論文の数について、私見により分類した領域ごとの推移として、図1に示す。学会誌の編集方針や頁制限に変化があったと思われるため詳細は論じないが、1980年代すなわち当学会の30周年頃に掲載数のピークが見られることは、筆者個人にとって重要な事実である。このような活発な研究開発活動から科学オタクの小中学生にも漏れ出てきた核融合の煌めきが、筆者を核融合研究の世界に誘ったのである。実際に1989年の30周年記念特集において、核融合は、炉心プラズマと核融合炉工学の両分野において研究開発が大きく展開していったことが記されている。核融合炉工学については、プラズマ加熱工学、超伝導マグネット、真空および粒子制御系、第一壁工学のように、大型装置の建設とともに発展した分野に多くが割かれている。一方で、ブランケット工学、材料工学、中性子工学、トリチウム工学、システム設計についても、将来の統合化を見据えた要素技術開発研究に注力されている様子がよくわかる。1980年代に実施された核融合特別研究による大学での組織的な研究が進められた時期とも重なる。

1999年の40周年記念誌では、「原子力研究における最近10年のあゆみ」の中で、1975年以来進められてきた、第2段階核融合研究開発基本計画の目標である臨界プラズマ条件が世界の3大トカマクで相次いで達成されたこと等を受けて、1992年において、エネルギー研究開発の

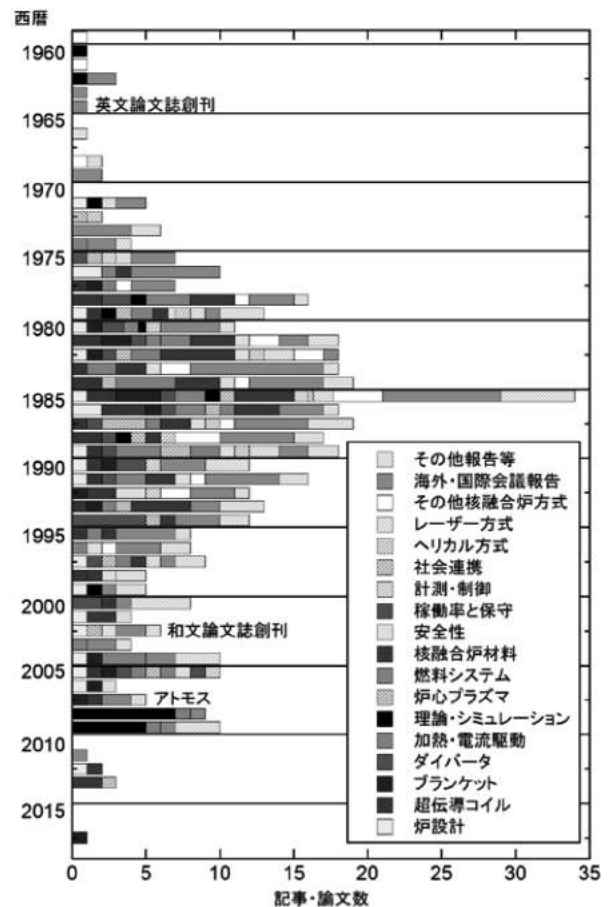


図1 日本原子力学会誌における核融合関連記事・論文数の推移

一環として「第3段階核融合研究開発基本計画」が策定され、核融合研究が新たな段階に入ったことに言及されている。1988年からは国際熱核融合炉(ITER)の設計活動が始まり、概念設計および工学設計活動を経て、1998年に最終設計報告書が作られている。また、この間において核融合科学研究所において、大型ヘリカル装置(LHD)が建設され、運転が開始されている。

2009年の50周年記念誌での最大のトピックスは、2007年にITER機構が発足し、フランスのサン・ポール・レ・デュランスにおいてサイト工事が始まったことである。また、ITERに装着するTBM(テストブラン

ケットモジュール)や、幅広いアプローチ(BA: Broader Approach)活動に関しても言及されている。このように大型プロジェクトが進展する一方で、40周年までには記されていない「人材の確保」について初めて懸念が表明されている。

核融合工学のこれまでの10年

過去の周年記念誌に倣って、この10年の核融合工学について振り返る。2017年にITER機構は、2025年のファーストプラズマに向けて、ITERの建設の50%が完了したと報告した。当初の計画からの遅れはあるものの、国際協力の困難を乗り越えて、2035年頃のDT燃焼実験を目指して建設が鋭意進められているところである。

国内では、BA活動におけるサテライト・トカマク計画とトカマク国内重点化装置計画の合同計画として、量子科学研究開発機構那珂核融合研究所において、2020年の完成を目指してJT-60SAの建設が進んでいる。また、同機構六ヶ所核融合研究所における国際核融合材料照射施設(IFMIF: International Fusion Material Irradiation Facility)の工学実証・工学設計活動(EVEDA: Engineering Validation and Engineering Design Activities)において、IFMIFの工学設計活動ならびに主要機器の設計・製作・試験が行われている。IFMIF/EVEDAのうち、リチウムターゲットループ試験装置については、1,300時間を超える定格流量を実証し、2014年に実験を終えている。原型加速器については、高周波四重極線形加速器(RFQ)による陽子ビーム加速試験を2018年に成功している。これらの成果を踏まえて、先進核融合中性子源照射施設(A-FNS: Advanced Fusion Neutron Source)の建設に向けて、施設の仕様の検討が進められている。

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)については、2017年に重水素実験を開始し、イオン温度10keVを達成した。慣性核融合については、大阪大学において2009年に建設されたLFEXレーザー装置および激光XII号を用いた独自の高速点火、そして磁化高速点火方式に関する研究へと進展している。

核融合に関する最近の欧米での興味深い動きとして、核融合ベンチャー企業が複数立ち上がり、磁場反転配位(FRC: Field-Reversed Configuration)の衝突合体などの特徴的な閉じ込め方式の研究開発が急ピッチで進められていることが挙げられる¹⁾。政府資金のみならず民間資金を活用した研究開発は、今後の巨大科学計画の進め方において、新たな可能性を提供していると言えよう。

ITER以降の発電実証を目指した原型炉計画の立案も、各極において進んでいる。わが国では、BA活動や原型炉設計合同特別チームによる原型炉に向けた設計活動や関連するR&Dが進んでいる。原型炉活動の進め方や、原型炉建設に向けた社会連携活動を含めた「アクションプラン」が示されている²⁾。2018年には第4段階

核融合研究開発基本計画に向けたロードマップが発表されている³⁾。

核融合工学のこれから

既に「核融合炉が拓く30年後の未来社会に向けて」というテーマの論文を日本機械学会誌に寄稿しているのので、「核融合工学のこれから」に関する私見については、そちらを参照して頂きたい⁴⁾。一点新たに指摘しておきたいことは、核融合工学体系の確立に欠かせない大学における核融合研究を取り巻く状況の変化への対応の必要性である。核融合研究開発が巨大科学プロジェクトとして着実に進展している一方で、大学における核融合(だけではない)研究を取り巻く状況は、2007年の国立大学法人化を経て、この10年で厳しい状況に置かれていると言わざるを得ない。このような状況においては、大学における研究者個人に求められる研究成果は、科学コミュニティはもちろんのこと、広く社会に認知されるような高いインパクトのものを高い頻度で導出することが必要であると考えられがちである。大型装置の建設と維持、そしてそれによって得られるデータベースの地道な積み重ねを必要とするような時定数の長い研究スタイルが主である分野において、研究者個人がキャリアパスを切り開いていくことは困難を感じることが多い。核融合を含めた巨大科学に関する研究開発を大学で進めるためには、一大学法人の枠に留まらない価値観について、広く社会と共有するための国民的議論が必要であろう。我が国が目指すSociety5.0における核融合炉の役割は何であるのか、そもそも役割は存在するのか、科学者と政府や産業界のみならず、より広い社会との継続的な対話を踏まえて、多角的かつ重層的な検討を進めることを心がけて、核融合エネルギーの実現を目指す次の10年に向かいたい。

参考文献

- 1) 浅井朋彦ら、「企業による核融合研究の最近の動向」, プラズマ・核融合学会誌 93(2017)18.
- 2) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/shiryu/_icsFiles/afiedfile/2017/12/28/1399735_003.pdf
- 3) http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/_icsFiles/afiedfile/2018/08/24/1408259_1_1.pdf
- 4) 笠田竜太, 「核融合炉が拓く30年後の未来社会に向けて」, 日本機械学会誌 119(2016) 510-513.

著者紹介

笠田竜太 (かさだ・りゅうた)

東北大学金属材料研究所原子力材料工学部門



これまでをふりかえり、今後を展望する(核融合工学部会)

これまでを振り返り、今後を考える

Look back on the past and think about the future

片山 一成

Kazunari Katayama

KEYWORDS: *Nuclear Fusion Engineering*

原子力学会との関わりを振り返って

原子力学会員となって約20年、原子力学会60年の歴史の1/3に携わってきたこととなります。地元愛媛では、私が1歳の時に伊方原発1号機が運転を開始しています。友達と「もうすぐ空から放射能が降ってくるらしいよ」という会話をしながら下校した記憶が朧げながらあるのですが、あれはチェルノブイリ原子力発電所事故の際の会話であったのだろうと、随分しばらく経ってから認識しました。当時、小学4年生だったこととなりますが、原子力や放射線についてほとんど何も理解していなかったように思います。福島第一原子力発電所の事故以降、放射線教育が見直されました。原子力学会員の一人として、国民の多くが原子力や放射線について正しく理解してもらえるように、継続的に努力していかなければならないと思っています。

大学に入り原子力工学を学び、卒業研究で研究室に配属されて以降、核融合炉の開発研究に取り組んでいます。学生時代を振り返ると、毎年3月と9月にやってくる原子力学会春の年会・秋の大会で、指導教員の先生方が恥ずかしい思いをしなくていよいよと発表準備と質問対策の勉強を行っていた側面もあったように思います。ある意味では、半年ごとに必ずやってくる原子力学会に背中を押してもらいながら、なんとか研究を進めていくことができたと言えます。はじめての学会参加は、修士1年の時、私の育った地元、愛媛大学で開催された春の年会でした。博士過程のロシア人留学生と2人で福岡からフェリーに乗り、翌早朝松山に到着し、学会での発表に臨みました。緊張しながら登壇した際に、教室の一番後ろに設けられた2つの椅子にちょこんと座る母と姉が視界に入り、大変驚かされました。発表を見に行けないのかと母からは聞かれていましたが、関係者以外は入室できないと伝えていました。本来は入室できないところ、息子の晴れ舞台を見たいとの親心を察して、事務局の方々がご配慮されたものと思います。私にとっては災難でしたが、離島でみかんを作る母にとっては、貴重な体験だったろうと思います。発表の方はなんとかこな

したものの、会場からの質問にはうまく回答できませんでした。当時東京大学教授であった田中知先生から、軽水素とトリチウムとの同位体交換反応の解析に、Bigeleisen理論を適用したことの妥当性について質問を頂きました。私の人生で最初に受けた、学会での質問で、その場面はいまも鮮明に覚えています。困った私の顔を見て、指導教員の故西川正史先生がすっと挙手されて回答されました。母と姉が見守る中、不甲斐ない自分を恥ずかしく思いながら、指導教員を頼もしく感じました。現在学会で活躍されている先生方にもこのような経験を持つ方が多いのではないかと思います。学会は、研究者を育てる貴重な場であることを、自分自身の経験を通して理解しています。

学会は、他の研究者と自由に意見を交わすことを通じて、研究を進展させるという点と人材を育成するという点で、なくてはならない重要な場です。研究発表後の質疑応答で「あなたの研究は間違っています。」と言われた経験は、私にその研究を継続させる力となりました。研究を行うに当たって、その研究を否定する意見や自分と異なる見解を示してくれる意見は、研究をより良い方向に導いてくれる建設的な助言と同じくらい大切なものかもしれません。正しかろうと間違っていようと、それまでの研究過程を、一度立ち止まって考えるきっかけを与えてくれます。最近では、研究者数が減少傾向にある一方で、研究課題はより細分化されてきており、研究発表後の質疑応答で、有意義な議論が難しくなってきたようにも感じています。発表後に全く質問がないのは寂しいものです。特に学生の発表の際には、人材育成の観点からも何かしらのコメントを出すことを心がけたいと思っています。

大学院生の頃参加した核融合工学部会が主催する核融合夏期セミナーは、とても思い出深いものでした。ソウル大学で行われた際には、建設が始まったばかりのKSTAR建家を見学しました。湯布院で行われた際には、博士過程の学生として、先生方と学生との意見交換セッションの進行を務めました。その夏期セミナーも参加学生数の減少に伴い、プラズマ・核融合学会との共催

を経て、平成 29 年度で一旦終了となり、休止状態となっています。その背景には、核融合研究に取り組む大学教員の減少があるのかもしれませんが、今後、学生数が減少する中では、どの分野でも人材の獲得が課題となります。他分野に負けない努力をしたとしても、一部の魅力的な分野を除いて、研究者数は減少傾向になることは避けられないと思われます。優秀な人材を育てるにしても、少数精鋭を前提に長期的計画を立てて、戦略的に組織的に取り組んでいかなければなりません。他分野での知見あるいは人材を有効に活用することができれば、研究開発をより効率的に遂行できるかもしれません。私自身は、近年、土壌中のトリチウム挙動研究を始めましたが、「保健物理と環境科学」分野や「核燃料サイクルと材料」分野で行われている研究も参考にさせて頂きました。原子力学会は、約 7,000 人の会員を有する大所帯で、原子力に関連する幅広い分野の研究者から構成されています。研究者各人が、学会の場で広くアンテナを張り、課題解決に有効なヒントや人材を異分野から得る努力をすることは必要ですが、原子力学会としても異分野間の人的交流を促す機会を、より積極的に設けても良いのではないかと思います。

核融合工学部会の今後

ITER や JT-60SA の建設が進む中、平成 29 年 12 月に核融合科学技術委員会にて「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」¹⁾がまとめられました。また、アクションプランで示された課題に戦略的に対応するためのロードマップが検討されており、平成 30 年 7 月に「原型炉開発ロードマップについて(一次まとめ)」²⁾が公開されています。研究開発項目は多岐にわたり、全日本体制での継続的な取り組みが求められます。人材育成は不可欠で、大学が研究者の種を産み、研究機関が育て、継続的に研究開発を支えていく仕組みづくりを急がなければなりません。大学と研究機関、関連企業等が連携して取り組むべき課題には、多くの人を結びつけている学会が重要な役割を担うことになります。平成 30 年秋の大会での部会企画セッションでは「核融合理工学分野の教育と人材育成」と題して、核融合科学技術委員会の提言、企業の視点、原子力分野での大学教育の実例についての貴重なご講演が行われ、闊達な議論が展開されました。今後も、核融合研究に関わる旬なテーマを取り上げ、問題意識の共有を図る場、意見を交わし問題解決の糸口を探る場、核融合開発の進展を広く社会に伝える場として、企画セッションを活用していきたいと考えています。

核融合研究は、国の大型プロジェクトとして進められています。学会は、国民が自ら考え判断するための、科学的根拠に基づく情報を発信し続けて行くことに存在意義があるのではないかと考えています。その為の議論の場であり交流の場でなければなりません。その点でこれ

までの活動を振り返ると、核融合工学部会から社会への情報発信は十分ではなかったと考えます。しかしそれは、これまで核融合研究を支えてこられた先輩方の相当のご努力のお陰で、ITER が実現し、いよいよ核融合原型炉が具体的に議論できるところまで研究開発が進展してきたからこそ、社会に向き合うという状況が生まれてきたことを意味しているのだと思います。現状では、一般社会での核融合の認知度、期待感が高まっていません。2020 年に JT-60SA のファーストプラズマが、2025 年には ITER のファーストプラズマが達成される予定です。また同年、原型炉への移行に向けたチェックアンドレビューが行われます。核融合研究開発に大きな進展が期待されるこの先 10 年で、核融合工学部会が取り組むべき重要課題の一つは、核融合研究の強みも弱みも含めた実態を知ってもらうためのこれまで以上の努力だろうと思います。例えば、核融合工学部会の広報活動として、全国の教育機関、企業、自治体、個人的団体などへ出張講義を行うというのはひとつの案かと思えます。部会員は全国にいますから、研究開発機関とも協力して共通の資料を準備できれば、実施は難しいことはありません。実際のところ、各部会員が所属する組織を通じて、このような取り組みはすでに行われています。今後、部会が関連組織と協力してマネジメントを行い、そのもとで組織的に広報活動を展開していくことについても議論していくべきだと考えています。他の部会と協力して実施する場合は、原子炉の仕組み、放射線利用などと合わせて核融合エネルギー開発の講義なども企画できるかと思えます。教育機関への講師派遣の際に、研究者・技術者としてのキャリアパスを明確に示すことができれば、人材育成の観点でも貢献できます。この点については、既に議論が行われていますが、核融合工学部会を含めた核融合コミュニティ全体で連携した努力が必要と考えます。

未来に明るい光を灯せる核融合エネルギーを実現するため、核融合工学部会も明るく開かれた組織であり続けたいと考えています。

参考文献

- 1) 文科省核融合科学技術委員会、「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」、平成 29 年 12 月。
- 2) 文科省核融合科学技術委員会、「原型炉研究開発ロードマップについて(一次まとめ)」、平成 30 年 7 月。

著者紹介



片山一成 (かたやま・かずなり)
九州大学大学院総合理工学研究院エネルギー科学部門
(専門分野/関心分野)エネルギー化学工学、核融合炉におけるトリチウム挙動、環境中トリチウム挙動、水素製造

これまでをふりかえり、今後を展望する(福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会)

福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会の取り組み

一被ばくとリスクコミュニケーション, トリチウム水, 燃料デブリ取り出しー

Challenges of ANFURD for contributing to Fukushima recovery and 1F decommissioning

- Radiation exposure risk communication, tank water, and fuel debris removal -

宮原 要, 中山 真一
Kaname Miyahaya, Shinichi Nakayama

KEYWORDS: Fukushima recovery, 1F, decommissioning, Academic Network, radiation exposure, risk communication, tank water, fuel debris, removal

I. はじめに

日本原子力学会(以下、本会)は、接点のある学協会に対して、相互の情報交換を行い、福島復興と廃炉推進に貢献する活動の一層の効率的・効率的な実施・推進を図ることを提案し、平成 28 年 5 月 20 日、33 の学協会が集い、「福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会」(以下、ANFURD: Academic Network contributing to Fukushima Reconstruction and Reactor Decommissioning)が発足した(現在、36 学協会が参画:表 1)。

福島第一原子力発電所事故(以下、事故)後の取組みとしては、本会はもとより、多くの学協会での活動がそれぞれ展開されてきた。福島復興と廃炉推進に向けて志をもったこれらの学協会が、互いの活動を知り、ニーズを把握し、連携することで、事故後の取組みで得られた知見を整理し、課題にどのように取り組むべきかについて広く社会へ情報発信することで、学協会連絡会への期待に一步でも応えることができると考えられる。

ANFURD では、これまで情報交換会とワークショップを開催した。情報交換会において、互いの活動を報告し合い、ワークショップにおいてニーズを共有し、連携

活動を具体化するための議論を行った。ANFURD の活動状況を表 2 に示す。

これらの活動を踏まえ、福島復興については、社会的に関心のある課題を設定し、科学的知見を整理し情報発信すること、廃炉推進については、廃炉の全体工程を俯瞰して潜在的課題を洗い出すこと、を当面の目標とし、勉強会を開催することにより現状や実状について理解の共有を図ることとした。

勉強会を具体化するにあたり、勉強会で何についてどのような情報共有を図るのかについて、以下の項目についてアンケートをとった。

- ① 福島復興、廃炉推進について勉強会でどの課題の情報共有を図るべきか(勉強会のテーマは何か)。
- ② 勉強会では、誰からの情報提供・現状紹介を期待するか。
- ③ 勉強会を踏まえ、科学的知見や潜在的課題をどのように整理すべきか。
- ④ 勉強会を踏まえ、科学的知見や潜在的課題をどのように周知・公開すべきか。

表 2 ANFURD の活動状況

ANFURDの活動状況	
会議開催状況	活動内容
2015年 12月21日 □ 学協会連絡会準備会	<p>互いの活動を報告し合い、ニーズを共有し、連携活動を具体化</p> <p>↓</p> <p>取り組むべき課題(3項目)の抽出 ①(福島復興)「放射線被ばくと健康・コミュニケーション」 ②(福島復興・廃炉推進)「トリチウム水の取扱い」 ③(廃炉推進)「燃料デブリ取り出しにおける潜在的課題」</p> <p>↓</p> <p>各課題について集中的な議論を通じ、論点を整理し、ANFURDとしての見解やどう取り組むべきかをまとめた</p>
2016年 5月20日 □ 第1回全体会 8月2日 □ 第2回全体会	
2017年 1月26日 □ 情報交換会 4月6日 □ 第3回全体会 9月4日 □ ワークショップ 11月14日 □ 第4回全体会	
2018年 5月9日 □ 勉強会1:「放射線被ばくと健康・リスクコミュニケーション」 5月9日 □ 勉強会2:「トリチウム水の取扱い」 5月15日 □ 勉強会3:燃料デブリ取り出しにおける潜在的課題 7月23日 □ 第5回全体会	

表 1 ANFURD の参画学会¹⁾

エネルギー・資源学会	化学工学会	日本核物質管理学会
環境放射能除染学会	計測自動制御学会	資源・素材学会
地盤工学会	水文・水資源学会	大気環境学会
土木学会	日本アイソトープ協会	日本応用地質学会
日本海洋学会	日本機械学会	日本技術士会
日本気象学会	日本原子力学会(幹事学会)	日本コンクリート工学会
日本混相流学会	日本地震学会	日本地震工学会
日本水産学会	日本電気協会	日本土壌肥料学会
日本農芸化学学会	日本保健物理学会	日本物理学会
日本放射化学学会	日本放射線影響学会	日本保全学会
日本ロボット学会	農業農村工学会	廃棄物資源循環学会
腐食防食学会	プラズマ・核融合学会	レーザー学会

(全 36 学協会)

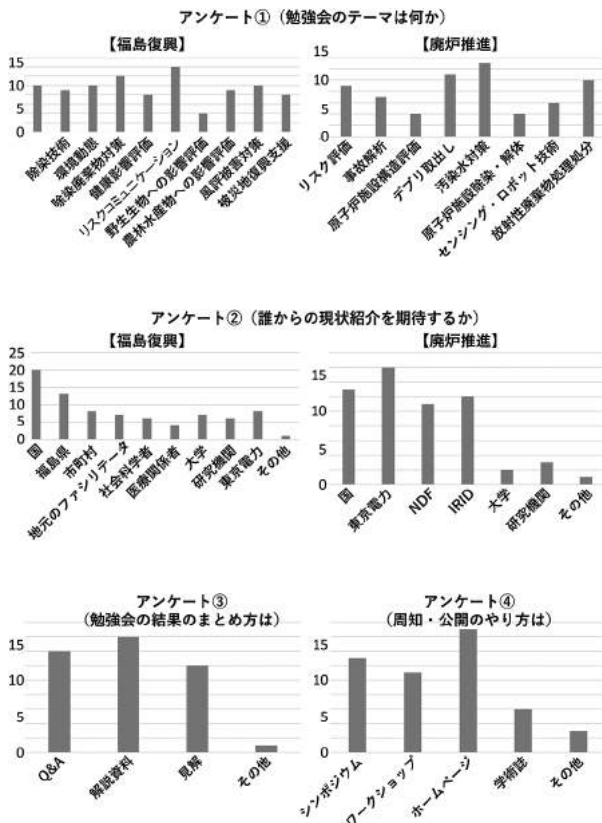


図1 アンケート結果のまとめ

(26学協会から回答；複数の項目に回答可。①【廃炉推進】の「汚染水」は、文中では代表的として「トリチウム水」と記している。)

アンケートの結果(図1¹⁾)から、まず勉強会で取り上げるべき課題として次の3つが挙げられた：「放射線被ばくと健康、リスク・コミュニケーション」(福島復興)、「トリチウム水の取扱い」(福島復興・廃炉推進)、「燃料デブリ取り出しにおける潜在的課題」(廃炉推進)。

これら3つの課題について、それぞれ勉強会を開催した。勉強会の進め方としては、まずそれぞれの課題に関わる現状を紹介し、論点を整理した上で、論点に沿った討論を行い、ANFURDとしての見解やどう取り組むべきかをまとめた。

勉強会の開催結果について、2018年秋の大会理事会セッションの場で報告した。さらに、本会の福島特別プロジェクトと廃炉検討委員会からのANFURDの取り組みへの期待や連携の在り方についてのコメントを踏まえ、セッション参加者との質疑応答・意見交換を行った。本セッションの開催概要については本誌2月号のShort Reportを参照されたい。本稿では、3つの勉強会での論点と意見のまとめについて紹介する。

II. 勉強会での論点と意見のまとめ

1. 放射線被ばくと健康、

リスク・コミュニケーション

論点として「低線量放射線の影響の解釈や一般の方々への伝え方」、「甲状腺検査の結果の解釈や今後のあり

方」、「リスク・コミュニケーションのあり方」について整理した。

「低線量放射線の影響の解釈や一般の方々への伝え方」については、国際放射線防護委員会(ICRP)では、100mSv以下の低線量域においては、放射線被ばくによる発がんの増加を疫学的に検出することは極めて難しいとしつつ、低線量域でも線量に依存して影響(直線的な線量反応)があると仮定して、放射線防護の基準を勧告している。これに関し、100mSv以下での健康影響(特に発がん)について、一般の方々に正確に伝えられているのか、どのように伝えたらよいかという問題提起があった。100mSv以下でのリスクはあったとしても小さいため、それを検出するためには、大人数の集団の解析が必要となり、現実の調査、研究の実施が困難である。また、遺伝的体質や生活習慣によってがんのかかりやすさがかなり異なるため、仮に放射線によってわずかに増加したとしてもこれらの変動幅に埋もれる可能性が考えられる。こうした疫学の限界がある以上、現時点において100mSv以下で統計学的に増加が確認されていなくても影響がない、あるいは増加しないとは言えない。しかし、一方で、「100mSv以下での影響は分からない」という表現では、これまで調査や研究が行われていないため何も情報がないという誤解を招く恐れがある。こうした状況を踏まえて、一般の方々向けには「(少しでもあるのか、全くないのかについては結論が出ていないもの)あったとしても検出困難なくらい小さいことは分かっている」という表現を用いているという報告があった。

福島県県民健康調査の一環として行われている「甲状腺検査の結果の解釈や今後のあり方」については、日本学術会議は、事故での放射性物質の放出量はチェルノブイリの7分の1にとどまるとし、検査でがんが見つかったのは高精度の調査が大規模に行われたことによる「スクリーニング効果」と指摘した。また、福島県県民健康調査検討委員会は、一巡目の結果について通常の数十倍の甲状腺がんが発見されたものの、チェルノブイリと比べて被ばく線量が小さく、被ばくからの時間が短いことなどから放射線の影響は考えにくいと中間評価した。こうしたことから、通常は見つからない、手術する必要のないがんが見つかることで不要な手術をしているのではない(過剰診断)という批判もあるが、同委員会は、現段階ではまだ完全に放射線の影響は否定できないとして検査の継続を求めた。

こうした現状を踏まえると、検査を受けることによる不利益についても丁寧に説明しながら検査を継続することが求められるとともに、専門家の立場では、データをきちんと分析し、分かりやすい説明をすることが求められる。現時点においては、自然に発生し、通常は見つからず、生命や健康状態に影響のないがん(潜在がん)であ

る可能性が高いと考えられ、慎重な経過観察、術前の穿刺吸引細胞診を行うことで不要な手術を回避することなどが望まれる。この問題に関しては、医学系の学術団体との協力が不可欠であり、日本放射線影響学会がその橋渡し役になることができるのではないかと考えられる。

「リスク・コミュニケーションのあり方」については、専門家は一般の方々から信頼を得て、求められている情報を提供し、その懸念や不安に答えられているか、また、今後に向けた自発的行動や参加協力につながるような取り組みになっているかが鍵となる。

これについては、まず、リスク・コミュニケーションの障害として、一般の方々の多くにおいて、放射線に関する知識が不足していること、「リスク＝危険」という理解から「リスクゼロ」を求める傾向があることが挙げられた。一方、専門家の側においても、学術的厳密性を求めるあまり分かりにくい表現が多かったのではないかと、一方的な説明や説得に陥りがちだったのではないかと(双方向の意思疎通になっていない)、などの反省もあった。しかしながら、最初は手探りで取り組みを続けているうちに、いろいろな教訓を得て、活動の見直しや改善が少しずつ図られてきている。

まず、リスク・コミュニケーションには科学的知識に関する信用と人間的信頼の両方が不可欠であるということ、各自の理解レベルに基づいて説明や意見交換ができることから少人数、対面式の対話が有効であることを、経験を通じて学んだ。課題としては、当初のきっかけ作りが難しいこと、マンパワーが必要であることなどが挙げられる。こうしたことを踏まえ、医師、教師など一般の方々から「先生」として信頼されているの方々、小中高生など若い世代の方々に放射線に関する知識を伝え、長期的に専門家、一般の方々間に多層的なネットワークを構築することが有効であろうという意見があった。さらに、風評被害などを防ぐためには、福島県および近隣県以外での放射線に関するリテラシー向上も必要であるという意見もあった。

2. トリチウム水の取扱い

論点として「安全規制」、「社会的側面」、「貯蔵の持続性」、「取り扱いの選択肢」について整理した。

「安全規制」では、トリチウムの環境への放出として、例えば排水の濃度限度(6万 Bq/L)が定められているが、多核種除去設備等で処理した水(トリチウム水)を安全規制と照らしてどう考えるのか。

「社会的側面」では、循環注水冷却により炉内を通過してから多核種除去設備等で処理した水の排水は、炉内を通らない地下水バイパスやサブドレインの排水と違いがあると思われており、処理水では希釈が必要であるものの基準を満たしても排水となれば、報道を介して風評被害が生じうるのでないか。排水は電力会社が得をすると

いう考えがあると信頼されなくなるのではないかと。

「貯蔵の持続性」では、東京電力ホールディングス社は、今後も構内でタンクを増設し、2020年までに計137万トン分を確保する計画であるが、現在の一日当たりのトリチウム水発生量(喝水期)である150トンのペースで増えた場合、残り5～6年で許容量を超えることから、構内に新たなタンク置き場を確保するなど構内にタンクを増やし続けることには限界があるのではないかと。

「取り扱いの選択肢」では、現状すなわち、適切に管理されている中、貯め続けるのが最もリスクが低い状況とも思われている一方、「トリチウム水タスクフォース」で取りまとめた5つの処分方法のいずれを選択しても、管理された状態での処分であれば、安全性という点では問題ないとされているものの、環境影響評価がなされていない。トリチウム水を溜め続けることには限界があり、どのようにして対処することが最善か、そのときの評価をどのようにするかを、社会的な背景も含め議論することが重要ではないかと。

以上の論点整理と論点に沿った討論を踏まえ、下記の見解を取りまとめた。

- ・ 現在タンクに貯蔵されているALPS処理水(トリチウム水)中のトリチウムは総量約1000兆ベクレルであるが、総量に関わらず環境への放出の濃度が法令で定められた放出基準(告示濃度)以下であれば、安全は確保できる
- ・ 環境に放出した場合、トリチウムは濃縮されず、放出地点から離れるに従い濃度は低減する
- ・ 放出基準以下の濃度とするには希釈が必要であり、どのように制御して希釈・放出を実施するのか具体的に示すべき(国、東京電力)
- ・ 上記の希釈・放出が適切に実施され安全が確保できることをどのように確認するのかを明確にすべき(原子力規制委員会)
- ・ 天然起源のトリチウムの存在量や生成量、通常運転の原子力発電所からの放出量などの過去の実績と比較してわかりやすく説明すべき(学協会、国)
- ・ 上記を踏まえ、風評に配慮して、信用が得られるように科学的知識を発信し、信頼が得られるように意思決定の仕組みを構築することが肝要

ANFURDは客観的な事実に基づき安全性などの科学的な知見を丁寧に説明し、風評を懸念する住民の不安に応えていく。

3. 燃料デブリ取出しにおける潜在的課題

被ばくの影響やトリチウム水などが現下の課題であるのに対して、デブリ取出しは近い将来の話である。廃炉は長い取り組みのため、これから本格化していく。将来何が必要になるかを俯瞰することが重要であり、将来の課題を各学会と共有する必要がある。

内部調査結果から推定されるプラントの状態を考慮すると、取り出しに向けて安全に炉内へどのようにアクセスしていくかが難しい課題になる。また、現状では事故時に発生したセシウムにより、格納容器内の線量率が高い。デブリのみならず多種の放射性物質を飛散させずにデブリを取り出すことも重要な課題である。

論点としては、以下が挙げられた。

- ・燃料デブリを取り出す作業は、現在の安定状態に手を加えて、燃料デブリにアクセスし、状態変化をもたらすため、作業に付随するリスク(作業中の不具合等に起因する一定の安定状態からの逸脱さらには建屋の劣化による放射性物質の漏えいや作業員の被ばくなど)を低減する必要がある
- ・将来何が起こりそうかを俯瞰し、仮説をたてた上で、あらかじめ何らかの備えをしておくことが肝要であり、特に影響度合いが大きいと思われる不確実な事象を徹底的に洗い出し、モニタリングすることによって仮説を検証することは重要である
- ・工法検討にあたっては、燃料デブリ取り出しによる速やかなリスク低減と、長期間にわたる取り出し作業時のリスク抑制を適切なバランスで両立させる必要がある。トラブルや故障を想定し、それぞれの措置が独立で互いに影響を及ぼさず(リダンダント)、擾乱の影響を受けにくく(ロバスト)、問題(電源喪失など)があっても回復する(レジリエント)機能が求められる
- ・燃料デブリ取出しの目標を設定し、目標達成に関わる一連のプロセスを俯瞰し、時間軸を考慮した成功パスを複数構築することが重要
- ・とくに、燃料デブリは炉内の様々な場所、様々な形態で存在することや、形態や物性の中長期的な変化の可能性が考えられ、燃料デブリ取り出しや取出し後の保管、廃棄物管理も考慮して、多方面から多様化を狙い、様々な手法の検討を行うことが必要。

これらの論点を踏まえ、ANFURDとして特に以下の課題への取り組みについて高い関心が示された。

- ・技術的には、原子炉压力容器底部に存在するデブリ取出し方法、ペDESTALの健全性維持、格納容器外のバウンダリの隔離性能確保、大規模デブリの保管と計量管理、装置の補修や交換、取り出し時の放射性物質の環境動態などがある。
- ・社会的側面としては各プロジェクトのアーカイブ化を進めておくべきではないか。
- ・また、長期的な取り組みとしての若手への魅力の発信、廃炉技術が他分野にどのように展開されるかを示していくことも必要 ⇒非原子力分野の人材育成や、熟練技術者の高齢化などが課題になる。

Ⅲ. 学協会連絡会への期待や連携の在り方と今後に向けて

1. 廃炉検討委員会と福島特別プロジェクトからの期待

廃炉検討委員会は、毎年春にシンポジウムを開催し社会に福島第一の廃炉に関する情報の発信と廃炉の課題を共に考える意見交換の場としている。広く原子力分野以外の方々に参加いただき、意見交換が狙いである。

ANFURDとの連携により、原子力学会のみでは十分に取扱いえない領域や分野で協働で活動することで、より効果的に廃炉作業を支援できるものと考えている。そのためには、連携の進め方に工夫が必要であり、早急に具体的な仕組みを作り上げなければならない。解決のニーズに係わる専門家が集まり、検討会を開き、解決のためのアイデアや提案をまとめるのも一つの方策である。廃炉検討委員会も積極的に関わって行きたい。

福島特別プロジェクトでは、今後もこれまでと同様の活動を行っていきたいと考えているが、震災から8年が経過し、地元の方々の関心・ニーズの変化や消費地での風評の払しょくなどについてどのように対応していけば良いのか、更に避難指示解除区域の復興、帰還への支援や帰還困難区域の復興にどう取り組むのかがこれからの重要な課題である。これらについてANFURDを通じ、幅広い学協会からのご意見やご提言をいただくとともに連携することで、さらにきめ細かい福島の住民への支援につなげていきたい。

2. 今後に向けて

ANFURDは引き続き廃炉検討委員会や福島特別プロジェクトと連携を図りつつ、福島復興や廃炉推進に向けた重要課題に積極的に取り組んでいく。

— 参考文献 —

1) <http://www.anfur.jp/index.html>(2018年12月27日)

著者紹介



宮原 要 (みやはら・かなめ)

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門



中山真一 (なかやま・しんいち)

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門

これまでをふりかえり、今後を展望する(核燃料部会)

1F 事故前後における大学での核燃料研究と人材育成 Past and future of Research and Human Resource Development for Nuclear Fuel Engineering in Japanese Universities

宇埜 正美
Masayoshi Uno

KEYWORDS: Nuclear fuel, Universities, Research and Human Resource Development

はじめに

大学と言えども核燃料の研究であるので可能ならばウランやプルトニウムを用いた実験をしたいと考えるのが自然であり、逆に通常扱うことが困難なこれらの物質を用いて新たな物性研究を行う研究者もいる。一方で原子炉用の燃料の研究では、まず原子炉型がありそれに対応する燃料型があるため、実用化研究や実用化後の課題研究では、実際の燃料を用いた研究が不可欠である。従って原子力の開発機関である JAEA や原子炉を運転している電力会社がその型の原子炉やそれ用の燃料を必要としなくなると、大学での研究も一気にトーンダウンする。そのようなしがらみの中で進んできた大学における核燃料研究のこれまでと今後を記述してみた。

1F 事故前までの状況

旧七帝大と東工大およびいくつかの私立大学に 1965 年までに原子力関連の単独の学科または専攻が設置されていた。しかし、平成に入ると国立大学の大学院重点化や学生のニーズに対応する組織再編等によりこれらの学科、専攻は統合され、その名称から原子力の名前が消えた。これにより、その時代の学生の人気によっては、学内外で(優秀な)学生の確保に多大な労力が必要になることとなる。

それでも平成初期の頃は、原子力はまだ環境にやさしいエネルギーとして位置づけられていたため、それまでの原子力工学教育をエネルギー関連の新学科(専攻)の一部で名前を変えて継続した大学もあれば、原子力カルネッサンスと呼ばれる時代には、立地地域にある福井大(2004 年)、福井工大(2005 年)などで新たに原子力工学の専攻、学科を立ちあげる大学もあった。

核燃料の研究および人材育成に関しては、核燃料物質を取り扱える施設の老朽化やその使用に関する法律上の要件を満たすことの困難さより、核燃料、あるいはウラン、トリウムなどのアクチニドを用いた研究が困難となって行った。例えば名古屋大学ではかつて原子力工学科・専攻を持ち、核燃料を用いた研究を行っていたが、

現在は核燃料物質を保管する施設のみを有する。

このような状況の変化は、それまで行われていた民間企業や国立研究機関が Pu や TRU など実際の核燃料を用いた実験を行い、大学では劣化・天然ウランを用いても Pu や TRU は模擬物質を用いて実験を行うという連携の仕方から、大学側はより複雑な模擬物質を用いた実験に加えて計算科学を用いた研究を行う連携の仕方に代わっていった。結果として、原子力の核燃料研究において熱力学(状態図)、分子動力学、第一原理計算など計算科学が大いに発展して行った時期でもある。

ただし、この頃はまだ、JAEA の高速炉サイクル実用化研究(FACT)や国内における第 IV 世代炉の開発も進められていたので、金属燃料、窒化物燃料などの新型燃料も研究開発のターゲットであった。また軽水炉燃料において J 合金等照射試験・照射後試験などが行われていた。高速炉燃料を含む新型燃料や軽水炉用の高燃焼度燃料についての研究において、JAEA 等の国立研究機関や民間企業にもそれなりの予算があり、また文科省等の大型の公募研究による資金獲得も可能であった。実際の核燃料物質を用いるかどうかは別にして、大学もこれらの機関と連携して潤沢な資金による核燃料研究が可能であった。

1F 事故後の状況

しかし、2011 年 3 月の福島第一原子力発電所事故を受けて、原子力をとりまく状況は一変する。その影響は各大学で様々であるが、学会教育委員会のアンケート調査結果では、前述した改組や名称変更後も原子力教育を継続してきた大学などで、特に大学院における優秀な学生の確保が困難になったことが伺える。ただ、安全や防災など原子力工学に新たな必修科目、研究課題が加わったのも事実であり、立地地域にある福井大学、福井工大などで改組、長岡技術科学大学、大阪府大などで原子力関連の学科・専攻の設置も行われている。

また、文科省の支援による原子力人材育成事業やその他の機関の原子力関連の研究開発事業の課題に安全、防災、廃止措置、特に福島炉の廃炉が加わったため、旧来

の原子力工学はもちろん関連する機械や知能分野のロボットや遠隔技術、放射線計測や環境修復を扱う研究室、さらには福島での復興を進めるための社会科学の学科・専攻でもこれらの競争的資金の獲得が可能となった。従って、「廃止措置」関連分野でこれまでの原子力工学関連の学科・専攻に留まらない、それまで原子力に係わってこなかった研究者にも比較的潤沢な研究予算が流れるようになったと言える。

核燃料の研究そのものについては、まず JAEA の FACT が宙に浮いた状態となり、大学における高速炉等の新型炉の燃料研究も下火になった。また東電が福島炉の廃炉と環境修復に専念しなければならず、その他の電力も当座の目標が再稼働となったため、1F 事故以前により行われていた濃縮度 5% 越ペレットや J 合金など高燃焼度軽水炉燃料に関する研究については、少なくとも大型の競争的資金を用いた研究は影をひそめた。

代わって燃料研究の主たる研究対象となったのが燃料デブリと ATF (Accident tolerant fuel) である。溶融した 1F 炉心に存在する燃料デブリを取り出すためにはその特性を把握する必要がある。1F の燃料デブリに関する情報はまだほとんど得られていないが、TMI 事故やチェルノブイリ事故の経験、これまで培ってきた計算科学による推察、これまで同様模擬物質を使った実験、さらには主に国外であるが新たに 1F 事故を模擬した大規模試験により、その性状を明らかにしようという研究である。これまでの燃料研究と異なり UO_2 が溶融するような高温までの挙動と、あまり扱ってこなかったボロン等の制御材やベDESTAL 床部のコンクリートなども対象となるため、1F の現場では突き詰められた喫緊の課題であるが、大学ではどちらかと言えば基礎研究の幅を拡げるチャレンジングな研究ととらえており、文科省他の競争的資金でそれに見合うだけの予算の獲得も可能である。

一方、ATF 研究は、国内では、SiC/SiC や FeCrAl 合金などもっばらシビアアクシデント時に水素を発生しにくい被覆管に関する研究・開発であるが、経産省の資金のもと JAEA が幹事機関となって企業、大学が連携したオールジャパンの体制で開始された。FeCrAl が旧来の軽水炉の被覆管材料ではなく、高速炉被覆管技術を応用したため、軽水炉燃料ペレットと被覆管および高速炉燃料ペレットまでを含むそれまで狭義の核燃料工学と一線を画していた高速炉被覆管研究がこれを機に軽水炉燃料研究と連携を果たすこととなった。

しかし、1F 事故はまたこのような実用化を目指したあらたな研究にも研究インフラの問題を突きつけることとなった。1F 事故以前より施設の老朽化の問題はあったが、1F 事故後の新しい規制基準は、試験、研究炉に大きな課題を科すこととなった。燃料研究とは直接関係しないが、京大炉、近大炉がしばらく再稼働しなかったこ

とは、人材育成の面で大学関係者に大きな影響を与えた。一方、試験・研究炉を多く所有する JAEA でもその継続か廃止かについて慎重な議論がなされ、結果、JMTR や「もんじゅ」など多くの施設が廃止となった。さらに事故時に止まっていた常陽も再稼働が遅れ、現在もまだ再稼働の見込みはたっていない。極めつけは、別途、ハルデン炉も廃炉が決まり、金輪際再稼働しないことが決ってしまったことである。

同じ ATF 研究でもアメリカの場合は状況がかなり異なっているというより、正反対と言える。そもそもアメリカでは福島事故以前の時点で国内での原子力技術の状況を考慮して、また人材育成と技術伝承も考慮し DOE (アメリカエネルギー省) が新型燃料の研究開発キャンペーンを開始しており、そこに 1F 事故を受けて ATF 燃料の開発が加わった。従って、産官学に多くの予算がつけ込まれると同時に、それまでの止まっていた多くの試験・研究炉等の施設も再度、動かすこととなっている。

今後のあるべき姿

1F の廃炉は今後の原子力産業の発展の必要条件ではあるが、核燃料技術者の育成も喫緊の課題である。しかし「燃料デブリ」と「ATF」だけで学生を確保するのは困難であり、この燃料デブリ研究の成果をもとにより安全な原子力システムの開発を推進する必要がある。既に事故進展挙動解析と燃料デブリ分析に従事する研究者が一堂に会して、事故進展挙動解析技術の高度化には燃料デブリのどのような物性を評価すれば良いかなどの議論を始めている。来るべき新型炉開発に向けてより安全性を高める核燃料工学の創成につながれば良いと思われる。

また技術の伝承の点からも大学での劣化ウランを用いた実験も継続すべきである。大学における核燃料物質の取り扱える施設に関しては、原子力学会原子力アゴラ特別専門委員会、大学等核燃および RI 研究施設検討・提言分科会において議論され、K 施設(少量国際規制物質使用施設)の統合の促進や Graded Approach を用いた規制の対応などが必要と言われている。しかし本当に高度な核燃料研究を維持するためには JAEA や民間の研究機関が実燃料を使った実験を、大学で劣化ウランや模擬物質を用いた実験と計算科学を駆使する研究連携を今後も継続すべきであり、所定の施設の再稼働と新たな施設の整備を国をあげて推進する必要がある。

著者紹介



宇笠正美 (うの・まさよし)
福井大学附属国際原子力工学研究所
(専門分野/関心事項) 燃料挙動, 燃料分析,
人材育成

これまでをふりかえり、今後を展望する(核燃料部会)

商用軽水炉燃料開発のこれまでとこれから

Past and Future of Commercial LWR fuel development

草ヶ谷 和幸

Kazuyuki Kusagaya

KEYWORDS: Nuclear fuel, Commercial Light Water Reactors

はじめに

60年の歴史を振り返ることは、20年ほどの職歴しかない私には書物¹⁾などに頼らざるを得ないが、約50年前に海外技術を導入して始まったわが国の商用軽水炉燃料について、その開発の大まかな変遷と福島第一原子力発電所事故による変化、および今後の展望について、筆者が身をおく産業界における状況を中心に述べる。

前世紀の軽水炉燃料開発

わが国最初の商用軽水炉は、沸騰水型原子炉(BWR)は敦賀1号炉(1969年臨界)、加圧水型原子炉(PWR)は美浜1号炉(1970年臨界)である。BWR、PWRともに1950、60年代にその原型を開発した米国の技術が、原子炉本体と同様、それに用いられる燃料についても導入された。当時の電力需要の年ごとの増大や石油への高い依存度といったエネルギー事情に対処すべく原子力を国産技術として確立・推進する国策ののって、燃料の基礎研究や製造技術開発も速やかに進められ、1970年代には国産燃料が国内の炉に供給されるに至った。

1980年ごろまでは、軽水炉燃料という新技術の未成熟ゆえに顕在化した諸課題を克服して、燃料の信頼性の著しい向上が図られた時期であった。当時、海外炉等において燃料のさまざまな破損事例(例えば、製造時に燃料ペレットに付着した水分が運転時に被覆管の水素脆化を起こした事象)が発生したが、製造技術や設計の改良によって順次克服された。

1980年代以降は、達成した信頼性の向上を背景に、原子炉利用の経済性向上を目指す技術開発にフェーズが移った。燃料集合体からその寿命中に取り出すエネルギー量の増加、つまり高燃焼度化のための開発が産業界主導で段階的に推進され、開発された新型燃料の商用炉での実証試験が官民協力して実施された。燃料の信頼性を保ちつつ高燃焼度化を図るには、燃料の設計や材料の改良が必要であった。PWR燃料では、例えば、炉内使用環境下での被覆管の腐食を抑制するために従来のジルコニウム合金よりも耐食性を高めた新合金が開発され

た。BWR燃料では、集合体内の燃料棒本数を増やして各燃料棒の負担を抑えるとともに、ペレット-被覆管相互作用による応力腐食割れの対策としてジルコニウムライナ被覆管が開発されるなどした。

2000年頃には、世界的に最も低い破損率を維持しつつ、これらの高燃焼度化の計画を達成した。直面した課題を次々に解決した諸先輩の努力・能力に敬服すると同時に、着実な開発の背景には原子力の興隆期の時代の熱気の後押しがあったことも強く感じられる。

福島第一原子力発電所事故前の開発動向

21世紀に入っても燃料のさらなる開発に向けた検討が続けられた。その概要は、日本原子力学会の「軽水炉燃料の高度化に必要な技術検討」特別専門委員会において検討し作成された「燃料高度化技術戦略マップ2007」と、その後、核燃料部会の「燃料高度化ロードマップ」実行委員会に引き継がれて更新された「燃料高度化技術戦略マップ2008-2009」²⁾に集約された。その戦略マップにおける“燃料高度化”とは、さらなる高燃焼度化による使用済燃料発生量の低減、海外で先行しつつあったプラントの高度利用(炉出力向上、柔軟な運転サイクル対応)によるCO₂排出量の削減、プルサーマル推進によるウラン資源の有効利用、といった公益性向上を図るに際して増大する燃料への負荷に燃料を対応させる、ということであった。その具体策としては、産業界が主体となったさらなる改良被覆管や改良燃料の開発などが挙げられ、それらの実用化に向けたロードマップが学会活動として産官学の共同作業で作成された。燃料高度化に必要な基盤としての試験施設や規格基準などについても議論がなされた。

福島第一原子力発電所事故後の開発動向

東日本大震災とそれに伴う福島第一原子力発電所事故の発生により、その後の安全規制の再構築と強化も相まって、国内の商用炉は一時すべて停止する事態となった。現時点においても再稼働した炉は数えるほどであり、そうした状況下、上述の燃料高度化の計画は白紙と

なった。

他方、福島第一原子力発電所事故では、冷却水を失った炉心においてジルコニウム合金の燃料被覆管が高温水蒸気と反応し、その反応熱により炉心溶融が促進されたとともに、反応により生じた大量の水素が水素爆発の発生につながった。その反省に立ち、これらの事象の抑制を意図した事故耐性燃料の研究開発が世界的に勃興した。欧米が先行するものの、国内においても事故耐性燃料に関する国の研究事業が立ち上げられるなどして、産官学による研究開発が進捗している。高温水蒸気との反応性がジルコニウム合金に比べ桁違いに低い材料(炭化ケイ素複合材、改良ステンレス鋼)を被覆管に適用した燃料の原理的・技術的実証を目指して過酷事故時のみならず通常運転時における材料特性や設計成立性が実験や解析等により調べられ、その成果は近年の当学会の秋の大会等で報告されている。

毎年開かれている軽水炉燃料関連の国際会議 Topfuel/WRFPM においても、昨今は事故耐性燃料に関する報告が多く、海外では上述の材料の他に、金属やセラミクスをコーティングしたジルコニウム合金被覆管や被覆管だけでなく燃料ペレットの革新も着目されている。事故耐性燃料以外では、従前からの研究分野(通常運転時、異常過渡時、設計基準事故時の炉心内での燃料挙動)の他に、使用済燃料が累積する状況を反映し、その貯蔵時の燃料挙動に関する研究が目立ってきている。

今後の展望

総合資源エネルギー調査会原子力小委員会傘下の自主的安全性向上・技術・人材ワーキンググループの要請を受けた日本原子力学会は、安全対策高度化技術検討特別専門委員会において「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」を検討し、平成 27 年 5 月に最終報告した。核燃料部会は、これを受け、核燃料関係の安全性向上に係る課題を掘り下げて検討すべく、部会内に「軽水炉燃料等の安全高度化ロードマップ検討ワーキンググループ」を設置し、活動を進めた³⁾。以前の「燃料高度化技術戦略マップ」とは異なり、安全性向上の観点に特化し、燃料分野での安全性向上をどのように進めていくのかを議論した。燃料の信頼性向上、解析評価技術の高度化、事故耐性燃料の開発といったカテゴリに分けて整理し、現状分析に基づく重点課題の明確化から、課題解決に向けた具体的取り組みの長期計画までを検討した。短・中期的には、開発済の技術(改良材料など)の早期実用化による安全裕度の向上、長期的には事故耐性燃料の実用化による飛躍的な安全性の向上を目指している。このワーキンググループの成果は、今後の燃料開発の貴重な道標となるだろう。

しかし、ロードマップに描いた道筋に立ちはだかる困難は大きい。一つには、国内の原子力発電自体の将来の

見通しの不確かさがある。他電源との競合や電力自由化により従前以上の経済性が原子力発電に求められつつある。また、開発における産業界側のより大きな分担を求める原子力委員会の表明のように国策としての後押しの減退が実感される。これらの状況は、廃炉による国内の燃料市場の規模縮小と相まって、今後の開発投資の困難さを増すものと考えられる。

二つ目には、燃料の技術面でのイノベーションが必要なことである。これまで依拠してきた技術(例えば、ジルコニウム合金被覆管)が事故耐性あるいは高燃焼度化の観点で限界が見えてきており、そこからの脱却が求められている。新しい燃料技術の確立は、材料開発、原子炉での照射試験、商用炉での実証試験を経て実用化までに場合により数十年の長期戦である。しかし、国内外の試験炉の廃炉が決まるなど、開発の基盤となる施設の確保は年々難しくなりつつある。人材の確保についても同様である。

上記の困難を乗り越えるためには、私見では、前世紀後半の興隆期のような開発の強力な原動力あるいは社会の後押しが必要であり、それを得るためには、福島第一原子力発電所事故を経た現在においては、過酷事故を起こさない従来と一線を画した燃料の実現を目指す夢のある開発が切望される。長期的には、固有安全性を持った次世代原子炉をベースとした全く新しい燃料の設計開発が目指す方向の一つだろう。

これまでの利便性を優先してきた社会から、今後は自然災害などに対する強靱性がより重視される社会になっていくと思われるが、原子力発電は災害時に“お荷物”ではなく、むしろ頼りにされるくらいの存在にならなければ、少なくともエネルギー産業としての原子力は社会から必要とされないのではないかと想像したりもする。原子力のいまの緩やかなフェーズアウトの状況の間にイノベーションを発信できるかが問われていると思う。

参考文献

- 1) 「軽水炉燃料のふるまい」改訂第 5 版、(公財)原子力安全研究協会、平成 25 年 3 月。
- 2) 燃料高度化技術戦略マップの概要について
www.aesj.or.jp/sc/committees/gijiroku/etc/2009-2-2.pdf
- 3) 核燃料部会 軽水炉燃料等の安全高度化ロードマップ検討ワーキンググループ 活動実績
<http://www.aesj.or.jp/~fuel/Events/WG.html>

著者紹介



草ヶ谷和幸 (くさがや・かずゆき)

株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン

(専門分野/関心分野)燃料挙動解析、事故耐性燃料

これまでをふりかえり、今後を展望する(バックエンド部会)

放射性廃棄物の処分等の実施に向けて

Towards implementation of radioactive waste disposal

田辺 博三
Hiromi Tanabe

KEYWORDS: *Radioactive waste, Management, Disposal, Clearance, Decommissioning*

I. 放射性廃棄物管理の現状

放射性廃棄物は、原子力エネルギーの利用および放射線・放射性同位元素(RI)の利用(以下、「放射線利用」)に伴って発生する。原子力エネルギー利用には、原子力発電所および関連する燃料サイクル事業の施設があり、放射線利用および原子力エネルギー利用に関する研究開発には、医療施設、産業施設、教育施設、研究施設等がある。放射性廃棄物は日本では高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物に分類される。高レベル放射性廃棄物は原子力発電に伴って生じた使用済燃料の再処理により発生する高レベル廃液をガラス固化したものであり、地層処分される。低レベル放射性廃棄物は前者の施設から発生するものを本稿では便宜的に「原子力発電事業関連廃棄物」といい、後者の施設から発生するものを「研究施設等廃棄物」という。これらの利用に伴い発生する放射性廃棄物を安全に管理することは、利用を安定して持続するために解決しなければならない課題であり、発生者責任の原則のもとで管理されている。放射性廃棄物管理には、処理、保管(貯蔵ともいう)、処分(埋設ともいう)およびこれらの間の輸送が含まれる。処理、保管、輸送に関しては公開された情報や関連事業者のホームページの情報があり、紙面の制約上、本稿では説明を省略する。

処分については、現在、世界的に採用されているものは陸地処分であり、多くの処分施設が運転(操業ともいう)中である。陸地処分は、閉じ込めと隔離の原則により処分の安全を確保する方法でありⁱⁱ、浅地中処分(トレンチ処分、ピット処分)、中深度処分(余裕深度処分)、地層処分がある。定性的に言えば、浅地中から深地層になるほど、閉じ込め性能と隔離性能が向上するが処分コストは高くなる。したがって、安全性と合理性を考慮すると、浅地中処分では放射性核種の寿命が短く放射線量も

少ないものが処分され、深くなるにしたがって、寿命が長く、放射線量も多いものが中深度処分(余裕深度処分)、次いで地層処分される。世界的に見れば、これらの処分方法はいずれかの国ですでに実用化されていることに留意が必要である。地層処分も、アメリカで軍事用施設から発生した TRU 廃棄物(アメリカの廃棄物区分名称)の地層処分施設 WIPP が運転されている等の実績がある。ただし、高レベル放射性廃棄物は、体積的には放射性廃棄物全体の 1% 以下と少ないが、放射性廃棄物全体の放射線量の 90% 以上を含有しているⁱⁱⁱことから、さまざまな処分方法の調査研究が行われてきた結果、現時点で最も有望な方法として地層処分が選択され各国で進められている。最も進んでいるフィンランドではすでに地下施設の建設が進んでおり 2020 年代の運転開始が予定されている^{iv}。廃止措置に伴って発生する資材には、含まれる放射性核種の寿命も放射線量も極く少ない物があり、放射性廃棄物として処分するのではなく、一般利用(再使用、再利用)あるいは一般産業廃棄物と同じ処分をしたとしても人への影響が無視できるくらい小さいという基準(国際慣行では 10 μ Sv/年以下)に基づき、クリアランス制度が適用されている国もある。ただし、具体的に適用する処分方法やクリアランスの実施有無は、国の政策や方針によって異なっている。

日本における取り組み状況を簡単に述べる。日本では前述した処分方法が全て適用される。

原子力発電事業関連廃棄物；日本原子力発電(株)は東海発電所の廃止措置等に伴い発生する廃棄物のトレンチ処分施設の審査中である。ピット処分は、日本原燃(株)の六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターで原子力発電所の運転に伴い発生する放射性廃棄物の処分が行われ

ⁱ 例えば、日本原子力学会再処理・リサイクル部会、テキスト「核燃料サイクル」、2015。

<http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt.html>

ⁱⁱ IAEA, Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, IAEA, Vienna, 2011.

