

巻頭言

1 IoE 社会のエネルギーシステム

浅野浩志

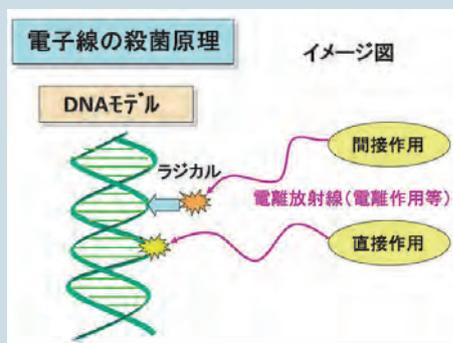
特集 電子線(EB)照射を利用した産業技術(滅菌・滅菌分野)

10 電子線(EB)照射を利用した実用技術

1950年代に滅菌で実用化された電子線プロセス利用は今や、年間4兆円の経済規模をもつに至っている。
鷲尾方一

12 医療機器・医薬品等の電子線(高エネルギー EB) 滅菌

高エネルギー電子加速器を用いた電子線滅菌は近年、医療機器、医薬品容器等のリスクの高い医療用品の製造時の滅菌法として一般的な滅菌法となってきた。
山瀬 豊



17 飲料用PETボトルの電子線滅菌技術

PET ボトルでは充填前の容器滅菌工程に電子線(EB)を利用した無菌充填システムが実用化されている。
中 俊明, 西納幸伸, 西 富久雄



EB滅菌方式
無菌充填システム

時論

2 我が国の縮原発政策と将来の電力供給

田中治邦

解説

20 社会課題への貢献に向けた学会の役割 2019年秋の大会セッションから

秋の大会の理事会セッションでは今後の学会活動のあり方について焦点をあて、「原子力をもつ安全の価値」を広く社会に伝える必要性などが提起された。
岡嶋成晃, 小宮山涼一, 山口 彰ほか

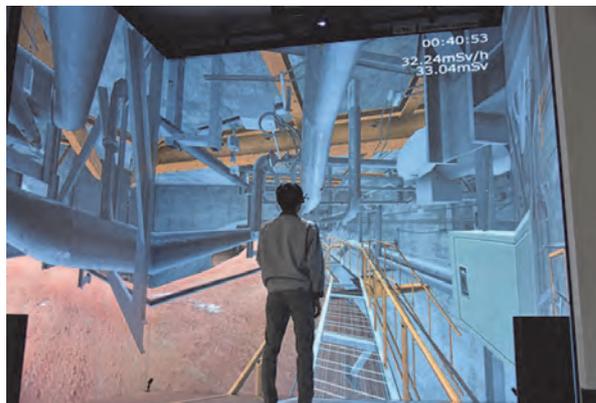


解説シリーズ

最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構(1)

27 1Fの廃炉と環境回復をめざして(1)

原子力の総合的な研究開発を行う原子力機構は、研究用原子炉や加速器、放射性物質の使用施設などの施設を使った基礎基盤的な研究と、それを土台としたプロジェクト的な研究開発を手がけている。このうち今回と次回は、1F事故対処のための研究について紹介する。
野田耕一, 野崎信久, 小川 徹, 山田知典



3次元で炉内を体験できるVRシステム

- 「AIに最終処分場を決めてもらう?」 井内千穂
 「仙台市を訪れて(2)震災後の松島の復興活動」 妹尾優希
 「物理学科のOCや講義でよく言われること」 鳥居千智
 「新生Jヴィレッジの象徴するもの」 服部美咲
 「刷り込みとリテラシー」 坂東昌子
 「将来を真剣に考える」 マイケル瑛美

解説シリーズ わが国の電力市場の全体像と今後の原子力発電(1)

31 わが国電力市場の全体像

電力システムに、市場メカニズムを活用した制度が導入されようとしている。卸電力市場が整備され、安定供給や環境適合といった公益的課題の解決に必要な価値を取引する新たな市場が次々と創設されつつある。 服部 徹

談話室

54 原子力の新卒採用 —学生に伝えたい「やりがい」—

坂上千春, 中村真紀子



原子力産業セミナーの来場学生数及び参加企業・機関数の推移

55 IAEA インターンシップ体験記 —世界トップレベルの場での国際感覚の醸成—

三成映理子, 福田貴斉

57 リケジヨの思い(8) 知らないことを調べる習慣

口町和香

理事会だより

59 学会における人材育成, 教育委員会の紹介

宇埜正美

サイエンス

36 核分裂発見 80 周年 —混乱, 高揚そして沈黙までの 7 年間—

核分裂発見の物語は分かりにくい。時代はナチスが台頭しドイツが戦争に向かう時期と重なり、発見の経緯はこの時代背景ぬきには理解しにくい。ここではいつ、誰が、どんなことを成したのかに焦点をあて、この物語にまつわる時の節目をたどる。 吉田 正

連載講座 基礎から分かる未臨界(3)

41 未臨界度測定のいろは

原子炉物理学分野で提案されてきた未臨界度測定手法は三種類に分類され手法ごとに利点・欠点がある。本稿では、代表的な未臨界度測定手法について概要と課題を解説する。 遠藤知弘, 左近敦士

報告

47 米国原子力発電所の最近のパフォーマンス—既存炉を最大限に有効活用—

大野 薫

51 「原子力をめぐる動向や今後」を記事化学会誌アンケート結果のまとめ

小林容子, 佐田 務

日々是好日～福島浜通りだより(7)

58 共に歩いている

吉川彰浩

- 4 News
- 40 From Editors
- 60 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 新入会一覧, 2020年度フェロー候補推薦募集, 英文論文誌(Vol.56, No.12)目次, 和文論文誌(Vol.18, No.4)目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧
- 61 日米欧原子力国際学生交流事業派遣学生レポート「IPP 滞在記」 遠藤理帆

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

学会誌ホームページはこちら
<http://www.aesj.net/publish/atomos>

IoE (Internet of Energy) 社会のエネルギーシステム

巻頭言



エネルギー・資源学会会長，電力中央研究所研究参事

浅野 浩志（あさの・ひろし）

東京大学大学院工学系研究科修了。博士(工学)。東京大学大学院院教授などを経て現職。内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「IoE 社会のエネルギーシステム」サブ・プログラムディレクター。専門はエネルギーシステム工学。

持続可能な経済成長は、気候変動対応なしでは成し遂げ得ないことは、言うまでもないことであるが、ゼロエミッションの社会経済像をどう描くか、化石燃料中心のエネルギーシステムをどのように変革していけば、脱炭素化を実現できるかは合意されていない。国を挙げて省エネルギーの限界に挑戦すること、再生可能エネルギーの最大限の導入を図ることはともかく、原子力発電の比率を長期的にどのような水準に保つのが受容可能かつ最適であるか、あるいは新型炉を水素製造など発電用途以外にも含めてどのように開発・導入していくかに関して学術ベースで深い議論がなされているとは言えない。

政府は、第5期科学技術基本計画において超スマート社会“Society 5.0”を提唱している。エネルギー分野では、IoT, Big data を活用したシステム統合化技術によるエネルギーバリューチェーンの最適化が目標となっている。統合化されたエネルギーシステムにおいては、産業・民生・交通の需要分野に応じて、多様なエネルギー変換・貯蔵・輸送・利用技術を組み合わせしていく。

内閣府は、旧来の専門分野の枠を超えて、イノベーションの成果を速やかに社会実装するため、第2期戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の一環として、エネルギー・環境分野において「IoE (Internet of Energy) 社会のエネルギーシステム」を組織している。2022年度までのプロジェクト期間で、電力化、脱炭素化、デジタル化に向かうIoE社会の実現のため、変動する再生可能エネルギーを制御して無駄なく利用するエネルギーシステムの構築および、その要素技術であるエネルギー変換・伝送システムのイノベーションの達成に向けた研究開発を実施している。例えば、交通分野の脱炭素化の切り札である電気自動車の一般的な普及には、高価な蓄電池の容量をできる限り削減し、軽い乗用車と積載容量の大きい重量車にする必要がある。そのために、走行中を含む利用シーンでこまめに充電できるワイヤレス電力伝送システムを社会インフラとして整備することを開発目標に掲げている。太陽光発電などクリーンではあるが、間欠的な出力の電源を使いこなす電力系統と交通ネットワーク上の充電インフラを統合的に整備・管理し、交通部門の大幅なCO₂排出削減を可能とする。

現状技術の延長線上では、再生可能エネルギーを電力系統のみで使いきれないため、熱、燃料、水素などを含む統合エネルギーシステムを構築する必要がある。大規模電源と同様に分散型エネルギー資源を活用できる電力市場などでリソースの事業価値を顕在化させる必要がある。郊外の戸建て住宅など民生用需要はともかく、太陽光発電と電力貯蔵設備だけで工業大国日本の電力供給を賄うのは技術的・経済的に難しい。非化石燃料でkW 価値の高い安定電源のオプションを持たないのは、エネルギー政策の基本である多様な資源のポートフォリオ構築を捨て、最適解から乖離するであろう。

エネルギートランジションを進めるために、エネルギーイノベーションに関連する学会で協力して、世代や専門分野を超えた、アカデミア、事業者、行政の多様な視点で建設的な議論を行う場を設け、エビデンスベースの政策提言を行うことにより、学会の価値を社会で広く認知してもらえるように努めるべきである。

(2019年10月29日記)



我が国の縮原発政策と将来の電力供給



田中 治邦 (たなか・はるくに)

日本原燃(株)フェロー
専門分野は炉心設計, 安全解析, リスク評価,
核燃料サイクル, 原子力の経済性

I. 第4次エネルギー基本計画に基づく想定

2014年4月に閣議決定された第4次エネルギー基本計画は「原発依存度は…可能な限り低減させる。その方針の下で…確保していく規模を見極める」としていた。そこで確保していく原子力規模の数値は示されなかったが、翌年7月経産省は「長期エネルギー需給見通し」を決定した。その前提は：

- ・エネルギー自給率を震災前を上回る水準まで改善
- ・震災前に比べ上がった電力コストを現状より低下
- ・欧米に遜色無い温室効果ガス削減目標を掲げる

というもので、2030年度にこれらの目標を同時に達成する解として発電に占める再生可能エネルギーの割合を22~24%、原子力の割合を22~20%とするなどのエネルギーミックスを算出した。これらの数値は定量的分析から求められたため、我が国にとって2030年以降も普遍的に継続する電源構成であると考えられ、寿命による廃炉は原発の新規建設で代替するとの解釈が可能であった。

22~20%という原子力の割合(毎年の燃料取替は570 tU)は六ヶ所再処理工場の処理能力(800 tU/年)と比較して少ないが、これまでに蓄積した使用済燃料が18,300 tUもあり、六ヶ所核燃料サイクルは全力疾走が必要というものであった。更に我が国にとって確保すべき原子力の規模が有意に存在する以上、核燃料サイクルを高速炉に引き継ぎPuのリサイクル利用を進めることになると考えることができた。

II. 2030年原発依存度22~20%の実現性

我が国の原発は、2011年3月の東日本大震災発生時点で運転中が54基、建設中が3基、福島第一原発事故発生以降に廃炉となった既設炉が21基で、既設炉は54-21=33基が残っている。

この既設炉33基と建設中3基の内、稼働を目指して原子力規制委員会の新規基準適合性審査を申請したのは27基(既設25基、建設中2基)である。そのうち許可済みが15基あるものの、これまでに運転再開できたものは9基、準備中が6基である。

また審査を未申請のものが33+3-27=9基(既設8基、建設中1基)あるが、筆者は今後申請されることが確実なもの3基に過ぎず、現在審査中の12基(=27-15)のうち2基が申請を取り下げられる恐れありと心配している。つまり今後廃炉の選択がなされ得るものが9-3+2=8基あり、そうすると震災以後の廃炉が21+8=29基で、生き残るのは27-2+3=28基止まりとなる。再稼働する28基が全て供用期間を60年へ延長するとして(延長許可取得済は現在4基に過ぎない)、2030年の原子力依存度22~20%を実現するには設備利用率92~84%が必要で、過去の実績から見てその実現可能性には疑問がある。原子力依存度20%を維持するためには遅くとも2040年頃、即ち今から20年後には次々と新設炉を運転開始する必要がある。

III. 第5次エネルギー基本計画の問題点

しかるに、いわゆるパリ協定への対応から2050年までに温室効果ガスの排出を2013年比で80%削減する方法について議論した経産省の研究会「エネルギー情勢懇談会」は、2018年4月に提言書を最終議論し、事務局(経産省)の案「経済的に自立し脱炭素化した再生可能エネルギーの拡大を図る中で、可能な限り原子力発電への依存度を低減する」との方針は堅持する」に対し、委員8人のうち5名が反対して原子力の維持を主張し、一方この「可能な限り原子力を低減」に明確に賛成したのは1名のみだったが、経産省は頑として譲らず原案の通り決定された。

その結果、2030年のエネルギーミックスは目標として維持するものの、2050年に向けては可能な限り原子力を低減することが第5次エネルギー基本計画に盛り込まれ、2018年7月に閣議決定された。

さらに、この原発依存度を可能な限り減らす方針は、翌年「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」にそのまま踏襲され2019年6月閣議決定され、国連の気候変動枠組条約事務局(UNFCCC)へ英訳版が提出された。このように我が国は縮原発政策をとっているものであり、従って新規建設(リプレース)は2050年に向けた国のエ

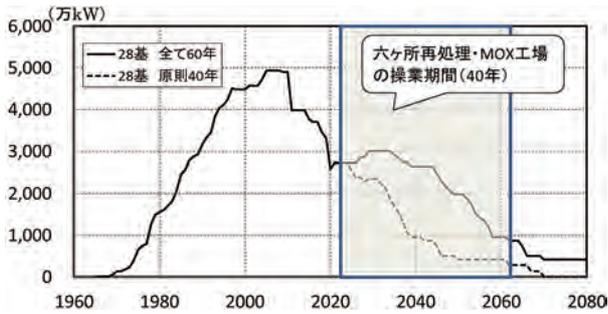


図1 原子力発電容量の見通しと六ヶ所サイクル操業期間

エネルギー政策に合致しないこととなった。

そこで、今後の原子力発電容量(年間電力量ではなく発電可能出力)の将来見通しと六ヶ所再処理工場の操業期間を重ねてみたものが図1である。退役する原発の出力を補う新設を行わず2050年で原発を無くすならば；

- ・六ヶ所再処理・MOX燃料工場は操業開始後20年程度で製品の行き場を失う
- ・六ヶ所再処理に続く民間第二再処理は必要が無い
- ・むつRFSを含め全国で中間貯蔵される使用済燃料の行き先は見通しが無い
- ・大間、東京東通の使用済燃料は行き先が見通せない
- ・原発が無くなるならば濃縮工場の拡大も意義は無い
- ・英仏から六ヶ所サイトへの廃棄物返還は続き、その管理期間は2050年を大きく越える
- ・LLWの埋設は最後の原発の廃炉工事終了まで続く

このような政策は青森県に展開する原子力プロジェクト(原子力発電、核燃料サイクル、SF中間貯蔵)を困難化し、放射性廃棄物の仕事だけを延々と続けさせるものであり、青森県にとって受け容れ難いもので、我が国全体の原子力を2050年を待たず短命に終わらせ、脱原子力により我が国の将来世代のエネルギー確保を危機に陥れるものである。つまりプルサーマルを含む核燃料サイクルを堅持するとしながら、実は矛盾だらけの政策を決定したのである。

IV. 再生可能エネルギー偏重と電力自由化

一方、経産省は再エネの拡大に全力である。軽負荷時季の好天で出力抑制せざるを得なかった九州の例やブラックアウトからの復帰に貢献できなかった北海道の例にも拘わらず、再エネの系統接続を増やすために日本版コネクタ&マネージ(N-1電制、ノンファーム型接続)、IoTとAIを利用したデマンドレスポンス、VPPやアグリゲータの奨励、MaaSと組み合わせたEVの普及、水素社会に向けたFCV、水素還元製鉄の産業化、メタネーション等々、大変な再エネ研究開発ブームである。

東日本大震災での電力供給危機の経験に基づくものとされる電力自由化の仕組みは、その際に関東地方へ電力を送り続けた柏崎刈羽原発の貢献も話題に上らず、建設

資金調達と運転開始後初期の減価償却費負担の大きな原子力発電所の建設を実質的に不可能なものとしている。エネルギー政策が脱原発で新規建設には根拠が無いからこれは構わないということであろうか。

2050年に発電における脱炭素・脱原子力を達成できるなら、電力供給の全てを再エネ+EV+水素に依存している筈だから、新型原子炉の研究は無駄である。即ち次世代軽水炉のR&Dは不要、FBRサイクルも不要、永久に出番の無い核融合のR&Dは一般会計を使っており正当化できないということとなる。このようなことでは、電力会社もメーカーも原子力学会へ協力する意義を失い、賛助は不要、会員数も減少傾向が続き、原子力学会は凋落を止められないことになってしまう。

