

巻頭言

1 エネルギー基本計画と水素戦略

柏木孝夫

時論

2 核のごみマップをめぐって

科学技術的作業を行う第三者委員会と、市民参加を重視した国民会議の設置を提案する。

今田高俊

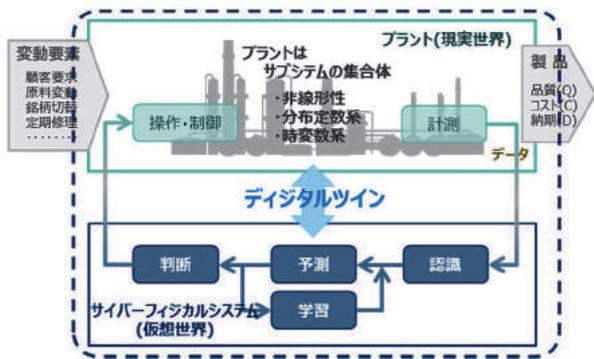
解説シリーズ

26 プラントへのIoT活用と安全・セキュリティ対策

IoTとCPSの応用可能性とCPS応用例

様々なモノをインターネットに接続し、モノの状態に関する情報を収集・分析してモノや環境を操作・制御しようとするIoT。そのIoTと、コンピュータ上のサイバー世界と現実世界とを融合するCPSの応用可能性、そしてそのプラントへのCPS応用例を紹介する。

五福明夫, 仲矢 実



プラントの仮想化とその活用

Column

- 4 「核のごみ」をどうするのがベターか? 井内千穂
 なぜドイツで時計が遅れたか? 川口マーン恵美
 「シーベルト」次の単位は・・・ 北岡哲子
 スロバキアで福島の話をして 妹尾優希
 他人の経験に学ぶ難しさ 竹内純子
 日本語で原子力を議論する意義 渡辺 凜

解説

13 国と東京電力を被告とする集団訴訟に関する考察

福島第一原子力発電所事故による損害の賠償を求める訴訟が、全国で提起されている。ここでは昨年の前橋地裁、千葉地裁、福島地裁の判決をもとに、国家賠償をめぐる争点を整理する。

遠藤典子

19 広島高裁の伊方再稼働停止判断を考える—春の年会で学会が特別セッション

原発の設置許可や運転の可否をめぐる訴訟における司法判断は、事故を潮目に変わりはじめる。ここでは広島高裁の仮処分決定内容に焦点をあてた学会のセッションのもようを紹介する。

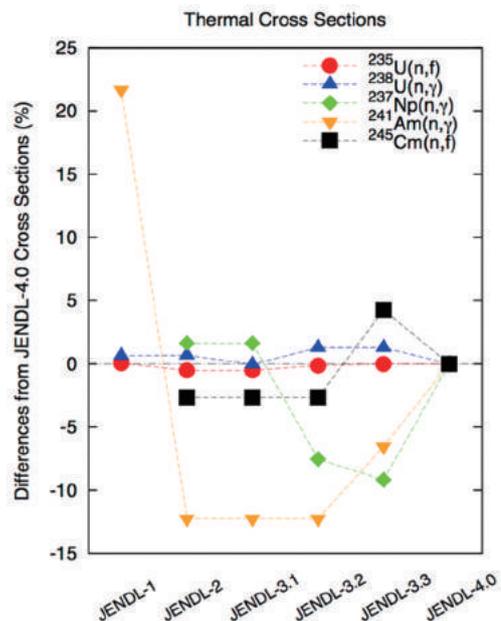
佐田 務

連載講座 核データ研究の最前線 (第8回 / 最終回)

41 核データライブラリ JENDL の進化

核データライブラリは核データ研究の集大成となる成果物である。本連載の最終回となる今回は、日本の標準として利用可能な核データライブラリであるJENDLの変遷や現状、そして今後の展望を紹介する。

岩本 修, 柴田恵一, 岩本信之, 千葉 豪



熱中性子断面積のライブラリ間の変化

From Abroad

22 Scientific Wanderlust Across The Ocean 海の向こうからの研究放浪記 (4)

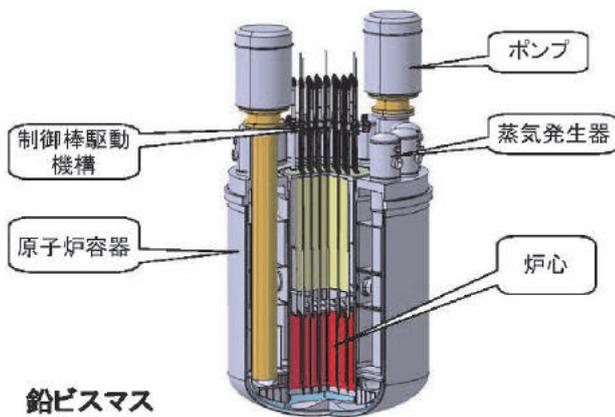
—オランダから日本へ

1999年にオランダから来日した時から、私はカオスに満ちた日本に魅了された。その日々と意見を「外部観察者」の目から綴る。 W.Van. Rooijen

連載講座 第4世代原子炉の開発動向 (第4回)

35 鉛冷却高速炉

鉛冷却炉は固有の安全性が高く、持続性、核拡散抵抗性、経済性にも優れる。構造材に対する腐食対策の見通しも得られており、各国の政策次第で実証研究の段階に進むことのできる状況にある。 高橋 実



鉛ビスマス
冷却高速炉SVBR-100

(G. Toshinsky, V. Petrochenko, 2012)

Short Report

46 リスク評価とマネジメントに関するアジア シンポジウム開催報告

山口 彰, 山本章夫, 成宮祥介

48 YGN 若手勉強会報告: 「安全神話」を議論

後藤弘行

会議報告

49 HOTLAB 2017 第54回ホットラボ・遠隔操作会議

湊 和生

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「目安箱」(<https://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>)にお寄せください。

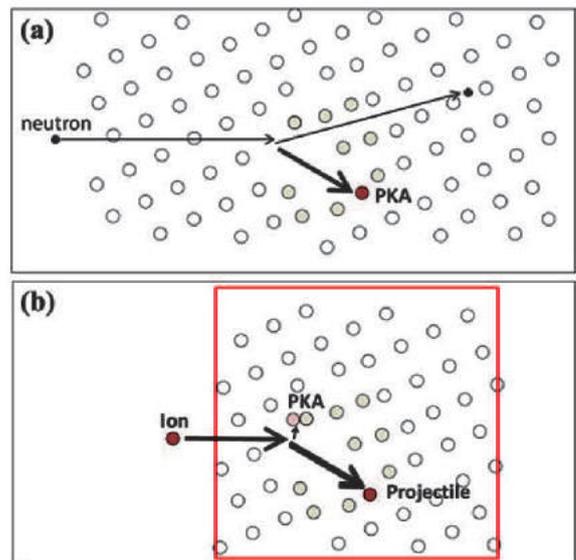
7 NEWS

- 経産省分科会, エネ基本計画で骨子案
- 世論調査, 原子力の信頼低下回復せず
- 海外ニュース

連載講座 原子力材料評価のための 最新ナノミクロ分析技術の新展開 (第3回)

30 イオンビームを用いた照射劣化の *in-situ* TEM 観察

原子力材料の研究開発では、中性子照射の影響をあらかじめ把握することが求められる。イオン加速器と透過電子顕微鏡 (TEM) を結合させた実験装置 (*in-situ* TEM) は、この問題に取り組むためのユニークな照射場を提供してくれる。 村上健太



カスケード損傷の模式図

(a) 高速中性子の場合 (b) 薄膜にイオン照射する場合

理事会だより

50 2018 年年会 理事会セッション等の報告

駒野康男

40 From Editors

新刊紹介「エネルギーの視点からみた放射線」

齋藤 隆

51 会告 日本原子力学会「第8回総会」のご通知

52 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 共催行事, 2018年度会費請求のお知らせ, 書籍販売のご案内, 英文論文誌 (Vol.55, No.6) 目次, 和文論文誌 (Vol.17, No.2) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

学会誌ホームページはこちら

<http://www.aesj.or.jp/atomos/>

エネルギー基本計画と水素戦略

巻頭言



東京工業大学 特命教授・名誉教授科学技術創成研究院
先進エネルギー国際研究センター長

柏木 孝夫 (かしわぎ・たかお)

1970年東京工業大学工学部生産機械工学科卒。
東京工業大学工学部助教授、東京農工大学大学院教授などを歴任後、2007年より東京工業大学統合研究院ソリューション研究機構(現・科学技術創成研究院)教授。おもな著書に「エネルギー革命」、「コージェネ革命」など。

固定価格買取制度(FIT)による賦課金が昨年2兆を超えた。この制度が始まる前はRPS法により再エネ導入を促進しており、比較的安価な風力発電が主流を成していた。FIT導入後買い取り価格の高い太陽光発電(PV)が一気に伸び、現在では4,000万kW以上も稼働し始めた。風力やPVは変動成分が多いため調整用電源が必要となり、大量に稼働し始めると系統に大きな影響を及ぼし出した。この観点から、蓄電システムの併設や水素等への期待が集まりつつあることは周知となっている。水素社会は究極の環境社会であり、第5次エネルギー基本計画でも水素に対し明確な位置付けがなされている。

再エネはCO₂を排出しない一方、自然環境の影響を受けやすい。例えば世界的に普及が進む太陽光発電は、曇りや雨になれば発電量が落ちるし、夜間は発電できない。変動成分が大きいという欠点がある。変動が大きいと、電圧と周波数が安定しない。発電量が多すぎたり、使用量に対して足りなければ停電してしまう。電力ネットワークに対して変動成分の大きな電気で出入りが乱れると、周波数がずれてしまう。

時々刻々と変化する需要や供給に対し、電力の調整機能が欠かせない。そこで、水素の出番となる。余った電力で水を電気分解し、発生した水素を圧縮すれば、超長期にわたって貯蔵できる。電力の需要が増えれば貯蔵した水素から燃料電池を使い、エネルギーを取り出せばよい。余剰電力を蓄電池に溜めるという方法もあるが、容量やコスト、効率性などに課題があり、将来的な主流は水素になると考える。こうした観点から、変動成分の大きい再エネを一層普及させるには、水素と併せた推進システムが不可欠であると考えている。

昨年末に政府が発表した水素基本戦略の意義は、世界に先駆けて「水素社会」を実現する道筋を示すものとして注目された。水素は再エネに加え、褐炭のガス化や化石燃料からも複製ガスとして抽出できる。しかも、CO₂を使用する工場などと併設することで、低炭素化も可能となる。日本が世界に先駆けて商用化し、水素を利用した家庭用燃料電池の普及なども含め、今後あるべき水素エネルギーの全体像を世界に見せるという点で、意義は大きい。

自動車業界では、現在、欧州を中心に電気自動車(EV)の台頭が予想され、水素で電気をつくって走る燃料電池自動車(FCV)の時代が遠のいたかのように見えるが、こうした一面のみから全体を判断するのは危険だ。確かにEVは充電スタンドの設置が容易だが、走行距離や充電時間、バッテリーの重量など課題も多い。その点、FCVは短時間で燃料をチャージでき、一度の補給で長距離走行が可能だ。価格面や水素ステーションの整備といった課題がクリアされれば、FCVの時代は確実に到来する。

水素社会の実現は、脱炭素社会に極めて近づくことが可能なことである。今後は水素のメリットや安全性への配慮などをできる限りオープンにする必要がある。世界にアピールする意味では、2020年の東京五輪・パラリンピックを水素社会の「ショーケース」にしたいと考えている。選手の送迎に燃料電池バスが使われ、福島から運ばれた再エネ由来の水素やそのメタン化も電源などに利用されれば、国民により身近なものとなる。

私は2030年以降、世界は本格的に水素社会に入っていくと見ている。技術立国日本としては、いち早くノウハウを確立し、世界をリードする必要がある今年はその元年である。

(2018年3月28日記)



核のごみマップをめぐる



今田 高俊 (いまだ・たかとし)

東京工業大学名誉教授・統計数理研究所
客員教授

学術博士。元日本学術会議「高レベル放射性
廃棄物検討委員会」委員長。東京大学文学部
社会学科助手、東京工業大学教授を経て現
職。社会システム論、リスク社会論、文明論、
持続可能社会論を専攻。

2015年5月、政府は原子力発電により発生する高レベル放射性廃棄物いわゆる核のごみの地層処分に関し、国が「前面に立って」取り組むことを「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」として閣議決定した。2000年にNUMO(原子力発電環境整備機構)が設立され、2002年より核のごみ処分地の公募に取り組んできたが、2007年に高知県東洋町の町長が議会に諮らず最終処分場建設に向けた調査の受け入れを表明したことで反対運動が起き応募撤回を余儀なくされた。以来、どの自治体も手を挙げることなく時が過ぎ去っていった。これを受けて経済産業省は「地層処分技術ワーキンググループ(WG)」を2013年10月に発足させて核のごみ地層処分に関する地質環境の評価を進めることになった。危機意識を募らせた政府は冒頭で言及した基本方針で、「科学的により適性が高いと考えられる地域(科学的有望地)を示す」とともに調査への協力を「関係地方公共団体に申し入れる」ことを前のめり気味に閣議決定したのであった。かくて、地層処分技術WGの検討にもとづいて、2017年7月に核のごみ処分地に関する「科学的有望地」改め「科学的特性マップ」が公表されることとなった。そして、科学的特性マップの提示を契機に、国とNUMOは、全国各地で意見交換会を進めている。以下、科学的特性マップを核のごみマップと略し、これをめぐる問題点を論じておきたい。



核のごみの最終処分場を検討するために核のごみマップを作成することの意義は大きい。しかし、問題はどのような手続きで、どれだけ客観的なマップづくりができていくかである。

マップは全国くまなく大ざっぱに4つに色分けされている。適性のある地域は全国で約65%、そのうち輸送面でも好ましい適地である海岸から20km以内の地域は約30%、およそ900の自治体が含まれる。いかにも茫漠としたマップであり、これをどのように利用するというのか。国が前面に立って処分地選定を着実に進めているこ

との「政治的アリバイづくり」だといわれては身もふたもなからう。

このことはともかく、気になるのはマップづくりが官庁主導のワーキンググループでなされたことである。マップづくりの基礎作業は「地層処分技術WG」がおこなったが、その委員選定にあたって、地層処分に関連する学会からの推薦方式を中心としたとある。その主旨は「中立性・公平性を確保するため」であるが、日本地震学会が疑義を提出するなど、不透明性が残るものであった。その経緯を当時の日本地震学会会長がWeb上に公表している。委員推薦依頼を受けた地震学会は、理事会および代議員にメーリングリストなどを利用して意見を聴取し、以下の条件が満たされたときに、学会から委員推薦をおこなうとの回答を、資源エネルギー庁長官あてに提出した。

日本地震学会は、資源エネルギー庁に対し、今回のWGへの委員の推薦依頼に対する前提条件として、(1)WGが「地層処分」の実施主体や政府に対して取組の改善をおこなう使命をきちんと果たせる第三者組織となっているかを明確にすること、(2)WGに参加する委員の役割と責任分担を明確にし、行政的判断の責任を負わないことを明確にした規則等の文書を上位の組織において作成、承認すること、の2点を要望したい¹⁾。

この要望は、内閣府原子力委員会からの審議依頼にもとづき、筆者が委員長を務めた日本学術会議「高レベル放射性廃棄物の処分に関する検討委員会」で作成した「回答」の主旨に沿った内容である。2012年9月にまとめた回答では、適地選定を含む科学的・技術的な安全性の検討に際しては、「自律性のある科学者集団(認識共同体)による、専門的で独立性を備え、疑問や批判の提出に対して開かれた討論の場」を確保すべきであると提言した²⁾。また、原子力委員会もこれを受けて、同年12月

に、処分場選択の検討過程について「担当大臣は(中略)学界、国民の声を踏まえつつ監査し、国や当事者に適宜に適切な助言をおこなう独立の第三者組織を、きちんと機能させる強い決意を持って自ら整備すべきである」との見解を表明している³⁾。しかし、今回のマップづくりには、これらの意見は反映されなかった。

最終的に「地層処分技術 WG」の委員として、地震学会推薦ではなく、個別に会員に委員就任を依頼し承諾を得る形となった。いわゆる「一本釣り」をしたことだ。日本活断層学会も推薦ではなく複数の会員の紹介という形を採用し、学会代表とはしていない。

国が前面に立って核のごみ処分に関する体制を再構築することは必要だが、処分場のマップづくりという科学的・技術的な作業の主導権まで国が握ってしまえば、本末転倒であろう。これでは独立の第三者組織をきちんと機能させることにはならない。福島第一原発事故で失った国民の信頼回復にとって逆効果である。

前のめり気味に核のごみマップが作成された後、2017年10月より経済産業省とNUMOの共催で、核のごみマップの意見交換会が福島県を除く46都道府県でエネルギーシフトに進められた。ところが、この過程でも国民の信頼を裏切る出来事が発生した。11月さいたま市で開催された意見交換会で、業務委託した会社が1万円の謝礼を約束して学生を動員しようとしていたことが発覚。その後の関係者への取材で、NUMOの幹部が東京電力の社員にも参加を要請していたことが判明した。NUMOは過去の意見交換会で少なくとも79人に動員の疑いがあることを発表し、理事長が陳謝する事態となった。意見交換会は一時中止され、約2カ月ぶりに「科学的特性マップに関する対話型全国説明会」と名称変更のうえ、首都圏の一都三県で5回開催されたが、参加者の不信感は拭えず前途多難である。最終処分についての国民的合意を形成するうえでもっとも重要な国民の信頼を損ねてしまえば、これまで取り組んできた努力も台無しである。



日本学術会議では、先の「回答」をより具体化するために、フォローアップ検討委員会を設置し、12項目にわたる政策提言をおこなった。その中で、地層処分の安全性に関する科学技術的問題の調査研究をおこなう諮問機関として「科学技術的問題検討専門調査委員会」を設置すべきことを提言した。委員会の設置に当たっては、自律性・第三者性・公正中立性を確保し社会的信頼を得られるよう、専門家の利害関係状況の確認、公募推薦制、公的支援の原則を採用することとした⁴⁾。そしてこの委員会の、核のごみマップに関連する課題として、1)地層処分のリスク評価および最終処分地が備えるべき条件の評価、2)科学的に見た最終処分場の適地のリスト化、3)天

災地変などによって保管場所の移動が必要になった場合の移動先の検討などを提言した。

加えて、市民参加に重きを置いた「核のごみ問題国民会議」の設置をも提言した。最終処分場問題では国民の信頼形成がとくに重要である。この会議の使命は、第1に、高レベル放射性廃棄物の地層処分の立地選定の在り方とその合意形成について公論を喚起すること。第2に、エネルギー政策に関する国民的議論をリードし、原子力利用の将来像をどうするのかについて国民の合意形成に携わること、である。

独立性と自律性を備えた「科学技術的問題検討専門調査委員会」と市民参加を重視した「核のごみ問題国民会議」を両輪として、核のごみ最終処分を考えていくことが重要である。処分場で不測の事態が発生したら核のごみを回収して別の処分場に移す必要があること(可逆性)をどう担保するのか。原発を再稼働すれば核のごみは増え続けるので、ごみの総量のめどを立てることも重要である。処分場はそういくつもつけれない。今回の「科学的特性マップ」には、こうした課題に丁寧に対応する意図は感じられない。

核のごみ処分の責任は、原子力を使ってきた私たちの世代が負うべきである。次世代にツケを回してはならない。そのために急ぎマップづくりを試みたのであろう。今回の核のごみマップを基礎にして国民的議論を喚起し、政府から独立した第三者組織による専門的議論を踏まえてマップの改訂を図っていくことが、核のごみ最終処分場の選定の近道になると思うのである。

(2018年3月30日記)

－ 参考資料 －

- 1) 加藤照之, 2015, 「放射性廃棄物地層処分技術ワーキンググループ設立をめぐって——日本地震学会からの回答と考え方」日本地震学会モノグラフ「日本の原子力発電と地球科学」編集委員会編, 日本の原子力発電と地球科学, 第3号, 86-91頁. (<http://www.zisin.jp/publications/pdf/monograph2015.pdf>).
- 2) 日本学術会議・高レベル放射性廃棄物の処分に関する検討委員会, 2012, 『高レベル放射性廃棄物の処分について(回答)』. (<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-k159-1.pdf>).
- 3) 日本原子力委員会, 2012, 「今後の高レベル放射性廃棄物地層処分に係る取組について(見解)」. (<http://search.e-gov.go.jp/servlet/PcmFileDownload?seqNo=0000095575>).
- 4) 日本学術会議・高レベル放射性廃棄物の処分に関するフォローアップ検討委員会, 2015, 『高レベル放射性廃棄物の処分に関する政策提言——国民的合意形成に向けた暫定保管』. (<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-t212-1.pdf>).

「核のごみ」をどうするのがベターか？

フリージャーナリスト 井内 千穂

原子力発電の恩恵を受けてきた現世代が排出した「核のごみ」の処分を後世代に押しつけないよう、原発の是非如何にかかわらず、誰もが真剣に考えなければならない。

そう思って、NUMOが展開中の「科学的特性マップに関する対話型全国説明会」の一つに行ってみたら、それは原発の是非如何にかかわらず考えるのではなく、原発と核燃料サイクルの継続を前提とした地層処分について、対話ではなく説明する場であった。50余年分の高レベル放射性廃棄物はガラス固化体約25,000本に相当する。元のウラン鉱石並みになるには数万年かかるが、ガラス固化体を金属製オーバーパックに封入すれば、製造後50年で表面線量2.7mSv/時まで下がるとか。

また、瑞浪超深地層研究所や幌延深地層研究センターといった研究施設を実際に見学してみて、地下の性質や処分技術に関する研究が進んでいることもわかった。

しかし、「最終」処分などと言ってしまふから、逆に後世代に対して申し訳なく、「火山列島日本では無理」という反論にもなる。せめて地上よりは安全で50年程度は安定と思われる地下で管理するのが現世代にできる次善の策ではないだろうか。

その間に、原発再稼働か脱原発かの論争に妥協点を見つけつつ、核種変換の研究や、金属燃料と乾式再処理技術による小型原子炉の開発なども進めてほしい。以前の時代には想像もつかなかった原発の開始からたかだか50年。今後50年の技術革新は10万年後の安全よりは確実ではないか？

Column

なぜドイツで時計が遅れたか？

作家 川口マーン 恵美

去年の大晦日、シュトゥットガルトは暖かかった。例年なら、シャンペングラスを片手に外に出て、零時に空を彩る打ち上げ花火に見惚れ、そのあと周りにいる人たちと見境なく「ハッピー・ニューイヤー！」とハグをしたら、凍えて家に駆け込むのが常だ。ところが、今年はいつまで外にいてもたいして寒くなかった。

一眠りして元旦の午前中、真冬には珍しい太陽に誘われて散歩に出たら、なんと、春のような光景！そのあともしばらく、50年ぶりという暖冬が続いた。

ただ、2月になったらシベリアからの寒波が押し寄せ、ドイツ全土が一気に冷凍庫に！2月末、比較的温暖なシュトゥットガルトでも、昼も氷点下だった。零下10度を過ぎると、風に向かうと顔が痛い。

3月2日付のシュピーゲル紙のオンライン版に、「なぜ目覚まし時計が遅れたか？」という記事が載った。ラジオや電子レンジなど、電気のコネクトにつながっている機器に付いているデジタル時計は、電気の周波数を利用して時を刻む。

ドイツの電力需要は冬が最大だが、冬場の再エネはあてにならず、特に今年は電力が極端に逼迫。そのため周波数が落ち、ドイツ全土でデジタル時計が軒並み遅れるという事態が起こったらしい。普通なら電流を増やして調整するが、それも追いつかず、数日で6分も遅れてしまった。巷には「遅刻の言い訳はこれで」というジョークと、「だから電波時計が良い」という便乗広告が飛び交った。

メルケル首相が最近盛んに「EUの電力統合」と言っているのは、電気のやりとりがスムーズにいくよう、EU国家間の送電線を強化しようということに他ならない。4年後、現在稼働中の原発7基が止まれば、ドイツの電力網渡りがさらに危うくなるのは織り込み済みだ。だからといって、ドイツのエネルギー安全保障の要が、周辺国との送電線の強化というのは、何かおかしくないか？

「シーベルト」 次の単位は・・・

日本文理大学 工学部 北岡 哲子
特任教授

今さらだが、“A ライ”を取得した。正しくは A 級ライセンス、4 輪自動車レースに出場する許可証である。超高速で駆け抜ける富士スピードウェイは己の五感を研ぎ澄ます訓練場だ。

一方、数か月後の舞台準備のため日々、日本舞踊の稽古に励んでいる。踊りの他にスポーツや楽器演奏も嗜むが、自己研鑽を伴う体験や努力は内面と対峙することで己を知り、ひいては他者理解に繋がる。

自身の現職の主軸は研究教育だが、至る所で人間関係の調整役を頼まれる。それは思うに、専門の研究遂行の厳しさだけでなく、レース中の恐怖の制御や美しく舞う姿勢保持の難しさを理解できるため、他者の辛さに共感し理解し合う場面が多いということか。言い換えると、A ライ取得と学位取得と名取得、異分野の苦労を比較できる物差しが心に育まれたと解釈できよう。

昨今、教員採用試験において大学の教育学部卒業者と他学部既卒者とは異なる試験や研修プログラムを行うべきという声がある。現行の試験の新卒成績優秀者より、社会的経験を積んだ既卒者が魅力的な教育者になると期待される所以は、教員の物差しだけでなく、多角的に他人の痛みを捉えられる多種の指標を持ち合わせていると想像できるからだ。

大震災以後ほぼ毎日耳にする、放射能の人体への影響量を表す単位「シーベルト」。ご存知のように、由来は放射線防護の偉大な功績のあるスウェーデンの物理学者ロルフ・マキシミアン・シーベルト。もし、経験が人の心に与える影響を表す単位があったら、良い人間関係構築にどんなに有用か。

この研究に貢献できれば将来、「テツコ」という単位が存在するのも夢ではないかもしれない。

Column

スロバキアで福島の話をして

コメニウス大学 妹尾 優希
医学部英語コース

スロバキアよりこんにちは。今年3月9日に「福島とスロバキアの原発」と題して、コメニウス大学日本語学科で日本語を学ぶスロバキア人学生14名にお話をさせて頂く機会がありました。今回は福島や原発について、スロバキアの学生がどのように感じているのか紹介させていただきます。まず、第一原子力発電所事故については、放射性物質による健康被害に対して不安を感じるという意見が多いのに対し、『スロバキアに原発が増設される事についてどう感じるか』という質問に対しては、「便利・必要だと思う」や「新しい仕事ができる」など肯定的な意見を持つ人が多かったです。実際に、来年にかけて運転が開始される、モホフツェの原子炉3・4号基では、建設に5,000人の職員が採用され、2017年の平均月収727ユーロの倍以上の1,600ユーロの給料が原発職員に支払われると報道されています。この様子は、原発事故前の日本と似ているのではないかと感じました。スロバキア北部に位置するボフニツェ原子力発電所付近のピェスタニ市出身の、ペトロネラさんは「ボフニツェの周囲の学校に通っていたため、授業で原発や放射能について沢山学んだ」と話していました。また、お父さんがスロバキアで原子力発電所関連の仕事をしているというパトリクさんは、「福島の原子力発電所で利用されていた機械が古すぎたと父から聞いた。日本は安全を重視する国だと思うのに、なぜ発電所に古い機械を利用していたのかが分からない」と話していました。今回の学生たちのコメントが事実であるかは読者の皆さんのほうが詳しいと思いますが、スロバキアの学生の感じ方を紹介させて頂きました。

他人の経験に学ぶ難しさ

国際環境経済研究所
理事・主席研究員 竹内 純子

以前、ある専門家の方と話していて、日本の原子力関連のトラブル報告書は機器や設備のトラブルばかりが言及されていて面白くないし、学ぶべき点が少ないという話を聞いたことがある。安易な比較文化論に落とし込むのは本意ではないが、欧米では機器や設備のトラブルをきっかけとして、その後人間がどういう挙動を取ったのかという分析に多くを割く。日本は「人」の話になると、その人の責任論になり、バッシングを引き起こしてしまうので、意識的か無意識的かは別として「人」の話を避けてしまうのではないかというのが、その方の見立てであった。

この見立ての当否は筆者にはわからない。しかし、各地の発電所を見学して何う安全対策の説明に、「人」の匂いがしないことが気になっていたのは事実だ。土木的・設備的な安全対策も重要だが、安全を守る最後の壁は現場の関係者だ。「人は失敗する」「人はパニックに陥る」を前提に、他人の経験に学ぶことは極めて意味が深い。

福島原子力事故にトップとして対応した吉田所長(当時)が語った吉田調書などは非常事態における人間の挙動を考える上でのヒントの宝庫であり、海外の原子力事業者には吉田調書を母国語に訳して徹底的に読み込んでいる事業者もあると聞く。しかし日本では「撤退」という発言を巡り、今後の原子力安全を考える上ではどうでもよい些末な点に議論が集中してしまった感が否めない。

あの事故に本当に学び尽くしたのか。自らがその現場にいたとしたらどう行動するか。そうした問いかけをしながら、吉田調書を含む各種事故調査報告書に改めて目を通してみる必要があるのではないだろうか。