ⁱⁱⁱ 例えばフランス ANDRA, INVENTAIRE NATIONAL DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS BILAN À FIN 2015, 2015.

https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/andra-bilan_inventaire_2015-16_12dec_hd_web.pdf

^{iv} 経済産業省資源エネルギー庁、諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について 2018 年度版、2018。

ており、現在、施設の新増設計画も進められている。研究施設等廃棄物；処分実施主体は日本原子力研究開発機構(JAEA)である。トレンチ処分は、日本最初の発電用原子炉「動力試験炉」(JPDR)の廃止措置に伴い発生したコンクリート約1,670トンの処分実地試験が行われ、処分は終了している。地層処分；原子力発電環境整備機構(NUMO)が実施主体であり立地活動等を行っている。

また、原子力発電所、ウラン燃料加工施設、使用施設等から発生するクリアランス物に関する制度が整備されており、コンクリートと金属の資材のクリアランスが認可されており、一部は施設内等で再利用されている。

II. 放射性廃棄物の処分等の展望と期待

放射性廃棄物の処分やクリアランスの本格化については、放射性廃棄物の発生、処理、保管、処分のバランス等を踏まえ、放射性廃棄物発生者の経営判断により決定されるものであるが、学会からの命題にしたがい、私見として期待も込めて展望したい。

まず、以下に、原子力発電所および日本原子力研究開発機構の廃止措置計画、福島第一原子力発電所の廃炉中長期計画、地層処分事業計画を簡潔に示す。

① 原子力発電事業関連廃棄物

原子力発電所の放射性廃棄物の平成28年度末の保管量は保管容量の約7割である^v。原子力発電所の廃止措置計画^{vi}に関しては、現在、廃止措置計画が承認された原子力発電所の廃止措置終了時期は、今後10年以内1基、20年以内1基、30年以内4基、30年以降1基となっており、これら以外にも廃止措置を決定しているものがある。

② 研究施設等廃棄物

JAEAの研究施設のバックエンドロードマップ^{vii}によれば、JAEAは今後約70年を第1期(～2028年度)、第2期(2029年度～2049年度)、第3期(2050年度～)に分けて方針が示されており、その間に79施設の廃止措置が予定されている。バックエンドロードマップ等^{v, vii}によれば、現在の保管量は保管容量の約8割に達しており、本ロードマップの方針どおりに廃止措置が進む場合、第2期の早いタイミングで現時点の保管能力を超えていく。したがって、今後10年程度(第1期)で処分に向けた対応を着実にいき、第2基からの累積保管料の増加を抑止する、余裕のある安全な保管を継続するため保管能力の確保に努めるなどの対応を行う等としている。

^v 原子力施設に係る平成28年度放射線管理等報告について
<http://www.nsr.go.jp/data/000203487.pdf>

^{vi} 日本の原子力発電炉(運転中、建設準備など)2018年8月2日現在

https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2018/08/jp-npps-operation180802.pdf

^{vii} 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンドロードマップ案、2018年12月26日
<https://www.jaea.go.jp/02/press2018/p18122601/>

また、処分は放射能レベルの低いトレンチ処分、ピット処分を優先的に進める等としている。

③ 福島第一原子力発電所の廃炉中長期計画^{viii}

中長期ロードマップによれば、30年から40年後の廃止措置終了を目標工程としている。放射性廃棄物の処理・処分に関しては、第3期(2022年以降)に、廃棄体の仕様や製造方法を確定し、その上で、発電所内に処理設備を設置し、処分の見通しを得た上で、廃棄体の製造を開始し、搬出する、としている。

④ 地層処分事業計画

サイト調査に20年程度、許可・建設に10年程度を必要とする^{ix}としており、運転開始までに約30年が必要である。

⑤ 規制基準の整備

現在、廃炉等に伴う放射性廃棄物の中深度処分(余裕深度処分)の規制基準の検討が進められている。今後、クリアランス制度、第二種廃棄物埋設におけるウラン廃棄物の取扱いの考え方、廃棄物埋設施設以外の原子力施設のサイト解放の考え方の審議を行うとしている^x。地層処分に関しては、概要調査地区等の選定の進捗に応じ、概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項を順次示すこと、とされている^{xi}。

廃止措置のエンド・ステートとしては、サイトを管理区域から解除し解放するグリーンフィールド化、原子力施設サイトとしての再使用、他施設からの放射性廃棄物への保管施設や処理施設等の継続利用、建屋等の再使用等が考えられる。また、1つのサイトに複数の原子力施設が存在する場合には、1つの原子力施設が廃止措置されても他の原子力施設が運転されているという状況もあり得る。しかし、最終的にはグリーンフィールド化することを考えると、サイトから放射性廃棄物を取り除き、搬出し、処分あるいは他のサイトでの保管が必要になるが、保管により無期限に対応することは将来世代に負担を課すことにもなることから、処分施設の整備が必要となる。

このような考え方にに基づき、さらに前述の各原子力施設の状況、計画を踏まえると、今後の予想としては期待を込めて以下が考えられるだろう。

今後10年間程度；六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設

^{viii} 東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(案)、平成27年6月12日

http://www.kantei.go.jp/jp/singi/hairo_osensui/dai2/siryou3.pdf

^{ix} 科学的特性マップに関する対話型全国説明会 説明資料

https://www.numo.or.jp/taiwa/pdf/setsumei_taiwa2018.pdf

^x 第22回原子力規制委員会資料3

<http://www.nsr.go.jp/data/000241068.pdf>

^{xi} 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針(平成27年5月22日閣議決定)

<http://www.meti.go.jp/press/2015/05/20150522003/20150522003-1.pdf>

センター(ピット処分施設)が順調に運転される。一方、東海発電所のトレンチ処分施設が運転開始するとともに他の原子力発電所でも計画あるいは申請がなされるだろう。また、研究施設等廃棄物の処分に向けた対応が着実に進められるだろう。

10年後からの20年間：廃止措置が本格化していくことに合わせて、研究施設等廃棄物の浅地中処分施設の運転が開始されるだろう。さらに、中深度処分(余裕深度処分)施設の運転が開始されるだろう。

30年後以降：福島第一原子力発電所の放射性廃棄物の処理・処分の本格化が進むだろう。また、地層処分施設の運転開始の時期を迎えるだろう。

放射性廃棄物の処分施設の運転開始時期を展望することは、非常に難しい。これは、処分が解決すべき課題が技術的課題だけではなく、候補サイトの選定、受入れ自治体との話し合い、合意に至る、さまざまな社会的課題も含んでいるからである。実現のためには、関係者のより一層の努力が必要であろう。

また、クリアランス物は放射性廃棄物ではないが、廃止措置計画の終了時期までにはクリアランスとその後の再使用、再利用が本格化していることが必要であろう。

Ⅲ. 放射性廃棄物管理の本格化に向けた次の10年間の取組

Ⅱ. 項を踏まえれば、今後10年間は処分の助走期間としてとらえられよう。その後、本格的な取り組みに発展することを期待し、この10年間程度に取り組むべき事項を私見として列挙した。

- ・放射性廃棄物の管理、特に安全なエンド・ステート(処分)の確立のための取組。IAEAの廃棄物等合同条約は各国が放射性廃棄物の管理の高い水準の安全を世界的に達成し維持すること等を目的としており^{xii}、日本も2003年に加入している。
- ・廃棄物の発生と抑制の徹底。IAEAの処分前管理に関する一般安全要件文書^{xiii}では、安全要件8：放射性廃棄物の発生と抑制、において、発生する放射性廃棄物を可能な限り低く保つことを要求している。その達成のためには発生施設側における管理も重要な要素であり、特に大量の放射性廃棄物が発生する廃止措置は、放射性廃棄物管理と一体的に進める必要がある。

その他、以下の事項があげられる。

^{xii} 使用済燃料管理および放射性廃棄物管理の安全に関する条約(廃棄物等合同条約)

<https://www.nsr.go.jp/activity/kokusai/jyouyaku.html#section3>

^{xiii} IAEA, Pre-disposal Management of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 5, IAEA, Vienna, 2009.

https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Public1368_web.pdf

- ・処分施設受入基準の早期確立と処理・廃棄体化の推進。
- ・ウラン廃棄物の処分方策、規制基準の制度化。
- ・放射性廃棄物の改良革新的な処理技術の開発。
- ・第二種廃棄物埋設へのALARA, BATの適用の定着。
- ・放射性廃棄物全体を俯瞰した推進、規制の議論。
- ・処分の合意形成の持続的取組。

Ⅳ. 学会として何を行うか、何が貢献できるか

バックエンド部会としては、従来果たしてきた会員への情報提供および様々な専門分野の研究活動を支援し発展に貢献していくことが、今後とも大切な役割である。そのうえで、さらに学会として社会への貢献という観点から、バックエンド部会は何を行うべきか、何ができるかを考え、実行することも重要ではないか。以下に筆者の私見を思いつくままに列挙した。

- ・一般の方々、学生、企業の新入社員等が必要とする時に自ら情報を入手できるようにするための、放射性廃棄物管理情報の体系的な整備。
- ・各地で開催されるだろう、地層処分の説明会、自主的な勉強会等、賛否両論の場に、学会の中立的立場から、求められる情報を提供。
- ・学会としての意見、見解レポートの発出。
- ・処分は特に社会とのつながりが大きく、また技術専門分野も広い。このため他部会(社会・環境部会、再処理・リサイクル部会等)、他学会(土木学会、地質学会等)、社会科学の専門家との協力、協働の強化。場合によってはそのための新たな場の創設による活動。
- ・核種分離・核変換の専門家と処分の専門家等の協働によるコスト・ベネフィット分析等、理解、共有活動。

Ⅴ. おわりに代えて

～これから取り組む方々へ～

処分は技術的経済的なテーマであるだけでなく、政策的、社会的なテーマでもあることから、多くの越えなければならぬ課題のある非常にチャレンジングな分野であり、これから取り組む方々にとって大変やりがいのある仕事だと思う。また、処分技術に取り組む研究者やエンジニアを目指す方々は、担当する科学技術分野に関して基礎から実現までを俯瞰しながら取り組むこと、このため諸外国のセーフティーケースや実証試験等も学ぶことによりグローバルな視野を持つことを期待する。

著者紹介



田辺博三(たなべ・ひろみ)

日本原子力学会フェロー

(専門分野/関心分野)放射性廃棄物の特性調査と処理・処分工学、規制制度

これまでをふりかえり、今後を展望する(バックエンド部会)

地層処分の今後の課題に関する一考察

An opinion on further research of geological disposal

若杉 圭一郎

Keiichiro Wakasugi

KEYWORDS: *backend, geological disposal, radioactive waste, safety assessment, Fukushima, unexpected events, scenario development, trade-off problem*

これまでを振り返り…

わが国のバックエンドに対する 80 年代以来の取り組みを振り返って見ると、バックエンド問題の解決は原子力を利用してきた人類共通の課題であるとの認識のもと、この分野を事業といった枠を超え学際的にも価値あるものへと立ち上げた先達の苦勞と熱意に敬意を表さずにはいられない。その潮流は 1984 年に原子力学会にて発足した放射性廃棄物研究連絡会に始まり、現在のバックエンド部会へと受け継がれている。バックエンド部会は 1997 年に発足し、同じ頃社会に出た私は、わが国における地層処分の技術的信頼性を示すことを目的とした第 2 次取りまとめ¹⁾のプロジェクトに携わる機会を頂き、研究開発のイロハを学んだ。地層処分研究では多岐にわたる学問分野の知識が必要となるため、当時の関係者は手弁当で分野横断的な議論の場を作り、また双方の専門知識を連携させ組織の壁を越えて協働で成果を論文化するなど、精力的かつ建設的な活動を進め、これを目の当たりにした学生達も研究者のロールモデルとして先達の背中を追い、夢と希望をもってこの分野に身を投じるといった良いスパイラルが回っていたように思う。

あれから約 20 年、2000 年に実施主体である原子力発電環境整備機構 (NUMO) が設立され、2002 年より処分候補地の公募を開始したものの、これに応じる自治体が現れない状況が続いている。さらに、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震により、原子力関連施設に対するシビアアクシデントが懸念され、放射性廃棄物処分については地質環境の安定性や地層が有する安全機能に関する不安が高まっている。これを踏まえ、我が国におけるバックエンドはどのようにあるべきなのか？

福島原発事故から学ぶべきこと

我々が東京電力福島第一原子力発電所事故から学ぶべき点は少なくないが、その一つに外部事象がシステム全体に与える影響とその伝搬の評価が不十分だったこと、このため予見される事象に対する対策を適切に施設設計へ反映できなかったことが挙げられる。地震・津波等の

自然現象に関する研究や、電源喪失への対応など、個別の事象・アクシデントについては専門家による知見の蓄積とそれに基づく対策が取られていたと考えられる。しかし、後知恵との誇りを覚悟で言えば、シビアアクシデントに繋がる事象についてそれらの相互作用も含めて、全体システムへの影響を見落としなく評価するための仕組みが不十分であった可能性がある。技術が成熟するにつれて専門分野の細分化・分業化が進むとともに、個別研究間の相関関係も複雑化する。これに伴い個別研究の技術情報を統合し全体システムを理解することに多くの知識と時間を要し、シビアアクシデントを導く事象・影響の連鎖をあぶり出すことが難しくなる。このため、個別研究の成果を直接あるいは近似するなどして、全体システム評価へ統合し、懸念される事象について体系的に検討していくことが、今後ますます重要性を増すと考えられる。そのためには、専門知識を兼ね備えつつ全体を俯瞰できるジェネラリストの存在も不可欠である。

また、バックエンドの中でもとりわけ地層処分においては、システムの規模および評価の時間スケールの長さがこれまでの人類の経験をはるかに超えることから、想定外事象の存在について慎重かつ注意深く検討する必要がある。このため、安全評価では、FEP (Features, Events and Processes) リストを整備し、それらの組み合わせを網羅的に分析することにより、長期安全性を損なうような事象・プロセスの評価に重大な抜けが無いようにシナリオを構築する。この方法は、国際的にもコンセンサスが得られており²⁾多くの実績があるが、残余のリスクに対応するためには現時点で認知されていない事象が存在するという前提に立ち、評価技術を開発していくことが必要である。これについては、昨今、上述した従来のシナリオ解析手法とは逆の考え方を導入し、安全性を脅かす結果を生じる過酷な状況からシナリオや関連する事象を創造し、想定外事象を探索する手法が開発されている³⁾。このような想定外事象を最小化する取り組みを反復的に行うことにより、地層処分システムのロバスト性を高め、さらに、蓋然性の低い想定外事象についても地層処分の安全性を論証し、十分な安全裕度を考慮した工学設計や包

括的な安全評価により、いかなる重大リスクの見落としもないように、多角的な視点と不断の努力で地層処分の安全性を高めていくことも福島原発事故からの教訓として認識すべき事項である。

トレードオフにブレークスルーを

地層処分特有のトレードオフの問題についても今後更なる検討が必要である。例えば、地層処分事業では、地下300m以深に処分施設を建設する。この際、坑道周辺の力学的安定性を向上させるため、あるいは地下水の湧出を抑制するためにセメント系材料を使用する。一方、セメント系材料を大量に使用する場合、処分施設周辺の地下水が長期にわたり高アルカリ性に保たれ、人工バリアや周辺岩盤に期待する安全機能が阻害される可能性があるため、長期安全性の観点からは極力セメント系材料の使用量を制限することが求められる。短期的安全性と長期的安全性のトレードオフがここにある。

また、社会的なトレードオフの問題も考えられる。例えば、原子力の恩恵を受けた世代が、将来世代へ放射性廃棄物の管理を押し付けることなく責任を持って処分するという行為は、別の見方をすれば、将来世代の放射性廃棄物に対する対策の選択権が奪われることを意味する。一方、将来世代への配慮により地層処分事業を先延ばしすることになれば、それは現世代の怠慢ともとれる。このような根本的かつ回避な社会的問題については地層処分の技術的発展とともに常に認識されてきたものの、近年、公募に応じる自治体が現れないことからその重要性が再認識されている⁴⁾。今後地層処分の専門家のみならず多様なステークホルダーを含めた取り組みが必要であるが、それらがどのようなのがこの問題の鍵である。

さらに、技術的な側面と社会的な側面が複合したトレードオフの問題も考えられる。例えば、社会からの要求として回収可能性やモニタリングを維持することは、社会的受容性を向上させる点で意味があるが、これらの導入は地層処分システムの長期的な受動的安全性に悪影響を及ぼす可能性があるとともに技術的にも困難である。このような技術的な制約と、社会からの要求を両立させるための仕組みを整備することは、地層処分事業が地域住民の合意なしに進めることができないことを考慮すれば、今後ますます重要性が高まると考えられる。

この他にも地層処分研究には取り組むべきトレードオフの課題は多数存在すると考えられ、決定的な解を持たないこのような課題について今後どうアプローチするかがこれからの地層処分研究のドライビングフォースになると思われる。そのためには、妥協点を探すという思考ではなく、相反すると思われる因子を両立させることに力点が置かれるべきであり、各因子のメリット・デメリットがどのような関係にあるのかを丹念に分析することが必要である。それこそがトレードオフの問題にブ

レークスルーをもたらすことに繋がると考えられる。

学会・部会への期待

バックエンドは息の長いテーマであり、社会的に信頼性の高いプロセスで合意を得ながら進める必要があることから、長期的な粘り強い取り組みが必要である。では、原子力学会あるいはバックエンド部会の長期的なミッションは何であろうか？

まず、バックエンドに限らず原子力業界の進退が政治的な判断に強く依存することを踏まえれば、政治分野へのインプットは極めて重要である。このため学会・部会には、産官学に「政」を加えた政産官学の連携をより密に実現できるハブ的役割を果たしてほしい。学会は事業者の立場をとることはないが、上記連携社会における意思決定の「質」が高まるような仕組みを構築することが期待される。

また、近年バックエンド分野を牽引してきた専門家が徐々に一線から離れる時期を迎えている。一方、原子力を志す学生数は年々減少傾向にあり、この分野における人材不足は、原子力の安全性あるいは社会的信頼性に関して、近い将来極めて深刻な状況を引き起こすことが予想される。学会・部会も含めた政産官学の協働でこの問題に対する更なる取り組みを着実に進めることが急務である。学生の原子力に対する関心を高め、夢と希望を持ってこの分野に入ることができると同時に、いつか見た背中を後進に伝えられるようにしたい。

今後も本学会・部会が、より高いレベルで学際的な協働を深める場として、また多様なステークホルダーとの対話や専門家の育成に貢献する組織として、継続的に発展されることを、関係各位の益々のご活躍とともに祈念する次第である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構:我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価, JNC TN1400 99-020~23, (1999).
- 2) OECD/NEA: Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories, (1992).
- 3) 日本原子力研究開発機構:平成29年度地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発5か年成果報告書, (2018).
- 4) 例えば, 日本原子力学会:放射性廃棄物地層処分の学際的評価, (2014).

著者紹介



若杉圭一郎 (わかすぎ・けいいちろう)
東海大学工学部
(専門分野)放射性廃棄物処分・安全評価

コミュニケーションのある熱水カロードマップによる展望

Prospects based on T-H Roadmap through Communication

中村 秀夫

Hideo Nakamura

KEYWORDS: *Thermal-Hydraulics Division, Roadmap, Reactor Technologies, Severe Accident, Safety Analysis, Validation, Experiment, Communication, Prospects*

I. 熱流動部会の成り立ち

熱流動部会は今年、秋山守先生が初代委員長を務められた熱流動研究連絡会から部会へ移行後、26年目を迎える。当時の経緯は三島嘉一郎先生が部会 News Letter (NL)No.61 に記されており、研究連絡会の頃より多くの先生方の開拓的かつ先見的な取り組みにより、大変活発な活動ぶりであった。初代部会長の宮崎慶次先生は部会 NL No.1 で、「原子力分野における熱流動は、単に原子炉冷却材の熱流動と云うにとどまらず、原子炉の工学的安全性や新型炉設計の中心的課題と密接に関連しております。また、最近の熱流動数値解析の発展にはめざましいものがあります。原子力学会の中核でもあり今後も益々発展が期待される分野でもあります。」と述べられ、熱流動部会の役割と展望を示されている。

熱流動部会の活動は、(1)研究交流、(2)情報発信、(3)国際会議、(4)ワーキンググループ(WG)、(5)人材育成・表彰、などであり、歴代の部会長や役員、協力者の方々の献身的なご努力により、原子力に不可欠な成果が確実・着実に多数、挙げられてきた。そもそも熱流動部会は、「原子力の数ある仕事の中でも最も重要な、システムの安全性やプラント性能に係る研究や技術開発に携わる研究者、技術者の集団」であり、「本部会の活動や在り方そのものが社会に大きな責任を持っている」(芹澤昭示先生、部会 NL No.21)。これは、内田秀雄先生を主査とする「SAFE プロジェクト」小委員会¹⁾が、軽水炉の初号機運開の7年前(1963年)に日本原子力産業会議によって開始され、黎明期ながら軽水炉事故時の燃料溶融防止、放射性物質放出の防止と抑制を目的とする(工学的)後備安全防護装置(post incident device, 現 ECCS)の研究のために、多くの実験を重ねられた事実からも明白であろう。

熱流動部会はこの様に、非凡な先生方が多くの優れた成果を挙げ、指導的に進められてきており、浅学非才の筆者は明らかに比較にもならず、原子力発電の現場経験も欠くため本稿は荷が重すぎる。ただ、いわゆる「熱水カロードマップ(RM)」の策定(現在の熱水力安全評価基

盤技術高度化戦略マップ検討 WG)に2007年当初より関与してきた経験と立場を基に、創立60年を迎える原子力学会の展望を述べさせていただきたい。

II. 熱水カロードマップの役割と現状

熱水力 RM^{2, 3)}は、RM の役割を次の様に説明している。

- ・ 取り組む技術課題の意義や役割、実施内容の適切性を広く国民と共有し、プロセスの透明性を確保するためのプラットフォーム
- ・ 取り組む技術課題の到達点、重要度評価、研究・技術開発の内容、R&Dの実施策と必要な技術基盤、成果活用策、関係者(実施者、予算提供者)、計画や成果の評価法などを明示し、関係者間で共有するためのコミュニケーションツール ~ 他分野とのインターフェイス
- ・ 課題取り組みの進捗や成果利用を評価・確認し、改定の検討を行うための計画管理表
- ・ 研究者のテーマ探索等に資するライブラリ兼ガイドブック ~ ニーズとシーズのマッチング
- ・ 研究・開発をはじめとする関係組織における人材育成への参考資料

最新の2017年版³⁾には、福島第一原子力発電所(1F)事故の教訓を基に13件の重要課題を含む技術課題が、炉心損傷防止など8件の時系列RMにまとめられている。そこでは、上記の役割(目標)を達成するため、軽水炉の熱流動技術の全体を内外の情報を基にした技術マップで俯瞰し、継続的に安全性を改善・発展させる道筋がバックキャスト的に検討された。主要課題の個票(課題調査票)には、背景、目標、R&Dの到達点(主要文献)のほか、資源エネルギー庁や規制庁の競争的資金による研究や開発プログラムの実績も記載している。さらに、専門分野のRMとしての立ち位置を示すため、原子力全体での課題と展望をまとめた「軽水炉安全技術・人材RM」(原子力学会と資源エネルギー庁の共同策定)との技術課題での対応関係を表示している。

Ⅲ. 今後の課題とは何か

熱水力 RM はこのように、分野の RM として軽水炉に関わる技術課題と到達点を網羅し、改善や新たな展開に必要なポイントを詳しく示していると、改定を進める WG 幹事は考えていた。ところが、2018 年春の年会で実施された拡大幹事会で、「学」の委員より「重要課題であるシビアアクシデント (SA) 解析コードの機能の記述が概略的過ぎ、目指す性能目標が不明瞭である。本来、R&D の成果の大部分は評価解析コードや分析モデルに収斂するため、そこから R&D 基盤技術や現象等、個々の課題が整理されるべきではないか」と、厳しくものを射た意見がなされた。幹事団は即座に、RM の記載ぶりの再検討を開始した。ただ、更に根本的な部分にも問題はないだろうか。このため、熱流動が直面する課題をあらためて考えてみたい。

大塚雅哉氏は部会 NL No.69(2010 年)に、「熱流動研究の難しさは、強い非線形性に基づく現象のモデル化の難しさ、予測の難しさにあります。数値シミュレーション技術と実験計測技術の発展により現象の解明が進み、予測精度が向上してきましたが、マルチスケール、マルチフィジックスの高精度モデリング、シミュレーション技術の V&V など、さらなる予測手法の精度向上、適用範囲拡大、信頼性確保が求められています。」と分析されている。これは、妥当性確認 (validation) 用データが有る領域を超えた先の現象を評価する時の、現象のスケール (外挿と内挿) の困難性を言い当てられているとも思われる。この、validation データを欠く領域では、どの様にすれば数値解析 (安全評価) 結果の信頼性を確保し、正確に不確かさの評価が行えるのだろうか。類推を進めれば、次の様な課題が例として想起される。これらの幾つかは熱水力 RM において、重要課題として検討されている。

1. 国産安全評価解析コードの開発

我が国では主に、米国内産業界が開発、または米国原子力規制委員会 (USNRC) が米国エネルギー省 (USDOE) の国立研究所と開発した解析コードを用い、事故現象を解明して作成した新たな相関式等を同コードに導入・改良して、安全評価に利用している。SAMPSON, THALES 以外の SA 解析コードも同様である。独自の国産解析コードを持つことで、新たな解析性能の獲得のほか、米国内事情に影響されない抜本的な改良、徹底した validation が可能になり、数値計算に係る我が国の実力の養成を図ることができる。例えば、熱水力解析コードは原子力規制委員会・規制庁により開発が進められているが、多様な試験データによる系統的な validation が必須のため、全日本の関係者を巻き込み、客観性を確保した実施が望まれる。

2. 検証用実規模データの整備とスケール分析⁴⁾

軽水炉は巨大なシステムであり、高温高压の蒸気・水二相流動を全ての事故条件で再現した validation 用試験データの完備は、予算的にも困難と考えられている。ドイツ UPTF の様な実スケール (圧力、温度、サイズ) での再現試験は少数だが、小型試験の外挿結果から大きく外れる結果を示すものが多い。外挿の過程にどのような非線形性が潜むか未知なため、例えばレイノルズ数が 10^7 を超える実機流量計の誤差評価をはじめ、実用において多くの課題がある。安全評価では、現実的な表現力を持つ BE 解析コードと統計的不確かさ解析法を組み合わせた BEPU (Best Estimate plus Uncertainty) 法を利用する規制機関も海外には在るが、昨年、イタリアで行われた国際会議 BEPU2018 では、その有効性について十分なコンセンサスが得られなかった。これは、TMI 事故 (1979 年) 後に本格化した BE 解析コード開発のゴールにある最も重要な課題であり、世界的にブレイクスルーが切望されている。

3. 3 次元二相流動の現実的な解析

原子炉での流動は本質的に 3 次元であり、軽水炉の事故時にはその大部分が高压の蒸気・水二相流となる。炉の安全裕度の評価には、演算速度の速い 1 次元二流体コードが用いられるが、局所の詳細な現象解明には数値流体力学 (CFD) コードが多く利用される。単相流動でもあり、関西電力美浜 3 号の配管減肉・破断事故には、CFD コードが利用された。昨年、前出の BEPU2018 において、フランス CEA のドミニク・ベスチョン氏が 3 ループ PWR の大破断冷却材喪失事故 (LOCA) 時の二相流動の解析結果を 3 次元動画で紹介した。もちろん、validation 用データの無い結果の信頼性は確認できないが、実現象の再現機能を持つ数値解析技術が現れた時の妥当性確認は、上述のブレイクスルーが望まれる課題と同じ位置付けにあると考えられる。これは、多数の熱流動部会メンバーの参加により学会標準として整備された、いわゆる「V&V ガイドライン⁵⁾」の利用に係る現実的な課題でもあろう。

4. シビアアクシデント (SA) 時の現象評価、実機計装

超高温で炉内構造物と相互作用を繰り返し、様々な組成を持ちうる溶融炉心の振る舞いに関する validation 用データを得ることは、大きなチャレンジである。比較的低温で扱える模擬物質を利用した実験は多く行われたが、酸化ウランを主体とする高温のコリウムとは振る舞いが異なることから、例えば OECD/NEA では、模擬物質の結果を容易には受け入れない状況である。SA では、炉心が非対称に 3 次元損傷する可能性があるが、例えば福島第一では損傷状況も損傷過程も未解明で、小型実験に基づいた SA 解析コードの信頼性は十分ではない。この事情は、高温、高压、化学反応、高放射線量な

ど、過酷な環境で長期にわたる信頼性が要求される炉計装も同様である。SA 研究は、主に TMI 事故後に開始されたが、現在も世界中の研究者が困難課題にチャレンジを続けている。

5. 新しいチャレンジへの対応

近年、SA 時の高温でもキャンドリングや酸化を生じにくい材質の被覆管を持つ事故耐性燃料(ATF)の R&D が世界中で行われている。実機への適用は未知数であるが、ジルカロイとは全く異なる材質や形状の被覆管の(放射線照射をも考慮した)伝熱特性は、実機への適用が現実的になる段階で、確実に必要になると考えられる。

6. 炉物理と熱流動とのカップリング⁶⁾

炉の運転時の核燃料の特性は、安全性や経済性など多くの点で重要であるが、中性子束が変動する熱流動の影響下では炉物理側の評価が安定しない。古典的な課題であるが、Multi-Physics 課題として不確かさ削減を図るベンチマーク解析などの努力が世界的に続けられている。

以上のように、熱流動には信頼性と正確な不確かさ評価を必要とする数値解析技術の研究が多く、validation 試験が必要とされる。熱水力 RM に限らず、熱流動部会は計算科学技術部会と密接な協力関係にあり、ブレイクスルー課題へのチャレンジも図られている。

IV. 最後に

熱水力 RM は熱流動部会の大切な財産であり、軽水炉

の利用に係る課題を熱流動の視点で俯瞰し、技術課題に立脚して現実的な可能性を示唆する羅針盤である。現在は改定の途上にあるが、その改定の過程になされる情報探索や議論、発信こそが大切である。今こそ、部会 NL で繰り返し強調されてきた双方向コミュニケーションを熱流動部会として実現し、国際感覚を有する多くの優秀な若手研究者・技術者により次代への道筋が示されるなら、我が国の原子力に真の希望を見いだせるのではないか。

— 参考文献 —

- 1) 日本原子力産業会議 安特研 SAFE プロジェクト小委員会「SAFE プロジェクト小委員会報告書」(1966).
- 2) 原子力学会誌 Vol.60(4) (2018)33.
- 3) 熱流動部会 HP : http://www.aesj.or.jp/~thd/committee/TH-RM/TH-RM_r.pdf
- 4) OECD/NEA, NEA/CSNI/R(2016)14.
- 5) 日本原子力学会標準, AESJ-SC-A008 : 2015.
- 6) 例えば, OECD/NEA UAM-LWR, HP: <https://www.oecd-nea.org/science/wprs/egrsltb/UAM/>

著者紹介



中村秀夫 (なかむら・ひでお)
日本原子力研究開発機構



From Editors 編集委員会からのお知らせ

— 最近の編集委員会の話題より —
(3月8日第8回論文誌編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・1月16日から2月15日までに英文論文誌に23報、和文論文誌に1報の投稿があった。
- ・論文誌編集委員会の2019年度の分野別編集委員数を仮決定した。
- ・論文審査分野の見直し案を検討した。第7分野の再編を軸に検討を進める。
- ・Preprint Serverにより公開された論文は、当面、新規性を喪失しないと見なすこととした。
- ・英文化WGの進捗が報告された。
- ・Progress in Nuclear Science and TechnologyのVol.5 Actinides 2017とVol.6 ISORD-9が出版された。学会ホームページで無料公開中。
- ・JNST International Advisory Board 運営細則案を検討した。
- ・JNST Most Cited Article Award 2018とMost Popular Article Award 2018の副賞の配分額を決定した。

(3月8日第9回学会誌編集幹事会)

【学会誌関係】

- ・巻頭言、時論、その他の記事企画の進捗状況を確認し、掲載予定について検討した。
- ・3月に開催される春の年会の企画セッションで、執筆の打診中の回答状況を確認した。
- ・学会誌アンケートに寄せられた回答のうち、編集委員会の所掌範囲ではないものを纏め、理事会に提出することとした。

【合同幹事会】

- ・規定類担当委員より、現在実施中の編集委員会運営細則のメール審議の状況について報告があった。
- ・学会誌福島関連記事の英文化出版事業についての進捗状況について説明があった。
- ・論文誌の分野再編の説明と懸案事項について報告があった。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

これまでをふりかえり、今後を展望する(熱流動部会)

Made in Japan の熱水力 ～偉大な飛躍を目指して～

Japanese T-H: A Small Step Towards Giant Leap

三輪 修一郎

Shuichiro Miwa

KEYWORDS: *Thermal-Hydraulics Division, Generation IV Reactors, Engineering Education, Knowledge Succession*

サンフランシスコでの環太平洋原子力会議(PBNC)に出席後、Purdue 大学へ向かう機内にて本稿を執筆している。Purdue 大学が所在するインディアナ州は単身渡米した10代後半からPh.D.取得までの期間を過ごした地域であり、神戸生まれ、ソウル育ちの筆者にとっては第三の故郷だ。人類史上初めての月面着陸に成功し“*That's one small step for a man, one giant leap for mankind*”との名言を残したニール・アームストロングもPurdue 大学卒業生だ。婚約祝いと称し、半ば強引に手に入れた筆者の腕時計がアームストロングと同じ手巻き式スピードマスターなものその影響だ(宴会等での良き話題提供役となってくれている)。

Purdue 大学在学期間中、世界における日本の技術的プレゼンスが大きく変化していくのを垣間見た。アナログからデジタルへの移行に乗り遅れ、米国の家電量販店に溢れかえていた日本製品は次第に姿を消し、胸を張って「日本製」と言えるのはもはやカメラぐらいであろうか。時代の流れは時に残酷で、ヒット商品を生み出したグローバル企業でさえも技術の進化に乗り遅れば過去の会社になってしまう。家電業界とのタイムラグはあるが、日本の原子力分野も過渡期にあるのではないだろうか。

Ishii・Hibiki 研にてPh.D.取得後、2013年3月に23年ぶりに日本に戻り北海道大学で教鞭をとる生活が始まった。日本の大学生と接しながら、新たな拠点での研究活動や、原子力学会等の学会活動にも参加し、様々な逆カルチャーショックを経験した。日本では握手ではなくお辞儀をすること、「私がやります!」ではなく「〇〇させていただきます」と(形だけでも?)了承を得ること、紙媒体の書類を押印提出すること(サインでは駄目なのか?ペーパーレス化は?)、宴席では「とりあえずビール」から始めること...等にもようやく慣れてきた。その間、熱流動部会をはじめ原子力学会の皆様に対しては、このアメリカ帰りの太々しい若造による失礼な言動でご迷惑を多々おかけしたことかと思う(この場を借りてお詫び申し上げます)。そのような中でも、寛大にお付き合い頂いた皆様には感謝の気持ちで一杯である。

本稿では、30年後の原子力業界を考える上で、筆者が体験した海外での経験と、日本での逆カルチャーショック等を軸に、現在直面する課題と次世代へ向けての提案等を一若手教員の立場で執筆させて頂ければと思う。

I. 世界の中の日本

米国大学原子力工学科の教材に、2名の日本人が登場する。湯川秀樹先生のYukawa Potential(量子力学)と、抜山四郎先生のBoiling Curve(伝熱工学)である。北大着任後、機械工学科の大学院生が「抜山」の名前を知らなかったのにいささかショックを受けたのが懐かしい(先代の偉業を後世に伝えるのも我々の責務ではないだろうか...)。Purdue 大学院に進学し、熱流動分野の研究活動を本格的に始めた際には日本人研究者のプレゼンスに大変感銘を受けたのを覚えている。二流体モデルのIshii(石井護先生)、流動様式線図のMishima(三島嘉一郎先生)、大口径ドリフトフラックス相関式のKataoka(片岡勲先生)、界面積濃度輸送方程式のHibiki(日引俊詞先生)をはじめ、多数の日本人研究者の偉業が認知されている。世界各国から集まった学生や、熱流動研究者が、慣れない日本名を当然のように連呼している様子を見るのが誇らしかった。これらの研究の特徴として、力学をベースとした機構論的モデルの構築、ユニークな実験を提案する発想力、高精度な実験計測に加え、時代のニーズ、時代の先を見抜く視点、ユニークな独創性等が兼ね備わっており、日本の基礎研究力が世界的に評価されてきた点と重なり合うのではないだろうか。世界トップレベルの研究成果を残された先生方から、若手世代は単に学ぶに留まらず、独自のアイデアでそれらを更に発展させ、次世代へと継承していく責務があると考え。

近年の業界の動向を少し広い視野で見してみる。日本が福島第一原子力発電所事故による復興作業や既設炉再稼働に向けた手続きに追われる中、海外勢はせっせと先を進んでいる。我々がアジア勢の研究クオリティが低いと上から目線で評していた間に、中国や韓国では(かつての日本がそうであったように)欧米帰りの若手が中堅となり、研究プログラムをリードしながら着々と改革を進め

ている。筆者のPurdue大学時代の先輩は、中国国内大学に新設された原子力プログラムの学科長に最近抜擢され、海外研究者のリクルートに大忙しだ。熱流動の基礎研究において、日中韓のレベル差は近年では僅差となり、応用研究では日本の先を行く領域も出てきているように感じる。PBNC会議ではSMRやGen IV炉のパネルセッションが米国、カナダ、中国、韓国で構成され、大いに盛り上がっていた。次世代炉開発やグローバル展開における日本のプレゼンスの低下を感じざるを得なかった(文科省の方が登壇されたのがせめてもの救いか...)。勿論、学会発表・講演だけが全てではないが、国際舞台における情報発信は、自らのプレゼンスや考えを内外に示すのと同等であり、日本人が考えている以上に重要である。建前本音社会で出る杭は打たれ、他者と同調することを美德とする日本人が「何を考えているのか分からない」と国際舞台で評されるのはそのためかもしれない。今後、Gen IV時代に突入となれば日本の立ち位置は今以上に弱くなるのではないかと危惧している。学会の未来を担う国内大学の情勢も明るくない。人事凍結中の国立大学が多数ある中、世界大学ランキングや論文数、就職率等の数字に必要以上に影響され、場当たりの改革案に教職員が振り回され、消耗している印象だ。この調子では30年後の原子力業界は一体どうなってしまうのか? ビジョン無き組織に未来は無い。今一度この業界の組織分析を冷静に行い、All Japanで知恵を出し合いながら今置かれているピンチを乗り越え、今後我々が目指すべきビジョンを次世代に提示する必要があるのではないか。

II. 日本が残していくべきもの

原子力熱流動分野における日本の強みを筆者が挙げるとすれば、(1)基礎研究力と、(2)高品質製品の安定供給力の2点だ。独創的なアイデアによる実験方法の発案や、モデル構築に至るまでコツコツと忍耐強く研鑽を積み重ねることが重要な基礎研究と、「匠の技」に表れる伝統的なものづくり文化は日本が世界に誇れるものだ。これに(米国が得意とする)誰もが使いこなせるシステムを作り上げる力とスピーディーで合理的な経営判断力、(韓国が得意とする)現地のニーズを徹底的に分析した上での積極的なマーケティング力とアグレッシブな交渉力等が備わっていれば、前述した家電製品をはじめ、日本製軽水炉は今以上に躍進していたかもしれない。

70~90年代にかけて国内大学にて展開されてきた熱流動の基礎研究の結果は、モデルや実験相関式といった形で安全解析コード等に適用され、ベンチマーク用のデータとして頻繁に引用されたりもしている。筆者がPh.D.在学期間中、指導教官の指針で複数の研究プロジェクトを平行にこなす訓練を一年目から受けてきた。数々の実験装置を設計・製作したが、まだまだデータが取得できる実験装置を、プロジェクトが終了する理

由のみで泣く泣くバラした事も多々ある。このような中小企業体制に似た米国大学研究室とは異なり、基礎研究に打ち込める土壌が日本にはまだまだ残っている。これは大きな強みであると筆者は考える。ある意味恵まれたこの環境を我々はフルに活かしているだろうか?

2番目に挙げた高品質製品の安定供給には、日本文化が誇る次世代への技術伝承がリンクしていると考えられる。日本文化に疎い筆者は、昨年からの妻の影響で週末に茶道を習い始めた。出だしから袱紗捌きで挫折しかけ、「道」の深さに気が遠くなりかけた筆者は、お稽古をビデオ撮影しても良いか思わず尋ねてしまった。古くから伝わるこの伝統にはHow Toを書き記した教科書もノートも存在しない。師匠のフォームを見よう見まねで覚え、何度も何度も歳月をかけて繰り返しながらマスターしていき、次世代へと引き継がれていくものだと聞いた。1300年近くの歴史を誇る伊勢神宮も同様だ。20年毎に社殿を作り替え、次世代へと技術を確実に継承する。当時の平均寿命でも「復習」することができるよう、20年の周期となったそうだ。原子力分野においても、これまで蓄積してきたMade in Japanのノウハウを次世代へ確実に継承していくことは喫緊の課題であると考えられる。国公立大学への運営交付金の減少が昨今話題となっているが、日本の大学院には米国のようなT.A.R.A (Teaching/Research Assistantship)制度は無く、毎年決まった数の学生が研究室に配属される。米国大学の莫大な研究費に圧倒されがちだが、その内訳はかなりシビアだ。Purdue大学では高額なオーバーヘッドに加え、大学院生一人あたりの人件費が年間600万円近く(学費+生活費援助)かかり、全てを研究費から賄う必要がある。予算をほぼ全額研究に投資できる上、次世代人材が毎年配属される日本の大学は、この業界の将来を担う人材への教育に注力できているだろうか?

III. まずは One Small Step から

北大に着任した当初、内向き志向と聞いていた日本人学生があまりにも海外に出たがらないのを目の当たりにし、ショックを受けた。日本での生活は快適であると同時に、ある意味ぬるま湯に浸かる感覚にも近い。熾烈なグローバル競争が展開される原子力業界のみならず、これからの時代を技術者・研究者として生き抜く上で、現状のままでは先行き真暗だ。そのためにも英語力はマストである(プログラミング力も付け加えておく)。北大工学部では、社会人であれば授業料を払ってでも受講したくなるような英語・英文講座が頻繁に開催されるが、そのようなリソースを活用しているのはごく一部の学生のみ。内向き志向のみならず、知的好奇心そのものが米国大学学生に比べて欠落している。それもそのはず、単位さえ取れば卒業出来てしまう「就職予備校」が国内大学の実態。平均的な学生の関心はエントリーシートや面

接対策、インターンシップと称した青田刈り&お小遣い稼ぎにせよと参加することのように映る。その結果、レイノルズ数の定義も怪しい大学院生が熱流動の研究室に配属できてしまうという(米国の大学では有り得ない)事例もしばしば生じている。本質的な解決策は卒業要件を厳しくし、米国同様、成果主義による評価を導入することだが、日本における既存システム改革、マクロ的变化は(黒船来襲でもない限り)難しいのかもしれない。現状での効果的な解決策の一つとしては、海外に出て世界との温度差を学生に肌で感じてもらうことだ。研究室間の海外インターンシップでも良い。米国機械学会、日本機械学会、中国核学会の3極の主催により、運営されている原子力工学国際会議(ICONE)では、学生達による Student Paper Competition が毎年開催されており、筆者も Track Co-chair として 2016 年より携わっている。日本機械学会の動力エネルギーシステム部門より選抜され、経済的支援を受ける 15 名程の国内学生は、海外学生と寝食を共にしながら口頭発表、ポスター発表を通して相互評価を行う。中には人生初の海外渡航の学生もいるが、この 1 週間で国内学生の目つきは明らかに変わる。会議が終わればいつもの日常生活に戻るのかもしれないが、その中の一人が変わるきっかけとなれば、業界としても意味があるのではないだろうか。学生は学会の将来であり、最優先されるべき投資先だ。日本原子力学会においても機械学会同様の取り組みがあっても良いのではないか? 熱流動部会であれば比較的レベルの高い原子炉熱流動国際会議(NURETH)にチャレンジさせてみるのも一案だ。学生時代はとにかく背伸びをし、厳しくレベルの高い環境に身を置くことが大切だ。

技術継承を兼ねた勉強会の開催についても言及したい。筆者は若手交流フォーラムや北海道支部での活動に携わってきた。しかしながら、イベントを企画するも参加者がなかなか集まらない。頑張っただけでようやくボーダーライン。筆者が大学院時代、会議参加は時間の無駄とのポリシーを貫き指導教員に頭を下げて頼み込み、3 年目になってようやく NURETH に参加させてもらった(同僚の研究成果も含め、3 件の口頭発表を行った)。様々な会議に参加できる日本の学生が羨ましい限りだが、蓋を開けてみれば参加者の顔ぶれはほぼ毎回同じ。内輪で研究討議を続けていてもマンネリ化していきただけのように感じる。なぜこのような事態が生じるのか。原因の一つとして考えられるのが膨大な会議の数である。秋・春の全国大会をはじめ、支部大会、部会がスポンサーする数々の共催会議。熱流動分野ではこれと同様の集まりが、日本機械学会、混相流学会、伝熱学会等でも持たれる。これは生産性の高い形態であると言えないのではないか。会議主催の際には損益分岐点の話が持ち出されるが、学生の教育、研究指導に本来従事すべき教員のボランティアによって成り立っているシステム

だ。教員と学生の心の余裕を奪う、本来の趣旨とは逆効果になってしまっているように思える。国内大学には、雑用をこなしてこそ評価されるという古き良き時代の風潮が根付いているようだが、昨今の膨大なメール処理と事務雑用に明け暮れる教員の背中を見ながら、研究者を志す若手が果たしてついてくるだろうか? 定員割れが続く博士後期課程プログラムの実態がそれを物語っているように思える。筆者が考えるに、今の国内若手研究者に必要なのは、スライドを眺める発表会では無く(研究発表はトップレベルの国際会議で年に数回 100% の力で自信作をぶつければ良い)、業種を超えた設定で、机上や実験装置、コンピューターを前に行う徹底的な議論・討議(Discussion)の場だと考える。60 周年の節目に、学会活動に関しても今一度精査が行われ、時代に合った活動形態へと進化できればと考える。

IV. 30 年後の日本の原子力業界

福島第一原子力発電所の事故以降、国内の熱流動基礎研究分野に関してみると、これからのビジョンが見えにくい状況が続いているように見える。特に、大学・研究所・産業の連携が弱まり、力の入れ場所がわからなくなっているようにも感じる。アカデミアの世界に浸っていると、業界で実際に問題となっている情報を耳にする機会が(個人的繋がりを除けば)大変少ない。本来であれば学会がインダストリーとアカデミアの橋渡し役を担うべきかと考えるが、数多くの会議が開催される割に、情報共有の場としての役割が果たせていないように感じる。これだけが原因では無いと思うが、近年の国内大学の研究動向はややガラパゴス化しつつあるような印象さえも受ける。米国エネルギー省ではアイダホ国立研究所を主体に今後の重要研究課題についての Research レビューが定期的に行われる。どのような知見の拡充が必要となるか徹底的に議論され、研究公募に反映されるといふ。同様な取り組みを日本でも定期的に行えないか。熱水力ロードマップ(RM)はそのための第一歩であると考えられる。まずは、RM のエッセンスを各研究機関が汲み取り、All Japan として数々の難題解決にむけて一歩ずつ取り組んでいくことが、30 年後に向けた大きな躍進("one giant leap")へと繋がるのではないだろうか。

以上、帰国 6 年目の若手による散漫な乱文にお付き合い頂きましたこと、御礼申し上げます。この続きは、学会等の場で建設的な議論を通して行えれば幸いです。

著者紹介

三輪修一郎 (みわ・しゅういちろう)
北海道大学



未来の若者につなぐ放射線計測研究

Prospects for an attractive radiation research

高橋 浩之

Hiroyuki Takahashi

KEYWORDS: *Radiation Measurements, Gamma-ray Imaging, Compton Camera, Neutron Imaging, Harsh Environment*

昨今の自然災害の多発は、おそらく地球温暖化の影響もあるであろう。東日本大震災以降は筆者の経験から照らして尋常とは思われない災害が立て続けに生じており、自然の猛威が益々激化しているようにも感じる。原子力発電プラントの再稼働の流れもそれにより妨げられ、国民の原子力に期待する気持ちも低下の一途をたどっているように思われる。先に生じた北海道の電力不足においても、泊発電所を稼働させて対応しようというオプションがまったく俎上にも乗らないのは、現に生じている問題よりもリスクの方が過大評価されてしまっているからであろうが、現在の原子力を象徴しているものと思われる。本来、各種学会からの提言などもあってよいのではと思うが、常に後手にまわっているような印象があり、迅速・機動的に意思決定をして何かを外部に発信するという機能が弱いようにも思われる。政治家が自己の信念に基づき原発の廃絶を声高に唱えることはニュースでよく報道されているが、それに比較して、冷静な意見が学会から何かでてくるということはあまりないように思う。しかし、このように原子力発電を軽視するような傾向が長期化するにつれて、将来を担うべき若者にとって、原子力の将来が見通しにくくなっているのは事実であろう。将来を考えたとき、国内の軽水炉プラントは作らないとしても、廃炉は残り、放射性廃棄物処分の問題はずっと続くので、原子力研究の必要性を疑うものはないが、今の規模での原子力研究を継続させることの是非は問われよう。わが国が原子力研究にこれまで投入してきたリソースは莫大であり、それにより原子力研究は非常に高い水準に到達しているもので、これをどのよう有効利用するのかは重要な視点で、当面、原子力学会として重要な課題はこの部分であろう。具体的には、新型炉など国民から受け入れられる新たな形での原子力エネルギーへのパラダイムシフトをどうやっていくのかということを示し、先導していくことではないかと思う。新しい炉を開発するとなるとそのための開発費や開発期間が膨大になることが気になるが、小型炉などのアプローチをとれば、現実的なところに落とし込んで、研究開発に着手していくことができるのではないかとい

う期待もある。核融合は、国民から受容される原子力エネルギーの一つの形であり、是非核融合をやりたいとって飛び込んでくる若者も多いので、そのような期待をもう少し広く受け止められることはできないかと思う。たとえば、核融合-核分裂ハイブリッド炉のような形で新たなコンパクト発電炉の研究を展開し、将来の核融合炉につなぐパスを作り、大量に発生する高速中性子の有効利用や、それにより生じる多くの問題に関する研究を展開する、というようにすれば、単に核融合の研究以外にも多くの原子力研究者が参加でき、それによって核融合エネルギー利用の実用化を加速することができるのではないかと思われる。

また、中性子源としてみたときの原子炉の魅力は大きいので、そのような新しい炉の研究と中性子利用をセットにして、新しい原子力研究を展開する、ということも可能ではないかと思われる。放射線工学部会では、中性子計測技術をより深化することになり、現状の中性子計測技術を核に発展させていくことができよう。福島第一原子力発電所事故以降は、放射線工学部会の関連では、ガンマ線計測技術において大きな進展があった。事故後に行われた福井大学における原子力学会においては、放射線工学部会からは、福島第一原発事故対応に係る環境放射線測定、というテーマで、環境放射線と放射能測定技術の新展開、放射線防護に用いられる線量概念、汚染分布調査における放射線計測、について3件の講演が行われたが¹⁾、当時は環境汚染への対応が喫緊の課題であり、その面からの放射線計測技術は大きく進展した。線量マップの作成や核種分離に有効な高性能シンチレーション検出器が開発され、ガンマ線のイメージングにおいては、事故前と比べてコンプトンカメラやピンホールカメラなどのガンマカメラの開発が進んだ。特に入射方向に対して分解能をもつ、指向性検出器の有用性が再認識されたと思われる。環境の放射能汚染に関しては、放射性セシウムなどのガンマ線放出核種が主体であるので、ガンマ線計測にハイライトが当てられ、中性子計測については、あまり注目されることがなかったと思われるが、中性子計測に関してはやるべきことが多い。中性

子はある意味では、原子力研究の要であり、中性子計測の専門家が集うのは原子力学会以外にはあまりない。使用済み核燃料についても中性子計測は直接的な情報を与えるので、今後は中性子計測の高度化を行うべきであろう。特にイメージング技術については原理的にガンマ線やX線のイメージングと同程度のレベルまで到達できるはずであるので、そのような開発を進め、技術レベルを高めていくべきではないかと思われる。

放射線工学は原子力分野以外にも医療においても有効に用いられている。放射線を用いた診断や治療は、レントゲンによるX線の発生以来、CTなどさまざまな形に進化をとげ、現代医療においてなくてはならない存在となっている。X線診断は既に100umを切る分解能を達成しているし、位相コントラスト法などの新しい原理で、イメージングの領域を拡大している。PET (Positron Emission Tomography) や SPECT (Single Photon Emission Tomography) に代表される核医学では、最近進展しているアルファ線放出核種を利用した α 線内用療法が成功しつつあるが、これに対応した放射能分布計測技術が求められているところである。たとえば α 線放出のあとにも核は励起されており、これが基底状態に落ちるところでガンマ線あるいはX線を放出するので、これを利用すればよいと考えられる。また、このような新たな核種の利用は、薬剤の合成と強く関係するので、さまざまな核種を用いた研究が考えられる。特に、さまざまな核種の特性を生かしてどのようにイメージングを行うかということは、原子力学会における放射線計測分野の重要な研究テーマとなるであろう。エネルギーとしての原子力がなかなか国民に受け入れられないとしてもエネルギー利用以外の原子力はまだ十分に探究されているわけではなく多くの可能性を秘めているものと思われる。医療などへの応用は、まだまだ十分な可能性をもっていると思われる。筆者らは最近、PETに代わる高感度診断法として、多光子同時計測による新しい画像診断法を提案しているが²⁾、同時計測やガンマ線のエネルギーなど放射線計測法としての議論は核医学会単体では深めることが難しく、原子力学会のような場で議論をしていかななくてはならない領域であろうと認識しており、核医学会との連携を深めていくのがよいと思われる。アルファ線、ベータ線、ガンマ線などを用いた診断・治療に加え、今後はさらに高次の放射線利用に関する技術として発展を遂げていくのにこのような活動が必要であろう。さて、医療以外はどうかということであるが、セキュリティやトレーサー利用などがある。特にこの中で、トレーサーとしての放射線利用については、蛍光分