V. 2050年の見通し

他方、世界の原子力先進国では早くに運転開始した米国オリジナル設計の廃炉が続くものの、新興国では原子力への旺盛な需要が続き、世界をロシア・中国製の原子炉が席巻することになるのが必至の情勢である。そしてウラン価格の高騰を防ぐためにFBRサイクルが確立し、日本は原子力の無い国として落ちぶれる。

このような展開を描画せざるを得ない理由は、国策に基づく再エネ100%社会の前提による。現実には筆者は2050年になっても我が国は；

- ・再エネ100%+EV+水素を実現せず半分以下に留まる
- ・原子力は寿命到来を待つ数基にまで減り、電力供給に殆ど貢献できない
- ・シェールガスを活用してLNG火力が大量に残存
- ・石炭も継続してベースロードの一翼を担う
- ・CCUSは国内に立地できず海外に押し付け、国内のCO₂大量排出が継続
- ・化石燃料、送配電設備、バッテリー、水素のために電力料金は高止まり
- ・やがて原子力の必要性に目覚めても、国産技術と製造工場の復活には時既に遅く、ロシア・中国・インドの支配下に入る

ということになるものと予想する。

さて、エネルギー資源に乏しい我が国に原子力は必須とこの分野に身を投じた我々は、福島第一原発事故を防げなかったこともあり蟄居すべきで、国の脱原発に等しい政策と再エネ神話のブームの下、事態を看過することしか身を処する道は無いのであろうか。会員諸氏は如何お考えだろうか。

原子力を再起させて我が国の産業と経済維持に貢献させるための筆者の提案は次に述べられる機会があればご説明させて頂く。

(2019年10月15日記)



原子力機構、30年後を見据えた将来ビジョンを策定

日本原子力研究開発機構は10月31日、30年先の将来を見据えた「JAEA2050+」を公表した。原子力をもつポテンシャルを最大限活用することで、気候変動問題の解決やエネルギーの安定確保に貢献することをめざす。

将来ビジョンでは福島原発事故の反省をふまえた上

で、今後は原子力安全の価値を再認識した「新原子力」の実現を図ると明記。そのために安全の追求、放射性物質のコントロール、デコミッショニング改革、革新的な原子炉システムの探求、高度化・スピンオフ、新知見の創出を進めるとした。（原子力学会誌編集委員会）

シニアネットワーク連絡会、シンポジウムを開催

原子力学会シニアネットワーク連絡会は10月19日、東工大で「2050年のエネルギーミックスはいかにあるべきか？」をテーマとした第20回シンポジウムを開催した。第1部では山本隆三・常葉大学教授が基調講演を行い、人口減少やエネルギー安全保障など国内外の情勢を踏まえて、日本のエネルギーはどのように考えればよいか、様々な視点から問題を提起。これを受けて第2部では井川陽次郎・元読売新聞論説委員が進行役になり、宇

佐美典也・岡山県立大客員准教授、杉山大志・キャンングローバル戦略研究所研究主幹、松田智・静岡大学大学院准教授、小野章昌・エネルギーコンサルタントが地球環境問題、再生可能エネルギーと原子力の果たす役割等について本音ベースで議論を行った。学会員、学生、社会人など約150名が参加した。議論概要は<http://www.aesj.or.jp/~snw/>に記載。

(同)

エネ庁委員会、処理水に関する風評対策を議論

福島第一原子力発電所の処理水に関する資源エネルギー庁の委員会は9月27日、前回8月の会合で示された貯蔵継続に係る事実関係を整理した上で、風評被害への対応策を議論した。

前回の会合で、東京電力は、多核種除去設備(ALPS)により浄化された処理水の保管状況とタンクの建設計画から、2022年夏頃に貯留水が満杯となる見通しを示したほか、今後の廃炉作業に必要となる敷地利用や、敷地外保管の可能性について説明した。

これを踏まえ27日の会合では、福島第一原子力発電所周辺への敷地拡大の可能性や敷地の有効活用などについて改めて整理。委員から質問の出ている発電所に隣接する中間貯蔵施設(除去土壌等)予定地への敷地拡大に関し、資源エネルギー庁は、国が地元や地権者の方々に説明し受け入れてもらっている関係上「難しい」とした。また東京電力は、廃炉の進展に伴い2020年代後半にかけて設置を検討する8施設の概ねの整備時期を示した上

で、貯留水タンクエリアの効率化や廃棄物処理作業の進捗などにより、空き地ができる可能性があるとして、「現在の福島第一の敷地内で廃炉作業をやり遂げる」とした。

風評対策に関して、資源エネルギー庁は、「貯蔵を継続する中でも、処分を行う際にも、風評への影響を最小限度に抑える対応策を検討することが必要」などとした上で、(1)具体的な懸念を抱く層への情報提供・丁寧な説明、(2)流通・消費の実績を見せることで不安を払拭、(3)流通関係者への働きかけ、(4)新商品開発・新規販路開拓、(5)海外への対応——との素案を提示した。また、東京電力からは、国内外で実績のある海洋放出と水蒸気放出について、風評抑制に向けた設備対応の検討状況が説明された。

委員からは、「漁業復興の時間軸も十分考えるべき」、「海外メディアから誤解を招かぬよう」といった意見があった。

(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)

【中国】 世界で2基目のEPR, 台山2号機が 営業運転開始

中国広核集団有限公司(CGN)の子会社で、フランス電力(EDF)が30%出資する台山原子力発電合弁会社(TNPJVC)は9月8日、世界で2基目のフラマトム社製・欧州加圧水型炉(EPR)の台山原子力発電所2号機(PWR, 175万kW)が、7日に営業運転開始条件の1つであるフル出力で168時間の連続実証運転を完了したと発表した。

世界初のEPRとして昨年12月に営業運転を開始した同1号機に次ぐもので、台山2号機は中国で47基目の商業炉となった。台山サイトの1期工事にあたるこれら2基は、年間240億kWhの無炭素電力を生み出すことから、TNPJVCは年間803万トンの標準炭の消費が抑えられるとともに、削減されるCO₂排出量は2,109万トンに達すると予測している。また、第3世代原子力発電所の貴重な建設経験は、英国のヒンクリーポイントC発電所(HPC)計画など、後続のEPR建設プロジェクトに提供し、中仏両国の協力による第三国での建設市場開拓に活かしたいとしている。

発表によると、1980年代に始まった中仏両国の原子力発電協力は、長年にわたって良好な結果をもたらしている。CGNは仏国からM310型PWRの技術と管理経験を学び、主要機器を英仏両国から購入し、1994年に中国初の100万kW級商業用原子力発電所、大亜湾1,2号機を完成させた。

90年代になるとCGNは仏国との協力関係を一層強化し、嶺南原子力発電所1期工事(各99万kWのM310型PWR)の2基を建設。大亜湾発電所で1%以下だった機器の国産化率は30%に拡大している。また、CGNとEDFは2007年に、新たに台山発電所の2基の建設で協力することを決定。1,2号機をそれぞれ、2009年と2010年に本格着工した。

これに続いて、CGNは2015年10月、EDFエナジー社が英国で進めているHPC発電所建設計画に33.5%出資し、後続のサイズウェルC発電所建設計画にも20%出資することで同社と合意。さらに、プラッドウェルB発電所建設計画では、中国が輸出を主目的とする第3世代設計として独自開発した100万kW級PWR設計「華龍1号」が採用されることになった。これらの合意により、中仏の原子力協力は第三国における協力も含めて、新たなモードに入ったとTNPJVCは指摘している。

「華龍1号」など先進的原子炉用の 燃料集合体を大量製造

中国核工業集团公司(CNNC)は9月23日、「華龍1号」など中国が独自開発した大型の先進的PWR用に、燃料集合体の大量製造を開始したと発表した。

それによると9月20日、独自に設計・製造した「チャイナ・フェュエル(CF)3」の燃料集合体4体を浙江省の秦山原子力発電所で試験しており、それ以前にも同型の燃料集合体を8体、秦山発電所の拡張工事にあたる方家山原子力発電所で使用。年末にはさらに8体を秦山発電所に装荷することになっており、中国が高性能原子燃料の開発に必要な技術すべてを習得したとしている。国際市場においても競争力のある独自の燃料システムと、これを生産する十分な能力を備えるに至ったとも評価した。

「CF3」燃料集合体について、CNNCは2016年1月、秦山第II発電所2号機を使ってプロトタイプ燃料の最初の照射試験を完了したと発表している。その際、原子炉のみならず燃料集合体についても設計・製造の自立を目指す中国にとって、これは重要な節目になったと指摘。中国で稼働するPWR用の燃料はこれまで諸外国の協力で製造されており、中国が知的財産権を保有する先進的な燃料集合体の開発は急務だと述べていた。

今回の発表によると、「CF3」燃料集合体は複数のプラントで実施した照射試験の結果、幅広く利用が可能であると判明。第3世代原子炉の基準に合致しているのみならず、性能も良好。その上、知的財産権が中国の保有となっている点をCNNCは強調した。

同燃料はまた、長期サイクルの運転に使用できるため「華龍1号」のような大型炉に適しているが、「燕龍」原子炉のように、熱出力40万kW程度のプール型・低温熱供給炉にも使用可能であるとCNNCは説明。「CF3」燃料は、中国が第3世代原子炉を独自に開発し、原子力発電を国内で大々的に活用する一助になったほか、中国の原子力産業界が国際市場に進出することにもつながるとしている。

【サウジアラビア】 韓国製SMR「SMART」の商業化を促進

サウジアラビアで原子力発電の導入計画を担当する政府機関「アブドラ国王原子力・再生可能エネルギー都市公団(K. A. CARE)」は9月17日、韓国製の一体型小型モジュール炉(SMR)「SMART」の商業化を促進する

ため、「韓国・サウジアラビアの包括的原子力研究開発の協力覚書(MOU)」を韓国政府と締結した。具体的には、サウジ国内における「SMART」炉の建設に向け、MOUから支援を受けて同設計をサウジの標準設計とするための許認可および建設許可を取得するとしている。

これは、オーストリアのウィーンで国際原子力機関(IAEA)の通常総会が開催されるなか、韓国・未来創造科学部(MSIT)が18日付で明らかにしたものの、MOUではこのほか、「SMART」炉の安全性確保と実用化のための技術協力が盛り込まれている。

両者はまた、「韓国・サウジアラビア原子力共同研究センターの設立と運営に関する協約」を同じ日に締結。サウジでの共同研究センター開所により、将来の原子力研究院設立を支援するとともに、SMART炉での革新的な要素技術開発と、安全解析コード等の共同研究を行う。

「SMART」炉は、海水脱塩と熱電併給が可能なシステム一体型モジュラーPWRで、熱出力と電気出力はそれぞれ33万kWと10万kW。韓国原子力研究院(KAERI)が中東諸国向けに開発したSMRで、サウジとは2015年3月に結んだ協力契約協定により、SMART炉を同国内で2基以上建設する可能性を探るため、2018年までの3年間に予備調査の実施と人的資源の共同構築を約束した。

また、2015年9月にKAERIとK. A. CAREが締結した協力契約では、「SMART」炉を将来的に、世界市場に共同で売り込むことが視野に入れられていた。

サウジ側も原油資源を温存しつつ、国内の電力需要急増に対処することを目的に、2040年までに原子力発電設備を1,200万kW～1,800万kW導入することを計画。2017年7月に内閣が承認した「国家原子力プロジェクト」では、1基あたり120万kW～160万kW程度の大型炉をベースロードの電力供給用に2基建設するほか、小型の「SMART」炉を複数建設するとしている。

MSITの今回の発表によると、両国は「SMART」を共同建設する前に、サウジ国内の標準設計認可取得を目指す方針。2015年12月から2018年11月まで実施した建設前設計共同事業(PPE)では、サウジ側が1億ドル、韓国側が0.3億ドルを拠出したが、これには原子力関係の研究者や韓国内の原子力企業(韓電技術、斗山重工業、ポスコ建設など)が参加した。

また、同炉が世界のSMR市場で競争上の優位を確実に確保できるよう、新技術を組み合わせて経済性や安全性、運転上の柔軟性などが大幅に向上した次世代の「SMART」炉を開発するとしている。

さらに、MOUの締結前に開催されたKAERIとK. A. CAREの会談では、「SMART」炉のPPEが完了した後、両者は後続の建設協力案について具体的な議論を

進めており、4つの協力分野を特定した。それらは(1)標準設計認可と建設許可の取得、(2)ビジネス・モデルの設計、(3)初号機の建設、(4)共同輸出の基盤構築——で、これらを通じて、サウジで「SMART」炉を建設するための準備作業をスピーディに進めるとした。また、現時点でSMRの導入を計画している中東や東南アジアの諸国に「SMART」炉を輸出できるように、積極的に協力していくとしている。

【UAE】

ロシアと原燃サイクル分野での協力継続

アラブ首長国連邦(UAE)で原子力発電導入計画を担当する首長国原子力会社(ENEC)は9月12日、ロシアのウラン製品・サービス販売企業TENEX社と2017年に交わした了解覚書を更新したと発表した。

同覚書は放射性廃棄物の処分・管理など、原子燃料サイクル分野における両者間の将来的な協力の枠組を定めたもの。ENECのM. アル・ハマディCEOは、「(ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社の1部門である)TENEX社は、原子燃料サイクルの管理で60年以上の経験と良好な実績を積み重ねているので、今後数年先までを見据えた協力の機会を模索していきたい」と述べた。同覚書の更新はまた、確固たる原子力プログラムを推進している国の企業と協力することや、経験豊富な原子力産業界を有する国との協力を明記したENECの戦略に基づくとしている。

UAEでは現在、韓国から導入した第3世代の140万kW級PWR「APR1400」を4基、アブダビ首長国西部のバラカで建設中。2018年3月に1号機の竣工式が執り行われたが、運転員の訓練と連邦原子力規制庁(FANR)からの承認取得に時間を要するため、燃料の装荷は今年末から2020年初頭の間に延期されている。

UAEは2008年3月に公表した原子力開発計画どおり、領土内でのウラン濃縮と使用済燃料の再処理を放棄しており、国際原子力機関(IAEA)包括的保障措置協定の追加議定書遵守を大前提とする方針。このためUAE政府は、放射性廃棄物と使用済燃料の長期的な管理・貯蔵政策策定に向けて、複数のオプションを検討中である。

この関連で、ENECの副総裁を代表とする一行は今年4月、TENEX社の招きにより同覚書の枠内で、ロシア中部クラスノヤルスク地方のゼレズノゴルスクにある鉱業化学コンビナート(MCC)を訪問した。TENEX社およびロスアトム社の幹部と廃棄物の最新管理技術や方式について協議したほか、使用済燃料集合体の湿式貯蔵施設

や、放射化学再処理のパイロット実証センターなども視察している。

【エストニア】

GEH 社，エストニアで同社 SMR の建設可能性を調査

米国の GE 日立・ニュークリアエナジー(GEH)社は 10 月 3 日、北欧バルト三国の 1 つエストニアで、同社製の小型モジュール炉(SMR)「BWRX - 300」を建設する可能性を探るため、同国のエネルギー企業フェルミ・エネルギー社と協力覚書を締結したと発表した。

フェルミ・エネルギー社はエストニアにおける第 4 世代炉の導入を目的に、同国原子力産業界で SMR 開発/建設を支持する専門家らが設立した企業。2030 年代初頭にも欧州連合(EU)初の第 4 世代 SMR を国内に建設する方針で、2020 年 1 月には複数の SMR について、フィジビリティスタディの結果を公表する計画である。「BWRX - 300」に関しては、同社と GEH 社は今回の覚書に沿って、建設の経済的な実行可能性を検証するとともに、立地要件や原子力規制要件の評価を行うとしている。

GEH 社の発表によると、「BWRX - 300」は出力 30 万 kW の軽水冷却式原子炉で、自然循環等により冷却水を制御する受動的安全性を有している。2014 年に米原子力規制委員会(NRC)から設計認証を受けた 150 万 kW の第 3 世代+(プラス)設計「ESBWR(高経済性・単純化 BWR)」がベースとなっており、実証済みの技術を用いた機器や設計を簡素化する革新的技術を採用。コンバインドサイクル・ガス発電や再生可能エネルギーに対しても、コスト面の競争力を持ったものになるとした。1MW あたりの資本コストも、GEH 社は既存の大型原子炉やその他の軽水冷却式 SMR との比較で、最大 60%軽減できると強調している。

フェルミ・エネルギー社の K. カルレメッツ CEO は、覚書を結んだ理由について、「エストニアはエネルギーの自給維持と、カーボン・ニュートラルな状態の達成のため、新世代の SMR 技術を必要としている」と説明。BWR 技術については、「安全かつ経済性と信頼性が高く、CO₂ を出さないエネルギー技術であることは北欧諸国ですでに、数十年にわたって実証されている」とした。「BWRX - 300」技術についても、投資の可能性と競争力の高い設計であると評価している。