Column

日本語で原子力を議論する意義

東京大学大学院
工学系研究科 原子力国際専攻 渡辺 凜

日本で使われている原子力発電システムの「母語」は英語だ。だから英語で書かれた教科書の方がわかりやすい。同じ専門用語でも、英語の文脈を埋めるように考案された概念だから、英語の文脈では「浮く」ことがない。

そもそも、「何語で考えるかと、思考のプロセスや産物との間には深い関係がある」ことは文系の常識である。すると、原子力システムを学び、運用し、改良するうえで、「母語である英語の方が合っている」ということがあるのかもしれない。あるいは、技術やシステムを新興国に売るとき、マニュアルが日本語では困る。

こうしてみると、原子力を導入する時、日本語への翻訳は人材確保のための最低限に抑え、なるべく英語を使う方が賢い戦略だったのかもしれない。

ともあれ結果として、日本語版のシステムが作られた。日本には、日本語で原子力を理解するための教科書があり、専門家がいる、人文系の研究や、市民による活動の蓄積もある。その上、大丈夫だと思っても事故が起こる可能性はあり、起こってしまえば大変な社会的責任を迫られる、という苦い経験もある。これらは、原子力利用に関する知的生産のための基盤であり、日本語版システムを作ったことで得た財産である。原子力の国際市場に進出しようとするならば、せつかく整備した知的インフラを活用しないのはもったいないのではないか。

文章を翻訳すると、ただ精読するより理解が一段深まる。日本の知的基盤を用いて「安全文化とは何か」「福島事故の教訓は何か」と議論し、その内容を英訳することは、国内のシステムの深化のためにも、国際市場進出のためにも、価値があるはずだ。



経産省、エネ基本計画の骨子案まとめる

経済産業省の総合資源エネルギー調査会基本政策分科会は4月27日に会合を開き、第5次エネルギー基本計画の骨子案をまとめた。原子力については安定供給性や効率性、温室効果ガス対応に優れるために重要なベースロード電源と位置づける一方で、その依存度については可能な限り低減させるという従来の方針を踏襲した。ま

た、原子力規制委員会により規制基準に適合すると認められた場合には、その判断を尊重し再稼働を進め、その際には国も前面に立ち、立地自治体など関係者の理解と協力を得よう取り組むとしている。

(原子力学会誌編集委員会)

原文財団が世論調査、原子力への信頼低下いまだ回復せず

日本原子力文化財団はこのほど、「原子力に関する世論調査2017」を発表した。同調査は、原子力に関する世論の動向や情報の受け手の意識を正確に把握することを目的として、2006年度から継続的に実施しているもの。全国の15歳から79歳までの男女1,200人を対象に個別訪問留置調査で2017年10月に実施した。

調査結果によると原子力のイメージとしては、「危険(68.5%)」、「不安(57.3%)」などの否定的なイメージに回答が集中。福島第一原子力発電所の事故後にポイントが高まった「信頼できない(30.2%)」は依然として高い水準を、逆に「必要(17.9%)」は低い水準を推移していることが明らかになった。

エネルギーや原子力などの分野で関心のある項目では「地球温暖化(47.3%)」、「原子力施設のリスク(41.7%)」、「福島第一原子力発電所の状況(41.0%)」が上位を占めた。しかし、10代では「特にない／わからない(男性44.4%、女性37.1%)」の回答が最も高く、関心の低さが伺える結果となった。

「聞いたことがあるもの」という設問では「日本のエネルギー自給率(38.3%)」、「パリ協定での採択内容

(29.4%)」という結果となった。海外の原子力政策については、「ドイツやスイスが今後国内の原子力発電を段階的に廃止する方針(35.4%)」に比べ、「中国やインド、ロシアなどは国内の原子力発電を増やす方針(19.5%)」や、「フランスや英国、米国は原子力発電を主要な電源として利用する方針(19.3%)」という情報の認知度は低い結果となった。

高レベル放射性廃棄物に関しては、「原子力発電の利用で放射能を持った廃棄物が発生する(68.7%)」ことの認知度は高い一方で、「2017年7月に『科学的特性マップ』が公表された(10.3%)」ことはあまり知られていないことがわかった。

今後の原子力発電の利用に対する考えでは「しばらく利用するが、徐々に廃止(49.4%)」とする意見が多く、「わからない(22.6%)」、「即時、廃止(14.9%)」の順。原子力発電を肯定する「震災前を維持(5.9%)」「増加(1.0%)」の意見は合計でも1割未満で、2015年(維持10.1%、増加1.7%)や2016年(維持8.3%、増加1.8%)に比べて割合が減少した。

(資料提供：日本原子力産業協会)

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

IAEA、緊急事態の解除時期特定等に資する安全指針公表

国際原子力機関(IAEA)は3月14日、原子力発電所や

放射線関係の緊急事態に陥った後、政府当局がその体制をいつ、どのように解除して平常時の状態に移行すべきかが判断する取り決めのガイダンスと勧告を盛り込んだ一般安全指針(No. GSG - 11)を公表した。

福島第一原子力発電所事故やチェルノブイリ事故など、世界で発生した事故や事象をケース・スタディとして取

り上げ、それらの経験から放射線防護に係わる教訓や良慣行を設定。緊急事態後の対応で科学的根拠に基づいた判断を下せるよう支援することを目指し、今後数か月以内に、同指針の訓練教材を発行する予定だとしている。

発表によると今回の安全指針は、IAEA が設定した安全要件における7つの共通事項(GSR)のうち、パート7「原子力または放射線緊急事態への対応と準備」、およびパート3「放射線防護と放射線源の安全」を満たす上で、推奨事項や手引きとなるものを示している。IAEA 理事会は2015年3月にGSRパート7を承認したが、世界的な緊急時対応と準備について開催された同年10月の国際会議では、緊急事態の解除と復旧への移行に対するガイダンスの「欠如」が重要課題として認識されることになった。

同国際会議はまた、IAEA が関連ガイダンスの策定作業を継続することも勧告。これを受けてIAEA は、緊急事態後に通常の社会・経済活動をタイムリーに再開できるよう促すことを目的に、地元生産物の消費制限や避難指示も含め、緊急時対応として取った防護措置の解除をどのように決定するかなど、項目別のガイダンスを今回の安全指針で提示。そうした決定を全体的な緊急時計画の一部とする取り決めの策定において、各国の政府当局に支援を提供できると説明した。

同安全指針は、IAEA のほかに食糧農業機関(FAO)や国際労働機関(ILO)、世界保健機関(WHO)、国際民間航空機関(ICAO)など9つの国際機関が協賛しており、IAEA は昨年12月に試験的ワークショップを含む訓練活動をウィーンで実施した。同ワークショップで講師を務めたアイルランド環境防護庁のプログラム・マネージャーは、「今回の指針により、各国の緊急時計画と対応の枠組で今まで取り上げられなかった課題がカバーされることになった」と指摘。緊急時から「新たな平常時」に移行する際、影響を受けた人々に安全と安心な生活を提供するための放射線防護条件やその他のファクターを意思決定者が特定し、緊急時体制の終了を正式に宣言する上で一役買うことになると強調した。ただし、IAEA は「新たな平常時」の説明について、必ずしも緊急時前と同一の状態を意味しない点を言い添えている。

【米国】

FES 社、原子炉 4 基を 2021 年までに閉鎖へ

米国のファースト・エナジー・ソリューションズ(FES)社は3月28日、財政的な事情によりオハイオ州とペンシルベニア州で運転する3サイト・4基の商業用原子炉を、2021年までにすべて閉鎖すると発表した。

同社の顧客エリアでは、北米最大の独立系統運用者(ISO)であるPJMが電力システムと卸電力市場を運営しており、このような自由化市場の容量オークションで十分な結果が得られないことや電力価格の低迷、電力需要の将来的な伸び悩みを理由として示唆。その一方で、閉鎖予定日までの運転期間中は、対象の原子炉を法的に救済する道を追求していくとともに、売却という選択肢も模索するとしている。

具体的な閉鎖計画としてFES社は、2020年にオハイオ州のデービスベッセ原子力発電所(ネット出力90.8万kWのPWR)、同じ州内のペリー原子力発電所(ネット出力126.8万kWのBWR)とペンシルベニア州のピーパーバレー原子力発電所(ネット出力約94万kWのPWR×2基)については、2021年の閉鎖を予定しているとした。これらの合計容量は約405万kWで、2017年の合計発電量はFES社による総発電量の約65%を占めた。また、地元コミュニティに対しては、これまでに税制面で5億4,000億ドル以上の貢献を果たしてきたとしている。

今回の決定については、「非常に難しい判断だった」とFES社は説明しており、合計2,300名の原子力発電所従業員や、地元コミュニティのリーダー、労組が原因になったわけではない点を強調。各発電所では果敢なコスト削減に取り組んできたが、直面する市場問題は自らの力では制御不能であるとの認識を示している。

実際にこれらの原子力発電所を閉鎖することになれば、詳細な廃止措置計画の作成や、運転認可の修正にともなう原子力規制委員会(NRC)との共同作業など、複雑な準備作業に約2年を要するという。また、これらの閉鎖が卸電力市場の信頼性に影響を及ぼす場合は、PJMの承認も必要になる。このためFES社は、対象原子炉の閉鎖計画を同日付でPJMに伝えるとともに、NRCにも口頭で通達。NRCに対してはその後30日以内に文書でも連絡する必要があると述べた。また、産業界の支援機関である原子力発電運転協会(INPO)と原子力エネルギー協会(NEI)にも、同様の通達を行ったことを明らかにしている。

規制委、WH社製AP1000の新設計画に建設・運転認可

米原子力規制委員会(NRC)は4月5日、フロリダ州マイアミ郊外で2基のウェスチングハウス(WH)社製AP1000をターキーポイント原子力発電所6、7号機(各PWR、110万kW)として増設する計画に対し、建設・運転一括認可(COL)を発給することを決定した。

事業者であるフロリダ・パワー&ライト(FPL)社の申

請書について、昨年12月の公聴会でNRC委員が安全性と環境影響の両面で問題がないことを確認したものの、この承認を受けて、NRCの新原子炉局スタッフは数日以内に正式にCOLを発給することになる。

FPL社は現在、同発電所で3基の火力発電プラント(1, 2, 5号機)と2基の原子力プラント(3, 4号機)を運転中で、6, 7号機増設計画のCOLは2009年にNRCに申請していた。この申請書を審査したNRCスタッフは2016年11月、最終環境影響声明書(FEIS)と最終安全評価報告書(FSER)を発行しており、公聴会では両文書でCOL発給に必要な項目すべてが裏付けられているか評価された。

同社はまた、既存の3, 4号機(各PWR, 76万kW)について今年3月、米国の原子力発電所としては初めて、2回目の運転期間延長をNRCに申請。1回目の申請で、運転開始当初の運転期間40年に加えて20年の運転がすでに承認済みであるため、2回目の申請が承認されれば、両炉は合計80年間の運転継続が可能になる見通しだ。

NRCはこれまでに18件・28基分のCOL申請書を受理したが、ターキーポイント6, 7号機へのCOL発給により、新たに建設と運転を許可した計画は合計8件・14基にのぼった。このうち実際に着工に至ったのは、ジョージア州のA. W. ボーグル3, 4号機計画とサウスカロライナ州のV. C. サマー2, 3号機計画のみで、両計画ともWH社製AP1000を採用。受動的安全系を備えた同設計が米国で建設されるのはこれらが最初の試みであったことから、両計画とも建設工期とコストが拡大していた。昨年3月にWH社が連邦倒産法の適用申請した後、サマー計画の事業者は2基とも完成を断念する判断を下している。

【ベルギー】

政府、エネルギー戦略案で脱原子力政策を維持

ベルギー政府は3月30日に新しいエネルギー戦略案を閣議決定し、この中で現行の脱原子力政策をそのまま維持していることを明らかにした。商業炉全7基を2025年までに全廃する一方、代替電源として風力など再生可能エネルギー源の増設に拍車をかける方針。それまでは、連邦原子力規制局(FANC)が原子力発電施設の安全性を確実に保証すると明記するに留まった。これらを盛り込んだ法案を5月末までに作成して閣議にかけ、今年中にも統合国家エネルギー戦略を完成させるとしている。

ベルギーではチェルノブイリ事故後の2003年、緑の党を含む連立政権が脱原子力法を制定しており、原子炉の運転期間を40年に制限するなどにより2025年までに

脱原子力を達成するとしていた。しかし、総電力需要量の約5割を賄う原子力の代替電源が確保できず、2009年当時の政権は2015年に閉鎖予定だった2基について、運転期間を10年延長する代わりに税金の支払いを求める覚書を事業者と締結した。

この覚書が法制化される前に福島第一原子力発電所事故が発生したため、2012年の政権は同覚書を破棄。運転期間の延長は出力の大きい1基のみとしたが、2014年に発足した現政権は、電力安定供給の観点から、最も古い2基の運転期間を2025年まで10年延長する方針を発表した。これら2基は運転期間が満了した2015年2月と12月に一旦停止されたものの、連邦政府と事業者は同年11月、原子力税の支払いなど、これらの運転期間を2025年まで延長する具体的な条件で合意していた。

今回のエネルギー戦略案における目標事項として、政府は(1)エネルギーの供給保証、(2)パリ協定の遵守、(3)適正価格の維持、(4)エネルギー施設で最高レベルの安全性を確保——を列挙。これらを実現する方策として、原子力の全廃による発電容量の不足を再生エネなどへの追加投資で補うメカニズムの設定、電力やガスなどのエネルギー・コストが他国より高くないよう特別な注意を払う、などを挙げた。

パリ協定関連では、2021年から2030年までのCO₂排出抑制目標が欧州レベルで決定していることから、「2030年までの国家エネルギー・温暖化防止計画」を早急に策定する方針。政府は4月末までに複数の洋上風力発電ファームを増設するサイトを特定し、建設工事の入札準備などを進める。計画中の3つの風力発電ファームについても、欧州委員会からの承認取得といった作業を急ぎ、遅くとも2021年1月の運転開始を目指すとしている。

このような政府戦略について、ベルギー原子力フォーラムは同日、「地球温暖化を防止するには、既存の解決策すべてが必要であり、原子力を2025年で全廃した場合、ベルギーはCO₂排出抑制目標を達成することはできない」との見解を発表した。

同フォーラムによると、電力需要の半分以上を賄っている原子炉7基はCO₂を排出しておらず、再生エネの間に欠けを安定的に補える存在。再生エネは、低炭素なエネルギー・ミックスの実現という点で重要ではあるものの、現在の発電シェア15%では、エネルギー供給保証や地球温暖化といった課題の早急な解決には不十分である。仮に、このシェアを今後、大幅に拡大できたとしても、ベルギーはこれを補完するエネルギー源に頼らざるを得ない。再生エネと組み合わせて原子力を維持することにより、ベルギーは2050年までにCO₂の排出量を半分に削減できるが、全廃した場合の排出量は3倍になると指摘している。

【スイス】 ベツナウ 1 が原子炉容器審査をクリアし、3年ぶりに再稼働

スイスでベツナウ原子力発電所を運転する AXPO 社は 3 月 20 日、原子炉容器(RV)母材の健全性を評価するための広範な試験・分析審査を終えた 1 号機を(PWR, 38 万 kW)3 年ぶりに送電網に接続したと発表した。

スイス連邦原子力安全検査局(ENSI)が 6 日付けで同炉の安全性保証文書(セーフティケース)を承認したことによるもので、停止していた期間中、緊急用電力供給システムの洪水対策や地震対策を講じたほか、RV 上蓋の取替も実施した点を同社は強調。セーフティケースの徹底的かつ資源集約的な審査の過程で、同炉は 60 年間の長期運転で要求される安全・技術要件すべてをクリアしていることが確認されたと指摘した。また、2034 年までに脱原子力を段階的に達成するとした政府の「2050 年までのエネルギー戦略」を支持しつつも、同炉は再び、スイスにおけるエネルギーの生産と供給保証に大きく貢献していくとしている。

スイスでは福島第一原子力発電所事故後に国民の反原子力気運が高まり、既存の原子炉 5 基を約 50 年間でとされる運転期間を終えたものから順次閉鎖し、国産再生可能エネルギー開発の推進といった対策を実行することになった。一方で、電力需要の約 4 割を賄うこれら原子炉の急激な削減は電力不足を引き起こすとの認識もあり、緑の党が 2016 年に「脱原子力を 5 年前倒しに達成するイニシアチブ」を国民投票にかけた際、54.2%の国民が反対票を投じている。同国ではまた、原子炉の運転認可に期間が定められておらず、ENSI が安全性を保証する限りは継続して運転することが可能である。

2012 年夏にベルギーで、ドール 3 号機とチアンジュ 2 号機の RV 底部に毛状ヒビの兆候が検出された後、ENSI は 2013 年に既存炉 5 基の事業者に対して RV 製造関係文書の点検を指示。ベツナウ原子力発電所では、2015 年 7 月に実施した超音波探傷検査で 1 号機の RV にヒビの兆候が検出されたため、AXPO 社は同炉の再稼働を延期して追加検査の作業手順計画書(ロードマップ)を ENSI に提出した。

同炉の RV は 1960 年代にフランスのクルーソー・フォージ社が製造したもので、当時の鍛造品製造プロセスでは、RV の母材中に非金属内包物が生成される可能性があった。このため AXPO 社は、ロードマップに沿って 1 号機 RV リングの複製品を使った様々な試験を数か月間にわたって実施。これには、RV 母材で探知された内包物の組成分析や内包物が RV の特性に及ぼ

す影響調査、母材であるスチールの強度試験なども含まれていた。

同社は 2016 年 11 月、このように詳細な物質特性評価検査の結果から、1 号機の RV に安全上の影響は及ばず、同炉を 2030 年まで 60 年間運転した場合も、適切な安全裕度が確保されるとするセーフティケースを ENSI に提出。ENSI は 2017 年 12 月にセーフティケースの補足文書を追加で受領した後、国際的に著名な専門家も交えた審査の結果として、内包物が RV の安全性に悪影響を及ぼすことはないとの見解を今月 6 日に公表していた。

なお、ENSI は同日、RV の健全性問題を巡る 2012 年以降の動向を以下の表に整理。既存原子炉 5 基のうち、ライブシュタット原子力発電所(BWR, 127.5 万 kW)の RV は、製造者と製造プロセスともにベルギーの原子炉とは異なっていた点を指摘した。また、2022 年まで稼働可能なミュールベルク原子力発電所(BWR, 39 万 kW)については、事業者が長期の運転にともなう規制面や技術面その他の影響を考慮し、2019 年 12 月に前倒しで閉鎖することを 2016 年 3 月に決定している。

【トルコ】 アックユでロシア製の初号機が本格 着工

トルコの半国営アナトリア通信は 4 月 3 日、地中海沿岸のメルシン県で、同国初の原子力発電設備となるアックユ原子力発電所 1 号機(120 万 kW のロシア型 PWR)が本格着工したことを伝えた。

同炉の建設工事は昨年 12 月、部分的建設許可に基づいて原子炉系統の安全系を除くすべての部分で開始されていたが、4 月 2 日にトルコ原子力庁(TAEK)が全面的な許可を発給したのにもとない、1 号機原子炉建屋の基盤部分で最初のコンクリート打設が行われたもの。同プロジェクトは 2010 年にロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社が受注しており、現地で開催された記念式典には、トルコの首都アンカラを訪問中だったロシアの V. プーチン大統領がトルコの R. T. エルドアン大統領とともにテレビ会議を通じて出席した。両首脳とも、2023 年の完成を目指して 1 号機が着工したことは、トルコ経済の発展および両国間のエネルギー協力における歴史的瞬間になったと強調している。

同発電所の建設と運転に関して両国が 2010 年に締結した政府間協力協定によると、アックユでは第 3 世代+(プラス)の 120 万 kW 級ロシア型 PWR(VVER)シリーズの「AES - 2006」を合計 4 基、建設することになっており、総工費の 200 億ドルはすべてロシア側が負担。選

定された事業者が対象施設を建設・所有・運転するという「BOO 契約方式」を原子力分野で初めて採用しているため、ロスアトム社がプロジェクト企業としてトルコに設立したアックユ原子力発電会社(ANPP)が、発電所の所有者として建設と運転に全責任を負う。同社は発電所の完成後、15年にわたって発電電力をトルコ電力卸売会社(TETAS)に販売予定で、これにより建設費を回収。同社株の49%までは、外部投資家に売却する計画だとしている。

祝辞のなかでエルドアン大統領はまず、トルコ経済が2003年から2017年までに平均5.8%で成長し、2017年だけで成長率が7.4%に達した事実に言及。1号機が完成する2023年までに、トルコは世界の経済大国10か国の1つとなる目標を掲げており、さらに安定したエネルギー供給が必要になる。その意味で、原子力発電所はトルコの将来にとって非常に重要との認識を示した。

また、世界では現在、31か国/地域で約450基の商業炉が稼働中で、2023年にアックユ1号機が完成すれば、トルコもいよいよ原子力利用国の仲間入りをすると強調。この年は丁度、トルコの建国100周年にあたることから、是非ともプロジェクトを成功させたいとの抱負を述べた。

トルコでは今のところ、エネルギー源の多くを石油と天然ガスおよび石炭に依存しているため、2025年までにアックユの4基すべてが完成し、総発電量の約10%を賄うことを期待。CO₂を排出しない原子力発電所は、トルコのエネルギー供給保証に貢献するのみならず、クリーンで環境的にも安全なエネルギー供給により地球温暖化防止にも大きな役割を果たすとの見通しを明らかにした。

【UAE】

初号機の竣工式、供給国韓国と協力関係強化へ

アラブ首長国連邦(UAE)の国営首長国通信(WAM)によると、同連邦初の商業炉として建設中のバラカ原子力発電所で1号機(PWR、140万kW)が完成したことから、3月26日に現地で竣工式が行われた。

原子力導入プログラムを担当する首長国原子力会社(ENEC)と主契約者の韓国電力公社(KEPCO)は、2012年夏の本格着工以来、原子力産業インフラがまったく存在しないUAEで、最も高い安全・品質管理基準を遵守しつつ同炉が69か月で完成した点を高く評価。建設段階を正式にクリアしたことから、今後は2015年に申請した運転許可を連邦原子力規制庁(FANR)から取得するため、安全な運転開始に向けた準備を集中的に進めていくとしている。

竣工式には、同発電所が立地するアラブ首長国連邦のムハンマド皇太子兼UAE軍副最高司令官、およびUAEを訪問中だった韓国の文在寅大統領が出席。このほか、UAEの外務・国務協力大臣を含む関係閣僚や主だった関係地域の首長、建設に尽力した韓国側専門家などが参列した。ムハンマド皇太子は1号機の完成について、「我が連邦の発展における歴史的瞬間だ」と述べ、UAEが進める原子力の平和利用プログラムは、同連邦が成長していく上で戦略的役割を果たすと指摘。エネルギー供給保証の強化や経済の多様化、雇用機会の創出に寄与することで、後継世代に将来を保障する一助になると強調した。

バラカ1号機ではすでに、冷態機能試験や温態機能試験を含めた様々なシステム試験が完了しているが、これらは初期試験プログラム(ITP)における第1段階の一部。ITPと並行して、ENECとKEPCO、および両社が共同出資する運転・保守(O & M)担当企業のNAWAHエナジー社は、運転開始準備のための包括的プログラムとして、O & M担当所員に高水準の能力を身に付けさせる訓練を実施中である。

同発電所で、所員や所定の手続き・プログラムといった準備がすべて完了し次第、NAWAH社は1号機で燃料の装荷と起動を開始するための承認をFANRから取得する計画。FANR側では運転認可の発給前に、発電所と運転組織のあらゆる側面について詳細な点検・審査を実施する。

また、FANRによる広範な審査プロセスに加えて、国際原子力機関(IAEA)と世界原子力発電事業者協会(WANO)所属の国際的な専門家が、独自の立場から1号機とその運転組織を評価中。原子炉の物理的インフラのみならず、運転チームと管理スタッフの能力と専門的知見についても、包括的な審査が行われることになる。

バラカ発電所では現在、1~4号機まで4基(各140万kWの「改良型PWR1400」)の建設作業を同時に進めているため、ENECは今後も2~4号機の建設管理を継続する。これら3基の工事進捗率はそれぞれ、92%、81%、および66%に達しており、発電所全体では86%の工事が完了した。4基すべてが送電開始した場合、UAEでは総電力需要の25%が賄われる見通し。原子力は今後数十年にわたって、クリーンで効率的かつ信頼性の高い電力を供給していくとしている。

【インド】

ゴラクプールの国産加圧重水炉建設で掘削開始

インド原子力発電公社(NPCIL)は3月24日、北部ハ

リヤナ州のゴラクプールで70万kWの国産加圧重水炉(PHWR)を2基建設するため、地盤の掘削工事を開始したと発表した。

同発電所I期工事にあたるこれら2基は、国内原子力産業の急速な発展を促すために政府が2017年5月に閣議決定した10基の70万kW級国産PHWR建設計画の一部。約6年後の完成を目指して、2019年に1号機の原子炉系統部分で最初のコンクリート打設を行うと見られている。

電力不足に悩むインドは、2032年までに原子力発電設備を6,300万kWとし、2050年までに総発電量に占める原子力の割合を25%に拡大する目標を掲げている。現在、22基・678万kWの原子力発電所が稼働中だが、ロシアから導入した2基の100万kW級PWRを除くと、国産PHWRのほとんどが出力22万kWで、最大でも54万kW。このため、NPCILは原子炉の大型化を進めており、建設中の6基はすべて70万kW以上、このうち4基が70万kWの国産PHWR(カクラパー3、4号機とラジャスタン7、8号機)だとしている。

ハリヤナ州初の原子力発電設備となるゴラクプール発電所では、最終的に70万kWのPHWRを4基建設する計画で、NPCILはすでに2014年1月に1、2号機の起工式を開催。翌2015年7月には、インド原子力規制委員会(AERB)が4基分の立地許可を発給した。それ以降、プレ・プロジェクト活動として進めていた用地の取得やサイト調査、環境面と規制面で必要な許認可手続などが、このほど完了したとNPCILは説明。2基分で総工費2,059.4億ルピー(約3,347億円)のプロジェクトであり、完成すれば北部送電網に140万kWのベースロード電源が加わるとの認識を示している。

なお、閣議決定済みの国産PHWR・10基のうち、カルナータカ州にあるカイガ原子力発電所で増設する2基以外はすべて新規サイトでの建設計画。ハリヤナ州のゴラクプール1、2号機のほかに、マディヤ・プラデシュ州チャットカで2基、ラジャスタン州マヒ・パンスワラーで4基となっている。

海外から100万kW級の軽水炉を導入する計画も徐々に進展しており、タミル・ナドゥ州クダンクラムでロシア型PWRの1、2号機が稼働中なのに加え、3、4号機が昨年6月と10月にそれぞれ着工した。後続の5、6号機についても、NPCILとロシアのエンジニアリング企業が同年6月、一般枠組協定およびプロジェクトの実施に必要な政府間信用議定書に調印した。また、南西部マハラシュトラ州ジャイタプールにおける6基の欧州加圧水型炉(EPR)建設計画について、NPCILは機器の調達活動など産業界関連の枠組に関する協定を3月10日にフランス電力(EDF)と締結。今年末頃の着工を目指

すことを双方が再確認している。

【インドネシア】

試験用小型高温ガス炉の詳細設計開始

インドネシアで原子力発電導入計画を担当する原子力庁(BATAN)はこのほど、商業用小型高温ガス炉(HTR)の導入に向けて、熱出力1万kWの試験・実証炉(RDE)の詳細工学設計(DED)を開始したと発表した。

熱電供給可能な小型HTRの開発は、100万kW級の大型炉を導入する前段階として同国が2014年から進めているもので、BATANは昨年、RDEの基本工学設計(BED)を完了。開発計画は新たなフェーズに移行し、今年9月初旬までにDEDを完成させる方針を明らかにした。同計画では、日本原子力研究開発機構が2014年8月から国産技術の国際展開と国際標準化の一環として協力しているほか、中国でHTR建設計画に携わっている中国核工業建設集团公司(CNEC)も2016年8月、中国製HTRの将来的な海外プロモーションを目的に、BATANと協力協定を調印している。

電力需給の逼迫等を理由に、インドネシアは1980年代に原子力発電の導入検討を開始。建設予定地における火山噴火や地震の可能性、福島第一原子力発電所事故などが影響し、大型炉の導入計画で目立った動きが見られない一方、中小型炉に対する関心は初期投資の縮減や電力網への影響軽減の観点から維持している。2014年にBATANが公表した原子力展望によると、2027年以降にジャワ島、マドゥラ島、バリ島をカバーする100万kW級原子炉2基の開発、2031年以降はスマトラ島でさらに2基、およびカリマンタン島、スラウェシ島、その他の離島においては、10万kW級小型HTRを産業利用目的に導入することが明記されていた。

2015年3月にBATANは、2014年からゆるやかなペースでRDE開発に乗り出したことを明らかにしており、その際、「原子力発電所の開発準備には非常に時間がかかるため、優先的な開発項目となるのは2019年以降になる」との認識を提示。RDEを開発する目的としては、(1)小型の原子炉建設を通じて、原子力発電所を開発・運転・維持するための技術を習得する、(2)原子力発電が安全かつ経済的で環境にも優しい電源であることをすべてのステークホルダーに実証する——を列挙した。2015年時点ですでに、RDEの開発準備チームが2019年の運転開始を目指して様々な準備活動を開始。それには、建設候補地の実行可能性に関する技術評価や、許認可手続に必要な技術文書の作成、候補地等における住民への説明が含まれるとした。

国と東京電力を被告とする集団訴訟に関する考察

慶應義塾大学 遠藤 典子

福島第一原子力発電所事故(以下、福島第一事故)による損害の賠償を求める訴訟が、全国の地方裁判所(支部を含む。以下、地裁)で提起されている。これらの訴訟の多くは、東京電力と並んで、国を被告としている。その最初の判決は、平成29年3月17日の前橋地裁が言い渡した東京電力と国の一部敗訴である。これに加え、続く9月22日の千葉地裁判決、10月10日の福島地裁判決を通じ、国の違法性について、「津波の予見可能性」、「結果回避可能性」などの争点が浮かび上がってきた。前橋地裁と福島地裁は、規制権限を行使しなかったとして国の違法性を認め、3地裁ともに国の予見可能性を認めた。東京電力に対しては、中間指針等ⁱを上回る精神損害の増額を求めるものとなった。本論考は、国家賠償を中心にこれらの争点を整理し、原子力損害賠償制度や安全規制へ及ぼす影響を検討するものである。

KEYWORDS: *State Redress Act, foreseeability of the Tsunami, the exercise of authority by the competent ministry, the new regulatory requirements*

I. はじめに

福島第一事故から2年後の平成25年3月11日以降、全国の地裁に提訴した原告らの数は約11,100人を超え、東京高等裁判所(以下、高裁)、仙台高裁での控訴審を含め、31件の裁判が継続している(平成30年2月28日時点)。これらの訴訟の多くは、東京電力と並んで、規制権限の不行使を理由に国を被告としている。

同じく国の規制権限不行使の違法性が問われた近年の訴訟、宅建業者訴訟(最高裁平成元年11月24日)、クロロキン薬害訴訟(最高裁平成7年6月23日)、筑豊じん肺訴訟(最高裁平成16年4月27日)、水俣病関西訴訟(最高裁平成16年10月15日)を鑑みれば、福島第一事故に関する集団訴訟については、今後3~4年の間に一審判決が、さらに一審判決から数年のうちに高裁判決が下されるものと見られる。最高裁判所に上告されれば、平成30年後半に判決が出されることになるだろう。本稿において検討する判決はあくまで前橋地裁、千葉地裁、福島地裁のそれであり(表1参照;詳細説明は後述)、他の一審判決や上級審判決を待たなければ、議論の普遍化は難しい。それを前提に、3地裁判決の争点を整理し、

原子力損害賠償制度や安全規制へ及ぼす可能性を想定し、その影響を検討する。

II. 訴訟の概要

1. 前橋集団訴訟

平成25年9月11日、福島第一事故により避難を余儀なくされたことで、被ばくに対する健康被害への恐怖や、慣れ親しんだ土地における生活基盤の喪失等、平穏な生活を侵害されたとして、群馬県に避難した原告ら45世帯137人は東京電力および国に対し、慰謝料(2,000万円)の一部請求として、一人当たり1,000万円およびこれに対する弁護士費用100万円の合計1,100万円を支払うよう求め、前橋地裁に提訴した。

平成29年3月17日の判決概要は、下記のとおりである。

- ・東京電力と国が連帯して、原告ら62人に対し、合計3,855万円を支払うよう命じる。
- ・東京電力は、平成14年の文部科学省地震調査研究推進本部による「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について」(以下、長期評価)の公表後、

Consideration on Recent District-court rulings to Class Actions concerning Accusation along with Liability of causes to the Fukushima NPP accidents against TEPCO and the Government as Defendants: Noriko Endo.