子の性能向上につれて、トレーサーとしてのRIは必要ないとして、駆逐されてきた歴史がある。他方、蛍光分子は大きな構造を有するため、トレーサーとして用いた場合に本当にその動態を抑えきれていないだろうと推測される。そこで、このようなトレーサーとしての完全性を検証することを行ってはどうかと思う。RIの利用と比較してどの程度ずれるのかを知ることは、トレーサーの選択の上で重要であろうが、それが定量的に行われていないと思われる。具体的にどの程度の精度でトレーサーが追随しているかを代表的な分子で系統的に調べておくことは一つの基礎データとして重要と思われる。このような研究は、主に物理的な面では放射線工学会がカバーしているが、化学・生物学的な側面を併せもつため、他の機関との共同作業が必須である。たとえば、アイソトープ協会と連携の上で、原子力学会で行うということが考えられる。また、福島事故以降に問題意識としてあがってきた放射線計測技術としては、非常に高い線量のもとで動作する放射線検出器というものがある。感度を落とすことで高線量下での計測が可能であることに加えて、情報量を確保しながら、どうやって極限環境下の計測を実施するのか、ということである。一つは超伝導放射線計測³⁾のように、現在実用になっていないような新たな技術に期待するということであるが、現状技術をもとにする限り、放射線の遮蔽技術と計測技術の組み合わせにより対応するしかなく、これは放射線工学会の2本柱を組み合わせる実現していかなくてはならないが、今後の部会活動において意識して進めていくべき点であろう。

— 参考文献 —

- 1) 日本原子力学会 2012年春の年会放射線工学会企画セッション、福島第一原発事故対応に係る環境放射線測定、福井大学、2012年3月21日。
- 2) Yoshihara, Y., Shimazoe, K., Mizumachi, Y. and Takahashi, H., Evaluation of double photon coincidence Compton imaging method with GEANT4 simulation, Nucl. Instr. and Meth. A873, pp. 51-55(2017).
- 3) 日本原子力学会 2017年秋の大会放射線工学会企画セッション、超伝導検出器の最新情報、北海道大学、2017年9月14日。

著者紹介



高橋浩之 (たかはし・ひろゆき)
 東京大学大学院工学系研究科
 (専門分野/関心分野)放射線計測全般にわたる研究を展開

放射線挙動・遮へい分野への期待

Expectations of the Radiation Physics and Shielding Research

萩原 雅之

Masayuki Hagiwara

KEYWORDS: *Radiation Shield, Accelerator, Benchmark experiments, risk assessment*

はじめに

放射線工学部会では、原子力技術利用において切っても切れない放射線をキーワードとして、原子力開発のみならず放射線利用分野に携わる多くの研究者・技術者間の情報伝達と議論を円滑にし、活性化する活動を行っています。その原点は、原子力学会内における放射線関連研究者の共通の場を作ることの必要性から1994年に発足した「放射線工学研究連絡会」であり¹⁾、60周年を迎える原子力学会本体に比べると若いですが、近年の加速器・計測・解析技術の進展や放射線を利用した医療技術の先進医療認定等が追い風となって、現在精力的な活動が進められています。放射線工学部会が対象とする分野は、おおむね(1)放射線挙動・遮へい、(2)放射線計測、(3)放射線線量と分類できますが、本稿では、今後の原子力関連施設開発を推進していく上で欠くことのできない要素技術の一つである(1)放射線挙動・遮へいに焦点を当て、現状と今後の課題をまとめたいと思います。

放射線挙動・遮へい分野の進展と現在

放射線挙動・遮へい分野は、原子炉、核燃料取扱施設、放射性同位元素取扱施設、加速器施設等の放射線安全設計を合理的に(事実に基づいて適切に)実施するために必要不可欠な分野であります。近年においては、日本原子力研究開発機構(JAEA)が中心となって開発している粒子・重イオン輸送計算コードPHITS(Particle and Heavy Ion Transport code System)²⁾や高エネルギー加速器研究機構(KEK)によって改良が進められている電子ガンマ線シャワー(EGS)コード³⁾に代表されるようなシミュレーション技術の進展や計算の基となるJENDL-4.0(JAEAが開発)⁴⁾等の核データの精度向上に伴い、実測と設計評価値間の差異は減少してきていますが、放射線に対する不安感が依然として一般公衆に存在するとともに、遮へい実験等で得られた最新の知見を安全規制に反映する取組みが低調であることから、高エネルギー加速器等の新しい施設の設計には、比較的大きな裕度を見込まねばならないのが現状です。一方で、多くのユーザーが利用す

る共同利用施設を建設・運営していく上での経済性や利便性と放射線に対する安全・安心の確保との間で生じる相反する要求を解決するためには、より高い精度の技術や管理能力が求められています。実際に、世界最高レベルのビーム強度を有する高エネルギー加速器施設：大強度陽子加速器施設(J-PARC)やSuperKEKB, RI ビームファクトリー(RIBF), 重粒子医療線施設(HIMAC等)がここ20年間で矢継ぎ早に建設され、国内のみならず世界中の原子核・素粒子物理学分野や物質・生命科学分野の研究者によって積極的に利用されています。このような加速器は最新の研究成果を即座に反映させることで、その性能を常に向上させており、J-PARC 物質・生命科学実験施設やホウ素中性子捕捉療法(BNCT: Boron Neutron Capture Therapy)等の産業・医療応用のための加速器中性子源開発に至っては、日本の技術が世界をリードするようになってきています。一方で、2011年3月11日に発生した未曾有の大地震(東日本大震災)によってもたらされた福島第1原子力発電所の事故、2013年5月23日に偶発的現象が重なり発生したJ-PARCハドロン実験施設放射能漏えい事象等をこの10年間で経験し、大規模実験施設では異常事象への潜在的なリスク評価やリスク管理が重要となってきています。リスクは発生確率×障害の規模で評価されますので、障害の規模が大きいと想定される事象には、障害の規模を低減させる措置とともに発生確率を合理的に低減させるような管理を行う必要があります。このような原子力関連施設を取り巻く社会環境の変化に伴って、放射線挙動・遮へい分野も幅広い研究が必要となってきており、新しい高エネルギー加速器の設計や廃炉研究においてはフロンティア科学的な要素が多く、これまでの施設開発や運用で蓄積してきた評価・測定技術が未知の領域(エネルギー、強度、加速粒子、高線量)にも適用可能か、障害規模の大きな潜在的リスクを評価できるか等が重要となってくると考えられます。

高エネルギー加速器遮へい実験

海外では、高エネルギー加速器施設の遮へい設計には、最新の学術的知見を基に開発された高エネルギー粒

子輸送モンテカルロ計算コードを用いるのが一般的となっています⁵⁾。一方で、高エネルギー粒子輸送モンテカルロ計算コードは、高エネルギー陽子・中性子と標的原子核の核反応を記述する物理モデルを基本としているため、加速器の遮へい設計のような放射線の複雑な物質内挙動に対して十分に精度検証されているわけではありません。そのため、単純体系を用いたベンチマーク実験を行い、一次粒子だけでなく二次粒子の遮へい体内の分布や遮へい体透過後のエネルギースペクトル、線量等の複合的な実測値を得て、評価結果との比較・検証を行うことが重要となります。これまで基礎物理研究を目的とする高エネルギー加速器施設において放射線安全研究のための専有ビームタイムを取得することは極めて困難でありましたが、国外4機関(欧州原子核研究機構(CERN), ヘルムホルツ研究機関(ドイツ), パドヴァ大学(イタリア), カリフォルニア大学), 国内8機関(KEK, JAEA, 京大, 九大, 産総研, 量研機構, 清水建設, 富士電機)が共同で大阪大学核物理研究センター(RCNP)の数100MeV準単色中性子源を用いた国際共同実験プロジェクトを企画し、高エネルギー加速器の遮へい評価法の検証に重要な中高エネルギー領域の核データや中性子遮蔽ベンチマークデータを取得することができました。図1に遮へい体後の中性子エネルギースペクトルの測定結果と計算値との比較の例を示しますが、この国際共同研究の成果は、2016年10月にパリで開催された第13回放射線遮へい国際会議(ICRS-13)の特別セッションのシリーズ講演に取り上げられ、世界の放射線遮へいコミュニティにおいて高く評価されました⁶⁾。CERNでは、RP weekという放射線防護グループに割り当てられているCERN High Energy Accelerator Mixed-field (CHARM) 実験施設のビームタイムが年に1週間あります。そのビームタイムを利用して、KEK, CERN, 清水建設, 九州大学, 産総研と共同で行った24GeV陽子入射における中性子の遮へい透過実験、熱中性子束分布測定実験等の結果⁷⁾は、経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)のデータベース(Shielding Integral Benchmark Archive and Database: SINBAD)への登録が予定されており、高エネルギー遮へい実験の分野では、日本が世界中の放射線関連研究者への情報発信の中心になりつつあります。

北上山地が候補地となっている国際リニアコライダー(ILC)は、超高エネルギーの電子・陽電子の衝突実験を行い、未知の物理現象を探索する加速器ですが、このようなフロンティア科学では工学的にも必ず未知の領域があります。昨今では、放射線遮へいのような要素基盤技術については、加速器施設のビームタイムの確保だけでなく、研究予算の確保も難しい状況になってきておりますが、世界中の研究リソースを結集して効率的・

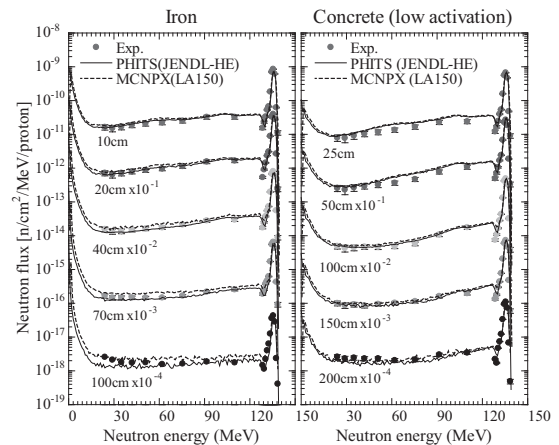


図1 遮へい体後の中性子エネルギースペクトルの測定結果と計算値との比較

効果的に社会的ニーズに合うような課題解決に取り組んでいき、得られた学術的研究成果をふまえた、最新の知見が原子力関連施設の遮へい設計および許認可に活かされるとともに、今後より正確な知識の普及を行うことにより、一般公衆に存在する放射線に対する不安感が少しずつ払拭されることを期待します。

参考文献

- 1) 日本原子力学会誌, Vol. 51, No. 4, pp.275-277 (2009), 部会活動(放射線工学部会)放射線工学部会14年の歩みと今後放射線をキーワードとして.
- 2) T. Sato et al., Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, pp. 684-690 (2018).
- 3) H. Hirayama et al., The EGS5 Code System, KEK Report2005-8, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), (2005).
- 4) K. Shibata et al., JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, J. Nucl. Sci. Technol. 48 (1), pp. 1-30 (2011).
- 5) 中島宏, 高エネルギー粒子加速器施設の遮蔽設計法の現状とその精度, RIST ニュース, No. 47 (2009).
- 6) M. Hagiwara et al., Shielding experiments of concrete and iron for the 244 MeV and 387 MeV quasi-mono energetic neutrons using an organic scintillator (at RCNP, Osaka Univ.), EPJ Web of Conferences, 153 08021 (2017).
- 7) T. Oyama et al., Measurement and calculation of thermal neutrons induced by the 24 GeV/c proton bombardment of a thick copper target, Nucl. Instr. and Meth. B, 434 pp. 29-36 (2018).

著者紹介

萩原雅之 (はぎわら・まさゆき)

高エネルギー加速器研究機 共通基盤研究施設

専門は加速器放射線防護, 放射線計測, 核データ測定



改めて考える“人間中心の設計”

Rethink on Human-Centered Design

佐相 邦英

Kunihide Sasou

KEYWORDS: *human-centered-design, human factors, AI system, automatization*

進化するシステムと“人間”

「当社の AI(人工知能)システムの暴走が、今回の事故の原因です」

「今後、AIシステムの精度を高めるとともに、人間がシステムの動きを監視し、必要な時には人間の制御に切り替える仕組みを構築します」

AIシステムは確実に進化していき、ヒューマンエラーをする人間に代わって仕事を行う場面^{1,2)}も出てくるであろう。そして、プラント設備の完全自動化運転・保守というのも、ロボット技術とあわせて技術的には可能な時代が来るかもしれない。しかし、様々なことを考慮して構築された AI システムであっても、どこかに落とし穴があって事故を起こし(“落とし穴はない”と言い切ること自体、安全文化が劣化している)、その結果、冒頭のような“記者会見”が行われることもあり得るだろう。

さて、この“記者会見”にあるような、『AIシステムに代わって人間が制御を行う状況』とは何であろうか。それは、AIシステムでも手に負えない“困難な状況”であり、人間はその“困難な状況”を解決できるだけの十分な知識とスキルを備えていなければならないことになる。見方を変えれば、“困難な状況”を解決できる十分な知識とスキルを持ちながら、その知識とスキルを発揮する場面が極めて稀であるために、ほとんどの時間を眠い目をこすりながら AI システムの動きを監視して過ごしていることになりはしないだろうか。

作業計画書や作業手順書の作成といったデスクワークにおいても、AIシステムの導入が進むかもしれない。忙しい人にとっては、非常に助かるシステムである。しかし、AIシステムが作成してきた作業計画書・作業手順書を鵜呑みにするわけにはいかない。計画書・手順書の妥当性がわかるだけの知識が人間には必要である。

つまり、AIシステムが進化した将来においても、人間が持っていなければならない知識やスキルは、現在と何も変わらないということになるであろう。

“人間”とシステムの協働

NASA の自動化の原則³⁾が示すように自動化は、人間にはできないこと、危険なこと、自動化した方が効率的なことなどを対象とすべきである。しかし、自動化した方がいいが、万が一に備えて睡魔と闘いながら自動化システムを監視したり、いつ人間が介入する状況になるかわからないという緊張感を持ちつづければならないのでは、本末転倒である。ヒューマンエラーの恐れはあるものの、初めから人間に任せておいたほうがいいのではないか。その方が、緊張感をもって仕事ができるとともに、達成感を感じられるだろう。また、仕事に必要な知識やスキルの学習・習得にも、意欲が沸くであろう。

人間はヒューマンエラーをする。これは何としても減らさなければならない。一方、人間に代わって自動制御を行える AI システムであれば、場面ごとの最適な判断や行動を導き出せるはずである。ということは、判断や行動の主体は生身の人間が行い、AI システムは人間の行動を監視しヒューマンエラーに繋がるような判断・行動があればアラートを出すような協働関係が、双方を活かす方法ではないだろうか。

つまり、人間を中心に据えてシステム全体を設計するという、昔から言われている“人間中心の設計”の考え方を再認識する必要があるだろう。

“人間”をサポートする研究，“人間”を育てる研究

では、そんな“協働関係”を実現するためには、何が必要だろうか。

“人間”が直面する課題に対して、AIシステムが最適と考える解決策を見いだせる機能は不可欠である。さらに、“人間”の立ち位置や視線の動き、発話(音声)、あるいは今後の技術発展によって計測できるようになる生体情報から、“人間”の意図を解釈できる機能の開発が必要であろう。これらによって、“人間”を見守りながら、必要に応じて適切な助言を行える、先進的な AI システムを期待したい。

上記のような、人間をサポートしてくれる夢のようなAIシステムができたからといって、“人間”が何もしなくていいというわけではない。仕事内容に応じた専門的な知識やスキルの習得は当然のこと、ヒューマンエラー防止活動、安全文化醸成活動などにも取り組み続ける必要があるだろう。また“人間”には、想定を超える出来事にも対応できる柔軟性、すなわちレジリエンス^{4,5)}がある。福島第一原子力発電所での経験を踏まえれば、このような能力も伸ばしていく必要があろう。“人間”を育てるには、訓練やOJTも含めた“教育”という手段を採ることが一般的である。しかし、“人間”は教育を受けた内容を忘れることもあり、ことヒューマンエラーについては、『自分は大丈夫』と根拠のない自信を持つこともあることから、教育内容によっては、手を変え品を変えて教育を繰り返さざるをえない。このような実態を踏まえ、新しいアイデアやその時々IT技術などを取り入れながら、新たな“教育”方法・手法を開発し続けることが、今後も変わらず必要であらう。

— 参考文献 —

- 1) C.B.Frey, M.A.Osborne: The future of employment: how susceptible are jobs to computerization?, Oxford Martin School Working Paper(2013).
- 2) OECD: Automation and Independent Work in a digital Economy, POLICY BRIEF ON THE FUTURE OF WORK, OECD(2016).
- 3) 日本船用工業会, 船用機器におけるヒューマン・エレメントに関する研究動向調査, 日本船用工業会業務部(2004).
- 4) J.Reason: The Human Contribution, Ashgate(2008).
- 5) E.Hollnagel, et al.: Resilience Engineering: Concept and Precepts, Ashgate(2006).

著者紹介



佐相邦英 (さそう・くにひで)

電力中央研究所

(専門分野)人間工学, ヒューマンファクター



書籍販売のご案内

■『原子力のいまと明日』一般社団法人日本原子力学会編, 丸善出版
2019年3月20日刊行, 336ページ, 定価2,160円(税込・送料別)

日本原子力学会では原子力と放射線についてのわかりやすい解説書『原子力がひらく世紀』を20年前に刊行し、好評のうちに現在『改訂3版』を発売中です。その後、東電福島第一原発事故踏まえた新たな解説書を刊行すべく教育委員会を中心に検討が進められ、このたび「原子力のいまと明日」を上梓すること

なりました。本書は、1F事故の推移と現状、原子力利用状況の変化、研究開発状況と廃炉への道のり、放射線の人体、生活、産業、経済への影響、あわせて福島県における風評被害の実態や原子力分野の人材育成についても取り上げています。

○特別価格販売のお知らせ

2019年4月25日まで以下の価格で販売いたします。この機会にぜひご購入下さい。

新刊『原子力のいまと明日』 定価2,160円 ⇒ 特別価格1,700円
既刊『原子力がひらく世紀(第3版)』 定価2,057円 ⇒ 特別価格1,600円
☆なお、上記2冊同時購入の方は、合計定価4,217円 ⇒ 特別価格3,000円
いずれも税込 送料540円(1冊以上何冊でも)

○ご購入は日本原子力学会ホームページ 書籍販売のページよりお申し込みください○
<http://www.aesj.net/publish/shopping>



運転操作でのロボットとの協調

Cooperation with Robots in Operation

五福 明夫

Akio Gofuku

KEYWORDS: *operation and maintenance, human factors, intelligent robot, cooperation*

父の2018年10月のブログの一部：

人工知能(AI)と歩調を合わせるようにロボット技術も高度化している。福島第一原子力発電所の廃炉用ロボットの研究・開発¹⁾では、人間の立ち入れない高放射線環境でも作業ができるロボットの開発が進められ、また、ヒューマノイドロボットと人間の協調作業に関する研究も着実に進展している²⁾。現在の人間の事務作業の大半は、近い将来AIが取って代わると予想されているが、この調子でロボットの技術開発が進めば、あと10年もすれば、3K作業と言われている労働の多くはロボットが行うようになるに違いない、外国人労働者の受け入れは増やし過ぎない方が良くない。

子の2028年10月1日の父への手紙の一部：

尊敬するお父さんへ。半年の研修期間が終わって、今日とうとうFuture第一原子力発電所の制御員として本配属されたよ。この発電所には最新鋭の原子力プラントが2基建設されていて、配属された1号機は今年の6月に運転を開始したばかりなんだよ。

お父さんの退職前の2010年代に急速に広まった太陽光発電も着実に設備容量を増やして、晴れた日の昼間はほとんどが太陽光発電所からの電気になってしまったけれど、曇った日や夜間の電力を供給するために、原子力発電も重要と認識されるようになったんだよ。その太陽光発電所も、温暖化によって最大瞬間風速が60m/s超の台風が日本にもしばしば上陸するようになり、古い太陽光パネルがその強風で破損して周辺の住宅に大きな被害を与えるようになって、うちの会社の太陽光発電部門も苦労しているようだけどね。また、お父さんの時代には熱効率がたった33%程度だった原子力発電所も、低温度の熱を効率的に利用できるようになって、熱効率が50%を超えるようになってきたんだよ。しかも地球環境保全、特に大気環境の保全のために火力発電所は全廃の方針が世界的に決定されて、考え方によっては永遠のエネルギー源である原子力発電も見直されるようになり、電気出力は30万kWhと、お父さんの時代の原子力発電所に比べるとかなり熱出力は小さいけれど、この発電所

が建設されたんだよ。

Future第一原子力発電所に着任してみて驚いたのは、一直10人の運転チームの半数がロボットなんだよ。運転部門ではロボットの採用はまだ5割弱だけれども、保全部門では7割以上がすでに保全員ロボットだよ。ロボットはもちろん2足歩行ロボットで、大きさや姿形も人間そっくりだよ。ただし、力は人間の2倍程度出せるし(暴走した場合への人間への危険性を配慮して2倍に抑えているらしい)、100mを8秒で走れる性能らしいよ。だから、手順や操作が決まっている作業は基本的にロボットが行うことになっていて、人間の運転員は、安全な場所でロボットの作業を確認するだけだよ。遠隔カメラでも確認できるのだけれど、現場を重視する会社の方針として、現場に向いて確認するらしいよ。ただし、ロボットが動作しなくなった場合のために、同じ作業の訓練は定期的に受けないといけないけれどね。もっとも、運転員ロボットにしても保全員ロボットにしても、コンピュータも含めてハードウェアは基本的には同じで、動作プログラムを初期化して入れ替えれば交代要員のロボットは発電所全体では何十台もあるので、定年までにボク自身が現場作業を行うことは無いと思うけどね。

でも、早速今日あった訓練で、当直長役の運転員ロボットにちょっと嫌味を言われたよ。どんな場合かって？ お父さんの頃にあった大袈裟な運転訓練センターは、今は無くなっていて、実際の制御室で訓練も行うようになっているんだよ。どうやるかって？ 訓練時間は30分と規制により制限されていて、警報が発報した場合には直ちに通常の運転モードに戻るようになってはいるけれど、人間の運転員の2人が訓練モードに入り、運転員ロボットが6体追加投入されて、実機の運転制御は制御室内にある基本機能を備えた小型の緊急時制御盤に切り替わり、当直長(人間)と運転員2人と運転員ロボット3体が監視・制御を担当し、運転員2人と運転員ロボット8体で訓練を行うんだよ。訓練モードでは、ブラインドだけとシナリオが決まっているので、運転員ロボットが当直長を務めるんだよ。

その訓練で、ボクはちょっとしたミスをしたんだよ。

自分ではミスとは思ってはいないけれど、規則に照らし合わせるとミスになるんだって。それは、警報 A が発報した時には連続監視しないといけない重要パラメータを監視している時に、すぐ隣で操作 B を行っている運転員ロボット X が突然故障したために、思わず操作 B の操作を引き継いで代行したんだよ。ほんの数秒のことだよ。すると、当直長役の運転員ロボットに、「規則では重要パラメータの監視は継続的に行うことになっているので、あなたは重要パラメータの監視から離れてはいけません。」と注意されたんだよ。人間だったら、すぐ隣の仲間の調子が悪くなったら助けるよね。人間の運転員が心臓発作で倒れた場合にも、同じように注意されると思うと首をかしげるよ。

また、プラント状態が落ち着いている時に、膨大な運転手順書をまる暗記して(当たり前だけど)、それに従って確実に運転上の操作ができる運転員ロボットの優秀さを褒める意味で、「運転員ロボットがこれほど有能なら、ボクはいなくてもいいよね。」と言ったら、なんと、「あなた方人間運転員は、運転員ロボットが対応できない状況になった時に、レジリエントな対応を考案して、我々運転員ロボットに的確な指示をすることが求められているのです。我々運転員ロボットは、運転手順書に書かれていることは、故障しない限り出来ます。しかも、運転員ロボットは予備ロボットが 10 体ほど本発電所には配備されていますので、必要時にはそれらが自動的に応援にきます。ですから、手順書に記載の操作を人間運転員に行ってもらうことはまずありません。しかしながら、運転手順書に無い事態には、残念ながら対応する能力はありません。あなた方人間運転員は、緊急事態において、ロボット運転員の出来ることと出来ないことを、知識としても経験としても把握していただくために、時間をつくって訓練を実施しているのです。筋は通っているが論理を超えた思考が出来る運転員に早く成長して下さい。」とたしなめられたよ。

だけど、当直長クラスに昇進できたとして、実際に緊急事態が発生して、ロボット運転員に一齐に振り向かれて指示を仰がれたら、適切な指示を出す自信は持てるのかなあ。本当にそのような能力が身に付くかも心配だよ。だから、日頃から考えるすべての事態を想像し、強力なコンピュータが内蔵された制御盤に向かって、こんな場合はどうする、あんな場合はどうなると問いかけて、針の孔でもつつくような質問や疑問を浴びせて、もし、考えられていない事態があった場合には、訓練時にプラント挙動を計算してくれる高精度な数値シミュレータも駆使してプラントの状態や振る舞いをシミュレーションして、対応マニュアルを少しずつでも充実させていくことが重要と考えているよ。お父さんが研究していて今ではプラント業界に定着したレジリエンス・エンジ

ニアリング³⁾の言葉で言えば、anticipating 能力を高めて learning 能力により学習して、monitoring 能力や responding 能力を磨くとなるのかな…。

父の 2028 年 10 月 2 日の息子への返信の一部：

昨日の手紙ありがとう。本配属後の初々しい興奮がよく伝わってきた手紙でした。去年まではまだまだ学生気分が抜けずに仕事がきちんと出来るかを不安に思っていたのだけれど、知らない間に随分成長したことが伺える手紙でした。

私の身の回りの世話も最近は介護ロボットが行ってくれて、随分助かっています。ただ、私が転倒しないように怪我をしないようにと常に気を配ってくれているけれども、出来るだけ世話をしないようにプログラムされているらしく、介助して欲しいところでも、こちらが限界になるまで手伝ってくれないのが不満だけだね。この前も、「あなた様の顔色、筋肉の緊張度合い、生理データをビッグデータ的に分析しますと、まだまだ余裕があるという結果ですので、もう少し頑張ってください。」と言われてたよ。やれやれ、いくらこちらのためと言っても、ロボットのセンシング能力が良くなるのも善し悪しだね。

その内にお前も、ロボット運転員に「先程の指示には問題がありそうです。何故なら、あなたに関する様々な指標からは、あなたは現在パニック状態にあることが明白です。この状態での判断は間違っていることが多いです。ですから、まずは落ち着いて下さい。それから、(異常時には人間はデータの再確認を怠る傾向にあるので)警報が発報してからこれまで記録されたデータをもう一度確認して、対応策を考えて下さい。落ち着くために我々運転員ロボットが出来ることは何でもしますよ。まずは、珈琲でも入れて差し上げましょうか？ 肩を揉みましょうか？」なんて言われるかもしれないね…。

－ 参考文献 －

- 1) 例えば、大西、大西、藤田、原、橋本、原子力災害対応ロボットの設計と開発、日本ロボット学会誌、32(9)、816-824(2014)。
- 2) 例えば、井上、比留川、人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト、日本ロボット学会誌、19(1)、2-7(2001)。
- 3) E. Hollnagel, et al. Resilience Engineering: Concept and Precepts, Ashgate(2006)。

著者紹介



五福明夫 (ごふく・あきお)

岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科
(専門分野/関心分野) ヒューマン・マシン・インタフェース、メカトロニクス、医療支援システム

これまでをふりかえり、今後を展望する(加速器・ビーム科学部会)

「加速器・ビーム科学」と「原子力」

“Particle Accelerator and Beam Science” and “Nuclear Energy”

林崎 規託

Noriyosu Hayashizaki

KEYWORDS: Particle Accelerator, Beam Science, Nuclear Energy

はじめに

今年2月、日本原子力学会は還暦を迎えた。

本学会が設立されたのは、わが国における1955(昭和30)年12月19日の原子力基本法、原子力委員会設置法、総理府設置法の一部を改正する法律(原子力局の設置)の公布より3年2ヶ月後の、1959年(昭和34年)2月14日であり、それから60年が経過したことになる。

加速器・ビーム科学部会は、“従来の「ある分野のための」加速器という位置付けから関連分野全体を総合的に支える活動の拠点としての活動が期待されており、これらの要請に応える”ために、1998年(平成10年)9月30日に設立総会がおこなわれ、いまはちょうど成人式を済ませたところと言ってよいだろう。

本部会の名称になっている「加速器・ビーム科学」は、原子核物理実験を契機として1930年代より目覚ましい発展を遂げたが、19世紀に始まった各種の放電管や陰極管の実験を端緒とし、のちのX線の発見や放射線・原子力研究の礎になっている。本稿では、わが国が過去に策定してきた「原子力の研究、開発および利用に関する長期計画(原子力開発利用長期計画)」や「原子力政策大綱」のなかでの「加速器・ビーム科学」の書かれ方を振り返りながら、その今後について少し考えてみたい。

原子力開発利用長期計画と加速器・ビーム科学

1957年(昭和32年)12月に公刊された「昭和31年版原子力白書」は、第2章「原子力開発態勢の整備」のなかで“原子力委員会の31年度の活動は、原子力の平和利用の進展のあらゆる分野にその足跡をとどめているが、特にわが国の原子力の研究開発利用の拠つて立つべき計画を作成したことは注目される。すなわち31年3月には長期および各年度の原子力開発利用基本計画作成の要領を定め、5月にはとりあえず31年度の計画を作成し、9月に入つて暫定的に長期計画を定めた。これらの計画を基軸として、原子力委員会は一貫した原子力政策を推進してきたのである。”と言及している¹⁾。その後、平成12

年までのあいだに「原子力開発利用長期計画」は原子力委員会により概ね5年おきに計9回策定された。

加速器・ビーム科学の記述が現れるのは、本学会が設立されて2年後の、1961年(昭和36年)2月決定の長期計画からであり、「アイソトープ利用の研究開発」として“医学利用については、基礎医学、診断、治療等への利用をいっそう促進するほか、原子炉による中性子線および加速器による放射線を利用しての研究を推進する”、“悪性腫瘍などの治療を行なうため、粒子加速器、アイソトープ線源等の利用を推進する”、“熱中性子を体外から照射し、病巣において生物学的効果比が大きな重粒子線を発生させ、腫瘍の診断、治療に関する研究等を行なう”、また、「放射線化学の研究開発」として“工業用に適する大出力加速器の開発のため、その安定性、加速管の開発、電流およびエネルギーの安定化その他部品の品質の改良等についての研究を促進する”と言及され²⁾、医工学分野での利用や研究の展開が期待されている。

それから26年後の1987年(昭和62年)6月決定の長期計画では、「原子力開発利用の意義」として“加速器技術等の進展に伴い、陽子加速による核破砕、自由電子レーザー等量子レベルでの原理・現象を工学的に利用するいわば「量子工学」とも呼ぶべき新しい技術分野が生まれようとしており、これらは21世紀に向けての大きな技術革新の要因となるとともに基礎的研究を飛躍的に促進する有効な手段になるものと期待される”と言及され³⁾、直ちに加速器による消滅処理の研究開発が活発化した。

また、「先導的プロジェクト等の推進」としては“高エネルギー重粒子線、高度に制御された陽子線および重粒子線、高品質重粒子線、原子炉発生による冷中性子線等は、原子核・素粒子研究、新材料創出、極限材料の評価、高度な計測、分析等に有用なものとして推進することとする。なお、加速器技術の著しい進歩に伴い、医療分野における速中性子線および陽子線のがん治療への利用が進められている。今後は、より治療効果が高く、正常組織への影響が少ないがん治療法が期待されており、高エネルギー重粒子線のがん治療装置の建設および研究開発

を推進するほか、 π 中間子によるがん治療研究についても実用化に向けて開発を進めていくことが適切であると考えられる。”、さらに“ π 中間子・ μ 粒子ビーム、単色中性子線、RIビーム熱外中性子線、大強度エネルギー陽子線、大強度高エネルギー中性子線等は、材料研究、高精度の計測分析等に有用であるので、既存の施設等の活用等により、基礎的な研究開発を推進することとする。また、大強度単色陽電子ビームについては、広く材料科学、固体科学に新しい計測手段を提供するものであるので、陽電子研究利用施設の整備を目指して、本格的技術開発に取り組むこととする。一方、高輝度のシンクロトロン放射光(SOR)は、ライフサイエンスや材料分野の構造解析等のための有力な研究手段であるとともに、原子力分野においても同位体分離等原子力の基礎研究の基盤を形成するものと期待されているばかりでなく、原子力分野におけるこれまでの技術蓄積を活用し得る分野である。”と言及され、粒子線治療や放射光など、後年になって施設整備や実用化が進んだテーマが列挙されている³⁾。

原子力政策大綱と加速器・ビーム科学

「原子力政策大綱」は、それまでの「原子力開発利用長期計画」に代わり、今後10年間程度に進めるべき原子力政策の基本的な考え方を示すものとして2005年(平成17年)10月に策定された。そのなかで加速器・ビーム科学については“近年の技術革新により、加速器、高出力レーザー装置、研究用原子炉等の施設・設備を用いて、高強度で高品位な光量子、放射光等の電磁波や、中性子線、電子線、イオンビーム等の粒子線を発生・制御する技術、および、これらを用いて高精度な加工や観察等を行う利用技術からなる「量子ビームテクノロジー」と呼ぶべき新たな技術領域が形成されてきている。これらの技術は、世界各国において最先端の科学技術・学術分野から、各種産業に至る幅広い分野を支える技術として、様々な科学技術水準の飛躍的向上に寄与することが期待されている。”と言及され⁴⁾、それまでの長期計画を含めて「量子ビーム」という言葉が初出している。

それから5年後の2010年(平成22年)11月には「新大綱」策定会議が設置されたが、翌年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故のために審議が中断された。その後、原子力委員会の在り方の見直しとともに「新大綱」は策定しないことになり、2012年(平成24年)10月に同会議も廃止された。

このような原子力をめぐる環境変化を踏まえて2014年(平成26年)12月に改正原子力委員会設置法が施行され、再出発した原子力委員会により2017年(平成29年)7月に「原子力利用に関する基本的考え方」が決定された。そのなかで加速器・ビーム科学については“放射線および放射性同位元素(ラジオアイソトープ)利用は原子力エネ

ルギーと共通の科学技術基盤を持ち、先端的な科学技術や工業、医療、農業、環境保全、核セキュリティ等の幅広い分野で利用され、国民の福祉、国民生活の水準向上等に大きく貢献している。すでに我が国においては、原子力エネルギー技術に匹敵する経済規模を産み出しており、また、加速器技術等の格段の進歩により、量子ビームテクノロジーという、イノベーションの有力なツールとしての一分野を形成してきている。今後も、研究開発機関や大学等は、既存基盤の戦略的な有効利用を進めるとともに、量子ビームを含め放射線および放射性同位元素を更に活用していくための基盤整備(老朽化対策や適切な人材配置等)を行うことが期待される。また、新たな技術シーズの発掘や技術の高度化とともに、放射線による健康や環境等への影響の研究にも注力していくことが重要である。さらに、放射線および放射性同位元素の利用が国民生活の向上に貢献しているという認識を広めることも重要である。これらの取組によって、今まで想定されていなかった領域も含めて、イノベーションが創出されることを期待する。”と言及され⁵⁾、基盤整備に加えて、アカウントビリティの重要性が示されている。

加速器・ビーム科学、その今後について

「原子力開発利用長期計画」や「原子力政策大綱」を通じて「加速器・ビーム科学」を振り返ってみたが、この60年で加速器技術は成熟期に移行し、社会環境も、期待される内容も変化した。「Society 3.0」で成長した「加速器・ビーム科学」が、今後どのように「5.0」のなかで再定義され、再出発していけるのか、楽しみである。

— 参考文献 —

- 1) 原子力委員会「昭和31年版原子力白書」
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/wp1956/index.htm>
- 2) 原子力委員会「原子力の研究、開発および利用に関する長期計画(昭和31年)」
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/tyoki1961/chokei.htm>
- 3) 原子力委員会「原子力の研究、開発および利用に関する長期計画(昭和62年)」
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/tyoki1987/chokei.htm>
- 4) 原子力委員会「原子力政策大綱」
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/tyoki.htm>
- 5) 原子力委員会「原子力利用に関する基本的考え方」
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/sitemap/bunya22.htm>

著者紹介



林崎規託 (はやしぎき・のりよす)
東京工業大学・科学技術創成研究院、放射線総合センター、産業技術総合研究所

加速器物理学の研究から始める原子力学への教育展開

Nuclear Human Researcher Development from Accelerator Physics

坂本 文人

Fumito Sakamoto

KEYWORDS: Accelerator, Education, Nuclear Engineering

はじめに

2011(平成23)年3月11日に発生した東日本大震災を発端とした東京電力福島第一原子力発電所(以下、1F)における放射能飛散事故以降、言うまでもなく原子力に関する確実に正しい知見の教育と、それを基盤とした若手技術者への教育および育成は大きな社会問題となっていると言えるだろう。

筆者が所属している全国51校ある国立高等専門学校(以下、国立高専)においては、高度経済成長期を背景として昭和37年に設立されて以降、企業および研究所へ多くの技術者を輩出してきた。それらの企業や研究所の中には原子力に関連する企業および研究所も多く存在している。しかしながら、国立高専においては「原子力」を冠した専門学科はもとより、原子力に特化した専門科目をカリキュラムに取り入れている国立高専はないのが現状である。エネルギー自給率がわずか6%と乏しい我が国においてエネルギー源としての原子力は極めて重要であり、日本における今後のエネルギー政策を考慮しても、国立高専における原子力分野のしっかりとした教育体制の確立が急務となっていた。

このような現状を背景とし、国立高専では全国51高専の母体となる国立高専機構が代表として、文部科学省(以下、文科省)の国際イニシアティブ事業「機関横断的な人材育成事業」に応募・採択され、1Fにおける事故以前の2010(平成21)年度より、高専学生を対象とした原子力における教育を重点的に展開してきた^{1,2)}。2018(平成30)年度に至っては、原子力に関する専攻を有する大学や電気事業連合会を通じて全国の民間電力会社への学生派遣による短期インターンシップ(図1)や、TV遠隔講義システムやe-Learning教材の開発と運用を実践してきており、これまでに延べ人数ではあるが約10,000人の学生への教育を展開してきた。今後も、この教育システムの確立活動を続け、最終的には原子力に特化した専門科目のカリキュラムへの取り入れへと繋げていきたいと考えている。



図1 東北電力女川原子力発電所におけるインターンシップの様子(新安全基準に適応した防潮堤の見学の様子)

加速器物理学からアプローチする原子力教育

「原子力」というキーワードから何を連想するかと学生達に問い掛けると、ほぼ全ての学生が「原子力発電」と回答する。日本原子力学会の各部会が示しているように、「原子力」といってもその分野は幅広く、原子炉物理学のみならず、人工的に荷電粒子線(放射線)を電磁波のエネルギーを利用して高エネルギーに加速させる「加速器」も原子力を担う重要な分野である。

近年では、加速器によって加速された電子ビームをターゲットに照射する際に発生する制動放射X線は、テーブルトップ型の超小型加速器による低エネルギーの電子ビームを用いることで屋外における利用も可能になることから、橋梁などのインフラの非破壊検査に大きな威力を発揮するため、インフラ整備への貢献に大きな期待が寄せられている³⁾。また、更に高エネルギーに加速させた電子ビームとレーザーパルスとの相互作用(逆コンプトン散乱)によるガンマ線の応用利用も大きな注目を浴びている⁴⁾。これは、高エネルギーに電子ビームを加速させる必要があるため、加速器自体の規模は先述の小型加速器と比較すると大きくなるが、貨物やトラックの荷台に隠蔽された特に重元素などの核物質の特定に大きな威力を発揮する。

これらの技術を 1F に代表される今後廃炉作業を必要とする原子力発電所や、定期検査に適用することで、その作業の効率化に繋がることが期待されることから、今後の加速器物理学における若手研究者および技術者の育成も、原子力業界においては急務と言えるだろう。

秋田工業高等専門学校における 加速器研究

筆者が所属する秋田工業高等専門学校(以下、秋田高専)も国立高専が実施する原子力事業に参画しており、これまでに多くの学生を企業および研究所に卒業生を輩出してきた。しかしながら、他の国立高専と同様に原子力に特化した専門科目がなく、原子力に関連する研究室も筆者の研究室のみである。秋田高専に着任して早いもので約 10 年が経とうとしているが、着任当初は卒業研究生を受け入れるものの加速器の研究を行うために必要な実験機材はもとより、実験スペースの確保に大変な苦勞を伴った。

まずは与えられた環境下で加速器の研究を継続させるため、有限要素法や時間領域差分法といった計算手法を駆使して、加速器における空洞共振器内部の電磁場・荷電粒子のダイナミクス解析プログラムの開発から研究をスタートさせた(図 2)⁵⁾。この研究を共に行った卒業生は、積極的にプログラミング技術を身に付け、卒業後は高エネルギー加速器研究機構(KEK)に就職し、スーパーKEKB 計画の加速器制御部門の技術職員として研究開発の最先端で活躍している。

また、最近では放射線相互作用のモンテカルロ計算コードである Geant4 を用いて、加速器から発生する電子ビームを応用した放射性核種である Cs137 の安定な核種である Ba への核変換の研究も展開している⁶⁾。この研究は Geant4 の開発グループの一員でもある富山高専の阿蘇教授や、KEK の計算機センターの皆様のご協力の下実施している。現在は基礎検討段階であるが、小型の加速器で除染システムが実現できれば、1F 事故で飛散した Cs137 の除染作業の効率化にも繋がり、廃炉作業の効率化のみならず、1F 近隣の除染にも貢献できると考えている。

今後は、秋田高専キャンパス内に実験スペースを確保できたこともあり、産業技術総合研究所(産総研)や東京工業大学、大阪大学の方々のご厚意により、高周波増幅器(クライストロン)の設置作業を進めている。これにより、シミュレーションによる基礎検討研究のみならず、高周波デバイスの設計から製作・性能評価までを行えると期待している。

学会を跨いだ研究者との情報交換と 協力体制の重要性

これらの研究活動は、筆者一人で展開できるものではなく、様々な研究者の方々からのご助言を頂いて進めて

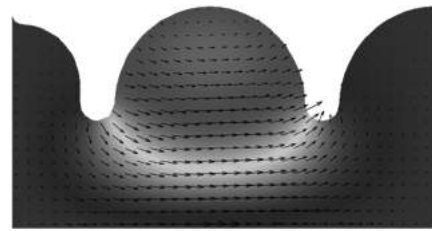


図 2 開発した有限要素法コードによる
加速空洞内部の電磁場分布

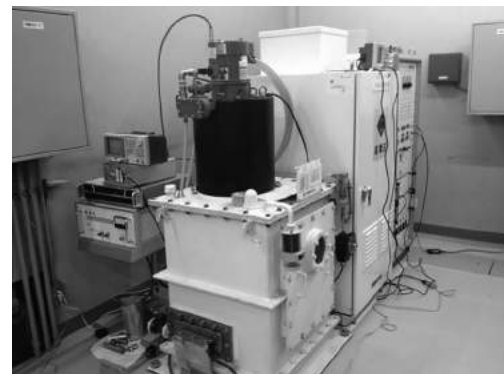


図 3 秋田高専に設置予定の高周波増幅器

きている。時には学会や分野の枠組みを横断し、ご助言を頂いた事も多くあった。特にシミュレーションコードの開発においては、日本シミュレーション学会の皆様には学会発表の際に貴重なコメントを頂いた。また、日本における加速器物理学の総本山とも言える日本加速器学会においては、国内外における加速器技術の最先端とその応用利用についての議論が活発に行われている。日本原子力学会の加速器・ビーム部会も、これらの学会との情報交換および交流の場を持つ事が今後の加速器物理からアプローチした原子力業界への貢献に繋がっていくものとする。

— 参考文献 —

- 1) 紀聖治 他 日本原子力学会誌, Vol. 57, No. 9(2015).
- 2) S. Kino et.,al, IEEE 2015 IEEE 7th International Conference on Engineering Education (ICEED) : (2015).
- 3) 上坂充 他 第 15 回日本加速器学会年会 THL004.
- 4) 羽島良一他 第 15 回日本加速器学会年会 THP021.
- 5) 佐々木信哉 平成 24 年度 秋田高専卒業研究論文集.
- 6) 渡邊柚乃 平成 29 年度 秋田高専卒業研究論文集.

著者紹介

坂本文人(さかもと・ふみと)

秋田工業高等専門学校 創造システム工
学科



日本原子力学会における社会・環境部会の意義

Meaning of existence of social and environmental subcommittee in AESJ

土田 昭司
Shoji Tsuchida

KEYWORDS: *Risk, Communication, Perception, Safety, role model, deficit model*

社会・環境部会が日本原子力学会に設置されたのは1999年である。今から20年前のこととなる。その設置趣意書によれば、21世紀に科学技術が果たす役割は小さくないものの社会が科学技術に対してむしろ懐疑的になっているとの認識の元に、「社会との関連が大きいことが原子力エネルギー技術の著しい特徴であって、その社会的側面について学問的に研究」することを本部会の目的としている。

日本原子力学会が如何なる団体であるかについては議論の余地がある。名称の示すところは学術団体である。一方でその構成員に原子力に関わる実務者が大きな割合を占めることから業界団体とまではいえないまでも利害関係のある実務者団体であるとみなされる可能性は否定できないであろう。ここでは、このような議論があることを念頭に置きつつも、学術団体である日本原子力学会における社会・環境部会の意義について検討してみたい。

学術団体の中におけるロール・モデル

学術の世界において価値があると認められるのは、理学の観点では真理を明らかにすることであり、工学の観点では人類の幸福に寄与する知識・技能を社会に実装することである。そこでは、真理をより深く知り理解できること、社会に役立つ実践ができることが尊敬の対象となる。したがって、学術団体の中においては簡単に言えば現実についてより深い多くの知識と理解のある者が皆のめざすべきロール・モデル(手本)となる。

社会における学術団体のロール・モデル

社会における学術団体のロール・モデルも基本的にはこれと同じである。社会に対して真理あるいは幸福に寄与する知識・技能を社会に実装することについて新たな知識と理解を提供することが学術団体のロール・モデルである。

ただし、この学術団体の中での同じロール・モデルが社会の中での学術団体にも適用できるためには一つ条件がある。それは、何が真理であり幸福に寄与する知見で

あるかを評価・判断する基準が社会全体で共有されていることである。学術団体の中であれば、対象学問領域について、この評価・判断の基準は大多数の構成員に共有されている。なぜならば教育等によって当該領域の評価・判断の技能を習得していることがその学術団体の構成員となる要件だからである。しかしながら、社会全体としてみれば特定の学術団体の中で共有されている評価・判断の基準を理解する者はむしろ少数であろう。特に原子力など先端科学技術を対象とする分野ほどその評価・判断の基準を理解する者は社会において少数であると考えられる。

欠乏モデル

科学技術を社会に実装するには社会からの承認が必要である。民主制の進展により1960年代頃から社会からの承認には一人ひとりの市民の納得がより重要となってきた。市民に納得してもらい働きかけには初め学術団体の中でのロール・モデルが援用された。すなわち、市民が納得しないのは科学技術の知識が欠乏しているからであり、知識と理解が進めば市民は納得するはずと考えられた。これを欠乏モデル¹⁾という。この考え方をもとに広く人々に「正しい知識を正しく伝えること」が行われてきている。多くの人に正しい知識を正しく伝えることは重要である。しかし、正しい知識を正しく伝えるだけでは市民の納得は得られないことがこれまでの経験から明らかになってきている。その理由は土田²⁾に詳しいが、原子力利用の場合ではそもそも市民と学術団体構成員で何が正しく有効であるかの評価・判断基準が共有できていないのである。

欠乏モデルが機能しないとき、市民と向き合うと学術団体の中でのロール・モデルが通用し難くなるように思われて、学術団体構成員にとっては大きな心理ストレスともなっていると考えられる。

このような場合、人は心理的に両極端な方向に向きやすいと考えられる。一つは自分はいくまでも正しく無理解な人の意見は無視してもよいと考えることであり、あと一つは社会において自分たちは間違っていると見なさ

れていると疎外感に浸ることである。しかしながら、土田³⁾が明らかにしているように、市民の大多数は原子力に携わっている者に感謝している。市民が原子力関係者に壁を作っているのではなく、原子力関係者のほうから優越感や疎外感から市民との間に壁を作っている可能性に留意すべきであろう。

社会・環境部会の存在

これらの困難があることから、原子力利用の科学技術を社会に実装することに関わる課題について研究する部会として社会・環境部会は存在している。

ところで、日本原子力学会には部会が19ある。部会はそれぞれ独自の研究領域を持つだけでなく、研究についての評価・判断基準にもそれぞれ独自の面があるであろう。その中で、社会・環境部会は研究領域、研究の評価・判断基準共に他の部会とは大きく異なっている。例えば、他の部会はいわゆる理科室であるが、社会・環境部会の歴代部会長7名のうち2名は文科系の社会心理学

が専門である。社会・環境部会では研究についての評価・判断基準も異なることが他の部会からの理解を難しくすることがある。この問題については次稿にて菅原慎悦が詳述する。

— 参考文献 —

- 1) Wynne, B. Public Uptake of Science, *Public Understanding of Science*, 1993.
- 2) 土田昭司(編著), 安全とリスクの心理学, 培風館, 2018.
- 3) 土田昭司, 「原子カムラ」の境界を越えるためのコミュニケーション(1), 日本原子力学会誌, 56(4), 2014

著者紹介



土田昭司 (つちだ・しょうじ)
関西大学社会安全学部



書籍販売のご案内

■ 『東日本大震災における原子力分野の事例に学ぶ技術者倫理』

一般社団法人日本原子力学会 倫理委員会編, B5判 73ページ, 定価 1,000円(税別・送料別)

本事例集は、2011年3月11日に発生した東日本大震災における原子力発電所に係る活動を事例として、今後遭遇するかもしれない事象に対してどのように向かい合ったらよいのか、今、備えておくべきことは何なのかを倫理的側面から考える教材として作成したものである。

倫理問題は、ある日突然やってくるものである。そのときに冷静な判断ができなければ技術者としての責務を果たせない可

能性があり、結果として大きな災禍にみまわれることも考えられる。そのような観点から今回の事例を通じて、さらに倫理観を向上させることは重要である。事例はいずれも実際に起こったことであり、リアリティをもって読み進んでもらえるものとする。そうすることで、より効果的に理解が促進されるものと思われる。(本書「事例の活用について」より抜粋)

○ご購入は日本原子力学会ホームページ 書籍販売のページよりお申し込みください○
<http://www.aesj.net/publish/shopping>



これまでをふりかえり、今後を展望する(社会・環境部会)

“社会系”の悲哀を超えて

Possible Role of Social Sciences in Nuclear

菅原 慎悦

Shin-etsu Sugawara

KEYWORDS: *Social Sciences and Humanities (SSH), Risk, Governance, Management, Safety, Socio-technical analysis*

工学・技術志向の強い組織/業界において、社会科学および人文学は、如何なる貢献を為し得るのか？ 筆者は、現在の職場においても学会活動においても、常にこの容易ならざる問いを念頭に置き、知的格闘を続けている。本稿では上記の問いを踏まえつつ、社会科学的研究や社会・環境部会の今後について私見を述べたい。

「下請け」としての“社会系”

原子力分野において、技術と社会の相互作用に光を当てる Socio-technical な研究アプローチが重要視されるようになって久しい。社会・環境部会の設立趣意書には、「本部会は、技術論や文明論の観点から見た原子力技術の特性や特質を分析するとともに、政治、経済、法、社会、国際関係、環境調和などの領域に発現する原子力の諸相を様々な学問的アプローチから研究し、…(中略)…人間、社会、環境、技術の相関係における原子力のあり方を探求する」とある。果たして我々は、「人間、社会、環境、技術の相関係」を、適切に理解し、あるべき姿を描き、それに向かって改善を重ねるような歩みを、十分に進めてきたと言えるだろうか。

福島第一原子力発電所事故(以下、1F 事故)の IAEA 事務局長報告書は、「日本の原子力発電所は安全であるとの基本的想定のために、組織とその人員が安全のレベルに疑問を提起しない傾向があった。原子力発電所の技術設計の頑強性に関する利害関係者間で強化された基本的想定は、安全上の改善が迅速に導入されない状況をもたらした」との診断を示している。そして、この「基本的想定」を問い直す手段として、「原子力安全への体系的アプローチ(systemic approach)を採択し、人的、組織的および技術的要因の全範囲の相互作用の複雑性を理解すること」を挙げ、これらの相互作用に十分に取組みなかつたことが事故の寄与因子の一つとなったと指摘する¹⁾。当学会自身のものも含め複数の事故調査を渉猟するに、IAEA のこの指摘は核心をついたものとして受け止めることが妥当であろう。

では、「人間、社会、環境、技術の相関係における原子力のあり方」の探求を標榜する当部会や、そこに連なる

研究・実践は、どの程度この問題に取り組んできたと言えるだろうか。近年の総論セッションの報告ないし関連論文を見ると、様々な主体との対話活動や理解活動の実践報告、原子力政策の決定過程分析等が多く見られる。これらの意義は、無論小さくなく。しかし管見の限り、原子力安全やリスク管理の“本丸”に対して新知見を示したり問い直しを迫ったりするような社会科学的研究は、残念ながらあまり見当たらない。私自身の力量不足も含め、社会科学・人文学からの貢献は、限定的なものにとどまってきたと言わざるを得ないだろう。

率直なところ、当学会の多くの会員や技術系各部会にとって、社会・環境部会やいわゆる“社会系”研究は、どこか副次的・従属的なものと見なされてきたのではないかと感ずることもある。技術側から“社会系”に対する発注の内容は、技術の中身とは直接関係しないがそれを支える基盤となりうるもの(誤解を恐れず言えば、技術利用を進めるための理解活動の「下請け」)に、ほぼ限定されてきた(例：技術側で考えた方策を社会に「わかりやすく」伝える説明方法や、原子力リスクの小ささを「正しく」理解してもらうための方策、等々)。“社会系”の側では、自身がこうした「下請け」と見なされることに反発を覚えつつも、それに対して効果的な反駁ができぬまま、先述の「利害関係者間で強化された基本的想定」をさらに補強する活動の一翼を結果的に担ってきたのだとすれば、我々は猛省せねばなるまい。

「根幹」に向かうか、 徹底した「周縁」を目指すか

では、どうすればよいか。以下に2つの戦略を示す。

一つは、“社会系”の研究や実践が副次的なものではなく、原子力安全やリスク管理の「根幹」に関わるものだということを、身をもって示していく方向性である。これは、IAEA の唱える「原子力安全への体系的アプローチ」から必然的に導かれる正統な戦略であるが、当然ながらその実現には並々ならぬ努力を要する。通常の社会科学的研究に要求される知的水準を満たすことに加え、技術利用を支える概念や理論に対する基本的理解、そして技術

系コミュニティの専門的議論への参画を厭わない態度も求められよう。ただ、茨の道ではあるが、決して不可能ではない。実際、技術と社会の相互作用についての「名著」とされるものを生み出してきた欧米系の社会学者には、上記のような戦略を体現してきた人が多い。“社会系”こそ「根幹」であるという主張を、骨太な知的活動を通して存分に示せれば、高齢化傾向の著しいこの分野にも優れた新規参入者を期待できるようになろう。

いま一つは、“社会系”が徹底的に「周縁」であり続ける、という戦略である。文化人類学では伝統的に、社会を「中心」と「周縁」という象徴的な軸で分け、否定的な意味を帯びがちな「周縁」にこそ、他者性を孕むがゆえに多義的な豊饒性を再生産していくという積極的な意味を見出してきた²⁾。原子力の「周縁」とは、原子力をめぐる“想像の共同体”の境界領域にあってその内外を放浪し、コア集団とはある種の異質さを帯びることで、原子力のあり方をより豊かにする役割を担うもの、と言えるだろう。これは、社会学に言う「異人」(stranger)の役割とも重なる。シュッツによれば、「異人」とは「共同体内のメンバーが疑問に付さない殆んどすべてに疑問符を付する者」であり、ときに既存の共同体秩序を問い直す契機をつくる³⁾。まさに、共同体組織としての“Questioning Attitude”の発露と捉えられよう。もちろん、この戦略にも非常な困難が伴う。「異人」は、立場・主張・利害といった既成概念を超越して、様々な人や事物と自由に触れ合い、共同体の持つ世界観を突き崩すような役割を果たし続けなければならない。しかし、我が国の原子力をめぐる共同体のあり方が批判的に問い直されている現在、上記のような意味での「周縁」や「異人」こそ、真に必要なものかもしれない。

ここまで縷々述べてきたが、これら2つの戦略はもしかすると排反ではなく、あるいは同根かもしれないとも思える。いずれにしても、その道は前途遼遠であるが。

How broad is broad enough ?