同社はこのほか、燃料ピン型溶融塩炉「SSR - W」の国内建設に向けて、サイト関係のフィジビリティスタディと適切な許認可体制の開発を実施するため、今年 3 月に開発企業の英モルテックス・エナジー社と了解覚書

(MOU)を締結した。

モルテックス社の発表によると、オイル・シェールを主要な電源とするエストニアでは、2030 年までに大部分の化石燃料発電設備が運転を終了する。バルト海諸国の一員として風力発電に一定の可能性が見出される一方、エネルギー自給を維持するため、エストニアは信頼性の高い代替電源を必要としている。近隣のラトビアやリトアニア、フィンランドが皆、完全な電力輸入国であることから、エストニアで安全かつクリーンな電源が確保されれば、この地域全体のエネルギー供給保障が改善されると強調している。

【チェコ】

ニュースケール社，SMR 建設めざしチェコ電力と覚書

米オレゴン州を本拠地とするニュースケール・パワー社はこのほど、チェコで同社製 SMR「ニュースケール・パワー・モジュール(NPM)」を建設する可能性を模索するため、チェコの国営電力(CEZ 社)グループと了解覚書を締結したと発表した。

同覚書により、両者はこれまで蓄積してきた原子力や技術関係の専門的知見を共有。具体的には、チェコ国内で原子力サプライ・チェーンを構築するとともに、SMR を建設・運転・保守点検していくための情報交換を行うことになる。

今回の覚書についてニュースケール社の J. ホプキンズ会長兼 CEO は、「当社製 SMR を今後、欧州で建設していく際の、最良の方法の検証機会を与えてくれる」と述べた。

チェコでは、原子力発電がもたらす潜在的な可能性を広範囲にわたって評価中で、これには既存炉の改修や SMR の建設が含まれる。CEZ 社の D. ベネシュ CEO は、「わが国ではすでに、国立原子力研究機関(UJV Rez)が SMR 関係の研究を進めており、SMR は無視できない将来の重要選択肢の 1 つだ」と指摘。チェコ政府の K. ハプリーチェク産業貿易相兼副首相も「SMR は原子力発電の将来を担っている」と述べ、「原子力研究で伝統的に世界の最前線に立つチェコが、ニュースケール社と SMR で協力することは、チェコのそうした地位を一層確かなものにする」と表明している。

ニュースケール社の「NPM」は PWR タイプの一体型 SMR で、電気出力は 6 万 kW。同モジュールを 12 基連結した場合、出力は最大 72 万 kW まで拡大することが可能。米原子力規制委員会(NRC)は現在、SMR としては唯一、NPM の設計認証(DC)審査を実施中で、すでに第 2、第 3 フェーズが完了。2020 年 9 月に同審査がすべ

て完了すれば、米国初の SMR として市場に投入できる。

米国内ではすでに、エネルギー省(DOE)傘下のアイダホ国立研究所敷地内で最初の 12 モジュールを建設する了解が得られており、ユタ州公営共同電力事業者(UAMPS)がこれらの所有者になる予定。運転はワシントン州の電気事業者エナジー・ノースウエスト社が担当し、2027 年頃に運転開始したいとしている。

一方の CEZ 社は現在、ドコバニとテメリン 2 つの原子力発電所で 6 基(合計約 420 万 kW)のロシア型 PWR (VVER)を操業中だが、これらが供給する電力量はチェコ全体の供給量の約 3 分の 1 に相当する。チェコ政府としては、地球温暖化防止や持続可能な開発、およびエネルギー供給保障の観点から、ドコバニ発電所で 1~2 基の原子炉を新たに建設する方針。また、これに続いてテメリンでも、既存原子炉の補完用あるいは取替用として新たな原子炉を建設する計画があり、どちらの場合も新規炉の環境影響評価(EIA)について、広く意見を求めている。

SMR に関しては、チェコの A. ハビシュ首相が今年 4 月、これらの現行増設計画とは別に、長期的将来の新規設備として最適だと述べたことが伝えられている。

【ポーランド】

原子力機構とポーランド国立原研、高温ガス炉技術協力を具体化

日本原子力研究開発機構は 9 月 20 日、ポーランド国立原子力研究センター(NCBJ)と、「高温ガス炉技術分野における研究開発協力のための実施取決め」に署名した。

両者は 2017 年、日本・ポーランド外相間で合意した戦略的パートナーシップの行動計画に基づき、「高温ガス炉技術に関する協力のための覚書」に署名しており、これまでも高温ガス炉分野において、技術会合や人材育成などの協力を進めてきた。このほど署名された実施取決めにより、高温ガス炉の高度化シミュレーションのための設計研究、燃料・材料研究、原子力熱利用の安全研究など、さらに協力を具体化させていく。

また、原子力機構は、高温工学試験研究炉「HTTR」(現在、新規基準適合性審査のため停止中)の建設・運転を通じて培った国産高温ガス炉技術の高度化、国際標準化を図り、ポーランドとの技術協力でさらなる国際展開の強化を目指す。

本件に関し記者団への説明に当たった同機構高速炉・新型炉研究開発部門次長の西原哲夫氏は、今回の実施取決めによる協力では、データの共有など、ソフト面が主

となるとしており、今後に向けて「ものづくりの段階でメーカーの参画にもつなげていければ」と期待を寄せている。電力供給の 8 割以上を石炭に依存するポーランドでは現在、その依存度を下げることが喫緊の課題となっており、石炭火力リプレースの候補とされる高温ガス炉導入の意義として、天然ガス輸入依存からの脱却、CO₂ 排出の削減、競争可能なコストでの産業への熱供給などがあげられている。高温ガス炉導入に関わる諮問委員会の報告書によると、現在設計段階にある研究炉(熱出力 1 万 kW)に続き、商用炉(同 16.5 万 kW)の予備設計も開始されつつあり、2026~31 年の初号機建設を目指している。

【フランス】

CEA, EDF らが仏国製 SMR「NUWARD」を共同開発

仏原子力・代替エネルギー庁(CEA)と電気事業者のフランス電力(EDF)、および同国の小型炉専門開発企業テクニカトム社、政府系造船企業のネイバル・グループは 9 月 17 日、同国で 50 年以上の経験が蓄積された最高レベルの PWR 技術をベースに、4 者が共同開発したという小型モジュール炉(SMR)設計「NUWARD」を発表した。

これにともない CEA と EDF は同日、SMR 開発で協力することを念頭に、米ウェスチングハウス(WH)社と枠組協定をオーストリアのウィーンで締結した。電気出力 30 万~40 万 kW 程度で、安全かつ競争力のある低炭素電力を生み出す原子炉の需要は世界中で高まっており、原子炉設計と燃料開発で類まれな経験を有する各社の経験を活かして取り組める重要な市場区分だと指摘。2020 年初頭にも、協力プロジェクトの詳細なロードマップ策定を目指すとしている。

「NUWARD」は、仏国で設計・建設された PWR の 2,000 炉・年以上の運転経験に基づいて開発されており、オーストリアのウィーンで国際原子力機関(IAEA)の通常総会が開催されている最中に公表された。それによると、実証済みの PWR 技術と、モジュール方式を取り入れた同設計は、運転者にとって大きな利点があるほか、発電電力にも競争力を持たせられる様々な革新的技術を採用。コンパクトで単純化された統合型設計であり、建設と運転の両段階で柔軟性が高く、世界で最も厳しい基準にも適合する革新的安全性アプローチが採られている。

同設計には、CEA の研究能力と認定能力、EDF が有するシステムの統合・運用能力、小型の原子力構造物とモジュール方式でネイバル・グループが蓄積した経験、コンパクトな原子炉設計に関するテクニカトム社の専門

的知識が結集され、これらの目標の達成を強力に推進することが可能。2020年代後半に競争力を備えたソリューションとして世界市場に送り出すため、各社は国際協力にも道を拓く考え。ここでは特に、設計の標準化や合理化、規制面の調和を図ることを重視している。

WH社との協力はこのような観点から模索されているもので、CEAとEDFおよびWH社の3社は締結した枠組協定に基づいて、テクニカトム社とネイバル・グループが参加するNUWARD計画、およびWH社製SMR計画の双方で蓄積されてきたPWR技術の専門的知見を統合する可能性を探る。WH社のSMRは原子力産業界で唯一、すでに運転中の原子炉で装備済みの受動的安全技術を採用していることから、「安全かつ競争力のある低炭素な電力」という世界の需要に応えられるとした。

この国際的な枠組協定ではこのほか、SMR開発を成功に導く上でカギとなる規制や設計の標準化を追求するとしている。

WH社との枠組協定について、CEAのF. ジャック長官は、「安全面や運転面の基準と設計の調和が求められる輸出市場を主な目標にしているため、今回の協定は原子力開発分野の主役企業と国際協力するための重要ゲートになる」と述べた。

EDFのJ. - B. レビエ会長兼CEOは、「我々の能力と幅広い経験、特に許認可手続に関するものを組み合わせれば、革新的技術を採用した安全かつ競争力のあるSMRを、世界のエネルギー・ミックスの脱炭素化に役立てることができる」と強調した。

ネイバル・グループのH. ギューCEOは、同社が過去40年以上にわたって、小型の原子力ユニットを推進力とする原子力潜水艦や空母を建設してきた実績に言及。NUWARD計画については、「我々の炉心関係の能力を提供する絶好の機会であり、相乗効果も期待できる」と述べた。

テクニカトム社のL. ロカールCEOは、同社が約50年間で20以上の小型炉を設計・組立て・起動した実績に触れ、「当社のエンジニアリング能力と特殊ノウハウをNUWARD計画に活かせることを誇りに思う」とコメントしている。

【英国】 政府、最終処分場建設プログラムで 「国家政策声明書」

英ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)は10月17日、高レベル放射性廃棄物等の深地層処分インフラ設置に向けたプロセスで、プロジェクトの実施に必要な開発同意書(DCO)の発給審査の基礎となる「国家政策声明書(NPS)」を発行したと発表した。

イングランド地方における同インフラ設備(深地層処分場と深地層調査用ボーリング孔)の開発については、BEISが2018年1月から4月にかけてNPSの案文を、建設サイトの選定プロセス提案文書とともに公開協議に付した。得られたコメントを勘案したNPS案文は、同年の夏に議会の上下両院、および関係委員会による精査が完了、今年7月からは改定版が再び議会審議にかけられていた。

BEISのN. ザハウィー・ビジネス産業担当相はNPSの発行について、「議会審議プロセスの最終ステップであり、高レベル廃棄物の管理で英国が解決策を見出す重要な節目になる」と指摘。そのような廃棄物を安全・確実に管理するインフラの「必要性」がNPSでは明確に説明されており、計画審査庁が深地層処分インフラの開発でDCOの発給判断を下す際、適切かつ有効な枠組を提供することになるとした。

また、今回のNPSでは2008年の計画法に従い、同NPSが持続可能な開発に貢献するとともに、気候変動の影響緩和と適応、景観等への配慮がなされていることなどを保証する「持続可能性評価(AoS)」の結果と、サイト選定で考慮すべき点などを考慮する「生息環境規制評価(HRA)」の結果が含まれた。ザハウィー・ビジネス産業担当相はこれら2点についても最終版を発行し、BEISのウェブサイト上に掲載したことを明らかにした。

今回のNPSによると、高レベル廃棄物を深地層処分場で長期的に管理することは、技術的、倫理的および法的側面からも必要なものであり、最良の処分方法であるという点では国際的に圧倒的合意が得られている。その他の処分方法についても検討が行われたが、いくつかの側面で適切でないことが判明。仮に、高レベル廃棄物のいくつかのカテゴリーで他の管理オプションを進めた場合でも、現実的な将来シナリオにおいてはやはり、深地層処分場が必要になるとしている。

電子線(EB)照射を利用した実用技術

早稲田大学 鷲尾 方一

電子線プロセス(加工技術)は1950年代にスタートした歴史のある技術であり、以降数多くの開発が行われた。最初の実用化は滅菌であったが、架橋技術、重合技術などの発展とともに社会を支える基本的な技術となってきた。世の中ではこの加工技術はあまり一般的に知られるものではないのだが、すでにその経済規模は年間4兆円を超えている。このように社会の基盤を支える電子線プロセス技術の概要を本稿で紹介する。

KEYWORDS: *Accelerators, Electron Beam, Radiation Processing, Material Creation, Radiation-Induced Reaction, Sterilization*

I. はじめに

1895年のレントゲンによるX線の発見、1898年のキュリーによるラジウム、ポロニウム発見により、人工および天然由来の放射線を得る道が開かれた。以来、放射線はポジティブな意味でもネガティブな意味でも人類に深く関わってきた。20世紀前半、とくに加速器が発明された1930年以降、放射線を原子核の変換や素粒子に関する実験に利用する、いわゆる原子核物理実験を主体として研究が進められてきた。ところが、1940年代以降になると、放射線と物質の相互作用の結果、誘起される化学反応について深い考察が始まるようになった。

放射線化学は、物質のイオン化エネルギーを超えたエネルギーを持つ粒子線や電磁波が物質に入った折に引き起こす現象を科学する学問体系である。放射線と物質の相互作用は、放射線化学の本題に属する重要な研究分野であり、今日まで80年近い歴史のなかでさまざまな実用化が図られている。(これについては鷲尾の総説を参照されたい)¹⁾ここでは、こうした放射線と物質の相互作用から生まれるメリットについて解説するとともに、これらのメリットを活かす実用技術について、開発現場から紹介してもらうこととした。

II. 電子線プロセスの歴史的経緯

上で述べたように、放射線の発生装置(加速器)の開発は1930年代初頭であったが、それから約10年を経過して人類初の原子炉の臨界が達成された。核変換の実験から核分裂への展開が図られた瞬間である。一方、これら

の実験の際に発生する放射線を有用技術としてのオプションに組み込んだのは、イギリスのA. Charlesbyによる功績が大きかった²⁾。しかし実際に加速器からの電子線が実用的な応用に展開されたのは、米国のベンチャー企業RayChem[現TEconnectivity]社による架橋ポリエチレン製造の努力によっている。一方、電子線の用途についても多岐にわたることが当時から知られており、1956年に米国のEthicon社が電子線による腸線縫合糸の滅菌を実用化している。日本においても住友電気工業(株)による企業化の努力や日本原子力研究所高崎研究所[現量子科学技術研究開発機構高崎—QST高崎]の設立などとあいまって、この時期に電子線を含む放射線利用が格段に推進された。この1960年代は放射線化学の分野でも科学的な進化が数多く起こった。1962年のHartとBoagによる水和電子の直接観測(パルスラジオリシス法による)³⁾や、線量評価法、イオンの収率、阻止能、励起状態、種々のイオン種やラジカルに関する考察などが多岐にわたって行われるようになってきた。この中で、高分子の放射線化学反応についての考察も極めて詳細に行われるようになってきた。これらの先進的な研究は主にヨーロッパと米国・カナダの大学や研究所において先導され、日本はこれらに必死についてゆくという状況であったと考えられる。1970年代に入ると米国において、電子線のプロセス開発が非常に精力的に行われるようになり、広幅の電子線加速器(最大幅は3mにも及んだ)のフィルムの架橋製品製造ラインへの投入、シリコンリリースコーティング、発泡プラスチック製造への展開、また高エネルギーのスクンタイプの電子線加速器がタイヤ製造のラインに投入されるなど、電子線プロセスの先進的な応用に大きな弾みが付き始めた。このような中、1977年には第1回の放射線プロセス国際会議(概要が参考文献に記されている)⁴⁾がプエルトリコにて

Practical Application of Electron-Beam Irradiation Technology: Masakazu Washio.