(2018年2月28日受理)

ⁱ 文部科学省内に置かれた原子力損害賠償紛争審査会が定める「原子力損害の範囲の判定の指針その他の当該紛争の当事者による自主的な解決に資する一般的な指針」(原子力損害の賠償に関する法律18条2項2号)として、中間指針、中間指針追補、中間指針第二次追補、中間指針第三次追補、中間指針第四次追補を決定・公表した。

表1 福島第一事故訴訟に係る地裁判決の概要について

裁判所、 判決日	原告数、 請求額	判決内容	仮執行	国の違法性に係る判断			東電の責任 に係る判断	控訴の状況		
				違法性	予見可能性	結果回避可能性		中間指針を超える賠償	原告	国
前橋地裁 平成29年3月17日	137人 約15億円	国：一部敗訴 62人、約3,900万円 東電：一部敗訴 同上(国と連帯責任)	○ (猶予あり)	○	○ 「長期評価」 に信頼性あり	○ 平成20年時 点で対策を取 れば十分間に 合った	○ 精神的損害の増 額(個別事情を考 慮し、帰還困難区 域以外にも一括 賠償を認定)	○	○	○
千葉地裁 平成29年9月22日	45人 約28億円	国：勝訴 東電：一部敗訴 42人、約3億8千万円	○ (猶予あり)	×	△ 「長期評価」は 必ずしも通説 的見解でない が、最大公約 数的まとめで あり、国は十 分尊重・検討 するのが相当 (ただし予見 可能性の程度 は高くない)	△ or × (注) ・予見可能性 の程度を踏ま えると直ちに 措置を講ずる 義務は導かれ ない ・事故前の知 見に基づく措 置を講じても 間に合わない か、結果を回 避できなかった 可能性もある	○ 精神的損害の増 額(個別事情を考 慮し、帰還困難区 域以外にも一括 賠償を認定。帰 還困難区域内に ついては一部増 額)	○	-	○
					予見可能性はあったが、規制権限不行使が著しく合理性を欠くとまでは認められず、違法とはいえない					
福島地裁 平成29年10月10日	3,828人 約162億円	国：一部敗訴 2,905人、約2.5億円 東電：一部敗訴 2,907人、約5億円 (国と一部連帯責任)	×	○	○ 「長期評価」 に信頼性あり	○ 平成14年末 時点で対策を 取れば十分間 に合った	○ 精神的損害の増 額(一部エリアに つき、一律に損害 対象期間を拡大)	○	○	○

(注)判決は「結果を回避できなかった可能性もある」と認めているが「結果回避可能性はなかった」とまでは言い切っていない。

敷地高さを超える津波を予見することができ、平成20年に実施した社内試算によって、実際に予見した。

- ・東京電力は、津波を予見した時点で、給気ルーバーのかさ上げや電源車の配置によって事故を防ぐことができたにもかかわらず、これらの対策を講じなかったことは強く非難されるべきである。
- ・国にも、上記対策を講じるよう東京電力に命令しなかったことに過失責任があるといえ、その責任は重く、国が支払うべき賠償金額は東京電力と同額である。

3月30日、判決を不服として、国と東京電力は東京高裁に控訴した。また、翌31日には、原告の一部の70人も、認定額を不服とするなどして東京高裁に控訴した。

2. 千葉集団訴訟

平成25年3月11日、福島県から千葉県に避難した原告ら18世帯45人が、福島第一事故により避難を余儀なくされたことで地域コミュニティから引き剥がされ、人

間らしい生活とその基盤を奪われたとして、東京電力と国に対し、連帯し、避難に伴う精神的苦痛への慰謝料として1人当たり一律月額50万円、ふるさとを失ったことへの慰謝料として一律2,000万円、財物賠償及びその他の損害(避難費用など)の賠償として合計28億円の支払いを求め提訴した。

判決概要は下記のとおりである。

- ・東京電力は、原告らに対して合計約3億7,600万円ⁱⁱを支払うよう命じる。
- ・国は津波の発生を予見できたが、対策を講じていたとしても本件事故を防げたとは限らないことから、国の責任を認めることはできず、国に対する請求は棄却する。また、東京電力にも、慰謝料を増額する理由となるような重大な過失はない。
- ・中間指針の定める月額10万円の慰謝料は、避難生活

ⁱⁱ 千葉地裁は賠償額などに誤りがあったとして、該当部分13カ所を訂正する更正決定の手続きを行った。原告3人の賠償額に訂正があり、賠償総額は3億7,600万7,601円から3億7,574万3,601円と、26万4,000円の減額となった。

に伴う慰謝料の最低水準を示したものであり、避難生活に伴う慰謝料とは別の慰謝料(判決では便宜的に原告らが主張する「ふるさと喪失慰謝料」とした)が認められる。

10月5日、東京電力と原告ら13世帯32人が、判決を不服として、東京地裁に控訴した。

3. 福島集団訴訟

平成25年3月11日、福島第一事故時、福島、宮城、栃木及び茨城県に在住していた原告ら3,828人が、放射線被ばくによる健康影響への恐怖や不安にさらされることなく平穏な生活をする権利を侵害されたとして、東京電力及び国に対して、連帯して、各個人の事故時の居住地の空間線量率を1時間あたり0.04マイクロシーベルト以下とすること(以下、原状回復)、それまでの間、各個人に1ヶ月あたり5万円の慰謝料を支払うことを求めるとともに、原告らのうち40人が、事故によるふるさとを喪失したとして、2,000万円の慰謝料を支払うよう求め提訴した。請求額の合計は約162億円である。

判決概要は下記の通りである。

- ・東京電力に、総額約5億円の支払いを命じるとともに、国に対しても、総額約2億5,000万円の支払いを命じる(国が支払いを命じられた部分については、東京電力と国の連帯責任)。
- ・原状回復を求める訴えについては、除染の方法等が特定されていないことなどを理由に却下する。

III. 国家賠償法における国の賠償責任

国家賠償法第1条第1項は、「国又は公共団体の公権力の行使に当る公務員が、その職務を行うについて、故意又は過失によって違法に他人に損害を加えたときは、国又は公共団体が、これを賠償する責に任ずる」と規定している。すなわち、公務員の故意・過失による公権力の行使に起因して被害を被った個人は、国または公共団体に損害賠償を請求することができる。この場合の「公権力の行使」とは、権力的行政行為に限らず、規制権限の不行使も含まれ、福島第一事故を巡る集団訴訟の争点となっている。国または公共団体は直接の加害者ではないものの、規制権限を適切に行使していれば、個人に損害が発生・拡大することを防止できたにもかかわらず、その行使を怠ったがために生じたとされる損害の賠償責任を問われているのである。

もっとも、国または公共団体が規制権限を行使するか否かには裁量に委ねられており、規制権限を行使しなかった場合も、直ちに違法となるわけではない。「被告国の規制権限の不行使は、その権限を定めた法令の趣旨、目的や、その権限の性質等に照らし、具体的事情の下において、その不行使が許容される限度を逸脱して著しく合理性を欠くと認められるときは、その不行使によ

り被害を受けた者との関係において、国賠法1条1項の適用上違法となる」(福島地裁判決)¹⁾。

では、不行使の違法性はどのように判断されるのだろうか。中心的に考慮されるのは、予見可能性、結果回避可能性、被侵害利益の重大性、期待可能性(国民が国や公共団体に対して、その規制権限の行使を要請し、期待しうる事情があること)、危険の切迫性等と考えられる。福島第一事故に関する集団訴訟では、前橋地裁と福島地裁は、規制権限を行使しなかったとして国の違法性を認めたが、千葉地裁は、結果回避措置を講じたとしても、本件事故を回避できなかった可能性もあるとして、国の違法性を認めなかった。

しかしながら、国による予見可能性については、3地裁ともに認めた。予見可能性および結果回避可能性は、上級審でも争点となるとみられる。

IV. 訴訟の争点

1. 津波の予見可能性

福島第一原発1号機から4号機側主要建屋設置エリアの浸水高は、敷地高(O.P.ⁱⁱⁱ+10m)を上回るO.P.+約11.5m~15.5mであった。

当該3裁判における津波の予見可能性の有無についての判断には、前述の平成14年の長期評価に加え、「太平洋沿岸部地震津波防災計画手法報告書」(平成9年、当時の建設省、運輸省、農林水産省、水産庁)、「地域防災計画における津波対策強化の手引き」(平成10年、当時の国土省、農林水産省、水産庁、運輸省、気象庁、建設省、消防庁)、「原子力発電所の津波評価技術」(平成14年、土木学会原子力土木委員会津波評価部会)、「溢水勉強会の調査結果について」(平成18~19年、保安院および原子力安全基盤機構)、東京電力による津波試算(平成20年)などが主に採用されている。

長期評価については、地震防災対策特別措置法に基づき、国の機関である地震本部が策定したものである。ここでは明治三陸地震(明治29年、マグニチュード8.2)と同様の地震が、日本海溝寄りの地域でどこでも発生する可能性を指摘していた。この知見を前提として東京電力が平成20年に行った福島県沖の日本海溝沖における津波試算は、福島第一原発の敷地南側で最大O.P.+15.7mの高さであり、これが国に報告されたのは、東日本大震災の3日前の平成23年3月7日であった。

国の勝訴を言い渡した千葉地裁にあっても、「経済産業大臣は、(中略)平成18年当時に存在した無視することのできない知見、すなわち長期評価の知見に基づいた津波シミュレーションを指示等するのが相当であったといえる。そして、同知見を前提として、最新の津波シミュレーション技法であった津波評価技術に基づき算出

ⁱⁱⁱ 大阪湾最低潮位

していれば、平成20年の推計と同様の推計結果、すなわち、福島第一原発の敷地南側で最大O.P.+15.7mの高さという結果が算出された可能性が高いといえ、経済産業大臣において、O.P.+10mを超える津波が福島第一原発に発生し得ることを予見することができたといえる」とした。

福島地裁判決でも、「長期評価」が本件地震、本件津波を想定したものではなかったとしても、「長期評価」において想定される地震によって1～4号機敷地高さ(O.P.+10m)を超える津波が合理的に想定されたのであれば、被告国はこれを省令62号4条1項で想定すべき「津波」として津波安全性評価の基礎とすべき義務があったというべきである」と結論づけた。

一方、国は、「長期評価の知見」が研究者の見解を最大公約数的にまとめたものでなければ、多数の見解でもなく、多数の専門家から理学的根拠を伴わないものとして懐疑的な評価がされていたこと」を挙げ、長期評価の位置付けや評価を誤っていると指摘している(平成29年5月18日に東京高等裁判所に提出された前橋地裁判決に対する控訴理由書)。

2. 結果回避可能性

千葉地裁において原告らは、「長期評価を前提に明治三陸地震の波源モデルを福島県沖に移して行った試算を前提にした結果回避措置として、遅くとも平成18年までに、①津波に対する一般的な防護措置として、タービン建屋の水密化、②非常用電源設備等の重要機器の水密化、独立性の確保、③給気口の高所配置又はシュノーケル設置、④外部の可搬式電源車(交流電源車、直流電源車)の配備等、全交流電源喪失に対する措置^{iv}」を採るべきであり、「いずれの措置も平成18年までに工事に着手していれば、遅くとも平成21年には全ての工事を完了することができ、本件事故を回避できた」と主張していた。

しかしながら、千葉地裁は、「原告らは、長期評価に基づく被告東電の試算を前提として、結果回避義務及び可能性を主張するが、経済産業大臣における予見可能性の程度に照らせば、①ないし④の各結果回避措置を直ちに講ずべき義務が導き出されるとはいえず、仮に、上記各結果回避措置を講じたとしても、時間的に本件事故に間に合わないか、あるいは、本件地震、本件津波の規模から、措置の内容として本件津波による全交流電源喪失

を防ぐことができず、いずれにしろ本件事故を回避できなかった可能性もある」と結論づけた。

一方、前橋地裁と福島地裁においては、「平成14年時点において規制権限が行使されていれば取られたであろう回避措置も、この「長期評価」から想定されたはずの浸水高O.P.+15.7mの津波を基準として考えるべき」とし、「被告国(経済産業大臣)が適切に規制権限を行使し、「長期評価」に基づくO.P.+15.7mの津波に対する安全性の確保を被告東電に命じていれば、被告東電は、非常用電源設備の設置されたタービン建屋等の水密化及び重要機器室の水密化を実施し、全交流電源喪失による本件事故は回避可能であったと認められる」(福島地裁判決)、「被告国は、遅くとも平成20年3月頃には、(中略)規制権限を行使して、被告東電において、本件結果回避措置を講じさせるべきであった」(前橋地裁判決)として、国の違法性を認め、千葉地裁とは見解を異にした。

V. 原賠法と民法709条

1. 責任集中と国の賠償責任

原子力損害の賠償に関する法律(昭和36年6月公布)(以下、原賠法)の3条は、原子力事業者の、無過失責任及び無限責任(1項本文)、異常に巨大な天災地変又は社会的動乱によって生じた原子力損害についての免責(1項ただし書き)を定めている。続く4条は、原子力事業者について責任の集中を定め、原子力損害について原子力事業者以外は賠償責任を負わないものとしている。

しかし科学技術庁原子力局監修『原子力損害賠償制度〔改訂版〕』(通商産業研究社、平成3年)では、「第3条第1項及び第2項の規定は、原子力損害につきそれぞれ無過失責任を負うべき者を定めているが、その原子力損害の発生につき原因を与えている他の者が民法又はその他の法律(国家賠償法、自動車損害賠償保障法等)に基づいて責任を有する場合においては、これらの者もまた(無過失責任ではないにしても)賠償責任を有するものとみなされる余地がある」と述べられている。またそもそも、憲法17条には、「何人も、公務員の不法行為により損害を受けたときは、法律の定めるところにより、国又は公共団体に、その賠償を求めることができる。」と記されている原賠法4条に責任集中が定められているといえども、国が原子力損害の賠償責任を免れることはできないとする解釈が、近年の学会の定説である。3つの集団訴訟でも、原賠法4条に基づく国の免責を主張していない。

2. 民法709条に基づく損害賠償請求

3地裁において、原告らは、被告東京電力に対し、主位的に民法709条に基づく損害賠償を請求し、原賠法3条1項に基づく損害賠償請求を予備的なものと位置付けた。しかし、「原賠法3条1項は民法709条の特則を定

^{iv} 昭和40年6月15日通商産業省令第62号。4条1項は「原子炉施設並びに一次冷却材又は二次冷却材により駆動される蒸気タービン及びその附属設備が想定される自然現象(地すべり、断層、なだれ、洪水、高潮、基礎地盤の不同沈下等をいう。ただし、地震及び津波を除く)により原子炉の安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置、基礎地盤の改良その他の適切な措置を講じなければならない」としている。

めたものであって、原賠法3条1項が適用される場合においては、民法上の不法行為の責任発生要件に関する規定はその適用を排除されると解するのが相当である」(前橋地裁判決)として、民法709条に基づく請求については、いずれも棄却した。

では、原賠法3条1項に基づく原告らの損害は、どのように判断されるのか。そもそも、原子力損害賠償については、「原子炉の運転等が多量の被害をもたらす特別の危険を内包するものであるから、そのような特別の危険から発生した権利侵害について原子力事業者が責任を負うという危険責任の考え方」が採用され、「原子力損害賠償責任は、過失責任ではなく危険責任原理により正当化される」²⁾。

その上で、前橋地裁判決においては、「原賠法3条1項に基づく損害賠償請求にあたっては、原子力事業者において過失の存することは要件とされていないもの」という前提を起しながら、原告らが慰謝料算定における考慮要素として挙げた非難性については「慰謝料算定における考慮要素において検討する」とし、「被告東電には、本件事故発生に関し、特に非難するに値する事実が存するというべきであり、被告東電に対する非難性の程度は、慰謝料増額の考慮要素となると考えられる」とし、慰謝料増額の考慮要素としての過失を認めている。さらに被告国に対する非難性と連動するとしている。

また、福島地裁判決においても、「長期評価」から予見可能なO.P.+15.7mの津波に対する対策を怠った結果、本件事故に至ったのであるから、被告東電には過失があるといえる」としながら、「故意やそれに匹敵する重大な過失があったとまでは認め難い」とも述べ、過失を認め、その程度を判断している。

一方、千葉地裁判決においては、「被告東電に、本件事故の発生について故意又はこれに匹敵し慰謝料を増額することが相当といえるような重大な過失があったということはできない」とした。しかし、「本件事故の影響が極めて広範囲に及び、個々の避難者も突然の避難を余儀なくされたということを踏まえると、損害の内容によっては、損害の主張立証をすることが極めて困難である場合があり得る。中間指針等及び賠償基準の考え方は、このような観点から、多数の避難者に共通する損害の賠償基準を策定し、被告東電は、中間指針等及び賠償基準の考え方を踏まえて策定した賠償基準により、一定の資料の確認ができた場合には賠償を行い、本件でも同基準に基づき一定の範囲では争わず賠償することを認めている。そうすると、上記のような損害の主張立証責任も踏まえ、被告東電が認める限度の金額についてはそれを損害として認定し、それを超える請求部分については、超過分の損害の発生及び金額の立証がされているかどうかを判断することが相当である」と、損害の主張立証は被害者保護に欠けるとの観点を示すと同時に、「避難指示等

により避難等を余儀なくされた者は、(中略)平穏な生活を送る利益を侵害されたといえることができる。このような利益は憲法13条^v、憲法22条1項^{vi}等に照らし、原賠法においても保護されるものといえるべきである」として、「地域コミュニティ等の生活基盤を喪失したことによる精神的苦痛」は「避難生活に伴う慰謝料では填補しきれないものであるといえる」と判断し、中間指針等では認められていないとして、「ふるさと逸失慰謝料」というワンショットの精神的損害を認めた。

VI. 機構スキームへの影響

東京電力が現在、損害賠償支払いについて被害者と合意済みの損害賠償総額は、約6兆5,000億円である。東京電力の資力をはるかに上回るこの損害賠償が迅速かつ適切に行われるために、国は原子力損害賠償・廃炉等支援機構(以下、機構)に対して交付国債による資金交付を行い、東京電力は機構から資金援助を受け、損害賠償支払いに応じてきた。東京電力が機構を通じて受け取った国からの援助資金は、東京電力が毎年の事業収益等を踏まえ特別負担金を、東京電力に加え、他原子力事業者が相互扶助のもと一般負担金を、それぞれ機構に納め、機構は国庫に返納することになっている。一般負担金は、総括原価方式のもと、原価に組み入れ電気料金に転嫁される。いわゆる機構スキームである。

仮に3訴訟での、中間指針等を上回る賠償を命じた判決を全賠償に拡大適用すれば、前橋地裁判決ケースで約3,000億円、福島地裁判決ケースで約1,000億円、千葉地裁判決ケースでは約6,000億円の賠償額の上昇が見込まれ、東京電力はもちろん、原子力事業者の負担も増えることが予想される。

仮に今後、上級審において東京電力の過失認定を含む判決が確定した場合においても、個別の事案についての判決の確定を以て、直ちに「賠償すべき損害と認められる一定の範囲の損害類型」を示したものである中間指針の改定を要するものとも思われぬが、仮に、将来的にその必要性が生じたとしても、これらの判決においては、過失の有無・程度によって精神的損害の額が増加するところ、中間指針等の精神的損害の額は、過失責任である交通事故等における自賠責保険の慰謝料を参照して改定しており、中間指針等の精神的損害の額を増額改定する必要はないと考える。

なお、交通事故の裁判例で、加害者の重過失を理由に精神的損害を増額した例はあるものの、その増加額は、

^v 「すべて国民は、個人として尊重される。生命、自由及び幸福追求に対する国民の権利については、公共の福祉に反しない限り、立法その他の国政の上で、最大の尊重を必要とする。」

^{vi} 「何人も、公共の福祉に反しない限り、居住、移転及び職業選択の自由を有する。」

過失の程度を含む様々な個別事情を踏まえて、1~2割程度に止まっている。

Ⅶ. 安全規制への影響

原子炉等規制法は、福島第一事故後の平成24年6月に改正され、この法改正に基づき、新規制基準が制定された。新規制基準は、重大事故対策の強化、最新の技術的知見の取り入れが図られ、すでに設置許可を得た原子力施設にも適合が義務付けられている。この法改正以降、原子力規制委員会が、原子力発電所の新規制基準への適合審査を実施している。原子力事業者は、総額4兆円を超える追加安全対策投資^{vii}を実施しており、再稼働なしには投資回収の見込みは立たず、原子力事業の持続可能性は極めて厳しいものになる。

今回の3訴訟において、判決はいずれも国および東京電力の予見可能性について肯定したが、仮に上級審でも予見可能性が認められることになれば、新規制基準への適合審査において、リスクを示す知見が仮説としても出された場合、知見の成熟度を無視した規制権限行使が義務付けられることにもなりかねない、との懸念が原子力事業者や関連事業者にある。

国は3訴訟において、規制権限不行使の違法に係る予見可能性が認められるためには、客観的かつ合理的根拠をもって形成、確立した科学的知見に基づく具体的な法益侵害の危険性が予見できることが必要であると主張してきた。「原子力規制において「絶対的安全性」までは求められておらず、求められるべき安全性が「相対的安全性」を前提とした一定レベルの安全性であることから導かれる当然の帰結ともいえる」(控訴理由書)^{viii}。

「なぜなら、仮に、客観的かつ合理的根拠を持って形成、確立した科学的知見がなくとも、抽象的な法益侵害

の危険性の示唆さえあれば、これに対し、規制権限を行使すべきというのであれば、原子力施設は抽象的には危険を内包しているものである上に、人知に限界があることは科学の常識であるから、その危険が現実化するリスクもあるということになり、「抽象的な法益侵害の危険性の示唆」という前提条件が常に満たされることになるし、社会的に許容できるリスクというものも観念できないことになるから、実質的に原子力規制に「絶対的安全性」を求めるほかならないからである。(中略)工学的判断に依拠しない対策というのは、リスクの優先度を考慮しない誤った判断を是認することになる」(同)。上級審は将来の原子力規制のあり方を大きく左右することになる。

— 参考資料 —

- 1) 最高裁平成元年11月24日第二小法廷判決・民集43巻10号1,169頁[宅建業者訴訟]、最高裁平成7年6月23日第二小法廷判決・民集49巻6号1,600頁[クロロキン薬害訴訟]、最高裁平成16年4月27日第三小法廷判決・民集58巻4号1,032頁[筑豊じん肺訴訟]、最高裁平成16年10月15日第二小法廷判決・民集58巻7号1,802頁[水俣病関西訴訟]、最高裁平成26年10月9日第一小法廷判決・民集68巻8号799頁[大阪泉南アスベスト訴訟]。
- 2) 豊永晋輔『原子力損害賠償法』(信山社、平成26年)。

著者紹介



遠藤典子 (えんどう・のりこ)

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科(専門分野/関心分野)エネルギー・環境政策をはじめとする公共政策、リスクガバナンス

^{vii} 2017年中頃時点、各事業者の公表ベース

^{viii} 「前橋地裁判決を受け、平成29年5月18日に東京高等裁判所に提出された控訴理由書」

広島高裁の伊方再稼働停止判断を考える

春の年会で学会が特別セッション

本誌 佐田 務

広島高裁は昨年12月に、四国電力伊方3号機の運転停止を求める仮処分を決定した。原発の設置許可や運転の可否をめぐる訴訟において、かつての司法は行政や原子力事業者の主張を認める判断を下すことがほとんどだった。けれども福島原発事故を潮目として、司法判断は住民側の主張を認める例がわずかずつだが増える傾向にある。ここでは広島高裁の仮処分決定内容に焦点をあてた原子力学会のセッションのようを紹介する。

KEYWORDS: *injunction, Ikata NPP, court, Japan Nuclear Regulation Authority, a caldera volcano, eruptions, volcanic hazards in site evaluation for nuclear installations*

この裁判は広島市などに住む住民が2016年3月に、四国電力伊方発電所3号機の運転差止を広島地裁に求めて始まった。提訴をうけて広島地裁は2017年3月に、住民側の訴えを退ける内容を決定。これを不服として住民らは広島高裁に異議を申し立てていたもの。広島高裁は2017年12月に、原子力規制委員会が定めた火山影響評価ガイドを厳格に適用すれば、9万年前の阿蘇山噴火で起きた火砕流が敷地に到達した可能性が十分小さいと評価できないとして広島地裁の決定を覆し、今年9月未まで伊方発電所3号機の運転を認めない決定を下していた。

これをうけて原子力学会では、この仮処分の決定内容について理解を深めるために、春の年会において特別セッションを企画。四国電力や法曹、火山学の有識者がそれぞれの立場や視点から意見や分析を述べた。

最初に登壇したのは四国電力で訴訟を担当している瀧川重理登氏。同氏は広島高裁抗告審における伊方発電所3号機運転差止仮処分決定について、次のように述べた。

広島高裁の決定内容

新規制基準の合理性などが争点とされた今回の抗告審では、基準地震動・基準津波の策定や、重大事故対策などについて新規制基準は合理的で、伊方3号機が新規制基準に適合するとして原子力規制委員会の判断も合理的であるとしている。

Discussion about the provisional injunction issued by Hiroshima High Court barring operation of Ikata NPP unit#3: Tsutomu Sata.