ここまでは社会科学の「立ち位置」について述べてきたが、以下、「中身」の話も少々論じてみたい。

Socio-technical な研究アプローチの射程は、その注目度の高まりとともに拡大してきた。例えばリスク管理論では、ある特定の技術や組織のみを対象としていたマネジメントが完結せず、多様なアクターとの関係性や政治・規制・社会的風土などを考慮に入れた「リスク・ガバナンス」の必要性が強調される。組織文化やヒューマンエラーの分野でも、個人から小集団へ、組織へ、そして複数組織間の関係性へと視野が広がっている。2011年刊行のINSAG-25 “Institutional Strength in Depth”は、安全確保努力を個々の組織の内部で行うのみならず、社会全体として様々な組織が関わり合いながら如何にリスクを統御していくか、という考え方を提示している⁴⁾。

このような流れのなかで、「コミュニケーション」や「ガバナンス」といった、主体と主体との「あいだ」や関係性に係る視点が重視されるようになったことは、ある意味必然的と言えよう。一方で、こうした分析射程の拡大が、リスク管理の実践にどこまで貢献しているのだろうか、との疑問も湧いてくる。

2011年夏、博士課程の学生であった筆者は、東大＝UCバークレー共同の原子力サマースクールに参加した。その際、バークレー側の講演者が、1F事故に至った日本の問題点についての歴史的・社会的分析を披歴した。曰く、日本は西欧近代の経験した「啓蒙」の時代を経ておらず、「個」が確立されていない。そのため、現場の技術者が重大なリスクに気付いたとしても組織内部で適切な問題提起ができず、結果として事故を防げなかったのだ、と。

筆者はこの話を、半ばの同意と、半ばの戸惑いとともに聞いた。たしかに、日本の「近代化」は西欧的な意味でのそれとはかなり異なるし、「自分自身の運命は自ら自由意志の下に決定する」という価値観に西洋文化ほど重きを置いていないという指摘には、首肯し得る面もある。そして、これが事故に至る一因となった可能性を完全に否定する材料を、筆者は持ち合わせていない。しかし、国家や社会を特徴づける文化の差は、あくまで相対的なものに過ぎず上下や優劣はないというのが、人類が植民地主義を克服する過程で獲得してきた見方であったはずである。もし、原子力事故を防ぐには日本の歴史を300年前からやり直すべしという含意があるとするならば、そこには当惑と反発しか生じない。

ほぼ同様の想いを、国会事故調報告書、とりわけその英語版に記された黒川委員長所感に対して抱いた。なるほど、日本社会に根付いた「マインドセット」に問題の淵源があるという指摘には、当たっている点もあるだろう。集団主義や権威に対する従順さは、適切なリスク管理を阻害するかもしれない。しかし、このような日本社会の「ありよう」自体が問題であるならば、そしてそれらは容易に変えられないのだとすれば、自ずと次の結論が導かれてしまう：「日本には原子力を扱う資格はない。」

「組織事故」論を主唱したリーズンは、チェルノブイリ事故の主席調査官レガソフの不幸な経緯（「我が国の経済政策の貧困がこの事故を引き起こした」と指摘し、その後自殺した）に触れつつ、レガソフの見解は正しかったが具体的改善策には結び付かなかったとした上で、「我々に変更可能なもの、制御可能なものに関心をもたなければいけない」と指摘している⁵⁾。変えることのできない歴史や地理的条件に根差した日本社会の特徴に事故原因を求める分析からは、実行可能な処方箋が示されにくい。原子力に携わる人や組織にとって何らかの制御が可能でないのだとすれば—(広義の)Engineeringの対象としてみることができないうのだとすれば—、その分析

は、ある種の放言にとどまっていまいかねない。

もちろん、大きな災害や事故が、当事者組織のみならず、それを巻き込む社会の根底にある問題点を抉り出し、社会全体としての改善を迫ることもある。我が国では1F事故が、隣の韓国でいえばセウォル号事件がこれにあたるだろう。この場合、当該事故から反省や教訓を得ようとする社会的過程を通じて、その国の「ありよう」が抜本的に問われ、法制度や規制体制等が大きく変えられる。しかし、シャインも指摘するように、組織の基層にある基本的想定は容易には変えられないし⁶⁾、ましてや社会全体のあり方を大きく変革させることなど、一朝一夕にできるものではない。原子力を適切に扱うために、日本社会のあり方を変えるべきで、またそれが容易に可能だと結論づけることは、非常におこがましいことであろう。

他方、筆者自身、「リスク・ガバナンス」という枠組み—これ自体、日本語に訳しにくい2つの語をさらに接続したものだが—を用いて思考を深めていると、アングロ・サクソン流の社会運営の仕方が、我が国のそれと比べ、リスクに向き合っていく上でより親和的ではないかと感ずることもある。「原子力リスクへの向き合いやすさ」という観点から見て、それが比較的容易な文化とそうでない文化、という差異があることは認めざるを得ないのかもしれない。近年では、安全文化や組織文化といった概念が西欧的な社会を暗黙の前提として構築されてきたことに自覚的となり、これらを各国の風土や文脈とともに検討しようとする流れもある。根拠の薄い文明論・文化論を振りかざすことは避けるべきだが、研究の射程拡大に伴って抉り出される、より深層・基層にある「変えにくい」問題に対していかにアプローチするかという点に対して、筆者を含めた社会科学研究者はもっと自覚的であらねばなるまい。

「リスク」の果てに

あるいは、こうした思考の隘路は、「リスク」という概念装置自体を再検討する必要性を示唆しているのかもしれない。バーンスタインは、リスク管理の本質を「ある程度結果を制御できる領域を最大化する一方で、結果に対して全く制御が及ばず、結果と原因の関係が定かでない領域を最小化すること」と指摘した⁷⁾。ルーマンは、リスクに係る決定の責任がいかに帰属されるのかという点に着目し、「決定者」と「被影響者」の間の溝こそが近代社会の根本問題であると論じた⁸⁾。すなわち、ある事物が「リスク」として語られるということは、当該問題が管理・制御・操作の対象であり、それが誰かの責任によって為されるべきだ、ということを否応なく含意する。

しかし、1F事故の背景分析は、原子力に携わる人や組

織のコントロール外にあるものに対する目配りなしに、原子力の安全は全きものとならない可能性を示唆しているようにも読める。これはもしかすると、原子力技術の問題に限らないかもしれない。あらゆる事物がネットワークで接続しようとする現代社会において、何らかの意思決定やその実践を行う上では、必然的に自らの制御可能範囲外のことをも考慮に入れざるを得ない。こうした社会においては、ある主体の制御範囲やある決定の責任帰属を画定しようとする「リスク」概念のみでは、技術と社会の相互作用の実相を必ずしも捉えきれず、新たな概念装置を必要としているのかもしれない。

ともあれ、1F事故からの教訓として、我が国は「リスク」に向き合うことを内外に宣言し、そのための法制度や組織も整備し、歩みを進めようとしている。「リスク」概念が直ちに無効化すると主張するつもりはないし、筆者自身も「リスク」の名を冠した組織に所属し、「リスク」に係る知見の生産に寄与し続けていきたいと考えている。しかし同時に、原子力に係る社会科学的研究が、上述のような「リスク」概念の有効性・妥当性に対する問い直しも含めた深い洞察に彩られるならば、それは原子力技術の「リスク」管理にも大いに貢献するであろう。

こうした思索の果てに、いったい日本の原子力利用に何の益があるのかと問われれば、正直なところ自信を持って応答はできない。ただ、原子力に係る知的営為をより豊かなものにするという意味では必ずや益があらうし、筆者としてはそこに一縷の希望があると信じたい。

— 参考文献 —

- 1) IAEA, 福島第一原子力発電所事故 事務局長報告書(日本語版), 2015年8月.
- 2) 山口昌男, 文化と両義性, 岩波書店, 1975.
- 3) A. Schutz, The Stranger, *American Journal of Sociology*, XLIX, 1944.
- 4) IAEA, A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process, INSAG-25, May 2011.
- 5) J. リーズン著, 塩見弘ほか訳, 組織事故一起こるべくして起こる事故からの脱出, 日科技連, 1999.
- 6) E.H. シャイン著, 梅津裕良ほか訳, 組織文化とリーダーシップ, 白桃書房, 2012.
- 7) P.L. バーンスタイン著, 青山護訳, リスク—神々への叛逆, 日本経済新聞社, 1998.
- 8) N. ルーマン著, 小松丈見訳, リスクの社会学, 新泉社, 2014.

著者紹介

菅原慎悦 (すがわら・しんえつ)

(一財)電力中央研究所 社会経済研究所
兼 原子力リスク研究センター



これまでをふりかえり、今後を展望する(保健物理・環境科学部会)

国民世論調査から見える原子力平和利用の課題

Subjects of Peaceful Uses of Nuclear Energy to Learn from Public Opinion Survey in Japan

占部 逸正

Itsumasa Urabe

KEYWORDS: *peaceful uses of nuclear energy, public opinion, risk perception, expectation for intention, expectation on technical capability, expert reliability*

原子力学会の設立と目的

1942年に原子核分裂を利用した原子炉が誕生し、人類が本格的に核分裂生成物と共存する時代を迎えた。1955年にジュネーブで行われた第1回原子エネルギー平和利用国際会議で初めて原子力発電の経験が紹介され¹⁾、その後、各国で原子力発電の実用化が進められた。わが国では、1959年に原子力分野の専門家をひとつにまとめる必要性から、日本原子力学会が設立され平和利用の学術的な立場からの体制が整えられた。

日本原子力学会は原子力利用に関し「公衆の安全をすべてに優先させて、原子力および放射線の平和利用に関する学術および技術の進歩を図り、その成果の活用と普及を進め、環境の保全と社会の発展に寄与する」ことを目的としている。また、倫理規定(2018年1月31日第6回理事会承認)では、原子力技術の正と負の側面を理解し、「・・・常に現状に慢心せず、広く学ぶ姿勢と俯瞰的な視野を持ち、・・・より高い安全を追求し、豊かで安心できる社会の実現に向けて、積極的に行動する」と述べている。

このような理念と倫理観を背景にして、日本原子力学会は原子力の平和利用のための基礎研究と技術開発に積極的に取り組み、世界の原子力発電とその関連技術の安全性の向上と信頼性の確保に大きく貢献してきた。

しかし、一方で原子力学会のこうした取り組みにも拘わらず、国民が原子力発電を豊かで安心できる技術として受け入れているとは言えない状況にあることを示す世論調査の結果がある²⁾。この調査は、原子力の社会的受容性に関する調査モデルを、「ベネフィット認知」、「リスク認知」、「信頼」の三つの心理要因により構成し、これらの心理要因の強さをアンケートにより測定したものである。ここでは、この調査結果を参考にしながらこれからの原子力と放射線の平和利用の在り方を考える。

原子力発電について

原子力発電に関する調査結果では、国民は原子力を「役に立つ」、「必要」なものと感じつつも同時に「危険」、

「不安」なものとして強く感じており、全体としては否定的な意見が優勢となっている。また、福島第一原子力発電所の事故(以後福島事故と呼ぶ)以降、原子力発電に対する肯定的なイメージの「必要」と「役に立つ」の割合が下降し、否定的なイメージの「信頼できない」と「不必要」の割合が急激に増加している(「信頼できない」は2010年10月の10.2%から2017年10月の30.2%に上昇)。否定的なイメージとしての「危険」と「不安」の割合が事故の前後であまり変化していないことを考慮すると、「信頼できない」や「不必要」とする意見の割合が増加したことが、原子力発電の必要性に対して、「必要である」と「どちらかといえば必要である」が62.4%(2010年10月の調査)であったものが、「しばらく利用するが徐々に廃止すべきだ」と「即時廃止すべきだ」が64.3%(2017年10月の調査)となるなど、国民の原子力発電に対する態度が否定的な方向に大きく変化したことと関連している。このことは逆に、優れたエネルギー源としての原子力発電の必要性の理解を得るためには、福島事故により失われた「信頼」をいかに回復できるかが重要な課題となっていることを示している。

放射線利用について

放射線に対しては、肯定的なイメージとして「必要」と「役に立つ」の割合が福島事故の前後で一時的に減少している。否定的なイメージについては、2011年11月に「危険」の割合が73.2%、「不安」のそれが53.8%と高いが、これらは福島事故以前と比べ顕著に増加しているとは言えない。また、「わかりにくい」の割合が急に増加しているが、これは事故後に接する情報量が急に増加したことと関連すると考えられる。放射線の利用に関しては、「医療、工業、農業などにおける放射線利用が必要である」の肯定的な意見が60.2%となっておりベネフィット認知は高く、その必要性について福島事故の前後で大きな変化は認められない。即ち、放射線利用に関しては、福島事故の影響より以前からある放射線の「恐ろしさ」や「未知性」に起因する認知バイアスが放射線の「危険」、「不安」イメージとして調査結果に表れたと考えられる。しか

し、放射線のリスク認知は関連する原子力産業等のリスクの認知バイアスとして影響している可能性がある。つまり、原子力発電所の事故は、放射線に対するリスクの認知バイアスが大きいために、より否定的な社会的評価を受け、他の製造業に比べ「信頼できない」がより強調された可能性を否定できない。放射線利用の「認知バイアス」は、国民の原子力発電に対する「信頼」と「必要性」の理解を円滑に進めることと深く関わると考えられることから、放射線安全と放射線の「認知バイアス」を改善するための取り組みは、放射線利用の促進のみならず原子力発電を「信頼できる」ものにするうえで重要な役割を果たすことになる。

防災体制について

防災体制の整備状況については、「整備されている」と「どちらかという整備されている」が8.7%で、「そうは思わない」と「どちらかというと思わない」が49.2%に達している。しかも原子力に関する情報保有量が多い人ほど、さらに地域社会の問題や課題に関心の高い人ほど後者の印象の割合が高くなる傾向を示している。原子力防災は米国での TMI 事故以来わが国でも体制の整備が続けられ、原子力災害特別措置法のもとで災害対応の実効性の向上のための検討がなされてきた。しかし、福島事故の際に、複合災害ということも重なり、災害対応が困難を極めたことからその後の防災対策の整備にも関わらず国民のなかにはその実効性に疑問を感じる人々が少なからず存在し、それが防災体制の整備状況に否定的な意見となって表れている。「事故は起こり得る」という福島事故の教訓を忘れることなく原子力防災の実効性を高めるために事業者や国、地方公共団体、専門家と国民が一体となって対話を進め、持続可能な組織体制を構築し、その技術能力を高めることが「防災体制が整備されている」という信頼感を得るうえで重要である。

放射性廃棄物処分について

高レベル放射性廃棄物については、「私たちの世代で処分しなければならない」、「最終処分場を早急に決めなくてはならない」とする一方で「最終処分場で大きな事故が起きないか心配」や「近くに最終処分場が計画されたら反対する」意見の人が50%を超え、「安全確保は可能だとは思えない」が33.8%と高くなっている。放射性廃棄物の問題については、社会的な関心に比べ専門家からの処理・処分や管理技術に関する情報が圧倒的に不足しており、国民には、多くの場合、この問題が何らかの形で社会的に採りあげられた際に限定的な情報として発信されているのが現状である。世論調査の分析でも述べているように、「地層処分についての納得感はまだ醸成されていない」ことは明らかであり、納得感を得るためには放射性廃棄物処理・処分の問題を廃棄物処分場の問題とし

てではなく処理・処分、管理の技術的な問題としてまず広く国民の理解を得ることが重要である。

求められる国民の信頼

原子力の平和利用には国民の信頼が不可欠である。信頼には二つの側面がある³⁾。ひとつは相手が役割を遂行する能力を有しているという期待としての信頼であり(やるべきことを実行できる能力を有する)、他方は、相手が信託された責務と責任を果たすという相手の意図に対する期待としての信頼(やるべきことを実行する気がある)である。原子力発電の「信頼」の問題では、原子力開発の当事者の安全対策の技術的能力に対する期待の問題なのか、あるいは安全対策を確実に実施しようとする意図に対する期待の問題なのかを分けて考える必要がある。世論調査では、原子力が信頼できない主な理由として、「正直に話していない」、「管理体制や安全対策が不足している」、「情報公開が不足している」などを挙げている。このことは、原子力発電に対する信頼は技術的能力に対する期待よりむしろ相手の意図に対する期待から生じている可能性が高い。

これに対し、原子力防災や放射性廃棄物の問題は、いまだにそれを実施する技術的能力に十分な理解が得られているとは言い難い。現段階ではこれらを確実に遂行できる技術的能力を有するという期待に対する信頼を確保することが重要である。

信頼につながる日々の安全活動

工学システムとしての原子力発電にはさまざまな事故原因が存在する。警戒を怠ると潜在的な事故原因の連鎖が生じ事象として顕在化し、この事故原因の連鎖がさらに拡大すると事象から重大事故に至る可能性がある⁴⁾。潜在的な事故原因は、自然災害を含め、設計、建設、操作、保守点検、コミュニケーション、訓練などのなかに潜んでいる。また、同時に事故原因の連鎖を断ち切るポイントは、異常の早期発見能力や再発防止策を確実にし得る技術的および組織的な仕組みの整備状況と関わっている。どのような工学システムでも小さな異常事象は必ず生じる。しかし、事故原因の連鎖を断ち切ることができれば、事象から重大事故に発展する蓋然性を限りなく小さくすることが可能である。なんらかの事故や異常が生じた場合に、わが国ではその責任を問う声が大きくなるが、重大事故に発展する前に異常を早期に発見できていることは、安全確保の第一歩において人間を含めた工学システムが正常に機能していることを示している。現在、原子力規制庁により保安規定の順守状況の調査や事故・故障等の報告が義務化され⁵⁾、異常の早期発見と再発防止対策が講じられ事故原因の連鎖による大事故の発生は高い確率で防止されている。問題は、意識しないで異常が見過ごされる、あるいは発見されてもその原因の

究明が適切に処理されない場合である。人間は、勘違いをしたり、物事を忘れてたり、同じことの繰り返しに飽きたり、面倒なことを嫌ったりする。人とその組織のこうした弱点を補い原子力施設の安全性と信頼性を高めるために、進歩の著しい情報技術を活用するなどして事故発生の蓋然性を下げる努力を不断に積み重ねることが、原子力安全を実現しようとする意図に対する期待としての国民の信頼を得るうえで重要である。

■ 専門家(大学教員・研究者)の役割

2017年調査では原子力の専門家に対する信頼は「信頼できる」と「どちらかといえば信頼できる」が22.7%となっており、福島事故を境に大きく失われた信頼が回復傾向にある。しかし、原子力情報発信者の情報源としての信頼は、専門家(大学教員・研究者)が49.6%と突出して高い。ついで、IAEAなどの国際機関(18.2%)と電力会社などの原子力関係者(16.7%)の順になっている。このことは、専門性を前提として、専門家(大学教員・研究者)には託された責務を果たす意図に対する期待としての信頼が高いことを示しており、原子力の平和利用における専門家(大学教員・研究者)の責務の重大性を窺わせる。公衆の安全をすべてに優先させて原子力と放射線の平和利用を実現するために、日本原子力学会の果たす役

割はきわめて大きい。

－ 参考文献 －

- 1) D.I.Blokhintev and N.A.Nikolaev, Proc. Inter. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, vol.3, P/615, UN, New York(1956).
- 2) 日本原子力文化財団, 世論調査, 2017年度原子力に関する世論調査, 2018年2月.
<https://www.jaero.or.jp/data/01jigyuu/tyousakenkyu29.html>
- 3) 山岸俊男, 安心社会から信頼社会へ, pp1-23, 中公新書1479, 中央公論新社, 1999年6月.
- 4) J.Reason, Managing the Risks of Organizational Accidents, 塩見弘監修, 高野健一, 佐伯邦英訳, 組織事故, pp1-27, 日科技連, 2000年8月.
- 5) 原子力規制委員会, 政策について, 保安検査に係わる報告書, および事故・トラブル情報.
<https://www.nsr.go.jp/activity/index.html>

著者紹介



占部逸正 (うらべ・いつまさ)
福山大学工学部
(専門分野)放射線防護計測



書籍販売のご案内

■ 『放射線遮蔽ハンドブック-基礎編-』

一般社団法人日本原子力学会 「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会編

A4判 370ページ, CD ROM付, ISBN 978-4-89047-161-4, 定価 5,000円(税別・送料別)

20年前に刊行されました『ガンマ線遮蔽設計ハンドブック』, 『中性子遮蔽設計ハンドブック』の改訂版『放射線遮蔽ハンドブック-基礎編-』を2015年3月16日に刊行いたしました。

ガンマ線, 中性子を一体として扱い, 『放射線遮蔽ハンドブック』としています。内容は計算の方法論を説明した基礎編で, 特にモンテカルロ計算, 核データ, 加速器遮蔽などの項目を大幅に

加筆いたしました。

販売後, ご好評により増刷しております。この機会にぜひご購入をご検討ください。

なお, 放射線工学部会HPで表紙, 目次, はしがき, 概要を公開しております。

<http://www.aesj.or.jp/~rst/>

○ご購入は日本原子力学会ホームページ 書籍販売のページよりお申し込みください○
<http://www.aesj.net/publish/shopping>



若手有志による放射線防護基準の検証： 福島事故後の緊急時作業員線量限度を巡って

Verification of radiation protection criteria by young professionals:
dose limit for emergency workers after the Fukushima nuclear accident

荻野 晴之
Haruyuki Ogino

KEYWORDS: Radiation protection, Fukushima nuclear accident, Emergency worker, Dose limit, Deterministic effects, Y-12 accidents

はじめに

「福島第一原子力発電所事故時に適用された緊急時作業員に対する線量限度は適切であったか?」「防護基準の策定において、ステークホルダーを交えた意思決定はうまく機能したか?」「人々の健康リスクを総合的に評価する手法の早期開発が必要ではないか?」これらは、放射線防護を専門とする若手有志が2011年6月に指摘した福島第一原子力発電所事故を巡る放射線防護上の諸課題¹⁾の一例である。

本稿では、若手有志が議論した諸課題の中から、緊急時作業員に対する線量限度に着目し、「線量限度を厳格に適用した場合、周辺住民の生命や生活を守るために必要不可欠な緊急措置の実施が制限されるのではないか?」という論点について、福島第一原子力発電所事故後の実測データに基づいて議論した内容を報告する。同内容については、2015年7月に開催された日本保健物理学会第48回研究発表会若手研究会セッションでも取り上げており、発表資料も公開されている²⁾。

緊急時作業員線量限度の検証

チェルノブイリ原子力発電所事故では28名もの緊急時作業員(運転員、消防員)が急性被ばくにより死亡したが³⁾、福島第一原子力発電所事故ではそのような例は報告されていない。緊急時作業員の生命を守るという意味においては、福島第一原子力発電所事故後の放射線防護策は成功したと言えるが、建屋の水素爆発や放射性物質の環境中への大量放出を防ぐことはできず、周辺住民に長期の避難を余儀なくさせたことの代償は計り知れない。

国際放射線防護委員会(ICRP)は、緊急の救助活動では1,000mSv(重篤な確定的影響の回避)あるいは500mSv(その他の確定的影響の回避)の参考レベルを用いて防護を最適化することを勧告しており、人命救助に

当たる志願者については線量の制限を課していない。しかし、日本においては、これらの緊急時作業員に対しても線量限度を適用することが法律によって定められている。福島第一原子力発電所事故以前は実効線量が100mSvであったが、事故直後の2011年3月14日から12月16日まで250mSvに一時的に引き上げられ、現在は、従前の100mSvに加え、特例緊急被ばく限度としての250mSvという二段階の構造となっている⁴⁾。

このような状況の中、放射線防護を専門とする若手有志では、今後万が一にも福島第一原子力発電所事故と同程度の大規模な原子力発電所事故が発生し、緊急時作業員の線量限度が250mSvに引き上げられたとして、建屋の水素爆発や環境中への放射性物質の大量放出などの壊滅的狀況が回避可能であるか、放射線防護の観点から検証した。政府事故調中間報告(291ページ)⁵⁾によれば、東京電力は福島第一原子力発電所のベント作業の実施により作業員の被ばく線量が100mSvを超える恐れがあったため、線量限度の引き上げを政府に要望し、3月14日に250mSvに引き上げられたとされている。しかし、線量限度の引き上げによってベントが可能になったかどうかの検討は見当たらない。そこで、事故の記録に基づいて、ベント作業に費やす時間と被ばく線量を試算した。

東京電力事故報告書(別紙2, 58ページ)⁶⁾に、1号機のベント断念の状況(2011年3月12日)が記録されている。運転員が中央制御室からベント弁までの往復距離の半分を移動するのに8分要し、100mSvの外部被ばくがあったことが分かる。現場の空間線量率を一定と仮定すれば、線量限度が250mSvに設定された場合、ベント操作に費やせる時間は約4分と試算される。中部電力の報告書⁷⁾によれば、人力によるベント操作には1弁あたり約50分必要とされており、線量限度が250mSvでは、人力による1号機のベント操作は一人では困難であったことが推察される。

次に、線量を制限する値とベント操作に費やせる時間の関係について試算した結果、現場の空間線量率を一定と仮定した場合、1,000mSvの制限値であれば64分をベント操作に費やせることが分かった。この制限値は、ICRPの勧告する緊急の救助活動に対する参考レベルとも一致する。しかし、活動する場所によって空間線量率は大きく異なるため、一概に制限値を1,000mSvに設定すればベント操作が可能になるとは言い切れない。重要なことは、壊滅的状况を回避するために受けざるを得ない被ばく線量を事前に推定し、緊急時作業員の放射線防護対策を検討するプロセスを経ることである。

今回の試算の対象が福島第一原子力発電所1号機に限られていることにも注意が必要である。普遍性が求められる法令に記載する数字を検討するためには、アクシデントマネジメントの実施に伴う作業員の被ばく線量をプラント別に検討する必要がある。そのためには、シビアアクシデント時のプラント内の放射性物質の挙動や機器の故障確率などの評価が不可欠であり、日本原子力学会保健物理・環境部会と原子力安全部会等の部会間の連携が必要になる。

確定的影響のしきい線量 250mSv の根拠

次に、若手有志では、一時的に引き上げられた線量限度(250mSv)の値の根拠について調査した。ICRPは、緊急時被ばく状況では線量が短期間で高レベルに達することがありうるため、重篤な確定的影響の防止に特に注意を払うべきと勧告している⁸⁾。確定的影響には、集団の約1%の人に発症する量で定義される「しきい線量」があり、数々の放射線生物学のテキストで、リンパ球の減少のしきい線量として250mGyという値が挙げられている。そこで、若手有志では、嶋田和真氏(日本原子力研究開発機構)が中心となり、250mGyの重要な根拠の一つと考えられる文献を調査した。その文献は、米国オークリッジ国立研究所で発生したY12エリア臨界事故について記されたものである⁹⁾。

同臨界事故の概要は次のとおりである。1958年6月16日、オークリッジ国立研究所のY-12プラントで、作業員がタンクの水を抜いてドラム缶に移した際、臨界事故が発生した。8名が被ばくし、うち5名は大量の被ばく(2.36~3.65Gy)、残り3名は比較的軽微な被ばく(0.7Gy以下)とされている。比較的軽微な被ばくを受けた3名についての血液像の変化に関する報告があり、「22.8radの者では、被ばく後2~4週間後に緩やかなリンパ球増加症が何らかの理由で認められた」とある。この22.8rad(228mGy)被ばくした者の線量と臨床症状が、リンパ球の減少のしきい線量を250mSvとした重要な根拠の一つになったと考えられる。

ここで着目したのは、根拠となるデータが60年以上も前であり、当時は中性子の放射線加重係数が線量評価

手法に考慮されていなかったことである。文献調査を継続した結果、同臨界事故の線量再構築に関する報告書¹⁰⁾が2006年に纏められていることを発見した。事故時の中性子スペクトルと放射線加重係数(ICRP1990年勧告)を考慮して中性子線量を再構築した結果、該当作業員の線量が228mGyから982mSvに変更されていた。リンパ球の減少のしきい線量を250mSvとした重要な根拠の一つが大幅に見直されたことになる。

他方で、確定的影響が発生する最も低いしきい線量は、男性の一時的不妊(睾丸)で、急性被ばくで約0.1Gyとされている¹¹⁾。しかし、一時的な症状であり、回復が期待されることから、緊急時作業員の線量制限との関係で議論された例は見当たらない。

緊急時に何を守るべきか？

厚生労働省が2014年に設置した「東電福島第一原発作業員の長期健康管理等に関する検討会」の報告書(22ページ)¹²⁾では、緊急時作業員の線量限度の考え方について、「緊急時作業中のリンパ球数の減少による免疫機能の低下を確実に予防するという観点から、東電福島第一原発事故時に、しきい値を確実に下回る250mSvを緊急被ばく限度として採用したことは、保守的であるが妥当といえる。」と記載されている。一般に、通常の労働安全の観点からは、免疫機能の低下を確実に防止することは重要である。しかし、破滅的状况の回避という例外的な事態に直面した際、免疫機能低下の防止に固執するあまりに、住民の生命や財産を守るために必要不可欠な措置が講じられないことはあってはならない。免疫機能低下とそれに伴う感染症の多くが通常医療により治療可能であるのならば、重篤な確定的影響の指標とはならないだろう。緊急時作業員がある程度の健康リスクを負わなければ、住民の生命や財産を守れないという現実と対処しなければならない。緊急時作業員に対する事前の意思確認や教育、訓練、医療環境の整備が必須であることは言うまでもない。

まとめ

本稿では、東京電力福島第一原子力発電所事故後に適用された緊急時作業員の線量限度について、放射線防護を専門とする若手有志が検証した結果の概要を紹介した。血液像の変化が見られる最小のしきい線量に関する重要な根拠の一つが大幅に見直された中、周辺住民の生命や生活を守るために必要不可欠な緊急作業に従事する者の線量制限値を設定するにあたっては、確定的影響の重篤度や被ばく後の医療環境まで考慮して考えていくことが重要であるとの結論に達した。

結びとして、次の格言を胸に刻んで、将来の原子力・放射線のリスクと向き合っていきたい。

There are risks and costs to a program of action. But they are far less than the long-range risks and costs of comfortable inaction. John F. Kennedy

ある行動を起こすには、リスクとコストが常に伴うだろう。しかし、楽をして行動しない場合の長期的なリスクとコストに比べれば、それらはずっと小さいものである。
ジョン・F・ケネディ

－ 参考文献 －

- 1) 荻野晴之, 谷幸太郎, 河野恭彦, 嶋田和真, 藤通有希, 福島第一原子力発電所事故を巡る放射線防護上の諸課題と今後の展開～若手, 学生より, アンケート結果等を含めて～, Jpn. J. Health Phys., 46(3), 197-204(2011).
- 2) 日本保健物理学会若手研究会, 緊急時作業における放射線防護の課題, 第48回研究発表会, 2015年7月2日(2015).
http://www.jhps.or.jp/wakate/events/150702_radiation%20protection%20in%20emergency.pdf
- 3) United Nations Scientific Committee of the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes(2008).
- 4) 電離放射線障害防止規則, 第二章 管理区域並びに線量の限度および測定(第三条～第九条).
- 5) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会, 政府事故調中間報告(2011).
- 6) 東京電力株式会社, 福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所における対応状況について(平成24年6月版)(2012).
- 7) 中部電力株式会社, 浜岡原子力発電所4号炉格納容器フィルタベント系(主ライン・弁の構成および運用方法等)について, 平成27年4月7日(2015).
- 8) International Commission on Radiological Protection, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4) (2007).
- 9) Brucer, M., The Acute Radiation Syndrome A Medical Report on the Y-12 accident. United States Atomic Energy Commission, Oak Ridge Institute of Nuclear Studies, Oak Ridge, Tennessee(1959).
<https://www.osti.gov/opennet/servlets/purl/16296353.pdf>
- 10) ORAU TEAM Dose Reconstruction Project for NIOSH, External Radiation Dose Estimates for Individuals Near the 1958 Criticality Accident at the Oak Ridge Y-12 Plant, ORAUT-OTIB-0057(2006).
- 11) International Commission on Radiological Protection, ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects on Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2) (2012).
- 12) 厚生労働省東電福島第一原発作業員の長期健康管理等に関する検討会報告書, 平成27年5月1日(2015).

著者紹介

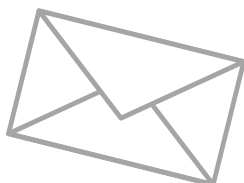
荻野晴之 (おぎの・はるゆき)
電力中央研究所

メール配信サービス (AESJ-NEWS) 会員限定配信のご案内

これまで任意登録していただいていたメール配信サービス「AESJ-NEWS」は、2016年7月から会員限定配信に変更になりました。

会員管理システムにご登録いただいているメールアドレスへ配信しておりますが、会員管理システムにメールアドレスを登録していなかったり、古かったりすると配信されません。配信希望の方でAESJ-NEWSが届いていないという方は、会員管理システムへのメールアドレスのご登録、または、登録しているメールアドレスのご確認をお願いいたします。

◇ 配信を希望されない方は、本会HP会員情報変更の情報メール (AESJ-NEWS) の受信を希望しないをチェックしてください。



◇会員情報変更◇

PCからはこちら
http://www.aesj.net/service_for_member/membership_service

スマートフォンからはこちら



これまでをふりかえり、今後を展望する(核データ部会)

共通基盤的なデータの必要性

Necessity of Commonly Usable Data

深堀 智生

Tokio Fukahori

KEYWORDS: *necessity, database, computer code, nuclear data, JENDL, verification, validation, nuclear system, design*

思い

原子力を考える上で、たとえそれが今後継続的に発展するのであれ、漸近的に終息に向かうのであれ、ある決断をする場合は、根拠をもってステークホルダーに「腑に落ちていただく」ことが肝要と考える。ここで、あえて「納得してもらおう」と書かなかったのは、筆者としては「納得」では説得して、「いやいや承諾」してもらおうようなニュアンスを感じるからである。もちろん、ステークホルダー全員に腑に落ちていただくことは不可能である。それでも、透明性および公平性を持ち、科学的である根拠を示す必要がある。ではこのような根拠はどのようにしたら得られるのであろうか。筆者の関心分野である核データのように、それがどのような分野に利用されようと、多くの学術的な努力の末、様々な議論を経て得られる共通基盤的なデータや手法を醸成する以外にはないのではなかろうか。例えば、規制側と開発側は同じデータを利用してよいと考える。データ自体に色はない。データを利用した研究結果について、その解釈にそれぞれの判断を加え、説明性を持たせれば良い。

共通基盤的なデータには、物理定数、熱力学データ、化学反応データのように基礎科学的なアプローチが必要なものもあれば、材料強度や腐食速度などの工学特有の対象が限られたものもある。本稿では、共通基盤的なデータについて、基礎科学と工学の両方の側面を持つ核データを例に引き、考えてみたい。

歴史

評価済核データファイルは、我が国の初期の段階では軽水炉(JPDR)用燃焼計算炉定数および高速炉研究のための基礎データとしての核データ(当初は「核定数」と呼ばれていた)への要請から始まった。詳細な核データファイルの歴史は、参考文献1)に譲り、ここでは簡単に述べる。軽水炉燃焼計算炉定数(1966)、熱中性子炉用炉定数JNDCセットNo.1(1968)、JAERI Fast Set(1970)などが初期の核データファイルである。その後、これらを発展させたJENDL-1(1977)、総合的な核データファ

イルであるJENDL-2(1982)、核融合炉も視野に入れたJENDL-3(1989)、アクチノイド核種および一部の構造材核種に共分散データが格納されたJENDL-4(2010)²⁾と続く。

これらJENDLの大きなモチベーションは、核分裂炉のみならず、核融合炉やADSまで視野に入れた原子力エネルギー開発に資するためであるが、これ以外にも宇宙における元素合成や中性子捕捉療法などで重要な核反応データにも応用が利くものであった。今後は、新たな利用を目指したJENDL-5の構想が進んでいる。

ニーズの考え方

核データが無くても原子力施設は設計できる。例えば、当時は遅発中性子の存在さえ知られていなかったのに、CP-1(1942年12月初臨界)を設計したFermiほどの程度の「核データ」を使用していたのであろうか。ちなみに、核分裂反応が発見されたのが1939年、Pu-239の核分裂が確認されたのは1941年のことである。「Fermi推定」で有名なように、彼自身は「概算」の達人であったといわれる。安全を考慮に入れなければ、やり方にもよるが、濃縮ウラン(CP-1の場合は天然ウラン)を積んでいけば、そのうち臨界に達する。念のために申し添えるが、Fermiは3本のカドミウム製制御棒およびカドミウム塩溶液の入ったバケツを用意させていた。

一方、安全性や経済性を向上させたいのであれば、核データを用いた予測システムの性能を向上させる必要がある。この予測システムは、現在では計算機を用いたコードによるものとなっているが、当初はノートの上で計算された数値によるものであったであろう。とすれば、モンテカルロ・シミュレーションなどはもっての外で、どちらかと言えば定性的な数式を用い、代入する数値としては、平均的な代表値を用いていたと思われる。現在では、原子炉内の構造材や核燃料の配置をCADデータに匹敵する詳細な表現で入力することが可能であるので、適切な入力データを用いれば、不確かさはほとんど核データによるものと信じられている。すなわち、解くべき方程式(原子炉の中性子による核特性の場合は、

ボルツマン方程式)が確定していれば、そこに代入する共通基盤のデータである核データがしっかりしてさえいれば、予測値は確実に真値の近傍に収束していく。

このように、作るべき原子力システムによって、共通基盤的データに対するニーズは、平均値さえ与えられていればよいものから誤差を伴った高精度の数値データセット(データベース)に至るまで、幅広いものとなる。ユーザのニーズは対象とするシステムによって、その幅の中のどの程度のものが必要かを見定めたものでなければならない。そうでなければいたずらに高精度なデータベースを要求されることになる。完成度99%のものにするためには、90%のものを作るのに比べて何倍もの労力が必要なのである。原子炉の核特性解析における臨界性評価と核データの関係については、まさに99%以上のものが求められている分野である。現状では、JENDL-4.0を用いた臨界ベンチマーク解析においては、C/E値で0.5%以内の誤差で計算がなされている³⁾。

ご存知の通りユーザ・ニーズは国によって違う。そのために、必要なデータベースの対象は、国によって異なる。計算手法についても、根本的な部分は同じでも、目的が違えば必ずと注力する部分が違ってきて当然である。自国のニーズに入らない部分は、その国が作成しているデータベースやコードを改良することは稀である。どの国が親切にも我が国のために自国に必要な機能のコードに付加してくれるというのか。これが、データベースやコードを国産化する理由となる。

反省

核データに関して個人的な反省点を挙げるとすれば、共通基盤的データとしての核データが「しっかりしている」ということについて、最初は、微分データを再現できれば良いと思っていた。その後、ユーザとのおつきあいが進むにつれて、積分データを加えることが重要であることが、徐々にわかってきた。しかし、これだけでユーザが使ってくれるとは限らない。「裕度」という概念を考えたときに、誤差さえ入れれば大丈夫と思っていたような気がする。「これだけやったのだから・・・」という思いはあったと思う。しかし、実際に使っていただくためには、計算結果に対する説明責任が必要であることがわかってきた。説明責任とは何であろうか。定義は対象によって様々であろうが、ここでは、結果に対する信頼性の保証であると考えている。統計学で言うところの有意水準のようなものかもしれない。少々定性的に過ぎるかもしれないが、「この条件で、この手法で計算したものは、この程度の不確かさをもって、正しいことが検証されている」と言えることが重要と考える。このための概念が、信頼性と妥当性の検証(verification and validation, V&V)だと思う。V&Vまでやって、ユーザは安心して使えるようになるのではないだろうか。

評価済核データファイルで言えば、その評価手法が信頼できるのは微分(実験)データを用いて検証し、評価結果が妥当であるのはベンチマークに用いる積分(実験)データで確かめる。その上で、実際のシステムに適用して見て、使えることを確認する(V&V)。こういった一連の流れが重要となる。核データの精度を必要とするのであれば、上記の微分実験および積分実験による測定データの充実が必須である。特にV&Vのための実機データが重要である。実機データの取得のためには、実際にシステムを稼働されている施設運用者や電力の方々の協力が不可欠となると考えている。

原子力学会への期待

以上述べてきたように、原子力エネルギーのみならず多くの分野を下支えする共通基盤的データは、最終的に実験でしか確認することはできない。このためには多くの装置や施設が必要となるが、国や民間の予算は限られている。共通基盤的データを取得しようと努力している研究者自身の工夫も必要であるが、これら研究者を集め、全体としてどのように考えていくのが合理的か議論する場を提供するのが学会の担う役割であるように思われる。実機データの取得のためには、さらにハードルを越える必要があると感じている。筆者が言うまでもなくそのような活動をされてきていると思っているが、さらに分野間、学会間の連携を模索し、「知の基盤」を支える活動をお願いしたい。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構核データ研究グループ編, 「II. シグマ特別専門委員会・シグマ研究委員会年表」, 核データニュース, 104, p.35(2013).
- 2) Keiichi SHIBATA, Osamu IWAMOTO, Tsuneo NAKAGAWA, Nobuyuki IWAMOTO, Akira ICHIHARA, Satoshi KUNIEDA, Satoshi CHIBA, Kazuyoshi FURUTAKA, Naohiko OTUKA, Takaaki OHSAWA, Toru MURATA, Hiroyuki MATSUNOBU, Atsushi ZUKERAN, So KAMADA and Jun-ichi KATAKURA, "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering", J. Nucl. Sci. Technol., 48, 1-30(2011).
- 3) Go CHIBA, Keisuke OKUMURA, Kazuteru SUGINO, Yasunobu NAGAYA, Kenji YOKOYAMA, Teruhiko KUGO, Makoto ISHIKAWA and Shigeaki OKAJIMA, "JENDL-4.0 Benchmarking for Fission Reactor Applications", J. Nucl. Sci. Technol., 48, 172-187(2011).

著者紹介



深堀智生 (ふかほり・ときお)

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門

(専門分野/関心分野)核データ研究, 原子核物理, 原子力基礎基盤研究

これまでをふりかえり、今後を展望する(核データ部会)

核データ測定 — これまでとこれから

Nuclear data measurement – past, present and future

片測 竜也

Tatsuya Katabuchi

KEYWORDS: nuclear data, nuclear reaction, measurement, neutron

筆者は十数年前に理学系の原子核物理から核データ研究に移り、核データ測定に携わってきた。筆者の視点から見た核データ測定について述べてみたい。

まず、核データ研究と原子核物理の違いを考えてみよう。核データ研究と原子核物理との大きな違いは核データ研究が工学研究であるという点である。測定手法や理論モデルは原子核物理と大きな違いはないが、その目的は異なる。それは工学的に必要とされる原子核データの提供である。平たく言えば「社会の役に立つのか」ということである。一方、原子核物理は原子核の構造や反応の物理的描像の追求であり、「そこに物理はあるのか」という問いに尽きる。もちろん両者は原子核というものに対する姿勢が異なるだけで反目するものではない。同じ道具立てで研究を進める以上、不可分の共存関係である。

核データ研究は核データライブラリの構築を軸に進められてきた。原子炉工学をはじめとする核データのユーザは核データライブラリを通して核データを利用する。そのために核データライブラリの高精度化や格納核種の拡充、つまり「社会の役に立つ」ものにするのが核データ研究の中心的な命題である。

歴史的には核データ研究は原子炉工学からの要請が発端であった。そのため特に中性子核反応データのライブラリ整備に力が注がれてきた。一方で現在では核データ利用は原子炉工学に限らず、核融合、医療、遮蔽、宇宙物理、分析、核セキュリティといった分野に広がっている。それに応じ、核データ研究の対象もまた荷電粒子入射反応や高エネルギー反応など拡大を続けている。

核データ測定は加速器科学や放射線計測技術の発展とともに歩んできた。それらの技術的発展とともに実験データの高精度化や対象領域の拡大を成し遂げてきた。近年の技術的進展で言えば核破砕中性子源の利用が挙げられる。核破砕反応で作られた高強度のパルス中性子ビームを用いることで微量試料の中性子核反応断面積が測定できるようになった。測定に必要な試料が微量ですむため、核変換研究で重要なマイナーアクチニドや長寿命核分裂生成物といった放射性核種の測定が可能になった。さらに最近の技術的進展としては、代理反応を用い

た核分裂研究や不安定核ビームを用いた研究が挙げられる。

さて将来の核データ測定はどうなっているだろうか。この疑問に答えることは容易ではない。核データの利用が多岐にわたっているためである。十年二十年程度のスパンで考えた時、一つの方向として考えられるのは小型中性子源を利用した応用の展開である。現在、高強度の小型中性子源の開発が盛んに行われている。その利用目的は、ホウ素中性子捕捉療法、分析、核セキュリティといった応用である。これらの小型中性子源の特徴は、高強度、小型、経済的というキーワードで表せる。小型の高強度中性子源が広く利用されるに伴いこれまであまり重要視されなかった核データの需要が高まるだろう。また、高強度の小型中性子源を用いて核データ測定を行うということも考えられる。現在開発中の小型中性子源の中性子ビーム強度は現行の小型中性子源の二桁も三桁も高いので大学のような小規模の施設においても高精度核データ測定が可能となる。

ここで核データ測定のあり方として複数施設による測定が重要である点を強調しておきたい。これまで複数の独立の測定値を比較・検討することで核データの信頼性は向上してきた。核データは物理量である以上、一つの真値が存在する。複数の測定値間で一致しなければ測定で見落としている何かがあることを示唆している。

そういう意味で日本国内に複数の核データ測定施設がある故に日本の核データ測定は支えられてきたと言える。2012年にブダペストでIAEA主催の「高精度核データ測定のための中性子ビーム利用」という会議が開かれた¹⁾。欧州からの出席者が大勢を占める会議であったが、日本からも誰か出席して欲しいということで筆者が出席した。会議後、報告書がまとめられ、別冊には各国の中性子ビーム施設の紹介をまとめた。その際、国内の11施設の方に執筆をお願いした。1国でこれだけの数の施設があることに感動を覚えた(但し残念ながらいくつかは既に閉鎖している)。このときは中性子ビーム施設のみリストアップしたので荷電粒子ビームも含めれば測定施設の数はずっと増えるであろう。

最後に研究を支えるのは人であることを強調したい。核データ測定施設もその技術を継承し測定する人がいなければ成り立たない。今後もその技術と精神を継承し、活発に測定を続けていく上で人材の確保と育成は欠かせない任務である。

著者紹介



片淵竜也 (かたぶち・たつや)

東京工業大学 科学技術創成研究院

(専門分野/関心分野)核データ測定, 原子核物理, 中性子捕捉療法

－ 参考文献 －

- 1) Technical Meeting on Use of Neutron Beams for High Precision Nuclear Data Measurements, Budapest, Hungary, 10-13 December 2012, IAEA-TECDOC-1743(2014).

日本原子力学会 創立 60 周年シンポジウム 「震災をこえて原子力の明日」開催のご案内

日本原子力学会は1959年2月14日に創立され、創立60周年を迎えました。この間、学会設立の趣旨に沿って、原子力の平和利用に関する学術および技術の進歩を図り、我が国の原子力研究開発の発展に寄与するとともに、会員相互の啓発に努めてまいりました。

しかしながら、2011年3月11日に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故により、我が国の原子力安全に対する信頼は失墜し、当学会の活動も大きな影響を受けました。このような状況の中で、事故への対応を含む学会活動を振り返りつつ、原子力の平和利用に対する信頼の回復と新たな発展への展望を開くため、下記のとおり、創立60周年シンポジウムを開催致します。多数の方々のご参加をお待ちしています。

シンポジウム

日時 2019年4月25日(木)10:30~17:55
場所 東京工業大学 くらまえホール(目黒区大岡山2丁目12-1 東工大蔵前会館)
定員 300名(定員になり次第締め切りとさせていただきます)
参加費 原子力学会員：無料、原子力学会員以外：2,000円(税込)、学生：無料
<注意>ご所属先が賛助会員であっても参加される方が非会員の場合、非会員扱いとなります。

申込方法 4月12日(金)までにシンポジウム申込専用 URL よりお申し込みください <http://aesj.net/60thsymp>
プログラム

第1部(10:30~12:30)

(司会)西野由高(原子力学会理事、日立製作所)

- | | |
|------------------------|-----------------------------------|
| [1]学会60年の歩み ―震災に向きあって― | 駒野康男(原子力学会会長, MHI NSエンジニアリング) |
| [2]特別講演「福島復興の現状と今後の課題」 | 開沼 博(立命館大学) |
| [3]特別講演 | 山根一真(ノンフィクション作家) |
| [4]海外からのビデオメッセージ | 原子力学会(米国, 仏国, 英国, 中国, 韓国, カザフスタン) |

第2部(13:30~18:00)

(座長)上坂 充(原子力学会前会長, 東京大学)

- | | |
|----------------------------|----------------------|
| [1]地球環境と原子力 小宮山涼一(東京大学) | |
| [2]将来の原子炉への展望 ―学会の役割― | 山口 彰(原子力学会副会長, 東京大学) |
| [3]バックエンド研究 ―現在と今後― | 稲垣八穂広(九州大学) |
| [4]高精度外部放射線治療と量子医理工学の今後の展望 | 白土博樹(北海道大学) |

(座長)羽倉尚人(東京都市大)

- | | |
|--------------------------------------|---------------|
| [5]量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 | 小野田 忍(QST) |
| [6]J-PARC 大強度パルス中性子源の特長とその利用技術 | 甲斐哲也(JAEA) |
| [7]オルガノイド形成法を用いた低線量率放射線影響の解明に向けた取り組み | 藤通有希(電力中央研究所) |
| [8]宇宙探査のための原子力 | 西山 潤(東京工業大学) |

閉会の辞

「原子力の明日」

岡嶋成晃(原子力学会副会長, JAEA)

情報交換会(懇親会)

日時 2019年4月25日(木) 18:10~19:30
場所 ROYAL BLUE 精養軒(東工大蔵前会館2階)
参加費 5,000円(税込)

定員 100名(定員になり次第締め切りとさせていただきます)

申込方法 4月12日(金)までにシンポジウムの申込みと同じ URL からお申し込みください <http://aesj.net/60thsymp>

シンポジウム・情報交換会問合せ先

日本原子力学会 事業課企画グループ, E-mail: kikaku@aesj.or.jp, TEL: 03-3508-1261

これまでをふりかえり， 今後を展望する (材料部会)

異床同夢

The same dream

阿部 弘亨

Hiroaki Abe

KEYWORDS: *nuclear materials, nuclear safety*

ここは小さな国のとある街。街はずれにちょっとした工場がある。昔からある工場だが、社長さんの趣味なのか頻りに外壁の手入れをしているので綺麗で見栄えは悪くない。それに環境汚染もないらしい。煙突からモクモク煙が出ていることもあるが、熱くなっている炉を冷やすために水を使っているの、その水蒸気だそうだ。そこで働いている人もこの国にはたくさんいる。

◇

A氏は街のバーで一人考えている。あの工場は危険だ。見かけを綺麗にしているのが何よりの証拠。きっと何かを隠しているに違いない。環境汚染が無いと謳ってはいるが、本当か？目に見えない、においもしない、何かを出しているのではないか？人間に感じ取れないのであればクリーンだといっても嘘ではない。何せ、社長にすら見えないのだから。

A氏はさらに考える。そもそもあの工場は安全なんだろうか。何十年あそこにあるのか覚えていないが、いままでも事故は無かった。だからなのか、この国の人達は安心しきっているようにも見える。

『けれど、明日のことは誰にも分からない。』

そう。だから盲信してはダメだ。それは責任の放棄にすぎない。マスコミ報道も鵜呑みにして良いとは思わない。そう考えて以前、あの工場の見学会とやらに自ら足を運んだことがある。大きな機械や太い配管が沢山あった。工場の人々が誇らしげに説明してくれた。安全が強調されていたように思う。専門用語が多くて何がどう安全なのかすっかり忘れてしまったけれど。

確かにあの時の説明ではあの工場は安全なんだなと思った。でもなんとなくモヤモヤが残ったことも覚えている。それは、安心しきれずに残った不安なのだろうか。ならば、安全が安心につながっていなかったということなのだろうか。

A氏はだんだん分からなくなってきた。安全と安心とは何だろう。あの工場が無ければその分安全かもしれない。でも、それは安心につながるのだろうか。あの工

場があることで支障なく生活できるし、仕事もあるし、それはそれで安心と言えるのではないだろうか。しかし同時に、あの工場があることで、安心ではないという感情も同居する。高速道路を歩いて渡るような目の前にある危険ではない。今まで大した事故もなかったあの工場が将来にわたって事故を起こさないという保証があるかどうかだ。

いろいろ考えを巡らしていた最中、お店のママが突然話しかけてきた。ねえ、今日は黙りこくって面白くないわね。そういえばあの工場、今度また改良工事するんですって。お上のご命令かそういうものらしいわ。理由はいいとして、そうするとこの国にまた人が増えるわね。お店も繁盛しそうだわ。この国はあの工場でもっているようなものね。それにあそこでは電気を作っているんでしょ？無くなったらみんなが困るわよね。このお店の電気も暗くなっちゃうのかしら。

いやいや、この狭いお店で薄暗くしてママと二人でお酒は飲みたくないよ、と言いかけてA氏は思いとどまった。ママのご機嫌を損ねるのはすこぶるよろしくない。

そのうちに酔いが回ってきたのか、A氏は次第に眠くなってきて、いつの間にか夢に落ちていった…

◇

男がいる。バーで好きな酒をちびちびやりながら一人考えている。

私があこの工場に就職して30年。長いものだ。やりがいのある仕事だった。思えば私の仕事は安全を脅かす何かとの戦いだった。駆け出しのころはポンプがしょっちゅう故障して交換作業に走り回った。バルブに穴が開いて熱水が噴き出したこともある。熱交換器が破裂したこともある。燃料に熱水が入ってしまい急速に腐食が進行したこともある。出力制御装置が途中で引っかかって壊れてしまったこともある。冷却系統が故障して炉の温度が上がり続けたこともある。腐食に気づくのが遅れたことも。とにかくいろんなトラブルがあった。

予測できるトラブルはまだ良い。予測できないものは厄介だ。30年の間にデータを蓄え、分析して工夫した。

時には偉い学者先生に教えてもらったこともある。でもあれはあまり役に立たなかったな。難しい数式とにらめっこしていた時に電気系統が故障して真っ暗になって、さすがに慌てたっけ。そういえばあの本はどこにいったかな？ともあれ、長年の試行錯誤と創意工夫と理論のおかげで、機械の故障を予測することもできるようになった。そして今まで大きな事故を起こさずやってこれた。これもチームのみんなのおかげだ。

『けれど、明日のことは誰にも分からない。』

そう。だから備えるのだ。安全は至上命題。誰にも分からないからこそ、杞憂の不安にただ苛まれるのではなく、不安に対して向き合うのだ。思いつく限りの対策を何重にもたてる。装置の品質をきちんと管理して誤作動しないように努力する。それでも故障したときの対応策をきちんと立てて、いざというときに慌てずに済むようにする。こういった積み重ねを軽んじてはこの国の人々に顔向けができなくなる。目指すのは究極の安全、か。でも、30年の経験でもまだわからないことがあるものだ。究極の安全とは何だろう。今度またあの先生に教えてもらうことにしよう…

◇

ちょっと、お客さんたち、起きてくださいな。肩を揺すられて A 氏は目を覚ました。ああ、あれは夢だったのか。

ふと隣を見るといつの間にかもう一人客がいて、その人も居眠りしていたようだった。ママはちょっと拗ねている。もう二人とも、ちょっと目を離れた隙に寝ちゃって。ここはお酒を楽しむところなんですからね(怒)。

ご機嫌斜めのママを放っておいて A 氏は客にあいさつした。夢の中で見た顔だ。彼は N 氏と名乗った。

驚きました。奇遇ですね。今夢を見ていたのですが、夢の中で私はあなたでした。

N 氏も驚きつつ、そして同じだったと言う。どうやら夢の中でお互いの考えていることを共有していたようで

すね。しかも同じお店にいるなんて。

初対面なのにそんな気がしませんね。A 氏は続く言葉をちょっと飲み込んだ。きっと N 氏はあの工場の責任者の一人だ。私とは立場が違う。彼が推進派ならば私はいわば反対派だ。

でも、なんだ。私はあの工場が安全なのか考えていたのだが、N 氏も全く同じことを考えていたではないか。私と N 氏は結論こそ違うが、そこに至る過程は同じだった。夢の中では、安全に運転して安定に電気を供給するとか言っていたな。なるほど。

それからしばらく私は N 氏とお互いの考えについて語り合った。N 氏は、夢の中で見た私の考えを批判せず受け入れたうえで彼の考えを丁寧に説明してくれた。安全を目指すとはどういうことなのか。安心とは何なのか。お互いに意見し合った。素人に分かり易い言葉を使ってくれたことが印象に残る。

◇

ママに促された。そろそろ閉店の時間だ。帰ろう。店の外で A 氏は改めて N 氏に向き合った。今晚は楽しいお酒でした。これからもお仕事頑張ってください。N 氏は微笑んでいた。私もです。あなたのご批判に真摯に応えられるよう頑張ります。