(2019年8月22日 受理)

開催されると、日本国内でも電子線を含む放射線プロセスへの取り組みが広がっていった⁵⁾。なお、今日実用化されているプロセス技術の基本的なものはこの頃ほぼ出揃っていたと考えられる。放射線による架橋技術、滅菌技術、グラフト重合技術、キュアリング技術、放射線による高分子の分解技術、ゲル化技術、結晶欠陥導入技術などである。

Ⅲ. 電子線プロセスのメリット

電子線を使ったプロセスは次のような理由で極めて理にかなった省エネルギー技術であるといえる。ひとつは、ウォールプラグから電子ビームへの変換効率がきわめて高い(装置にもよるが静電型の MeV クラスの加速器では 90% を超える)ことである。ひとつは、取り出された電子ビームが誘起する化学反応がもともと電子の共有(共有結合)に基づく変化を誘起する点である。すなわち物質中に入った加速電子は、物質を構成する原子の軌道電子と直接的な相互作用(物理過程)を通じて速度を落とし、大量の 2 次電子を発生させながら、化学反応を引き起こすのに適切なエネルギーにまで減速され、これら電子により、いわゆるスパー(活性種の集団)が作られ、ここから化学反応が進むことになるが、ここまでの過程では大きなエネルギーの損失を受けない。更にスパー内の反応活性種は共有結合に直接働きかけてその結合状態を制御できる(滅菌の場合は OH ラジカルによる DNA 鎖の化学反応誘起)。こうして大きなエネルギー損失がなく反応を制御しやすい、ほぼ理想的なプロセスが完結することになる。

では、どのくらいエネルギーをうまく使っているのか。これを理解するためには、放射線の吸収エネルギー量と反応による目的物に至る過程を数値で見るとよく分かる。電子線プロセスの際、実際に使用される吸収線量は 10~100 kGy (kGy=kJ/kg) 程度である。ちなみに医療用具の滅菌線量(通常は菌の数を 6 ケタ下げる線量)は 25 kGy が基本である。この吸収線量はどのくらいの熱量に相当するのか、水の温度上昇で考えてみると分かり易い。理科年表を参考にすると水の定圧比熱は 4.2 J/K・g であるとされている。10 kGy でこのエネルギーがすべて熱に変換されたとしたら水の温度を 2.4℃ 上昇させるエネルギー量ということになる。滅菌線量でも水の温度をたった 6℃ 上昇させる程度のエネルギーで足りるということになる。他の滅菌法に比べていかに効率よいかがよく分かる。

さらに、本技術は大量生産に向いていること、加速器の運転によるものなので、災害時には簡単に停止可能であることなど、多くのメリットを持つ優れたプロセスであると言える。

Ⅳ. 現在の電子線プロセスの状況

以下、現在日本国内外で実施されているプロセスの名称とその技術的バックグラウンドを筆者の知る限りの情報をもとに簡単に紹介しておく。

- ・電線被覆の耐熱化(架橋技術)
- ・熱収縮チューブ、シート製造(架橋技術)
- ・発泡プラスチック製造(架橋技術)
- ・グリーンゴム強度増強(架橋技術)
- ・テフロン耐放射線性向上(架橋技術)
- ・超耐熱性 SiC 繊維製造(架橋技術)
- ・プラスチックの架橋、改質(架橋技術)
- ・電線被覆の不燃化(グラフト重合技術)
- ・電池用隔膜(グラフト重合技術)
- ・塗膜硬化(重合技術—UV 硬化と競合—)
- ・殺菌、滅菌(DNA の 2 重鎖切断)
- ・食品照射(日本以外。DNA の 2 重鎖切断)
- ・半導体特性制御(格子欠陥生成)

これらのプロセスは、電子線照射がその主要な部分または一部を担っている。その実施に際して常に考慮すべき点は、その技術が社会インフラの基盤を支えているもので、継続的に我々の経済活動に必須のものとなり得るかどうかである。そういったものが電子線プロセスとして生き残っており、さらに開発が進められていると考えられる。従って、社会から消えていく消費材やもはや必要とされない商品などは、自然に消滅していくという点では、他の産業技術と大差ないことは認識すべきであろう。

なお、2015 年における放射線利用の経済規模は 4 兆 3,700 億円にも上るとの内閣府報告も提出されている⁶⁾。

— 参考文献 —

- 1) 鷲尾方一 最新放射線化学(基礎編)放射線化学とは—放射線と物質の相互作用—, *RADIOISOTOPES*, 66, 385-393 (2017), doi: 10.3769/radioisotopes.66.385
- 2) A. Charlesby, *Proc. R. Soc., Ser. A*, 215, 187(1952).
- 3) E. J. Hart & J. W. Boag, *J. Amer. Chem. Soc.*, 84, 4090(1962).
- 4) 放射線と産業 6 号(1977).
- 5) 鷲尾方一, 前川康成監修 EB 技術を利用した材料創製と応用展開, シーエムシー出版 2016 年 7 月.
- 6) http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2018/gaiyo_1_e.pdf

著者紹介



鷲尾方一(わしお・まさかず)

早稲田大学理工学術院
(専門分野/関心分野)加速器科学・放射線化学/加速器の先端的应用から産業利用まで、基礎科学をベースに応用展開を図ることを心掛けている。

医療機器・医薬品等の電子線(高エネルギー EB)滅菌

住重アテックス株式会社 山瀬 豊

高エネルギー電子加速器を用いた電子線滅菌は、滅菌法では比較的新しい方法であるが、近年、医療機器、医薬品容器等の人体に対するリスクの高い医療用品の製造時の滅菌法として一般的な滅菌法となってきた。その背景には、高エネルギーの電子線は、最終梱包のまま短時間に低温で透過処理できることや、従来から主流であったエチレンオキシドガス(EO)滅菌のEOの発がん性の問題関連の規制等、滅菌バリデーション(科学的妥当性の検証)要求、無菌性保証など品質規格要求等も厳しくなったことなどがある。さらに近年は、ガンマ線滅菌の線源高騰、環境、セキュリティ、リスク管理等も重視されEO滅菌だけでなくガンマ線滅菌からも電子線滅菌に切り替えるケースも増えている。今後は、コンプライアンス順守やCSRの推進等の社会的な取り組みを背景に、環境、労働環境、安全、品質などの対策強化などに伴い、医療機器、医薬品等の電子線滅菌はさらに増加していくことが考えられる。

KEYWORDS: *Electron Beam, Accelerator, Sterilization, Validation, Medical device, Sterility assurance, Dosimetric release, Sterile pharmaceutical.*

I. 電子線滅菌の概要¹⁾

医療機器等の電子線滅菌は、一般に製品の製造プロセスにおいて、最終梱包後に高エネルギーとされる5~10 MeVクラスの電子加速器から放出される高エネルギーの透過力の優れた電子線を照射し、微生物を無菌性保証が担保できる条件で処理することを目的としている。

特に滅菌医療機器、無菌医薬品等では滅菌バリデーションという科学的妥当性の検証が必要となるため、微生物の死滅効果だけでなく、素材への影響、梱包内部での透過性、作用分布など無菌性を保証するための多岐にわたる検証が必要となる。その際、電子線滅菌は、これらの滅菌バリデーションにおいて、対応しやすく処理後の有害残留物もないこと、コスト、スピードでも優れている側面もあり近年、照射滅菌業者への委託滅菌だけでなく、大手医療機器メーカーも電子加速器を自社導入するケースも増えてきている。

1. 電子線照射設備等の概要

(1) 電子線照射設備と電子線発生原理

電子線照射設備の事例として、茨城県つくば市の住重アテックス(株)つくばセンターの5 MeVクラスを図1に示す。この照射設備はコンクリート遮蔽壁(最大厚2.5 m)でおおわれた照射室建屋の上部に電子加速器を設置

Electron beam (high energy EB) sterilization for medical device and pharmaceuticals : Yutaka Yamase.

(2019年9月4日 受理)

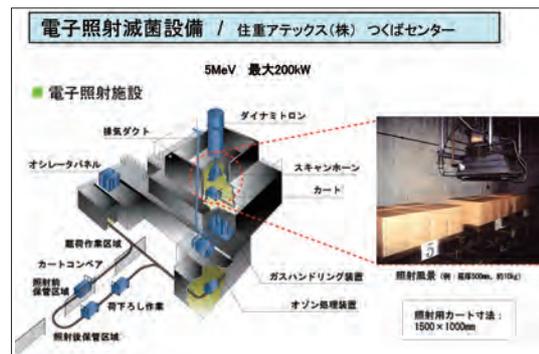


図1 電子線照射設備
(当社セミナー資料より)

しており、加速された電子線は加速管ビームラインを通り、下部の照射室で品物に照射が行われる。この加速器の電子線の発生原理は、図2のように、テレビのブラウン管と同様で、電子銃より放出され易い状態となった電子が高電圧下で加速され、スキャンマグネットの磁力により電子線をスキャニングして一定の幅(約1.4 m)で均一に照射される。

2. 電子線滅菌の殺菌原理

電子線滅菌の殺菌原理は図3のように電子線の電離放射線の電離作用等により殺菌されるが、この電離作用は微生物のDNAの構造に直接的にダメージを与える直接作用とDNAの周りの水分子を活性の高いOHラジカル化させこのラジカルがDNAにダメージを与える間接作用があり、この両作用により完全に微生物の増殖を停止

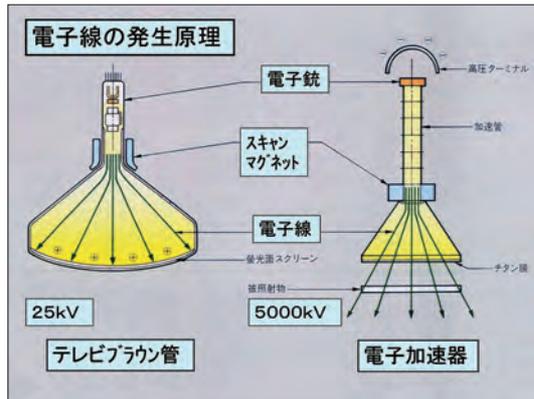


図2 電子線の発生原理
(当社セミナー資料より)

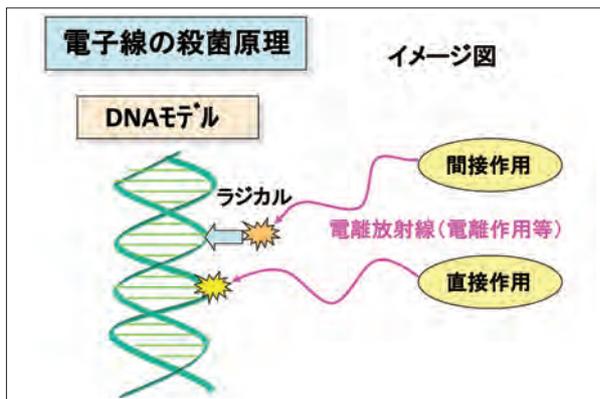


図3 電子線の殺菌原理
(当社セミナー資料より)

し殺滅させる。その際の照射時間は約2~3秒である。

3. 電子線滅菌の特徴

(1) 電子線滅菌の長所

①物質への透過性

- ・当該高エネルギー5 MeV 電子線では密度1 g/cm³の素材(水やプラスチックブロック等)に対し両面照射により約40 mm透過でき、プラスチック空容器、アルミ製ドリンク剤キャップなど梱包かさ密度0.1 g/cm³の場合には両面照射により約400 mmの透過が可能である。
- ・紫外線などと違い金属であってもその金属の厚み、梱包内かさ密度制御により透過可能である。
- ・包装材は、高価なガス透過性バッグ等が不要で、アルミ包装、多重包装も可能である。

②低温照射処理

- ・照射による温度上昇は10 kGyの滅菌線量で水の場合温度上昇2.4℃ときわめて少ない。
- ・熱による影響を受けやすいプラスチック素材、生薬、医薬品などにも適用可能性がある。
- ・冷却、冷凍のまま照射することも可能で、常温に比べさらに照射変質が低減可能である。

③照射処理時間が短く判定時間も早い

- ・電子線はガンマ線に比べ、線量率(時間当りの吸収線量)が数千倍~数万倍と高線量率のため、実質照射時間が数秒と短く、その他の滅菌法と比較してもきわめて高速で、連続、大量処理が可能である。
- ・高線量率のため材質への影響(劣化、着色、臭気等)はガンマ線に比べ一般に少ない(同線量の場合)。
- ・線量測定はフィルム型線量計により照射後1~2時間程度で計測可能である。
- ・試験照射、滅菌バリデーションなどの場合短時間で大量のデータが取れるため詳細な内部線量分布測定も容易に測定可能である。また、多品種のバリデーション試験も容易である。

④ドジメトリックリリースが採用可能

- ・ドジメトリックリリースとはいわゆる電子線の線量の結果により滅菌判定でき、製品の無菌試験など培養試験が省略可能というもので従来の培養期間7~14日間が省略できる可能性がある。

⑤滅菌後の残留物質がない

- ・EOGや有害薬剤等による滅菌の場合は、滅菌後にこれらの残留物を製品から排気残留物処理などが必要だが、電子線滅菌では残留物はなく、原則滅菌後の後処理不要である。また高圧蒸気滅菌等での滅菌後の乾燥も不要である。

⑥滅菌バリデーションが比較的容易

- ・電子線滅菌の殺菌実質ファクターは、線量(吸収線量:kGy)1つだけであるためEOG滅菌のように多数の滅菌管理ファクター(ガス濃度、温度、湿度、圧力、時間)がなく滅菌バリデーションデータ取得が容易である。
- ・滅菌梱包内部の線量分布は、照射条件に従って物理的に傾向が定まるため、蒸気、ガス系等の滅菌方法に比べその挙動を予測しやすく再現性も高い。

⑦電氣的に電子を発生、制御可能

- ・ガンマ線滅菌の場合は放射性物質を用いるが電子線は電気をエネルギー源とし、ガンマ線の放射性物質(線源コバルト60)の購入、廃棄等の費用が不要である。
- ・電子線の場合、放射性物質取扱い上のセキュリティ、パブリックアクセス関連のリスクが少ない。

(2) 電子線滅菌の短所・留意点

①設備が大型で高額

- ・高エネルギーの電子線は、そこから発生する制動X線を遮蔽するため遮蔽壁(コンクリート壁厚2.5 m)など含め設備が大型化する。
- ・電子加速器と遮蔽建屋等で初期投資は通常十数億円規模と高額である。

②病院内では使用されていない

- ・設備が大型で、高額なため医療機器等の製造時には使用されるが病院内では使用されていない。
- ③設備の管理に専門性が必要
- ・設備の管理には第一種放射線取扱主任者の資格者が必要。
 - ・作業者は、放射線安全教育、健康診断、被ばく線量管理などが必要。
- ④透過能力はガンマ線に比べ劣る
- ・透過力はガンマ線に比べ劣るため、液体入り人工透析用ダイヤライザー、大型の粉体原料、大型の人工心肺など透過ができない製品形態もある。
- ⑤材質への影響に関し、事前の試験評価が重要
- ・事前に滅菌バリデーションの一環として、照射による素材への影響評価は照射直後だけでなく、一定期間の経時的な変化も含めた試験評価が必要。医療機器では通常6ヶ月以上の経時変化評価が必要となる。

II. 電子線滅菌の動向

1. 医療用品の電子線滅菌に関する変遷²⁾

電子線滅菌に関する医療機器、医薬品等(医療用品)の薬事承認、規格動向等の変遷を表1に示す。

1989年に住友重機械工業(現住重アテックス)が茨城県つくば市に当時産業用では世界最大出力の5MeV 200kWの大型電子加速器設備を設置した。

同施設において、1991年に国内で初となる医療用具の電子線滅菌の製造業施設の許可を得て電子線滅菌品の承認も取得した。同年この承認事例を受け、行政より電子線滅菌の承認申請に係るガイドが事務連絡として発行された。この承認前例をきっかけに医療機器等の電子線滅菌が行われるようになった。2006年には、同施設で国内初の無菌医薬品の電子線滅菌製造業の許可を取得し、放射線滅菌(ガンマ線含め)による医薬品の滅菌としても国内初の正式な審査となったが長い年月を経て品目承認が

表1 主な国内における医療用品の電子線滅菌の変遷
(電子線滅菌の薬事承認規格動向 当社セミナー資料より)

年	内容
1989年	高エネルギー電子線滅菌施設(国内初/弊社)
1991年	医療用具の電子線滅菌製造業許可(国内初/弊社)
1991年	電子線滅菌を用いた医療用具の承認申請にかかる添付資料について(厚生省 事務連絡)
1995年	『医療用品の滅菌バリデーション及び日常管理のための要求事項/放射線滅菌』(第1版) ISO/TC198 ISO11137 高エネルギー電子線明記
1996年	『医療用具のドジメトリックリリースの導入に関する研究』厚生科学研究
1997年	第13改正日本薬局方 第一追補 参考情報 『3.最終滅菌法及び滅菌指標体』『5.微生物殺滅法』電子線滅菌が明記
1999年	第13改正日本薬局方 第二追補 参考情報 『4.最終滅菌医薬品の無菌性保証』 パラメトリックリリース(ドジメトリックリリース)が明記
2006年	医薬品(乾燥) 点眼薬の電子線滅菌製造許可、承認(国内初/弊社)
2012年	医薬品(液剤) 殺菌消毒剤の電子線滅菌承認(国内初/弊社取引先)
2013年	医薬品(液剤)の電子線滅菌ドジメトリックリリース承認(国内初/弊社取引先)
その他: 2010年	放射線滅菌/電子線滅菌 JIS化、2012年 PIC/S(電子線滅菌含む)事務連絡

得られた。

その後、国際的な医薬品の審査の枠組みであるPIC/S GMPに日本も加盟したことで2012年の関連通知が発行され、この中のANNEX12において医薬品の電離放射線の使用についてのガイドが示され電子線滅菌に関するガイドも示された。

2. 医療用品等の滅菌事例の動向

(1) 医療機器(旧:医療用具)