(2018年4月10日 受理)

一方、火山事象に対する影響評価については、新規制基準に適合するとして原子力規制委員会の判断は不合理であり、抗告人らの生命身体に直接的かつ重大な被害を受ける具体的危険の存在が事実上推定されるとし、期限付きの運転停止の決定がなされた。

今回の広島高裁の決定では、四国電力の火山影響評価に対し、現在の火山学の知見では伊方発電所の運用期間において火山の活動性が十分小さいと判断することはできず、新規制基準適合性審査において審査官が評価の妥当性を判断する際に参考している「原子力発電所の火山影響評価ガイド(原子力規制委員会決定)」に従うならば、過去最大の噴火規模(阿蘇4噴火)を考慮すべきであるとしている。

また、過去の阿蘇4噴火による火砕流が到達した可能性が十分小さいとは言えないことから、立地は不適であるとしている。さらに火山灰についても、想定している噴火規模が過小であることから、想定している堆積量も過小評価であるとして、四国電力の主張を認めなかった。

運用中に巨大噴火が発生する可能性は十分小さい

火山事象に対する評価について火山影響評価ガイドでは、設計では対応できない火砕流などの火山事象が原子力発電所に到達する可能性が十分小さいこと(立地評価)や、火山灰などの影響により原子力発電所の安全性が損なわれないこと(影響評価)の確認を求めている。

なお、伊方発電所から約130km離れている阿蘇カルデラで約9万年前に起こった阿蘇4噴火は、過去約260

万年間(第四紀)で最大規模の噴火である。巨大カルデラ噴火には珪長質の巨大なマグマ溜まりが必要だが、阿蘇の地下に大規模な珪長質マグマ溜まりはなく、その他のマグマ溜まりも巨大カルデラ噴火を示唆するようなものではないことなどから、運用期間中に同様な噴火が起こる可能性は十分小さい。

また、阿蘇4噴火の際に発生した火砕流については、伊方発電所までの距離が130kmあることや火砕流の流れを妨げる地形的な障害があること、さらに四国では阿蘇4火砕流堆積物が認められないことを考慮すれば、伊方発電所の敷地には到達していないと評価できる。

なお阿蘇で巨大カルデラ噴火が起こる可能性は十分に小さいことから、火山灰については九重山の噴火を想定。風向きなど厳しい条件のもとで解析した結果、発電所敷地で最大で15cm堆積すると評価され、これによる施設の安全性に影響がないことを確認している。

一方、今回の高裁決定には、判断の過程に不備がある。運転差し止めが認められるためには、伊方3号機の事故によってどのように生命や身体に被害が及ぶのか、その可能性はどれぐらいかについての検討が必要だが、広島高裁の判断はその検討を怠っている。特に大規模噴火が事故原因となる場合、噴火そのものが原因で重大な被害が発生する可能性が高い。こうした事情を全く考慮していない高裁の判断過程には不備がある。

また、広島高裁は、原子力規制委員会が専門技術的裁量を有することを重視する姿勢を示している。だからこそ、原子力規制委員会が策定した火山ガイドを厳格に適用すべきだとする一方で、原子力規制委員会が厳格に審査した結果は軽視し、自らの判断を優先して会社の評価を否定している。こうした高裁の判断は矛盾しており、不合理である。

なお当社では2017年12月21日、この決定を不服として広島高裁に異議申立てを行い、2018年1月31日には阿蘇が大規模なカルデラ噴火が起こるような状態ではないことを主張する書面を提出した。加えて、3月末を目途に、火山事象への立地評価および影響評価について、最新の文献や専門家らの意見書等を揃えうえて、当社の主張の詳細を補充する書面を提出するべく準備を進めている。当社としては、裁判所に一日でも早い判断をいただきたいと考えており、引き続き、伊方3号機の安全性に係る主張・立証に全力を尽くしていく。

広島高裁は「可能性が十分小さい」根拠を求めた

続いて中央大学の安念潤司氏が登壇。原子力規制の特色や規制基準に対する司法判断、広島高裁の判断過程などについて、法曹の視点から次のように述べた。



原子力規制委員会が定める火山ガイドは、サイトから

160km以内にある第四紀火山について、発電所の運用期間中に活動の可能性を評価し、それに伴う火砕流が発電所に到達する可能性が十分小さいと評価できない場合には、その原子力発電所の立地は不適となるものがある。

なお、今回の決定の焦点となった火山事象、とりわけ阿蘇カルデラについて四電は、

- ①火山活動が活発な地域で発生するといわれる低周波地震が中岳(阿蘇山)付近の地下深部に認められるものの、他には認められない。
- ②マグマ溜りの存在を示唆する地震波低速度領域が、中岳火口直下ではなく約3~4km西の草千里南部の地下約6km付近に存在するものの、地下10km以浅に大規模な低速度異常は認められない。
- ③カルデラの深さ15~21kmに広がる低速度領域が認められ、5~15%のマグマもしくは10~30%の水が含まれている可能性があるが、特定には至っていないし、この低速度領域が大規模なマグマ溜まりであるとしても、その分布深度は非常に深く、近い将来の破局的噴火を示唆するものではない。

という根拠により、近い将来に噴火する可能性は極めて低く、発電所運用期間中における噴火はないものと評価した。

また、火砕流については、発電所敷地と阿蘇カルデラの距離は約130kmあり、その間には佐賀関半島や佐田岬半島などの地形的障害があることを考えあわせれば、阿蘇4火砕流は敷地まで達していないものと考えられると評価している。

ここで争点となるのは、

- ・阿蘇カルデラについて、発電所の運用期間中の噴火の可能性が十分小さいと判断できるか否か。
- ・噴火の可能性が十分小さいと判断できないとすれば、火砕流が原発サイトに到達する可能性が十分小さいと判断できるか否か。

という点にある。

一方で巨大噴火の時期、場所などを予測する方法や、マグマ溜りの状況を高精度で観測する方法も確立されていない。そのような中で今回の広島高裁は、現時点の火山学の知見を前提とした場合に、原子力発電所の上記運用期間中における検討対象火山の活動可能性が十分小さいかどうかを判断できると認めるに足りる証拠はないとしている。

この広島高裁の判断とは異なり、例えば福岡高裁宮崎支部は、少なくとも破局的噴火については、その発生の可能性が相応の根拠をもって示されない限り、発電用原子炉施設の安全性確保の上で自然災害として想定しなくても、当該発電用原子炉施設が客観的にみて安全性に欠けるところがあるということではできないという判断を示している。

これに対し広島高裁は、現時点の火山学の知見を前提とした場合に、原子力発電所の上記運用期間中における検討対象火山の活動可能性が十分小さいかどうかを判断できると認めるに足る証拠はないとの立場をもとに、四国電力が行った地質調査や火砕流シミュレーションからは、阿蘇カルデラ噴火の火砕流が伊方発電所敷地に到達した可能性が十分小さいと評価することはできないから、原発の立地は不適であるとした。

これらの司法判断を整理するならば、将来の大規模噴火の可能性予測が不確実である中で、

- ・広島高裁は「その可能性が十分小さいという根拠を示せ」
- ・松山地裁や福岡高裁宮崎支部は「その可能性が十分小さいとは言えない根拠を示せ」

という考えが、それぞれの判断の根底にあると分析できる。

内規が規制基準ならば、明確性が必要

一方、許認可の基準は明確でなければならず、通常は省令(施行規則)レベルで具体的な数値が記載されていることが多い。ところが原子力規制では、設置許可基準規則などの法規命令を見ても具体的な規制数値が記載されていることは少なく、内規である火山ガイドで初めて具体的な規制数値がでてくる。しかし、法形式上は内規であっても、実質的な規制基準となっているならば、他の規制行政における省令(規則)と同様に明確性が求められるべきと考える。ここには、規制委が定める内規である「火山ガイド」の規定の曖昧さがある。

この点について原子力規制庁は今年3月7日に、巨大噴火の可能性の評価については、「現在の火山学の知見に照らした火山学的調査を十分に行った上で、火山の現在の活動状況は巨大噴火が差し迫った状態ではないことが確認でき、かつ、運用期間中に巨大噴火が発生するという科学的に合理性のある具体的な根拠があるとはいえない場合は、少なくとも運用期間中は、『巨大噴火の可能性が十分に小さい』と判断できる」との見解を示した。

国土が火山灰で覆われる噴火の確率は100年で1%

三番目に火山学の専門家である神戸大学の鈴木桂子氏が登壇。「カルデラ火山と巨大噴火」というタイトルで次のように述べた。



日本には111個の活火山が存在する。その大部分は、山体を形成し、頂部で噴火を繰り返すタイプの火山である。

火山噴火の規模は火山爆發指数(VIE)を用いて表現される。火山爆發指数とは、爆發的な噴火の規模を知るために噴出する火砕物の体積を0から8の9段階に分ける

もので、VEI=0は $10m^4$ 以下、VEI=1は 10^4m^3 …と桁が上がるごとに規模が増える。火山噴火は日本列島で数年に1度程度発生するが、通常の火山体で発生する爆發的噴火はせいぜいVEI=5までである。

一方、火山噴火は火山体で発生するだけではない。火山地形の中にはカルデラと呼ばれる鍋型の凹地地形を形成する噴火も存在する。VEI=6以上の噴火に相当するのがカルデラ噴火である。カルデラ噴火とは、一気に大量のマグマを噴出することにより地下のマグマ溜まりが空洞化することにより地表を支えきれずに陥没を起こした結果、地表に直径が2km以上の凹地が形成される噴火を指し、そのようなカルデラをカルデラ火山と呼ぶ。

カルデラ火山の噴火はまず、プリニー式噴火と呼ばれる噴煙柱高度が数10kmに及ぶような噴煙柱を形成する噴火で始まる。その後、噴煙柱が崩壊することにより火砕流が発生する。

この火砕流は全方位型で、四方八方に発泡したマグマのかけらや細粒火山灰や石質岩片と高温のガスとが混合した粉体流が高速で地表を流走する。噴出源近傍では、大量の火砕流堆積物が地形的な低所を厚く埋め立て火砕流台地を形成する。給源から遠ざかるにつれて谷を埋め立てながら火砕流堆積物を残し、流送距離は155kmを超えることもある。また流走する火砕流から上空に舞い上がった火山灰は偏西風に乗り、広範囲に降下堆積することとなる。

約3万年前に鹿児島湾北部の始良カルデラでは、大きな噴火が起こった。この時の火砕流は熊本・宮崎県で達し、南九州の動植物はほとんど全滅した。鹿児島県のシラス台地はこの時の噴出物で形成されたもので、火山灰はほぼ日本中を覆ったとされている。このような噴火現象は、日本列島では100年に1%の確率で発生すると推定される。



また、コメンテータとして登壇した法政大学の宮野廣氏は、「このような問題に対して原子力規制委員会は技術的判断を明確にし、さらなる対策が不要であることを審査書に明記する必要がある。また、規制委員会が定めている火山ガイドが示す内容は曖昧であり、外的事象に対する限界を明記すべきだ」と指摘した。

さらに司法判断については「社会通念上、このような大規模火砕流が地域全体を覆うような事態に、原子力発電所の安全確保を求める必要はないという判断がある。また、原子力分野の高度な技術的判断が求められる裁判については、そのための専門の裁判所を置くことも、一つの方策である」と述べた。

*本原稿は当日の講演内容を、予稿集や当日の放映資料などで一部補足しています。(文責は本誌)

From Abroad

Scientific Wanderlust Across The Ocean

—海の向こうからの研究放浪記，オランダから日本へ—

福井大学 Willem Van Rooijen

1999年の夏、デルフト工科大学の学生として日本の研究機関や企業を見学しに来日した。そしてその最初の東京の数時間で私の人生が変わった。卒業後、日本に職を求めるのは簡単ではなく、しばらく米国ジョージア工科大学で働いたあと再来日を果たし10年になる。はじめ日本の文化はヨーロッパや米国に似て分かりやすいと思ったりしたが、日本はやはり基本的にヨーロッパとは異なる。自分の生まれ育ったヨーロッパ文化のフィルターを完全に消し去ることはできないが、「外部観察者」でいることにもまたメリットがある。私の日本での日々と思いを「外部観察者」の目から綴ってみたい。

KEYWORDS: *The Netherlands, cultural differences, approaches to problem solving, safety culture*

I. はじめに—日本との出会い

最初に日本に来たのは、1999年の夏、オランダのデルフト工科大学応用物理学科の4年生の時であった。私たちは学生28人で日本における「応用物理学」の研究機関と会社を見学しにやって来た。成田空港に着陸して、それから電車で東京まで。初めて日本の景色を見て大変な「ショック」を受けた。当惑した。私の出身地のオランダでは、全てがきちんと整理されている。畑は四角、道は真っすぐ、景色はどこでも「平」、住宅は全て一緒。それで、日本は…完全な混乱！うっとりとした。10時間の飛行で結構疲れていたし、成田から東京まで1時間は超えたと思うが、電車の窓からずっと景色を見ているうちに、列車はくねくねと蛇みたいに東京の中心の上野駅まで行った。私たちは地下鉄の銀座線に乗り換えて、最後にホテルまで歩いた。東京は梅雨の季節で、これまでの人生で見たこともない大雨。ホテルのロビーに着いたら、みな口々に「暑い！」「こんな雨は信じられん！」「もういや！」。でも私は、道を見ながら、「ここって本当に魅惑的だな」と思った。あの最初の東京の数時間で人生が変わった。

オランダに帰国したあと、ライデン大学と東京にある日蘭学会の1年間の交流プログラム「Japan Prizewinners Programme (JPP)」に申請した。JPPで初めて日本語を勉強したが、これは魅力的な経験になった。高校生時代

Scientific Wanderlust Across The Ocean ; From the Netherlands to Japan : Willem Van Rooijen.

(2018年2月5日 受理)。(原文日本語)



図1 オランダのチューリップ畑

の一番好きな科目は古典ラテン語と古典ギリシア語で、その他に、オランダ語、英語、フランス語、ドイツ語とロシア語を勉強した。文法、構文、語族、語源、形態論。ヨーロッパの言語は、語族から見るとよく似ているので、文法などはほぼ一緒である。フランス語を読めるなら、イタリア語とスペイン語もある程度理解できる。日本語は全く異なった！それまでに勉強した言語と全く関係がなかった。だから言葉をすべて「暗記」しないとイケなかった。文字はアルファベットと全く異なっていた。漢字、ひらがな、カタカナの書き方は、「完全な一貫性」と同時に「完全な混乱」。日本語の勉強は完全な「新たな経験」となった。

JPPでつくば市の産業技術総合研究所でロボットの音声認識関係で7ヶ月研修した。産総研の指導官はバイクを持っていて、そのバイクを使わせてくれた。そうすると、この世の中の一番好きなことが結びついた：「日本」と「バイク」。バイクでどこまでも行った。福島県の会津若松、日光、富士山、飛騨高山、仙台…。JPPで日本語を



図2 バイクに乗る筆者



図3 ジョージア工大のあるアトランタ市街

勉強したので、少なくとも、少し日本語を話せて、旅行でたいへん役に立った。

JPPの1年間が終了してから、オランダに帰国し、デルフト工科大学の原子炉研究所と応用物理学部の原子炉物理学部門のドクターコースに入学した。博士論文は第4世代高温ガス炉の核燃料サイクルだった。卒業の1年前から、日本のポストを探したが、何とも上手く行かず、結局、米国ジョージア州アトランタ市にある「ジョージア工科大学」の原子力専攻に助教として就職した。アメリカの仕事は面白かったけど、日本にまた戻りたかった。2008年の2月に福井市で開催された国際会議に出席したら、以前にメールで相談ののってくれた福井大学の望月教授と会った。望月先生が2009年度から発足する予定の「附属国際原子力工学研究所」について説明してくれ、その瞬間、アメリカの仕事を止めて福井大学に転職することにした。結局、2009年の6月から、日本原子力研究開発機構の「特別研究員」と福井大学の「研究員」として、また日本にやって来た。

II. 文化のフィルターについて

自分の文化と異なる環境で生活すると、奇妙な経験をするようになる。新しい環境に入ってしばらくすると、新しい環境を理解できたと思いはじめ。が、実際には新しい環境の基本はまだ理解できていない。新しい環境の理解にはやはり長い時間がかかる。でもその結果、「日本」という国の文化は、表面的に「ヨーロッパまたは米国の文化」に似ていると思ひ、外国人として「分かりやすい環境」であると判断してしまう。しかし、実際の日本文化は非常に分かりづらいと思う。日本の文化はやっぱり「基本的に」ヨーロッパと違う。

「新しい文化」を勉強すると、「自分の文化」の勉強にもなる。私の場合、「オランダの考え方」と「日本の考え方」の違いが問題となる。そういう場合、「正しい」考え方があるのか？深い理解のために、その二つの考え方（哲学とも言える）が違う理由と原因を説明しないとイケないので、自分の文化と新しい文化の両方を評価する必要が

ある。そして、新しい文化の勉強は大変時間のかかる仕事になる。私の場合、毎日、日本について勉強して、もうそろそろ10年になる。

われわれ人間には、この世の中における出来事の原因、理由、それからその意味の解析のために「文化のフィルター」が備わっている。科学者、工学者として、自分のことを「合理的」であると思っているが、「合理的」の意味も、文化によって異なる。人間として、自分の文化のフィルターの影響を完全に消し去ることは非常に難しい。たぶんそれは不可能である。一方で、多少奇妙に聞こえるが「外部観察者」でいることにはメリットがある。「外部観察者」はその地の文化的背景を持たないからだ。

文化のフィルターに関して、一つの例を紹介したい。私の一番好きな日本の映画は伊丹十三監督の「タンポポ」である。表面的には「タンポポ」は「ラーメンの映画」であるが、実は日本の社会に対する非常に微妙な風刺でもある。そういう微妙な風刺性は、日本人にとっては当たり前のことだから、あまり気づかないと思う。文化のフィルターの影響で、日本人にはそういう「当たり前のこと」の珍しさが見えず、理解できないのではないだろうか。

III. 原子力安全の文化

原子力安全文化にとって「外部観察者」的観点の重要性に異論の余地はない。安全基準の国際的なピアレビューが強調される理由である。福井大学に来てそろそろ10年になる。この期間にフクシマの事故があって、事故に伴う様々な議論に接した。ここで、「外部観察者」として原子力の安全文化に関する私の意見を紹介したい。下記に紹介することは日本の専門家の皆さんにもよく分かると思うが、その安全文化への影響は往々にして過小評価される。

まず、「問題解決への日本型アプローチ」について。ここで、日本の文化を、私に経験があるヨーロッパおよび米国の文化と比較する。単純に言えば、日本人は「処理・方法」に向かい、ヨーロッパ人は「目的」に向かい、米国人は「結果」に向かう。これを私の好きなバイクにあてはめ

るなら、日本人の工学者は「このバイクはどうすれば作れるのか」(過程)、ヨーロッパ人の工学者は「どういうバイクを作るべきか」(構想)、それから米国人の工学者は「どういうバイクを作れば利益が出るか」(結果)を考える。

構想、過程、結果は3問とも重要であり、成功する「ものづくり」のためには3問とも解答しないとイケない。ここで説明したいのは、問題の順番である。日本の文化では「処理過程・方法」が第一となるので、他の問題が忘れられる恐れがある。日本人の考え方は科学分野でも確認できる。日本人が書く論文の表題には「…の手法開発」、「…計算手法の改良」、「…の評価方法」などが多く見られる。伝統的な日本の茶道も非常に目立つ例である。茶道の目的は、あくまでもお茶であるけれど、茶道では「正しいお茶の入れ方」は結果よりも重要である。

原子力ではどうか。原子力規制の枠組みでは「処理・方法」への集中により、「規制の目的」よりも、「規制の方法」に終始する恐れがある。規制において、「査察方法」では考慮されていない不安全な状態を見逃す恐れがある。その他に、不安全な状況についての組織的な知識また個人的な知識があっても、査察方法のみを遵守して評価した結果、問題を見逃してしまう恐れがある。

IV. 誤りのタブー

第2の日本の文化の特徴として、「誤りのタブー」がある。日本人は危険回避行動で生きている。この特徴に関しては、メリットとデメリットがある。例えば、授業中に学生に質問しても、返事が間違っていると恥ずかしいと思うためか、誰も返事してくれない。学生は海外の研究者などとあまり話さない。英語での会話に自信がないため、間違っていると大変だ、何も言わないほうが良いと思うのだろう。オランダでは、そういう「非コミュニケーション」は、特に「上司」から声をかけられた場合など、非常に失礼である。日本社会では、「非コミュニケーション」の失礼よりもまず「誤りのタブー」を恐れる。

「誤りのタブー」の最大の問題は「誤りの告白」が非常に難しくなることである。原子力安全のためには、安全基準を最新の知識に基づいて改良し、施設を遅滞なく基準に適合させ、その経緯を常に公知するサイクルを回すことが常識でありまた必須でもある。ところが日本では「基準の改訂」や「施設の改善」が、「何か問題があった」ということだと評価され、その結果このサイクルが著しく遅れる。「社会」の責任も指摘させて頂きたい。合理的な社会において、誤りや不正について合理的に議論し、合理的に解決すべきである。そうしないと、問題が過小評価されてしまい、非常に危険な状況になる恐れがある。

V. 個人の独立

第3の日本の文化の特徴として指摘したいのは、「独立性の欠如」である。特にヨーロッパの文化と比べたら、

日本の文化で「独立性」はあまり評価されない。ここで、「独立性」の意味は、「個人的な責任」になる。オランダの大学院生の時に、「鉄道の安全文化」についての講義があった。先生は鉄道の工事の安全確保の専門家だった。先生の説明によると、工事の労働者の安全確保の責任は必ず1人。2人や3人は絶対ダメだと言われた。理由として、(1)安全確保に複数の担当者があると、担当者同士が互いの判断を信じて、何か不安全な状態になっても、お互いの反応を待ってしまい、対応が遅れる可能性が大きくなる。(2)1人の担当者が不安全な状態を確認しても、2人目が反応しないと、問題がないと思ってしまう。(3)もし事故になったら、安全性の担当者の個人的な責任を確認できなくなる。私は個人的にちょっと納得できないところもあるが、オランダの安全文化の基本は「1人の責任」である。

日本の文化では、「皆の協力が一番有効」、「グループは個人より強い」、「2人の知恵が1人の知恵より大きい」と考える。昔の原子力規制は、原子力を推進する経産省の分担だった。実は、そういう「独立性の少ない」状態にも色々メリットがある。メーカーや電力会社か困っているところ等は非常に早く解決できる。しかし、福島で日本の安全文化の考え方の弱点が明らかになってしまった。厳しい判断であればあるほど、多くの担当者があるせいで、担当者がお互いの判断を待ってしまう。

VI. 日本の大学とその研究環境について

これまで26人の日本人がノーベル賞を受賞した。このうち、14人が最近の10年の受賞で、「ハードサイエンス」(物理学、数学、天文学、化学、生物学等)が11人を占める。受賞した日本人の専門は物理学、化学、医学だった。ノーベル賞の実績からみると、日本の研究環境は世界水準にあることは間違いない。しかし、ノーベル賞研究は「歴史的な研究の成果」でもあるので、将来を保証してくれるものではない。

他の先進国と比べたら、日本の第3期の教育レベルは高い(第3期教育：高校などの中等教育を終えた人を対象とした教育段階)。OECDの統計を用いて確認したところ、「第3期教育達成率」は日本が世界で3番目になる(韓国とカナダは1番、2番である)。しかし、日本の大学院レベルの教育には大きな問題がある。「学生教育負担」(学生として教育のために払わないといけない金額)は世界で一番高く、進学(博士前期課程、博士後期課程と共に)の達成率は最悪の順になっている。100万人の人口当たり、日本に「博士」は135人(うち「ハードサイエンス」55人)しかいない。韓国：100万人当たり193人、イギリス：272人、ドイツ：290人。日本人の物理学の博士の1人に対し、ドイツには2人がいることになる。この点でも研究開発分野の未来には大きな不安を抱えている。

将来に向けて、博士後期課程の人材を増やすべきで、

才能ある学生に対して、進学を勧めるべきであると思う。複数の改良方法があるだろう。その1つは、アメリカの「Graduate Research Assistant」制度と同様に大学院生に毎月の給料を支給するといふ。「大学院生給料制度」は2つの大きなメリットがある。第1は、学生への負担を軽減し、アルバイトなどはしなくてもいい状態になり、研究に集中できるようになる。第2は能力の足りない学生は進学できなくなり(業績のない学生に誰もお金払いたくないわけ)、大学院生の平均水準が高まる。もう1つ改良できるところは、博士で卒業した社員と研究員の給料を増やすべきであると思う。

VII. 日本のものづくり

「ものづくり」は日本経済の要であるが、同様な商品を安く提供できる相手が出てきている。韓国と中国の自動車メーカーが市場に入り、日本のメーカーとほぼ同じ商品を半分の値段で提供できれば、非常に厳しい状態になる。携帯電話、パソコン、半導体のデジタル製品の市場では、外国のメーカーとの競争が激しく、利益幅は非常に少なくなっている。さらに、日本における社会の高齢化を考えるなら、将来に向け労働者の生産性の高度化が必要になる。高度の教育を受けた人材に基に利益幅の大きい「この世の中にまだない」商品を開発しないとイケないと思うが、現在の日本のメーカーが必要とする「イノベーションの力」はまだない。

すでに書いた日本の文化の特徴も災いして、日本のメーカーは投資を先延ばしする傾向がある。自分の研究開発よりも、米国、ヨーロッパのメーカーの研究開発と商品を勉強して、それから一番成功できると思われる技術を選択する。この行動は(部分的に)危険回避行動である。ほぼ完全にできている技術を選択すると失敗の確率は小さくなる。

日本のメーカーのやり方は時には有効である。リスクを少なくし、研究開発の予算もあまり必要ないのに高品質の製品を提供できる。一方、デメリットとして、新商品の市場参入は遅れ、「最新」、「最先端」の商品を提供できなくなってしまう。日本のメーカーの市場参入は、第



図4 筆者の住む古民家

2番目、第3番目になる場合が多い。最先端の商品を提供できないと利益幅の大きい商品が提供できない。

VIII. 日本での暮らし

2009年に日本に来た時は1年契約で来た。その1年契約は毎年延長が必要だったので、じっくり基本を作ることがあまりできなかった。しかしその後、福井大学の教員の募集があったので応募し、任期なしで採用されたときは本当に嬉しかった。仕事が安定したから、基本を伸ばすことができた。

一方私生活では福井県嶺南地方の集落にある古民家を買った。嶺南地方には、「空き家問題」があり、私が購入した古民家も空き家状態だった。日本の高齢化と少子化は嶺南地方でも大きな問題になっている。平均年齢が60歳を超える集落が多い。高齢化は問題でもあるが、好機でもあると思う。日本人は「実家」または「実家の土地」を売りたいくないので、空き家状態の家はどんどん増えている。でも、集落の生活には色々なメリットもある。子育てのいい環境にもなるし、物価が低い。例えば、長期間利用契約を結んで、空き家状態になった家を若者の家族に使ってもらおうといふ。家の解体補助金も考えられる。空き家になった建屋を解体して木を植え、動物と植物に優しい環境づくりもできる。場合によって、利益を取れる果樹園なども考えられる。最後に、利用されていない田んぼの長期間リースなども考えられる。長期間リースにより、田んぼを有効に利用して頂き、農業の雇用の機会にもなると思う。

IX. おわりに

日本の高齢化と共に、労働生産性を継続的に増やさないといけない。労働者の生産性向上は、機械と多量のエネルギーを必要とするので、安定したエネルギー資源、競争価格のエネルギー資源が必要になる。私の意見では、この条件を満たすエネルギー資源は「原子力」しかない。東日本大震災の前の自信を取り戻し、将来に向けての日本の原子力産業界の再活性化に期待している。

私は「日本」というところが好きなので、福井大学の仕事に精を出し、集落の生活を楽しみながら、私の小さな力で周りの人の生活に貢献できるといふと思っている。

著者紹介



Willem Van Rooijen (ウイレム・ファン・ローイエン)

福井大学附属国際原子力工学研究所
(専門分野/関心分野) 原子炉の数値解析、
核燃料サイクル評価、原子炉設計、新型炉

プラントへのIoT活用と安全・セキュリティ対策

IoTとCPSの応用可能性とCPS応用例

岡山大学 五福 明夫
 横河電機㈱ 仲矢 実

様々なモノをインターネットに接続し、モノの状態に関する情報を収集・分析してモノや環境を操作・制御しようとするIoT技術の開発や応用が盛んになってきている。また、コンピュータ上のサイバー世界と現実のフィジカルな世界(実世界)とを融合するCPS(Cyber Physical System)に関する技術も適用されつつある。本稿では、プラントへのIoT技術と安全・セキュリティ対策に関して、IoTとCPSの応用可能性およびプラントへのCPS応用例を紹介する。

KEYWORDS: *IoT, Cyber Physical System, Mirror Plant, Economic Model Predictive Control*

I. IoTとCPSとそれらの応用可能性

近年のマイクロデバイス技術、無線通信技術や、環境発電(エネルギー・ハーベスティング)技術の進展により、様々なモノがネットワークに接続されて、遠隔でのセンシングや制御を行う仕組みであるIoT(Internet of Things)の技術開発および適用が進められている。また、プラントの制御対象の状態をセンシングにより数値化し、定量的に分析・モデル化して、「経験と勘」として処理されていた様々な知見を有効に利用しようとするCPS(Cyber Physical System)の適用も盛んになってきている。

IoTやCPSでは、様々なセンサによって定量化されたデータを有効活用して、システムの制御性や特性を高めようとするものと捉えることができる。これらの技術の活用により、原子力プラントの運転や保守においても、安全性や効率をこれまで以上に高めることが可能であると考えられる。

そこで本解説では、3回にわたって、プラントへのIoT活用と安全・セキュリティ対策について、技術の現状や課題を解説する。第1回は、IoTとCPSの応用可能性とCPSのプラントへの応用例について解説する。また、第2回では、IoTの適用におけるリスクとセキュ

リティ管理についてまた、第3回では、IoTセキュリティ管理に対するセキュリティ心理学の考察を解説する。

1. IoTの応用と無線通信技術

(1) IoTによるモノの状態の監視と操作・制御

インターネットにセンシング機能を持つモノを接続することで、離れた場所にあるモノの状態センシングを通して、離れた場所の状態を知ることができる。例えば、温度、気圧、照度などをセンシングすることによる環境モニタリング、衝撃、振動、移動などをセンシングすることによるモーションモニタなどが考えられる。

また、インターネットにアクチュエータ機能を持つモノを接続することにより、離れた場所にあるモノの操作・制御を通して、離れた場所の状態を変えることができるようになる。応用例としては、照明機器やエアコンなどの家電機器の操作などがある。

さらに、モノあるいはインターネットに情報処理能力も付与すれば、モノの置かれた環境の様々な情報を収集して、離れた場所のモノ同士の状態も含めて情報を自動分析して、アクチュエータ(操作器)を介して制御・操作することにより、環境を望ましい状態へと変更することも技術的には十分できる。

このようにIoT時代の幕開けを迎えているが、IoTの概念自体は以前からあり、その代表的な成功例には、全世界で動いているブルドーザをはじめとする建設車両や建設機器の稼働状況管理システムや、航空機のエンジン

Applications of IoT to plants and issues of safety and security on the applications; Possibilities of IoT and CPS applications and a CPS application : Akio Gofuku, Makoto Nakaya.