N 氏が立ち去り雑踏に紛れていった。後ろ姿を目で追いながら A 氏は思う。あいつは良い奴だった。信頼できる。ならばあの工場の安全とやらを信用しても良いのかもしれない。ただ盲信はするまい。いつかまた話をしてみよう。そして改めてこの目で確かめてみることにしよう。

著者紹介

阿部弘亨 (あべ・ひろあき)

東京大学大学院

(専門分野/関心分野)原子力燃料材料科学、材料科学、電子顕微鏡学



これまでをふりかえり、今後を展望する(材料部会)

先進材料の可能性を押し上げる加工技術

Processing technology enhancing the potential of advanced materials

能登 裕之

Hiroyuki Noto

KEYWORDS: *Processing Technology, Advanced Materials, Hot Isostatic Pressing*

はじめに

これまで著者は、原子力・核融合を中心とした耐熱系構造材料の研究を行い、本学会等でも様々な基材の酸化物分散強化合金や低放射化材料に関する勉強をさせていただいた。その中で、少しずつ時代の変化とともに研究の動向が変遷してきているのを感じている。本稿では、この変遷から考察し、これからハイライトになり得る研究およびその研究の効率的遂行において有益となる手法について予想する。

高性能化された先進鉄鋼材料に求められる加工技術

核融合炉用鉄鋼材料における変遷をみると、放射線によるオーステナイト鋼のスウェリング化が問題として提起されたことがきっかけで、それまで期待されていたオーステナイト系 SUS 鋼は見直され、新たにスウェリング性の低いフェライト鋼へ変更された。そこで、強度においてオーステナイト鋼よりも劣るフェライト鋼を強化するため、相変態や析出物の強化技術により、F82H 鋼や ODS 鋼といった先進エネルギー材料が生み出されることになった。特に ODS 鋼においては、次世代核分裂炉燃料被覆管の候補としても期待を集めており、この分野における次世代構造材料は、核分裂原子炉用の材料としてはもちろん、将来的な核融合炉の候補材料としても、密接にかかわっている。そして、これまで核融合・原子炉材料の研究は、「評価研究」と「材料開発」が相互にフィードバックして材料の高性能化に寄与してきたといえる。

このような新材料の性能は非常に高く、耐熱性、耐照射性、耐腐食性など、その実用化へ向けた調査が進められてきた。しかしながらこれらの材料は非常に高性能に強化されているがゆえに、塑性能を必要とする加工や部分的溶融を伴う溶接に弱く、またそれにより高性能化された組織が部分的に失われることが知られている。つまりこれからの研究として、高性能金属材料をコンポーネント化するための「加工プロセスの技術」が必要不可欠となる。

異分野における加工技術

塑性加工の自由造形という利点を持つ次世代の加工技術の一つとして、HIP(熱間等方加圧)を用いた加工法が挙げられる。HIP 処理は、不活性ガスによりあらゆる方向から加圧を加えることができ、この技術を応用すると、接合一体成型が可能となり、非常に複雑な冷却部材を製作することができる¹⁾。このような高度に自由度の高い加工プロセスの最大の特徴は、単に自由造形ができるという点に留まらない。

ここで一つ、加工技術の可能性を示す事例として、耐熱素材が、融点付近の高い温度域で除熱コンポーネント材に用いられている例を紹介する。産業用ガスタービン翼や航空機のエンジン翼は、非常に複雑な除熱冷却構造によりその素材融点に近い温度域にもかかわらず、使用できることが知られている²⁾。一般的に構造材料はそのような温度領域では強度が担保されないため使用されることは少ない。しかしながら、上記の例では効率的な冷却システムが反映された設計により実現しており、その設計を可能としているのが素材の加工技術なのである。そこで、著者は、もし、このような設計・加工技術が核融合・原子炉材料分野にあったならば、先進材料設計の可能性を広げることができ、将来的には、同じような先進的加工技術が求められるのではないかと考えた。つまり、これらの材料における高められた性能を生かすも殺すも素材開発における次のステップである加工プロセスにかかっているとみえるのだ。

実際に核融合分野では実験炉の建設に世界が動いており、その先の原型炉設計開発も本格化してきている。そのような情勢の中で、研究現場には、実際のコンポーネント製作研究やその設計が求められる段階に来ている。そのため、材料開発では、より高度化された加工技術が、これからの数十年の原子力・核融合材料研究のハイライトの一端になると推測しており、難航する次世代炉へのブレイクスルーの一つになり得ると期待している。

共同利用を目的とした HIP 装置

前述した次世代の加工技術として期待されている熱間等方加圧 (Hot Isostatic Press : HIP) の特徴を紹介する。HIP 処理とはアルゴン (Ar) や窒素 (N₂) といった不活性ガス等を媒体として、等方的な高圧と高温にて加圧を加える処理のことである。被処理体には均一に圧力が加わり、加圧後の形状は初期の被処理体の形状と大きく変わることがなく、変わる場合でも相似的に収縮する。このような加圧特性を応用すると、「粉末材料の焼結」、「焼結・鑄造材料の内部欠陥、残留空孔の高密度化」、「カプセリングを行った異種材料の拡散接合」が実現でき、技術力によっては非常に複雑な成形を可能とする。

この装置は、一般的に産業応用の側面が強く、学術機関における導入は、これまで例が少なかった。その理由として、装置自体のコストだけではなく、高圧ガス保安法に関わる保安設備、保安係員、定期検査などがあり、学術機関における HIP 研究は外部発注のケースが多かった。そこで将来的な HIP 成形技術研究の拡大が見込まれる現状を考慮し、自然科学研究機構-核融合科学研究所(岐阜県土岐市)では、共同研究・利用を目的とした小型 HIP 装置を導入した。これは小型でありながらも産業用装置であり、一般的な研究用 HIP 装置(通称ドクター HIP)とは異なり、処理室容量は 120mmΦ-240mmh と、試作材料の小規模焼結から、小型モックアップ体製造までを見越せる容量を持っている。

この共同利用のための HIP 装置では、導入以来、これまでにない新しい試みが数多く実施されている。その例を以下に示す。

○タンダステン(W)材料の高韌性化・成形技術 : W は、核融合ダイバータのプラズマ対向材料(PFM)に留まらず、高エネルギー加速器のターゲット材として期待されており、その高韌性化が望まれている。この高韌性化の手法の一つとして炭化チタン(TiC)を微細分散させた粒界強化型 W-TiC 合金の開発を進めている。

○銅(Cu)合金の高強度化 : Cu は、近年、ヒートシंक部材としての需要により、高強度化が求められている。核融合分野においては、原型炉級高熱負荷の除熱コンポーネントとして期待されている。その一方で、高強度化が要求されており、前述した鉄基で研究されてきた酸化物分散強化法を銅材料に適用する試みを始めている

共同利用研究の重要性

このような研究を進める上で当該 HIP 装置の大きさは、研究開発において重要な位置付けにあると考えている。例えば、このような先進的研究開発を産業規模の大型 HIP 装置を用いて行おうとすると、ガスを満充填する HIP 装置の性質上、運転回数やコストに制限がかかることになる。そのためこれまでは、HIP 装置を用いた

挑戦的な研究の着手が難しくなる傾向にあった。しかしながら、将来的な大型化を見据えると、産業規模の大型 HIP 装置もまた必要不可欠となる。このジレンマを解決し、研究用試作から大型化への橋渡しとすることが当該 HIP 装置の役割であり、その仕様は、大学等における材料開発の加速度的な飛躍や、実機サイズのモックアップ体試作が可能であると期待している。

このような試みは HIP 装置に留まらず、さらに大きな枠組、研究ネットワークにおいてもこれからの研究現場には求められてくると考えている。我々が行っているような、実用的ものづくり研究を推進するためには、コストなどの効率化が有効な手段となり得る。例えば、大型装置を必要とする開発研究を各学術機関それぞれが行おうとすると非常に難しくなるが、一方で、コミュニティを利用したネットワーク、および装置の相互利用が可能となれば、非常にスムーズに研究の遂行ができる。このような共同利用の推進もまた、将来的な“研究手法”という観点で盛んになるべき動向であると考えている。

ひいては、このような研究の効率化による加速度的な飛躍は、原子力・核融合研究分野における日本が、国際的に競争力を高めるきっかけになり得ると期待できる。つまりこの先、数十年において、重要となるもう一つのキーワードとして「学術機関保有装置の共同利用推進」であろうと考えている。

最後に

本稿では、将来的なハイライト研究になり得る工学分野の一つとして「材料の成形技術」を取り上げた。また、そのような挑戦的研究を効率的に行う上で、「学術機関における共同利用推進」が非常に有益な手法となり得ることを述べた。特にこのような共同利用研究は、本特集で述べたような材料成形分野に留まらず、人文・自然科学・エネルギー・情報システムといった研究現場全体にも当てはまることであり、限られた研究資源の中で、世界の研究者たちとの競争力を高めるものであると考えている。

— 参考文献 —

- 1) 高圧力の科学と技術, Vol.2(1993)No.1.
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jshpreview/-char/ja>
- 2) 日本伝熱学会学会誌「伝熱」, Vol.39(2000)No.154.
<https://www.htsj.or.jp/journals/>

著者紹介



能登裕之 (のと・ひろゆき)
自然科学研究機構 核融合科学研究所

これまでをふりかえり、今後を展望する(原子力発電部会)

日本の原子力発電所の安全確保

Ensuring the safety of Japanese nuclear power plant

決得 恭弘

Yasuhiro Kettoku

KEYWORDS: *new regulatory standards, severe accident*

I. はじめに

我々原子力事業者は、原子力発電の安全確保の取り組みに当たり、二度と福島第一原子力発電所事故と同様の事故を発生させないという強い決意のもと、事故直後の緊急安全対策に始まり、これまで様々な安全性向上対策を講じてきた。

この過程では、従来の規制基準では、炉心損傷は想定せず、また単一故障のみを想定していたが、福島第一原子力発電所事故を徹底的に分析して得られた知見を踏まえた新規制基準では、地震・津波などの自然災害や火災などへの対応の充実、多重性・多様性・独立性を備えた信頼性のある電源・冷却設備の機能強化など、従来の基準が強化された他、炉心損傷防止対策や格納容器破損防止対策等の基準が新設され、様々なハード対策を実施するとともに、竜巻、外部火災といった発生頻度の低い自然災害等の外的事象についても、そのリスクを低減させる方策に取り組んできた。

また、福島第一原子力発電所事故においては、災害への対処に必要な要員(重機による瓦礫等の撤去作業・機材による注水作業等)の確保や機材の整備が不十分であったため、迅速な対応に支障をきたしたことを踏まえ、ソフト対策についても取り組んできた。

このような取り組みについて、当社高浜発電所3・4号機ならびに大飯発電所3・4号機は、原子炉設置変更許可等の許認可を取得し、再稼動を果たしている。

II. 安全性向上への取り組み(ハード対策)

1. 地震対策

基準地震動の策定にあたり、敷地周辺の活断層の評価を重点的に行った結果、震源は敷地周辺の断層が運動すると考慮し、また、震源の上端深さを従来の評価から変更したことにより、従来よりも大きい基準地震動を策定した。

また、敷地周辺の詳細な調査を実施した場合でも、なお敷地近傍において発生する可能性のある地震の全てを事前に評価しうるとは言い切れないことから、「震源を

特定せず策定する地震動」については、平成12年鳥取県西部地震や、平成16年北海道留萌支庁南部地震を考慮した値を基準地震動として策定した。

この基準地震動見直しにより、機器、配管のサポート補強や地すべり対策等を行い、耐震性の向上を図った。

2. 津波対策

想定される津波高さとして、若狭湾付近にある海底の断層や海底地すべり等を波源として考慮し、これらを組み合わせ設定した。敷地への浸水防止対策として、想定される津波高さに対し、余裕のある防潮堤等を設置した。また、非常用ディーゼル発電機給排気口のかさ上げや水密扉設置等の対策を行った。

3. 内部溢水対策

建屋内に設置されたタンク等から水漏れ等を想定した場合に、重要な設備が浸水の影響を受けないように、止水対策および逆流防止対策を行った。また、重要な設備が被水の影響を受けないように、操作スイッチへ保護カバーの設置を行った。

4. 火災対策

耐震性のあるタンク、ポンプおよび配管等の消火水系統、火災の早期検知のための多様な火災感知器、ポンプ等へのハロン消火設備ならびに可燃物へのスプリンクラー等を設置した。また、森林火災による発電所施設への延焼を防止するために森林を伐採し、幅18m以上の防火帯を設置した。

5. その他

全交流電源が喪失した場合や炉心冷却手段を確保するため、設備の多重性・多様化を図り強化を行った。また、加圧水型原子炉(PWR)プラントは原子炉格納容器が大きく、炉心が損傷しても水素爆発の可能性は極めて小さいが、炉心溶融時に原子炉格納容器内に発生する水素の濃度を低減させる装置を設置した。

Ⅲ. 安全性向上への取り組み(ソフト対策)

1. 事故時対応体制の強化

事故対応に必要な技術能力を有する要員を増員し、発電所常駐要員のみで事故の初動対応を行うことができる体制とするとともに、当社社員に加え、プラントの詳細情報を持つプラントメーカーの技術者や、現場実務に精通している協力会社社員を緊急時に速やかに召集し、事故の収束に向けた支援を行う体制を構築した。

2. 事故時対応能力の向上

事故時の対応能力を向上するため、毎年1回原子力防災訓練を実施している他、要員の役割に応じた教育・訓練を行っている。また、新たに配備された設備・資機材や設備変更を踏まえ、技術的習熟が必要となる手順について、訓練設備(モックアップ)を用いて繰り返し訓練を実施することで、対応能力の習熟を図っている。

3. 広域避難計画への協力・支援

発電所周辺地域内の住民避難については、自治体からの要請に基づき住民数や地域事情を考慮して、社有バス、福祉車両、ヘリコプター、船舶により、支援することとしている。

また、避難者に対するスクリーニングポイントでの汚染検査について、自治体からの要請に基づき支援協力をを行うとともに、要員の派遣ならびに検査に必要な資機材の提供を行うこととしている。

Ⅳ. まとめ

エネルギー自給率が極めて低い我が国においては、「エネルギーの安定供給」、「経済性」、「環境への適合」(3E)のバランスに優れる原子力発電の果たす役割は大きい。

また、2018年7月3日に閣議決定された国のエネルギー基本計画において、原子力発電の比率を20~22%とする、2030年のエネルギーミックスの確実な実現へ向けた取り組みのさらなる強化を行うことが明記された。

当社としても原子力発電は重要な電源であり、国により安全性を確認されたプラントは、有効に活用していくことが重要と考えている。

福島第一原子力発電所事故の後、我々は原子力発電の安全確保のため色々なハード対策およびソフト対策に取り組んできたが、今後も引き続き、当社社員、プラントメーカーの技術者および協力会社社員一人ひとりが、今一度、身を締め、原子力発電の安全確保に終わりはなく、さらなる安全性をたゆまず向上させていくとの強い意思と覚悟のもと、安全最優先で原子力発電の運転・保全に万全を期したい。

また、再稼働後の安全運転の実績を一つひとつ積み重ねるとともに、原子力発電の重要性や安全性について広く社会の皆さまにご理解を賜る活動に全力を尽くしてまいります。

このような活動については、日本原子力学会原子力発電部会から世の中へ幅広く発信することで、社会に対する日本の原子力業界全体の理解を促進できるよう、部会長として尽力させていただきたい。

著者紹介

決得恭弘 (けつとく・やすひろ)
関西電力株式会社
原子力事業本部



これまでをふりかえり、今後を展望する(原子力発電部会)

原子力の安全性向上のための技術開発 Technology Development for Nuclear Safety Enhancement

後藤 圭太
Keita Goto

KEYWORDS: Safety Enhancement, Passive Core/Debris Cooling, Hydrogen Management

原子力を取り巻く環境

原子力は、二酸化炭素排出量削減による地球温暖化防止や長期的なエネルギーセキュリティ確保の観点から、日本において重要なエネルギーである。

平成30年7月に閣議決定された日本の第5次エネルギー基本計画¹⁾において、「東京電力福島第一原子力発電所事故を経験した我が国としては、(中略)原子力については安全を最優先し、可能な限り原発依存度を低減する」とされている一方で、原子力技術開発の推進については、「原子力利用の安全性・信頼性・効率性を抜本的に高める新技術等の開発を進める」、「こうした取組みを進めるに当たっては、(中略)民間は創意工夫や知恵を活かしながら、多様な技術間競争と国内外の市場による選択を行うなど、戦略的柔軟性を確保して進める」とされている。

近年、国内外を含め、地球環境に優しい再生可能エネルギーの増加や、電力市場の自由化による電力価格競争の激化など、原子力を取り巻く環境が変化している。エネルギー環境が変化する中で、原子力発電が今後もエネルギー源として選択されるためにも、福島第一原発事故の教訓を踏まえたより高い安全性の追求はもちろんのこと、環境に配慮した、安定的で、他電源に負けない低廉な電力供給という観点で、原子力の技術開発・研究開発を進め、原子力発電の電力市場への競争力向上を図っていく必要がある。

原子力の技術開発の取り組み

従来の軽水炉技術の向上に加え、国内外の原子力発電を取り巻く環境変化、および福島第一原発事故の教訓を踏まえ、原子力の技術開発・研究開発に取り組む必要がある。当社においても、福島第一原発事故による外部ハザード対策の重要性、深層防護の向上の必要性を鑑み、原子力発電の更なる安全性向上のための技術開発に取り組んでいる。技術開発の分野は、福島第一原発事故の教訓において優先度が高いと判断されたシビアアクシデント(SA)の防止および緩和に関する技術課題として

	炉心損傷前	炉心損傷後 (原子炉容器内)	炉心損傷後 (原子炉容器外)
炉心冷却 /デブリ冷却	事故耐性燃料(ATF) (SiC炉心冷却喪失時の優れた耐性)	原子炉容器内保持 (IVR)による外部冷却	静的デブリ冷却/ MCCI防止
格納容器 健全性		静的崩壊熱除去 スクラビング/フィルターベント	
水素対策	事故耐性燃料(ATF) (SiC水素発生抑制)	金属酸化物を用いた水素除去システム	
SA シミュレータ	事故解析(MAAP)モデルの開発/改良		
計装設備強化	シビアアクシデント事象関連パラメータ計測技術		
蓄電池	大容量リチウムイオンバッテリー(SCiB TM)		
地震対策	振動減衰/免震技術		

図1 安全性向上のための技術開発の概要

IAEAの報告書²⁾で強調されている技術分野に対応しており、具体的には、深層防護、異常事象/外部事象、全交流電源喪失(SBO)および最終ヒートシンク喪失、水素対策、格納容器ベント、SA対策、計装制御・電源設備の強化、使用済み燃料プール冷却といった広範囲に亘る技術開発を推進している。

当社の福島第一原発事故後の安全性向上のための技術開発の概要を図1に示す。また、主な先行技術開発の概要について、以下に紹介する。

先行技術開発の紹介

1. 水素対策

福島第一原発事故では、燃料被覆管のジルコニウムと水蒸気との反応で大量かつ急激に発生した水素が格納容器過圧や原子炉建屋爆発の原因と推定されており、水素対策の重要性が強調されている。この対策として、(1)水素発生の抑制と、(2)発生した水素の除去の2つの対策に関する技術開発を進めている。

(1)については、高温水蒸気環境下でも反応速度が緩慢で温度上昇しにくいシリコンカーバイド(SiC)による事故耐性燃料(ATF)の被覆管材料等の炉心材料の開発である。炉心材料には、通常プラント運転時の高温水中での耐食性や照射による膨張変形を許容するための韌性が求められるが、一般的にSiCのようなセラミックス材料は韌性が低い。このため、SiCマトリックスとSiC繊維



図2 SiC 炉心材料の試作品

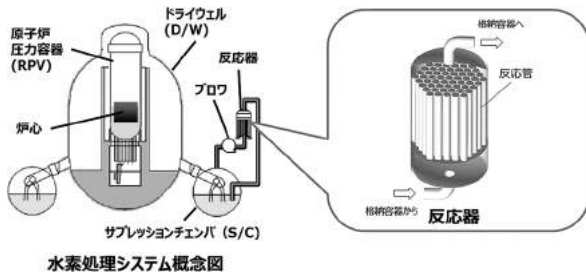


図3 水素処理システム概念図

維を複合化した材料(以下、SiC 複合材料と称す)とすることで靱性を確保する製造技術を開発している。この製造技術により、SiC 複合材料による短尺のチャンネルボックスと燃料被覆管(以下、SiC 炉心材料と称す)の試作に成功した。図2にSiC 炉心材料の試作品を示す。

今後、フルスケールのSiC 炉心材料の製造、および照射試験の準備等を進めていく。

(2)については、格納容器内が窒素置換されたBWR向けに、酸素を必要とせず高速に水素処理が可能な金属酸化物を用いた水素処理システムの開発を進めている。

新規規制基準対応に準拠した安全対策として、フィルターベントシステムによる系外放出で格納容器過圧を防止するが、放射性物質の格納容器外への放出は避けられない。このため、ノーベント達成を目指した水素処理システムの開発は、原子力の社会的受容性向上にも役立つものと期待される。図3に水素処理システムの概念図を示す。

これまで、水素処理材の反応速度式、反応器評価モデルの構築を実施し、システム解析評価により水素処理システムの有効性を確認している。今後、各評価モデルの精度向上を図ると共に、水素処理システムの実用化に向けた検討を進めていく。

2. 炉心冷却/デブリ冷却

炉心損傷後の高温の溶融炉心と格納容器床面/壁面の

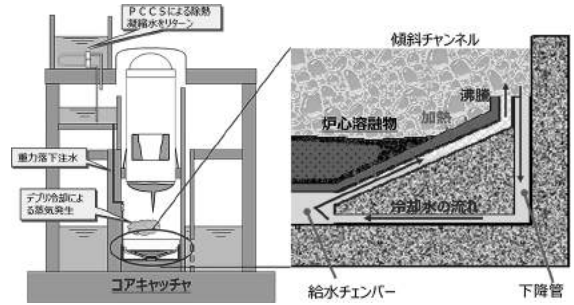


図4 コアキャッチャ概念図

コンクリートの接触(溶融炉心-コンクリート相互作用(MCCI))による非凝縮性ガスの発生を防ぎ、溶融炉心を格納容器下部で安定的に保持/冷却できるコアキャッチャは、原子炉格納容器の安全性向上に有効な設備である。

当社は、図4に示すような冷却流路を水平に対し傾斜を設けたコアキャッチャを開発し、模擬試験にて、流路内の冷却水が自然循環し、溶融炉心を冷却可能であることを確認した。

また、設置スペースや搬入に制約のある既設炉への適用のための薄型コアキャッチャの開発も経産省の委託事業にて実施しており、実機で想定される炉心溶融物を冷却可能であることを確認している。

今後の展望

電力の安定供給、二酸化炭素排出量削減の観点で、原子力発電は引き続き重要な電源であり、福島第一原発事故の教訓を踏まえた更なる安全性向上や、他電源に対する競争力向上に資する技術開発の継続が必須である。原子力プラントメーカーは、国、事業者、研究機関との協調により、率先して技術開発を推進していく使命があると考える。

－ 参考文献 －

- 1) 経済産業省 HP 第5次エネルギー基本計画。
<http://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001-1.pdf>
- 2) IAEA report on reactor and spent fuel safety in the light of the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant, 2012.
<https://www.iaea.org/sites/default/files/spentfuelsafety2012.pdf>

著者紹介



後藤圭太 (ごとう・けいた)
東芝エネルギーシステムズ(株)
原子力システム設計部

これまでをふりかえり、今後を展望する(再処理・リサイクル部会)

日本の再処理の歴史を振り返る

Retrace the history of reprocessing in Japan

大塔 容弘

Yoshihiro Oto

KEYWORDS: *reprocessing, purex process, Tokai Reprocessing Plant (TRP), Rokkasho Reprocessing Plant (RRP)*

はじめに

1941年2月、カリフォルニア大学のグレン・シーボーグら(米)はサイクロトロンで加速した重水素をUに直接照射し、Pu-238を生成した。その後、加速した重水素をBeに照射し中性子を発生させ、Uに照射後Pu-239を生成し、この物質が核分裂することを発見した¹⁾。サイクロトロンの生みの親であるアーネスト・ローレンス(米)は、この物質によってスーパー爆弾が作れると気付いたのであった²⁾。しかし、当時のサイクロトロンでは1ヶ月にせいぜいPu 1mgしか生産できなかった。解決の道は何か。それは、中性子の発生源としての核分裂連鎖反応炉(すなわち、原子炉)を建設し、その中でUを照射しPuを生産した上で炉から取り出し、UからPuを化学的に分離(すなわち、再処理)することである。1942年2月、マンハッタン計画の一環としてPu生産方法開発のためのセンターが、シカゴ大学・冶金研究所として発足した。そこで、エンリコ・フェルミ(米)による核分裂連鎖反応炉シカゴパイル(CP-1、黒鉛減速、自然空冷)の建設、冶金研究所に招聘されたシーボーグを責任者とするPu分離技術の開発が開始された。再処理の起源である。

マンハッタン計画

Puの分離技術として最初に採用された技術は、リン酸ビスマス沈殿法である。照射後のUを硝酸で溶解後に添加したリン酸ビスマス(BiPO₄)の沈殿に、U中の極微量のPu(IV)が同伴して共沈する現象を利用したものである。このリン酸ビスマス沈殿法によるPu分離工場が、テネシー州オークリッジ近郊のクリントンとワシントン州ハンフォードに建設された。

戦後に建設された再処理工場の採用技術は、溶媒抽出法であるが、その技術開発はマンハッタン計画の中で行われたものである。溶媒抽出法が拠り所とする基本的な特性は、高酸化状態における硝酸Puおよび硝酸Uは、ある種の水に溶けない有機物(エーテル、エステル、ケトン)に対して容易に溶けるという性質である。一般に、

核分裂生成物はこれらの有機物に対して不溶性である。エーテルとしてジブチルカルビトール(Butex法、英国ウィンズケール)、エステルとしてリン酸トリブチル(Purex法、各国)、ケトンとしてヘキソン(Redox法、米国ハンフォード)が開発されたが、現状における主流プロセスはPurex法である。

Purex法の抽出剤であるリン酸トリブチル(TBP)の有効性は、ジェームス・ワーフ(米)によって発見された³⁾。実際には、TBP単体で使わずにケロシンやドデカンのような炭化水素をTBPの希釈剤として用いる。TBPは、硝酸に対する耐久性に優れており、硝酸濃度を変えることで抽出・逆抽出ができるので、余分な薬剤を添加する必要がなく、またTBPや希釈剤は揮発性が低く安定である。

日本の再処理の起源

昭和31年9月、最初の「原子力研究開発利用長期計画」(原子力長計)が策定された。この中に、“わが国における将来の原子力の研究、開発および利用については、主として原子燃料資源の有効利用の面から見て増殖型動力炉がわが国の国情に最も適合すると考えられるので、その国産に目標を置くものとする”と“燃料要素の再処理および廃棄物の分離処理については、その初期には日本原子力研究所(原研)が研究的に実施するが、その後は核燃料物質の散逸を防止し、安全性を確保するため原子燃料公社(後の動燃事業団)において集中的に実施するものとする”との記述がある。

昭和34年8月、原研東海研究所化学部の石森研究室において、研究炉JRR-1で照射し、生成したPuをTBP溶媒を用いて抽出し、マイクログラム量のPuを日本で初めて単離した。その一員に故内藤奎爾先生が加わっていた。先生は、カリフォルニア大学バークレー校に留学中、シーボーグ教授の下で日本人で初めてPuを取り扱った研究者であった⁴⁾。

日本初の再処理工場である原研東海研究所再処理特別研究棟(再処理特研)では、昭和43年3月から昭和44年3月までの1年間に、研究炉JRR-3の使用済燃料(Ae)被

覆、金属 U、燃焼度 600Mwd/tU)を使った再処理試験を 3 キャンペーン実施し、約 200g の高純度 Pu を回収した。その後、動燃再処理工場運転員の訓練施設として利用され、昭和 45 年に運転を停止した。停止後は、各種研究実験に供された。平成 2 年から再処理施設解体技術開発事業が開始され、平成 38 年(2026 年)に終了予定である。

東海再処理工場

昭和 36 年の第二次原子力長計では、“燃料サイクルの円滑な実施をはかるため、我が国においても早期に再処理方式を確立しておく必要がある。このような観点から 1960 年代後半に完成を目標として原子燃料公社に再処理パイロットプラントを建設し、再処理の工業化試験を実施する”，との記載がある。これを受け、昭和 39 年原子力委員会は公式に施設建設を打ち出した。その際の完成時期は、1970 年代初めとされた。

動燃事業団(動燃)は、これを基に「再処理施設の安全性に関する書類」を作成し、昭和 43 年 8 月、国に提出した。安全審査の開始である。原子力委員会の“安全上支障のないものと認める”との答申を受け、昭和 45 年 1 月、国は設置許可を与えた。茨城県側の反対運動のため着工が遅れたが、建設はほぼ計画通りに進められ、化学試験そして U 試験を終了後、いよいよホット試験開始という時に、米国カーター政権の原子力政策変更の煽りを受け、日米原子力協定に基づきホット試験開始に待ったが掛けられたのである。その後、日米再処理交渉を経て、ホット試験は再開され、昭和 55 年 12 月に終了し、合格書が交付された。なお、新日米原子力協定は、昭和 63 年 7 月に発効した。

平成 26 年 9 月、日本原子力研究開発機構は東海再処理工場を廃止する方針を固めた。新規制基準への対応に 1,000 億円以上が掛かる見通しとなったため、存続は困難と判断した。そして、平成 29 年 6 月、原子力規制委員会に対し、廃止措置計画の認可申請を行った。廃止措置完了までの期間は 70 年、総費用約 1 兆円としている。そして、平成 30 年 6 月認可が下りた。なお、昭和 52 年から平成 19 年までの 31 年間に処理した使用済燃料の総量は、1,140t である。

六ヶ所再処理工場

昭和 42 年、原子力委員会は第三次原子力長計を決定した。その中で、“(東海再処理工場のみでは処理能力が不足することから)新たな再処理工場を建設する必要がある、その際民間企業にて行わせることが期待される”と述べている。しかし、その後が目立った動きが無かったためか、昭和 46 年の第四次原子力長計では、“原子力事業の安定操業のためには、スケールメリットを生かすことが重要なので、電気事業者を含む関係業界が早急に

協力体制の確立を進めることが望まれる”と前進を促した。前述の日米再処理交渉共同声明を踏まえ、再処理民営化を盛り込んだ原子炉等規制法の一部改正案が成立したことを受けて、電気事業連合会(電事連)は昭和 55 年 3 月 1 日、民間再処理工場を管理運営する日本原燃サービス(株)(原燃サービス、後の日本原燃(株))を設立した。

原燃サービスは、電事連と協議の上、再処理工場の基本設計に当たっての基本仕様(年間処理能力、使用済燃料仕様等)を決定するとともに、動燃との間で「再処理施設の建設、運転に関する技術協力基本協定」を締結した。昭和 59 年 7 月、電事連は青森県と六ヶ所村に対し、ウラン濃縮、再処理および低レベル放射性廃棄物物理設の 3 施設を六ヶ所村村内のむつ小川原開発区域内に一括して立地したい旨を正式に申し入れた。翌年 4 月、知事および村長から電事連に対し、正式に立地受託の回答があった。当時の青森県副知事であった山内善郎氏は、自著の中で次のように述べている⁵⁾。“電事連は、当初九州に触手を伸ばしたが、地元の拒絶反応は激しく、立地要請に至る前に断念せざるを得ない状態だった。そこで、一転して北に目を向け始めた。一時、北海道・奥尻島が候補となったが、結果として青森県が最終候補となった。……六ヶ所村のむつ小川原開発は、石油備蓄基地は建設されたものの石油ショックの煽りを受けて死に体同然だった。経団連の後押しを受けた「むつ小川原開発会社」が施設の誘致に向け積極的に動いた”，と。

原燃サービスは、国内外の技術調査の結果、主工程については海外の実証性の高い技術を導入すべきとの結論を得、特に再処理の実績が大きく、かつ、既に UP-3 という新しい工場の建設を進めている仏国技術が優れており、またホット試験の結果もバックフィットが可能であった。そして、部分的に、より優れた英国の減圧蒸発技術、西独のヨウ素除去技術、東海工場で開発された技術等の採用を決めた。昭和 62 年から開始された基本設計をベースに「再処理事業指定申請書」を作成した。安全審査は、平成元年 3 月に 1 次審査が開始され、2 次審査の結審は平成 4 年 12 月であった。この間に、濃縮事業と低レベル放射性廃棄物物理設事業を管理運営する日本原燃産業(株)と合併し、日本原燃(株)が発足(平成 4 年 7 月 1 日)した。

平成 5 年 4 月の使用済燃料受入・貯蔵建屋の建築工事の着手から建設が開始され、2 年後には本体建屋の建築工事を開始した。使用済燃料プールの場合、平成 11 年 7 月にホット試験が開始され、翌年 12 月に本格運用に入った。本体施設の場合、試験運転は、薬品のみ使用の化学試験、U 燃料使用のウラン試験、使用済燃料使用のアクティブ試験に区分される。

日本原燃は、原子力安全・保安院宛てに本体施設に係る試験運転の全体計画書および各段階の試験計画書を提出し、保安規定の認可、地元との安全協定の締結を経て、

平成 18 年 3 月末にアクティブ試験を開始した。アクティブ試験では、環境への放出放射能、核分裂生成物の分離性能、U と Pu の分配性能、液体廃棄物/気体廃棄物の処理性能等を確認する目的で、U、Pu および核分裂生成物を含む使用済燃料を使用する。取扱いに当たっては、取扱う放射性物質の量を段階的に増加させることとする。すなわち、低燃焼度燃料から高燃焼度燃料へと、冷却期間の長い燃料から短いものへと対象燃料をシフトする。六ヶ所再処理工場の場合、5 ステップに区分してアクティブ試験を実施した。高レベル放射性廃液のガラス固化に関する使用前検査受検前の最後の試験運転を平成 25 年 5 月に成功裏に終了した。ところが、福島第一原発事故原因を踏まえて策定されるであろう新規基準の適合性確認が必要であろうとの観点から、使用前検査の受検は叶えられなかった。現在は、平成 25 年 12 月に施行された適合性確認審査の結果待ちである。審査結果を踏まえ、必要な補修工事等を行ない、平成 33 年度(2021 年度)上期に竣工の予定である。

平成 28 年 5 月、電力自由化等による事業環境の変化の中でも再処理等を滞りなく実施するための制度処置として「再処理等拠出金法」が成立した。これにより、資金を安定的に確保し、日本原燃に事業委託するための主体として(認可法人)使用済燃料再処理機構が設立された。

今後の課題

平成 30 年 7 月、原子力委員会は「我が国におけるプ

ルトニウム利用の基本的な考え方」を決定し、「Pu サーマルの着実な実施に必要な量だけ再処理が実施されるよう認可する」との方針を示した。日本では、電気を作る以外に回収 Pu を活用する方策がないにも係わらず、Pu 保有量に上限を設けるとしてしまったのである。回収 Pu は資源小国日本の将来の電気エネルギー源であるにも係わらず。

将来世代のために、今後の世界情勢の大きな変化に備え今からエネルギー備蓄を進める必要がある。そのためには、再処理と回収した Pu の MOX 燃料利用の促進が必要不可欠と考える。我々は、Pu サーマルの確実な実施と高速増殖炉の技術確立のための動きをバックアップする使命があると考えている。

— 参考文献 —

- 1) Glenn Seaborg with his son, Adventures in the atomic age, Farrar, Straus and Girous.
- 2) ジェレミー・バーンシュタイン, プルトニウム, 産業図書.
- 3) James Warf, Extraction of Cerium (IV) Nitrate by Butyl Phosphate, J. Am. Chem. Soc., 71, 3257(1949).
- 4) 内藤奎璽, 私の見た原子力半世紀, 日本原子力学会誌, 39, 143(1997).
- 5) 山内善郎, 回想 県政 50 年, 北の街社.

著者紹介

大塔容弘 (おとう・よしひろ)

日本原子力学会 SNW 連絡会会員

日本原子力学会誌「ATOMOS」アンケートのご案内

日本原子力学会
編集委員会

編集委員会では、多くの読者から意見を伺いその結果を記事企画に反映し、誌面内容の向上を図るため、2016 年 9 月号より毎月、原子力学会会員を対象に学会誌「ATOMOS」のアンケートを実施しております。皆様の率直なご意見・ご要望をお聞かせください。

いただいた回答については集約した上で、学会誌で随時、紹介しております。会員の皆様からのご意見をお待ちしておりますので、ご協力をお願い申し上げます。

- アンケートは所要時間 1 分です。
- 毎月月初に、AESJ-NEWS で回答 URL と回答期限のご案内をお送りしています。
- アンケートに関するお問合せ先
一般社団法人 日本原子力学会 編集委員会
学会誌編集長 佐田 務
E-Mail : q_atomos@aesj.or.jp

これからの日本の再処理のあり方

Reprocessing future in Japan

秋山 大輔

Daisuke Akiyama

KEYWORDS: *reprocessing, purex process, pyroprocessing*

はじめに

ウラン資源を含め資源の乏しい日本において、核燃料サイクルは原子力発電所で使用されたウラン燃料を再処理することで未使用ウラン、プルトニウムを回収して有効に利用できることから国策とされてきた。特に使用済燃料の再処理プロセスは核燃料サイクルの中でも重要な工程である。そのため昭和30年、原子力基本法が成立し、さらに昭和31年に原子力長期計画が策定されて以降国内の研究所および大学では再処理の研究開発が盛んに行われてきた。再処理法は湿式処理と乾式処理に大きく分類される。我が国や多くの国で採用されているのは湿式処理のPUREX法であり、これはリン酸トリブチル(TBP: tributyl phosphate)を抽出剤として用いた化学分離法である。一方乾式再処理法(pyroprocessing)は水溶液を用いない分離プロセス法であり、フッ素ガスでウラン等をフッ化させて分離する方法や、溶融塩中で電解還元によりウラン、プルトニウムを回収する方法である。特に後者の溶融塩電解法は主に金属燃料を対象としているため、次世代燃料の再処理法として研究開発が進められている。

工学的な意味での再処理は、使用済核燃料からウランとプルトニウムを再利用するために分離回収する化学処理のことであるが、上記のように様々な方法が存在し、溶液化学、有機化学、放射化学、電気化学、固体化学、アクチノイド化学といった様々な化学分野の知識が必要となり、これらの分野の基礎研究の基に成り立つ技術である。技術力の維持、向上のためにも継続した基礎研究を行っていくことが重要である。

現在の日本における再処理研究

日本における再処理研究は、継続的に再処理技術基盤研究、群分離と資源化に関する研究などが行われている。また、2011年3月に発生した福島第一原子力発電所の事故により、多種多様な放射性廃棄物が生じたため、これらの放射性廃棄物の処理、処分研究についても現在積極的に行われている。このような基礎研究や社会の

ニーズに対応した研究は大学や研究所で今後も行われていくことが日本の再処理分野の研究開発において重要である。一方で、福島事故以降、放射性物質、核燃料物質使用施設の規制が厳しくなり、これらを取り扱える実験施設が減少している。そのため、ウランやアクチノイドを取り扱ったことがない若手の研究者や学生が増加していることが懸念される。これは再処理分野に限らず原子力分野全体の課題として、これらの実験施設を管理し、若手の研究者や学生が利用しやすい環境を整え、原子力分野における将来世代の育成につなげ、ひいては原子力分野の技術力の維持、向上に努めることが重要であると考えられる。しかし施設の維持、管理は大変な労力を要するので、各事業所で分散された施設の集中化と、日本全国の施設間での連携による共同利用を積極的に行っていくことが現実的であると考えている。

日本と韓国の学生の主張

私の所属する東北大学多元物質科学研究所の佐藤(修)研究室では毎年韓国から学生を招いて原子力人材育成を行っている。隣国の韓国も資源が乏しく、日本と同様に核燃料サイクルを重要な政策として位置付けてきた。韓国は米韓原子力協力協定において使用済燃料の再処理とウラン濃縮が認められていないが、2015年に乾式再処理の一部は研究開発が可能となった。そのためか、韓国の学生も原子力のエンジニアや研究者になるために原子力分野の研究室を選んだという学生が多くみられ、原子力に対して前向きな姿勢が見られた。一方、こちらの学生が原子力分野の専攻を選んだ理由は、福島第一原発の事故を受けて興味を持ったためという意見等が多い。しかし、原子力分野への就職については慎重な姿勢を示していた。もちろんこれは韓国および日本の一部学生のみを対象にした結果であるため、これが日本と韓国の全ての学生の考え方とは言えない。しかし日本の福島第一原発事故後の現在、原子力業界のネガティブな話がほとんどであるため日本の学生の考えは理解できる。一方韓国は現在廃炉が決定した原発が少なく、高レベル放射性廃棄物処分の事業も2016年に高レベル放射性廃棄物管理に

関する基本計画案が策定されて始まったばかりで課題が明確化されていない。一方日本における原子力分野は使用済燃料問題、最終処分問題や福島第一原発の廃止措置といったはっきりとした課題が山積みであることが、日本と韓国の学生の意識の差を生んでいるように思われる。しかし原子力発電は2018年3月に決定された第5次エネルギー基本計画において長期的なエネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源として位置付けられた¹⁾。そのためにも原子力分野の学生の人材教育が求められるが、日本の学生に原子力分野の仕事に興味を持ってもらうことが課題である。

今後の課題

これから先原子力分野では使用済燃料問題、最終処分問題や福島第一原発のほかに今後増えていく古い原子力発電所の廃炉等原子力施設の廃止措置が数多く行われていく。福島第一原発を含む廃炉等に伴って生じる放射性廃棄物の処理・処分については再処理を含めたバックエ

ンド分野の研究者が叡智を結集し行っていかなければならない数十年にわたる課題である。そのための原子力人材育成は重要な課題であり、基礎研究を行える研究施設の維持管理や、原子力分野に興味を持ってもらえるよう産学官が連携した取り組みが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：第5次エネルギー基本計画(2018年7月3日)、
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf

著者紹介



秋山大輔 (あきやま・だいすけ)
 東北大学多元物質科学研究所

日本原子力学会「教育会員」募集のご案内 ～小・中・高等学校の先生方にご紹介ください～

一般社団法人 日本原子力学会

日本原子力学会では、2019年2月に創立60周年を迎えるにあたり、小・中・高等学校の先生方を対象に、広く原子力や放射線の理解を深めていただくことを目的に新たな会員区分として「教育会員」を設けました(2018年6月発足)。

学会員の皆様におかれましては、お知り合いの先生にぜひご紹介をお願いします。

なお、教育会員の会費等は学生会員と同じで、以下のとおりです。

入会金 無料

年会費 5,000円(会計年度は4月～3月)、下半期入会(10月～3月にご入会)の初年度は、半額の2,500円になります。

部会/連絡会費 無料

詳細・申込用紙 教育会員の詳細のご案内、入会申込書は以下よりダウンロード可能です。

http://www.aesj.net/join_membership/kyoikukaiin(本会HPからも入れます)

問合せ先 一般社団法人 日本原子力学会 会員係、

〒105-0004 東京都港区新橋2-3-7 新橋第二ビル3階, TEL: 03-3508-1267, FAX: 03-3581-6128,

E-Mail: kaiin@aesj.or.jp

沸騰現象シミュレーションの来し方行く末

Think of boiling-simulation's past and future

切刀 資彰

Tomoaki Kunugi

KEYWORDS: *Boiling simulation, Multiscale approaches, Phase change models, Kinetic contribution, Interface thickness, Contact line, Microlayer*

はじめに

現在の原子力発電は軽水炉技術によって支えられており、その性能と安全性を担保しているのは、これまでの多くの先達によって培われてきた燃料棒表面での沸騰現象の経験的理解と燃料チャンネル内や系統ループ内の二相流動現象に関する構成式の構築・整備によるものである。しかし、現有炉の高性能化や安全性向上、並びに将来の新型軽水炉の設計を目指すためには、実験による相関式の構築は時間的・設備的・予算的な限界に直面していることは周知の事実である。そこで、実験に代わって期待されているのが、数値解析による気液二相流現象の把握と予測である。既に集中定数系の非定常二次元二相流方程式に基づく炉心内および炉冷却システムの特性評価や安全評価は手法としては確立されており、多くの成果を挙げているが、用いられている構成式は適用範囲に限られ、必然的に予測範囲も限界がある。このため、当部会でも解析コードの検証方法(Verification & Validation)についての検討を進めている。

一方、近年のスーパーコンピュータ(以下、スパコン)の発達は著しく、非定常3次元熱流体輸送方程式をこれまでは不可能と思われていた高い時空間分解能かつ有意な計算時間内で解くことが可能となっている。このような計算環境の進展は沸騰現象の直接的なシミュレーションの可能性を大きく拡げており、実験に代替して数値シミュレーションによる相関式の構築・整備が可能な時代が到来しつつある。本稿では、マルチスケールでの沸騰現象シミュレーションの系譜を振り返りつつ、顕在化している問題点を指摘するとともに、解決へ向けた方策を探ってみたい。

沸騰現象の何を知るべきか？

沸騰現象は沸騰核の生成に起因しており、大きくは過熱層内の温度揺らぎに起因する均一核生成と加熱面の表面状態に起因する自由エネルギー過剰に伴う不均一核生成に大別され、原子力分野では後者が主体たる原因である。核の生成・凝縮過程は金属原子蒸気に関する統計熱

力学理論として確立されているが、沸騰現象に伴う気泡核生成と気泡成長は極めて高速な相変化現象、すなわち非定常・非平衡状態の現象であるため、伝熱工学による速度論的取扱いが重要となる。

沸騰現象の原子力における主要課題は、限界熱流束(CHF)の予測であることは論を待たないが、その基礎過程である核生成、気泡成長、気泡合一、気泡離脱、膜沸騰、および蒸気膜崩壊などの詳細な物理過程に立脚した機構論的モデリングの構築が喫緊の課題である。この内、加熱面上の気泡発生と成長・離脱過程については、加熱面の性状(濡れ性)、動的接触線のモデル化および気泡底部のマイクロレーヤ効果が重要であるが、その物理的・工学的な議論は未だに収斂する様子はなく、むしろ濡れ性や接触線の議論は衝突・付着液滴挙動に関する基礎的な研究としての議論にとどまっている。

一方、計測技術の発達は粒子相関速度計測法(PIV)による気泡周囲の流動状況の定量的可視化を可能とし、赤外線透過する基板に薄膜コーティングした電極面の温度を赤外線(IR)カメラで非定常2次元計測し、これを伝熱面温度と見做して基板内3次元熱伝導計算を行って壁面熱流束を算出することが可能となっている。しかしながら、PIVやIRカメラの時空間分解能は依然として不十分であり、沸騰現象を完全に捉えるまでには至っていない。また、気泡周囲の過熱液層の時空間分布に関する計測は約50年前から全く進捗しておらず、シミュレーション結果を検証する過渡的な時空間データの蓄積はなされていない。最近、竹山ら[IHTC16-23750, 2018]は25 μm 極細熱電対を用い、サンプリング速度10kHzで周期的に離脱する気泡周囲の時空間温度計測を開始しており、データ蓄積が進めば沸騰シミュレーションの検証データとして利用可能となろう。

以下に、沸騰現象シミュレーションで必要とされる情報収集とモデル化の主たる課題の一部を列挙する。

- 1) 核沸騰機構の把握とモデル化
- 2) 核生成サイトの発生位置と数の把握
- 3) 接触線近傍のマルチスケール現象、すなわち、100nm程度の平衡液膜厚さ(ナノスケール領域)、100nm~

10 μm 程度の接触線とマイクロレーヤ(メソスコピック領域), 10 μm ~1mm 程度の見かけの接触角領域(マクロスコピック領域)から構成されるマルチスケール界面挙動の取り扱い方法(支配方程式や計算手法)の確立

- 4) 加熱面の濡れ性に関するモデル化(親水性/撥水性)
- 5) 相変化現象のモデル化(非平衡性と緩和時間の考慮)
- 6) 蒸発・凝縮の動力学的寄与の考慮
- 7) 高サブクール時のマイクロレーヤモデルの妥当性検討
- 8) 核生成気泡間のマイクロ対流の CHF との関連性
- 9) 気泡挙動と離脱周期について, 周囲流動との関連性
- 10) 非定常ドライアウト/リウエットのモデル化
- 11) CHF における気泡周囲の伝熱機構の定量的評価

マルチスケール三相界面をモデル化できるのか?

現在までの沸騰現象シミュレーションでは, 核生成過程は取り扱っておらず, 例えば, 自由界面を記述する代表的な VOF(流体体積分率)法による沸騰シミュレーションでは, 加熱面上に形成される過熱層の密度不安定に起因する局所温度揺らぎを熱伝導計算で捉え, 加熱面の局所温度が予め設定した過熱度と飽和温度との和を超した加熱面位置の直上の計算セルに, 核生成理論で求まる臨界核体積を VOF 値として設定することで模擬的に取り扱っているに過ぎない[Kunugi, Comput. Fluid Dynamics J., 9, 2001]. 沸騰核の導入については, 多くの物理的・計算科学的なモデル化の課題が残されており, 今後の研究進展を待ちたい。

一方, 気泡成長・離脱過程については, 壁面を考慮した共役熱伝導問題として取り扱わねばならないことは当然であるが, 壁面の濡れ性の考慮や三相界面での接触角や界面の動的挙動を含めた nm から mm スケールまでのマルチスケールのモデル化や気泡周囲の対流挙動の寄与を検討する必要から, 様々な計算手法が検討されている。

ミクロスケールの代表的な計算手法は, ポテンシャル場を有する原子・分子の運動をニュートンの式で記述し, 時間積分しながらその経路を追跡し, 周囲の原子・分子との相互作用を統計的に評価する分子動力学であるが, 多数の原子・分子を長時間追跡することに伴う数学的不適切性が顕在化し, 時間方向に誤差が蓄積する問題がある。また, 計算体系のサイズも, 例えば大気圧飽和沸騰の初生気泡は数 μm 程度であるが, 現在のスパコンを以てしても 1 μm 程度が限界であり, 現状では分子動力学で実際の沸騰現象をシミュレーションすることは不可能であるが, 平衡液膜や三相界面のごく一部については適用可能性を否定しない。

メソスケールの代表的な計算法は, van der Waals によるヘルムホルツ自由エネルギー密度の空間勾配の導入に端を発し, Ginzburg と Landau が Type-I 超伝導体へ初めて適用し, Cahn と Hillard が二成分金属原子相間の

拡散問題へ適用し, 現在では Phase Field 法と呼ばれている。Korteweg は初めて本手法を 2 成分流体方程式へ展開し, ほぼ 1 世紀後, Jacqmin [J. Compt. Phys. 155, 1999] が 2 相流への拡張可能性を示して以降, 数多くの研究が行われている。このモデルの問題点は, 二相間密度比が 1 に近い, つまり臨界状態に近い場合でない基礎式の仮定が成立せず, Onuki [Phys. Rev. E75, 2007] が指摘しているように, 界面を分解するためには 1nm 程度の計算格子を必要とし, さらに非現実的な重力場を設定しなければ沸騰気泡の浮力上昇を計算できず, 沸騰シミュレーションには程遠い。さらに, 基礎式は原子(イオン)の拡散方程式であり, 対流項は原子(イオン)の拡散速度であるため, 二相流動の対流速度と連成させて解くことは, 数値計算として技術的に可能であっても物理的な正当性は無い。物理的な正当性を無視して, 界面捕獲のためにだけに Phase Field 法を用いる方法を拡散界面法(DIM)と呼ぶが, 捕獲された相界面厚さに物理的な意味は無く, 従ってこの界面厚さへ如何なる物理モデルも適用してはならない。

マクロスケールでは様々な計算手法が開発されてきているが, 相界面の厚さは対象のスケールと比べて相当に小さいため無視されてきた。しかし, 相変化時の界面での熱物質移動を考慮する際には界面厚さは極めて重要である。市販 CFD コードでは, Lee [LA-UR 79-975, LASL, 1979] の提案による相変化モデルが蒸気輸送式で用いられている。このモデル係数は界面での蒸発・凝縮の動力学的寄与を表しており, 時間の次元を持つため, 相変化の緩和時間とも解釈できる。したがって, 適切な計算格子とモデル係数の選択で沸騰現象の解析できそうであるが, これらは User の「経験知」に強く依存するため一般性に欠ける。筆者らは格子内の界面に仮想的な厚さを持たせ, この仮想界面厚さに非定常熱伝導式の近似解を適用して相変化面の移動速度を見積もることで, クラジウス-クラペイロンで表される瞬時の相変化と非定常熱伝導で表される緩和時間効果を取り入れたモデル化によって準熱平衡過程の表現に一応成功したが, まだ課題は多く道半ばである。

おわりに

個人的には, 高サブクール時の DNB 型 CHF 予測に関する物理的知見の蓄積とモデリングが重要と考えており, プール沸騰シミュレーションから流動沸騰シミュレーションへの計算科学技術研究の発展を大いに期待している。

著者紹介



功刀資彰(くぬぎ・ともあき)
京都大学工学研究科

総合工学の視点からの原子力工学への貢献

Contribution to nuclear engineering from a view point of general engineering

笠原 直人

Naoto Kasahara

KEYWORDS: *General engineering, Nuclear engineering, Computational Science and Engineering*

総合工学としての原子力工学と 計算科学技術

「原子力工学」は「総合工学」の代表例である。「総合工学」とは、旧来の工学には見られなかった工学における横型分野であり、あらゆる工学体系や知識を総動員して設計・製造される人工物に関する分野であると定義される。すなわち、「総合工学」は、機械工学、電気電子工学、土木建築工学などの領域型分野とは異なり、学際的・複合的な分野である応用物理、計測制御、計算機科学、計算科学・技術、エネルギー・資源、放射線、宇宙航空、海洋船舶、安心・安全・リスク学、環境学、巨大社会システムなどが含まれる¹⁾。

「原子力工学」は核臨界、放射線遮蔽、構造強度、熱流動、炉心設計、原子炉動特性、原子炉安全解析、放射性廃棄物処理・処分および環境影響評価などの各分野を総合的に扱う学問である。

「計算科学技術」は、上記のような異なる領域を横断的に扱える技術である。さらに、これらを統合してシステム全体の振舞いをシミュレーションにより予測することが出来る。このため、総合工学の視点から「原子力工学」に大きく貢献できるポテンシャルを有している。

計算科学技術のこれまでの貢献

原子力研究の歴史では、中性子物理を中心として、実験では全てを模擬出来ない場合、数値実験により技術の進歩を図ってきた。原子力工業界の活動でも炉心設計、燃料熱水力、安全設計、構造設計、耐震設計など多くの分野で計算科学の技術を活用してきた。また、それらを支える数値計算技術として、従来の差分法や有限要素法等の枠を超えたメッシュフリー手法や粒子法等の新しい手法や、超大型からPCレベルまでの並列計算技術が開発されてきた。2000年代からは、実験に代えてシミュレーションを活用するニーズが高まり、日本原子力学会は、2016年7月に「シミュレーションの信頼性に関するガイドライン:2015」(原子力学会ガイドライン)²⁾を発行した。これは、シミュレーションの信頼性の確保に関す

表1 近年の計算科学技術 企画セッション一覧

年度	タイトル
H21 秋	計算材料科学の炉材料へのアプローチ
H21 春	シミュレーションの信頼性確保のあり方とは？
H22 秋	リスク活用に向けた確率論的破壊力学技術の最新動向
H23 秋	軽水炉分野におけるモデリング&シミュレーションの国際情勢と我が国の課題
H23 春	我が国における軽水炉シビアアクシデント評価技術の今後
H24 秋	津波評価手法の現状とその適用
H24 春	モデリング・シミュレーションの高度化
H25 秋	地震動シミュレーションと構造評価手法の現状とその適用
H25 春	シミュレーションのV&Vの現状と課題
H26 秋	シミュレーション可視化技術の最前線
H26 春	シミュレーションの信頼性確保のためのガイドラインの策定
H27 秋	シビアアクシデント解析の現状と Challenge
H27 春	解析コードV&Vの現状と実施例
H28 秋	外部ハザード評価のための数値解析
H28 春	シミュレーションの信頼性確保に関する取り組みの現状と課題
H29 秋	粒子シミュレーション技術は何をもたらすのか？ ～課題と展望～
H29 春	計算科学技術分野におけるモンテカルロ(MC)法の活用～現状と将来展望～
H30 秋	人工知能技術の活用と将来展望

る重要性が高まる状況に鑑み、モデルV&Vに基づいて、不確かさを考慮した予測評価、品質管理を加えたモデリング&シミュレーションの方法論の考え方をまとめたものである。こうした、計算科学技術の原子力工学へのこれまでの貢献は、表1に示す計算科学技術部会の企画セッションで概観できる。

福島第一原子力発電所事故以降の 環境変化への対応

福島第一原子力発電所事故の後、事故時の現象解明が急務となった。その結果は、今後の安全性向上と廃炉作業の両者のベースとなる。また、原子力規制委員会からは新規性基準が発行され、シビアアクシデント対策と地震・津波・火山等の自然災害に対する規制が大幅に強化

された。上記のような環境変化とそれに伴うニーズに対応するため、計算科学技術分野では以下のような活動を行っている。

シビアアクシデントの再現実験は困難であることから、シミュレーション解析コードと個別現象試験の組み合わせによる事故現象解明が期待される。シミュレーション解析は、感度解析やシナリオ検討など実験的アプローチを補完する優れた能力を有し、事故時の現象進展について妥当な結果を与えることが示されている。しかし、コード内に存在する非常に多くのモデルが相互に関連しながら解析が行われるため、その全容を理解し、各モデルが現象評価結果に対して与える影響を明確化することは容易ではない。特にシビアアクシデント解析においては、炉心を構成する構造材の変形、溶融、流動、凝固、化学反応といった非線形度が桁違いに大きな現象を解く必要があるため、精密に解くことはあまり意味が無く、解析の限界を知りつつ、個別現象試験と、事故時の計測データと組み合わせて、可能な限りの評価を行う努力が必要である。自然界に多く存在する連続現象を対象とした場合、モデルの定量化が不十分で解析結果の絶対値が不正確であっても、相対比較は可能であり、この性質を利用すると感度解析ができるようになり、複雑な現象の支配因子を抽出することに役立つ。また、実験が不可能な複雑で大規模な現象を解明するには、多くの要素試験から全体像を描いていく作業が必要である。このために、部分モデルを組み合わせたシミュレーション解析が有力な手段となる。今後は、要素試験から得られる部分的なデータに基づくシミュレーション解析の結果と、廃炉の進捗に応じて徐々に得られる実機データを比較しながら、現象解明が進むと思われる。

原子力規制委員会が定めた新規制基準への適合性審査においては、様々な外部ハザードに対する影響評価が求められている。しかし、対象とする現象のスケールが非常に大きく、また、現象の不確定性(発生頻度・発生強度)も大きいため、試験によって影響評価を行うことは困難であり、一般的に、数値解析(シミュレーション)を用いた評価が実施されている。ただし、解析を実施する場合においても、適切なモデル選択や境界条件設定といった課題が残されており、十分な説明性(妥当性)を有する解析結果を得ることは容易ではない。このため、解析の目的を明確にした上で、最終結果への支配因子に着目した合理的なモデル化が必要となる。一方、仮定が入るモデル化をできる限り排除し、最新のHPC(High Performance Computing)技術を用いて、現象全体を3次元解析する方法の研究も進んでいる。今後は、解析規模の拡大および

高速化に加え、計算で得られた膨大なデータから、結果や結論を評価する技術が進むと思われる。

外部ハザード評価における数値解析の適切な活用法や今後の解析精度向上に係る課題などについて、表1に示すように企画セッションでも活発に議論されている。

これからの原子力工学への貢献

シビアアクシデント現象解明と、自然現象影響評価は、継続が必要な課題である。さらに、今後の原子力利用の主要な課題として、社会的受容性の向上がある。両者に共通するのは、複雑で多岐に渡り、不確実性の大きいことである。

こうした問題は、従来の伝統的な科学手法では解決が難しいことが示されている³⁾。伝統的な科学は、個別の真理の探究である。その探求の結果として法則を導出し、法則群が自然と整合的な知識体系を構成する。一方、巨大で複雑なシステムでは、個別法則が正しくとも、多くの要因の相互作用により、全体として予測不可能な振舞いをする⁴⁾。新しい科学においては、法則を見つけるだけでなく、全体として実世界と整合する環境を創らなければならない。

個別法則の積み上げだけでは予測が難しい現象やシステムの評価には、シミュレーションが有効である。さらに、個別法則やその相互作用の分析が不十分でも、膨大な経験データから、実用的な精度で将来を予測する技術が登場してきている。平成30年度原子力学会秋の大会における計算科学技術部会セッションでは「人工知能技術の活用と将来展望」をテーマとした。

これからの新しい原子力工学の課題解決へ、計算科学技術の貢献が期待される。

参考文献

- 1) 日本学術会議, 総合工学分野の展望, 総合工学委員会, (2010).
- 2) 日本原子力学会, シミュレーションの信頼性に関するガイドライン, (2016).
- 3) 日本学術会議, 社会的課題に立ち向かう「総合工学」の強化推進, 総合工学委員会, (2017).
- 4) 大橋弘忠, エネルギー Q&A, ERC 出版(2018).