当初、国内での電子線滅菌の承認品目は、ラテックスゴム手袋であった、しかし、その際は5MeVであったことやゴム手袋は複数の積層された最終梱包であったため、透過力の問題もあり薄い梱包となり実用照射にはならなかった。

その後、手術用縫合糸、採血用穿刺針などは商用レベルでの照射となった。また、米国大手医療機器メーカーの国内製造の救急絆創膏が国内で初めてEOG滅菌から電子線滅菌に切り替えられた。

その他、手術用ガウン等の不織布の大手企業も電子線滅菌を採用し、当初は委受託滅菌であったが自社に電子線滅菌装置を複数導入するまでになった。以上はほとんどEOG滅菌品からの切り替えであった。特に米国大手企業が世界中の自社工場へのEOG滅菌を廃止する指令を出したことを受けて、日本は初めて電子線滅菌を採用した。近年では、大手医療機器メーカーでは、出荷量の多い各種シリンジの滅菌をガンマ線から電子線滅菌へと切り替えている。

(2) 医薬品無菌容器

医薬品のうち無菌が求められるのは無菌製剤であり、注射薬、点眼薬、消毒薬等がある。

これらの包装容器のうち、特に点眼薬の容器は1990年代当初より大手各社がEOG滅菌から電子線滅菌へ切り替えるようになった。現在ではほとんどの点眼薬、洗眼薬等の容器は電子線滅菌で処理がされている。今後は、注射薬用のプレフィルドシリンジなどや輸液包装容器等の電子線滅菌も期待されている。

(3) 医薬品無菌製剤

医薬品無菌製剤の電子線滅菌は、2006年に点眼薬(乾燥)の用時溶解型のPTP包装製剤の承認が得られて以降、茨城県つくば市の施設で商用電子線滅菌が開始された。その後、同施設では消毒剤(液体)についても商用で電子線滅菌が実施された。

一方、医薬品の場合は、医療機器、包装容器のプラスチック材料などと異なり電子線照射による影響評価試験などの検証試験が膨大であり、承認には長い期間を要しており今後の課題でもある。

3. 国内における放射線滅菌設備の設置動向

国内におけるガンマ線、電子線(5~10 MeV)の滅菌設備の設置推移を調べたので図4および表2に示す。これらからわかるように、国内での放射線滅菌施設の設置は、1969年にガンマ線の滅菌施設が栃木県に創設され2000年を最後に新設のガンマ線設備は設置されていない。一方、高エネルギーの電子線滅菌施設は、ガンマ線設備設置より20年後の1989年に茨城県で設置されて以来、その後2014年まで新設の電子線設備が設置されており、累計設置数では電子線滅菌設備がガンマ線滅菌設

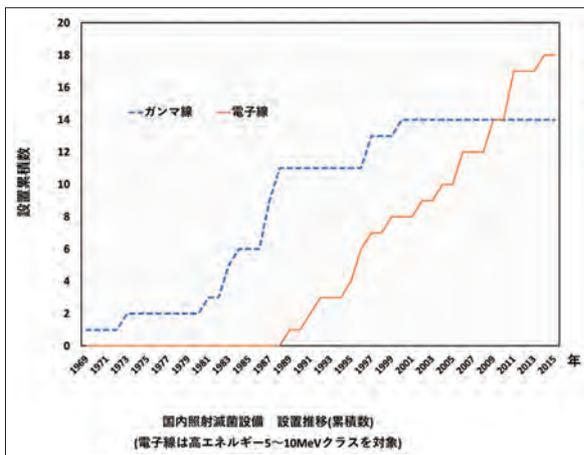


図4 国内照射滅菌設備の設置推移
(電子線は5~10 MeVを対象 当社調べ)

表2 国内照射滅菌設備の設置推移 当社調べ

大型 照射滅菌設備(ガンマ線、電子線)の設置 推移				
設置年	ガンマ線(設置数、地域)		電子線(設置数、地域)	
1969	1	栃木	0	
1973	1	群馬	0	
1981	1	滋賀	0	
1983	2	山梨	0	
1984	1	群馬	0	
1987	1	滋賀	0	
1987	2	広島	0	
1988	2	秋田、大分	0	
1989	0		1	茨城
1991	0		1	群馬
1992	0		1	茨城
1995	0		1	石川
1996	0		2	茨城
1997	2	茨城、群馬	1	大阪
1999	0		1	大阪
2000	1	滋賀	0	
2002	0		1	静岡
2004	0		1	宮崎
2006	0		2	山梨
2009	0		2	秋田、茨城
2011	0		3	茨城、福井
2014	0		1	広島
合計	14		18	

2019.9.1 住重アテックス(株) 山瀬 豊 調査
※ 電子線は、5,10MeV高エネルギー電子加速器を対象



図5 10 MeV 電子加速器(IBA 社ロードトロン)
(写真提供: 国内代理店 セティ(株))

備より多い。

処理能力としてはガンマ滅菌設備よりも電子線滅菌設備の方が処理能力が数倍多い場合もあるため全体の処理能力は設置台数よりもさらに数倍大きい可能性もある。また、この調査で注目する点は、大型のガンマ線滅菌設備を保有していた大手医療機器メーカーが、近年は、高エネルギー電子線滅菌設備を導入している点である。

この背景には、ガンマ線の線源であるコバルト 60 放射性同位元素や運搬費の高騰、使用済コバルトの廃棄、リスク管理などの側面もあり、電子線滅菌設備への切り替えの要因ともなっていると考えられる。また、電子線滅菌設備では、1997年以降は全て10 MeVクラスの高エネルギー電子加速器による滅菌設備となっている点や、1999年以降は、10 MeVの電子加速器ではベルギー IBA社製のロードトロンという電子加速器が日本国内で8台を占めている点も興味深い(図5)。

Ⅲ. 電子線滅菌の今後の展望²⁾

近年、国内外で企業の社会的責任に関するニュースがクローズアップされている。特に、コンプライアンス、危機・リスク管理、地球環境への配慮等に関連した話題がより高まっている。こうした社会環境を背景に医療機器、医薬品等のいわゆる医療用品の滅菌プロセスは、人の生命にかかわる重要なプロセスであることや滅菌に関する規格もグローバル化し精査されてきた中で、無菌性保証についてもその科学的妥当性の検証要求や最新の滅菌規格においては滅菌剤の環境影響評価とその対策についても要求されてきている。しかし、このような背景の中でも、現状の医療機器の滅菌では、発がん性のあるEO³⁾のガス滅菌が未だに多く使用されており、その排気ガス管理についても問題視されつつある。以上のような

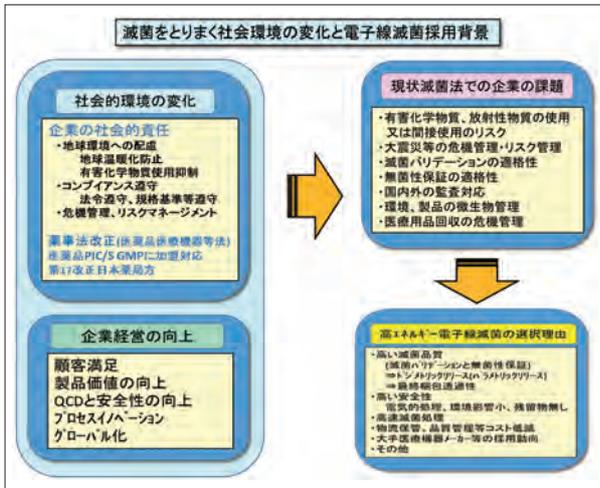


図6 滅菌をとりまく社会環境の変化と電子線滅菌採用の背景
 転載：第23章電子線滅菌について
 (EB技術を利用した材料創製と応用展開 シーエムシー出版2016)

背景もあり今後は、クリーンで環境負荷も少ない電子線滅菌がさらに普及していくものと考えられる。(図6)

－ 参考文献 －

- 1) 山瀬豊：医薬品等への電子線滅菌の利用現状と今後の展望 (製剤技術研究会誌 2005Vol.14No.2).
- 2) 山瀬豊：第23章電子線滅菌について (EB技術を利用した材料創製と応用展開シーエムシー出版2016).
- 3) 優先評価化学物質のリスク評価 No.19 エチレンオキシド厚生労働省, 経済産業省, 環境省, 平成30年3月.

著者紹介



山瀬 豊 (やませ・ゆたか)

住重アテックス株式会社

(専門分野/関心分野)放射線滅菌, 微生物試験, 滅菌バリデーション, 線量計測, 素材改質/環境・品質管理, ビジネス戦略, マーケティング



書籍販売のご案内

■『放射線遮蔽ハンドブックー基礎編ー』

一般社団法人日本原子力学会 「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会編

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

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

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

加筆いたしました。

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

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

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

○ご購入は日本原子力学会ホームページ 書籍販売のページよりお申し込みください○

<http://www.aesj.net/publish/shopping>





図3 EB滅菌方式無菌充填システム
(出展)放射線利用振興協会発行、P10の写真1より転載

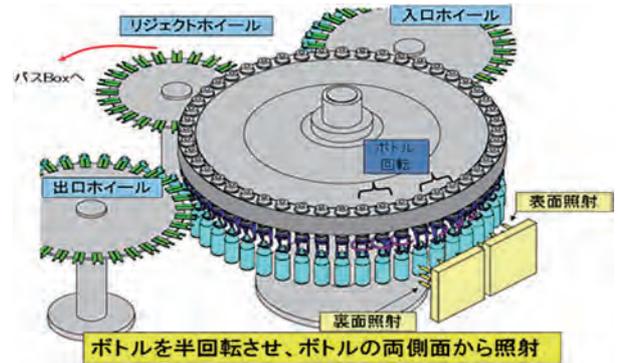


図5 両面照射 EB滅菌システム
(出展)放射線利用振興協会発行、P11の図1より転載

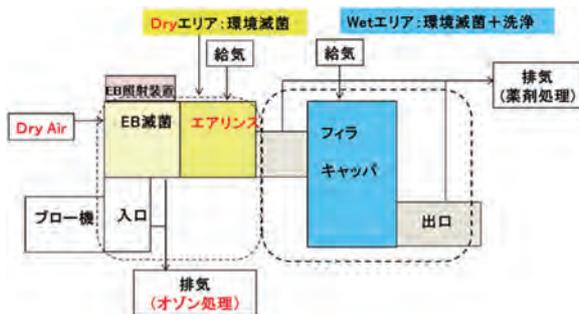


図4 基本構成図

IV. EB技術のボトリングラインへの応用展開³⁾

PETボトル用のEB滅菌方式無菌充填システム(図3)を実用化する際には、いくつかの課題をクリアする必要があった。その主な課題と解決の技術などについて説明する。

1. EB照射環境の制御

一般的に大気中にEBを照射すると、オゾンや窒素酸化物、あるいはそれらと大気中の水分が反応して硝酸などが生成される。一方で、機械装置を構成する金属類は硝酸などにより腐食しやすいので、この硝酸の生成を防止することが必要である。

方策としては、空間を密閉して窒素雰囲気中に置換する方法もあるが、PETボトルの連続的な搬送であるため、EB照射空間に供給する空気を乾燥空気として、大気中の水分を排除することにより硝酸生成を抑制した。また、長時間連続生産においても無菌環境を維持できるように、EB滅菌装置を含めたシステム全体の空間を制御している。具体的な構成図に関して図4に示す。

2. EB照射と環境滅菌

無菌充填システムでは、生産開始に先立ち充填環境を無菌にする必要がある。一方、EB照射装置の特性上、従来の無菌充填システムと比較して、機械・装置に対する洗浄や滅菌は容易ではない。

また、EB照射環境に使用可能な材質も限定され、無菌充填システムとして要求される条件との整合性にも配慮が必要である。

このような課題を解決するために、EB装置に対する洗浄滅菌工程での水分の使用を控えるとともに、その工程が完了した後、EB照射する前に乾燥工程を付加している。特に、EB照射ウィンドウのチタン箔は非常に薄い膜であるため、洗浄滅菌工程での腐食因子を排除することに留意が必要である。また、チタン箔の冷却用エアについてもエア回路を滅菌する機能と滅菌工程におけるチタン箔への危害を防止する機能が相反する形で求められる。

このように、無菌充填システムのEB装置は、それに適した滅菌工程の構築とその構造・材質の選定など、細部に亘る配慮が必要である。

3. ボトル全面へのEB照射と安定した搬送機構

PETボトルをEB滅菌する際は、ボトルの表裏・内外のすべての面にEBを照射する必要があるため、EB滅菌機内でボトルを180度回転させ、表・裏両面からEB照射している。また、ボトル搬送グリッパの形状もEB照射とボトル搬送の両方に適した形状にしている。

一方で、PETボトル飲料の生産ラインは、能力として600~1,200 bpmの高い能力が要求され、24時間の連続生産体制が一般的であり、安定したボトル搬送や機械システムとしての高い信頼性が要求される。このようにEB滅菌適性と高速安定搬送を両立させ、図5に示すようなEB滅菌システムとして構成している。

4. EB滅菌の殺菌効果と検証

EBによる殺菌メカニズムは、電子が細胞自体に直接アタックする直接的・物理的な作用と、細胞内の水分がEBにより化学反応で分解してOHラジカルを発生することで細胞を死滅させる間接的・化学的な作用の、2種類の殺菌メカニズムが複合的に作用するとされている²⁾。

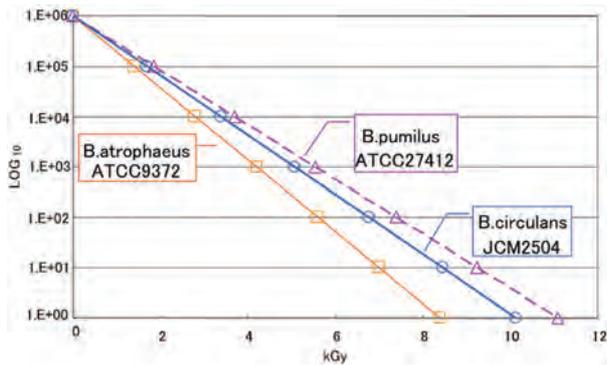


図6 EB照射における代表的な微生物のサバイバルカーブ
(社内テストデータ)

(出展)放射線利用振興協会発行, P11の図2より転載

これにより過酢酸(PAA)などの殺菌用薬剤への耐性が強い微生物も含めた広い範囲の微生物に対して、EBは高い殺菌性能を有している。

放射線殺菌での代表的な指標菌である *B. pumilus* をはじめ、薬剤殺菌などで一般的な指標菌である *B. atrophaeus* などの微生物に対して評価テストを実施して、その特性を確認した。図6にそのサバイバルカーブを示す。

V. 飲料用ボトリングライン以外への展開³⁾

ここまでは飲料用PETボトルに対するEB滅菌技術を説明してきたが、開発した技術は、それ以外にも十分に活用できると考える。特に無菌環境での高速連続式自動化ラインに対して実用化できたことは、EB装置としての環境適性、信頼性、生産性などを実証した訳であり、より幅広い領域での利用が可能である。

また、EB装置と搬送装置をトータル的にデザインできたことでも、その利用領域の拡張が図れることを示唆している。

一方、表面殺菌だけを目的とすれば、前述の300kVのソフトエレクトロンよりもさらに低い150kV級の加速電圧でも殺菌は可能であり、製薬設備用のEB装置として実用化した。

VI. おわりに

以上、当社が開発・実用化したEB滅菌方式の無菌充填システムを中心に、電子線の産業利用として身近な分野への電子線滅菌の応用事例を紹介させて頂いた。

初号機の実生産開始から約10年が経過し、納入実績の累計としては、10ラインを越えてきた。それらが順調に稼働していることを踏まえると、EB滅菌技術の信頼性と実ラインでの耐久性が実証できたものと考えられる。

— 参考文献 —

- 1) 「低エネルギー電子線照射の技術と応用」シーエムシー出版、早稲田大学 鷺尾方一監修。
- 2) 「滅菌法及び微生物殺滅法」日本規格協会、国立感染症研究所 佐々木次雄 他。
- 3) 「EB技術を利用した材料創製と応用展開」シーエムシー出版、早稲田大学 鷺尾方一監修。
- 4) 「放射線と産業133号」一般財団法人 放射線利用振興協会発行。

著者紹介



中 俊明 (なか・としあき)
(所属) 澁谷工業株式会社
EBシステムの開発、設計



西納幸伸 (にし・ゆきのぶ)
(所属) 澁谷工業株式会社
EBシステムの開発、設計



西富久雄 (にし・とくお)
(所属) 澁谷工業株式会社
EBシステムの開発、設計

社会課題への貢献に向けた学会の役割

2019 年秋の大会セッションから

日本原子力研究開発機構 岡嶋 成晃ほか

日本原子力学会は今年 4 月に創立 60 周年を迎えたことを機に、シンポジウムを開催した。9 月に富山大学で開かれた原子力学会の秋の大会では、このシンポジウムでの議論や原子力をめぐる内外の状況などをふまえて、今後の学会活動のあり方について焦点をあて、「原子力をもつ安全の価値」を広く社会に伝える必要性などが提起された。