(2018年1月20日 受理)

状況のモニタリングなどのデータの解析による新しい付加価値の創出などがある。当時の日本では、ハードウェアの製造販売を中心としたビジネス構造からサービス型産業への転身の好例として紹介されていた¹⁾。

原子力プラントのような工業プラントの操作・制御の大部分は遠隔操作化されている。IoT 技術を用いて多数のセンサによりプラント状態を詳細に取得して適切な操作・制御を行うことは、プラントの安全性の向上や運転の効率化が期待できる。例えば、これまでは巡回点検によって確認していた機器の状態を常時遠隔でモニタして、得られるデータを分析することにより、機器の異常を早期に検出したり、待機系の設備などが起動されたかどうかを現場に行かなくても確認したりすることができる。また、遠隔モニタリングで収集された膨大なデータを分析して将来の状態変化が推定できれば、適時な保守を行うことができよう。

(2) IoT 向けの無線通信技術

IoT においては、モノの情報は多くの場合無線通信を通して収集される。IoT の実現のために、WiFi や Bluetooth を補う無線通信方式として、短距離ナローバンド(狭帯域)で低消費電力な IEEE802.15.4²⁾がある。この規格は、利用周波数帯は 2.4GHz 帯で、ノイズに強い変調方式を用いており、双方向通信が可能で、強力な暗号化技術である 128 ビット AES 暗号を備えている。また、電池交換無しで年単位の駆動や環境発電素子による駆動が可能となっている。ただし、通信速度は抑えられている。

また、通信速度を低下させて長距離通信を実現した長距離ナローバンドの通信規格も作られている。

2. CPS と IoT

CPS は IoT と似た概念であり、両者とも実世界とコンピュータ内に構成されるサイバー世界を融合することに特徴がある。IoT は実世界にあるモノを中心とした見方で、モノがインターネットに繋がることを重視しているが、CPS は実世界の情報とサイバー世界の情報が融合することに重点を置いている³⁾。この観点の相違から、IoT はインターネットで繋がれた現実世界から見たデータ処理に関心が向けられている趣が強い。一方、CPS は必ずしもインターネットへの接続を前提とせず、全く異なる原理で駆動される世界同士、すなわち、コンピュータやプログラムが作るサイバー世界と、現実の装置やマシンを中心とするフィジカルな世界(実世界)の融合を重視している。このため、IoT と CPS とは区別される場合があるが、現在では、両者はほとんど同じものとして扱われている。

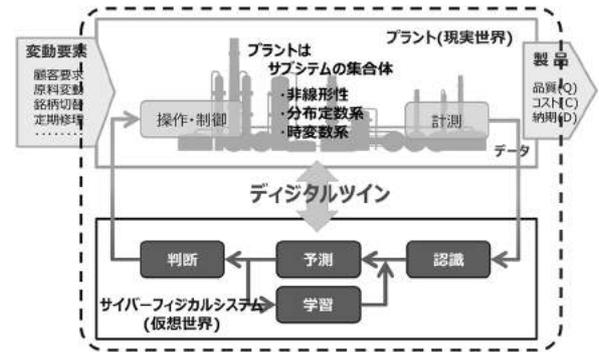


図1 プラントの仮想化とその活用

II. プラントへのIoT活用について

1. プラントのモデル化

コンピューティング技術、センシング技術、情報通信技術の発展により、IoT には適用性・機能性・効率性に磨きがかかり、俊敏に対応するシステム・精密に動作するシステム・人間を補完するシステムへと変貌を遂げつつある。IoT もしくは CPS の本質は、コンピュータが現実世界を扱いやすくするためのモデル化にある。また、現実世界を反映させたシミュレータを実システムと連動させた融合システムを構築することが重要となってくる。

ここで実在するプラントを仮想世界で表現するモデル化の注意点と活用目的について考察してみる。(図1)一般的にプラントはサブシステムの集合体である。その挙動は非線形的で、大きなスケールを持つため分布定数的な扱いが必要となる。また、化学プラントや石油精製プラントなどでは、触媒劣化などプロセス状態が時変数的に変化する。例えるならば、プラントはあたかも生き物のような振る舞いをし、時々刻々変化する状況下でエネルギーや素材の生産活動を行っている。これに加え、国際情勢や経済情勢により原燃料の多様化や変種変量生産などの入力条件や動作条件の変動がある。このような操業環境下でも、プラントはある決められた品質・コスト・納期を満たし製品を出力しなければならない。

モデルにより表現する仮想世界のプラントでは、仮想世界の特質を活かして、実在するプラントでの課題や問題点を解消しなければならない。仮想プラントの具体的活用方針としては、流体力学、化学工学など様々な知識の集合体であるプラントを理解するために知識の隙間を埋める手立てを実現する。また、現象の相互関連性が強いいためプラント全体の理解、関連性の気づきを促す仕組みを提供する。知識を活用して装置の内部状態を可視化する。精度の高い予測により現実世界での非常操作を支援する。実在の商用プラントを利用した限界運転実験などは不可能である。現実世界を可能な限り正確に模擬した仮想世界があればその応用は限りなく広い。

2. 現実と仮想を融合したミラープラント

筆者(仲矢)らは実在するプラントの状態をコンピュータ上に再現する“ミラープラント”を開発した⁴⁾。ミラープラントは、実在するプラントと共に同時並行で動作するダイナミックプラントシミュレータである。シミュレータでのプラントモデルには、原理・原則に基づく物理モデルが採用されている。プラントのオペレーションは、統計や確率によって決定されず、また、シミュレーションで使われるプラントモデルは、データが存在しない範囲でも現象を近似できるために、物理モデルを採用している。ミラープラントでは、制御システムが毎秒周期でプラントから集めてくるデータならびに制御情報をオンラインでシミュレータに与える。入力されたデータをもとにシミュレーションモデルパラメータを調整し、現在のプラント状態を忠実に表現する。

ミラープラントでは、“トラッキング”と“動的補償つきデータリコンシリエーション(DDR)”という2種類のシミュレーションモデルパラメータ調整機能がある。トラッキングは、プラントモデルの局所的な合わせこみを目的とし、以下の4つの演算が毎秒周期で処理される。

- (1) プラントモデルでの境界となっている点での温度、圧力、流量などをミラープラントへ取り込む。
- (2) 制御機器の目標値(SV値)、PIDパラメータ、上下限值などの制御情報をミラープラントへ取り込む。
- (3) レベル制御のように制御動作が遅い場合には実プラントでの計測値(PV値)をSV値とし、追従性を高めるために制御器の操作量(MV値)をフィードフォワード信号として与える。
- (4) 実プラントにおいて実際には制御されていない状態量であっても実プラントとシミュレーション結果を一致させる場合に、シミュレータでの計算値と実測値が一致するようにモデルパラメータを変更する。具体的な例としては、反応器の出口温度を実際の計測値と合わせるために反応速度定数を調整する。

トラッキングは毎秒周期で演算が実施されるため、限られたモデルパラメータしか調整できない。また、触媒劣化や熱交換器でのスケール付着による伝熱の劣化などゆっくりと変化する現象に対するモデルパラメータの調整法としてDDR技術を開発した。DDRは1日に1回のように長周期で動作するパラメータ調整処理である。一般的にデータリコンシリエーションは定常状態を仮定しているが、ミラープラントにおいては、各時間におけるプラントの状態量を計算し保持しているため変動量を得ることができる。実測値とシミュレーション値の残差の二乗和が最小となるデータリコンシリエーション技法に、この変動量を加味した演算を行いモデルパラメータ調整に応用した。

ミラープラントでは、トラッキングとDDRによる2

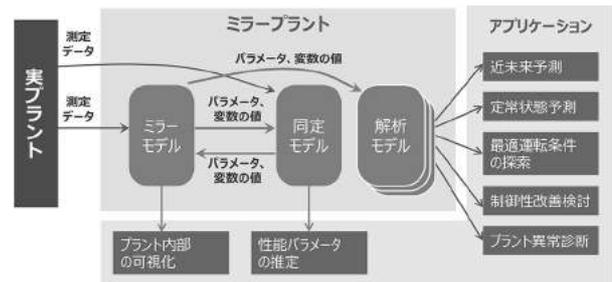


図2 ミラープラントの構成

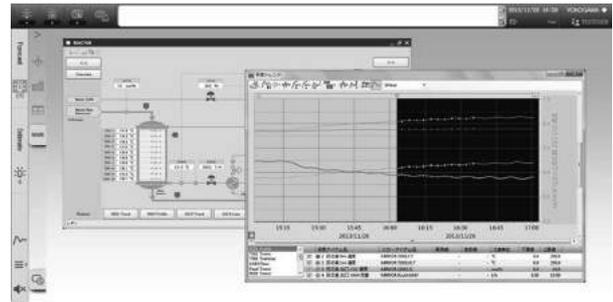


図3 ミラープラントの操作画面

つのモデルパラメータ技術により、現在のプラント状態を正確に模擬することを実現した。図2にミラープラントの構成を示す。ミラープラントは、トラッキングを行うミラーモデル、DDRを行う同定モデル、そしてミラープラントの各種アプリケーション(例えば未来予測)を提供する解析モデルの3つから構成されるシミュレーションシステムである。

コンピュータ上に実際のプラントと同じ挙動をするバーチャルなプラントは以下の操業支援機能を実現化した。

- ・プラント内部の可視化機能
装置内部の状況を推定し、リアルタイムでオペレータ(運転員)に示す。
 - ・性能パラメータの推定とモニタ機能
触媒活性や伝熱壁の劣化状況の推定を行い、設備の性能監視を行う。
 - ・定常状態予測機能
現在のプラント状態から運転条件を変更した際に、将来のバランスする状態を予測する。生産量変更などでの運転条件探索などで利用する。
 - ・ケーススタディ機能
現在のプラント状態から運転条件を変更した際に、過渡状態を含めて将来のプラント状態を予測する。危険操作域を回避する運転条件探索やPIDパラメータの調整などに利用する。
- ミラープラントにより、オペレータは従来のオペレーションとは全く異なり、未来を見ながら(正確には予測結果を見ながら)プラントを運転することが可能となった。ミラープラントでのプロアクティブオペレーション

を実施する操作画面を図3に示す。未来で起こる異常を検知し、現在のうちにその処置を施こせる。ミラープラントの応用は様々で、オペレータから生産性改善を行う現場技術スタッフまで活用できる。ミラープラントは現在、商用プラントにて稼動し成果を挙げている⁴⁾。

3. プラントモデルの更なる活用

現実と仮想を融合したミラープラントは、オペレータの意思決定をサポートする運転支援を実現した。ミラープラントは、使えば使うほど自動的にモデルパラメータのチューニングが実施される。また、現実とシミュレーション値が大きくかけ離れた部分があればプラントモデルそのものを見直し更新することを試みる。いかに精緻なモデルを作れるかがIoT活用の鍵を握ることをII-1節で述べた。もしよいモデルが得られたならば、図1に示すサイバーフィジカルシステム(仮想世界)をコントローラにすることもできよう。実プラントからデータを取り込み、モデルにより最適な操作量を出せばプラントの運転自動化が可能になる。

現在、自動車の運転自動化が注目を集めている。完全運転自動化、無人運転まではまだ道のりは遠いと感じるが、着実にその開発は進んでいる。同様にプラントの運転自動化においては、品質分析工程のオンライン化やオペレーション判断の人工知能化、異常状態でも人が介入しない安全停止システムなど新たな技術開発課題が多々あるが、プラントの運転自動化に向けた制御技術として、EMPC(Economic Model Predictive Control)に関して紹介する⁵⁾。

モデルがあれば、これを使って予測値を求めることができる。車の運転においてカーブを曲がる際のハンドル操作では、ドライバーはおおよそ軌道をイメージしてハンドルを切るように、予測制御ができることが望ましい。プラントでのPID制御では、目標値(SV値)とプラントでの計測値(PV値)の差分(偏差)をなくすように操作量(MV値)をコントローラが出す。リアルタイムで計測できるプラントの状態量は限られているので、温度・圧力・流量といったプラントから見ると環境変数を制御することにより製品を生産している。また、環境変数の制御結果により製品の品質を決定している。EMPCでは、Economic Valueを設定することで、品質条件を満たした製品を最適に生産することが可能になる。

EMPCでは、以下の式を解けばよい。

$$\min/\max_u \int_{t_0}^{t_f} EV(x(t), y(t), u(t)) dt \quad (1)$$

$$\dot{x}(t) = f(x(t), y(t), u(t)) \quad (2)$$

$$g(x(t), y(t), u(t)) = 0 \quad (3)$$

x : 状態変数 y : 出力変数 u : 操作変数

$$k(x(t), y(t), u(t)) \leq 0 \quad (4)$$

$$x(0) = x(\tau_k) \quad (5)$$

$$xl \leq x(t) \leq xh \quad (6)$$

$$yl \leq y(t) \leq yh \quad (7)$$

$$ul \leq u(t) \leq uh \quad (8)$$

ここで、式(1)はEconomic Valueを記述する最適化の式である。投入エネルギー量最小、収率最大などプラントでどのような生産を行いたいのかを記述する。式(2)、(3)がプラントモデル式である。非線形式のまま扱うのがEMPCの特長である。式(4)~(8)は条件制約式である。プロセス制約などはここに記述する。従来のモデル予測制御では、定常運転でのある動作点でステップ応答試験を実施し、むだ時間+1次遅れ近似式で線形プラントモデルを構築し、多変数制御によりプロセスの安定化が行われていた。EMPCではダイナミックに状態が変化するプロセスの制御に適用できる。現在のコンピューティング技術では、EMPCはまだ限定されたプロセスにしか適用できない。今後コンピュータ技術の発展により、大規模なプラントモデルを利用した最適モデル予測制御が実現できるであろう。

— 参考資料 —

- 1) 坂根正弘著, 『ダントツ経営-コマツが目指す「日本国籍グローバル企業」』, 日本経済新聞出版社 (2011).
- 2) <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/Download.html>: アクセス日(2018.1.20).
- 3) 岩野, 高島, 情報管理, Vol.57, No.11, pp. 826-834 (2014).
- 4) 仲矢, 他, 横河技報, Vol.56, No.1, pp. 7-10 (2013).
- 5) 加藤, 伊藤, 第59回自動制御連合講演会, pp. 196-200 (2016)
- 6) X.C. Li, L.Q. Zhang, M. Nakaya, A. Takenaka, IEEE-IMCEC, pp. 685-690 (2016).

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)大規模プラントの運転員支援システム, ヒューマン・マシン・インタフェース, 機能モデルとその応用, 医療支援システム, メカトロニクス



仲矢 実 (なかや・まこと)

横河電機株式会社 IA-SS 事業本部グローバルシステム開発センター

(専門分野/関心分野)プロセスシミュレータ, プラントモデリング, 高度制御技術, 化学プロセス工学, AI 技術を駆使した化学プロセス設計

原子力材料評価のための最新ナノマイクロ分析技術の新展開

第3回 イオンビームを用いた照射劣化の *in-situ* TEM 観察

長岡技術科学大学 村上 健太

原子力材料の研究開発では、中性子照射の影響をあらかじめ把握することが求められる。イオン加速器と透過電子顕微鏡(TEM)を結合させた実験装置(*in-situ* TEM)は、この問題に取り組むためのユニークな照射場を提供してくれる。本稿では、*in-situ* 実験が高速中性子によるカスケード損傷を理解するために果たしてきた歴史的役割を概観した後、現在取り組まれている研究課題を紹介する。また、*in-situ* TEM の設計・製造・実験における留意事項を踏まえ、研究用の照射場が果たすべき役割についても考察したい。

KEYWORDS: *ion beam, accelerator, TEM, radiation damage, cascade, in-situ experiment*

I. 緒言

新材料の採用や供用条件の変更など、原子力プラントで使用される材料に関係した研究開発では、未だ存在しない環境条件における健全性を事前に示すという、一見矛盾した要求が課されている。この問題を解決するためには、実績ある類似材料の挙動を調べたり対象のプラントによく似た環境を再現したりして十分なデータを取得した上で、データの相関関係を注意深く吟味する作業を重ね、説明性の高い合理的な選択に至ることが大切である。つまり、原子力材料学は、自然科学の要素を基盤としつつ、経営工学的な要素を上手く使いながら発展してきた学術領域である。

照射場の選択を含む照射試験の設計は、特にマネジメント色の強い研究分野である。材料開発者は、中性子と物質の相互作用に関するマルチスケールな物理を包括的に理解した上で、想定するプラントと同じであることを追求する部分と、現実とは異なる条件になることを許容する部分を区別して、健全性評価に使用する照射場を選ばねばならない。現実と異なる部分については、条件の保守性を確保する必要もある。照射施設の開発者は、今後の原子力プラントの開発動向などを踏まえ、照射実験結果の適用先の特徴を先読みして抽出し、照射場として再現することが求められる。既存の照射場との補完関係

Recent development of nano/micro-scale analytical techniques for nuclear materials (3); In-situ TEM observation of radiation damage using ion beam : Kenta Murakami.

(2018年1月16日 受理)

■前回タイトル

第2回 中性子回折法による材料強度研究

や、利用可能な廃炉材の状況を考慮するなど、グローバルな視野も必要である。また、照射場だけでなく、照射後試験等も含めた活動全体を効率的に実施できる環境を提供することも大切である。

透過電子顕微鏡(TEM)の試料位置にイオンビームを導入して照射その場観察を行うための実験装置(*in-situ* TEM)開発は、上述した照射施設の設計に関する課題に対して、小規模ながら特徴的な仕方で取り組んだ成果である。東京大学の東海村キャンパスでは、1978年から2000年まで400kVの静電イオン加速器と200kVのTEMを結合させた*in-situ* 実験装置が運用されており、この分野をリードする研究が行われてきた。著者は、2012年以降、東京大学の関村直人教授や阿部弘亨教授らと共に、同キャンパスの重照射損傷研究設備(通称 HIT)において新しい*in-situ* TEMを開発し、それを用いた実験に取り組んできた^{1, 2)}。欧米におけるイオン加速器を用いた材料研究は一時期停滞していたが、10年ほど前から材料照射用加速器施設の設備や管理体制が相次いで改善され、*in-situ* TEM 実験を含む研究成果が積極的に発表されるようになった^{3~6)}。

本稿では、イオンビームを用いた*in-situ* TEM 実験の基本コンセプトを歴史的な経緯を踏まえて概説した後、これから解決すべき原子力材料の課題に対してこの技術がどのように貢献できるかを説明する。また、*in-situ* TEMに関連した実験技術について概観する。これらの解説が、原子力材料研究のための照射実験設計という学術分野に関する理解を深める一助になれば幸いである。

II. イオン照射実験の基本的考え方

高速中性子による照射影響をイオン照射実験で評価す

ることには、どのような意味があるのだろうか。はじめに、高速中性子によるはじき出し損傷を概観してみよう。図1(a)のように、金属材料中に入射した高速中性子は、ある位置で標的原子の一つと衝突する。中性子を散乱させた標的原子は運動エネルギーの一部を受け取って、周辺原子との結合を切断し、材料中を運動し始める。この原子を「第一はじき出し原子(PKA)」という。PKAは中性子とは異なり、直ぐに周囲の原子に散乱されて、運動エネルギーを連鎖的に周辺原子へ受け渡す。この過程で、PKAを起点とする狭い領域に「カスケード損傷」と呼ばれるはじき出しの連鎖反応が生じる。はじき出された原子の大半は運動エネルギーを消費して格子点へ復帰するが、一部は格子欠陥となる。残留した格子欠陥の拡散に伴う物質移動によって材料のマイクロ組織が変化し、照射下に特有な材料変化が誘起される。

つぎに、図1(b)のように、薄膜化した試料に対して、高速中性子の代わりに自己イオンを照射することを考えよう。もし、中性子照射におけるPKAのエネルギーと、イオン加速器から入射する自己イオンのエネルギーが同じであるならば、カスケード損傷の領域に限って比較すると、ほぼ等価な現象となるはずである。格子欠陥のシンクが大きな薄膜に対する照射実験とバルクに対する照射実験の違いは考慮する必要があるとはいえ、マイクロ組織を観察するうえで測定領域の狭さ自体は問題とならない。むしろ「模擬PKA」である入射イオンの方向やエネルギー、照射量を制御できるので実験面での長所が大きい。したがって研究課題と実験条件を適切に選択するならば、イオン照射実験は原子力材料の研究開発に大きく貢献できるのである。

In-situ TEMを用いた研究の最大の成果は、分子動力学法等の原子シミュレーションをリードする形でカス

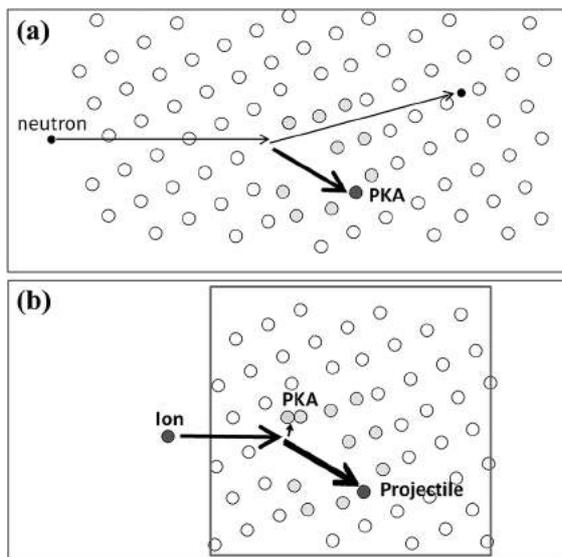


図1 カスケード損傷の模式図
(a)高速中性子の場合、(b)薄膜にイオン照射する場合

ケード損傷に関する知見を拡充してきたことである。図2(a)~(b)のように、Auなどの面心立方構造を有する重金属にイオン照射しながらTEM観察すると、視野に突然、数ナノメートルの欠陥が現れる。様々な方位から観察すると、これが空孔型の積層欠陥であることが分かる。この欠陥形成は、カスケード損傷によって狭い領域に高密度に導入された空孔が短距離拡散して集合する現象だと解釈され、cascade collapseと呼ばれている。同様の体系で原子シミュレーションを行うと、確かにカスケード損傷の中心部分には空孔が多く残留し、外縁部には格子間原子が残留する傾向がある。TEM観察可能な欠陥が現れるのは局所的な空孔密度が高い場合である⁷⁾。興味深いことに、ある程度以上のエネルギーのイオンビームを用いて実験を行うと、複数の空孔型欠陥が図3のように同時形成することが多い⁸⁾。これは、カスケード損傷が幾つかの領域に分枝することを示すものであり、この現象も原子シミュレーションによって再現された⁹⁾。

このように、元素や結晶構造など標的物質の違いや、入射イオンのエネルギーの違いなど、課題を設定し、実験的にはcascade collapseを観察しておおまかな挙動を捉え、詳細な部分は原子シミュレーションで描く、という過程を繰り返すことで、カスケード損傷という数ナノメートル・数ナノ秒の世界を詳しく調べてきたのである。

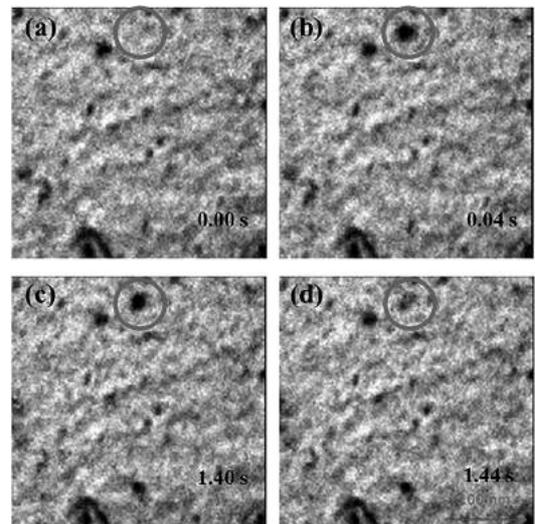


図2 Cascade collapse による欠陥集合体形成と消滅

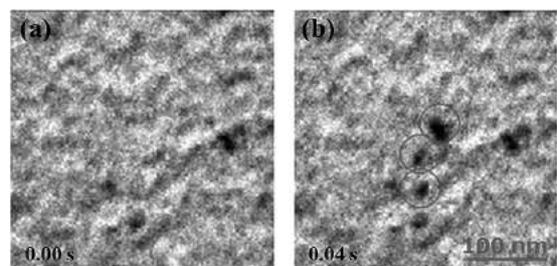


図3 複数の欠陥集合体の同時形成

Ⅲ. いま *In-situ* TEM に期待される役割

1. ミクロ組織変化の同視野測定

TEM や三次元アトムプローブなどによって測定される材料のミクロ組織は、構造材料の劣化評価のための重要な情報である。本連載でも紹介されている通り、観察技術の進歩によって、より詳細な情報が取得できるようになってきた。結果として、構造材料の劣化予測モデルの中には、直接的または間接的に、ミクロ組織観察の結果が考慮されている。

ミクロ組織情報の工学的な重要性が増すにつれて、測定結果の代表性をより厳しく吟味する必要が生じている。通常の照射後試験では、まず原子炉で照射材を作製し、そこから分析用の試料を採取して調整し、ミクロ組織観察を実施する。一般的に、構造材料は金属組織と呼ばれる数十マイクロメートルのサイズで不均質性を有するが、ミクロ組織の測定は1マイクロメートル以下の視野で実施されることが多い。照射によるミクロ組織の変化は微量の添加元素や不純物の濃度に敏感である。よって、二つの試料のミクロ組織に違いが観察されたとき、それが材料のマクロな照射劣化挙動を適切に反映しているのか、材料の初期状態の不均質さに影響されているだけなのか、判断することが求められるのである。試料調整も含めた分析技術の標準化に向けた取り組みは、今後ますます重要になるだろう。

In-situ TEM の大きな利点は、照射による累積的な影響を同視野で継続的に観察できることである。これは、同一材料における照射量依存性を検討する際に、金属組織に起因する試料間の初期状態の違いや、視野毎の偶発的な違いを無視できることを意味する。加えて *in-situ* TEM を使えば、照射後試験では実質的に不可能な、細かな刻み幅での経時変化測定も可能となる。結果として、信頼性の高い経時変化の傾向曲線を取得することができるのである。ただし、*in-situ* TEM を用いた実験においても、測定箇所の経時変化が材料全体の照射劣化を指標するのに適切かという問いを吟味する必要がある。

最近の *in-situ* TEM 実験は、ミクロ組織発達挙動の照射量依存性を明らかにすることを目的としたものが多い。2010年代に入って、Zr合金、W合金、316系ステンレス鋼、フェライト・マルテンサイト鋼などのミクロ組織が観察され、転位ループなどの発達挙動が丁寧に測定されてきた。数密度やサイズ分布の照射量依存性は、実プラントにおける劣化挙動を考察するための優れた参照情報となる。ただし、ミクロ組織の発達を比較するという目的で使用する場合、*in-situ* TEM には損傷速度や試料表面の効果など、実プラントの条件とは異なる要素があることに留意が必要である¹⁰⁾。

2. 欠陥の動的挙動の観察

いろいろな照射場における照射効果の累積的影響を同じ尺度で示すために、照射損傷量を dpa という無次元数で表すことが多い。これは displacement per atom の略であり、原子1個あたり何回のはじき出しを経験したかを示している。イオン照射による損傷量の評価方法も確立されている¹¹⁾。照射劣化の原因ははじき出しによる格子欠陥の形成であるから、損傷量(dpa)を主たる指標として照射実験を設計するのは合理的だと思われる。

ただし、実験に使われる照射場は、損傷速度(dpa/s)が実プラントより高いことが多い。いわゆる「加速照射」である。古典的な拡散理論によると、損傷速度が高いと、材料中の平均欠陥濃度は高くなり、平均移動距離は短くなる。したがって、ミクロ組織は高密度かつ小サイズになりやすい。この傾向は、実験的にも確認されている。しかし、カスケード損傷後に残留する欠陥の動的挙動を注意深く調べると、現象はもう少し複雑なようである。

第一に、高速中性子によって導入される欠陥は、カスケード損傷に起因する特異な分布を有している。一般的な拡散理論は、緩やかな濃度勾配をもつ均質な格子欠陥を仮定しているため、注意が必要である。第二に、複数の元素からなる金属材料では、点欠陥の形成エネルギーが隣接する元素によって変化する。したがって、カスケード損傷後に残留する欠陥は、あらかじめ特定の溶質原子と結合した状態で拡散を始める可能性がある。これらを踏まえると、カスケード損傷下では、通常の固体内拡散に律速される場合より、効率的にミクロ組織が形成されているかもしれない¹²⁾。