著者紹介



笠原直人(かさらはら・なおと)
東京大学

ロードマップのローリングを通じた水化学のこれから

Advanced Water Chemistry by Rolling of Road Map

河村 浩孝

Hiroataka Kawamura

KEYWORDS: *Water chemistry, Radiation source reduction, System component integrity, Fuel cladding integrity, Road map*

水化学とは

軽水炉では構造材料・燃料と原子炉冷却水との境界領域において、その安全性や信頼性にかかわる様々な事象が生じ、これらは水を介して相互に関連している(図1)¹⁾。例えば、長期間に亘り水質が悪化すると、一次系圧力バウンダリからの冷却材漏えいや燃料破損が生じることで、放射性物質の環境放出に繋がる可能性がある。また、材料腐食により発生する腐食生成物が水を介して炉心で放射化され材料表面に移行蓄積すると、これが線源となって作業従事者の被ばく線量の上昇の原因となる。したがって、原子力安全の確保とともに作業安全の確保のためには、水化学管理の側面から、

- ①腐食抑制による構造材料・燃料被覆管の健全性維持
- ②線源強度低減による作業従事者の被ばく低減

の継続的な達成が求められる。

このため、水化学は、軽水炉の水質管理を通じ、構造材料および燃料被覆管・燃料部材の防食による健全性維持、線源強度低減による被ばく低減、および環境負荷低減を図ることを主要な目的としている。

材料腐食に与える影響は材料ごとに異なる場合がある。ある材料の腐食抑制に効果的な水質であっても別の材料に効果的でない、あるいは線量低減において不利な

組み合わせもあるなど、トレードオフの関係にある場合も多い。トレードオフの解消には、プラントシステムを包括的に捉えた上で、水化学を適切に実践する必要がある。このように、多様な課題に対し調和的解決を図ることで、プラントの安全性と信頼性、作業従事者の安全確保が高度なレベルで達成可能となる。

水化学部会では、福島第一原子力発電所の事故後に水化学ロードマップのローリングを開始した。本稿では、この活動を通じ議論中の水化学の在り方について概説する。

これまでの水化学

水化学分野における研究・技術開発のロードマップ「日本原子力学会 水化学ロードマップ2009」¹⁾は、通常時の軽水炉保全にかかわる水化学の高度化に加え、経済性向上に向けた研究・技術開発の選択と達成時期の明確化を目的に策定したものである。福島第一原子力発電所の事故前の水化学分野では、このロードマップを基に過酷事故を除く通常時を対象とし、産業界と学術界を中心に研究・技術開発を行ってきた。この活動に加え、日本原子力学会標準として、2015年度からBWRおよびPWRの水化学管理指針の制定に取り組んでいる。

これからの水化学

福島事故の反省に立ち、日本原子力学会は、原子力発電システムの安全性向上に対するこれまでの取り組みの問題点を根本的に見直し、原子力安全文化の醸成、自主的安全性向上の観点から、経産省資源エネルギー庁の「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」を策定した。

水化学部会においても、原子力安全の議論が狭義の安全評価に留まっていたことを反省し、水化学の在り方について議論を重ねた。その結果、社会・一般公衆・環境に多大な影響を与えることのないよう、原子力安全の考え方を取り入れ、研究・技術開発および人材育成を行っていくべきとの共通認識が生まれた。

1. 水化学ロードマップ検討

この認識を具現化するため、水化学部会では、「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」と整合し、最新の深層防護

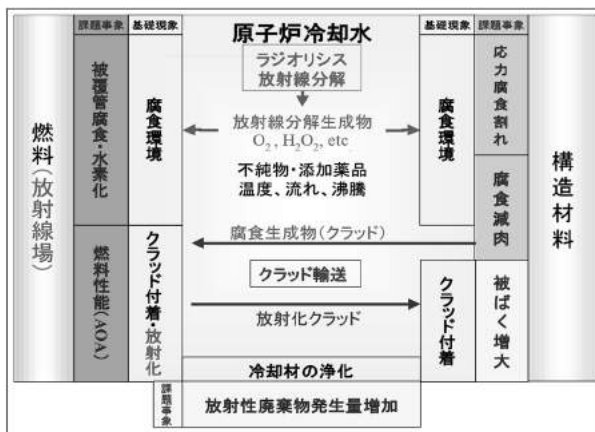


図1 水化学管理の目的¹⁾
(水化学の諸課題とそれらの相互関係)

に立脚した水化学管理を確立すべくロードマップを策定することとした。2017年4月に水化学ロードマップ策定検討WGを立ち上げ、2018年度内の策定を目指し、鋭意活動中である。検討WGの主査は東北大学の渡邊豊教授、委員は、大学、研究機関、電気事業者、プラントメーカーの20名で構成される。幹事は筆者が務める。

2. ロードマップへの反映

現在、水化学ロードマップをローリング中である。従来の水化学管理の改善と高度化に係る課題の見直しに加え、自主的安全性向上に向けた新たな研究・技術課題の抽出など、水化学部会内で議論を重ねている。

表1に深層防護の観点から水化学に求められる防止対策を纏める。応力腐食割れ(SCC)の抑制、配管減肉環境緩和、SG長期信頼性確保、燃料被覆管の健全性維持、クラッド付着対策による核燃料の性能維持、線源強度低減、廃棄物低減、化学物質の影響低減などは、通常時の水化学に関する課題であり、これまで通り、水化学の安全基盤研究として位置づけた。これら課題は、主にレベル1(異常・故障の発生防止)およびレベル2(異常・故障の事故への拡大防止)に該当する。

その一方で、シビアアクシデント(SA)、非SA時の核分裂生成物挙動にかかわる共通基盤技術を新たな課題として抽出した。また、福島廃炉推進対応の水化学として、二次廃棄物処理対策を含む汚染水処理対策、廃炉工程に係るデブリ取出し時の水処理策、水素発生防止対策に向けたラジオリシスの高精度化と高度化、および液膜腐食、気化性防錆剤などの材料腐食対策も新たな課題とした。以上は、レベル3(事故の影響緩和)とレベル4(設計基準を越す事故への施設内対策)においても水化学の役割は大きいと判断した。

状態基準保全については、過酷事故時にも機能するようレベル3と4にも対応することとした。レベル3では、燃料破損の早期検出に向けた冷却水中の核分裂生成物濃度やオフガス系などの線量率の監視技術に加え、炉

心損傷の把握に向けた格納容器雰囲気線量率監視技術の高度化を取り上げた。レベル4に対しては、損傷状況の的確な把握に向け、原子炉水位など炉内監視の性能強化を課題とした。

以上の安全基盤研究課題の選定に当たっては、経験豊富なシニアの意見に加え、ヒアリングを通じ若い世代からの提案も積極的に取り入れた。本ロードマップは、①課題と技術の必要性、背景、目的、達成時期、実施概要、実施体制を取り纏めた課題整理票、②導入シナリオ、③技術マップ、および④ロードマップで構成される。実施体制には、核燃料部会、材料部会、計算科学技術部会など他部会とのかかわりを明示した。これにより、関係部会との連携を強化しながら課題の効率的解決を図る。

水化学共通基盤技術、および人・情報の整備に関しては課題もある。国内の大学には、ラジオリシス以外に水化学に直接関係する講座は殆ど存在しない。水化学分野では、保全技術に加え、事故炉の汚染水処理、廃炉に係る除染技術など新たな課題が山積している。このため、広義の原子力安全向上の観点からも、溶液化学、腐食工学、材料工学部門などの講座においても水化学を対象として戴くことを期待する。

以上、通常時の水化学に対しては改善、高度化を図りながら原子力安全の向上に定常的に貢献していくことは論を俟たないが、福島の廃炉推進や再稼働プラントのさらなる安全性向上についても、技術の革新と実機適用を推進していく。このため、本ロードマップの策定後も、必要に応じローリングを継続する。

まとめ

今後は、軽水炉の高経年化、寿命延伸、廃炉など状況の変化に柔軟に対応しながら、プラントシステムの調和的解決を図り、軽水炉の安全性、信頼性、経済性の向上に貢献していく姿勢が水化学分野に求められる。検討中の水化学ロードマップが、より良い水化学の実践に対し嚆矢となり、水化学管理指針とともに国内軽水炉の安全性向上と人材育成に広く活用されることを期待する。

— 参考文献 —

1) “日本原子力学会 水化学ロードマップ2009”, (一社)日本原子力学会 水化学部会, ダウンロード文書 <http://www.aesj.or.jp/~wchem/RM2009.pdf>

著者紹介



河村浩孝 (かわむら・ひろたか)
一般財団法人 電力中央研究所 材料科学研究所

表1 深層防護の観点から水化学に求められる防止対策

深層防護	レベル1	レベル2	レベル3		レベル4		レベル5
	異常・故障の発生防止	異常・故障の事故への拡大防止	事故の影響緩和	設計基準を越す事故への施設内対策	設計基準を越す事故への施設内対策	設計基準を越す事故への施設内対策	防災(核燃料RMでは、地震時)
日本原子力学会における定義	異常や故障等の発生防止のため、実証された技術に基づいて十分裕度のある設計を行うこと	トラブル発生時に直ちに検知して対応すること	事故に備え、その影響を緩和すること 設計基準事象に基づいて準備すること	シビアアクシデント(SA)を防止するための対策を講ずること	シビアアクシデント(SA)を防止するための対策を講ずること	シビアアクシデント(SA)を防止するための対策を講ずること	福島第一の廃止措置
水化学の安全目標	異常・事故の未然防止	異常・事故の早期検知	炉心損傷の維持 ・溶前部のペレットのFP抑制 ・溶後部のペレットのFP抑制	冷却性能の維持 ・公衆への被ばく低減 ・事故後の炉心損傷抑制	・冷却性能の維持 ・ペレット、燃料デブリからのFP放出の抑制	・冷却性能の維持 ・ペレット、燃料デブリからのFP放出の抑制	
水化学に求められる防止対策	構造材料の経年劣化の抑制と管理を目的とし、実証された技術や知見に基づいて十分裕度を考慮した水化学管理、品質管理等に基づいた保守管理を行うこと	機器や配管等の腐食に起因した冷却材の漏洩等の機能喪失が起きた場合、直ちに検知し、冷却材の漏洩による環境放出等の拡大防止を目的とした対策を講ずること	環境への放射線放出を抑制し、環境への影響を緩和すること	設計基準を越すような事故状態に備え、SAを防止するための対策、およびSAに至った後の影響を緩和するための対策を講ずること	設計基準を越すような事故状態に備え、SAを防止するための対策、およびSAに至った後の影響を緩和するための対策を講ずること	設計基準を越すような事故状態に備え、SAを防止するための対策、およびSAに至った後の影響を緩和するための対策を講ずること	水化学管理の寄与は小さい

これまでをふりかえり、今後を展望する(水化学部会)

水化学基礎研究のこれから

Future prospects of fundamental study on water chemistry

室屋 裕佐

Yusa Muroya

KEYWORDS: *Water chemistry, fundamental study, young investigators*

はじめに

軽水炉水化学は、軽水炉の血液とも言える冷却水を適切に管理することによって、燃料や構造材料の腐食抑制、放射能移行制御による作業員の被ばく低減、環境負荷低減といったプラントの健全性を確保・維持する基幹技術である。水化学部会は、1982年に水化学研究専門委員会として発足し、2007年からは水化学部会として、水化学技術の高度化や高経年化対策といった重要な課題に対し産官学連携で活動を続けてきた。その中で、水化学技術は当初の画一的な手法から、複数の選択肢を用意し各プラント毎に最適なものを選択するというより高度な手法へと進化を遂げた。次第に多様化・複雑化していく水化学技術全体を展望できる書籍の必要性が叫ばれるようになり、2000年に原子炉水化学ハンドブック¹⁾が編纂、刊行された。この頃には既に、10年、20年スパンで徐々に進んでゆく世代交代も鑑み、技術継承ツールとしての側面も強く意識されていたようである。2009年には、原子力学会誌に「軽水炉水化学プラントの水化学」と題する全10回の連載講座が寄稿されるなど、技術分野としてある一定の成熟を見たものと考えられる。しかし震災以降新たな局面を迎えている。プラントの長期停止が続き、過去の課題の再燃に加えて新たな課題も生まれるなど、これまで築き上げてきた戦略のみでは当該分野の将来に対する不安が拭えない状況となっている。そこで水化学部会では新たな取り組みを進めており、これを紹介しつつ今後の展望・期待について述べる。

将来構想検討会

水化学の今後の目標、理想や取り組みについて議論するため、寺地巧氏を主査として将来構想検討会WGを組織し、定例研究会やサマーセミナーにおいて若手・年長者を交えた意見交換を行った。定例研究会の改善、技術伝承の推進、平行して進められている水化学ロードマップ改訂作業への反映といった取り組むべき項目が抽出された。詳細は文献3)を参考されたい。

原子炉水化学ハンドブックの改訂

原子炉水化学ハンドブックは水化学技術者のバイブルとして活用されているが、2000年の発行から15年以上が経過し、徐々に古い情報が見られるようになった。更に震災に伴う軽水炉プラントの長期停止によって、技術伝承や人材育成の機会が大きく失われることとなり、この穴を今後いかにして埋めていくかが喫緊の課題となった。そこで水化学部会では、新たな技術継承ツールとして最新の知見や技術を盛り込んだハンドブックの出版を目指し、2018年よりWGを設立し改訂作業を開始している。震災後、事故時プラントや廃止措置プラントの水化学といった新たな発展途上の分野も登場しており、技術継承のみならず今後の技術高度化の一助になることも期待される。

水化学研究のこれから

水化学部会は、電力会社やメーカーといった産業界からの寄与が最も大きく、大学からの寄与は残念ながらあまりない。稼働中のプラントのデータ蓄積が極めて重要であり、震災以降はこれがほぼ行えない状態が続き、事態は深刻である。今後少しずつ再稼働が進めば改善されてくると期待されるが不安もある。それには時間を要する上、廃止措置を決定した炉もあり、これまでと同様に進めていくことは難しい。対して海外では通常通りに稼働し、新規プラント建設も進んでいる。そのため、もちろん実学の蓄積は重要ではあるがいずれ追い付かれるのではないかという懸念はある。今後も日本の水化学部会が水化学の世界水準をリードしていくことを前提にすれば、何かしら他の高い付加価値も生み出せる集団でもあることが必要であろう。少ない知見を最大限に生かす技術(IoT等)であったり、材料・水に関わる基礎研究、特に、高温水中の材料の腐食挙動や抑制技術など、学・官との連携が不可欠となるテーマも数多くある。原子力が火力と一線を画すのは、放射線の存在である。水、材料、固液界面といった様々な場における物理化学を、ミクロからマクロの様々なスケールで、温度、圧力、溶質、そ

して放射線といった様々な環境において、自信を持って説明できるまでにはまだまだ時間が必要であろう。特に、安全を担保する上では、通常の軽水炉条件を逸脱した環境もあらかじめ十分に考慮されていることが重要である。エンジニアリングのみならず、基礎研究に基づいた科学的根拠を自分達で得て基準として与えられる力は、今後の国際競争力を維持する上で少なくとも必須になろう。現状としては、基礎研究を取り巻く環境は芳しいものではない。昨今はすぐ結果の出る研究やインパクトがあり視覚に訴える研究が持て囃されがちであるが、水化学分野には、例えば腐食は1サンプルに数ヶ月以上を要するであろうし、ラジオリシスに至っては素反応一つを決めるのに10年以上議論するケースもあるなど、世の中のトレンドに流されない研究が多く存在する。そのため例えば大学では、大学の中で華やかになりし研究テーマ群と肩を並べて、学生に広く水化学研究というもの認知度を上げるのもなかなか大変である。まずその入り口において、水化学研究の重要性だけでなく、魅力なり将来性を自信を持って提示できることの必要性を感じる。新しく展開・追求できる大テーマがその分野にあるか否かは、その後のモチベーションにも大きく影響する。次世代炉の水化学、情報工学との融合等々、前向きな産官学連携に基づくプロジェクトの立ち上げは非常に魅力的であり、今後そのような場を意識して作っていくことが我々の世代の責務であろう。一方で、そのような中・長期的な努力の前にも、もっと身近なところで始められることもあるように思われる。例えば、春・秋の年会は、我々学会員が集う場としては最も身近な場である。しかし参加率はあまり高くないようである。発表分野が多岐に亘るため普段の自分の業務内容との関連性を

あまり見いだせないなど、参加しにくい理由があるものと思われる。ただ、あえて少し見方を変えてみると、全ての分野から最新情報が提供される場はどこか？と考えると、それはまさに年会・大会である。自分とは異なる分野を覗いてみたり、いつ自分に役立つかは分からないがそれらの新しい情報(特に基礎研究)を通して将来の自分との関わりを考えてみたり、人材育成の場として非常に有効活用できる可能性も備えているようにも見える。前述の世界水準をリードするために必要な原動力とは何かと考えると、そのような新しいものにアンテナを張る姿勢は少なくとも必要である。身近なものに少し新鮮さを感じてみる、そんな少しの工夫から隠れたメリットが引き出される、そんな新たな展開にも期待する。

— 参考文献 —

- 1) 石樽顯吉 他, “原子炉水化学ハンドブック 日本原子力学会編”, コロナ社, (2000), ISBN: 978-4-339-06597-8.
- 2) (a) 内田俊介, “軽水炉プラントの水化学(1) 軽水炉プラントにおける水の役割と水化学制御”, 51(2), 106(2009).
(b) 勝村庸介, “軽水炉プラントの水化学(4) 水化学の基礎—放射線化学”, 日本原子力学会誌, 51(6), 490(2009). など
- 3) 寺地巧, 渡邊豊, 久宗健志, “水化学部会の将来構想に係る取り組み”, 日本原子力学会誌, 60(2), 116(2018).

著者紹介



室屋裕佐 (むろや・ゆうさ)
大阪大学産業科学研究所

これまでをふりかえり、今後を展望する(原子力安全部会)

原子力安全部会の10年間の活動を振り返る

Ten Years of Activities of Nuclear Safety Division

阿部 清治
Kiyoharu Abe

KEYWORDS: Nuclear Safety Division, Safety-Related Issues, External Initiators, Risk Management, Emergency Preparedness and Response, Safety Research

I. 原子力安全部会の活動概要

学会誌本号は学会創立60周年を記念するものであるが、原子力安全部会(以下、「安全部会」と略記)は2018年夏にちょうど10周年を迎えている。以下、私からまず、安全部会の設立および活動の経緯をごく簡単に紹介した後で、私を含め、何人かの部会員が、所属組織と部会においてどのような活動をしているか、どのような意識を持っているかを述べていく。

まずは設立の経緯。私は2007年3月末に原子力安全・保安院を退職したのだが、その直前に、当時学会会長だった田中俊一さんから、学会の理事に就任せよ、そして、学会に安全部会がないのは困るから設立せよ、という依頼を受けた。それに応じて、学会の理事になり、2008年7月に安全部会を設立した。従って、安全部会の設立経緯は他の部会と全く異なる。一般に学会の部会はボトムアップで設立される。部会設立の賛同者を募った後で、理事会に承認を求める。これに対し安全部会は、トップダウン、理事会主導で設置を決め、それへの参加者を募ったのである。

安全部会の設立趣意書¹⁾も私が用意したのだが、特に大事な記載事項は次の通りである。

- ・学会には、安全に係わる個々の技術分野についての部会は設置されているが、安全そのものを対象とし、安全の横串を通す機能を有する部会が必要である。
- ・部会は、合理的な安全規制のあり方、より体系的な法制、より実効的な防災、長期的な安全研究計画、安全解析手法の高度化や結果の利用法など、個別の技術分野ではカバーしきれない安全に特有の分野において、知識の集約や普及・向上に努める。
- ・部会はまた、学会内外の専門家・専門組織と協力して、原子力安全に係る事項について議論・検討し、知識の集約と体系化を図る。

こういう前提であるから、安全部会の活動では常に、産学官の協力が必要であり、部会長と副部会長も産学官から選ばれる。(初代の部会長は、当時東大教授でいらし

た班目春樹先生に就いていただいた。)また、他の部会、他の技術分野とのコミュニケーションも不可欠である。

次に、福島第一事故後の活動経緯。2011年3月の事故後しばらくの間、安全部会はほとんど何の活動もできなかった。(当時は私が2代目の部会長を務めていた。)安全部会のメンバー、特に幹事会のメンバーは、所属組織の中での対応で忙殺されていたのである。2012年に入ってやっと学会活動ができるようになり、2月17日から12月19日にかけて8回にわたり、「福島第一原子力事故に関するセミナー」を開催し¹⁾、2013年3月にその成果を報告書²⁾にとりまとめた。福島第一事故については多くの事故調査報告書があるが、その多くは「当事者は入れない」でまとめられているが、安全部会の報告書は、当事者・専門家による事故調査報告書である。また、福島第二、女川、東海第二の各発電所がなぜ重大な事故を免れたかについての分析もしている。

この時期以降の安全部会の主要活動は2つある。(3代目の部会長である東大・関村直人教授の下で進められている。)ひとつは、春の年会と秋の大会における「安全部会企画セッション」と、同じ課題についての部会主催「フォローアップセミナー」である。これらの会合では、上述の福島第一事故報告書で同定した「今後検討すべき課題」をひとつひとつ採り上げ、ほとんどの会合に、原子力規制委員会あるいは原子力規制庁の参加も得て、産学官で議論がなされている。もうひとつは、「夏期セミナー」であり、2013年以降毎年福島県内で開催している。いずれも2泊3日で、昼はびっしり講義と討論、夜は懇親会である。

II. 規制の立場での部会活動

上述した安全部会の特性から、その活動は「学」に籍を置いたものであっても、国や各事業者の実務と密接に関係している。以下、各執筆者はそれぞれの立場で部会および所属組織の活動に係わるトピックスを紹介する。私自身は規制の立場で記述する。

福島第一事故に関しては、私は原子力安全基盤機構

(JNES)において、事故分析の責任者を務めた。そこでは、事故で顕在化した諸問題を、深層防護の観点から整理した。次いで、上述のように安全部会の福島第一事故セミナーを開催し、産学官の安全の専門家の知見をとりまとめた。更に、個人の立場で、拙著「原子力のリスクと安全規制」を公刊した³⁾。

こうした一連の活動については国の立場で国際社会とも共有した。たとえば、自然現象などの共通原因で多重故障が発生するとき深層防護はどこまで有効なのかは、国際的な検討課題となった。また、安全部会の報告書²⁾では結論として、「安全の確保に関し、従来から大事と言われてきた原則的考え方は、事故の後でもやはり大事である」として、具体的には、継続的改善、リスク情報の活用、運転経験の反映、産学官の協力と規制の独立性などを挙げたが、これは OECD/NEA の福島事故分析報告書⁴⁾で以下のように引き継がれている。“The concepts that form the foundation of nuclear safety principles – such as DiD, diversity, continuous improvement and operational experience feedback – were considered important before the accident, and remain so after the accident.”

2012年9月に発足した規制委の最初の仕事は、新規制基準の策定である。発電用軽水炉と核燃料サイクル施設に対する基準を検討するチームが設置され、両チームとも更田豊志委員(当時)が議長を務め、私も両方に参加した。(更田氏は、規制委発足まで安全部会の幹事で、規制委員になってからも安全部会の多くの会合に参加している。)明示されているわけではないが、安全部会での福島第一事故についての議論は、新規制基準の背景になっている。少し遅れては、廃炉廃棄物物理設に係る基準の議論もなされ、私はこれにも参加している。

新規制基準では、自然現象など個別の誘因事象への設計要求が大幅に強化されるとともに、重大事故対策が規制要件化された。また、技術の現状を十分に考慮した規制がなされるようになり、リスク情報の適切な活用、計算コードに頼らない防災、国の関与と制度的管理を前提としての廃棄物物理設などが始まっている。

こうした、規制の観点で重要な課題は、当然に安全部会にとっても重要な課題であり、企画セッションやフォローアップセミナーでは、主にこれらの課題について、産学官での議論がなされている。過去のテーマを列挙すれば、施設外誘因に対する防護のあり方、原子力防災のあり方、原子力安全研究の取り組み、リスク情報の活用の現状と課題、外的事象対策の原則と具体化、福島第一

におけるリスク要因とそれへの防護策、安全目標の活用にかかる現状と課題、原子力安全文化、外的事象に対する包括的な安全確保の体系の現状と課題、等々である。

特に、2018年2月には、規制委発足後5年を経過した機会を捉えて、「原子力規制の今後への期待」をテーマにしたフォローアップセミナーを開催している。そこでは、現在規制委が直面している、新検査制度および安全性向上評価と、その基盤のひとつとなるべきPRAの概念および結果の利用についてパネル討議を行っている。

私自身は一連の企画セッションおよびセミナーのほとんどで司会役を務めたが、これらの場合は産学官の良いコミュニケーションの場となっていると感じている。一例を挙げれば、外的事象対策については、「学」からは対策のあり方についての整理がなされ、「官」からは規制要求とその背景が説明され、「産」からは導入された具体的対策が説明されて、その後で徹底議論されている。

他分野との関係としては、廃棄物物理設規制の考え方が整理されたことを契機に、バックエンド部会との定期的なコミュニケーションが始まっている。これも、安全部会の設立趣意書通りの活動である。

私自身は、2017年3月末で規制庁を退職し、2018年3月末で安全部会の幹事も退任したので、もはや規制にも部会活動にも直接的な関与はほとんどなくなっている。しかし、現在の安全部会が一層活発に活動していること、また、それが産学官の、あるいは技術分野間の、コミュニケーションの中核となっていることを見るにつけ、安全部会を作って本当に良かったと思っている。

－ 参考文献 －

- 1) 原子力安全部会ホームページ、
<http://www.aesj.or.jp/~safety/>
- 2) 原子力安全部会、「福島第一原子力事故に関するセミナー報告書—何が悪かったのか、今後何をすべきか」、(2012年3月)。
- 3) 阿部清治、「原子力のリスクと安全規制」、第一法規、(2015年3月)。
- 4) OECD/NEA, “The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident – OECD/NEA Nuclear Safety Response and Lessons Learnt”, (2013)。

著者紹介



阿部清治 (あべ・きよはる)
東北大学

これまでをふりかえり、今後を展望する(原子力安全部会)

原子力発電の安全性向上の取り組み

Safety Improvement at Nuclear Power Plants

谷川 純也, 津村 真吾

Junya Tanigawa, Shingo Tsumura

KEYWORDS: Safety Analysis Report, Risk Management, Risk-Informed Decision Making, Reactor Oversight Process, Probabilistic Risk Assessment, Core Damage Frequency

原子力安全部会では、現在、原子力部会企画セッション(春の年会、秋の大会)、フォローアップセミナー、夏期セミナーを開催し原子力安全に係る議論を深めることを中心とした活動が行われており、我々は2018年8月開催の夏期セミナーに初めて参加した。夏期セミナーは、原子力業界の若手を対象として、第一線で活躍されている専門家の解説講義や経験談、先輩方との交流を通して原子力安全に関する最新の知識を習得し自己研鑽する場として福島県内で開催されている。今回の夏期セミナーにおいては、新規規制基準適合性審査での経験と今後へ活かしたい事例紹介についてメーカ、事業者の実務者4名から発表いただき議論するプログラムを、長岡技術科学大学の村上先生とともにコーディネートし、産官学間での忌憚ない議論ができたのではないかと考えている。

事業者としては、新規規制基準適合性審査での経験も踏まえた上で、新規規制基準の適合に留まることなく、更なる安全性向上の取り組みを進めているところである。

例えば、2013年12月改正の原子炉等規制法(第43条の3の29)にて規定された安全性向上評価届出制度への対応がある。

関西電力では、高浜発電所3号機を対象に評価を実施し、評価結果を届出書にまとめ2018年1月に届出し、同日公表している¹⁾。初届出では、確率論的リスク評価(以下「PRA」という。)および安全裕度評価が評価項目に含まれる。これらの評価にあたっては、新規規制基準対応で新たに設置、改良工事を行い、事象発生時の体制および手順も大幅に見直したことから、それらの変更を評価モデルに反映している。また、PRAの結果の分析を踏まえて、「RCPシャットダウンシール導入」などの追加措置を抽出している。PRAの結果からの追加措置の抽出にあたっては、「原子力発電所におけるシビアアクシデントマネジメントの整備および維持向上に関する実施基準」の考え方を参考に、PRAの事故シーケンスグループの重要度に応じた追加措置の定量的な選定基準(図1)を設定したプロセスによる抽出を試みている。また、安全

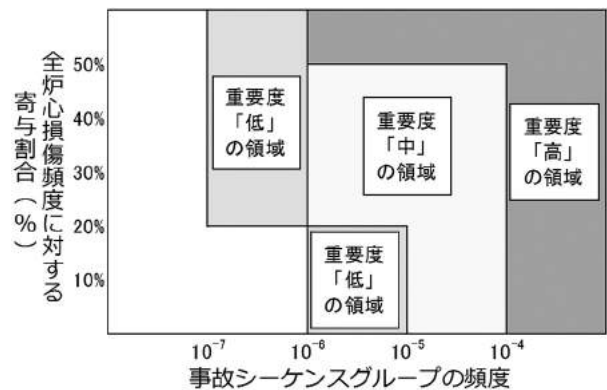


図1 スクリーニング・重要度分類基準(炉心損傷頻度)

性向上評価は、新たな取組みであるため、評価内容および届出書の記載が適切か、理解できる記載になっているかなど改善を図るべき課題はあると考えており、今後、実績を重ねていく中で、改善に取り組んでいく。

また、事業者は、2018年2月に「リスク情報活用の実現に向けた戦略プランおよびアクションプラン」²⁾を発表し、リスク情報を活用した意思決定(RIDM)プロセスをプラントの設計、建設、および運転といった業務に取り入れ、マネジメントを強化していく方針であることを表明している。この戦略プランは、2つのフェーズに分けて進める。フェーズ1は、2020年もしくはプラント再稼動までの期間とし、この期間は、RIDMプロセス導入のために必要な機能の整備を行うとともに、既存のリスク評価のプロセスやツールによりリスク情報の活用を実践する。フェーズ2では、2020年度から導入予定の原子力規制検査に対応しつつ、RIDMの実施業務を拡張していく。これらの取組は、電気事業連合会に設置された「リスク情報活用推進会議」において、進捗や課題を共有し、ピアプレッシャーを受けながら、ベンチマーク等で協力しつつ、戦略プランを着実に実施しているところである。

中部電力では、2014年から自主的・継続的な更なる安全性向上のロードマップ³⁾を公表し、リスクマネジメントの強化に取り組んでおり、前述の戦略プランもふま

O号機 プラント停止中の週間「リスク」情報 2018年M月D日(金)～2018年M月D日(金)									
【凡例】		M/D(金)	M/D(土)	M/D(日)	M/D(月)	M/D(火)	M/D(水)	M/D(木)	M/D(金)
○：運転or待機 ×：待機除外	余熱除去系(A)	○	○	○	○	×	×	×	×
	余熱除去系(B)	○	○	○	○	○	○	○	○
【プラント状態】 燃料：全燃料取出 プールゲート開放	燃料プール冷却系(A)	○	○	○	○	×	×	×	×
	燃料プール冷却系(B)	○	○	○	○	○	○	○	○
	低圧炉心スプレイ系	○	○	○	○	×	×	×	×
M月D日以降、A系の機器が待機除外となり、燃料損傷頻度は上昇する。	低圧注水系(C)	○	○	○	○	○	○	○	○
	高圧炉心スプレイ系	×	×	×	×	×	×	×	×
	補給水系(A)/(B)/(C)	○/○/○	○/○/○	○/○/○	○/○/○	○/○/○	○/○/○	○/○/○	○/○/○
	燃料プール補給水系(A)	○	○	○	○	×	×	×	×
	燃料プール補給水系(B)	○	○	○	○	○	○	○	○
	消火系(A)/(B)	○/○	○/○	○/○	○/○	○/○	○/○	○/○	○/○
	原子炉機器冷却水(A)	○	○	○	○	×	×	×	×
	原子炉機器冷却水(B)	○	○	○	○	○	○	○	○
	高圧炉心スプレイ冷却水	×	×	×	×	×	×	×	×
	非常用D/G(A)	○	○	○	○	×	×	×	×
サポート機能	非常用D/G(B)	○	○	○	○	○	○	○	○
	非常用D/G(H)	×	×	×	×	×	×	×	×
	燃料損傷頻度/日	3 e-12	3 e-12	3 e-12	3 e-12	8 e-11	8 e-11	8 e-11	8 e-11
【リスク低減策】 可搬型設備を用いた注水	監視強化 リスク回避ポイント	燃料プール冷却：B系							
	燃料損傷頻度【日】	燃料損傷頻度は低<推移				重要な注水系統：補給水系 重要な電源機能：非常用D/G(B)			
青：運転時(目安) 赤：本評価(停止時)	燃料損傷頻度【日】	リスク低減策の努力レベル以下							

図2 停止時PRAを活用した週間リスク情報(例)

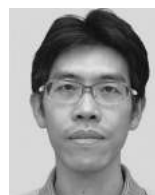
え、体制整備、PRA整備、人材育成等を進めている。具体的には、設計レビューを行う原子力部門の会議体における審議において、原子力リスクだけでなく、放射線、環境、労働災害等の様々なリスクの程度を定量化、可視化して統合的に評価するリスクマトリクス法を導入してリスク管理している。また、発電所の現場においても、定検時の停止時のPRAから得られる知見を活用して、保守作業実施時のリスク低減策を検討している(図2参照)。また、更なるリスク情報活用の拡張に向けたリスク評価手法の高度化に向けて、国の支援を受け電力中央研究所が実施する津波PRAプロジェクトにパイロットプラントとして協力している。

原子力規制検査については、2020年の本格導入に先立ち、2018年10月から試運用が開始されている。新たな原子力規制検査においては、原子力規制庁と事業者との間で原子力安全に関するコミュニケーションが一層重要となる。このような環境において、産学官で原子力安全について忌憚無く議論のできる原子力安全部会の重要性は増すものと考えられる。

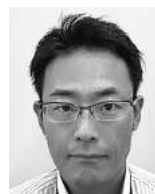
－ 参考文献 －

- 1) 高浜発電所3号機安全性向上評価(第1回)届出書(平成30年1月関西電力株式会社)。
- 2) リスク情報活用の実現に向けた戦略プランおよびアクションプラン(2018年2月原子力事業者11社)。
- 3) 原子力の自主的・継続的な安全性向上に向けた更なる取り組みについて(2014年6月13日 中部電力株式会社)。

著者紹介



谷川純也(たにがわ・じゅんや)
関西電力株式会社
原子力事業本部



津村真吾(つむら・しんご)
中部電力株式会社
原子力本部

原子力安全の中の廃棄物処分安全

Waste Disposal Safety as a Part of Nuclear Safety

前田 敏克

Toshikatsu Maeda

KEYWORDS: *Waste disposal, Long-term safety, ALARA*

原子力安全部会というと原子炉の安全というイメージが強いが、最近では放射性廃棄物の処分も取り上げられるようになった。

放射性廃棄物は固体であり、閉じ込め容器を破るほどの高いエネルギーも持たないため、高温高压の液体や気体を閉じ込める原子炉施設のような制御や電源は不要だが、長半減期核種を多く含む廃棄物の場合、適切な対策がなされないと数万年以上の長期にわたり人に影響を及ぼす可能性がある。

このような長期の安全を管理のみに頼って確保することは不可能なので、根幹的な対策として、火山や断層活動のように処分施設を破壊しうる事象の影響の及ばない安定な深い地下に処分することで廃棄物を人の生活環境から隔離することとしている。また、廃棄物を工学的なバリア(「人工バリア」という)で閉じ込めて核種が漏れないようにするとともに、漏れ出た核種は、天然の岩盤など(「天然バリア」という)に吸着したり沈殿したりすることによって生活環境への移行が遅延される。

原子炉施設では、事故防止や万一の事故時の影響緩和と住民避難のための対策に重点を置くが、処分施設の人工バリアの閉じ込め機能はいずれ失われることから、生活環境への核種移行は通常起こる事象としてあつかう必要がある。このため処分の安全評価では、人工バリアの劣化や天然バリア中の核種移行、生活環境での希釈を考えたシナリオに基づいて公衆の線量を計算する。

ただし、数万年を超える長期の安全評価は実証もできないし大きな不確かさがともなう。不確かさの程度は、千年間の人工バリアの劣化評価と、数万年間の天然バリア中や生活環境中での核種移行評価とは当然異なるため、「現時点と予測可能な将来を考えたときにその限りで最善の手段を技術的に講じておくことが、遠い将来の人々や環境を防護する上で最も合理的」というBAT(Best Available Technique)の考え方が一つの解となる。これはALARA(As Low As Reasonably Achievable)に欠かせないものである。

このように廃棄物処分の長期の安全は、人の手を借りなくても確保できるようにできる限りの措置を講じることが基本だが、一方で、将来の掘削技術や人の活動は予測できないので、どんなに深く埋めても、廃棄物が掘り返されてしまう可能性は否定できない。このため、処分場の掘削行為は法律によって無期限に制限される。ただし無期限といっても、数万年も政府機能が存在し続けることは期待できないので、この制度は国としてのできる限りの措置の一環として位置づけられる。

これに対し、掘削も含めて将来何があるのかわからないのだから、そもそも論として、廃棄物を深く埋めて、見えなく、取り出しにくくしてしまわず、地表近くで無期限あるいは暫定的に保管すべきという意見は少なくない。廃棄物処分が掘り所としている考え方の一つに、将来のある時点でその先の判断について決定できるように配慮した「段階的アプローチ」があるが、地表近くでの保管はこのアプローチを適用しやすい。一方で、保管のみの議論はその後の負担の先送りだという意見もある。

廃棄物処分の安全性について社会とのコミュニケーションを図っていくためには、そもそも論も含めて、まずは同じ「原子力安全」である廃棄物処分安全と原子炉安全の専門家が意見を戦わせ、考え方として同じであるべき部分や違って然るべき部分の認識を共有した上で、原子力学会としての考え方を明確にすることが必要と考える。こうした「他流試合」を通じて、お互いの分野の安全を考えていく上での気づきもあるかもしれない。

今後、多くの若手が参加した原子力安全部会とバックエンド部会との活発なコミュニケーションを期待する。

著者紹介

前田敏克(まえだ・としかつ)

日本原子力研究開発機構
研究主席



これまでをふりかえり、今後を展望する(原子力安全部会)

安全研究と意思決定の健全な関係

Relationship between Safety Research & Decision Making

村上 健太

Kenta Murakami

KEYWORDS: *Integrated Risk-informed Decision Making, Safety Research*

20世紀初頭の著名な社会学者マックス・ウェーバーは、「職業としての学問」と題する講演で、学者を志す若者に対して、学術領域はますます細分化するので「科学の探求によって究極的な価値判断を得られる」という幻想を捨て、自分の専門領域で「日々の仕事」に励むよう強く勧めた。この講演録は原子力を学び始めた私にとって衝撃的だった。「果たして原子力安全を科学的に追及することは幻想なのだろうか？」

原子力安全部会の活動は、この問いに対する一つの答えである。当部会は、原子力安全が拠り所とすべき原則の一つに着目し、参加者がそれぞれの立場または専門性に基づいて意見を表明し、議論を重ね、その内容を丁寧に記録して公開してきた¹⁾。これにより、専門毎の前提条件の相違や、知見の確からしさが顕在化し、領域間の隙間に気付くことができる。なにより、原子力安全の当事者が「知識の限界」をどのように捉えているかが明らかになる。科学に価値判断を押し付けることなく、しかし科学的に、原子力安全を追求するのである。

人材や研究リソースも大事だが、私は研究成果の不確かさを取扱う方法論が確立することに期待している。安全部会の2018年夏期セミナーでは、事業者およびメーカーの若手からの報告の中で、評価手法の高度化と共に意巻対策が合理化されていく様子を知ることができた¹⁾。安全に関する意思決定において研究成果を吟味している様子が可視化されるなら、研究者に強い動機付けを与えるだろう。安全性向上評価届出制度が、安全上の弱点となる専門領域間の隙間を埋めるよう研究者を誘う駆動力となることを期待する。

研究成果を意思決定に活用しやすくするために、個別の研究コミュニティが取り組むべき課題もある。私の主専攻は原子炉構築物における微視的な経年劣化挙動である。この分野には、限られた資源で自信あるデータを取得するため、条件設定や試料の取扱いに関する多くの不文律がある。試験計画には装置固有の特性も考慮される。研究成果と意思決定を繋ぐには、研究組織に伝統的に蓄積されてきた暗黙知を表出し、その小領域における研究マネジメントを標準化して、不確かさを小さくする

技の数々を(暗黙知の所有者の権利に配慮しつつ)可視化することが重要になる。

何よりも研究姿勢の変化が必要だ。原子力安全に関する長期的な研究テーマには、他分野における標準問題としての歴史的役割があった。一例として、原子力材料の研究は分析技術の開発を支えてきた。結果的に、原子力と関連する様々な分野で、中規模の同好会的な研究コミュニティが生まれている。今後も原子力が標準問題の役割を担い続けると過信せず、中堅・若手が精力的に活動して、個別の課題に対して素早く結論を出すために、目的志向型の専門家コミュニティを作りたい。

原子力安全部会は、福島第一原子力発電所事故の報告書で、深層防護という考え方に拠りながら、それを効果的に実施する上で不足していた点を明らかにした。そのこと自体に異存はないが、あのように大きな事故を経て、なお事故前の問題設定が有効であり続けるということには(他分野では不確かさの取扱いに関するイノベーションが次々と生まれているように見えるから、なおさら)研究者として忸怩たる思いがある。私としては、新たな学術の潮流を生むことを切に願いつつ「日々の仕事」に勤しみたい。不確かさの問題に真摯に取り組み、意思決定と安全研究の間に適切な緊張関係を生み続けるなら、近い将来の大仕事(軽水炉リプレースや地層処分サイトの決定)に向けて原子力安全に係るコミュニティ全体の基礎体力が高まるはずだ。

— 参考文献 —

- 1) 原子力安全部会ホームページ
<http://www.aesj.or.jp/~safety/>

著者紹介

村上健太 (むらかみ・けんた)

長岡技術科学大学 原子力システム安全工学専攻



これまでをふりかえり、今後を展望する(新型炉部会)

原子力学会設立 60 周年によせて

— 積み残し課題への対応 —

For 60th anniversary of the Atomic Energy Society of Japan

- Management of suspended issues -

柳澤 務

Tsutomu Yanagisawa

KEYWORDS: *Advanced reactor, Fast reactor, Development strategy, Monju decommission, GEN-IV*

はじめに

原子力学会設立 60 周年おめでとうございます。学会はやっと還暦を迎えたばかりで、次の新しい生き方に脱皮することになる。我が新型炉部会は 2010 年 7 月誕生の 8 歳で少年期に入ったところである。1958 年 10 月の学術会議で原子力学会の設立が決定されたが、その 1ヶ月前には第 2 回ジュネーブ原子力平和利用国際会議で、原子力が夢から現実へとよいよ世界が本格的な開発をスタートさせる気運が高まった。そこでは米、英で実用規模に入った原子力発電所の運転経験や経済性と核融合の平和利用等が注目された。そのような中、日本原子力学会は 1959 年 2 月の設立総会によりスタートした。

1959 年の原子力学会誌創刊号には「トリウム均質動力炉の定常運転までの過程について」(大山彰、清瀬量平)と題する、Th-U233 の増殖系成立の過程と U235 あるいは Pu239 の供給との関連に関する研究論文が掲載されている。新型炉部会関連の第一号ではないだろうか。

我が国初の原子力長計は既に 1956 年 9 月に策定され、核燃料の有効利用から見て増殖型動力炉が国情に適合するので、国産に目標をおくものとするとして、技術水準の向上を図ると共に、設計に着手すると謳われ、自主技術開発による新型炉のプラント設計力が問われることになった。世界をみると、1959 年には新型炉開発、特に高速炉(高速増殖炉)では、英で 11 月に 1955 年から建設されていた実験炉 DFR が臨界を達成し、仏では実験炉ラプソディーの建設地が決まった年である。当時の海外の高速炉開発状況はどういうものであったか。

世界の高速炉開発は米国で、1946 年 8 月には水銀冷却の小型高速炉のクレメンタイン(熱出力 25kW)を臨界にし、多くの重要な知識と経験を提供して、1952 年には運転停止したことから始まる。それ以降、高速炉開発として冷却材は液体金属の水銀、鉛ビスマス、NaK の経験も重ねて、ナトリウムが主流に向かっていった。燃料については、金属燃料と共に MOX 燃料への関心が高まって

いった。このような動向は米、ソの高速炉に関する技術基盤の充実、強化の成果に負う所が大きかった。その後の 1960 年代以降の世界の高速炉開発の経緯を概観して、実用化をめざした新型炉開発がいかに容易なことでないかを冷静に直視してみる。

原子力開発の当初は、どの国もウラン資源の入手の厳しさに備えるため、原子力発電の急成長をめざす中、軽水炉の後塵を拝しつつ、高速炉導入を図っていく構想が立てられた。実際にはウラン需給の緩和や予想より低いエネルギー成長率で軽水炉主体で展開したことで高速炉開発にも影響が及んだ。

その後、米国はインドの核実験(1974 年)を契機に世界的な核拡散の懸念を提起し、カーター政権は再処理、高速炉開発を凍結させた。また、TMI 事故(1979 年)、チェルノブイリ事故(1986 年)による原子力安全性への懸念が国際的広がりをみせた。

このような中、各国での事情を背景にして、1990 年代には米国の実験炉 FFTF、EBR-II の運転停止、独の原型炉 SNR-300 の建設中止、英の原型炉 PFR の運転停止、仏実証炉 SPX の運転停止、日本でのもんじゅナトリウム漏えい事故に伴い、特に欧米の高速炉開発の気運は急速に失速した。2000 年代に入り、地球環境の温暖化、石油価格高騰を背景に、原子力カルネサンスと称される程に、原子力の重要性が再認識され始めた。米国が提唱した軽水炉に続く第 4 世代原子力システム(GEN-IV)プロジェクトが開始され、国際フォーラム(GIF)を設置し、国際枠組みで推進することになった。我が国では 2011 年東電福島第一原子力発電所事故(東電福島事故)で、新型炉開発も先を急ぐのではなく、まず自分の足下を固めよとの警告として、これまでの自らの開発経緯について冷静に熟考することが大事だろう。

新型炉部会の活動

新型炉部会設立の 2010 年 7 月といえば、もんじゅがナトリウム漏えい事故から 14 年半ぶりに運転再開した

のが5月6日であり、前年の12月には京都で18年ぶりの高速炉国際会議FR09が開催されていた。そこではGEN-IVの活動が報告され、仏のフェニックスは35年間の運転を停止し、もんじゅの運転・試験にバトンタッチする期待が寄せられていた。中国の実験炉CEFR、インドの原型炉PFBRが建設終盤を迎えていた。ところが、もんじゅは運転再開で炉心確認試験を終えた後、燃料交換の後始末の際、炉内中継装置の落下事故がおり、復旧したが新たに機器点検漏れなどの保守管理不備の問題がおり、2015年11月には原子力規制委員会からもんじゅ運営主体の見直しの勧告が出された。その間、東電福島事故を受け、国が原子力政策の抜本的見直しを表明したため、性能試験準備は保留され、原子力規制委員会は高速炉についても新規基準を用意することになった。

もんじゅは試験、運転を通じて事故、トラブル・不具合等を経験し、原因究明、調査研究、対策、品質保証活動の改善、社会への説明責任を通じて、それらを克服しつつ技術や人材、更には規制も育っていく道場と位置付けられる。厳しい状況の中でも何とか道場を開いておくため、関係者が協力して、運転再開への備えを整えなければならなかった。新型炉部会としては高速炉の新規制基準作成に向けての議論を深め、検討を続けて、以下のようなテーマで春、秋の学会の特別セッションを続けた。

- ①福島第一原子力発電所事故の技術的知見と第4世代炉の安全性
- ②研究開発段階発電用原子炉に対する規制基準に関する論点
- ③第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計クライテリア特別専門委員会報告(共催)
- ④第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計ガイドライン研究専門委員会報告
- ⑤もんじゅ安全性の国際レビュー

高速炉の新規制基準はいまだ棚にあげられている状況であるが、実験炉常陽の審査にも繋がるので重要な課題であり、新型炉部会での検討が国際的にも認められるべく、GIFなどに対し、安全設計クライテリア、ガイドラインで我が国が主導的立場をとることをめざしている。

もんじゅの運営主体の見直しに関する原子力規制委員会からの勧告に関連しては、2016年春の学会の新型炉部会で緊急意見交換会を開催し、9月には「高速増殖原型炉もんじゅの有効な活用について(見解)」、11月には「『もんじゅ』の意義と活用に関する提言」のプレスリリースにより、運転実績が僅少な研究開発段階であることを踏まえて、安全性向上、運転経験の蓄積の重要性を訴えた。また、もんじゅが運転再開によって今後実施すべき研究計画についても部会セッションで議論された。

もんじゅの保守管理の不備に関しては「研究開発段階

発電用原子炉の保守管理の在り方報告書」をまとめ、実用炉とは異なる取り組みをすべきことを部会セッションで報告した。

新型炉部会としては、更に、次世代炉は国際的俯瞰が極めて重要と認識しており、特にGEN-IVの動向が的確に把握できるよう報告会、学会誌投稿を行っている。海外では挑戦的な高速炉開発を進めているインドの原子力学会と日本原子力学会の協力の覚書の調印を新型炉部会からの要請も考慮され、2013年9月インド大使館で堀池寛会長が調印された。現在どのような協力活動がなされているのだろうか。

積み残された課題

もんじゅは2016年12月21日原子力関係閣僚会議において原子力機構に代わる具体的な運営主体の特定には至らなかったこと、新規基準に適合するための対応に相当の時間と費用を要すると見込まれることなどを踏まえ、もんじゅを原子炉として運転再開はせずに、今後廃止措置に移行するが、今後も高速炉開発を継続していくという方針を決定した。この方向付けは高速炉開発会議で行われたが、経産、文科両大臣、関連三機関の代表者のみで構成され、学会の見解や地元の意向も取り込んだ議論もなかった。廃止決定に際してはこれまでのもんじゅ開発のプロセスを踏まえた課題、反省が示されている。ここでは「もんじゅプロジェクトの「技術的な内容」に問題があったというよりむしろ、保全実施体制や人材育成、関係者の責任関係など「マネジメント」に問題があった。とりわけ「最先端の研究開発」と「安全な発電事業の実施」という二つの性格が異なる要素が混在する難しいプロジェクトであると述べている。まさしく実用化をめざした新型炉開発の本質的課題の原子力界への問いかけである。

高速炉という原子力の新しい技術体系、特に高速中性子、ナトリウムという安全性に懸念が表明されているものに関わる技術開発を自主開発を軸に据えて推進していく上で、実用化を見据えての原型炉段階の開発姿勢、取り組みへの構えに対して、幅広い視点からきちんと検証し、見解をまとめ、今後の新しい技術体系の開発戦略にいかすことを考えないといけない。その他にも政府方針に記されている検討すべき課題を列記してみる。

1. 実証炉以降の高速炉の開発に資する様々な技術的な成果が獲得され各種保守・修繕技術等の知見も蓄積された。
2. 燃料供給等に係る高速炉関連技術や人材育成基盤の構築といった多岐にわたる成果が得られている。
3. もんじゅプロジェクトの中断でやり残したことから、次期実証炉の高度化、安定運転、安全評価、コスト低減等にも活用されるはずだった運転再開により得られる知見については国内の試験施設や

国際協力等の活用，更には実証炉段階での対応等により獲得が可能である。

4. 国際協力の活用で高速炉に関する最先端技術開発の知見を獲得することの重要性が増している。
5. もんじゅの持つ機能をできる限り活用し，今後の高速炉研究開発における新たな役割を担う。
6. もんじゅを含む周辺地域を我が国の高速炉研究開発の中核的拠点の一つとして位置付け，もんじゅを活用した高速炉研究を引き続き実施するとともに高速炉の実用化に向けて技術開発等を実施する。

もんじゅ廃止措置決定から1年半，すでにこれらは忘れ去られそうだ。

また，今後の「高速炉開発の方針」として，開発方針を具体化するため，今後10年程度の開発作業の「戦略ロードマップ」を2018年を目途に策定することをめざすとされている。新型炉部会では，これに対して「高速炉戦略ロードマップ検討会」(主査笠原直人東大教授)を設け，高速炉サイクル開発の長期目標や社会との係わりを踏まえた技術開発戦略や長期的視点および短期的視点からの戦略の検討を続けている。この検討会には，大学，研究機関，メーカー，電力の研究者，技術者のOBが多数参加されている。