KEYWORDS: AESJ, 60th Anniversary Symposium, Fukushima Daiichi NPP accident, Information and consult, Attractive nuclear energy, COP21, ICAPP, Nuclear safety value, restore public trust

I. 60 周年シンポジウムから

会合ではまず、原子力学会の岡嶋成晃会長が登壇し、今年 4 月に開催した創立 60 周年シンポジウムの内容とその後のアンケート結果をふまえた学会の今後の活動のあり方についてこのように述べた。

◇

今年 60 周年を迎えた日本原子力学会は設立以来、原子力の平和利用に関する研究開発の振興に寄与するとともに、会員相互の啓発に努めてきた。その中で、2011 年 3 月に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故により、我が国の原子力安全に対する信頼は大きく揺らぎ、本会の活動にも大きな影響を与えた。

今年 4 月に開催した 60 周年シンポジウムでは、この現状を踏まえるとともに、福島復興の推進と原子力の平和利用に対する信頼の回復と新たな発展への展望が示された。ここではシンポジウムの概要と、シンポジウム後にいただいたアンケート結果を紹介するとともに、社会貢献に向けた学会の役割の観点から、今後 10 年の『再構築期』に向けた活動の方針を述べる。

次の 10 年は「再構築期」

シンポジウムは 2 部で構成され、第 1 部では前学会長の駒野康男氏が、本会の 60 年を産業界の発展と関連づけて振り返るとともに、震災後の福島復興と廃炉推進に

対する本会の取り組みの現状を報告。次の 10 年を「再構築期」とし、本会が取り組むべき課題として①専門家の立場からの提言と理解活動の促進、②福島の廃炉の促進と周辺地域の復興への支援、③放射線利用・放射線防護の研究の促進、④教育・人材育成の継続と技術伝承、⑤会員数維持の活動を提言した。

続いて立命館大学の開沼氏は、1F というオンサイトと福島県というオフサイトとの関係に着目。「風評」は関係者間のディスコミュニケーション状態から生じたものであり、それを回復させることが福島の復興と信頼回復につながると指摘した。また、ノンフィクション作家の山根氏は「『ポスト第 2 の敗戦』の原子力」と題する講演の中で、地元企業が福島第一発電所廃炉推進に取り組んでいる姿を、動画を交えて紹介した。

エネルギー源としての原子力について展望した第 2 部では、安全性の確保を大前提とした上で安全の価値を技術論に基づいて説明することや、将来に向けて原子力の価値と安全の価値を高める必要性が指摘された。そのためには放射性廃棄物の処分技術を処分全体として信頼できる技術とするために連携や統合が必要であることや、再生可能エネルギーとの共存に向けた技術開発を進めることで、地球環境問題の解決に向けた貢献を果たす必要も強調された。

さらに若手研究者を中心とした講演があり、バックエンド技術、放射線治療、量子素子開発、中性子イメージング技術、低線量率被ばく影響研究および宇宙探査機器用エネルギー源への原子力利用に関する最前線の研究が紹介された。

Role of AES Japan for Contributing to Social Issues ; From 60th Anniversary Symposium : Shigeaki Okajima, Ryoichi Komiyama, Akira Yamaguchi, Yasuo Komano, Shoji Tsuchida.

(2019 年 9 月 24 日 受理)

情報発信や社会との連携求める声も

会合後のアンケート回答結果では、50代以上からの回答が7割を占めた。この50代以上の年齢別比率は、学会の正会員の50代以上の年齢分布とほぼ一致している。シンポジウムの内容についておおよそ好評を得たが、学会活動に対しては社会とのつながりを意識した情報発信、原子力分野以外との研究連携活動・そのサポート、オープンな情報発信と社会との議論・情報交換、最新成果の積極的な情報発信、リスクコミュニケーション等社会的活動の促進などの要望があった。

また、人材育成については新しい魅力のある課題の提示、対外的な成果公開による若手の興味開拓、若手研究者の交流・成果公開を目的としたイベントの開催、廃炉に限らない原子力・放射線利用テーマの提示、若手に原子力分野に対し夢や希望を持たせてほしいなどの意見があった。

これからの学会は、原子力分野の最新の研究成果および廃炉への寄与を積極的に、社会的にも認められ魅力あるものとして発信することが、若手研究者の意欲および会員増加につながるものと考えられる。

II. 地球環境問題と原子力

次に東京大学の小宮山涼一准教授が「地球環境問題と原子力」というテーマで、原子力をめぐる内外の状況を次のように紹介した。



ICAPP, 「温暖化対策には原子力が不可欠」

2015年12月にパリで開催の第21回気候変動枠組条約締約国会議(COP21)の場で地球温暖化対策に原子力利用が不可欠であることをアピールするため、これに先立ち同年5月に開催されたNuclear innovation for a low-carbon futureをサブタイトルとする「原子力発電プラントの進歩に関する国際会議(ICAPP)2015」にて、日本を含む39の原子力学会が憲章「Nuclear for Climate DECLARATION」に署名した。

これを受け日本原子力学会は、「原子力アゴラ調査専門委員会 地球環境問題対応検討・提言分科会」を立ち上げ、地球環境問題に対する原子力発電の潜在的能力の活用についての社会的提言を行うために定量的かつ科学的な調査結果に基づいて検討を開始した。地球環境問題での原子力発電の役割の検討に際しては、エネルギーセキュリティや電力市場の課題も同時に踏まえることが重要であり、それらの諸課題も含めて、以下の通り7つの提言をまとめた。

原子力は中核的な選択肢

1) 地球環境問題に対処するためには、すべての技術選択肢を総動員することが肝要である。その中で原子力発電は重要な役割を担い、再生可能エネルギーの大量導

入によるコスト上昇の緩和や再生可能エネルギーの供給電力の変動への対応を可能とするものである。

- 2) 地球環境問題への対応に際して、技術の環境価値が市場で適切に評価されるためには、非化石価値取引市場やゼロエミッション・クレジット取引などの枠組みの構築が重要であり、その枠組の中で、技術選択肢の一つとして原子力発電が重要な役割を果たし得るとの認識が共有されることが必要である。
- 3) 原子力技術先進国である日本は、世界全体の問題である地球環境問題に対してその優れた技術を活用するとともに、さらに技術開発の一層の強化を図り、国際的イニシアティブを発揮することが求められる。
- 4) 世界情勢の不確実性が増す中、エネルギー自給率が極端に低い日本は、原子力発電の維持を図るとともに、自前の技術である原子力発電でエネルギーセキュリティを強化する視点が不可欠であり、技術自給率を重視し、中長期的かつ国家的視点で、原子力発電の新增設・リプレース、維持が必要である。
- 5) 電力市場自由化が進められ、市場の予見可能性が低下する中で、原子力事業への適切な投資サイクルを維持するための制度設計が求められる。また、原子力はベースロード電力、供給信頼度、出力調整能力、非化石価値、熱や水素などの多目的利用などの面において多様な価値をもっており、これらの機能を活用することで、原子力の市場競争力の向上が期待できる。とりわけ日本の発電コストは高く(図1)、現状では米国や中国の2倍の水準であり、将来も高止まりが予想されている。その中で原子力発電は、電力価格の安定化に資する重要な技術オプションとなる。
- 6) 原子力発電がエネルギーセキュリティ、環境問題の解決に貢献する電源であることを規制当局と事業者が共有し、安全確保を大前提としたうえで、安全審査の合理化を通じて、再稼動に必要なプロセスの迅速化を図ることが必要である。
- 7) 安全性強化、電力自由化、再生可能エネルギーの導入拡大、災害時の電力安定供給といった社会のニーズ・トレンドへの対応や原子力の持続的利用の実現に向けて、多様な原子力技術開発(新型炉、再処理技術、出力調整機能や運転継続機能の拡充、熱利用など原子力エネルギーの多目的利用、再生可能エネルギーとの共存

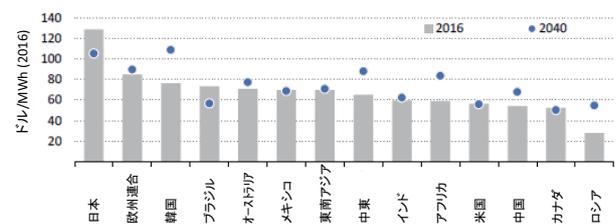


図1 主要国の発電コスト

(IEA, World Energy Outlook 2017, pp.277, Figure6.25 を翻訳し転載)

に向けた技術開発)が引き続き重要である。

まとめると、地球環境問題、エネルギーセキュリティ、電力安定供給への対応を考えるならば、原子力は脱炭素化や技術自給率の高さに優れており、中核的な技術選択肢の一つである。その原子力エネルギーの利用を進めるためには再エネとの共存、電力システムのレジリエンス強化など、新たな社会ニーズに適合することが必要であり、人材の維持・継承、技術の高度化と安全性・社会受容性の実現、福島原発事故・軽水炉の教訓を踏まえた技術開発、バックエンドを巡る問題解決への取り組みなどに対して、国や原子力産業界の努力を期待する。

Ⅲ. 将来の原子力の展望と学会の役割

続いて原子力学会の副会長を務める山口彰氏が、「将来の原子力の展望と学会の役割」というテーマで、次のように述べた。



エネルギー確保と環境保全を両立させる原子力

戦後日本のエネルギー政策の選択においては、図2のように5つの分岐点があった。

一方、原子力エネルギーは、現在においても将来にわたっても一定の役割を果たすと期待される。第5次エネルギー基本計画(2018年7月)は、2030年に向けての原子力を、“数年にわたって国内保有燃料だけで生産が維持できる低炭素の純国産エネルギー源として、優れた安定供給性と効率性を有しており、運転コストが低廉で変動も少なく、運転時には温室効果ガスの排出もないことから、安全性の確保を大前提に長期的なエネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源である”と位置付けた。

2050年に向けては、“あらゆる選択肢の可能性を追求するため野心的な複線シナリオを採用”し、特に“原子力は脱炭素化の実用段階にある選択肢”とした。原子力を長期にわたって安全に利用することは、エネルギーの確保と環境の保全を両立させる、高位の政策目標を達成するための現実的かつ有効な道筋である。

もちろん、原子力の将来を模索する道筋は平坦ではない。エネルギー基本計画は、“経済的に自立し脱炭素化

した再生可能エネルギーの拡大を図る中で、可能な限り原発依存度を低減する”との方針を示し、原子力利用の適正な規模を見極めるとともに再生可能エネルギーとの共存をも求めている。

また、“社会的な信頼回復がまず不可欠であり、福島原発事故の原点に立ち返った責任ある真摯な姿勢や取り組みこそ重要であり、社会的信頼の獲得が鍵である”と記す。果たして将来の原子炉の姿はどのようなものであり、そこに至る道筋をどう描けばよいのであろうか。

世界を見渡せば、既設の軽水炉を80年間にわたって運転しようとする動き、大幅にコストを抑制できる魅力的な小型炉、電源供給に柔軟性をもたらすモジュラー炉、革新的な概念を導入する次世代炉、高レベル放射性廃棄物の有害度を低減する原子炉技術など、将来の原子炉の研究・技術開発を活性化する動きが盛んである。

これらは、既存軽水炉をより有効に活用して経済価値を高めたり、受動的特性を生かして安全価値を追求する次世代炉であったり、資源有効性やエネルギーセキュリティ性能を向上させる概念であったり、まさに、原子力の価値の追求がいたるところでなされていると言えよう。

状況変化に対応した「新しい価値」を見据える

一方、エネルギーを取り巻く状況には多様なリスクがある。化石資源の価格変動などの地政学的リスク、先端技術の他国依存による地経学的リスク、送電網へのサイバー攻撃によるリスク、各エネルギー源のリスク、技術開発投資などエネルギー競争に劣後するリスクなどがそれぞれである。また、原子力文化財団の2018年の世論調査の結果によれば、「原子力は危険で複雑であり不安」という回答が、「原子力は必要で役に立つ」を上回っている。

将来に向けては低炭素エネルギーの価値を正當に評価するとともに、原子力発電所を多数の天然ガス発電所で置き換えることのないように、新しい公共政策が必要である。なお、今日の化石燃料のコストは、有害な炭素放出の社会コストを考慮していないため、多くの地域で意図的に低く抑制されている。

気候変動とクリーンエネルギー政策では、このようなマーケットの失敗を認識し、期せずして退役する原子力発電所は低炭素エネルギー源で置き換えられるべきである。そのような政策が定着するか、天然ガスの価格が上昇するまでは、事業者は政治に財政支援を求め続けるべきであり、原子力発電所の財政支援はクリーンエネルギー政策、電気料金、安全・セキュリティ・性能に関する要求と整合する

「原子力のもつ安全の価値」を伝える

我が国において将来の原子力利用への持続的道筋を描き、そして社会的信頼を取り戻すために、日本原子力学

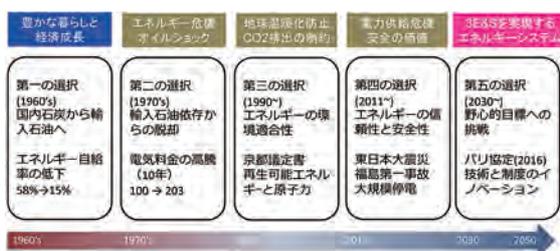


図2 エネルギー選択の分岐点

総合資源エネルギー調査会基本政策分科会(2017年8月9日)の資料に基づいて作成

AIに最終処分場を決めてもらう？

フリージャーナリスト 井内 千穂

日本には最終処分場がないから原発ゼロしかない、かつ、最終処分場の話は、原発ゼロに決めてからだ。そういう「原発ゼロ」派の論理によると、現状では最終処分場の立地の問題ではなく、どこであろうと反対ということになる。そうではなく、既に決まった地層処分の方針に立つとしても、NIMBY(“Not In My Back Yard”)による反対運動は避け難い。最終処分場が必要なことはわかるが自分の近所に建ててほしくないのは人情だし、自分が受け容れても、反対意見を調整するのは困難を極める。どうしたらいいのか？というテーマで中高生が話し合う「中学生サミット」の場で一人の生徒が真顔で言った。

「AIに決めてもらうしかないと思う。」

ええっ！そんな重要な決定をAIに委ねていいのか？！咄嗟に反論したくなったが、原子力発電をスタートしてから50年経っても、日本人の知恵では核のごみをどこに処分するのか決めることができないのは事実だ。そういう大人たちに対する今の若者たちの苛立ちの表明であると同時に、自分たちにも決めることができそうにないという無力感の表れも感じた。あるいは、AIと共存する明るい未来もアリなのか？

2年前に発表された科学的特性マップを作成するのに使用された自然条件のデータに加えて、日本各地の人口動態、産業構造、自治体や地方議会の政治分布、フィンランドやスウェーデンなど過去の「成功事例」など、考えられる多様な要素のデータを膨大に入力し、まだ見つかっていない断層など不確定要素の確率も入れ込んだりすれば、最適地の候補をそれなりに列挙することはできるのか？AIの専門家に聞いてみたい。国による申し入れとAIのレコメン機能と、どちらが受け容れ難いだろうか？

Column

仙台市を訪れて(2)震災後の松島の復興活動

コメニウス大学医学部英語コース 妹尾 優希

今月も引き続き東北よりお送りします。

日本三景の一つとして、江戸時代から多くの人々を魅了してきた松島ですが、2011年3月11日の大規模な地震とその後の最大3m80cmの津波によって大きな被害を受けました。震災当日、松島湾には1,200人あまりの観光客がいましたが、地元民とともに避難し、津波による直接的なけが人や死者を出すことなく、全員無事であったそうです。これは、松島の湾口部に位置する桂島でも同様で、地震・津波によって83軒のうち36軒が全壊し、大きな被害を受けましたが、200人の島民には犠牲者は出なかったそうです。遊覧船のガイドさんによると、松島湾周辺の地域に古くから津波避難対策があったというわけではなく、東日本大震災の1年前に起きたチリ地震から教訓を得て対策を日頃から行っていたことが功を奏したそうです。

津波避難対策により、けが人や死者は周囲の地域と比べ少なかったものの、家屋への被害は大きく、遊覧船や漁船も係留していた桟橋ごと流され、閉店した旅館や飲食店も少なくありませんでした。しかし、震災から8年が経過し、全国からのボランティア、地元の人々や瑞巖寺で修行している雲水さんたちの復旧活動により、現在の松島には穏やかで美しい景色が広がっています。

また、私が訪れた7月15日は塩竈みなと祭が行われ、鳳凰と龍をかたどった2隻の極彩色の船が、漁師さんたちが乗る大漁旗を掲げた漁船に囲まれながら、神輿を乗せて松島湾を巡る様子を見ることができました。戦後に始まった、このお祭りは、東日本大震災が発生した2011年も途切れずに続いたそうです。湾岸は、多くの観光客と漁船に向かって大きな旗をふり踊る地元の学生で賑わっていました。