In-situ TEM で点欠陥を直接観察することは難しいが、ミクロ組織形成の動的挙動を測定できるという利点を生かせば、上記の課題の解が得られると期待されている。時間差で近距離に導入された二つのカスケード損傷に着目し、その間にどのような相互作用があるかを調べることが、「加速照射」の影響を精緻に知るための手がかりとなる。Cascade collapse による空孔型欠陥を照射下で観察していると、図2(c)~(d)のように、サイズが急峻に減少することがある。この現象は、カスケード損傷によって局所的に大量に形成された格子間原子が、固体内を波のように変位して、近くの空孔型欠陥集合体へと一気に吸収される現象と理解されている。

このように、照射下でのミクロ組織形成では、欠陥濃度に基づくモデル化では扱い難いカスケード損傷間の相互作用が存在する。*In-situ* TEM には、カスケード損傷からミクロ組織形成までの動的挙動を連続的に観察できるという利点がある。説明性の高い劣化予測のために、後に続く物理過程へ与えるカスケード損傷の影響を定量的に評価できるような *in-situ* 実験が期待されている。

IV. *In-situ* TEM の技術開発

1. TEM の改造

イオン加速器と TEM を結合する方法は複数あり、研究目的や制約条件によって適当なものが選ばれている。TEM の鏡筒には、磁気レンズを始めとする様々な部品が所狭しと配置されている。初期の *in-situ* TEM の中には、部品の一部に貫通孔を設けてイオンビームを入射するものもあった。その後、TEM においては、元素分析用検出器のために鏡筒にポートを用意することが標準的になった。検出器の挿入方向は、TEM の光軸に対して $45\sim 90^\circ$ 傾斜しているが、この空間を上手く使ってイオンビームを入射させるのが現在の一般的な改造である。

検出器の挿入方向から直接イオンビームを入射する場合は、まず試料をイオンビームの方向へ傾斜させて照射実験を行い、次いで試料を電子線の方向へ傾斜させて観察を行うことを繰り返す必要がある。つまり、照射下での欠陥の動的挙動観察はできないが、同視野でのマイクロ組織発達を観察できる。この改造は安価なことに加え、TEM の観察能力にほとんど影響しないという長所もある。中国・武漢大学の装置はこの方式を採用している³⁾。

$\sim 100\text{kV}$ 程度のイオンビームであれば、鏡筒内部に小さな静電プリズムを埋め込んで、内部で偏向させることにより、TEM の光軸からの傾きを小さくすることができる。この方法により、比較的小規模な改造で、欠陥の動的挙動を観察することができる。最近では、英国 Salford 大学の装置でこの方式が採用されている⁴⁾。このサイズの加速器を結合した装置は国内で比較的多く作られており、東京大学・東海村のブランケット棟で 2000 年まで使用された装置を始め、北海道大学、九州大学、島根大学、旧日本原子力研究所の東海研と高崎研などで運用されてきた。その用途は、必ずしも原子力材料のはじき出し損傷の研究に限定されていなかったようである。

より高エネルギーのイオンビームを入射してカスケード損傷の挙動を観察したいなら、TEM の電子銃から対物レンズまでの部分を嵩上げし、集束レンズと対物レンズの間の空間を拡張することで、イオンビームの光路を確保することができる。最近の TEM は、元素分析用の検出器を TEM 光軸に対して 90° に置くことが多く、静電プリズムでは十分な偏向能力を得られないこともあって、嵩上げ方式が主流になりつつある。集束レンズの焦点位置などを調整することができるのなら、観察能力自体には殆ど影響せずに改造を行うことができる。米国アルゴンヌ研究所⁵⁾や仏国原子力庁(CEA)オルセー研究所⁶⁾、東京大学 HIT^{1, 2)}などの装置は嵩上げ方式を採用することで $0.5\sim 2\text{MV}$ クラスの加速器と TEM を結合した。

2. *In-situ* TEM の据え付け

In-situ TEM の据え付けはエンジニアリングの観点でも興味深い。特に困難なのは、TEM 本体の位置決めである。イオンビームによる TEM 本体の照射を避けるために、TEM 鏡筒内には細い案内管が試料近傍まで取り付けられることが望ましい。案内管とビームラインの光軸が少しでもずれてしまうなら、イオンビームは試料へ到達することができない。ビームラインは加速器本体との関係によって設置場所が厳密に規定され、通常は位置決めをしてから速やかにサポートをアンカーで固定する。一方、TEM 本体は除振台の上に設置するので、ダンパの沈み込みを考慮しながら試料位置をイオンビームの光軸上に置き、案内管と光軸を揃えなければならない。地震等も考慮して、除振台の可動域を予め制限することも必要である。その後、意図的に TEM 本体に振動を加え、除振台上で鏡筒が元の位置および傾きに復帰することを確認する。しかも、これらの作業を空間や設備の限られた管理区域の実験室で行うのである。

図 4 にビームラインと TEM のレイアウトの例を示す。東京大学の *in-situ* TEM は既設の加速器に追設されたことから制約条件が多く、据え付け工事が困難であった。(多くの研究機関では、*in-situ* TEM は加速器本体と同時に設置してきたことから、レイアウトの余裕が多少大きかったようである。)大学のような研究機関にとって、エンジニアリングを実践する場を持つことは、人材育成の観点を含め大変貴重な機会であった。

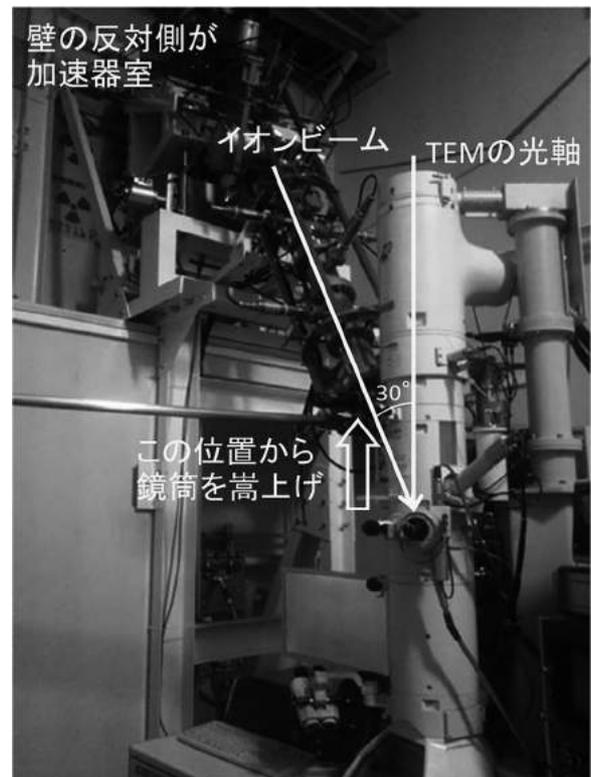


図 4 東京大学・東海村キャンパスの *in-situ* TEM

3. 試料作製と照射実験

従来は、電解研磨によって直径 3mm のディスク状試料から膜孔を作製してきた。最近では集束イオンビーム加工や電子後方散乱回折法が気軽に利用できるようになりつつあり、材料の特定の方位から小片上の試料を切り出して薄膜化することが多くなっている。研究者毎にさまざまな工夫を凝らしているだけでなく、人材育成事業等を通じた専門家同士のノウハウ共有の取り組みも進められている。過度に専門的になるので詳細は省くが、試料作製の高度化によって、*in-situ* TEM 観察で得られる情報の質も大きく向上している。

TEM 試料は薄膜であり、試料表面は照射欠陥のシンクとなることから、試料作製の工夫によって特徴的な実験を行うこともできる。例えば、鉄合金には 2 種類の方位 ($b=a/2[111]$ と $b=a[100]$) に転位ループが形成することが知られているが、照射後試験で転位ループの測定を行うと、両者の割合や数密度に関する報告にかなりばらつきがある。そこで、方位の異なる薄膜状の TEM 試料を作製して、それぞれイオン照射すると、表面と照射欠陥の方位関係に対応して、特定の欠陥集合体が表面と相互作用して、消失することが確認できる。適切な方位で試料を切り出すことにより、特定のマイクロ組織にのみ着目し、余分なマイクロ組織を追い出すような実験も可能となる。一方、無思慮な試料作製は、精緻なマイクロ組織発達挙動の測定という *in-situ* TEM の利点を大きく損なうことになる。

V. 結言

In-situ TEM は、高速中性子による PKA をイオンビームで模擬することにより、原子力材料中のマイクロ組織に対するカスケード損傷の影響に関する情報を抽出するために設計された照射場であり、近年その重要性が再評価されている。同視野におけるマイクロ組織発達の測定や、照射欠陥の動的挙動の測定を通じて、照射劣化予測における不確かさを低減し、より良い材料開発に貢献することが期待されている。

材料研究が「役割分担の中で要素ごとの信頼性向上(等)には貢献はしてきても、原子力のシステムに対して(中略)重要な判断をする中心的な役割は演じてこなかった」¹³⁾ という声が、原子力材料研究者の中にもある。*In-situ* 実験の設計は「あなたは原子炉システムをどのように捉えていますか」と材料研究者に問いかけるかのような研

究課題である。同時に、余分な外乱因子を排除して実験環境を作り込むために研鑽を重ねることは、物質の挙動の本質を追求することと同義である。装置の利用や保守には原子力材料に関する総合的な知識が求められることから、人材育成の基盤的設備としても有望である。これには設計思想の伝承も関係する。東京大学 HIT の *in-situ* TEM の場合、東京大学・東海村キャンパスブランケット棟にあった先代の *in-situ* TEM の開発、運用、高度化等の経験を上手く引き継いだので、短期間かつ低コストで装置開発を行うことができた。ユニークな特徴を持った複数の *in-situ* 実験装置が相互に補い合いながら、研究と教育のハブとして機能することで、照射効果に関する学術を拡げて行くことができればと切に願っている。

— 参考資料 —

- 1) K. Murakami, T. Iwai, H. Abe, and N. Sekimura, Nucl. Instrum. Meth. B 381 (2016) 67.
- 2) K. Murakami, D. Y. Chen, H. Abe, and N. Sekimura, Proc. ICAPP 2017, No. 17288 (2017).
- 3) L.P. Guo, C.S. Liu, M. Li, B. Song, M.S. Ye, D.J. Fu, and X.J. Fan, Nucl. Instrum. Methods A 586 (2008) 143.
- 4) J. A. Hinks, J.A van den Berg, and S. E. Donnelly, J. Vacuum Sci. Tech. A 29 (2011) 021003.
- 5) Intermediate Voltage Electron Microscopy (IVEM)-Tandem Facility Argonne National Laboratory, <http://www.ne.anl.gov/ivem/>
- 6) Y. Serruys, *et. al.*, C. R. Physique 9 (2008) 437.
- 7) K. Morishita, H. L. Heinisch, S. Ishino, and N. Sekimura, Nucl. Instrum. Meth. B 102 (1995) 67.
- 8) N. Sekimura, Y. Kanzaki, S. R. Okada, T. Masuda, and S. Ishino, J. Nucl. Mater. 212-215 (1994) 160.
- 9) R. E. Stoller and L. R. Greenwood, J. Nucl. Mater 271-272 (1999) 57.
- 10) S. Ishino, N. Sekimura, K. Murakami, and H. Abe, J. Nucl. Mater. 471 (2016) 167.
- 11) R. E. Stoller, M. Toloczko, G. S. Was, A.G. Certain, *et. al.*, Nucl. Instrum. Meth. B 310 (2013) 75.
- 12) K. Murakami, T. Iwai, H. Abe, N. Sekimura, Y. Katano, T. Iwata and T. Onitsuka, Philo. Mag. 95 (2015) 1680.
- 13) 鈴木雅秀, Nuclear Materials Letters, 8 (2011) 9.

著者紹介



村上健太 (むらかみ・けんた)

長岡技術科学大学 技学研究院
(専門分野/関心分野)原子力材料・システム保全・安全マネジメント

第4世代原子炉の開発動向

第4回 鉛冷却高速炉

東京工業大学 名誉教授 高橋 実

鉛または鉛ビスマス共晶合金は高速炉の冷却材として核・熱・化学的に優れた性質を有している。構造材に対する腐食性が欠点と考えられてきたが、すでに腐食対策の見通しも得られている。鉛冷却炉は、固有の安全性が高く、持続性、核拡散抵抗性、経済性などの第4世代原子力システムの要件をいずれも容易に満たすことのできる有望な高速炉とみなすことができる。そのため、海外ではその特長を生かした種々の鉛冷却高速炉の概念が提案され、開発研究と国際協力が着実に進展しており、各国の政策次第で実証研究の段階に進むことのできる状況にある。

KEYWORDS: Lead-cooled Reactor, Fast Reactor, Liquid Metal, Lead, Lead-bismuth Eutectic, Generation IV International Forum

I. はじめに

鉛または鉛ビスマス共晶合金を冷却材とする高速炉を一般に鉛冷却高速炉(LFR)とよぶ。鉛系重金属は空気や水と接触しても激しく反応しないが、それだけでなく、鉛冷却高速炉は固有の安全性が高く、しかも核燃料サイクルに適しているためエネルギー資源の持続性に優れ、核拡散抵抗性や核物質防護にも利点がある。また経済性にも優れ、遠隔地用の小型炉の需要にも応えられる。

本稿では、はじめに鉛系重金属にはどのような特長があるのか、またそれを冷却材に用いる高速炉とはどのような特徴があるかについて解説し、第4世代原子力システム国際フォーラム(GIF)における鉛冷却炉に関する活動状況と世界の主な鉛冷却高速炉の開発の動向について紹介する。

II. 鉛系重金属冷却材の特徴¹⁾

1. 鉛および鉛ビスマス共晶合金

鉛系重金属とはどのようなものだろうか。天然鉛の主な同位体は²⁰⁶Pb24.1%、²⁰⁷Pb22.1%、²⁰⁸Pb52.4%であり、天然ビスマスは²⁰⁹Bi100%である。融点が最低となる鉛ビスマス合金の共晶組成は44.5% Pb-55.5% Biである(図1)。

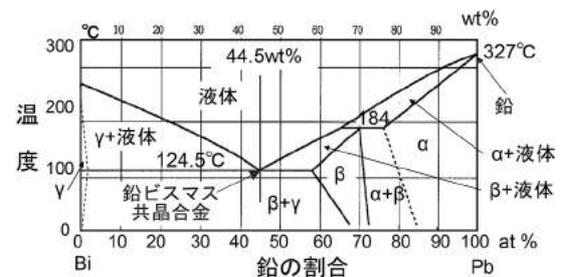


図1 鉛ビスマス合金の相平衡図

世界の鉛の埋蔵量はおよそ8千万トン、ビスマスの埋蔵量はおよそ11万トンである。高速炉1基当たりおよそ数千トンの鉛あるいはビスマスを必要とするので、将来多数の鉛冷却高速炉を建設する場合、鉛は足りるがビスマスは不足するであろう。

2. 核的性質

鉛系重金属の核特性を表1に示す。共鳴領域を除く高速中性子領域で、中性子捕獲断面積は非常に小さく、中性子弾性散乱断面積は比較的大きい。そのためナトリウムに比べて中性子の平均自由行程が短い。質量数が大きいために中性子の減速能と減速比は小さい。²⁰⁸Pbは捕獲断面積がさらに小さい。

表1 核特性(700K, 中性子エネルギー 500keV)

	45.5% Pb- 55.5% Bi	²⁰⁸ Pb	Na
散乱断面積(b)	7.5	7	4
捕獲断面積(b)	2×10^{-3}	1×10^{-3}	8×10^{-4}
平均自由行程(cm)	4.5	4.7	11.2
減速能(cm^{-1})	0.0021	0.0020	0.0075
減速比(-)	36	67	422

The Development status of Generation IV reactor systems (4); Lead-cooled Fast Reactor: Minoru Takahashi.

(2018年3月2日 受理)

■前回タイトル

第3回 超臨界圧軽水冷却炉

表2 鉛と鉛ビスマス共晶合金の主な物性値

	Pb	45.5% Pb-55.5% Bi
密度(500℃)(kg/m ³)	1.04 × 10 ⁴	1.01 × 10 ⁴
融点(℃)	327	124
沸点(℃)	1737	1670

表3 高温における冷却材の潜在的リスクの特徴

	Pb, Pb-Bi	Na	軽水
保有熱	少量の顕熱	少量の顕熱	大量の潜熱
蒸気圧	低い	低い	高い
化学的性質	不活性	空気中で燃焼、 水と反応し H ₂ 発生	Zr と反応し H ₂ 発生

ビスマスは中性子を吸収すると、 $^{209}\text{Bi}+n \rightarrow ^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po}$ の反応によりポロニウム ^{210}Po を生成する。 ^{210}Po は半減期138.4日で5.3MeVのエネルギーの α 線を放出する。

3. 物理化学的性質

表2に鉛と鉛ビスマス共晶合金の主な物性値を示す。密度は水のおよそ10倍である。鉛の融点はそれほど低くないが、鉛ビスマス共晶合金の融点は冷却材として十分低い。沸点がナトリウムの880℃より非常に高い。500℃における飽和蒸気圧はおよそ 10^{-4} Paであり十分低い。

鉛系重金属は水と化学的にほとんど反応しない。水の生成ポテンシャルはPbOとFe₃O₄の生成ポテンシャルの中間にあるので、水と平衡しているとき鉛系重金属は酸化されず、鋼材表面にFe₃O₄の保護膜が形成される。鉛系重金属は高温で空気に触れても燃焼反応は起こらないが、酸化されて固体の酸化物PbOになる。

4. 溶解度

高温鉛系重金属中のNi、Fe等の溶解度は高い。500℃におけるFeとCrの溶解度はいずれも $10^{-4} \sim 10^{-3}$ wt%であり、Niの溶解度は1～数10wt%の非常に高い値である。

5. 冷却材の潜在的リスクの比較

高温の軽水やナトリウムは表3に示すように潜在的リスクが高いが、鉛系重金属の潜在的リスクは低いので安心できる冷却材である。低压系を構成できるので冷却材の漏えいと放射性物質の外部への拡散が起こりにくい。

Ⅲ. 鉛冷却炉の特徴¹⁾

1. 利点

(1) 高速炉心と中性子閉じ込め性能

鉛系重金属は減速能が小さいため、ナトリウム冷却炉

より中性子スペクトルが高エネルギー側にある。そのため燃料棒配列ピッチを小さくしなくても高速炉心とすることができる。また、ブランケットを設けなくてもPu増殖が可能である。中性子スペクトルが硬いため、長寿命のマイナーアクチニドの核変換にも適している。中性子の平均自由行程が短いため中性子の閉じ込めが容易であり、反射体を必要とせず、小型炉の設計も容易である。

(2) 低い余剰反応度と長寿命炉心

Puの燃焼と増殖により炉心の反応度損失を低く抑えられるため、余剰反応度を1ドル以下に保つことができ即発臨界事故を排除でき、長寿命炉心の設計もできる。

(3) 負のボイド反応度による固有の安全性

中性子スペクトルが硬いので、冷却材ボイド反応度を負の方向にしやすい。これはボイドが発生しても中性子スペクトルの高エネルギー側への移行が小さく、 η 値の増加や ^{240}Pu の核分裂反応への寄与が小さいためである。

(4) 高沸点による固有の安全性

一次系冷却材の沸点が非常に高いため、冷却材の沸騰が起こりにくく、ボイドによる反応度印加は排除できる。

(5) 二次冷却系の削除および直接給水

蒸気発生器伝熱管破損時の水との化学反応や、冷却材の漏えいによる火災が起こらない。このため鉛系重金属の二次冷却系を削除でき、簡素なシステムが可能となる。炉心上部の一次系冷却材に直接給水して直接接触伝熱により蒸気を発生させれば、蒸気リフトポンプの機能がえられ、機械式ポンプと蒸気発生器を削除できる。

(6) 優れた自然循環冷却性能

冷却材の温度変化による密度変化が大きいため、定格運転時と崩壊熱除去に自然循環冷却を利用できる。燃料棒配列ピッチを大きくできるので圧力損失が小さく、自然循環冷却に有利である。

(7) 大きい比重に対する設計対応と安全性

鉛系重金属の比重は水やナトリウムのおよそ10倍であるので、機器間の液位差によって冷却材を循環できる。耐震設計上は中型炉または小型炉に限られる。燃料集合体や制御棒の浮き上がり防止策が必要である。浮き上がり方向の制御棒挿入方式も選択できる。重い液体の流れに接する構造材にはエロージョン(壊食)が起こりやすいため設計で冷却材の流速を2m/s以下に制限する。材料表面の酸化膜はエロージョンの抑制に有効である。速度が10m/sに達する機械式ポンプの回転翼の表面にはエロージョンの防止のためにコーティングが必要である。炉心崩壊事故時には浮力により燃料ペレットの上方への分散を促進し、再臨界事故が抑制できる。集合体内の上部に砲弾型遮へい体がないため分散はさらに容易である。

2. 課題

(1) 鉛の選択

ビスマスの資源量が少ないことと、ビスマスからのポロニウム²¹⁰Po生成が問題であるため、ビスマスを含まない鉛を冷却材に用いることも考えられている。

(2) 酸素濃度の制御

冷却材が酸化して流路を閉塞したり、構造材の表面が酸化により腐食されることは避けなければならない。それには冷却材中の酸素濃度を低く抑える必要がある。一方、酸素濃度が低く過ぎると構造材表面に酸化被膜が形成されず、構造材が冷却材に溶け出す。したがって、図2に示すように冷却材中の酸素濃度を 10^{-8} ~ 10^{-7} wt%程度の値に保たなければならない。

酸素濃度の制御方法には、所定の酸素ポテンシャルに設定した水素と水蒸気とArの混合気体を冷却材に接触させる。酸化鉛の粒子槽に冷却材を通して、温度制御により酸素の溶解と析出を制御する方法もある。酸素濃度のオンライン計測にはジルコニア固体電解質酸素センサーが用いられる。

(3) 被覆材・構造材の共存性

溶解腐食を受けるとオーステナイト系ステンレス鋼の表面層が多孔層になる。溶解腐食を防止するためには構造材の表面に酸化物の保護膜を形成させる必要がある。550℃程度まで鋼材にはCr含有量の多いフェライト・マルテンサイト鋼が防食上適している。さらに高温の被覆管にはSiやAlを添加し、あるいはAl-Fe系合金を表面にコーティングすることにより、安定な酸化膜を形成させる。

溶解腐食の条件下では流れによって材料表面が流体力学的に浸食されることがある。これをエロージョンとよび、激しい損傷が起こるので注意を要する。

(4) ポロニウム対策

ビスマスが中性子を吸収するとアルファ放射性核種である²¹⁰Poが生成されて一次系冷却材が放射化される。固体鉛ビスマスは表面のペイント処理だけで遮蔽できるが、ポロニウムは蒸発し、あるいは水化物となってカバーガスを汚染するので、メンテナンス時の内部被ばく対策が必要である。

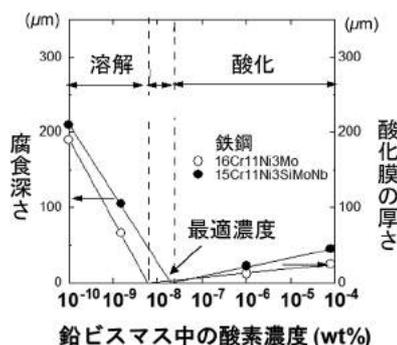


図2 溶解腐食と酸化腐食(500℃,3000時間の鋼材)²⁾

表4 GIFの鉛冷却炉概念の諸元³⁾

	ELFR	BREST-OD-300	SSTAR
熱出力/電気出力(MW)	1500/600	700/300	45/20
熱効率(%)	42	42	44
炉心入口/出口温度(℃)	400/480	420/540	420/567
二次系	過熱蒸気	過熱蒸気	超臨界CO ₂
タービン入口蒸気温度(℃)	450	505	553
タービン入口圧力(MPa)	18	18	2

IV. GIFの活動³⁾

第4世代原子力システム国際フォーラム(GIF)の設立後、鉛冷却炉暫定運営委員会(LFR-pSSC)にEU、米国、日本が常時参加してきた。2010年11月に東工大とEUの間で鉛冷却炉に関する覚書(MOU)が交わされ、LFR-pSSCの参加国となった。次いで2011年7月にROSATOM(ロシア)、2015年11月に国立ソウル大学(韓国)、2018年2月に米国エネルギー省が署名し、中国も近く署名する見通しである。

GIFの鉛冷却炉の候補はELFR(EU)、BREST-OD-300(ロシア)、SSTAR(米国)の3つで、いずれも冷却材に鉛を用い、プール型である(表4)。これらはそれぞれ大型炉、中型炉、小型炉に相当する。

LFR-pSSCは、2012年以降年2回開催され、各国のLFR開発の現状が紹介され、システム研究計画(SRP)の更新がなされている。2014年に安全性に関するWhite Paperを提出し、以降、安全設計基準(SDC)、安全設計指針、システム安全アセスメント、IRSNレポートを作成している。

V. 鉛冷却炉の開発の動向

1. ロシアの鉛冷却炉

鉛ビスマス炉の潜水艦8隻の就航実績がある⁴⁾。その技術力により、電気出力100MWの鉛ビスマス冷却小型高速炉SVBR-100が開発された(図3)。酸化ウランを燃料に用いる7~10年の長寿命炉心のモジュール炉である。

SVBR-100は、固有の安全性が高く、工場生産・遠隔

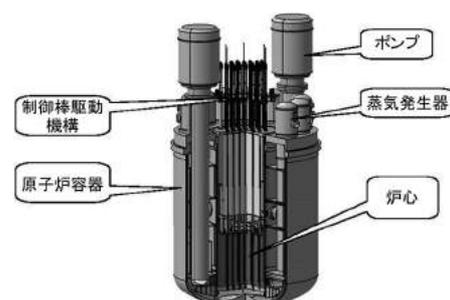


図3 鉛ビスマス冷却高速炉SVBR-100⁴⁾

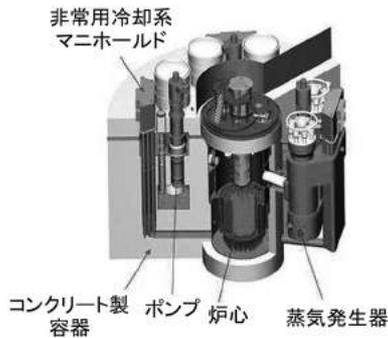


図4 鉛冷却高速炉 BRES-OD-300⁶⁾

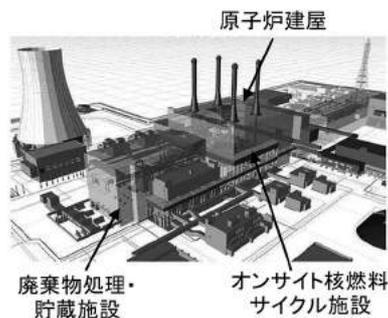


図5 BRES-OD-300のオンサイト核燃料サイクル施設⁶⁾

地輸送・運転に適し、電力だけでなく熱・蒸気供給、海水淡水化にも利用できる。実施主体はAKMEエンジニアリングで、2022～2025年に研究開発と設計を完了し、2025年からウリヤノフスク地区に初号機の建設を開始し、2026年～2027年運転開始を計画している。

鉛冷却高速炉 BRES-OD-300 は、公衆の避難を要する事故を起さず、ウランを最大限利用し、低放射能レベルで廃棄物を処分し、核不拡散のためウラン濃縮・プルトニウム増殖を行わず、最小限の核物質輸送と、競争力を確保することを開発指針としている⁵⁾。窒化物燃料を用い、燃焼と増殖により余剰反応度を1ドル以下に抑えて即発臨界事故を排除している。冷却材が高融点であるためライナーを施したコンクリート製容器により冷却材喪失事故を回避できる(図4)。

敷地内に原子炉建屋等と核燃料サイクル施設および廃棄物処理・貯蔵建屋をまとめてオンサイト核燃料サイクルを構成し、外部への核燃料と廃棄物の輸送を最小限にしている(図5)。

BRES-OD-300 は、NIKIET が実施主体であり、2025年ごろに運転開始の見通しである。2014年5月にNIKIET (ROSATOM の代表) と Ansaldo (EURATOM の代表) の間で、BREST プロジェクトと LEADER プロジェクトの協力について同意し、情報交換を行っている。

2. 欧州の鉛冷却炉³⁾

欧州で研究開発中の鉛冷却炉には、加速器駆動核変換システム ADS を開発するための未臨界原型炉 MYRRHA

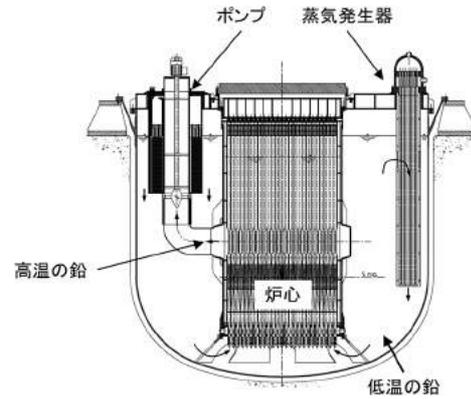


図6 鉛冷却高速炉 ELFR の概念図⁷⁾

(Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications), 鉛冷却原型炉 ALFRED (Advanced Lead-cooled Fast Reactor European Demonstrator), および大型鉛冷却炉 ELFR (European LFR) がある。