各機関のOB，特に現役退職直後の方々には，日頃気になっていた課題について，目前の業務で思考する余裕もなかったという方が多いのではないかと。様々な現場でトラブル，事故の克服に携わった方，国際核燃料サイクル評価(INFCE)で先行き気掛り続きだった方，海外のフェニックス，PFRに駐在した技術者，あかつき丸のプルトニウム輸送や，IAEAの査察に携わった方と多様な現場で実務に携わったシニア世代の方も多し。

ニア・OBの方の力をもったいない。

前掲した課題は難問ばかりで検討も簡単ではない。このように積み残された課題はどこか機関でも抱えているはずだ。新型炉部会としても新型炉に向けての技術開発の対象への関心と共に，開発プロセスそのものの検討にも挑戦して頂きたい。そこには，現役は日ごろの緻密な業務に忙殺されており，実務経験豊富で参集の機会も比較的自由に設定できるOBの方に積極的に参加頂き，現実性のある検討をお願いして報告書等の成果にまとめて公表することはできないだろうか。そのためには，OBが評論家としてでなく，課題解決への貢献をして，実のあるものにするには課題の提示，設定と検討の場を明確に設けることが重要である。

原子力関係のシニア・OBの役割として，原子力がおかれた厳しい状況を打開するために，社会や若い人との対話ばかりでなく原子力界自身が抱えている課題に対し誠実に検討を続け，一定の成果を出し，社会からの期待へ応えていくことの貢献につながることも重要でないか。そこでは，事業体，機関との緊張関係も生ずるかもしれないが，それが健全な姿ではないだろうか。

原子力学会としてもシニアに対する年会費，部会費への特別な配慮によりこれらの活動の活性化につなげることはできないだろうか。ご検討をお願いしたい。

著者紹介

柳澤 務 (やなぎさわ・つとむ)
 新型炉部会・前部会長
 元日本原子力研究開発機構



これまでをふりかえり、今後を展望する(新型炉部会)

新型炉分野の将来に向けて

For the Future of Advanced Reactor

市川 健太

Kenta Ichikawa

KEYWORDS: *Advanced reactor, GEN-IV, Technology succession, Social receptiveness, Dissemination of information*

はじめに

第4世代原子炉は、将来世界のエネルギー需要に対応するため、安全・信頼性、経済性、持続可能性、核拡散抵抗性などに優れた概念として各国で研究開発が進められている。これらの新型炉の実現に向けた研究開発、設計、製作・建設、運転に至る一連のサイクルは、開発者の現役寿命よりも長期におよぶことが多い。このため、その完遂のためには、次世代を担う若い人材の継続的な参入が必要不可欠である。そのことから、ここでは、新型炉分野が若い世代からの関心を得るために、部会に要望すること、開発者が取り組むべきことを述べる。

若い世代からの関心を得るために

新型炉分野が若い世代からの関心を得るためには、第一に新型炉開発の必要性が一般社会から適切に認知されること、第二に新型炉業界の活性化が必要であると考えられる。

まず、新型炉開発の必要性についてであるが、一般社会の中で真剣に考察や議論がなされる機会はほぼ皆無であり、今日現在の社会的な認知度は、残念ながら低いと言わざるを得ない。新型炉が実現することで、ウラン資源の有効活用によるエネルギーの安定供給や、高レベル放射性廃棄物の減容と潜在的有害度の低減による環境負荷の低減、プロセス熱利用や水素製造といった多目的利用等の様々な恩恵を社会全体が享受できることになる。また、海外に目を向ければ、ロシア、中国、インド等では、国策として新型炉開発が推進されている。これらの国々は、新型炉開発が国益に繋がるように、明確なビジョンを掲げている。エネルギー資源の乏しい我が国においても、新型炉の実用化に向けた国家レベルの長期戦略が望まれる。これらは、国家の枠を超え、世界全体の持続的発展にも貢献するものである。これらの新型炉がもたらす恩恵や海外の開発状況が広く理解されることが、新型炉開発の必要性の社会的な認知の第一歩であり、若い世代が新型炉分野に関心を持つきっかけになるのではないかと思う。

次に、新型炉業界の活性化については、新規のプラント建設の気運が国内で高まるのが最も効果的ではあるが、新型炉分野に限らず、原子力業界全体でも、短期的には難しい状況であると言える。現実的な代替策として、既設プラント・施設の利活用や、大規模な研究開発の立ち上げが望まれる。これらを通じて得られるモノづくりや実現象に触れる経験は、技術伝承の最適な機会であるが、昨今の原子力業界においては、その機会は極端に少なくなっている。一人前の原子力技術者を育成するために必要な要素として、他の設計者等から伝承される知識、実物や実現象に接した経験から取得する着眼点や発想力の2つが挙げられる。前者については、近年、各機関で注力され、最大限の努力がなされており、今後も継続されるであろう。一方、後者については、前述の通り、近年不足気味である。原子力業界に限らず、自らの設計結果や評価結果が実現する瞬間に立ち会う経験は、技術者にとって必要不可欠なものであり、製作・運転まで経験してみて、初めてわかることもあると考える。これらは、人から教えられるものではなく、実際に自らが体感して初めて身に付くものである。既設プラント・施設の利活用や大規模な研究開発等により、技術の伝承や革新がなされ、業界が活性化すれば、新型炉分野を志望する若い人材も増え、さらなる業界の活性化とレベルアップが期待できるのではなかろうか。

部会への要望

上記の観点から、新型炉部会に要望することは、技術的に正確で適切な情報の発信である。情報発信は、情報の受け手を意識する必要がある。ここでは、次世代の新型炉分野を担う若い世代を含む一般社会向けと、政府向けに別けて考察する。

まず、一般社会向けの情報発信については、新型炉開発によって社会全体が得られる恩恵と海外の最新の開発状況に焦点を当てるべきである。新型炉のもたらす恩恵と開発の必要性が一般社会から適切に理解されるよう、技術的に正確な情報を発信し続けることが重要である。また、海外の新型炉開発の進捗は目を見張るものがあ

り、この状況が続くようであれば、これらの国々から我が国は取り残されるという危機感を社会全体で共有することも、重要ではないだろうか。さらには、新型炉開発で先行する国々は、様々な失敗を経験し、それを開発推進の教訓として活用している点にも着目すべきである。失敗経験を糧に、直面する課題を克服してきた経緯については、技術的な観点ではもちろんのこと、失敗を取巻く社会環境の側面でも、我が国は社会全体として見習うべき点が多いように思う。これらの情報発信により、新型炉開発へ注がれる一般社会からの視線が、厳しくも期待を込めたものによっていけば、開発を推進する風土が醸成されていき、新型炉分野を志望する若い世代も増えていくのではないかとと思われる。

次に、政府向けの情報発信については、新型炉の実用化に向けたビジョンが国策として明確に示されることの重要性を発信すべきである。新型炉開発で先行している国々は、国家としての明確なビジョンに基づき、研究開発を推進していることから、国家レベルの長期戦略の必要性は明らかである。また、新型炉への規制の在り方についても、専門家集団である学会からの提言が必要である。特に、新型炉の規制は、実績が豊富な軽水炉の規制と比較すると、難しい面が多い。まず、実績の少ない原子炉の特性を踏まえた規制基準の策定が必要な点、また、軽水炉と同程度の安全・信頼性は備えておく必要があるが、同一の尺度で示すことは難しい点である。これらの点について、国内関係者で対話を重ね、規制のあるべき姿を模索する必要があるが、この局面で、純技術的な議論が展開される学会という場合は、大いに存在価値を発揮できるのではなかろうか。また、第4世代炉国際フォーラム(GIF)では、高速炉開発国の政府間協力として、ナトリウム冷却高速炉に対する国際的な安全設計要件である安全設計クライテリア(SDC)と安全設計ガイドライン(SDG)の構築が進められている。これらは、今後のナトリウム冷却高速炉の規制において、大いに参考とされるべきであろう。仮に、炉の特性が十分に理解されないまま、不合理な規制要求が課されたことで、今後誕生しうる革新的な新型炉の芽を摘むようなことがあれば、これは国益を損なうことを意味し、社会全体にとって不幸なことである。

開発者が取り組むべきこと

以上を踏まえ、自身を含む開発者が取り組むべきことを挙げるとすれば、新型炉業界の信頼回復と活性化への貢献である。昨今、特にナトリウム冷却高速炉については、もんじゅを中心に否定的で厳しい報道が続いたこともあり、一般社会からの信頼回復を関係者の一人ひとりが意識する必要がある。安全第一の姿勢の徹底や、日々の業務の着実な推進、一市民としての近隣友人・知人との対話といった、地道な取り組みが必要である。

次に、新型炉業界の活性化のためには、国内に蓄積されてきた膨大な技術知見の維持・向上が必要である。前述の通り、モノづくりの機会の創出が最も効率的であるが、技術伝承の確実な推進、海外知見の取り込みや他分野の技術の応用等、現在の状況下で可能なことを貪欲に進めていく姿勢を持つことが重要である。そして、学会発表や論文投稿などを通じ、自身の研究開発成果の積極的な発信を行うことで、新型炉業界のみならず、原子力業界全体の活性化に貢献していきたい。

最後に、新型炉分野は特に、次世代の目標となるべき夢を掲げなければならない。最先端の安全・信頼性の確保はもちろんのこと、近年益々多様化する一般社会や国からの要望に応え、次世代を担う若い人材を惹き付けるような魅力ある新型炉概念を創出し、その実現を目指して、歩み続けることが我々開発者の使命であると考えている。

— 参考文献 —

- 1) 佐賀山豊, 安藤将人, 第4世代原子炉の開発動向 第1回全体概要, 日本原子力学会誌 Vol.60 No.3 (2018).
- 2) GIF Portal Site
https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public

著者紹介

市川健太 (いちかわ・けんた)
三菱FBRシステムズ株式会社



これまでをふりかえり、今後を展望する(リスク部会)

リスク部会の設立とその意義について

Establishment of Risk Science and Technology Division and its Significance

牟田 仁
Hitoshi Muta

KEYWORDS: Risk, Probabilistic Risk Assessment (PRA), Risk Management, Risk Communication, Reliability Data, Safety Goal, Uncertainty

リスク評価に係る背景とリスク部会 設立の経緯

人や社会に利益をもたらすための活動には必ずメリットとデメリットがあり、原子力の利用においても、膨大なエネルギーを得る代わりに、東京電力福島第一原子力発電所のような過酷事故が発生すると、原子炉内部で生じる放射性物質が外部に放出されることによって、放射線が人体に健康影響を及ぼしたり、放射能による汚染で土地が利用できなくなったり、農作物や家畜が被害を受けるマイナスの面があります。

このようなマイナスの面は、多くの場合「リスク」という言葉で表現されます。「リスク」は、様々な定義や考え方がありますが、International Risk Governance Council (国際リスクガバナンス協議会)によれば、私たちが価値をおくものについての事象や活動の不確かな(普通は望ましくない影響である)"と定義されています^{1, 2)}。また、ISO ガイド 73³⁾、ISO31000⁴⁾では「目的に対する不確かさの影響」と定義されています⁵⁾。

原子力発電所は、考え得る多くの事故シナリオを想定し事故を防止する/事故影響を緩和する対策を施していますが、その想定範囲を超えるもの、想定と異なるもの、想定できても詳細な情報がないもの、更にはそもそも想定すらできていないといった不確かさに対しては対処が難しい可能性があるのが実情です。従ってどこまで対処を行っても、「リスク」を完全になくすることは困難であると言わざるを得ません。

上述のように、原子力発電によって得られるエネルギーは我々の生活に大きな恩恵をもたらすものであり、得られるメリットも非常に大きく、原子力に関する技術の持つ価値は高いものがあると考えられます。原子力発電に「リスク」があるのであれば、その「リスク」を不確かさも含めて合理的に理解し、その理解に基づき可能な限り「リスク」を少なくすることが原子力に対する科学的なアプローチであると言えるでしょう。

「リスク」の理解には「確率論的リスク評価(Probabilistic Risk Assessment: PRA)」と呼ばれるシステムティックな

評価体系が用いられます。PRAは、1970年代に発行された米国の WASH-1400 'The Reactor Safety Study' において手法として体系化され、その後の NUREG-1150 'Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants' で個別のプラントに対する PRA が実施され、この後も評価技術に関する様々な研究が行われてきました。我が国においても PRA に関する研究をはじめ、国内の全ての原子力プラントの内的事象を対象とした PRA を行い、その知見をアクシデントマネジメント (AM) の導入に活用してきました。その後、中越沖地震や東北太平洋沖地震を経験し、外的自然現象に対する PRA 手法に関する研究や個別プラントの PRA の実施、更には新規制基準への対応にその知見を活かすための努力がなされてきました。

日本原子力学会においても標準委員会により内的事象および外的事象を対象としたレベル1~3PRA の実施基準および PRA によるリスク情報活用のための実施基準を整備し、PRA 研究や評価、並びに活用の基盤の構築を行ってきました。

今後も PRA から得られるリスク情報の有用性を鑑みると、PRA に関わる技術を常に最新のものとし、評価対象となる、立地条件をも含めた原子力プラントに適したものとしていくために、最新研究動向や PRA に必要なデータの整備に関する調査・研究活動を維持し発展させていく必要があります。

リスク部会の設立趣意書⁶⁾にもありますように、我が国では産業界、大学等研究機関および規制機関において、これらを目的とした調査・研究活動が行われています。また、東京電力福島第一原子力発電所の過酷事故の原因となった地震および津波等の外的事象に関しては、地震工学や土木工学といった幅広い分野における専門家の知見も取り入れた外的事象 PRA の評価技術を高度化していく必要があります。更には、評価技術のみならず、リスクを管理するための考え方や技術、リスクコミュニケーションといった分野の調査・研究活動も重要であると考えられます。

以上のことから、定量的リスク評価および関連する

データ類に関する研究活動の支援，その発展に貢献すること，更には本分野における将来の人材育成への寄与を目的として，「リスク部会」が設立されました。

リスク部会の役割と今後の活動について

2017年9月13日，日本原子力学会秋の大会（於北海道大学）にてリスク部会の設立総会が開催されました。リスク部会は，日本原子力学会の19番目の部会として発足し，原子力施設並びに放射線の利用に係る技術リスク，さらにはそれらを取り巻く社会リスクにかかる定量的リスク評価技術およびリスク活用にかかる研究開発や技術体系構築，国内外動向調査，国際協力活動，そして研究者・技術者の交流と育成を目的としています。

リスク部会では，部会活動を円滑に推進するために，部会長，副部会長の下に，部会の円滑な運営を行う総務・財務小委員会，部会の活動方針の検討や研究の活性化および人材育成にかかる活動を行う企画・研究小委員会，国際会議の開催や国際協力の窓口となる国際小委員会，部会報等の発行や部会ホームページの管理，論文集や教材などの出版等の活動を行う広報・出版小委員会を配置しました。

この体制の下，発足以来，以下の活動を行ってきました。併せてこれまでの実績も示します^{6,7)}。

- ① 部会員の相互交流のための，定期的な「部会報」の発行およびリスクに関わる国内外の情報伝達
 - ・部会ホームページの立ち上げ(2017年12月)
<http://risk-div-aesj.sakura.ne.jp/index.html>
 - ・部会報発行(2018年3月，9月)
- ② 研究会，セミナー，講演会，講習会等の開催
 - ・講演会「自主的安全性向上のためのリスク評価技術活用に関するPRAへの期待と活用のための取組」(2018年3月開催)
 - ・シンポジウム「シンポジウム『安全目標』再考－なぜ安全目標を必要とするのか？－」(2018年8月開催)
 - ・日本原子力学会における企画セッション「最近のPRA手法の研究・開発動向」(2018年春の年会)
「PRAのためのプラント固有データ収集と信頼性データ構築への取組」(2018年秋の大会)
- ③ 本部会の活動に関わる国内外の関連学協会，諸機関との連携，研究会等の共催
 - ・国際シンポジウム「PRAとリスクマネジメントに関するアジアシンポジウム」(2017年11月開催)
- ④ 本部会活動に関連する他部会の活動に積極的な協力
 - ・日本原子力学会2018年春の年会企画セッション「外的事象に対する包括的な安全確保の体系の現状と課

題」(原子力安全部会，標準委員会との共催)

- ⑤ 本部会の活動に関わる研究専門委員会，特別専門委員会等の活動に積極的な協力
 - ・「確率論的リスク評価の活用および手法調査」研究専門委員会(仮称)の発足
- ⑥ 特記すべき研究成果等について，学術研究的立場からの評価ならびにその発信
- ⑦ 日本原子力学会の年会・大会，本部会の関与に関する研究会等で発表された本部会員の論文等の，学会誌および論文誌への投稿の積極的な奨励

今後もこれらの活動を継続しますが，特に以下の活動に注力することで，より一層リスク評価にかかる研究支援および将来への人材育成を推進していきたいと考えています。

- (1) 研究会の実施による国内各機関が取り組んでいる定量的リスク評価技術の高度化研究の成果の共有
- (2) 国内外の定量的リスク評価の専門家を招待し，先進の技術紹介や研究発表を行うシンポジウムの実施
- (3) PRAに関する国際会議の主催，共催
- (4) 定量的リスク評価技術の講習会実施，若手優秀発表表彰制度の導入等による人材育成
- (5) 定量的リスク評価情報の発信・提供

リスク部会では，リスク評価の研究者や実務者を志す若い方々や，人文・社会系を含む様々な専門分野の研究者，専門家に本部会の活動に関心を持っていただき，部会へ参加して頂くことを期待しています。共に活動することで，原子力の科学と技術の持つ価値が社会に広く受け入れられるようになることを願ってやみません。

－ 参考文献 －

- 1) International risk governance council, "An introduction to the IRGC Risk Governance Framework"
- 2) <http://risk-div-aesj.sakura.ne.jp/message.html>
- 3) ISO Guide 73:2009 Risk management - Vocabulary
- 4) ISO 31000 - Risk management
- 5) AESJ-SC-TR011:2015「リスク評価の理解のために」
- 6) <http://risk-div-aesj.sakura.ne.jp/prospectus.html>
- 7) <http://risk-div-aesj.sakura.ne.jp/activities.html>

著者紹介



牟田 仁 (むた・ひとし)

東京都市大学 工学部原子力安全工学科/
総合理工学研究科共同原子力専攻

これまでをふりかえり、今後を展望する(リスク部会)

リスクの理解，共有のための部会活動について

Activities of Risk Science and Technology Div. for
Understanding and Sharing the Idea of Risk

河合 勝則

Katsunori Kawai

KEYWORDS: Risk, PRA, Safety Goal

はじめに

定量的リスク評価およびそれに関連するデータ類に関する研究活動を支援し、その開発発展に貢献すること、さらに将来の人材育成に資することを旨とするリスク部会は、2017年9月に発足し、その記念講演において、資源エネルギー庁原子力政策課松野課長から「様々なステークホルダーのコミュニケーションプラットフォームになり、社会信頼の確保につながる活動を期待する」とのエールを頂きました。発足から1年を経過し、リスク評価手法の基盤整備と活用を主要なテーマとするシンポジウムと企画セッションをそれぞれ2回ずつ開催し、リスクを扱う技術と応用に係る専門家の知見、研究の成果を紹介してきました。

活動の概要

2回の企画セッションでは、近年のPRAに関する国際学会で活発に議論されている技術開発の動向、および、PRAの根幹となるプラント固有の信頼性データの構築に係る活動に焦点を当て、専門家に最先端の技術を紹介いただきました。2018年3月のシンポジウムでは、自主的な安全性向上の活動への貢献を期待されるPRAの現状と改善の方向性について3つの講演、「自主的安

全性向上活動のためのPRAに関する提言(野口和彦教授、横浜国立大学)」、「『Risk-Informed Decision Making: A Survey of United States Experience』におけるPRAの活用について(山中康慎氏、電力中央研究所)」、「米国における安全性向上活動のためのPRAの活用事例とグレードの考え方: Woody Epstein氏、Appendix R Solutions」を行いました。また、講演者に山口彰教授(東京大学)、白井孝治氏(電力中央研究所)、成宮祥介氏(JANSI)を加えた総合討論にて、社会のリスク許容の判断基準、PRAの扱い方と信頼性について議論しました。

2018年8月のシンポジウムでは、東京大学の弥生研究会から発行された論文「『安全目標』再考—なぜ安全目標を必要とするのか?—」を題材とし、4つの講演「安全目標がなぜ今必要なのか(山口彰教授、東京大学)」、「安全目標をどのように活用するか(浦田茂氏、原子力エンジニアリング)」、「安全目標と社会とのかかわり(菅原慎悦氏、電力中央研究所)」、「安全目標をめぐる日本の経緯と「構造災」(寿楽浩太准教授、東京電機大学)」を行いました。また、講演者に竹内純子氏(国際環境経済研究所)と示野哲男氏(原子力エネルギー協議会)を加えた6人による総合討論にて安全目標の必要性、安全目標の検討のプロセス、安全目標と社会との接点、災害後の復興/避難/救済等にも関連付けた検討のアプローチ、不足なく且つ過剰でない安全性維持のために必要なことは何かについて議論しました。

今後の活動に向けて

企画セッションのテーマ、シンポジウムでの提言を参考にして、リスク評価の技術基盤と社会とのコミュニケーションを含むリスクの活用に関し、リスク部会の着眼点を私なりの理解で整理してみました。

【リスク評価技術の高度化】

- ・ 動的PRA、外的事象PRA、マルチユニット/マルチハザードPRA等、PRA手法の高度化とその応用

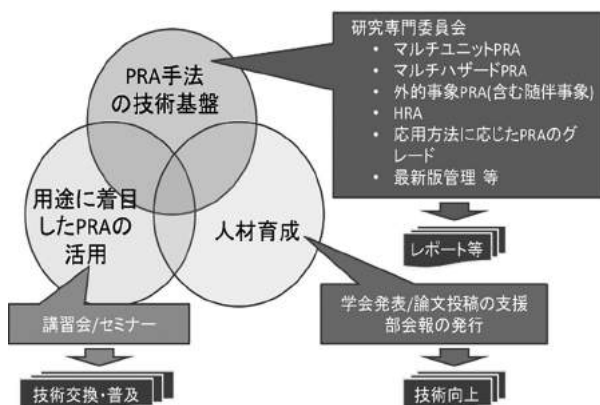


図1 リスク部会の活動と役割等



図2 安全目標に関するシンポジウムの様子

- ・ わが国固有の信頼性データの構築
- ・ 標準等で規定したハザードや故障以外に存在するリスクを把握し、定量化するための手段、また、デジタル設備等、リスク評価手法が確立されていない技術への対応
- ・ 成熟していないPRA手法で得られた結果を活用していくための手法(例: NUREG-1855¹⁾やR.G.-1.200²⁾)
- ・ 世の中に過酷な事故を引き起こさないための目標は何か等、社会が受け入れられる安全目標の検討と安全目標を防災の設計等の現実の活動に使える仕組み

【社会とのコミュニケーション】

- ・ 様々な人とのコミュニケーションにより、人々の感情やリスク認知の背後にある価値を分析し、リスク把握のための視野を広げ、対策としての“How”の部分を広げるためのプロセス
- ・ 「不確かさ」や「わからなさ」の存在を前提とした安全確保に関する社会とのコミュニケーション
- ・ IAEAの階層型安全目標に表される上位目標に関する、様々なステークホルダーが関与する議論のあり方
- ・ メリットを経済性だけで語っていた過去の延長ではなく、社会にどういう貢献をするのかという着

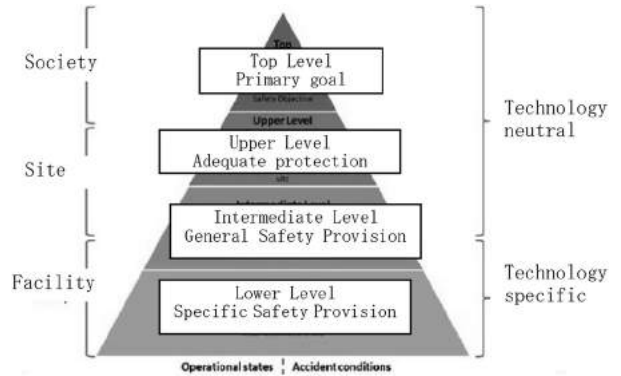


図3 IAEAが提案する安全目標階層構造概念

観点での原子力という技術に関する議論

【人材育成】

- ・ 社会に存在する様々なリスクを、保守、設計や運転等の専門分野の知識とリスクの知識を組み合わせ、リスクを総合的に判断する人材の育成

今後、シンポジウムで得られた提言を参考にして、研究専門委員会の立ち上げ、企画セッションでの最新技術の紹介とともに、国内のリスク評価技術の進化に資するシンポジウムを開催していきます。

— 参考文献 —

- 1) NUREG-1855, Rev.1, 2017年3月 “Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision Making”
- 2) Regulatory Guide 1.200, Rev.2, 2009年3月 “An Approach for Determining the Technical Adequacy of PRA Results for Risk-Informed Activities”

著者紹介



河合勝則 (かわい・かつのり)
MHI ニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング株式会社

これまでをふりかえり、今後を展望する(海外情報連絡会)

今後の世界の原子力開発動向について

Future Nuclear Development in the World

橋 幸男

Yukio Tachibana

KEYWORDS: *Generation IV Nuclear Reactors, VHTR, SFR, MSR, SMR*

はじめに

2011年3月11日の東京電力福島第一原子力発電所事故以降、我が国の原子力産業・研究所はその事業の推進に厳しい状況を経験したが、事故の反省と教訓を踏まえつつ、関係者の精力的な取組み、および国際的な協力により着実に元気を取り戻しつつある。国内を見ると、国際的にも高い安全性を求めた新規制基準に適合した既設発電炉は、2015年8月の川内一号機を皮切りに順次再稼働を進めつつある。また、研究用原子炉についても、京都大学研究用原子炉(KUR)、同臨界実験装置(KUCA)をはじめとして、順次、運転を再開してきており、原子力機構のHTTR(高温工学試験研究炉)は2019年度に運転再開する計画であり、高速実験炉「常陽」と共に、それぞれ再開に向けた準備を進めている。

海外との協力強化も進んでおり、例えば第4世代原子炉については、第4世代原子力システムに関する国際フォーラム(GIF)の枠組みの下での、多国間による高速炉、高温ガス炉等に係る研究協力が進んでおり、二国間においては、仏のASTRIDプロジェクトに関する日仏協力、日米二国間の日米民生用原子力研究開発ワーキンググループ(CNWG)の枠組み等における協力が進んでいる。高温ガス炉については、さらに、ポーランドにおける新たな高温ガス炉開発の進展に資するため、原子力機構とポーランド国立原子力研究センター(NCBI)との間において、高温ガス炉の設計、材料、安全評価等に関する技術の協力を開始したところである。

海外情報連絡会は、①日本原子力学会と海外の原子力機関の協力を推進する、②日本原子力学会と海外の原子力関連学会会員相互の融和を促進する、および③海外の原子力に関する情報伝達と調整を図る、の3つを目的とした活動を行っている。海外情報連絡会では、この③の目的と関連して、年4回の講演会を活動の中心に据えている。

本報では、これまでの講演会の内容を踏まえつつ、今後の世界の原子力開発の動向について述べる。

世界のエネルギー情勢

昨年度の第4回講演会において、(一社)海外電力調査会の黒田雄二氏に「世界の電力市場と原子力の動向」¹⁾と題する講演を行っていただいた。以下にその概要を示す。

- ・ 世界エネルギー機関(IEA)によると、2016年から2040年の間に世界の一次エネルギー需要は28%増加の見込み。この中で、原子力発電電力量は47%増加の見込み。
- ・ 世界の原子力発電設備は2016年末現在の413GWから516GWへと25%増加の見通し。この増加の大半は中国、インド、およびロシア。
- ・ この様に今後も世界の発電電力量と共に原子力発電電力量が増加していくことが予測される。
- ・ 中国、インド、ロシアのような電力非自由化国においては、今後も第3世代原子炉(改良型軽水炉)の建設が進み、海外の新規導入国へ輸出していくものと見られるが、米国、英国、フランス、日本のような電力自由化国では、他の電源に比べリスク(建設投資リスク、市場競争リスク、政治規制リスク、バックエンドリスク、事故リスク)を持つ原子力発電所の新設は難しくなり、米国では、一部の運転中の発電所も経済的に厳しい状況となっている。

このように、中国、インド、ロシアにおいては、今後も大型軽水炉の建設が進むと考えられるが、原子力の新規導入国のみならず、原子力先進国の中でも電力自由化国の一部においては、より建設投資リスクが小さい小型モジュール炉(SMR)が導入されていくものと考えられる。

第4世代原子炉

2001年7月に、4つの開発目標である「持続可能性」「安全性」「経済性」「核拡散抵抗性」を満足する第4世代原子力システムの研究開発を多国間協力で推進することを目的として、「第4世代原子力システム国際フォーラム(GIF)」が発足した。2030年代の商用化を目指しており、13か国、1機関(アルゼンチン、オーストラリア、ブラジ

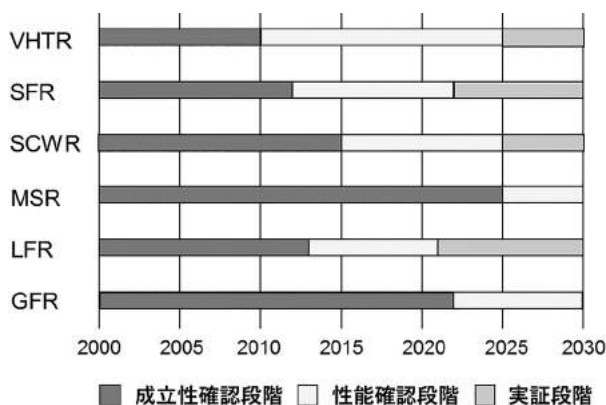


図1 GIF技術ロードマップ

ル、カナダ、フランス、日本、中国、韓国、南アフリカ、ロシア、スイス、英国、米国およびユーラトム)が参加している。

GIFにおいては①超高温ガス炉(VHTR)、②ナトリウム冷却高速炉(SFR)、③超臨界圧水冷却炉(SCWR)、④熔融塩炉(MSR)、⑤鉛冷却高速炉(LFR)、⑥ガス冷却高速炉(GFR)の6つの炉型が選定されている。このうち参加国が最も多いのがVHTR、2番目に多いのがSFRである。

図1に2014年1月に改訂されたGIF技術ロードマップ²⁾を示す。VHTR、SFR、SCWR、LFRの4炉型については、成立性確認段階(Viability Phase: 基本コンセプトが、関連する条件下で試され、全ての潜在的な技術的問題が、特定され解決される段階)から性能確認段階(Performance Phase: 工学規模のプロセスおよび現象並びに材料性能が、プロトタイプの条件下で検証され、最適化される段階)に移行している。なお、実証段階(Demonstration Phase: 詳細設計が完了し、商業展開の段階への移行を目指し、システムの許認可、建設、運転が行われる段階)は、GIFの枠組みでの研究開発協力の範囲外である。

これらの炉型のうち、VHTRは出力300MWe以下であり、SMRとしても注目されている。また、SFR、MSR等についても(大型炉のみならず)SMRとしての設計が可能である。

小型モジュール炉(SMR)

SMRには上記の第4世代原子炉に加えて、小型軽水炉等が含まれ、多種多様なコンセプトが提案されている。

本年度の第2回講演会において、原子力機構の國富一彦氏に「ポーランドにおける原子力の動向－高温ガス炉の開発を中心として－」と題する講演を行っていただいた。この講演の中で、カナダおよび英国のSMR計画については、以下の通り紹介されている。

- ・ 2018年6月12日、カナダ原子力研究所(Canadian Nuclear Laboratories: CNL)がサイト内に建設予定のSMRの実証炉に関して、国内外の原子炉開発会社4社から関連資料が提出されたと報告した³⁾。2017年に関心表明が出された19社から4社への絞り込みがなされた。
- ・ CNLはSMR技術研究を優先項目と選定し、2026年までの実証プラント建設を目指している。
- ・ 原子力開発会社10社は、カナダ原子力安全委員会(Canadian Nuclear Safety Commission: CNSC)に対して、事前審査を要請し、CNSCによる評価が行われている。

上記の原子力開発会社10社が提案している炉型は、高温ガス炉(3社)、ナトリウム冷却高速炉(1社)、軽水炉(2社)、熔融塩炉(2社)、鉛冷却高速炉(1社)、マイクロリアクター(1社)である。

また、2016年に英国政府(Department of Energy & Climate Change)が公開したSMR Techno-Economic Assessment⁴⁾では「発電を目的とすれば小型軽水炉にアドバンテージがあるが、脱炭素のためには高温熱が必要とされることを考慮すれば、小型高温ガス炉が最も大きな役割を果たす」とされており、高温ガス炉の熱電併給技術の可能性に大きな期待が寄せられていることがわかる。

おわりに

地球温暖化防止のためには、世界的な温室効果ガス排出量の削減が必要であり、原子力が果たす役割は今後も大きいと考えられる。今後の世界においては、大型軽水炉に加えて、小型軽水炉、高温ガス炉、ナトリウム冷却高速炉等の小型モジュール炉の建設が進むものと期待される。

－ 参考文献 －

- 1) [url:http://www.aesj.or.jp/kaigai/documents/Lecture/Lecture-39-4-Proc.pdf](http://www.aesj.or.jp/kaigai/documents/Lecture/Lecture-39-4-Proc.pdf)
- 2) Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems, January 2014.
- 3) CNL News Release, "CNL announces strong interest in siting an SMR demonstration unit", June 12, 2018.
- 4) [url:https://www.gov.uk/government/publications/small-modular-reactors-techno-economic-assessment](https://www.gov.uk/government/publications/small-modular-reactors-techno-economic-assessment)

著者紹介

橘 幸男 (たちばな・ゆきお)

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門



これまでをふりかえり、今後を展望する(学生連絡会)

学生連絡会の活動を通して学んだこと

Lessons Learned from Student Network Activities

村本 武司

Takeshi Muramoto

KEYWORDS: *Student Network, Young Generation Network, Science School, Communication*

学生連絡会について

日本原子力学会学生連絡会は、1998年原子力学会秋の大会学生企画セッション第2部の学生連絡設立総会での決定をうけて、企画委員会に学生連絡会設立の要望書を提出しました。その後、企画委員会、理事会の承認を得たのち、本連絡会は1998年11月26日に正式に活動を開始しました。設立に至った背景として1998年当時原子力学会に所属する学生会員は500名を超えていました。しかし、学生にとって本学会は自身の研究発表をするだけの場になっており、学生同士の交流や正会員との交流機会は少なく、研究を発展させていくための開かれた、連続的な場とはなっていませんでした。そのような背景から、将来各分野で若手として活躍するであろう学生が相互に交流意見を交換し、また正会員と交流を活発にさせる為の受け皿となる組織として本連絡会は設立されました。学生会員同士の相互の情報交換、研究交流を通して、学生の研究活動を支援し、日本原子力学会の発展に貢献することを本連絡会の活動目的に掲げ、多くの諸先輩方の活躍によって1998年当時から現在に至る20年ものあいだ歴史を紡いできました¹⁾。

現在の主な活動は、学会の学生ポスターセッションの開催、若手連絡会 YGN やシニアネットワーク SNW との対話会、施設見学会や科学教室の実施などを様々な組織からのサポートを受けて行っております。今回は初めに簡単に本年度活動報告として YGN との対話会と科学教室企画のご報告をします。後半は学生連絡会の活動、特に科学教室の企画を通して私自身が学んだことを記し、そこから個人的な学生連絡会の将来の展望を述べます。

YGN との対話会

2018年8月4日に原子力の若手と学生の対話会 in 関東 2018 が日本原子力学会 Young Generation Network (YGN)²⁾と学生連絡会で共催されました。日本の原子力分野の第一線で活躍している若手社会人たちと大学生との対話を通して、学生の漠然とした原子力業界への理解

を深める。また、学生自身が将来のキャリアパスを考えるための場を設けるために開催されました。当日は電力、メーカー、研究機関、大学、省庁、コンサルなど多方面からの社会人の方の参加がありました。また学生側の参加者は、学年は学部3年生から博士課程3年生まで幅広く、所属大学は関東の大学は勿論のこと、京都大学や広島大学など関東の大学以外からも参加がありました。

対話会は初めに、若手の自己紹介と称して YGN 運営委員より、「原子力業界マップ」と題した、日本の原子力業界の現状の解説がありました。その後若手社会人一人一人から、所属や仕事内容に関する簡単な自己紹介がありました。これにより学生側は原子力業界の現在の全体像をイメージすることができました。次に6グループに分かれてお茶菓子を囲みながらの、自由なグループ対話が行われました。各グループでは、それぞれの簡単な自己紹介から始まり、学生側が原子力業界に抱いている疑問や自身の進路のことなど思い思いのことを若手社会人につづけることができ、それらの疑問や質問に対し若手社会人からこれまでの経験を基にした多様な視点からの有益な回答やアドバイスがありました。また学生同士や社会人同士でも会話が弾み、日本の原子力業界について熱い議論が交わされました。総じて、学生にとっては原子力業界における自身の将来のキャリアパスを考える



図1 対話会の様子



図2 霧箱実験の様子

良い機会となりました。

科学教室の企画

2018年8月7、8日に東京大学で開催された“Techno Edge 2018”にて、小中学生を対象に原子力分野のことにについてより分かりやすく伝えることを目的とした科学教室を開催しました。座学だけでなく参加者の方に実際に放射線の可視化実験を行ってもらうことで放射線についての理解を深めて貰うことにしました。

当日は100名を超える子供たちとその親御さん方に参加していただきました。前半は「私たちの周りの自然放射線を見てみよう！」と題した放射線についての簡単なレクチャーを学生連絡会の学生が行いました。後半は実際に霧箱を参加者の皆様に作ってもらいました。自分で作った霧箱を使った実験は非常に好評で、「楽しかった!」「面白い!」「初めて見た!」といった嬉しい声を子供たちから聞くことができました。

科学教室の企画から学んだ事

今回の科学教室の開催を通して、私自身準備時から原子力や放射線について学び直し、どのように伝えたら専門的なことも伝わりやすいのかなども考えました。これにより、自分自身も普段何気なく学んでいた研究対象以外の専門的なことについて理解をより深めることができました。また、親御さんとの会話の中で「原子力は本当に安全なのか？」などのような質問もされました。これに対し、私はうまく返答することができませんでした。この質問がきっかけで、原子力を学んでいる学生として、いつでも一般の方が抱く原子力に対する素朴な疑問に対して適切に答えることができるように、原子力やエネルギー問題に対し、普段から考える必要があると感じ

ました。さらに今回の参加者は小中学生と若い世代であり、説明する側も学生と比較的年齢的にも近い世代であったために、会話が弾み専門的なことにもより興味を持ってもらえたのではないかと感じました。

以上より今回の科学教室の企画から学んだことは、学生が一般の方と実際に専門的なことについて対話する経験は、自身の専門性をより理解することができると同時に、自身の専門分野やそれに関係する分野により関心を持ち、考えるきっかけになるのではないかと考えます。また、自分の専門分野のことを一般の方にどのように伝えればよいかを肌で感じる良い経験になります。さらに学生が主催することで同年代の若い世代への影響力があるのではないかと考えます。

従って、将来的に原子力分野の専門家となりうる学生が一般の方と実際に専門的なことについて対話する場を早い段階で経験することは、学生自身にとっても学びが多く、さらに一般の方、特に若い世代の方に原子力のことについて関心をもってもらいやすいと考えます。これは今後の原子力分野の発展を考えた時に大変有益であると考えます。

今後について

現在私は学生連絡会の一員として活動しています。そこでこのネットワークを活かして、科学教室のような学生が一般の方と実際に専門的なことについて対話する経験をすることができる場を学生同世代の学生に提供することができれば、自身にとっても他学生にとってもよい学びの場になり、将来の様々な原子力の課題の解決に微小ながら貢献できるのではないかと考えます。

最後になりましたが、今後も学生連絡会はこのような活動を精力的に継続していきますので何卒宜しくお願い致します。

— 参考文献 —

- 1) 日本原子力学会 学生連絡会 ホームページ
url : <http://www.aesj.or.jp/student/>
- 2) 日本原子力学会 若手連絡会 ホームページ
url : <http://www.aesj-ygn.org/>

著者紹介

村本武司 (むらもと・たけし)

東京工業大学 環境・社会理工学院 博士
課程1年



これまでをふりかえり、今後を展望する(シニアネットワーク連絡会)

シニアネットワーク(SNW)連絡会の歩みと新たな展開に向けて

The history and future of senior network committee

石井 正則, 早野 睦彦
Masanori Ishii, Mutsuhiko Hayano

KEYWORDS: senior, dialogue with students, nuclear education, public acceptance

I. SNW の紹介, 沿革

長年原子力業界の実務に携わってきた私達の心配は、多くの方々がエネルギー問題に関心を持って、正確な情報に接することが出来ず、国民的論議がなされないままに偏ったマスコミの論調が一人歩きをし、国の根幹に関わるエネルギー問題の方向が形成されていくのではないかという点にあります。エネルギーの安定供給は、ただ工業界、産業界のためだけではありません。エネルギーは、生きとし生ける者全てが使用してその営を支えるものですから、その確保は人類の発展存続を支配するものでもあります。

そのような思いから、2001年10月にボランティア団体として「エネルギー問題に発言する会」が発足しました。その後、私たちは次世代を担う学生たちが原子力を学問として学ぶだけでなく、原子力界を正しく理解し、自らの問題として考え、技術力で世界に貢献しようという気概を持ってもらう推進活動のため2006年5月にシニアネットワーク連絡会(SNW)を発足させました。

SNWは多岐にわたるエネルギー問題に対して、何ものにもとらわれず自由で多様な意見を社会に発信することを旨としております。会員は原子力メーカー、電力、研究所、大学などのOBを主体とし、正会員(原子力学会会員)約200名、協力会員(非原子力学会会員)約100名で構成されています。

II. 活動方針およびこれまでの活動

SNWは会員それぞれが培ってきた知見と経験を活かし、世代間の対話と様々な交流を通じて学術の発展と技術の伝承ならびに人材育成に協力し、真の理解者を拡げることを目指して以下の活動を行ってきました。

1. 学生たちとの対話活動

次世代を担う若者との対話の機会をつくり、意見を聴き疑問に答え励まし、シニアの経験と考えを伝え、若者に夢と希望を与えて彼らが次世代を担う気概を自ら育む手助けとして対話活動に取り組んできました。

2. 一般市民や教育現場との対話活動

一般市民と次世代を育てる教育現場の先生方との対話を通じてエネルギー問題の正しい理解を助けるため、対話会や公開シンポジウムに取り組んできました。

3. メディアや政官界への提言活動

私達の目指す理念と活動方針に賛同する団体と協力し、水平的なネットワークを結んでメディアや政官界への提言活動を行いました。

4. 講師派遣や見学会による理解活動

国が推進する原子力の理解活動などを支援し、求めに応じて講師派遣や原子力関連施設の見学会を企画し、理解の推進に努めてきました。

III. 新しい活動の展開に向けて

SNWがスタートして12年が経過しました。この間、2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所の震災・津波事故で地域が壊滅的打撃を受け、脱原発の風潮が高まりました。とはいえ、我が国の原子力の必要性が減少したわけではありません。一部に脱原発を決めた国もありますが、世界では途上国を中心に旺盛な導入計画を進めています。

我が国にも脱原発を主張するグループもありますが、その一方、S(安全性向上)+3E(供給安定性、経済性、環境適合性)を基軸としたエネルギー選択の必要性があらためて認識されるようになりました。これを受けて政府はこの度第5次エネルギー基本計画を策定しました。この計画では2050年に向けて、原子力は安全性を大前提に安定的に寄与する重要な脱炭素化電源としての寄与を期待しています。一方、変動型再生可能エネルギー(太陽光と風力)を経済的に自立した脱炭素化主力電源とすることを目指しています。これには多くの課題が残されているものの、長き将来にわたるエネルギー問題を考えると環境負荷の少ない再生可能エネルギーと原子力の組み合わせは必然的な帰結です。

そのためには原子力に関する社会の理解活動が不可欠であり、我々SNWの役割はより一層重要になると考えて以下の活動を展開したいと考えています。

1. 対話活動

いままでも原子力系、技術系学生に対して、日本のエネルギー事業、原子力事業の推進役としての活躍を願い、また国家百年の計として教員養成系や文系、女子大の学生諸君に対しても対話活動を進めてきました。この間、2016年には対話活動10周年を迎え、2017年春の年会で10年を総括した報告を行いました¹⁾。またSNW東北も発足10周年記念シンポジウムを実施(2018年6月9日)、東北地区対話会10年の歩みを報告しました²⁾。

今後はさらに学生の指導にあたる先生方に対しても、生徒の指導と一緒に考える勉強会を通して、次世代の若者の育成を支援して行きたいと思っています。その最初の試みとして、鹿児島県の社会科を元気にする会と合同で勉強会を実施し、その成果は日本エネルギー環境教育学会で報告しました(2017年1月22日と11月25日)³⁾。今後はこのようなネットワークを拡げたいと考えています。

2. 意見・提言活動

専門家はもっと情報を発信すべしとの多くのご意見をいただいています。例えば報道が原子力発電の恐ろしさだけを解説し、安全対策の向上や、エネルギー問題の本質に触れないような場合その不公正を正すのみならず、一般の方々がどのように理解するかという視点で我々は意見を述べ、問題点を指摘してゆく必要があります。このような問題指摘に際しては、理念と活動方針を共にする当該分野の他団体とも協力して提言活動を拡げてゆきます。

3. 社会の理解促進活動

先に述べた通り、2050年に向けて長期に安定して持続的、且つ自立した我が国のエネルギー供給の指針が示されました。そこでは再生可能エネルギーに対して大きな期待が述べられていますが、いまだ実効的な道筋が示されているわけではありません。我々は、再生可能エネルギー、化石燃料によるエネルギーも含めて、エネルギー安全保障、経済、環境の観点からどのような道を歩むべきかを検討し、その内容を広く世の中に問う必要があると思っています。今まで原子力の視点から公開シンポジウムを行ってきましたが、環境派、再生可能エネルギー派の方々とも同じテーブルについて議論し、これからの道筋策定の一助とする必要があると考えています。また、従来からの見学会などによる理解活動、草の根運動などへの講師派遣を引き続き行ってゆきます。

IV. 今後の課題

1. 熱心な先生方との連携

我が国のエネルギー問題に関心が高く、且つ学生達に分析的思考や俯瞰的視野で冷静に考えさせようとする熱心な先生方が居られることが大きな継続要因です。

SNWは学校側のニーズに柔軟かつ機動的に対応することが常に求められます。先生方との緊密な連携が対話会活動継続の上で重要と考えていますが、先生方にも異動があることから不断の関係継続に努め発展させる努力が必要です。

2. メンバーの見識、使命感、情熱の維持向上

自身の知見と経験を活かしつつ上記の先生方の要請に応じて、学生達や一般の方々との対話に情熱と意欲と使命感を持つシニア有志の存在が不可欠です。対話会活動の品質は、シニアの見識と対話会現場での力量発揮にかかっています。活動のレベルを維持向上しながら、シニアも拡大して行きたいと思っています。

3. 協賛団体との共働

SNWの基幹事業(対話活動、意見・提言活動、社会の理解促進活動)の意義を深く理解し、篤く支援していただく協賛団体の存在なしには活動の継続はありません。協賛団体との日常の意思疎通を通して要望を的確に反映した活動を心掛けることが肝要と認識しています。

4. 持続性ある活動基盤の強化

SNWの活動は学会のご理解とご支援を受けながら、共感を持つシニア有志達のボランティア精神で支えています。東京電力福島第一原子力発電所事故以降の原子力忌避の風潮を払拭し、向上した安全性のもとに原子力エネルギーを活用していくためには、この活動組織や制度などの基盤も強化する必要があります。国が推進する原子力理解活動や協賛団体の活動に協力しつつ、活動の持続に努める所存でおります。

— 参考文献 —

- 1) 学生とシニアの対話10年を振り返って、松永一郎(2017年春の年会、2017年3月29日)。
- 2) Milestone of SNW東北(シニアネットワーク東北10年の歩み(2018年6月9日))。
- 3) エネルギー・原子力に関する小中高教員とシニアの対話会、若杉和彦、工藤和彦、山下信久、日本エネルギー環境教育学会第13回全国大会(2018年8月8日)。

著者紹介



石井正則 (いしい・まさのり)
シニアネット連絡会 会長



早野陸彦 (はやの・むつひこ)
シニアネット連絡会 代表幹事

これまでをふりかえり、今後を展望する(核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会)

3S の協働プラットフォームとしての原子力学会への期待

Expectations towards AESJ as a Cooperation Platform of “3S”

宇根崎 博信
Hironobu Unesaki

KEYWORDS: nuclear safety, security, nonproliferation, safeguards, 3S

はじめに：原子力安全の3Sについて

原子力の安全は、工学的な安全、核セキュリティ、核不拡散・保障措置の3本柱(以降、「3S」という。)から成り立っており、どの「柱」が欠けても原子力安全はその礎から崩れ去ってしまうことは言うまでもないであろう。

この点において、これまでの原子力学会の状況や動向を振り返ってみると、3Sのうち、核セキュリティと核不拡散・保障措置に係る学術活動への総合的な取り組みは必ずしも古くから充実していたとはいえず(このことは当連絡会が発足した大きなきっかけでもあったと認識している)、この方面での本格的な取り組みがなされるに至ったのは、特に平成に入ってから大きな動き、すなわち、原子力に関連する社会科学分野の重要性の認識の高まりを受けた原子力学会の姿勢の変化と、その中で社会科学と自然科学との接点の好事例としての核セキュリティと核不拡散・保障措置の認識があると考えている。

このような経緯を踏まえ、本稿では、創立60周年を迎えて、原子力学会の将来を考える上で、3Sと原子力学会とのかかわりという視点に立って、当連絡会が関係する研究開発分野として、近年研究開発が急伸しているセキュリティ分野の動向について紹介するとともに、3Sの協働プラットフォームとしての原子力学会への期待と要望を私見として述べたく思う。

社会情勢の変化と3S：セキュリティを例にとって

本稿を執筆している60年前、原子力学会が設立されたのとはほぼ同時期の1952年に東京国際空港が、1958年に大阪空港(現在の大阪国際空港)が開港(正確には米国からの返還後の再開港)していることをも踏まえ、我々の最も身近にある「セキュリティ」として、空港におけるセキュリティ措置の変遷を例にとって、3Sのうちのセキュリティについて考察してみたい。

極めて単純な整理をすると、航空安全の世界では、近年の社会情勢の変化を踏まえ、セキュリティ面での脅威

の想定が従前の(単純な)ハイジャックから広域な物理的・社会的被害を生じうる組織的なテロ行為へと格上げされているといえる。

これを受けて、セキュリティ措置の面でも、従前のX線透過法による手荷物検査と金属探知機によるボディチェックから、いわゆるボディースキャナーや3D手荷物検査システムなど、後方X線散乱やミリ波技術を採用したより高度な検知装置が導入されると共に、多重の本人確認、なりすましや不正な荷物持ち込み防止のための動線管理などのソフト的防護措置が強化されているのは周知の事実であろう。60年前のセキュリティ措置が全く通用しないのが現状である。

このような流れは、原子力安全の世界のうちの核セキュリティや核不拡散・保障措置においても全く同様であり、特にこの10数年、社会情勢の変化を受けた想定脅威の変化と、それに対応するための制度的・技術的措置の改革と高度化、そして、そのニーズを受けた技術開発の進展が目覚ましい。技術面では、核物質検知における小型加速器技術の応用や放射線検出システムの高度化¹⁾、核鑑識(nuclear forensics)における物質分析技術の高度化や画像処理技術の応用²⁾など、学際的かつ横断的な取り組みがなされている。また、制度面においても、内部脅威者(インサイダー)に対する規制上の対策としての信頼性確認制度の導入や情報管理・鍵管理措置の強化、原子力施設のデジタル化の進展を踏まえたサイバーセキュリティへの対応の強化など、社会的・技術的な変革、進展を踏まえた制度強化が進められている。

このように、核セキュリティと核不拡散・保障措置は、工学的な安全に対するものと同様もしくはそれ以上に社会的な要請を踏まえた早いペースでの変革が要求されるものであり、それに呼応して関連する技術を開発して適時に社会にインプリメントすることが要求される分野であるといえよう。この点は、社会と科学技術のインターアクションの好事例として、これからの原子力研究の中での進展を一層期待したく考えるものであり、当連絡会としても、魅力ある横断的な分野として、関連する研究分野の諸氏、特に学生諸君や若手研究者諸氏に対して積

極的にアピールしていきたく考えている次第である。

3S 間の対話と協働：アカデミア、そして原子力学会のあるべき姿とは？

前節で、社会と科学技術とのインターアクションという点からセキュリティや核不拡散・保障措置技術について述べたが、ここで話を原子力安全における3Sの協働という包括的なテーマに戻そう。3Sの協働は原子力安全を確保する上での根本的な要求であるが、現状はどのようなものであるのか。規制面での動きについて述べた後に、アカデミアと原子力学会における今後のあるべき姿について考察したい。

規制面における3Sの協働については、IAEAが中心となって実施する国の原子力規制に対する国際的なレビュー活動であるIRRS(Integrated Regulatory Review Service: 総合規制評価サービス)の中で、2016年に発表された勧告³⁾においても、我が国の原子力安全規制に対し、原子力安全とセキュリティ(注:ここでいう「セキュリティ」は、核セキュリティと核不拡散・保障措置を含む、いわば広義のセキュリティと解釈する)に対する規制がより一層統合された形で行えるような仕組みを構築することが提言されている。この勧告を受けて、原子力規制庁においては、新たな取り組みとして、事業者の安全管理・保安活動における3Sの相互作用についての検証が始められている。すなわち、ある「S」に対する保安活動がその他の「S」に対して及ぼす影響をこれまで以上に詳しく評価し、悪影響を及ぼす可能性を排除することにより、より一体化した原子力安全を確保するという流れを構築するべく、事業者における状況の調査や、現在構築中の新検査制度におけるセキュリティ関連検査の統合などのアクションが進められている。原子力安全をより包括的な視点からとらえることの重要度が認識されてきた、ということであるが、この背景には、それぞれの「S」を管理している者(事業者側、規制側の双方とも)の間での対話・情報共有・意思疎通が必ずしも十分であったとは言えないことが顕在化してきたことが大きいものと認識している。

このような動向をアカデミアの世界に照らし合わせ、アカデミアにおける3Sの協働についても、より深い視点から考えていくことが、これからの原子力学会(および学会員)の活動においてもより一層重要となるものであると考える。この礎となるものとして、現在進められているセーフティとセキュリティのシナジーに関す

る検討の成果をふまえ、これからは、

- ・ 3Sが協働することによって、学術的な面で原子力安全をより強固にするための方策は何か、
- ・ そのための3Sの間における対話・情報共有・意思疎通が十分であるかどうか、

という点について、より具体的な議論を深めるという取り組みが重要かつ必要であると考えられる。

そして、3Sに対する規制側の認識の変化というイナーシャをも踏まえ、アカデミアにおける3Sの協働という意識を学会員の間で広く共有し、3Sに関する技術面・制度面での学術的な取り組みを協働して進展させるためのプラットフォームとして、原子力学会の役割は今後もますます重要となることと考える次第である。

おわりに

原子力の安全を技術的・制度的に確固たるものとする、そのための学術的な対話の場を提供すること、そしてその成果を社会に発信してアカデミアと社会とを繋ぐことが原子力学会の使命である。その中で、激動する社会情勢の変革を適時にとらえ、原子力安全をより幅広い視点から議論し、原子力の平和利用を学術的に支える礎を強固なものとする、そのための3Sの協働のためのプラットフォームとして原子力学会が果たすべき役割は大きい。今後の原子力学会の持続的発展の上でも、本稿で述べた考えが広く共有され、進展していくことを強く期待したい。

参考文献

- 1) H. Ohgaki et al., "Nondestructive Inspection System for Special Nuclear Material using Inertial Electrostatic Confinement Fusion Neutrons and Laser Compton Scattering Gamma Rays", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 64, Issue 7, pp. 1635-1640 (2017).
- 2) 大久保他, "核鑑識研究開発成果報告書", JAEA-Technology 2015-001 (2016).
- 3) "Report of the Integrated Regulatory Review Service (IRRS) Mission to Japan", IAEA-NS-IRRS-2016, IAEA (2016).