物理学科の OC や講義でよく言われること

京都女子高校3年生 鳥居 千智

理学部物理学科のオープンキャンパスや講義に行くとよく言われることがある。「高校の物理と大学の物理は全然違う」「物理が面白くないと言う人に大学の物理を解かりやすく講義したら、面白いと言う人がたくさんいた」などだ。それは「物が落ちる速度を計算するのが物理学だ」と思われていることも原因の一つであろう。これは物理に限ったことではない。中学のときの英語の先生が「英語の授業でずっと説明を聞いたり問題を解いたりするのは、体育の授業で説明を45分聞いて実際に体を動かすのは5分というようなものです。本当はね」と言っていたのと同じ考えである。大学で究めるためにも高校までの勉強はした方が良くと思うが、それをその学問の本質だと思うのはもったいない。

ではどうすればいいか?生徒たちに「本当の学問はこういうものだ」と積極的に伝え、かつ学校ではあまり行われぬ実験や体験、講演などをする場や出前授業を増やすべきだ。受験に間に合わなくなるため、実験をじっくり行う場は授業では十分には設けられない。だからこそ授業以外の場で学生向けに設けるのが良いと思う。そしてそこでは「自分の分野と違うからこの分野は聞いても意味がない」と思わせないことも重要だ。一見関係のなさそうな分野の知識も深めることで新しい視点でものを見ることができ、また単に興味のあるものが多い方が人生はより充実しそうだからだ。

大学に入ったら、私が好きな分野に興味を持つ人が増えるような活動をしたい。どんなことをしているのか、またどのような面白さがあるのかを、特に小中高生に伝えたい。自分で楽しむだけでなく、得たことや考えたこと、感じ取ったことも発信していきたい。

Column

新生Jヴィレッジの象徴するもの

フリーライター 服部 美咲

生命を司る森の神が、暴走して世界を焼き尽くす。神は倒れ、焼野原には新たな草木が芽吹く。甦った森は、しかし元の荒々しい原生林ではなく、穏やかな里山だ。かつての森は二度と戻らない。新たな森と共生しようとする人間の強さが描かれた。「もののけ姫」(宮崎駿監督)のクライマックスシーンである。

福島県広野町と楡葉町を跨ぐサッカー施設・Jヴィレッジは、日本サッカー界初のナショナルトレーニングセンターである。東京電力福島第一原子力発電所の事故直後から6年間、Jヴィレッジは事故収束の拠点となった。入念に手入れされた芝に鉄板が敷かれ、廃炉作業に向かう作業員の車が駐められた。日本代表選手が合宿に使った、サッカー選手の誰もが憧れた特別なグラウンドも例外にはならなかった。

原発事故から8年、Jヴィレッジは再生した。春にはラグビーのトップリーグ公式戦が行われた。青い天然芝で選手がぶつかりあい、ボールが快晴の空高く飛ぶ。観客席には少年少女の姿もある。歓声と共に涙を浮かべる人もいた。コンサートやドローン教室も開かれ、人気ドラマのロケ地にも選ばれた。原発事故前の「サッカーの聖地」から、地域復興のシンボルとして、多角的なコンセプトを打ち出している。

東日本大震災と原発事故は、被災地の日常を破壊した。人々は、それぞれの復興の形を模索する。原発事故前の日常を取り戻すのではなく、新たな日常を創り出す——。新生Jヴィレッジの象徴する復興の形は強く、明るい。

刷り込みとリテラシー

NPO あいんしゅたいん 坂東 昌子

1990年代のころ、故向坊団長・猿橋勝子副団長で総勢20名ぐらいだったろうか、日中女性研究者交流会が北京で開かれた。そこで、「放射線と聞いたら何を思い浮かべますか」という質問に、日本側はもちろん「原爆」、ところが中国側は全員「治療」という回答だった。科学技術の社会への普及の仕方、人々のイメージの差が出るのに驚いた。科学と社会の間にあるギャップは、市民と専門家間の「未知」「恐怖感」に基づく「社会的便宜対技術リスク」の溝だという。ゲノム・AIなど、原子力と共に社会に莫大な影響を与える分野では深刻な問題となり、リスク学やレギュラトリー科学での課題となった。概観すると、「市民の無知に対する方法論」の検討(リスクコミュニケーション)か、「規制のありかた」という視点(レギュラトリー科学)になっている。知らぬ間に肝心の科学者の科学的検討に対する努力の比重が落ちる。これが、安全派と危険派の2つに分裂する原因ではないか。プロの科学者も固定概念から抜けきれず、同じ意見の科学者グループばかりで、異なった意見がまともに飛び交うことはない。例えば福島甲状腺調査について、「福島の場合、スクリーニング効果はあるが放射線の影響はない」と一方、他方は「スクリーニング効果だけではこれだけ大量のがんは発生しない」という。当あいんしゅたいんでは、両主張者が同じ場で議論できる機会を作ろうとしたが実現できず、自ら田中司朗先生の解説で、現論文を検討しⁱ、「どちらもはっきりしない。線量対リスクの関係を見るべきだ」ということになったⁱⁱ。

固定概念にとらわれず客観的に検討する科学者がもっと沢山いたら、市民も混乱しないだろうな、とつくづく思う。

i <http://jein.jp/networkofcs/information-list/epidemiology-seminar.html>

ii <http://jein.jp/networkofcs/information-list/epidemiology-seminar/summary.html>

Column

将来を真剣に考える

東京学芸大学附属国際中等教育学校6年 マイケル 瑛美

人が生活をするに必ず出るものの1つがゴミである。エネルギー産業においても同様だ。原子力発電では、ガラス固化体という高レベル放射性廃棄物のゴミが出る。その原子力発電のごみ処理を行っている原子力発電環境整備機構、通称 NUMO の方に話を聞く機会があった。今まで、メディアの情報から原子力発電を使うか使わないか考えたことはあっても、今すでに存在する“ゴミ”の問題については考えたことがなく、講演は目からうろこであった。2019年3月末のデータでは、すでに25,000本相当のガラス固化体が存在しているそうだ。私たち、エネルギーの消費者は使うだけ使って、“ゴミ”の問題については考えなくてよいのだろうか。

原子力発電を使う、使わない、の議論ももちろん大切だが、今まで使用したものの処理についても真剣に考えなければいけない。今ある“ゴミ”の処理方法が決まっていなくて次にどのようにして進むことができるのだろうか。エネルギーを作り出し、その過程で出た“ゴミ”の処理まで考えてこそ、私たちの将来の発展を支えるエネルギー産業を生み出すことができるのではないだろうか。

最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構

第1回 1Fの廃炉と環境回復をめざして(1)

日本原子力研究開発機構 野田 耕一, 野崎 信久, 小川 徹, 山田 知典

原子力の総合的な研究開発を行う国内唯一の機関である日本原子力研究開発機構は、研究用原子炉や加速器、放射性物質の使用施設など、特徴ある施設を使った基礎基盤的な研究と、それを土台としたプロジェクト的な研究開発を手がけている。とりわけ重点的に取り組んでいるのが「福島第一原子力発電所(1F)事故への対処のための研究」「原子力の安全性向上のための研究」「高速炉や高温ガス炉など新型原子炉の開発や再処理技術の高度化など核燃料サイクルの確立に資する研究開発」「放射性廃棄物の処理処分や有害度低減のための研究開発」である。このうち今回と次回は、1F事故対処のための研究について紹介する。

KEYWORDS: *Japan Atomic Energy Agency, Fukushima daiichi NPS, decommissioning, Naraha Center Tecnology Development, Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS)*

当機構の福島第一原子力発電所(1F)事故対応の活動は、災害対策基本法における指定公共機関として事故直後の緊急時対応から始まった。現在は政府の「1F廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」に基づいて1Fの廃炉と、福島環境回復に向けた実効的な研究開発を行っている。

I. 廃炉に挑む

現在、福島県内にある原子力機構の研究活動拠点は5ヶ所。1F廃炉関連では楡葉町、富岡町、大熊町に、環境回復関連では三春町と南相馬市に施設がある。

この中で最も大きな規模を誇るのが、楡葉町にある楡葉遠隔技術開発センターだ。ここでは1Fの廃炉作業の推進に必要なロボットなどの遠隔機器の開発と実証試験を行っている。

このセンターの試験棟には、巨大な空間が広がっている(図1)。高い放射線にさらされている1Fの建屋内を調べ、ガレキなどを撤去する作業の多くは、ロボットや遠隔操作で行う必要がある。ここは、そのための動作試験や操作訓練を行う施設である。この施設内には、広い



図1 楡葉遠隔技術開発センターの試験棟の内部の様子

網で覆われた鉄骨の構造物がありドローンの飛行実験も行われている。その隣には、1F建屋の中を再現したもので、操作員がリモコンを操作すると、ロボットがそこにある階段を自在に登り降りする構造物があり、また、その横には大きな水槽があり、別のロボットが水中を動き回っている。

1F事故の大きな課題である漏えい補修や止水技術の実証試験は、技術研究組合国際廃炉研究開発機構(IRID)が1F2、3号機の原子炉格納容器の下部を実規模で再現し取り組んでいる。

Fukushima Daiichi Decommissioning and Fukushima Remediation(1): Koichi Noda, Nobuhisa Nosaki, Toru Ogawa, Tomonori Yamada.

(2019年10月1日 受理)



図2 楡葉遠隔技術開発センターのVRシステム

3次元で炉内を体験

これらの設備がある試験棟の隣には研究管理棟があり、その中にはバーチャルリアリティ(VR)システムがある。専用のメガネをつけて所定のスペースに立つと、あたかも原子炉建屋内を自由に動きまわっているような動作が再現できる(図2)。

建屋内で作業する際の計画の検討や作業者の教育訓練、遠隔操作機器の操作訓練を行うのが狙いだ。これらの施設はオープン以来3年4ヶ月たっており、研究者などによる利用は200件に迫る。

また、今年度から新たな取り組みとして、ロボット関連の人材育成を目的に、教育機関や企業を対象にした「ロボット操作実習プログラム」の利用を開始。福島県内の高校生などが同プログラムを活用し、クローラ型のロボットやロボットシミュレータ等の操作を体験した。

なお、同センターは次のような試験を行うことができ、研究開発を行う企業や大学などに広く活用されている。

①モーションキャプチャシステム

がれきの上を進むロボットの動作検証や、ドローンを



図3 ロボットによるモックアップ階段試験のようす

飛行させた時の動作を高速度カメラで計測できる。

②モックアップ階段

傾斜角や高さを変えることで、1F現場にあるさまざまな階段を模擬した。ロボットでの走行試験や動作計測ができる(図3)。

③ロボット試験用水槽

1F建屋内の水没調査する水中ロボットの試験ができる。昇温や水質を変えられる。

④バーチャルリアリティ(VR)システム

仮想現実技術を用いることにより、巨大な4画面に1F建屋内を3次元で再現し、あたかも現場にいるかのような環境を立体視できる。

II. 未踏分野に挑む

事故が起きた1Fの炉心はどうなっているのか。これから何をすべきか。シビアアクシデント後の廃炉は、世界がまだ経験したことがない。このような未踏分野の取り組みには、多様な分野の知識や経験を動員し、創造的なアイデアとその活用が必須となる。

原子力機構ではそのために、研究者個人の独自性を尊重する「パズル型」のコミュニティーを構築した。廃炉人材育成に取り組む大学、高専、学協会と連携して立ち上げた「廃炉基盤研究プラットフォーム」がそれである。

言うまでもないことだが、事故炉の「廃止措置」技術の研究開発は、科学技術の最前線に位置している。炉内の状況を把握するにしても、わずかな量のサンプルから高度な分析技術を用いて最大限の情報を引き出すことが必要となるとともに、作業者のリスク管理には新しい原理

に基づいた先進的な計測技術や耐放射線性を高めたカメラなどが不可欠である。

また、廃炉の各段階における安全確保のために、格納容器内の線量率分布の予測や、高度な画像処理と組み合わせた工程管理技術など、多様な計算科学的アプローチも有用である。これら先進的な技術をタイムリーに廃炉の現場に届け、それを活用することが、基礎・基盤研究に求められている。

産官学の英知を結集する CLADS

これらを円滑に行うために原子力機構は2015年4月に、廃炉国際共同研究センター(CLADS)を組織した。その研究開発拠点として2017年4月には福島県双葉郡富岡町に、国際共同研究棟(図4)の運用を開始した。CLADSは楡葉遠隔技術開発センター、大熊分析・研究センターや茨城地区にある原子力機構の各施設、さらには東京電力、国や福島県、国際機関、国内外の大学、研究機関、企業との研究連携と人材育成の取り組みに係る拠点としての役割を担う。

そのCLADSの目標は「国内外の英知を結集する場の整備」「国内外の廃炉研究の強化」「中長期的な人材育成機能の強化」「情報発信機能の整備」の4つである。研究開発では炉内燃料デブリの状況把握、燃料デブリの経年変化、取り出し完了までのリスク管理に係る研究、遠隔での分析や3次元イメージング技術の開発、分析データの取得、拡充などに基づくより適切な廃棄物処理・処分方法の提示などを見据えている。

III. 溶けた燃料を削り取る

福島から遠く離れた福井県敦賀市にある原子力機構の「ふげん」。2003年に運転を終えた同炉では2008年から廃止措置が始まった。その本体を解体するために開発されたレーザー光による切断技術が今、1Fの廃炉作業でのツールとして期待を集めている。

1Fの廃炉を進めるためには、まず炉心から溶け落ちたデブリがどこに、どのような性状や形状で、どれだけの量があるかを把握する必要がある。その後に控えるのが、回収を前提にしたデブリの切り出しだ。

このデブリは溶けた燃料が原子炉の構造物などを溶かしながら固まっ



図4 上はCLADS国際共同研究棟、下は損傷した炉内にある燃料デブリなどの組成を調べるレーザー遠隔分析用基礎実験装置(左と中央)と開発した可搬型レーザー分析装置(右)

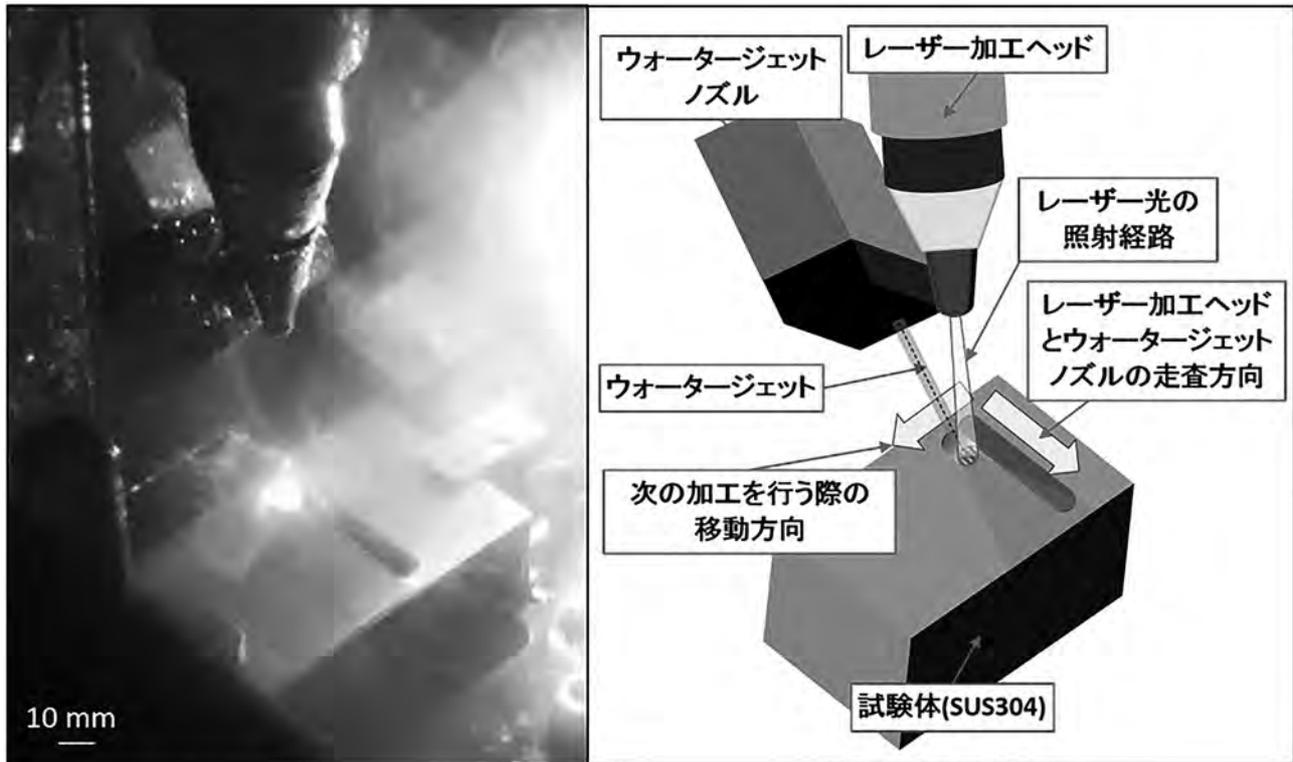


図5 レーザー光とウォータージェットを組み合わせた加工試験

てできたため、性状や形状が様々ではない。放射線量も高く、部分的には相当に固いと想定されている。その場合には、通常のカッターではまるで歯が立たない。

このため原子力機構では、福井県にある「ふげん」の廃炉で既実績があるレーザー光による切断方式に注目した。この方式だと加工ヘッドを移動させれば、どのような形状のデブリにも対応することができる。カッターのように直接デブリに接触することがないため、加工ヘッドが摩耗することもない。

水噴射しながらレーザー光で切断

ただしレーザー光による切断の場合には、切断面の溶けた部分をガス流で吹き飛ばすために、粉じんが拡散する欠点がある。これに対応するために原子力機構と日立GEニュークリア・エナジー、スギノマシンの三者は共同で1Fの廃炉作業の一環としてレーザー光と、ウォータージェットを組み合わせた加工技術の開発を進めている。

レーザー照射面にガス流の代わりに水を噴射するウォータージェット装置と回収装置を組み合わせることで、粉じんの拡散を抑えるレーザー加工技術(図5)であり、対象物を表面からきれいに削り取ることにより高い加工性能を実現できることを確認した¹⁾。この成果によりデブリや炉内構造物の表面を削り取る作業や、それらを切断する作業への適用が期待できる。また、この技術は遠隔操作技術とのマッチングにも優れている。

さまざまな物質が混じりあい、複雑な形状の1Fのデブリを削ったり切断したりする作業は多くの困難を伴うが、このシステムは多様な廃炉作業に対するフレキシビリティが高いため有望な選択肢となる可能性がある。

原子力機構などでは今後、機器の耐放射線性能の向上や粉じんなどの回収装置のシステム化などの課題を解決し、技術の確立に向け、引き続き研究を進めていく。

— 参考文献 —

- 1) T. Yamada, T. Takebe, I. Ishizuka, H. Daido, T. Hanari, T. Shibata, S. Ohmori, K. Kurosawa, G. Sasaki, M. Nakada, H. Sakai, "Development of a laser chipping technique combined with water jet for retrieval of fuel debris at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station," *J. Nucl. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1080/00223131.2019.1647890>.