MYRRHA は冷却材とターゲット材に鉛ビスマス共晶合金を用いた熱出力 100MW の未臨界高速炉で、開発主体は SCK・CEN (ベルギー) である。2016 年から許認可がはじまり、2024 年までに 100MeV の加速器を実現し、2024 年に 600MeV への増強と原子炉の建設を決定する。

ALFRED は MOX 燃料を用いた熱出力 300MW のプール型炉であり、ELFR (図6) を開発するための原型炉と位置づけられている。小型モジュール炉 (SMR) としての意義もある。炉内構造を単純化したホットレグポンプ方式を採用している。ヘリカル型蒸気発生器にパイオネット管を採用し、崩壊熱除去系は蒸気発生器に組み込まれ、その二次側は水によるアイソレーション・コンデンサー (IC) 方式である。

ALFRED の開発主体は Ansaldo Nucleare (イタリア) で、ENEA (イタリア), ICN (ルーマニア), CV Rez Laboratory (チェコ) 等からなる FALCON コンソーシアムを設立している。また、EURATOM - 米国 I-NERI 間と LEADER (EU) - BREST 間で情報交換も行われている。これまでの計画では 2021 年まで成立性研究、2023 年まで工学的許認可、2025 年にルーマニアに建設開始、2028 年運転開始とされていた。その後の遅れにより、2028 年までの建設開始をめざしているが、それは予算次第である。機器開発研究は ENEA (イタリア) で行われている。

3. 中国の鉛冷却炉⁸⁾

中国科学院 (CAS) 核能安全技术研究所 (INEST) は、ADS と鉛冷却高速炉を開発するため、熱出力 10MW, 100MW, 1000MW の 3 段階からなる CLEAR (China LEAd-based Reactor) 計画を実施している。CLEAR-I (10MWt) は、酸化ウランを燃料、鉛ビスマス共晶合金を冷却材とし、臨界炉と未臨界炉からなっている。また、遠隔地電力供給のため 2017 年から CLEAR-MC を提案

している。初期概念 CLEAR-M (Mini-reactor) は電気出力 1~10MW の鉛ベースモジュール炉である。水素製造炉 CLEAR-H 等の革新炉も考案している。

CLEAR 炉の設計、安全性評価、設計・解析ソフト開発、鉛ビスマス循環実験、機器研究開発が実施されている。電気加熱模擬実験装置 CLEAR-S (Engineering Validation Reactor) と零出力鉛炉 CLEAR-0 を建設・運転し、鉛炉計算機シミュレーター CLEAR-V の開発も行った。鉛ビスマス循環ループ KYLIN-II 等が機器試験に用いられている。

4. 米国の鉛冷却炉⁶⁾

鉛冷却高速炉 SSTAR (Small Secure Transportable Autonomous Reactor) は工場生産・運搬・現地運転のための小型炉で、窒化物燃料を用い、20~30年の長寿命炉心である。一次冷却系は自然循環鉛冷却方式で、二次冷却系には超臨界圧 CO₂ のブレイトンサイクルを採用している。電気出力は 20MW から 180MW まで拡張できる。

米国では民間企業が鉛冷却炉に参入しており、Hydromine 社は UO₂ または MOX 燃料を用いる電気出力 200MW の鉛冷却高速炉 AS-200 を提案している。また、Westinghouse も鉛冷却高速炉の設計概念を提示している。鉛冷却 SMR の可能性を検討するため、米国と EU の間で INERI (International Nuclear Energy Research Initiative) プロジェクトが実施されている。

5. 韓国の鉛冷却炉⁶⁾

国立ソウル大学が、核変換炉 PEACER と鉛ビスマス冷却高速炉 URANUS-40 (Ubiquitous, Robust, Accident-forgiving, Nonproliferating and Ultra-lasting Sustainer) を提案している。PEACER-300 は、金属燃料 (U-TRU-Zr) を用いた電気出力 300MW の鉛ビスマス冷却炉である。URANUS-40 は、UO₂ 燃料を用いた電気出力 40MW の地下設置カプセル型自然循環小型炉で、高い核拡散抵抗性を有している。鉛ビスマスループ HELIOS (Heavy Eutectic liquid metal Loop for the Integrated test of Operability and Safety) が建設され、熱流動解析コードのベンチマーク試験に供されている。

6. 日本の鉛冷却炉

東工大が提案している鉛冷却炉は、長寿命心の可搬型小型炉 LSPR (LBE-cooled Long-Life Safe Simple Small Portable Proliferation Resistant Reactor) と直接接触沸騰水型炉 PBWFR (Pb-Bi-cooled direct contact boiling Water Fast Reactor) である。核燃料サイクル開発機構・原電は日本版鉛ビスマス冷却高速炉 JLFR (Japan LFR) を検討した。いずれも鉛ビスマスを冷却材とするプール型強制循環炉である。

LSPR-50 は、電気出力 53MW で、金属燃料または窒化物燃料を用いた燃料交換サイクル 12 年の小型長寿命炉心である。原子炉を工場で生産して燃料を装荷し、船舶等により現地に運搬して運転した後、燃料を抜き取らずに船舶等によりそのまま工場に持ち帰る小型炉である。PBWFR は窒化物燃料を用いた電気出力 150MW の小型炉で、炉心出口の一次系冷却材中に直接給水することにより蒸気を生成し、同時に蒸気の浮力により一次系冷却材の循環を行うものである。蒸気発生器と一次系循環ポンプが削除されているため、建設コストが安価である。鉛ビスマスとの直接接触による高温水を蒸気発生器に送る間接サイクル方式も提案されている。鉛ビスマス冷却炉心と加圧水型炉の BOP を組み合わせたシステムである。

JLFR は、窒化物燃料を用いる電気出力 750MW の高速炉で、ELFR と異なりコールドレグポンプ方式である。

東工大では、鉛ビスマス冷却炉の多様な開発基礎研究を行ってきており、再処理を不要にする高燃焼度の CANDLE 燃焼炉心も研究されている。

VI. 今後の展望

ロシアの設計が最も実用化に近く、中国が急速にこれを追っており、EU は一定の技術レベルにある。EU はロシアの BUREST や米国の SMR とも協力関係を結び、中国とも技術交流を図っている。米国では、近年 DOE が鉛冷却炉を取り上げ、民間企業も参入している。GIF-LFR pSSC には各国が参加するようになり活動が活発化している。このように鉛冷却高速炉の研究開発は国際的な情報交換により徐々に発展している。

— 参考資料 —

- 1) M. Takahashi, et al., "Design Concepts of LFRs and Related Studies in CRINES of Tokyo Tech.," GLOBAL2011, Paper 392485, Nagoya, Japan, 2011.
- 2) I. V. Gorynin, et al., "Structural Materials for Power Plants with Heavy Liquid Metals as Coolant," Proc. Heavy Liquid Metal Coolants in Nucl. Technol. HLMC'98, October 5-9, 1998, Obninsk, Russia, (1999) pp. 120-132.
- 3) A. Alemberti, et al., "Status of Generation-IV Lead Fast Reactor Activities," Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, FR17, Russia, June 26-27, 2017, IAEA-CN245-065.
- 4) G. Toshinsky, V. Petrochenko, "Modular Lead-Bismuth Fast Reactors in Nuclear Power," Sustainability 2012, 4, pp.2293-2316; doi:10.3390/su4092293.
- 5) Y. G. Dragunov, "BREST- OD- 300 Reactor Facility: Development Stages and Justification," Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, FR17, Russia, June 26-27, 2017, IAEA-CN245-539.
- 6) Presentation materials, "GLANST: Global Symposium on

Lead and Lead Alloy Based Nuclear Energy Science and Technology," Seoul, Korea, Sep. 7-8, 2017.

7) A. Alemberti, "National Status on LFR Development: EURATOM," 13th GIF LFR-pSSC Meeting, March 7-8, 2013.

8) Y. Wu, "R&D Progress of China Lead-Based Reactor," ibid., IAEA-CN245-301.

著者紹介

高橋 実 (たかはし・みのる)

東京工業大学 名誉教授

(専門分野/関心分野)原子炉工学, 熱工学, 材料工学, 液体金属工学



新刊紹介

『エネルギーの視点からみた放射線 強くて、怖いけど、怖くない』

田辺哲朗著, 141p.(2018.1), 九州大学出版会
(定価 2,700 円), ISBN978-4-7985-0221-2・C3040

放射線に関する解説書は、福島原子力発電所の事故以降、放射線の人体への影響を中心に書かれた著作が増え、特に医療関係者によるものが多くなったという印象を持っている。

本書は、工学部出身の著者が、放射線とはエネルギーを運ぶものという視点から書いており、放射線の性質、種類から始めて、放射線の影響(物体や人体)、除染、放射線計測、放射線利用、地球と放射線、エネルギー利用とリスクといった幅広い分野を最新の知見をもとにまとめた労作である。

被ばくとは放射線の持つエネルギーが生物体に与えられることで、放射線の種類や、放射線を受け取った側の器官によっても影響が異なることなどから解説し、放射線は強くて跳ね返すことができないので怖いものだが、むやみに怖がるものでもないことを説明している。

例えば、「なぜ安全な被ばく線量を明言できないのか」という項目では生物に放射線を照射したときの分子レベルの影響から、細胞・組織・個体への影響までのメカニズムについて現在の生物学の研究成果を丁寧に紹介している。

福島について触れている部分では、「ICRP の勧告に基づい

て、政府は福島原発で影響を受けた地域で予想される年間被ばく線量が20mSv以上になる地域を計画的避難区域と設定し、かつ影響を受けている地域の住民の年間被ばく線量を20mSv以下にするように設定しなおしたのです。それ以前は、一般人の被ばく線量は年間1mSv以下にすることをやっていましたので、一気に20倍引き上げられたことになり不安が広がっているようです。」との話の後に、「絶対安全なのは何シーベルト以下なのですか?」と聞かれても、20mSv以下であろうが1mSv以下であろうが100mSv程度以下の被ばくであればすぐにその影響は現れないとされていることを答えざるを得ないことも説明している。

自然放射線と人工放射線とは全く同一という説明など、基礎的な話から、放射線の検出は容易だが、放射線の種類や強度を測定することは難しいことなど興味深い話も数多い。

読者をどのレベルに想定しているのか判らないが、文系の人でも物理の数式的な記述を気にしなければ読み物としても面白いのではないだろうか。高校の教員など人に放射線について説明する機会のある方々にはお勧めのテキストである。

(元三菱重工業・齋藤 隆)



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 —

(5月8日第10回論文誌編集幹事会, 第11回学会誌編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・平成30年3月16日~4月15日に英文誌へ25論文, 和文誌へ1論文の投稿があった。掲載料の減額を含めて投稿数減少への対策を検討していくこととした。
- ・編集委員会(論文誌)の次年度への引き継ぎ事項を確認した。
- ・福島第一原発の廃止措置に関連する研究論文(英文および和文)を特集号として募集することを承認した。
- ・編集委員の選任についての試案が説明され、第3分野で試行することを了承した。
- ・英文誌 International Advisory Board に関する運営細則の原案が示された。編集委員会規程に盛り込むこととした。
- ・和文論文誌投稿の手引およびテンプレート, 英文誌のテンプレートそれぞれの改定案を微修正の後, 承認した。
- ・7月の新年度の委員会は全員に参加を求めることとした。

【学会誌関係】

- ・編集委員会(学会誌)の次年度への引き継ぎ事項を確認した。
- ・国際活動委員会が本学会と協定を締結している海外学協会の紹介記事企画について委員長より説明があり、引き続き検討していくこととした。
- ・60周年記念号の記事企画について検討した。今回の案を骨子とし、各組織への依頼を行うこととした。
- ・第50回(H29年度)学会賞のうち、記事候補案の説明があった。以降、複数の委員で検討・選出し、最終案を出していくこととしている。
- ・「風評被害への対応」企画の進捗状況を確認し、掲載予定を検討した。
- ・次年度の学会誌編集委員体制について確認・承認した。
- ・巻頭言, 時論, その他記事の企画の進捗状況を確認し、掲載予定を検討した。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

核データ研究の最前線

～たゆまざる真値の追及,そして新たなニーズへ応える為に～

第8回(最終回) 核データライブラリ JENDL の進化

日本原子力研究開発機構 岩本 修, 柴田 恵一, 岩本 信之
北海道大学 千葉 豪

核データライブラリは核データ研究の集大成となる成果物である。すなわち核データは利用されて初めて価値があり、核データ研究の最終的な出口が核データライブラリとなる。日本の核データライブラリである JENDL の変遷や現状を紹介し、国際的状况にも触れつつ今後の展望を示し、8回にわたる連載講座の最後とする。

KEYWORDS: Nuclear Data, JENDL, Past, Present, Future, Evolution

I. 汎用ライブラリの変遷と JENDL-4.0

中性子汎用核データライブラリは歴史的には 1960 年代の英国 UKNDL (UK Nuclear Data Library) とドイツ KEDAK (KErnDAten Karlsruhe) にその端を発する。但し、それらの活動は 1980 年代初めに終了し、1981 年に OECD/NEA データバンクの下でスタートした JEF (現在は JEFF) プロジェクトが欧州での核データ整備を引き継ぐことになった。米国では UKNDL 及び KEDAK から若干遅れて 1960 年代後半から独自のライブラリである ENDF の開発が始まり、現在に至っている。一方、日本ではやはり 1960 年代から旧日本原子力研究所のシグマ研究委員会及び日本原子力学会シグマ特別専門委員会(両委員会を総称してシグマ委員会と呼ぶ)の下で核データ評価活動が開始された。日本独自の汎用ライブラリ JENDL¹⁾を持つことに至った背景には、1)「もんじゅ」開発のための臨界実験の詳細解析をする上で、素性の知れた独自の核データライブラリの存在が不可欠である。2)原子力の自主開発を進めるのに基本的なデータベースを外国産に頼るのは危険である。等の認識が当時のシグマ委員会メンバーにあったことによる。結果的にこの認識は的を射たものであり、現在、わが国が核データ大国として原子力の様々な分野で独自の展開を可能と

することにつながる英断であった。

1977 年に完成した JENDL (Japanese Evaluated Nuclear Data Library) 汎用ライブラリの第 1 版 JENDL-1 は、前述の経緯から高速炉開発を主目的とするものであった。この開発を行うに当たり、核反応モデルコード、データ編集コード、データ可視化コード等の開発研究を事前に行って来た。収納核種数 72、上限エネルギー 15MeV で、現在の汎用ライブラリに比べると極めて小ぶりのものであったが、高速炉の諸特性を当時としては十分な精度で予測できた。これを弾みとして、高速炉のみならず熱中性子炉、遮蔽、核融合中性子工学への応用も考慮した汎用ライブラリ JENDL-2 の開発が直ちに進められた。収納核種数は 181 に増え、上限エネルギーも核融合を考慮して 20MeV とされた。JENDL-2 は 1982 年に公開され、その予測精度は核分裂炉に対しては高いものであったが、残念ながら 14MeV 中性子を扱う核融合中性子工学では不十分な結果となってしまった。これは、評価に使用した核反応モデルが 10MeV 以上のエネルギー領域の物理現象を適切に記述できるものではなかったことに起因する。この問題の解決には次版である JENDL-3 の登場を待つことになる。

1980 年代は ITER 開発計画と相まって核融合中性子工学が世界的に注目を浴びた。日本では、旧日本原子力研究所、大阪大学、東北大学等の D-T 中性子源を持つ施設で、実験的研究が盛んに行われた。上述の様に JENDL-2 は核融合中性子工学への適用に問題があったので、シグマ委員会は真の汎用ライブラリを目指して JENDL-3 の開発に着手した。1989 年に JENDL-3.0 (171 核種)、1990 年に JENDL-3.1 (324 核種)、1994 年に JENDL-3.2 (340 核種)そして 2002 年に JENDL-3.3 (337 核種)を公開した。それぞれの版の詳細説明は省くが、

Cutting-edge studies on Nuclear Data for Continuous and Emerging Need (8) ; Evolution of the nuclear data library JENDL : Osamu Iwamoto, Keiichi Shibata, Nobuyuki Iwamoto, Go Chiba.

(2018 年 1 月 16 日 受理)

■前回タイトル

第 7 回 高エネルギー領域への挑戦

3.1 は 3.0 に FP 核種を追加, そして 3.2 および 3.3 はその時々での問題点を解消した改訂版である。JENDL-3 シリーズでの幾つかのトピックを挙げてみる。軽核では, 核融合でのトリチウム増殖に関係する ${}^7\text{Li}(n,n't){}^4\text{He}$ 反応断面積が当時の ENDF/B-IV に比べ 14MeV で約 10% 小さくなった。この結果は核融合炉ブランケットの設計に大きな影響を与えることになった。中重核の評価では, 高エネルギー中性子入射による核反応をより正確に記述する理論モデル(直接反応, 前平衡反応)を採用したことにより, 14MeV 中性子入射に伴う放出中性子スペクトルを高精度で予測可能になり, JENDL-2 での問題点を解決することができた。また, 重要な U 及び Pu 同位体の核分裂断面積に関して, それぞれの反応の測定値に加えて, 比測定値(例えば, ${}^{239}\text{Pu}(n,f)/{}^{235}\text{U}(n,f)$ 等)も考慮した一般化最小自乗法に基づく同時評価を数 10keV 以上のエネルギー領域で実施した。これにより, 全体としてバランスのとれた最適な核分裂断面積の評価が可能となった。さらに JENDL-3 シリーズで特筆すべき点として, ガンマ線生成断面積, 放出中性子二重微分断面積及び共分散データがあげられる。ガンマ線生成は核発熱の計算, 二重微分断面積は核融合炉の設計計算で必要とされていた。一方, 共分散は評価済みデータの不確かさを示す量として, 特に, 高速炉開発で強く求められていた。JENDL-3 シリーズの最終改訂版となる JENDL-3.3 ではガンマ線生成が 114 核種, 二重微分断面積が 60 核種そして共分散が 20 核種に与えられた。

現時点での最新版である 2010 年に公開された JENDL-4.0(406 核種収納)では, 重要核種データの見直しとともに, 革新的原子炉開発, 軽水炉の高燃焼度化・MOX 燃料利用などを考慮してマイナーアクチノイド(MA)及び核分裂生成物(FP)データの信頼度向上に重点を置いた²⁾。測定値の少ない MA 及び FP の評価では理論計算が多用される。そのために, 新たに最新の核物理的知見を反映した核反応モデルコードを開発した³⁾。前版 JENDL-3 では主に外国産のモデルコードを使っていたが, JENDL の開発経緯を鑑み独自のコードを作成した。これにより, 核データ評価における理論的予測のポテンシャルが向上した。更に, 核反応計算で重要な核子のチャネル結合光学モデルパラメータを新たに導出し⁴⁾, 上記のコードとともに高速中性子エネルギーでの評価に使用して, 断面積の精度を高めることができた。一方, アクチノイド核種の熱中性子捕獲及び核分裂断面積は, 測定データがある場合は標準断面積で再規格化して測定年代, 実験誤差及び評価者の判断による重みを考慮した平均から算出した。測定値がない場合は, 近傍核の系統性及び理論計算値を加味して求めた。図 1 に熱中性子断面積のライブラリ間の変化を示す。 ${}^{235,238}\text{U}$ と比べて MA の変化が著しく不確かさが大きいことがわかる。

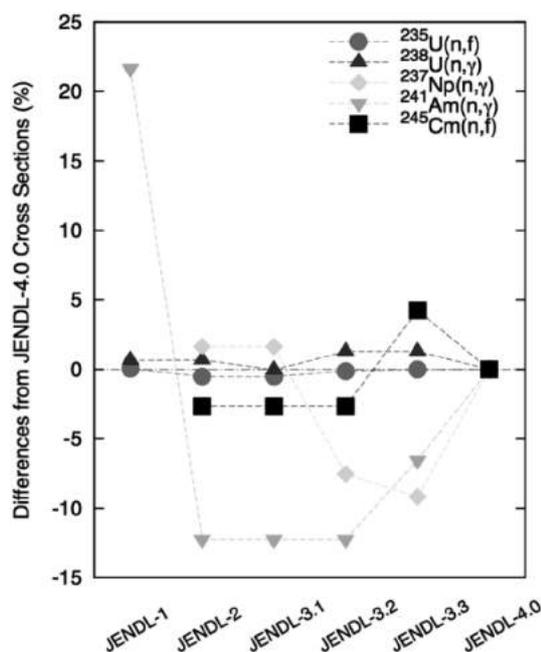


図 1 熱中性子断面積のライブラリ間の変化
 ${}^{237}\text{Np}$ 及び ${}^{245}\text{Cm}$ は JENDL-1 には収納されていない

通常, 核データライブラリはその公開に先立って, 種々の臨界集合体や放射線遮蔽模擬体系などで取得された実験データ群に予め適用され, その性能が確認される。このようなときに用いられる実験データは, 中性子エネルギーや多くの核種からの寄与の積分値として決まることから, 断面積などの測定データである「微分データ」に対して「積分データ」と呼ばれる。積分データを用いた核データライブラリの検証作業は核データライブラリ開発の重要な一つの過程と言える。

核データライブラリの検証に用いられる積分データとしては, 高速および熱中性子系の臨界データや核融合中性子の遮蔽データなどからなる特定のデータセットが一般的に用いられてきたが, 近年, これまでに世界各国の実験施設で取得された臨界・遮蔽実験データを見直し, データベース化するという複数のプロジェクトが始動した。その結果, 膨大な数の積分データが整備・公開された。例えば, 「国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト」で整備されたデータベースには, 2015 年時点で 5,000 弱もの臨界データが含まれている。近年の核データライブラリの積分検証にはこれらのデータベースが積極的に活用されている。

核データライブラリの検証の過程で積分データの再現性に問題があった場合には, それを核データ評価にフィードバックすることになる。そのため, 検出された問題の原因となっている核データを特定する必要がある, そこでは積分データの個々の核データに対する感度を定量化することが求められる。中性子の輸送計算や原子核の生成・消滅計算の結果得られる積分データの核データに対する感度の計算手法は, 原子炉物理学の分野

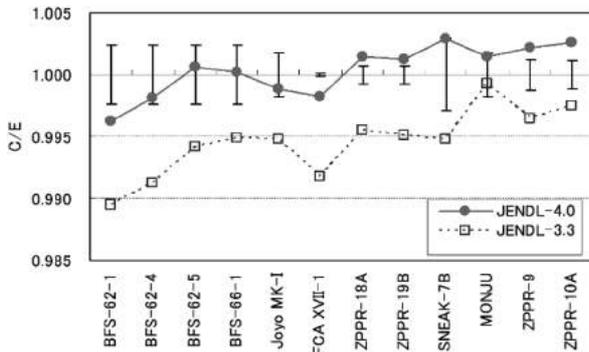


図2 高速中性子炉の臨界パラメータに対する予測精度 (JENDLを用いる計算値(C)を実験値(E)で割った値) 縦棒は実験値の誤差を表す

で精力的に開発が進められ、JENDL-4.0の開発ではこの技術が極めて効果的に活用された。原子核理論、原子核実験の専門家らが主となって作られてきた核データライブラリであるが、今やユーザー側も一体となった開発が世界的な潮流となっている。その先鞭をつけたのがJENDL-4.0と言えるかもしれない。

図2にJENDL-4.0の積分検証の結果⁵⁾を、古いバージョンであるJENDL-3.3の結果とともに示すが、予測精度の劇的な向上が図られていることが明らかであろう。また、近年は核データに対して、その最も確からしい値とともに、その「不確かさ」を与えることがユーザー側からの要求により必須となってきている。積分検証の情報を核データ評価に反映させた場合、個々の核データの不確かさもその影響を必然的に受けることになる。高い予測精度に加えて、高い信頼性を兼ね備えた核データライブラリの開発を目指して、現在も世界で精力的な研究活動が行われている。

II. 特殊目的ファイルの最近の進展

汎用評価済ライブラリとは別に、核データ利用の広がりや新たなニーズを受けて、崩壊データや放射化、高エネルギー・光核反応等に対する特殊目的ファイルが開発されている。ここでは、特殊目的ファイルに関する最近の進展⁶⁾について紹介する。

原子炉ではUやPuの核分裂反応で生じたエネルギーを利用して、発電を行っている。では、それらが核分裂を起こした後は、どのような核種が残るのだろうか。核分裂生成物の核種分布(核分裂収率)を知ることは、特に核廃棄物処理の観点から、長寿命核分裂生成物の生成量や崩壊熱の評価に極めて重要となる。これに応える核データが、36核種の核分裂収率を収録したJENDL/FPY-2011である。このファイルには中性子誘起核分裂収率(31核種)、並びに自発核分裂収率(9核種)に関するデータがそれぞれ収録されている。一方で、生成された核分裂生成物はそのほとんどが不安定であるため、安定な核

種に向けて放射性崩壊を起こす。この過程で放出されるガンマ線やベータ線が使用済み核燃料における崩壊熱の原因となる。このガンマ線やベータ線の平均エネルギーや生成された核種の崩壊様式に関する核データを収録しているのが、JENDL/DDF-2015である。このファイルには1,284核種に及ぶ核分裂生成物のみならず、中性子やHからRf(原子番号104)までの3,237核種の崩壊データが収録されている。これらのデータのうち、核分裂直後に生成された核種の多くは短寿命であるため、崩壊様式や発生するエネルギーさえ、あまり分かっていない。これらの崩壊データの評価に理論計算⁷⁾を採用することでこの困難を克服し、さらに崩壊で発生するガンマ線を捉える全吸収ガンマ線分光(TAGS)法による測定データを取り入れることで、崩壊データの精度向上が図られている。

さて、原子炉施設の廃止措置を行う上で、施設の放射化量を推定するための放射能インベントリ評価は欠かすことができない。この評価を実施するのに必要な核データは、中性子輸送計算用の汎用ライブラリと放射化量推定用の放射化断面積ファイルになる。後者の用途のために開発されたJENDL/A-96(1996年公開)には、233核種が収録されている。しかしながら、線量限度等を定めた告示に示されている原子炉施設で放射能評価を行う必要のある半減期30日以上、もしくは超長寿命の核種の生成に関与する親核種は311種あり、JENDL/A-96のデータだけでは不十分である。そこで、特に軽水炉施設の廃止措置への利用に向けたJENDL/AD-2017が開発され、上記311核種が収録された。この放射化断面積ファイルには各核種の生成断面積が収録されているが、原子核の基底状態とは別に、エネルギーが高く寿命の長い準安定状態にある原子核(アイソマー)の生成断面積を含むことに大きな特徴がある。これにより精度の高い放射能評価が可能となる。それでは、なぜインベントリ評価を行うのに二つのファイルが必要になるのか不思議に思うかもしれない。応用面から考えれば、輸送計算に必要な汎用ライブラリに放射化断面積が収録されていれば、すっきりする。残念ながら、このようなデータの収録はJENDL-4.0においてさえ、3核種のみであり、また多くの核種に対して両データを整合させるのは大変な作業になるため、統合が進んでいない。しかしながら、今日の原子炉施設の高経年化を考慮すると、放射化断面積の重要性は益々高まるものと考えられるため、今後の汎用ライブラリ開発においては放射化断面積も統合して収録し、この問題を解消していく必要がある。

核データは原子炉施設のみならず、陽子加速器施設の遮蔽設計などにも利用される。このような分野への利用に対応した核データとして、高エネルギー核データファイルJENDL-4.0/HE(2015年公開)がある。このファイルには、最大200MeVまでの中性子及び陽子入射に対してそれぞれ130及び133核種の核データが収録されてい

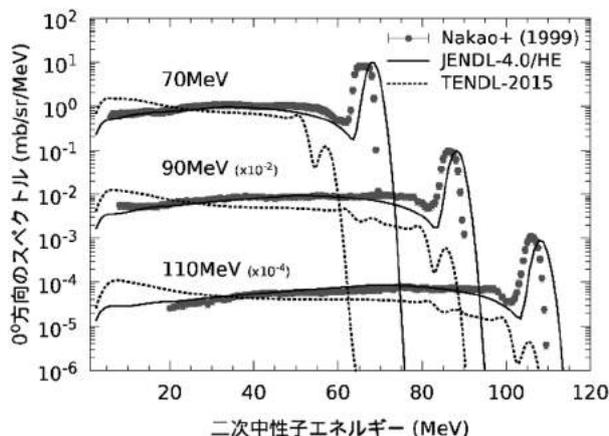


図3 ${}^7\text{Li}$ 標的への陽子入射により0度方向へ発生した中性子のエネルギースペクトルに対する実験値と評価値との比較

る。中性子入射核データは20MeV以下のデータを収納したJENDL-4.0を基に拡張されており、ユーザーの利便性と核データの整合性を確保している。また、陽子入射核データには、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)などにおける中性子発生ターゲットとして注目される ${}^6,7\text{Li}$ や ${}^9\text{Be}$ が新たに収納され、これらを用いた装置開発などへの利用が見込まれる。図3に、 ${}^7\text{Li}$ 標的への陽子入射により、0度方向へ発生した中性子のエネルギースペクトルを示す。TENDL-2015ライブラリ(オランダ)と比較すると、JENDL-4.0/HEの実験値への再現性が高いことが分かる。なお、ピークエネルギーのずれは、標的中における陽子の減速が考慮されていないためであると考えられる。