著者紹介



宇根崎博信 (うねさき・ひろのぶ)

京都大学 複合原子力科学研究所, 大学院
エネルギー科学研究科
核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡
会会長

これまでをふりかえり、今後を展望する(倫理委員会)

倫理委員会を持たない倫理的な学会を目指して

Let's aim at AESJ without Ethics Committee

大場 恭子

Kyoko Oba

KEYWORDS: *Ethics Committee, Code of Ethics, Academic Society*

はじめに

倫理委員会は、2001年12月に日本原子力学会倫理規程(以下、「倫理規程」)¹⁾が制定されたことを受け、学会員が倫理規程の精神を理解し、倫理規程に則った行動をとることを目的とした常置委員会として設置された委員会である。よって、学会60年の中で倫理委員会が存在しているのは近年の18年弱ということになる。

では、倫理委員会がなかった(倫理委員会が設置されるまでの)42年強は、日本原子力学会(以下、「原子力学会」)あるいは原子力学会会員(以下、「会員」)は、倫理的ではなかったのだろうか。もちろん、そんなことはない。だが、1998年に起きた使用済み燃料輸送容器データ改ざん問題の調査検討委員会の報告書²⁾では、「企業および技術者のモラルの確立」が大きく取り上げられた。また、原子力学会として倫理規程制定を目指した準備会を開催した当日には、JCO臨界事故も起きた。他の学会の動きの影響もあるが、原子力の業界の中で起きたいくつかの不祥事が、倫理規程あるいは倫理委員会の設置のきっかけになっている。

しかし、倫理規程が制定され、倫理委員会が設置されたことによって、原子力学会の活動、あるいは学会会員は、それ以前に比べ、あるいは、もし倫理規程や倫理委員会がなかった場合に比べ、倫理的な行動を取れるようになったのであろうか。存在してしまっている以上、それがなかったという仮定の結果を知るすべはないが、私の考えは、倫理規程や倫理委員会がなかったとしても、そう違わないのではないかと思う。であれば、なぜ原子力学会に倫理規程や倫理委員会は必要なのであろうか。

倫理規程と倫理委員会の存在意義

実は、倫理規程によって、事故が防げるのか?といった類の問いは、原子力学会が倫理規程を制定しようという動きの中で、すでに複数投げかけられ、倫理規定制定委員が回答している³⁾。以下に、いただいたご意見とその回答を2組抜粋する(注釈:倫理規程が制定されるまで、原子力学会では「倫理規定」と表記している)。

■いただいたご意見(A)

(省略)事故は防げるのか? (省略)

□いただいたご意見(A)への倫理規定制定委員会の回答

倫理規定さえできれば事故が減るとは考えておりません。(省略)しかし、(省略)倫理的問題が発生する前に適切な判断ができる能力を身に付けるべく、専門家は倫理の問題について考える習慣をつけるべきだと考えます。

■いただいたご意見(B)

このような規定ができたとしても、事故はほとんど減らないし(皆無とは言いません)、企業活動の本質は変わらないと思われれます。むしろ、事故を起こした時、当事者への詰問のための根拠、学会のいいわけを作るにすぎない。(省略)倫理規定によって事故が減る、安全性が増すなどと考えることはおこがましい。(省略)

□いただいたご意見(B)への倫理規定制定委員会の回答

倫理規定さえできれば事故が減るとは考えておりません。技術や組織等の問題がより大きいことも指摘の通りです。ただ、倫理について深く考えなかったために倫理上の問題を引き起こすということもありえます。その意味で技術者は倫理の問題について考える習慣をつけるべきだと考えます。

このように、倫理規定制定委員会は繰り返し「倫理規定さえできれば事故が減るとは考えておりません。」と述べている。そして、私自身もその回答をその通りと考える。だが、原子力学会にある倫理規程や倫理委員会の存在の意義はどのように考えればよいのだろうか。

福島第一原子力発電所事故後の議論

倫理規程が制定され、倫理委員会が設置された以降も、会員(賛助会員を含む)が関係する事故やトラブルは複数起きており、倫理委員会としては、時にそれらに対する意見表明も行ってきた⁵⁾。しかし、倫理委員会内でもっとも議論等に時間を費やした事故は、東京電力(株)福島第一原子力発電所事故(以下、「1F事故」)である。

インターネットでは、ドイツにおける原子力利用の社会的側面について議論をした「エネルギー供給に関する倫理委員会」と比較されることもあり困ったが、1F事故

は、間違いなく日本が原子力技術を導入していなかったら起きなかった事故であり、原子力技術の導入是非について議論されることは致し方ない。また、1F事故の起きた当時の倫理規程の前文には、「原子力が人類に著しい利益をもたらすとともに、大きな災禍をも招く可能性があることを我々は常に深く認識し、(省略)」⁴⁾という文章もあった。この文章は、私が初めて倫理規定案を見た時から存在しており、私自身とても強く印象が残った文章であると同時に、制定後の改訂中には、「この技術に携わることに誇りをもつための倫理規程であるにも係わらず、最初に携わる技術が“大きな災禍をも招く可能性がある”と記すのはいかななものか」というご意見をいただいたこともありながら、残してきた文章である。しかし、当時から倫理委員であった私は、この文章を読みながらも、日本国内でこれだけ多くの方の生活や人生をかえる事故が起きることを考えられなかった。そんな自身の認識や覚悟の甘さを痛感しながら、倫理委員会内では、倫理規程や倫理委員会の意義を含め、議論を重ねた。

それらを経た今、私自身の考える倫理規程や倫理委員会の意義は、「倫理規程は、“安全のために考えなければいけない事項”をまとめたものであり、倫理委員会は、会員が倫理規程にて挙げている事項すべてに目配りできる(逆にいうならば、一つの条項の順守にこだわり、より大切な条項を見落とすことを防ぐ)ことによって、真剣に安全について取り組んでいる会員が、常に広い視野を持って、より高い安全を実現できるようにする活動を展開する」である。

だが、ここでまた疑問が生じる。倫理規程や倫理委員会は、「原子力学会」が制定し、設置すべきであろうか。

学会の倫理委員会の限界

1F事故後に倫理委員会内で行った、倫理規程や倫理委員会の意義を含め、議論でも、「学会という組織の特徴と、個人と所属組織の係わり合い」はひとつの大きなテーマであった。具体的にいえば、「会員は原子力学会所属意識をどれくらいもっているのか」「原子力学会あるいは会員にとって、倫理規程や倫理委員会が存在することはどの程度どのような意味があるのか」「会員の所属組織(給与を得ている組織)以外の倫理規程がどの程度影響をもつのか」等々である。

原子力学会の会員には、所属組織がない方もいらっしゃる、あるいは所属組織があっても、その組織が倫理規程を持っていない場合もある。各組織がどのような倫理規程をもつべきか、現在の倫理規程は適切なのかといった検討にも、倫理規程は役立つであろう。このように考えると、学会が倫理規程を持つことに意義はある。さらに、倫理規程を軸として、さまざまな会員の共通する悩みを吸い上げ、議論する場の設定等、学会の中に規程の浸透を担う組織がある意義は大きい。

しかし、いかなる学会の倫理規程も倫理委員会の活動も、多くの会員の「所属組織」の活動を越える影響はないのではないだろうか。倫理規程では、憲章にて組織文化の醸成を謳っているが、原子力技術に携わっている組織それぞれが、なぜ倫理規程が必要なのか。なぜ倫理の活動が必要なのか。ということに向き合い、検討し、それらに人や労力を割くことを是とするならば、より高い安全を実現できる倫理的な行動が生まれると考える。

結語

原子力学会が倫理規程や倫理委員会をもつ意義やそれに対する疑問を述べてきたが、私は、今の倫理規程や倫理委員会が不要であると思っているわけではない。倫理規程に対しても、自分自身が倫理委員であることにも誇りをもっている。また、学会の倫理委員会だからこその活動があるとも思っている。しかし、一度作った組織は、その後もずっと存在しないといけないわけではない。また、倫理規程や倫理委員会がなければ倫理的ではないという指摘も違うと思う。

これからの社会は、たとえばAIの著しい進歩によって、人の役目が「失敗しながら未来を創ること」になるのではないかと考えたりもするが、そのような新しい社会での倫理を考えるには、学会のような複数の組織や専門をもつ者が一堂に会し議論できる組織に倫理委員会があることが必要にも思う。しかしながら、会員の所属組織が適切な倫理活動を行うことを前提に、学会がそれらの組織と連携を深めることで、倫理委員会がなくても、倫理的であると社会が認める学会となり得ることは可能と考える。是非、倫理委員会ありきではなく、より自由に原子力界における倫理活動の在り方を、多くの方と考えたい。

参考文献

- 1) 日本原子力学会倫理規程。
http://www.aesj.or.jp/ethics/02_/02_02_/
 - 2) 使用済み燃料輸送容器調査検討委員会：使用済み燃料輸送容器のデータ問題について、2002年12月3日。
 - 3) 倫理規程の意義等に関して
<http://www.aesj.or.jp/ethics/document/pdf/rinrikitei/igi.pdf>
 - 4) 日本原子力学会倫理規程(2009年版)：
<http://www.aesj.or.jp/ethics/document/pdf/code/code2009.pdf>
 - 5) 日本原子力学会倫理委員会「意見表明」：
http://www.aesj.or.jp/ethics/03_/03_051_/
- ※ URLの閲覧日は、すべて2018年9月30日である

著者紹介



大場恭子(おおば・きょうこ)
倫理委員会委員長

これまでをふりかえり、今後を展望する(ダイバーシティ推進委員会)

こたえはダイバーシティと共にある

The Answer is Blowing with Diversity

岡田 往子

Yukiko Okada

KEYWORDS: Diversity, Humanity, Inclusion, Ukichiro NAKAYA, Ethics of Nuclear Energy

原子力学会のダイバーシティはいつから？

ダイバーシティ推進委員会(以下、本委員会という)は2003年1月の男女共同参画ワーキンググループを経て2007年に男女共同参画委員会に昇格、さらに2017年に名称を変更して現在に至る。その背景には、男女共同参画の実現が21世紀の日本社会の最重要課題とした1999年6月の「男女共同参画社会基本法」、翌年の「男女共同参画基本計画」の閣議決定がある。また、日本学術会議からは「女性科学者の環境改善の具体的措置について」(要望)および「日本学術会議における男女共同参画の推進について」(声明)が採択され、応用物理学会、日本化学会、日本物理学会などが中心となり理工学系学協会に呼びかけ、2002年に12学協会、計29名の参加の下、男女共同参画学協会連絡会(以下学協会連絡会)が発足した。

本委員会も学協会連絡会設立の初期から、積極的に参加・活動しており現在も協働している。学協会連絡会が目指しているものは「学協会間での連携協力を行いながら、科学技術の分野において、女性と男性がともに個性と能力を発揮できる環境づくりとネットワーク作り」である。わが国の研究者に占める女性割合は15.7%との国際比較で世界29位であり、先進国の多くは30%以上である¹⁾ことから見ても、如何に研究分野で女性の知が使われていないかがわかる。さらに国別ジェンダーギャップ(男女格差)指数²⁾においては2017年の調査で114位であり、内訳として政治参画(123位)、経済参画(114位)、教育(74位)、健康(1位)で男女格差が大きいことがわかる。学協会連絡会はこうした状況を受け、女性研究者が能力を発揮できる環境づくりのために、実態調査として大規模アンケートをこれまでに4回実施し提言要望書にまとめ、国の機関に提出している。

原子力と人間性

では、原子力においてダイバーシティを考える意義とは何だろうか。生物学者福岡伸一氏が中谷宇吉郎博士の随筆を編集した『科学以前の心³⁾』の中に原子力について書かれている部分がある。中谷博士は世界初の人工雪

製作に成功し、低温科学に大きな業績を残した先生であり、名随筆家でも有名である。中谷博士は1962年の随筆「機械の心」で、当時の科学的話題の「最大の花形」として、原子力を挙げている。とはいえ、福岡氏によると原子力という言葉を使うことはあっても、その是非のクリティカルな議論はされていない。

しかし、それ以前の1950年に執筆した「未来の足音」の文章に興味深い記述がある。「原子力の解放が、人類の文化の滅亡を来すか、地上に天国を築くか、それは目の前に迫った問題である。そして、それを決定するのは科学ではなく、人間性である。人類の総数の半ばを占め、その上子供を味方にもっている婦人たちが、この問題について割り当てられた任務は、かなり重いといっている。中谷博士の「人間性」とはなんだろうか。

生命科学者の中村桂子氏の著書「科学者が人間であること⁴⁾」の小見出し「生きものであることを忘れた人間」には次のように書かれている。「まず、一人一人が「自分は生きものである」という感覚を持つことから始め、その視点から近代文明を転換する切り口を見つけ、少しずつ生き方を変え、社会を変えていきませんか」と呼び掛ける。私たちが生きている現代社会はあらゆる問題を抱えている。中村氏は「全否定は解決につながりません。事故を機に原発への不信が芽生えたからといって、原子力発電という一つの技術を否定すれば解決するものではないのです。むしろ科学・科学技術に関わる人のありよう、現代社会の科学・科学技術の受けとめ方など、より広く、より深い課題があることを考えなければなりません。原子力発電だけでなくすべての科学技術に存在する問題なのです。」と書いている。

中谷博士も中村氏も「人間」に問いかけている。さらに、中谷博士は科学とは「考えること」と言っている。多様な研究者や技術者が生きものであることを意識し、考え合うことが、個々の人間性につながっていくのではないかと思う。中谷博士が女性の任務の重要性は、単に子

育ての役目だけではなく、女性が持っている才能として人間の本質を作る部分に多くかかわっていることを重視してのことではないか。

より深い課題に取り組みなければならない現代社会において「自分は生きもの」であること感覚を組織の中に持ち込むには価値観の異なる多様な人材や女性の知は大きな役目を担うのではないかと私は思う。

なぜ、ダイバーシティを推進？

多様性という概念は、生物種が環境変化に適応して生き延びていくには画一的な集団よりも多様性をもった集団の方が有利だという考え方から始まっている。この考え方が、社会でも広がっていった。21世紀のグローバル化の進展に伴い、属性、民族、宗教などにより思想や価値観などの多様性が認識されはじめた。日本でも多くの企業において社内における個人や集団の多様性が企業の収益や発展に貢献することが言われ始め、制度や環境づくりへの取り組みが進められている。そして今、問われているのは、女性に限らず、障がい者や外国人、セクシャルマイノリティなどダイバーシティをどのように定着発展させるかである。多様な人材が集まっても、組織の内部でメンバー同士が認め合い、受け入れあう風土がなければ定着は難しい。

聖徳太子の十七条憲法の第十条を紹介したい。読み下しに「十に曰わく、忿(こころのいかり)を絶ち瞋(おもてのいかり)を棄て、人の違を怒らざれ。人みな心あり、心おのおの執るところあり。彼是とすれば則ちわれは非とす。われ是とすれば則ち彼は非とす。われ必ず聖なるにあらず。彼必ず愚なるにあらず。共にこれ凡夫のみ。是非の理なんぞよく定むべき。相共に賢愚なること鑽の端(はし)なきがごとし。ここをもって、かの人瞋ると雖も、かえってわが失を恐れよ。われ独り得たりと雖も、衆に従いて同じく挙げ」と書かれている。この中で特にダイバーシティとして注視すべきことは、「現代語訳：人それぞれに考えがあり、それぞれに自分がこれだと思ふことがある。相手がこれこそといっても自分はよくないと思ふし、自分がこれこそと思つても相手はよくないとする。自分はかならず聖人で、相手がかならず愚かだというわけではない。皆ともに凡人なのだ。そもそもこれがよいとかよくないとか、だれがさだめうるのだろうか。おたがいだれも賢くもあり愚かでもある」のところである。ここでは傲慢にならず、違うことで人を見下さず、常に謙虚さをもって物事を考え、人に接しているかを私たちに問うているのではないか。

先日、日本学術会議男女共同参画分科会主催のシンポジウムを傍聴した。そのなかで語られた用語を一部紹介すると「従属者を生み出す要因は監視、バッファー、役割モデルの欠如」「幼稚な人が権力を握っている」「人間同士が尊敬し合う社会」「真つ当な議論できているか」「傲慢症

候群」「自分たちに内在しているリスクを自覚自制する必要性」「言ってみて議論することの出来る社会の実現」「自分を律する」「謙虚さ」などである。私たち自身にこれらの言葉を置き換えることができるだろうか。ダイバーシティの問題は単に女性や障がい者や外国人、セクシャルマイノリティを尊重し、環境を整えることだけではない。同時にそういう環境を享受できる人間を育てることにある。3.11以降に一般の人たちに映しだされ、作られた原子力研究者・技術者のイメージは、組織のしがらみの中で、知らず知らず容認してきたことから派生する風土から作られたものかもしれない。こういった風土を見つめなおすためにも、今まで育ててこなかった新たな種が必要なのではないかと私は思う。それがダイバーシティの必要性だと思う。

ダイバーシティ推進のための インクルージョン

ダイバーシティの定着発展には、多様な人材がお互いを認め合い、受け入れ合う機会や風土を生み出す「インクルージョン」の取り組みが不可欠と言われている。多くの課題を抱えている現代社会において、組織が真剣に取り組むには、組織としての理念とビジョンが極めて重要である。本委員会はその組織の理念とビジョンの下、多様な人を享受できる風土をつくるインクルージョンの取り組みを推進していくのが良いと思う。日本社会全体も科学技術分野もすべての分野でダイバーシティは進んでいない。本学会がその先鋒となり推進することは、今後の科学技術および科学技術者への不信をも払拭することにつながるはずだ。ダイバーシティを一義的な紋切型の対応で終わらせるのではなく、議論のうねりの中においていくことだ。一昨年のノーベル文学賞のボブ・ディランではないが、「こたえはダイバーシティという風と共にある。」

— 参考文献 —

- 1) 男女共同参画白書 2018年版 内閣府男女共同参画局
http://www.gender.go.jp/about_danjo/whitepaper/index.html
- 2) GGI(Global Gender Gap Report 2017)
http://www.gender.go.jp/link/public_olink/olink_kyodosan_kaku_201801_01.html
- 3) 科学以前の心：中谷宇吉郎、福島真一編、河出文庫 2013.
- 4) 科学者が人間であること：中村桂子、岩波新書、2013.

著者紹介

岡田往子（おかだ・ゆきこ）
東京都市大学工学部原子力研究所



これまでをふりかえり、今後を展望する(編集委員会(学会誌))

スコープを拡大し、読みやすさを追求してきた AESJ expanded its scope and pursued readability

佐田 務
Tsutomu Sata

KEYWORDS: AESJ, *Atomos*, *scope*, *readability*, *Fukushima daiichi accident*, *integration of knowledge*, *values and deliberation*

2001 年から、学会誌は大きく変化

原子力学会が現在、定期的に行っている主な刊行物は原子力学会誌アトモス、英文論文誌、和文論文誌の3誌である。このうち原子力学会誌アトモスは月刊で、発行部数は約7千部。その主要記事は1ヵ月後にHPに公開¹⁾しており、1959年の創刊号から現在までの本誌のほぼ全文については半年後にJ-STAGE²⁾上で全面公開すべく登載作業を行っている。英文論文誌は月刊で、和文論文誌は季刊で発行。両論文誌はともにすべて電子化されて全面公開^{3, 4)}されている。

なお、日本原子力学会は1959年に創立され、原子力学会誌も同年に創刊された(=表紙と目次は下記)。

その原子力学会誌は2001年まで、現在のアトモスと和文論文誌とが合体した形で発行されていた。内容は学術的色彩が強く、学会の行事や技術報告、研究論文が主だった。

その後、原子力学会理事会は、「より読まれるための学会誌」をめざして、そのための改革を編集委員会に依頼する。これを受けて編集委員会は他の学会の編集責任者

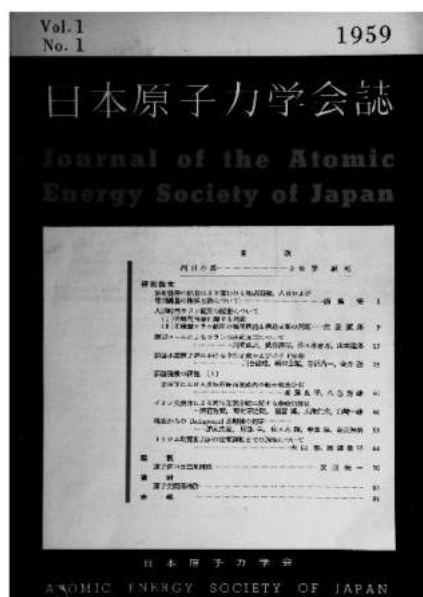
と面談するなどの情報収集と検討を実施し、2002年から原子力学会誌と和文論文誌を分けること、原子力学会誌では時事的な要素を取り入れることとし、時事的な要素をより、取り入れることとした。

論文誌から記事主体のジャーナルへ

学会誌編集委員会ではその後も、紙面刷新を続けた。その最も大きなことからは、主要な内容を従来の「論文」ではなく、通常の雑誌と同様の「記事」をめざしたことにある。「記事」と「論文」の違いは、読者にとっての「読みやすさ」の違いに尽きる。

通常の論文の場合、その構成は研究の意図や経緯を紹介する「はじめに」で始まり、研究の成果が時系列的に紹介されて、最後に結論が導かれる。いわば起承転結型でストーリーが展開される。

一方の記事の場合、冒頭にその内容の最も重要なことからあるいはその要約が紹介される。つまり、起承転結の「結」が最初に来る。新聞やニュースはこの形態をとっており、最初に重要なことがらをまず紹介し、その後経緯や背景や詳細が順次、追記されていく。なお、各大



目次	
創刊の辞	会長 藤 誠 司
研究論文	
放射性塵の拡散により覆われる地表面積、人口および集団線量の推定方法について	西 脇 安 1
人形峠型ウラン鉱床の探査について	
(I) 基盤花崗岩に関する問題	
(II) 堆積型ウラン鉱床の堆積構造と構造支配の問題	佐 藤 源 郎 9
筒型ロールによるウランの圧延加工について	川崎正之, 武谷清昭, 佐々木吉方, 山本達郎 19
沸騰水型原子炉における中性子束およびボイド分布	川台敏雄, 新井公雄, 寺沢昌一, 金井 務 28
沸騰現象の研究 (I)	
常圧下における多相形断面流路内の転流密度分布	斎 藤 良 平, 八 巻 秀 雄 40
イオン交換体による同位元素分離に関する基礎的知見	垣花秀武, 野村昭之助, 福富 博, 大滝仁志, 山崎一雄 46
地表からの Background 放射線の測定	道家忠義, 服部 亨, 佐々木 誠, 中本 淳, 高見保清 53
トリウム均質動力炉の定常運転までの過程について	大山 彰, 清 瀬 量 平 64
総 説	
原子炉の自己制御性	武 田 栄 一 70
素 料	
原子力関係特許	82
会 誌	85

学や研究機関における研究成果の発表の内容やプレスリリースも近年、これと同様の傾向へ変化しつつある。

そのほかに学会誌では、構成自体も刷新してきた。時事的なテーマを取り上げた特集や座談会の記事掲載、社会的な視点からとらえた記事の増加、記事のあらましを説明したカラー目次の導入、巻頭言に次ぐ時論の新設、ダイバーシティを意識したコラムの新設、表紙の刷新、アンケートの実施などがそれである。

1F 事故後はスコープを拡大

また、東電福島第一原子力発電所(1F)事故は、この事故を取り巻くさまざまな問題が「原子力」界だけで解決できる話ではなく、多様な「知」を結集させる必要を私たちにまざまざと突きつけた。それに沿って学会誌編集委員会では、原子力そのものが直面している多様な問題を多角的な視点からとらえる特集を数回にわたって企画し掲載してきた。この視点は今も、継続中である。

【至近号の特集の主なもの】

- ・2019年3月 原子力のこれまでとこれから
- ・2017年4月 福島原発事故から6年－各学会の取組
- ・2016年7月 1F事故から5年－原子力学会活動の総括
- ・2016年5月 復興に向けて何をすべきか
- ・2015年3月 原発事故から4年－今問われる知の統合
- ・2014年3月 福島原発事故とその後

未来をどうデザインするか

他方で原子力学会誌あるいは原子力学会がこれから取り組むべき課題は、さまざまに広がりつつある。1F事故関連にしても風評や廃炉に伴う諸問題は、これからの状況の変化に応じてアジェンダが変化しつつある。

そのほかにも低線量放射線の影響、高レベル放射性廃棄物の処分、防災、社会とのコミュニケーション、安全目標やリスクガバナンス、規制緩和やグローバル化、情報化、学のあるべき姿、知の統合などの問題群や技術のオートノミー(自律化)、近代化への問いかけといった構

造的な問題群が控えている。

それらのテーマは「日本や世界が目指す社会のグランドデザインとはどのようなものか。その中で原子力はどうのようにあるべきか」ということに包括できるのかもしれない。

とはいえ、世の中には多様な価値感がひしめきあっている。グランドデザイン一つとっても、それらは事実と人々の価値観の両方を含めた検討が必要となる。合理的な解が一つとは限らない中で、そこではみんなが何とか受け入れ可能な調整を図るしかなく、一筋縄でいく話ではない。とはいえ、原子力分野での議論の行方が、そのような社会の上位目標と合致していくことは、みんなが望むことだろう。

そのために原子力学会誌では、何をすべきか。私たちはその自問をかかえつつ、原子力をめぐるさまざまな各論を取り上げていくとともに、可能な限りメタ的(俯瞰的)な議論や社会構造の変化をも視野に入れた企画に取り組んでいきたいと考えている。

－ 参考資料 －

- 1) 日本原子力学会誌 立ち読みのページ
<http://www.aesj.net/publish/atomos/tachiyomi>
- 2) J-STAGE 日本原子力学会誌
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jaesj1959/-char/ja/>
- 3) Journal of Nuclear Science and Technology
<https://www.tandfonline.com/toc/tnst20/current>
- 4) J-STAGE 日本原子力学会和文論文誌
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/taesj/-char/ja/>

著者紹介



佐田 務(さた・つとむ)

日本原子力研究開発機構 勤務。慶大卒。専門紙記者、内閣府原子力安全委員会技術参与を経て2009年から現職。2013年から本誌編集長。専門は社会学。

これまでをふりかえり、今後を展望する(福島第一原子力発電所廃炉検討委員会)

福島第一原子力発電所廃炉検討委員会の取り組み

Activity for Study Committee on Decommissioning of the Fukushima Daiichi NPP

宮野 廣
Hiroshi Miyano

KEYWORDS: Fukushima-daiichi, Decommissioning, Committee of AESJ, Outcome and Future Contribution

I. はじめに

東日本大震災から8年が経った。

衝撃的な情景と共に原子力発電所の事故の印象が、焼きついて消えないが、そろそろ、しっかりと国のエネルギー問題とこの事故炉の廃炉を、どのように進めて行くべきかの議論に真摯に向き合うべき時期になったと考える。

廃炉の作業では、1号機、2号機、3号機のそれぞれの格納容器内部の映像が得られ、損傷が想像以上に大きく、高い放射線が測定され、かなり厳しい環境にあり、燃料の溶融混合物の取出し作業は容易ではないという状況がわかってきた。

これまでに、廃炉作業での国としての取り組みの方針を定めるロードマップが策定され、それに基づく詳細な技術戦略マップが策定、各年の進捗に合わせた見直しの取り組みも進められるようになった。

各炉内の崩壊熱の除去システムと汚染水の管理システムが定常に動く仕組みが完成し、環境改善と管理は常態化してきた。

格納容器内、炉内に取り残された燃料の溶融混合物(燃料デブリと言う)を取り出し安定な保管状態に持ち込む取り組みによいよ取り掛かる。2019年度内に取り出し方法を確定し、2021年内には取り出しを開始する計画が示された⁵⁾。そこで、福島第一原子力発電所の事故炉の廃炉について、その論点を明確にし、原子力学会としてのこれからの取り組みについてまとめる。

II. 福島第一原子力発電所の状況^{3, 4)}

東京電力福島第一原子力発電所(以下「福島第一」という)の状況を概観する。福島第一の敷地全体の広さは、約350万m²である。東京ドームの75個分である。そこには、原子力発電所が被災した1号機から4号機までの4基と、無事であった5号機6号機がある。1号機から4号機の前には、港湾施設がある。敷地内には多くの処理水と濃縮された放射性物質を含む廃液があり、水を貯めるための、タンク、水槽類が多数設置されている。現在

まで、約100万トンの汚染水が処理され、このタンクに貯蔵、保管されている。

発電所の状況は4号機では、既に、使用済燃料は全数取出され、除染して、解体するまでになった。一般の廃炉の廃止処置を待つみの状態となっている。

1号機から3号機の事故炉の状況は、それぞれの特徴があるが、使用済燃料の取出しはこれからである。各号機とも使用済燃料プールの設置床面など汚染状態が厳しく、取出しに苦労している状況である。床面や使用済燃料プール内に落ちたがれきを取り除き、放射線の防護処置を行うなどの作業を進めた後に取出し作業に取り掛かる計画で、進められている。

一方、各号機の炉内の燃料は、多くが溶融、破損し、一部は炉低部にたまり固まっている状態であるが、多くは、炉低部から高熱の液状となって漏れ出し、フラスコ状の格納容器の底部にある、コンクリートの一部を溶かして、固まった状態となっていると推定されている。各号機の格納容器の底部ベDESTAL内(圧力容器を支持するコンクリート製の円筒状の壁の内側)の状況は、ほぼテレビカメラによる目視での調査がされ、この部位での構造物の損傷状態や低部での水の溜まり具合などが把握されたところである。

III. 福島第一原子力発電所廃炉検討委員会の活動^{1, 2)}

原子力学会では、2011年3月11日の事故後、速やかに事故調査委員会(主査:田中知東大教授)を立ち上げ、事故の原因分析と反省をとりまとめ、事故調査報告書を発刊した。それに基づき体制を整え、長期に取り組む観点から、2014年に「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会」(以下「廃炉委」という)を理事会直結の組織として設置した。

廃炉委の主な目的は、このような福島第一の廃炉に向けての政府および事業者等の活動が、安全、かつ円滑に進められ、地元の復興に結びつくよう、課題の抽出と対応策の検討など、広く学の知恵を集め、それぞれの専門性を生かした活動を行い、有用な提言、提案を提示する

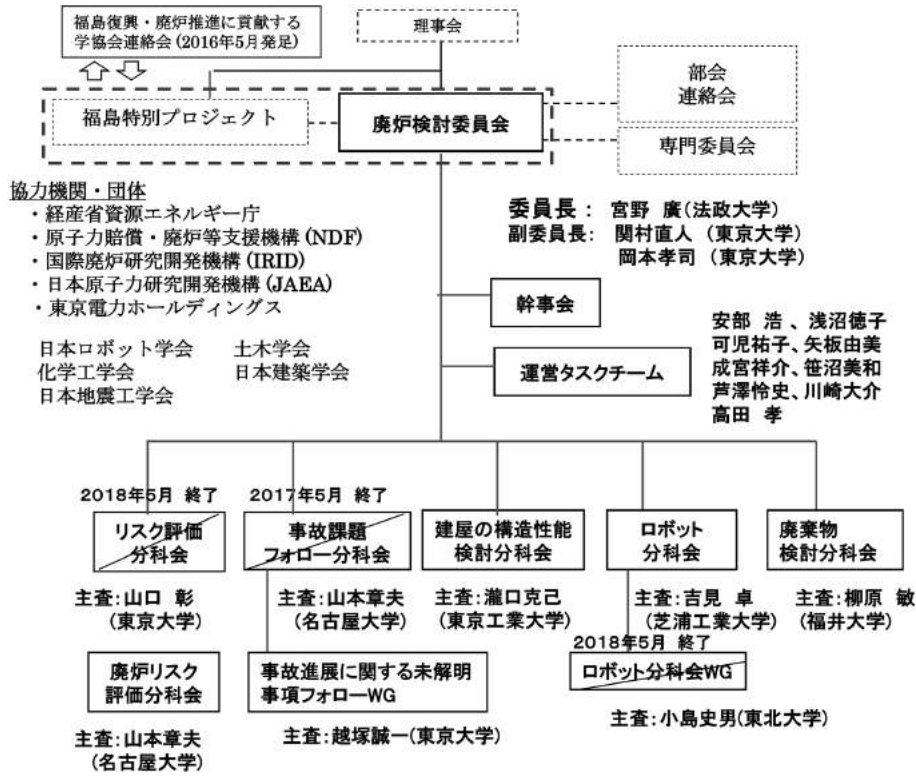


図1 日本原子力学会 東京電力福島第一廃炉検討委員会の体制と学会内外の連携

ことである。

廃炉委では、具体的な課題への取り組みとして、分科会を設置し、活動を加速させてきた。他の学協会の協力を得て、協働し課題の解決に向き合っているところである。各分科会の活動の状況を以下に示す。

①リスク評価分科会－廃炉過程でのリスク要因の分析や評価法の確立のための評価法の検討、②建屋の構造性能検討分科会－建屋の健全性の確認、評価基準の検討、③ロボット分科会－高放射線場であり、かつ手探りの狭隘部での構造物取出しの工法に適用するロボット技術の検討、④事故提言・課題フォロー分科会－燃料の破損過程などの未解決の技術課題の研究に結び付けるための解明事項のまとめ、⑤廃棄物検討分科会－サイトのエンドステート(目標とするサイトの姿)に持って行くための、廃炉の過程で排出される多量の放射性廃棄物の処分法の検討、他の分科会を設置し、専門家による検討の活動を進めてきた。

活動の成果¹⁾は、学会では春の年会、秋の大会に報告、学会員との意見交換を行っている。また、一般に向けては公開文書での公表や毎年春に開催している廃炉委シンポジウムで活動を公開し、廃炉の課題の紹介や学会としての提言を行い、市民、マスコミ、他の専門家の方々の意見交換を進めてきた。

原子力学会では、福島第一の事故の復旧と周辺地域、福島復興の支援を学術界との連携を深めて、学術界全体として成果を上げ貢献するべく、広く学協会に声をかけ多くの学協会の賛同を得て、2016年5月に「福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会」(以下、「学協会連絡会」という)を発足させた。

現在、36団体が参画し、情報の共有と学術支援の協働を進めてきている。今後とも継続して、廃炉委と共に活動を進める。

IV. 福島第一の廃炉事業の課題と学会の貢献

福島第一の廃炉は、国の一大プロジェクトでもあり、東京電力が責任を持って実施していかなければならない事業でもある。しかし、事故の発生はわが国の原子力界の大きな責任でもあると考える。

原子力界(学術界)は、この廃炉の活動に対して、積極的に貢献したいと考えている。これまでの活動の中から、見えてきた課題がいくつかある。以下に、これらの課題を取り上げ、学会としての取り組みについてまとめる。

1. 廃炉の体制とロードマップによる戦略ーリスク低減戦略

福島第一の事故炉の廃炉の作業は、周辺地域の放射性物質による汚染の、除染や、住民の補償を含めて、当面は、国が全体を取りまとめ指揮をしている体制となっている。実際には、組織のトップにNDF(原子力損害賠償・廃炉等支援機構)を置き、研究開発を分担するIRID(国際廃炉研究開発機構)やJAEA(日本原子力研究開発機構)、さらに実行部隊である東京電力ホールディングスの廃炉カンパニー(以下、「東電」という)がある、とい

う体制である。

取り組みの基本方針は、「安全」、「合理的」、「迅速」、「現場志向」として、中長期戦略プランを立てて、それをロードマップの形に見える化を行い、実行管理をしているものとしている。

最も重要な方針が、「リスク低減戦略」である。

それは、様々な放射性物質を特定し、その特徴を捉えて、分析、評価して、優先順位を決めた上で、このリスク低減のための対応を決定する、というものである。これを着実に進めるために、プロジェクトリスクを特定して、適切に管理する方法であり、これらの計画を社会と共有して、協働で廃炉を進める考えである。

以下、廃炉事業のプロジェクトにおける課題とその対応について案を示す。

2. プロジェクトの課題

その1：研究・技術開発

わが国の原子力発電の推進と原子力安全規制を行ってきた国、福島第一の事業責任者である東京電力、各原子力発電技術を担ってきたメーカ各社と専門技術を担う関係組織が協働して、福島第一の廃炉を進めている。そこには大きな国の資源を投入し、初めての事故炉の廃炉と言う取り組みを行う、原子力安全としての放射線安全の取り組みと高放射線下、未確認の構造への失敗の許されない作業を行わなければならないという、極めて難しい課題がある。

学会では、多くの専門家が各組織に参画し貢献することはもちろん、誰もがその専門としての視点から計画へのコメントや異論と可決策の提示など積極的に働きかけを行っている。廃炉委はNDFの研究開発会議に参加し協力している。学会をあげてNDFで取りまとめている技術開発に対して、専門家として積極的に意見を述べ、研究者として技術開発に参加、貢献している。この事故炉の廃炉作業は、今後とも、長期にわたり常に新たな知見が得られ、対応しなければならない作業である。学会の廃炉委は長期にわたり対応すべく、体制を整備して知見の解明や作業での原子力安全の確保のために、協力を続けなければならない。

3. プロジェクトの課題

その2：事故炉の安全目標と管理基準

二つ目の課題は、事故炉の安全目標である。通常の原子力発電所では安全目標を定めて、それに基づき、格納容器の破損限界や炉心燃料の熔融限界を定める性能目標を決め、設備の設計基準を定めている。しかし、福島第一の1～3号機は、既に事故炉となって大きく損傷しており、燃料を内在するとは言え、通常の原子力発電所に適用している安全目標や基準をそのまま適用することは適切ではないと考えられる。まず、この損傷を受けた炉

の具体的な安全の目標を、検討し定めなければならない。その上で、福島第一として具体的に管理しなければならない項目とその管理基準を明確にしなければならない。長期にわたり、格納容器内から発電所敷地内への、大量の燃料を含めて高レベルの放射性廃棄物を取扱わなければならない状況において、周辺地域への影響はもちろんであるが、廃炉作業員に重大な影響を及ぼす放射線リスクがある。そこで重要なのは、放射性物質の排出基準の設定とリスク評価である。大気への放出に対して、現状は、放出する側に、規制は掛けられていない状況である。周辺のモニタリングポストでの測定で、異常がなければよい、としている。原子力発電所では、漏れることを許さない管理をしており、隔離は最も重要な要求でもあると考える。

一方、地下水への排出においては、排出基準は明確には設定されてはいない。海水域での測定や井戸での測定など、いくつの地点での測定は行われているが、排出側の基準は明確ではない。どのような基準を要求するのか、またそれをどのように管理確保して行くのかを早急に定めなければならない。

この分野は学会の重要な役割であり、廃炉委の議論は重要と考える。責任を持って取り組み、提案することが望まれる。

4. プロジェクトの課題

その3：エンドステート考えた工法選択

現在のロードマップでは 2021 年までに汚染水の処理を完了させ、2022 年には溶けた燃料、燃料デブリの取り出しを始め、2051 年には廃炉が完了する、想定するエンドステートに到達する計画としている。しかし、このロードマップには発電所内全体の、最終の姿については、示されてはいない。敷地には既に、大量の放射性廃棄物を抱えており、今後さらに大量の放射性廃棄物、特に高い放射線レベルの廃棄物が、格納容器内、原子炉内から敷地の方に出てくる。

三つ目の課題は、これらをどのように処置するのか、またどのように(最終)処分をするのかである。福島第一の放射性廃棄物は、通常炉の廃棄物と大きく異なりほぼ全ての廃棄物には、燃料との混合物か、少なからず燃料を構成していた放射性物質が含まれていることである。この処分については、これまでは議論もされてはおらず、廃棄物の処分を含めて、敷地全体を含めて福島第一の最終的な状態＝すなわち、エンドステートが見えていない。限られた敷地内で、長期にわたり、これらの廃棄物をどのように管理して行くのか、またどのように処分して行くのか、その方向性によっては、廃炉の作業は、大きく異なり、廃炉の手順も変わってくる。この廃炉の作業では、高レベルの放射性廃棄物を直接扱うことから、手戻りがあってはならない。従って、当面の最終の

姿，エンドステートを社会に提示し，社会との合意を形成することが必要である。

廃炉委には，これまでに放射性廃棄物の処理処分に係わってきた専門家が多く参画しており，十分な議論をして目指すべきエンドステートを提案しなければならない。

5. プロジェクトの課題

その4：プロジェクトのリスクとロードマップの見直し

四つ目の課題は，プロジェクトが抱える様々なリスクである。最も重要なものは，方針として示された「リスク低減戦略」のリスクの定量化である。その中で更に，重要と考えられるのが放射性物質の放出リスクである。それは，周辺住民への健康影響はもちろんであるが，他の廃炉(廃止措置)にはない，燃料デブリなど放射性物質の福島第一の廃炉作業員への影響は大きく，重要なものとなっている。

他，プロジェクトリスクには，投入費用と時間の制限がある。これは経営問題であり，国の経営問題として税金を投入する上で，プロジェクトの管理母体が国民に納得のいく計画を示すことが必要なことである。

廃炉のプロジェクトが，国の予算で動くものである以上，国民の理解が重要である。これに対応する方策が，ロードマップによる管理であり，見える化である。ロードマップは，誰が責任を持ち，いつまでに，どれくらいの費用を使い，目標とする成果を得るかを示すものである。それを国民に明確に示し，国民の理解を得て，ロードマップに基づく評価と管理と，その修正，見直しをするものでなければならない。

廃炉委では，特に作業の過程で発生するトラブルによる放射性廃棄物の放出のリスクについて，リスク評価法を中心に検討を進め「リスク低減戦略」に貢献する。

6. 福島第一の廃炉事業の課題とまとめ

福島第一の廃炉事業を進めるに当たっての課題と原子力学会としての取り組みと貢献の概要をあげてきた。以下に要点をまとめる。

①誰が責任を持って事業を運営するのか

国がとりまとめた事業のロードマップでは，目標と責任を明確にしたロードマップとなっているのか，という本質的な疑問が指摘される。その上で，事業推進の体制はそれでよいか，という枠組みが問われる。

②エンドステート(最終的な状態)をどのように見ているのか

主に，各号機の格納容器内から大量に取出される放射性廃棄物は，各号機の最終状態と取出された放射性廃棄物の取り扱いや発電所全体の敷地内の取り扱いを明確にしなければ，廃炉の工事そのものの手順や工法は決まら

ない。それにより工法全体の見直しも必要となる。

③目標とする安全目標，コスト運営，管理計測項目，達成時期

事故炉の廃炉において，最も重要な管理要素は「リスク」すなわち「放射線リスク」であると定義している。このリスクについて住民，国民と共有し，受け入れるリスクを明確にしなければならない。その上で，リスクを管理するための計測方法と管理方法の提示が必要である。また，一方，放射線リスクは十分に小さいことから他のリスク，税金の投入や電気料金からの資金の投入，さらには工期の大幅な遅れなどのリスクも生じることを理解し，選択が求められる。

原子力学会は技術的な課題の解決だけではなく，これらのリスクに係わる課題の解決のためにも貢献して行かなければならない，と考える。

V. 事故炉の廃炉を進めるための 周辺の課題

福島第一の廃炉事業を進めるに当たって，取り組まなければならない課題がいくつかある。人材の育成と研究開発への取り組みである。

1. 技術力・人材の確保と育成

廃炉事業の重要な問題は，人材の確保である。廃炉事業では放射線管理や，材料劣化対策，放射性廃棄物に計測・分離や取扱い，処理処分問題への対応など放射性物質を扱う技術分野から自動機やロボットの開発と補修，さらには大量のデータの蓄積と分析などの原子力に直接の係わりの少ない技術分野の技術者，研究者が求められる。他方，高放射線下での作業には，これらの事業を把握した上での，放射線物質を含んだ廃棄物の取り扱い，管理の作業にはそれなりの訓練を受けた多くの放射線下の作業員を確保しなければならない。それぞれの分野での人材の確保と育成が求められるが，人材を集める仕組みはできてはいない。東京電力だけの問題ではない。国として廃炉事業を進めなければならないことを考慮すれば，国全体で取り組まなければならない課題と言える。

さらには，廃炉は建設，運転を経験しての廃炉事業とも言える。技術の根幹は，発電プラントの設計，製造，建設，運転，保守・補修にある。総合的に人材の育成を考えなければ，長期にわたる人材の確保は難しいものとなる。今から，国，事業者，メーカ，学术界が協働して，総合的な人材育成を考えた取り組みに着手していただきたい。

厳しい環境下での作業が続くことから，いかに人材を集めて行くか，いかに人材を育成して行くかは，大きな課題となる。

2. 研究開発費の継続的確保

廃炉に係わる技術開発や調査研究は、前述のように多分野での取り組みと人材確保、育成が求められ、自ずと技術開発・研究のニーズは高くなる。しかし、廃炉作業で求められる直接、直ぐに役立つ課題は、開発に要する時間が見えずニーズは多くはない。一方、現在、事業者、メーカ、学術界に存在する多くの人材は、これまでの発電炉の研究開発で育成されてきたものであり、新設炉の沈滞により急激に削減されてきている。10年を待たず人材の枯渇は生じてくるものと推察される。さらに、当面の廃炉作業が終了してもなお、廃棄物の処理処分の研究開発を行って行かなければならないと推察される。福島第一の廃炉を含めた原子力分野の総合的な技術開発、研究開発に携わり、人材育成を行う仕組みを作ることが一つの方策と考えられる。

3. 国際協力と地域社会との連携

地域社会との関係を見てみる。現在、福島第一の発電所地域、福島県ではJAEAなどが中心となり、様々な廃炉に係わる施設が建設されている。大物の試験施設やロボットの検証試験地区、照射化された材料の試験検査施設などが整備されている。これらの施設を如何に有効に活用するか、これはこのような全ての施設の大きな課題となっている。

この解決のための方策の一つに、国際共同研究としての活用がある。現在も、廃炉技術の獲得には、研究の公募に世界から参画を求めたり、研究成果の報告を国際大会として海外から専門家を招いたり、また積極的に国際会議での発表を行うなどの取り組みがなされている。福島第一の事故のデータの取得や、除染、溶融燃料の取扱い等を含めて、それらの取扱いは貴重なものであると言える。これらを国際社会の共有財産として活用することも考えなければならぬと考える。

国際社会からの積極的な廃炉作業への参画や、研究開発の協働への参画を促すことも必要と考える。この地区の研究施設を利用して、研究者・技術者を受け入れることである。この地域を国際研究都市として開発することは、日本の存在意義を高めることにもなると考える。

そのために、わが国が住居や研究施設を提供し、参加国は研究費を分担する仕組みを作ること一つの方策と言える。参加費を負担することで、膨大で貴重なデータにアクセスできる大きなメリットが得られるであろう

し、このような仕組みを提供すれば、わが国は廃炉の技術開発での世界の知恵を活用でき、更には原子力の安全性向上に大きく貢献することとなるであろう。それは、国際社会から評価されるものであると考える。

地域社会は放射線リスクを受け入れるだけではない、地域が潤うメリットを得る仕組みもまた必要である。

VI. おわりに

福島第一の廃炉は、国民一人一人が積極的に、プロセスを見守って行かなければならない。原子力学会は原子力界の一員として、事故の責任を果たすべく、国民と共にこの廃炉事業が成功するように積極的な貢献を行って行かなければならない。

福島第一の廃炉は不明確でどんな不具合が起きるかわからない事業であり、様々な分野の多くの方々との協力が、これから長い道のりの中で求められる。各界とも若手が引き継いでいくものと推察するが、引き続き、様々な分野との協力関係を持ち活動して行くことを期待する。

— 参考文献 —

- 1) 日本原子力学会 HP
http://aesjnet.sakura.ne.jp/
- 2) 日本原子力学会東京電力福島第一原子力発電所 廃炉検討委員
URL http://www.aesj.net/activity/activity_for_fukushima/public
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁 廃炉・汚染水ポータルサイト
URL http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/hairo_osen/sui/index.html
- 4) 経済産業省資源エネルギー庁 スペシャルコンテンツ、福島
URL http://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/fukushima/
- 5) NDF 廃炉支援部門 戦略プラン 東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2018 他 URL
http://www.dd.ndf.go.jp/jp/strategic-plan/index.html

著者紹介



宮野 廣 (みやの・ひろし)
法政大学 大学院
廃炉委員長

これまでをふりかえり、今後を展望する(福島特別プロジェクト)

福島特別プロジェクトの活動

Activity of the Cleanup Subcommittee

佐藤 修彰, 三倉 通孝, 布目 礼子

Nobuaki Sato, Michitaka Saso, Reiko Nunome

KEYWORDS: *Radioactive cesium, Decontamination, Environmental remediation, Paddy field test, Professional advisory, Local community*

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故により放出された放射性物質による汚染の除去や環境修復について分析し、課題の検討と解決に向けた提言を行うことを目的として、原子力学会では、平成23年4月に「原子力安全」調査専門委員会の下にクリーンアップ分科会を立ち上げた。平成24年には理事会直結の組織「福島特別プロジェクト」にて引き続き実施されている。ここでは、福島特別プロジェクト・クリーンアップ分科会がこれまでの活動について、既報告¹⁾以降の活動も含めた概要を述べる。

II. 主な活動

1. モニタリングおよび環境修復に関する提言

(1) 「環境放射線モニタリングセンター」設置の提言

環境放射線モニタリングの実施にあたっては、関係する自治体が連携して家屋、田畑、森林、農作物、水産物、上下水などに関するきめ細かなデータを取得・収集後、データおよび解析結果を、自治体等を通じて速やかに住民に公開することが重要である。そこでデータを集約し、測定地点間の比較や時間的な変化などの総合的な解析を行う機関として「環境放射線モニタリングセンター」の設置を提言し、その後、文部科学省により上記機能を備えたモニタリングセンターが設置され、一元的な管理が実施されるようになった。

(2) 「環境修復センター」設置と除染モデル検証プログラムの提言

次に、発電所敷地外の地域住民の生活環境に対する修復事業を統括して主体的に運営を行う「環境修復センター」の設置とその備えるべき要件を提言した。また、本格的な除染およびその後の避難住民帰還計画立案に用いる基礎データ取得のための除染モデル事業による被ばく線量低減効果の検証プログラムの実施を提言した。さらに、環境修復に関する企画、修復計画を含めた修復戦略の策定や最新の知見に基づく修復技術の提案、除染等により生じた汚染廃棄物の一元的管理などの情報提供を行う組織を提案し、環境省が除染専門家の派遣や除染情

報などの発信を行うための除染情報プラザ(現環境再生プラザ)を福島県との協同事業として平成24年1月21日に福島市に開設し、現在に至っている。

2. 除染技術、仮置場、中間貯蔵に関する情報提供

(1) 除染技術カタログの作成

チェルノブイリ事故後に欧州連合(EU)がまとめたEURANOSプロジェクトの除染技術データシートを調査・翻訳し、発電所敷地外の汚染地域の環境修復に適用可能な技術例(64項目)について「除染技術カタログ」をまとめ、除染計画作成のための説明用資料を作成した。

(2) 除去土壌の仮置場の解説

除染により発生する除去土壌を一時的に保管する仮置場の設置や運営に従事する市町村の担当者およびその周辺の地域住民の疑問や不安の解消を目的として、環境省の「除去土壌の保管に関するガイドライン(平成23年12月第1版)」をベースにクリーンアップ分科会からの推奨事項を付加した仮置場に関する解説資料を作成した。

(3) 中間貯蔵に関する情報提供

仮置場に集積した除染廃棄物は数か所の中間貯蔵施設へ搬入、保管し始めており、中間貯蔵の概要と将来的な廃棄物処理・処分に関する情報を提供してきた²⁾。

3. 水耕栽培における放射性セシウムの挙動評価

2. (1)で述べた「除染技術カタログ」の作成において様々な除染技術を対象に調査を行ったが、水田除染については海外の知見が乏しく、現場の知見を得る必要があった。クリーンアップ分科会ではJA そうま(現JA Fukushima Future)営農経済部と農地所有者の協力の下に水耕栽培試験を行い、セシウムの移行挙動を評価した³⁾。

(1) 放射性セシウムの移行挙動評価

土壌自体が稲作のための機能を保持した状態で除染効果が期待できる水田の代かき試験をJA そうまの協力を得て平成23年度に行った。放射性セシウムは比較的表層部に存在しており、代かき作業後の作土層の平均放射能濃度について、1回目の代かきで50%程度低減され、2回目ではさらに50%程度低減されることを確認した。

次に土壌の浄化もしくは除染への適用技術としてゼオライト散布と、チェルノブイリ事故の際にも行われてい

たカリウム施肥に注目し、放射性セシウム移行抑制効果の確認試験を、平成24年より開始した。試験田をゼオライト散布およびカリウム施肥の有無により分けし、毎年5月から10月にかけて田植え、施肥、稲刈り、脱穀の水耕作業を実施。土壌、用水および稲体のCs-134および137、K-40の放射能測定により施肥の効果等を調べた。収穫した玄米中の放射性セシウム濃度は、ゼオライト散布およびカリウム施肥にかかわらず、いずれも一般食品の基準値(100Bq/kg)を大きく下回った。収穫した玄米に対する土壌からのCsの移行係数(土壌と玄米の放射性セシウム濃度比)は、0.01以下と処分施設の性能評価で用いている評価値よりかなり低くなった。

(2) 放射性セシウムの経年変化挙動の評価

2012年以降毎年行った水耕栽培の結果から放射性セシウムの経年変化を調べた。図1には、年度ごとに得られた玄米および藁のCs-134および137とK-40の移行率の変化を示す。最初の数年間では半減期2年のCs-134の減衰の効果によりセシウム放射能は大きく減少し、天然カリウムと同程度になることがわかる。その後は放射性セシウムの放射能減少は緩やかになるが、K-40以下となることがわかる。また、天地返し等の除染対策を講じることにより、玄米へのセシウムの移行はさらに抑制されて、基準値以下となり、出荷に問題のないことが分かった。なお、ゼオライト散布は、セシウム移行抑制効果は大きくないと考えられるが、カリウム施肥は若干抑制効果があることを確認した。

4. 地域との対話

(1) 除染情報プラザへの協力

クリーンアップ分科会は、「除染情報プラザ」を活用し、地域住民等の環境修復などへの質問・相談に、中立的立場からわかりやすく解説、積極的に地域との対話を実施している。具体的には、プラザや現地で開催される講習会や除染現場に、講師やアドバイザーとして専門家を派遣し、地域住民などの除染技術・放射線影響などに関する相談や質問に対応している。最近は除染活動および廃棄物の処理処分に関する質問が多くなっている。これまでに延べ約900名(平成30年12月末時点)の専門家派遣を行ってきた。

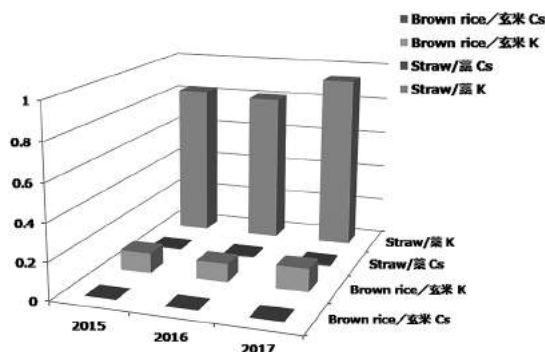


図1 放射性セシウムおよびカリウム移行率の経年変化

(2) シンポジウムの開催

福島住民の方々へのわかりやすい情報提供を目的に、国や関係自治体、関係機関と協力し、福島市、いわき市、郡山市において、環境修復(除染)、低線量被ばくと健康影響などについて専門家からの説明を基に参加者と意見交換を行うシンポジウムを開催した(総計13回)。

III. おわりに

福島特別プロジェクト・クリーンアップ分科会は、東京電力福島第一原子力発電所事故による放射性物質の汚染除去や環境修復に関する迅速かつ合理的な対応のため、モニタリング、環境修復、仮置場、中間貯蔵に関する情報提供を行ってきた。また、南相馬市での水耕栽培試験によるセシウムの移行挙動評価や、プラザへの専門員派遣により地域住民を支援する活動を実施してきた。今後も、地元の方々の関心やニーズの変化を考慮しながら、地域住民の視点で、早期の現状復帰(帰還支援や復興)できるよう課題を分析・評価し、環境修復に対して提言するとともに、除染廃棄物の輸送・処理処分など今後具体化が進められる項目に関する情報を正確でわかりやすく提供していく。また、消費地での風評払しょくについても他機関と協力して検討していきたい。

— 参考資料 —

- 1) 井上正, 藤田玲子, 「クリーンアップ分科会の活動」, 日本原子力学会誌, Vol.54, No.1, 55-56(2012).
- 2) 石倉武, 藤田玲子, 「福島における除染・処分コスト単位工事コスト係数法による除染・処理・貯蔵処分費用の試算」, 日本原子力学会誌, Vol.55, No.1, 40-47(2013).
- 3) クリーンアップ分科会, 佐藤修彰「水稲栽培における放射性Csの挙動」日本原子力学会誌, Vol.57, No.7, 34-37(2015).

著者紹介



佐藤修彰(さとう・のぶあき)
東北大学多元物質科学研究所



三倉通孝(さそう・みちたか)
東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギーシステム技術開発センター



布目礼子(ぬのめ・れいこ)
原子力環境整備促進・資金管理センター