電子線加速器を用いた放射線治療が多くの医療施設で行われている。加速器の高加速電圧化に伴い、電子と物質との相互作用で発生する光子のエネルギーが10MeVを超えるものがある。この高エネルギーの光子が人体や装置、遮蔽材中の原子核と反応し中性子を発生することがある。この中性子は遮蔽材の放射化により従事者への被ばくの可能性を高める一因となるなど、人体に悪影響をもたらす。これらの影響評価や放射化量推定などへ利用されるのが、光子入射に対する核反応データファイルJENDL/PD-2016である。このファイルは、人体や加速器遮蔽材などを構成する主要な181核種を収納した標準版と2,681核種を収納した拡大版で構成され、世界最大級のファイルとなっている。光子のエネルギー範囲は最大140MeVまでをカバーしており、高エネルギー光子による核分裂反応を利用した非破壊検知システムの構築など幅広い分野への利用が可能である。

Ⅲ. 核データライブラリの国際的状況

核データの分野では、多国間の国際協力として2つの大きな枠組みがある。一つは本連載講座第5回で紹介されたIAEA核データセクションの活動であり、もう一つ

はOECD原子力機関の下で実施されている国際核データ評価協力ワーキングパーティ(WPEC)⁸⁾である。WPECでは年一回の会合が開かれ、開発状況等が報告され、国際的に情報が共有されている。現在、開発が活発な代表的な核データライブラリとして、JENDL, ENDF, JEFF, CENDL, TENDLがある。以下にこれらのライブラリ開発の状況(2017年11月現在)を簡単に紹介する。

ENDFは米国を中心として開発されている核データライブラリである。最新版は2011年公開のENDF/B-VII.1であり、423核種に対する中性子反応データを含む。この版ではJENDL-4.0から多くのMAデータが採用された。現在、次期ライブラリENDF/B-VIIIのベータ版が公開されており、近々正式版も公開される予定である。開発にあたり、WPECの枠組みで実施された国際評価ライブラリを作るパイロットプロジェクト(CIELO)の成果が全面的に取り込まれた。CIELOでは世界の核データの研究グループを多く巻き込んでウランや水素、酸素、鉄の主要同位体について、実験や評価、積分テストの広い観点から協力が進められ、その結果得られた多くの知見がENDFに反映された。

JEFFは欧州を中心として開発されている核データライブラリであり、最新版であるJEFF-3.2が2014年に公開された。JENDL, ENDF, JEFFの主要ライブラリ中で最も新しいものであり、472核種に対する中性子反応データを収納している。JEFFには他の核データライブラリからデータが積極的に取り込まれている。次期バージョンJEFF-3.3は550核種を超える中性子反応データを含み、ENDFと同様に近日公開される予定である。

ENDFとJEFFは比較的多くの機関が参加して開発されており、良いものがあれば他の核データライブラリのデータから採用する方針であるが、一方、CENDLはほとんど中国の一研究機関である中国原子能科学研究院で開発されており、対極的である。現在、2009年に公開されたCENDL-3.1が最新版であり、240核種を収納している。次期CENDL-3.2の開発が着実に進められている。

TENDLは通常の評価済核データライブラリとは大きく異なる考え方で開発されている。核データを一つ一つ評価するのではなく、単一の原子核反応計算コードTALYSを全面的に使用して、非常に多くの核種の核データを系統的に評価している。このため、非常に多くの核種に対してデータを作成可能である。現在の最新版はTENDL-2015で、2,809核種の中性子反応データを収納している。また、陽子やアルファ粒子等の核反応データにも、2,800を超える核種のデータが含まれている。

IV. JENDL の展望と核データ研究 (連載講座の結びに代えて)

JENDL は日本国内の原子力開発の基盤を与えるものとして、開発されてきた。現在の JENDL-4.0 は軽水炉や高速炉、核融合炉等へ広く利用でき、これらの応用に対する様々なベンチマークテストでも良い結果が得られている。世界的に見ても、JENDL の信頼性は高く、ENDF、JEFF はいうに及ばず、IAEA が取りまとめた核融合炉のための核データファイル FENDL 等でも JENDL から多くのデータが採用されている。これらの成果はひとえに開発に携わった先人たちがこれまで積み上げてきた努力の賜物である。

しかしながら、本連載講座第 1 回で述べられているように現在の核データライブラリでニーズを満たしているわけではない。原子炉の臨界性などでは非常に高精度(典型的には実効増倍率で 0.1% のオーダー)の予測が求められているが、標準とされる一部の断面積を除くと通常の断面積の精度はせいぜい 1% 程度である。幅広い利用に対して、近い将来この精度を満足する核データの提供は難しいだろう。今できることは、現在の核データの不確かさを示し、その不確かさに基づいて合理的な核データの利用を促すことである。JENDL-4.0 で核データの不確かさを示す共分散データはアクチノイドを中心にかなり充実した。しかし、まだ十分とは言えない。加えて、妥当な共分散データを得るにはどのようにすれば良いか、また、その確からしさをどう担保するかは現在の課題であり、国際的にも盛んに議論や研究が進められている。

現在の科学技術開発において数値計算の果たす役割が非常に大きくなっており、これを支える核データも多様なものになる。対応するには核反応や核構造に関する理論的な理解が欠かせない。また、連載講座第 2 回で述べられたように実験データに理論的な解析を加えることで、核データの精度向上につながる。

現在の核データライブラリ開発において、WPEC や IAEA 核データセクションの存在感が増している。最近の核データライブラリの進展は、これらの国際協力なしには語れず、これからもこの傾向は続くであろう。その一方で、それぞれの国や地域における技術開発の方向性に応じて優先度が異なるため、核データの独自開発を続けていくことが必須であり、国際協力は独自の技術力を有することが大前提となる。それぞれの核データプロジェクトが、それぞれの優先度に従い開発を進めつつ、国際協力により共通の課題に取り組むことが相互の利益

につながるといえる。

JENDL は次期版として JENDL-5 の開発を進めている。アクチノイド以外の核種についても共分散データを充実させ、すべての安定核種のデータを含めたライブラリを 2021 年度に公開することを目指している。JENDL の開発では、日本国内の核データへの要望を満たすため、国際協力を活用しつつ、分野間の連携を深めて JENDL をさらに進化させていくことが必要である。そのためには、今後も核データ研究を魅力あるものとして、特に若い世代の研究者を含む多くの人を引き付けて行くことが重要であろう。この 8 回にわたる連載講座が、そのきっかけになれば幸いである。

(余談)副題にある「真値の追及」は「真値の追求」と書かれるべきであるが、これは核データの値について核データの研究者が常に追及されていることの表れともいえ、ご容赦願いたい。

－ 参考資料 －

- 1) K. Shibata, J. Nucl. Sci. Technol. 50, 449 (2013).
- 2) K. Shibata et al., J. Nucl. Sci. Technol. 48, 1 (2011).
- 3) O. Iwamoto, J. Nucl. Sci. Technol. 44, 687 (2011).
- 4) S. Kunieda et al., J. Nucl. Sci. Technol. 44, 838 (2007).
- 5) G. Chiba et al., J. Nucl. Sci. Technol., 48, 172 (2011).
- 6) O. Iwamoto et al., EPJ Web of Conf. 146, 02005 (2017).
- 7) K. Takahashi et al., Atom. Data and Nucl. Data Tables, 12, 101 (1973).
- 8) E. Dupont et al., Nucl. Data Sheets 120, 264-267 (2014).

著者紹介



岩本 修 (いわもと・おさむ)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)核データ、核物理、原子炉物理、放射線工学



柴田恵一 (しばた・けいいち)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)核データ評価、原子核物理



岩本信之 (いわもと・のぶゆき)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)核データ、原子核物理、宇宙核物理

千葉 豪 (ちば・ごう)

本誌, 59[10], p.48(2017)参照。

リスク評価とマネジメントに関するアジアシンポジウム開催報告

東京大学 山口 彰
 名古屋大学 山本 章夫
 原子力安全推進協会 成宮 祥介

リスクに関する国際シンポジウムは、日中韓を中心に横浜で開催された。20年ほど前に日韓で始まった日韓 PSA ワークショップにその起源をおくもので、原子力施設に関するリスク評価の専門家が一堂に会し、充実した意見交換、議論が行われた。リスクの本格活用に臨む我が国としては多くの知見を得たシンポジウムとなった。

KEYWORDS: ASRAM2017, PRA, Risk Assessment, Asia, Risk Management, Japan-Korea PSA Workshop, Risk-Informed Oversight Process

I. 開催の経緯

ASRAM: Asian Symposium on Risk Assessment and Management(リスク評価とマネジメントに関するアジアシンポジウム)は、リスク評価とマネジメントにかかわる国際会議である。2015年の第12回日韓 PSA ワークショップの後、原子力発電所の新規建設が目覚ましい中国を加えアジアの原子力新興国も入ったシンポジウムに拡張することが検討され、2016年10月にソウルにて行われた PSAM13 の最終日午後に ASRAM の発足が決まったものである。今後は毎年、日中韓で持ち回り開催をすることになっている。

II. 会議の意義

我が国では、福島第一原子力発電所事故を経て、リスクの概念、PRA 手法のようなリスク評価、リスク情報を用いた意思決定の重要性が声高に叫ばれるようになっており、特に外的事象(地震や津波など)も考慮したリスク評価や保守活動やマネジメントなどへもリスク情報を活用する、という動きが、規制機関、事業者などで活発になりつつある。

一方、アジア諸国では、原子力発電の必要性が主張されている。中国は、目覚ましい経済発展による電力需要の増大に対応するため、積極的に原子力発電を導入してきている。2011年以降も、新たに24基が運転を開始し、現在は、米国、フランス、我が国に次ぐ37基の原子力発電所を保有している。さらに多くの原子力発電所建設を計

Symposium Report on ASRAM2017: Akira Yamaguchi, Akio Yamamoto, Yoshiyuki Narumiya.

(2018年3月5日 受理)

画している。また、韓国は、我が国と同様、エネルギーの輸入依存が大きく、従来より積極的な原子力発電導入政策を取り、24基の原子力発電所が稼動中であるが、現政権が脱原発を宣言したこと、昨年、地震があり原子力発電所が影響を受けたこと、などの状況にあり、原子力発電の安全性、リスクの把握が重要となっている。さらに、東南アジア諸国では、経済の安定的な発展を実現するために、原子力発電を建設、計画している国もある。

このようなアジア諸国を交えて、原子力施設のリスクについて議論し意見交換を行うことは、研究成果の提示だけでなく、政策や安全確保活動の実施に直接、影響を及ぼすこともあり、大変、意義の大きいことである。

III. 会議の概要

日時、場所、参加状況、発表状況、プログラムは以下のとおりである。当初、100名程度の参加を予想していたが、150名を超える参加者となった。

- ・日時：2017年11月13日～15日
- ・場所：パシフィコ横浜
- ・運営組織：主催は日本原子力学会で、日本 ASRAM 組織委員会を立ち上げた。名誉委員長に、近藤駿介(原子力発電環境整備機構理事長)を迎え、組織委員長は、山口彰が務めた。
- ・参加者：8カ国、151名。日本85名、韓国46名、中国11名、タイと米国が3名ずつ、インド、インドネシア、スウェーデンが1名ずつ。
- ・発表：技術セッションでの発表は総計74件。内訳は、韓国28件、日本26件、中国8件など。横浜での開催ということで日本からの参加者は多かったが、発表は相対的に少なかった。

・プログラム

- 11月13日(1日目)オープニング, プレナリースピーチ, 招待講演, キーノート講演, パネルディスカッション
- 11月14日(2日目)技術セッション
- 11月15日(3日目)技術セッション, クロージング

IV. 発表の概要

1. プレナリースピーチ

日韓 PSA の時代から中心的に活躍されてきた, 近藤駿介氏, 韓国の Park 氏, そして香港シティ大学の Way Kuo 氏から, それぞれ会議に向けた重要なスピーチがなされた。近藤駿介氏からは, 「原子炉リスクを ALARP にする, IoT 時代におけるリスクマネジメント」と題して, 2017 年に発行された INSAG-27 で, 事業者と規制機関の間だけではなく, 産業界や市民も交えたコミュニケーションや相互作用が重要であることなどを引用しつつ, 人的あるいは自律した組織の過誤を取り扱う部門間の相互コミュニケーションが重要であり, IoT リスクにとって, 自律が重要な決定因子になるだろう, との趣旨が述べられた。Chang K. Park 氏からは, 「新しい脅威と新設計基準」と題して, 3 基の炉心損傷事故のあと, 公衆が原子力エネルギーを受け入れるためには新しい「ゼロリリース安全目標」が必要なこと, 原子炉の新設計に対して新しい DBA (設計基準事故) の定義が必要なこと, ゼロリリース安全目標を保証するために追加の ESF (工学的安全特徴) が求められること, が述べられた。続き, Kuo 氏からは「エネルギー開発に着目したリスク」と題して, 現代においては, 空気汚染, 自動車事故, テロリズム, など多くのリスクの中で, エネルギーリスクは最大のものであるとし, 化石燃料の使用と地球温暖化による気候変動は地球の将来に影響を及ぼすこと, エネルギーと環境との関係を分析することがより明確な構想を与えてくれる, との主張が披露された。

2. 招待講演とキーノート講演

規制庁金子修一氏から「リスクインフォームドオーバーサイトプロセスに向けた NRA の挑戦」と題して, 現在, わが国で取り組んでいる新しい検査制度についてリスクの点での概要が紹介された。この挑戦を継続していくために必要な点として, ①手順, 意思決定基準などを検討すること, ②マニュアル, ガイド, 標準などの整備, ③新法令施行までの 2.5 年の試行, ④リスク評価法の開発, ⑤規制庁の検査官, リスク評価者の育成, ⑥検査官の訓練プログラム整備, などが示された。

3 名のリスク専門家からキーノート講演がなされた。電中研 NRRC (Nuclear Risk Research Center) 高橋毅氏から「日本の事業者におけるリスク評価研究とその活用」, 中国清華大学 Yanfu Li 氏から「原子力発電所のサイバーセキュリティ」, 韓国 KAERI (Korea Atomic

Energy Research Institute) Joon-Eon Yang 氏から「韓国の安全目標に整合するリスク研究の現状」の講演があった。特に日韓両国の最新のリスク研究とその目的について相互に参考になる情報交換がなされた。

3. パネルディスカッション

2 つの興味深い討論が行われた。一つは, Woody Epstein 氏による「火災防護のためのリスクマネジメントと実適用」の特別セッション。これには日中韓と米国の火災リスク評価の専門家が参加した。停止時の火災リスク, データベース, 検査との関係, などが議論された。さらに地震起因火災 PRA も必要になること, 優先順位をつけた実践的火災リスク評価が必要であることが指摘された。もう一つは, 若手世代による「アジア PRA コミュニティの強い結束」をテーマに, 日中韓米, インド, タイからの若手研究者による熱い議論が展開された。パネリストからは各国のリスク評価の研究テーマを紹介したが, それぞれの原子力事情を反映したものであった。今後このような異なる視点の意見交換を継続することで, 相互に問題解決が共有されることも期待される。

4. テクニカルセッション

シビアアクシデント, 先進的 PRA 手法, 緊急時計画・対応, 地震リスク評価, 外的ハザード・フラジリティ, マルチユニット PRA, 内的事象 PRA, 火災 PRA, リスクマネジメント・RIDM, 停止時 PRA, 他施設の PRA, 保守・検査, 地震安全原則, リスク活用, 人間信頼性, 放射線被ばく, 環境影響評価の 15 トピックスについて, 合計 74 件の発表があった。新しい方法論の提案, 考え方の提言, 様々な活動へのリスク活用, と大変幅の広い課題にかかる研究発表であった。また質疑応答では意見の活発なやり取りがあった。

V. まとめ

20 年にわたり築いてきた日本と韓国の PSA ワークショップを, 中国さらにアジアの原子力諸国に参加を呼びかけて開催した, アジア地域におけるリスク評価・リスクマネジメントの国際会議 ASRAM の概要を紹介した。参加国それぞれ, 位置づけは異なるが, リスク評価・リスクマネジメントが原子力エネルギーの民生利用に係る関係者(研究者, 事業者, 規制者, 一般公衆)にとって重要であることが再認識された。2 日半であったが, 参加者には多くの貴重な情報を持ち帰ってもらえたと思う。

次回 ASRAM2018 は, 2018 年 10 月に中国で開催予定である。リスク評価, リスクマネジメントを議論する国際会議は毎年世界のどこかで開催されているが, わが国から近隣国で開かれる本国際会議に, ぜひ多くの方々が参加され, 今回に匹敵する, いやそれ以上の数と内容の発表により, 活発で有意義な会議になることを希望するものである。

YGN 若手勉強会報告：「安全神話」を議論

YGN 運営委員 後藤 弘行
関西電力

日本原子力学会若手連絡会(YGN)は、2017年11月17日～18日に第5回若手勉強会「安全神話とは何か。私たちは本当に安全神話に囚われていたのか。」を開催し、26名の若手が議論を行った。その概要について報告する。

I. はじめに

YGNでは、若手の日常業務に囚われない自己研鑽のため、2016年より「若手勉強会」を開催している。第5回となる今回は、福島第一原子力発電所事故から6年が経過し、一部の原子力発電所で再稼働が進む中で、改めて事故の背景とされる「安全神話」をテーマとした。

II. 第5回若手勉強会の報告

1. 開催概要

本勉強会は、「安全神話」をキーワードに、我が国でなぜ原子力のリスクや想定外に対する議論や備えが疎かにされたのか、それを繰り返さないために何をすべきか、を議論するため、2017年11月17日～18日に、大阪市にて開催し、電力、メーカー、大学、研究機関等から若手26名が参加した。なお、本勉強会ではチャタムハウスルールⁱを適用し、本音で議論されるよう配慮した。

2. 基調講演

基調講演として、3名の講師をお招きした。1日目の冒頭に、北海道大学公共政策大学院の鈴木一人教授より、安全神話が形成された歴史的・構造的な要因について、国、事業者、マスメディア、地域住民等の様々な関係者の認識や行動、それらの背景について、政治学の視点での分析を講演いただいた。それに続き、1日目の後半には原子力安全推進協会の大谷昌徳氏(元・関西電力)から、2日目には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の佐治悦郎氏(元・原子力安全委員会、三菱重工業)より、事業者、メーカー、規制関係者の立場でリスク情報活用や安全対策等に取り組みられた経験から、当時の認識や状況、また今後のリスクとの向き合い方等について、講演いただいた。

3. 参加者ディスカッション

2日目の最後に、参加者を少人数のグループに分け、安全神話が形成された要因や今後の取り組みについて議論した。限られた時間ではあったが、様々な視点の意見が交わされた。以下に、主なものを紹介する。

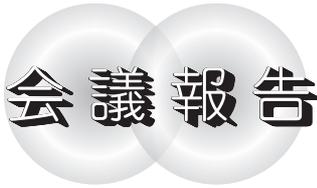
- ・「原子力は安全である」という喧伝が、次第に想定外の議論をタブーとしたといわれるが、専門家と非専門家の間にある知識や認識方法の差異を前にして、専門家側が常に適切な言い方をし続けることは、現実には非常な努力を要するだろう。しかし、言葉は自己暗示の効果を持つもの。安易な説明方法に逃げてリスクの議論が妨げられぬよう、自覚的なコントロールが必要。
- ・外交など、多くの政治決定は不確かな情報を基に決定され、それが当然のこととして根付いているのに、なぜ原子力ではできなかったのか。業界全体でトランスサイエンスの議論を続け、「不確かさ」に向き合う風土を自ら醸成することが必要。技術者には、政策や経営等の意思決定者に対し、臆せずに「科学で分かることはここまで」と伝える勇気が求められるのではないか。
- ・事業者、メーカー、行政、マスメディア等、関係者間の不信感も、リスクの議論を妨げたのではないか。将来のビジョンを共有するとともに、各々の立場や役割を相互に理解することが、リスクを適切に伝達、議論し、ともに解決策を考えるために必要ではないか。

III. 所感

参加者の事後アンケートでは、「新たな観点、多くの教訓を学ぶことができた」などの回答のほか、「もっと違う立場の意見を聞き、具体的な解決策と一緒に考えてみたい」といった要望も寄せられた。これは、基調講演において、原子力業界の外部からの分析と内部の実感の両方に触れ、その後の自由討論により若手同士で各々の課題認識を交換したことで、参加者が客観的、かつ臨場感をもって過去の状況を捉え、当事者としてこの問題に取り組む意識付けができたものと考えている。

(2018年2月15日記)

ⁱ 「会議で得た情報を参加者は自由に使用してもよいが、発言者及びその他の参加者の身元・所属団体は明かしてはならない」というルールで、国際会合等の場で率直な議論を促すために多く用いられている。



HOTLAB 2017 ; 第 54 回ホットラボ・遠隔操作会議

HOTLAB 2017; 54th Annual Meeting on Hot Laboratories and Remote Handling

2017 年 9 月 17~22 日 (茨城県, 水戸市)

日本原子力研究開発機構 (JAEA) は、日本原子力学会および国際原子力機関 (IAEA) の共催のもと、標記会議を開催した。この会議は、照射後試験技術、遠隔操作技術、およびホットラボ施設の安全運用などの情報交換および協力を目的に、1963 年からほぼ毎年、もともとは欧州域内の会議として開催されてきた。2007 年からは、世界各国が参加する会議に発展し、日本からも毎年数名が会議に参加してきた。2011 年からは、IAEA とも協力しながら運営されてきている。

今回の日本での開催は、2013 年の米国・アイダホフォールズでの開催について、欧州域外では 2 回目であった。本会議には、21 개국から 155 名 (うち海外 107 名) が参加し、特別セッションと 5 つの技術セッションで 51 件の講演およびポスターセッションで 29 件の発表があった (表 1)。

福島特別セッションでは、東京電力福島第一原子力発電所 (1F) の廃止措置に向けた取り組み状況、ならびに JAEA の橋葉遠隔技術研究開発センターおよび大熊分析・研究センターの現況・計画が報告された。また、1F のガレキの放射能分析の結果が報告されるとともに、1F の燃料デブリについて、米国 TMI-2 の場合を参照しつつ、報告・議論された。さらに、1F の廃止措置に係る国際協力について報告・議論された。ホットラボを利用した燃料デブリなどの分析・測定評価をとおして、1F の事故進展の解明や軽水炉の安全性向上に貢献していきたい、というホットラボ関係者の強い意欲が感じられた。

ホットラボ運転のセッションでは、東日本大震災による JMTR ホットラボの被害と対応、1F 事故がオランダの原子力設備導入に対して与えた影響などについて、報告された。また、従来の大型のホットラボではなく、照射後燃料材料の微小試料で精巧な分析・測定を実施する新しいホットラボとして、米国アイダホ国立研究所 (INL) の IMCL (Irradiated Materials Characterization

Laboratory) および英国原子力公社 (UKAEA) の MRF (Materials Research Facility) の設置・運用について報告された。さらに、ホットラボ施設を有効活用するシステムとして、米国の NSUF (Nuclear Science User Facilities) の概要と現状が報告された。

廃棄物・貯蔵のセッションでは、ホットラボの廃止措置、燃料貯蔵プールから乾式貯蔵施設への使用済燃料の移送、中レベル放射性廃棄物の中間貯蔵施設建設から得られた教訓などについて報告された。

施設・設備のセッションでは、過去の設備開発および建設から得られた経験等について報告された一方で、欧州共同研究センター、スウェーデン、フィンランド、スイス、電中研などから、ホットラボ施設・設備の新設について報告された。主に、照射後材料の微細構造の特性評価を行うことを特徴としているものが多かった。

遠隔操作技術のセッションでは、コンピューター補助のマニプレータ、バーチャルリアリティ技術や衝突回避機能などが付与されたマニプレータの開発と現状などについて報告された。

照射後試験技術のセッションでは、従来から実施されてきている、燃料から放出される FP ガスの分析や燃料のガンマ線スペクトロメトリなどの照射後試験技術の他に、微小試料の作製技術やホットセルにおけるマイクロラマン分光分析による核燃料物質の経年変化の研究などについて報告された。

本会議では、ホットラボへ新しい技術・設備を導入する技術者とそれらを利用する研究者との議論が活発に行われた。世界的にホットラボが老朽化してきている中、1F の燃料デブリの分析のための新たなホットラボ建設に期待が寄せられた。また、微小な燃料材料試料で精巧な分析・測定ができる施設・設備の必要性が強調された。

会期の最後の 2 日間は、茨城東海地区 (JAEA 原子力科学研究所の燃料試験施設および NSRR、ならびに J-PARC : 61 名参加) と福島地区 (JAEA 橋葉遠隔技術研究開発センター、東京電力福島第一原子力発電所 : 59 名参加) のテクニカルツアーを実施した。

次回の会議は、2018 年 9 月にフィンランドのヘルシンキで開催される予定である。

(日本原子力研究開発機構・湊 和生、2018 年 1 月 9 日 記)

表 1 セッション名と発表件数

セッション	発表件数
* 福島特別セッション	9 件
* ホットラボ運転	10 件
* 廃棄物・貯蔵	5 件
* 施設・設備	8 件
* 遠隔操作技術	8 件
* 照射後試験技術	11 件
* ポスターセッション	29 件

理事会だより



2018 年年会 理事会セッション等の報告

2018 年春の年会が、桜満開の中、大阪大学で開催されたが、今回、私も運営に関わった理事会セッション(社会・環境部会共催)、およびダイバーシティ推進委員会が学生連絡会共同で初めて実施したポスターセッションについて、報告する。

1) 理事会セッション「福島復興に向けた風評被害への対応」

原子力に関する「風評被害」問題には様々な対処が試みられてきたものの、うまくいっていない現状があり、また東電福一のトリチウム処理問題でも大きな課題であり、今回の理事会セッションで取り上げた。

本セッションでは、「風評被害」問題への建設的な、かつ社会的にも健全な解決方策をさぐるべく、東京電機大・寿楽先生の座長の下、3人の専門家によるご講演と、上坂会長や会場も交えたパネル討論により、具体的な対処の糸口を見出すことを試みたものである。

関大・土田先生より、「社会心理学の視点からのアプローチと対処策の展望」と題して、下記のご教示があった。

- ・風評は社会的緊張状態、事象があいまい(専門家の中で意見が異なる：許容線量が1mSv か 20mSv か)であれば促進されやすい。

- ・風評は6つの要因により起こり、それぞれへの対応をとれば風評が収まるが、今回の場合は構造的ストレイン(放射線被ばくは不安という感情)をクリアすることが重要。

- ・風評被害の対策としては、知識の曖昧さを減少させることが重要。また、福島への不安に打ち勝てる感情・肯定的共感を持つことが重要。

藤田保大の下先生より「被災地域のケアコミュニケーション経験からの示唆」と題して、一般公衆の放射線に対する誤解からくる不安(放射線はうつる、こわい、危険等)の実態の説明があった。また、風評被害をなくすためには以下が有効であるとのことがあった。

- ・国/自治体/災害発出者は、正しい情報を正確に、平易に、迅速に、繰り返し伝える。公衆はそれを、正しく理解して理性的に行動する。また、メディアと専門家は両者をつなぐ役割をになうべきである。

- ・小学校～大学までの、放射線教育を充実する。

- ・食品の風評被害対策としては、福島県産の汚染率を公表、流通市場の放射能調査の定期的公表、市民参加の陰膳調査の実施等が有効である。

千葉大学の神里先生より「食とリスクの問題と科学技術社会論からのコメント」と題して、下記のご教示があった。

- ・福島風評問題は、ダイオキシン問題やBSE問題と類似点が多く参考になる点もあるが、事故が完全収束していない、長期的な対策が必要、影響を受けた範囲や総リスクの大きさ等に差異がある。

- ・現代は、食は栄養価や美味しさだけの追及でなく、食を通して付加価値・物語を情報として消費している。風評はいわばマイナスの情報消費として捉えられる。

- ・代替可能性の高いものは風評被害をうけやすい。その対策としては、同じ立場のステークホルダー相互の互助や保険などによる対処法が有効である。

この後、寿楽先生の司会の下、上坂会長と会場も交え、意見交換会が行われ、会場からは、風評被害対策には流通の形を変えることが有効、リスク認知を常態化すべき、学術会議の子どもの被ばくに関する影響のまとめた結果がインターネット上では議論になったが影響力の大きい新聞やTVでは報道がない理由等の意見交換があった。

今回、限られた時間の中、風評被害対応に対する建設的な示唆が得られたので、今後、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：原子力学会が幹事)の場でも他学会との議論を深めて対処方法について検討していくこととしたい。

2) ダイバーシティ推進委員会のポスターセッション

本委員会は、原子力に携わる女性のネットワークの構築を目的として、学生連絡会(35件発表)と合同のポスターセッションを開催した。今回、県/研究機関/電力/メーカから9名の参加があり、研究/業務内容等の報告があった。同時開催の学生にもポスター説明聴講に参加してもらい有意義な発表会であった。さらに、ポスターセッション後、私も参加したが、本委員の大学の先生方等も交え、2時間意見交換会も行った。お互い、介護/子育てをしつつ仕事をこなしてきた苦労話等の披露もあり、参加者の若手にとっても有意義な意見交換になったものと思う。また、ネットワークの構築にも、有意義なものであり、この活動の継続発展を期待したい。

なお、当学会の女性の会員比率は4%であり、これは十数年前に比べると倍増したものの、今なお他学会に比べ低い割合である。最近、機械学会は10年ぶりに会員増加に転じたと報道があったが、その要因の一つとして、女性ネットワークの強化による女性会員増加がある。理事としては、このような活動を通じ、女性会員が増えることも期待したい。(副会長 駒野 康男)