著者紹介

執筆順、所属はすべて日本原子力研究開発機構
野田耕一 (のだ・こういち)

専門分野・関心分野 原子力工学

野崎信久 (のさき・のぶひさ)

専門分野・関心分野 原子力燃料材料

小川 徹 (おがわ・とおる)

専門分野・関心分野 核燃料工学, 高温化学

山田知典 (やまだ・ともり)

専門分野・関心分野 材料工学, レーザー加工

わが国の電力市場の全体像と今後の原子力発電

第1回 わが国電力市場の全体像

電力中央研究所・社会経済研究所 服部 徹

わが国で進められている電力システム改革では、市場メカニズムの活用を重視した制度設計が進められている。電力のエネルギー(kWh)としての価値を取引する卸電力市場が整備されるとともに、安定供給や環境適合といった公益的課題の解決に必要な価値を取引する新たな市場が次々と創設されつつあり、電力供給の持つ様々な価値が、それぞれ市場を介して取引されるようになってきている。個々の市場で決まる価格を通じて、市場参加者が合理的に行動した結果、エネルギー政策の目標を達成できるような市場の設計が求められる。

KEYWORDS: Electricity System Reform, Electricity Market, Efficiency, Competition, Electricity Price, Cost, Risk, Security of Supply, Decarbonization

I. はじめに

東日本大震災を契機として、わが国では電力システム改革が進められ、2015年に電力広域的運営推進機関(以下、広域機関)が設立され、2016年には小売市場の全面自由化が実施された。2020年には送配電部門の法的分離も控えており、発電部門や小売部門でのさらなる競争の進展が予想されている。

競争を促し、電力供給の効率化を図るために重要な役割を果たすのが市場メカニズムである。わが国でも、電力システム改革以前から、小売電力市場や卸電力市場といった市場が形成されていたが、新たに非化石価値取引市場やベースロード市場が創設され、さらには容量市場や需給調整市場といった市場も創設される予定になっている。これだけ多くの市場が極めて短い期間で創設されることになり、そもそもこれらの市場が何故必要とされ、何を達成しようとしているのか、果たしてうまく機能するのか等、電気事業に携わる関係者にとって十分に理解できていないことも多いと思われる。それらが原子力発電を含む発電事業にどのような影響を及ぼすのか、関心を持たれる関係者も多いだろう。

この解説シリーズでは、電力システム改革後のわが国の電力市場の全体像を紹介しながら、それらが原子力発電にどのような影響を与えるのかについて、海外の電力

市場の経験も踏まえて展望する。

以下では、電力分野における市場メカニズムの活用の意義について確認した上で、以前から存在している市場や新たに創設される市場の目的や概要について述べ、電力市場全体で目指すべき姿について論じる。

II. 電力分野での市場メカニズムの活用

1. 市場メカニズムとは

市場メカニズムの活用は、電力の供給において、わが国のエネルギー政策の目標の一つでもある「経済効率性」を達成するための手段である。市場メカニズムとは、自由な競争の下で、需要と供給のバランスをとる価格によって、効率的に資源を配分し、社会全体の利益(経済厚生)を高める機能である。競争の中では、追加的に生産量を増やすための費用(限界費用)が安い順に供給が決まる(図1)。

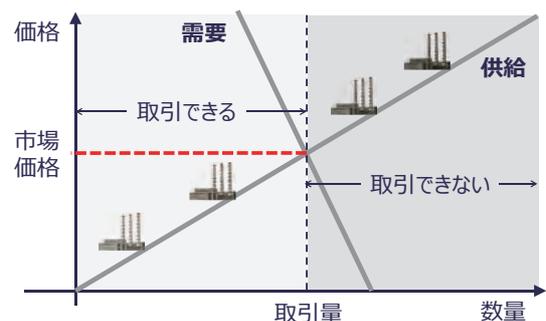


図1 市場メカニズム

Overall Picture of Electricity Markets in Japan : Toru Hattori.
(2019年10月3日 受理)

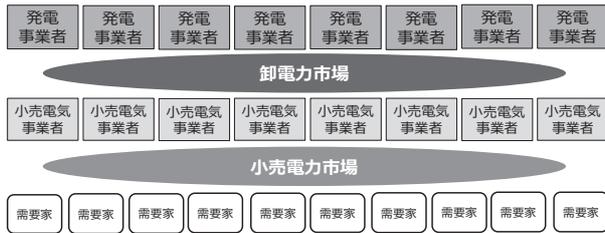


図2 基本的な電力市場の構図

市場価格より安く生産できれば取引することができ、高ければ取引できない。一般に、同じ財(商品)の取引であれば、市場価格は同じになるので、安く供給できれば、その分利益を得ることができ、それを固定費の回収に充てることになる。

ただし、市場において供給が余っている状況(供給余剰)では、市場価格は安くなる。自由化された市場では、利益を出せない生産者は市場からの退出を迫られることになる。これにより供給余剰が解消されると価格は再び上昇する。こうしたプロセスを経て、長い目で見れば、市場に残る効率的な生産者は固定費を回収できるようになると考えられる。

2. 電力の自由化と電力市場

わが国の電力分野における市場メカニズムの活用は、1990年代半ばから徐々に始まった電力の自由化とともに進められてきた。従来、発電・送電・配電・小売の垂直一貫体制の電気事業者が地域独占で供給義務を負い、料金が規制されていたところ、1990年代の半ばから2000年代にかけて、発電部門と小売部門に段階的に競争が導入されることになった。それは、競争的な卸電力市場と小売電力市場が形成されていくことを意味する。基本的には、発電部門と小売部門が取引するのが卸電力市場であり、小売部門と需要家が取引するのが小売電力市場である(図2)。発電事業者は、発電した電力を卸電力として小売電気事業者に販売し、小売電気事業者はその電力を最終需要家に販売する。

小売電力市場は、2016年に全面自由化され、すべての需要家が小売電気事業者を選択できるようになり、新しい小売電気事業者(新電力)も数多く参入してきている。こうした競争の中で需要家を獲得するために、小売電気事業者はより安く卸電力を調達する必要がある。自ら発電所を建設して発電することもできるが、他から安く購入してこることもできる。このように、小売電気事業者が需要家に販売する電力を調達する市場が卸電力市場である。原子力発電を含む発電事業者にとっては、発電した電力を売るための重要な市場である。

Ⅲ. 卸電力の取引に関連する市場

以下に紹介する卸電力の取引に関連する市場は、取引の時点や期間などに違いはあるものの、基本的には、エ

ネルギーとしての電力(kWh)を取引する市場である。

1. 卸電力の取引

卸電力市場において、卸電力を取引する方法は大きく分けて2つある。一つは、小売電気事業者と発電事業者(同一事業者の小売部門と発電部門を含む)が直接契約して取引する「相対取引」である。従来は、ほとんどの取引が相対取引であった。なお、取引相手と直接契約するのではなく、仲介事業者を介した相対取引もある。もう一つは、取引所を介して取引する「取引所取引」である。取引所では、匿名で取引を行うことができ、自ら取引相手を探す必要はない。日本では、任意で参加できる卸電力の取引所として、日本卸電力取引所(JEPX)が設立されており、2005年から実需給の前日に取引を行う前日市場(スポット市場)が運営されている。前日市場では、オークションによる取引が行われ、30分単位で卸電力の価格が決まる。入札価格の安い電源からその発電量を落札し、各時間帯の需要を満たすのに必要な最後の電源の入札価格が約定価格となって、落札した卸電力はすべてその約定価格で取引される(図3)。これを「シングルプライスオークション」と呼ぶ。また、約定価格を設定することになる電源は「限界電源」と呼ばれる。

取引所の存在感が高まると、そこで決まる価格が指標性を持つようになる。それは、相対取引の価格も取引所の価格を参照して決まるようになることを意味する。相対取引の価格は通常公表されないが、卸電力市場では、相対取引を含め、取引所の価格で取引が行われているとみなすことができる。

これまで、旧一般電気事業者の自主的取り組みによって、卸電力取引所の取引量は徐々に増加していたが、近年は、大幅に増加しており、2019年6月には実需要の35%程度が取引所で取引されている¹⁾。

JEPXでは、前日市場の取引が終了した後で、実需給の1時間前まで取引できる「時間前市場」も運用されている。電力の場合、系統全体で需要と供給が常に一致している必要があり、個々の市場参加者も、30分単位で過不足(インバランス)のないように電力を調達することが求められている。過不足が生じた場合には、その分についてインバランス料金を支払う必要があるが、時間前市場

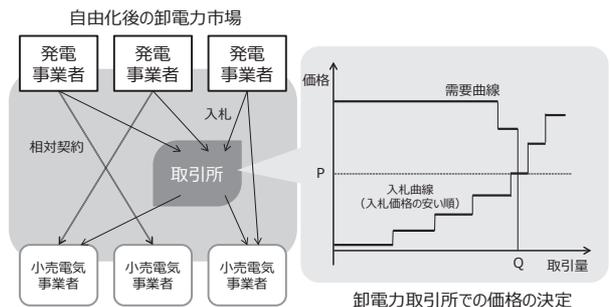


図3 卸電力市場における取引と取引所の価格

での取引により、直前まで、そうしたインバランスの解消を図ることができる。

2. リスクヘッジのための市場

電力のスポット市場では、競争的な価格が決まり、市場参加者に効率化を促すが、一方で、需要と供給が常に変動し、その交点である価格も時々刻々と変動することになる。こうした価格変動は、売り手にとっても買い手にとってもリスクとなるため、その変動を固定化するニーズが発生する。従来の相対取引でも、そのようなリスクを回避することができるが、JEPXでは、将来の一定期間(1年間、1カ月間、1週間)に電力を受渡する「先渡し契約」を取引する「先渡し市場」を運営しており、そこで条件の合う取引相手と取引することも可能である。

さらに2019年9月から、東京商品取引所において、電力先物が試験上場され、15か月先までのスポット市場の価格変動リスクを管理できる先物取引が行われている²⁾。電力先物では、最初取引した一定期間先の卸電力の価格と、実際のJEPXの前日市場の月間平均価格の差額を精算する「差金決済」を行う。実需を持たない事業者(金融機関など)も取引に参加することができる。

3. 連系線を利用する取引

エリア(旧一般電気事業者の供給区域)を跨ぐ相対取引をする場合は、連系線を利用する必要がある。従来、その利用者については、「先着優先」と「空おさえの禁止」を原則とするルールで決められていたところ、2018年10月からは、前日市場を介した形で利用者を決める「間接オークション」が適用されることとなった。具体的には、売り手である発電事業者は卸電力取引所の前日市場に売って、そのエリアの価格を受け取り、買い手である小売電気事業者は、卸電力取引所に、そのエリアの価格を支払う(図4)。

間接オークションは、前日段階においてより効率的な電源、具体的には前日市場で落札した電源から連系線の容量を割り当てることができるという意味で、30分単位の連系線の容量をめぐる市場と言える。また、結果的に取引所の取引量が増加することで、卸電力取引所の活性化につながることも期待されていた。実際、間接オークションの導入前後で比較すると、前日市場の取引量は1.5倍程度に増加している³⁾。

ただし、間接オークションの下で、連系線を利用する

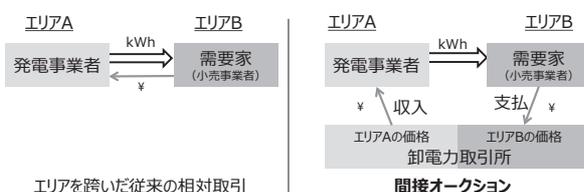


図4 間接オークションへの移行

取引を行うと、地域間の価格差(値差)が変動するリスクを負うことになる。連系線の制約がなければ、全国で同じ価格での取引が実現できるが、送電制約でそれが実現できない場合には、エリアの価格に差がつくことになる。その結果、売り手のエリアの価格が安くなり、買い手のエリアの価格が高くなれば、取引の当事者は、取引する電力を安く売って高く買うことになる。そのような値差の変動リスクをヘッジするための「間接送電権取引市場」が2019年からJEPXで運営されている。制度の詳細についてはJEPXの資料⁴⁾に譲るが、いくつかの連系線を対象とする取引が約定しており、一定のニーズが存在することを裏付けている。

IV. 電力システム改革で創設される新市場

2016年秋から開催された「電力システム改革貫徹のための政策小委員会(以下、貫徹小委)」では、従来のkWhの価値を取引する卸電力市場や小売電力市場での更なる競争の促進に加え、安定供給や環境適合といった公益的課題への対応の必要性が示された。ただし、公益的課題の解決にあたっては市場メカニズムの活用を図ることとされた。そのために新たに創設されることになった市場が、「ベースロード市場」、「需給調整市場」、「容量市場」、「非化石価値取引市場」である。

以下では、個々の新市場における取引の目的とその背景、取引する商品とその価値、取引に参加する売り手と買い手といった、概要について述べる。

1. ベースロード市場

ベースロード市場(以下、BL市場)は、旧一般電気事業者と新電力のイコールフットイングを図り、さらなる小売競争の活性化を図ることを目的として創設される市場である⁵⁾。新電力は、ベースロードの供給力(原子力、大型水力、石炭火力)に対するアクセスが限られているとされ、そのような電源を以前から建設、所有してきた旧一般電気事業者との競争で不利とされてきたことが背景にある。

BL市場では、旧一般電気事業者のベースロード電源が供給する電力のkWhの価値が取引されるが、これは一種の先渡し市場であり、ある程度長い契約期間(1年間)に一定の電力量を受け渡す標準化された商品を取引する市場である。そのため、約定すれば、売り手も買い手もスポット市場の価格変動リスクをヘッジできる。

売り手は旧一般電気事業者であるが、必ず一定量の売り入札をしなければならない義務が課せられている。また、その売り入札価格は、ベースロード電源の平均費用を上限とすることになっている。買い手は主に新電力の小売電気事業者であるが、BL市場から購入する義務はなく、スポット市場の価格が安くなれば、スポット市場

からの調達に切り替えることも可能である。本来、自由な取引が行われる市場において、売り手のみに義務が課せられているという意味で、BL市場は、いわゆる「非対称規制」としての側面を有する。

取引は JEPX において、2019 年度は 3 回に分けてオークションが行われることになっており、8 月に第 1 回、9 月に第 2 回のオークションがすでに開催されている。

2. 需給調整市場

「需給調整市場」は、一般送配電事業者が系統の安定化に用いる調整力(Δ kW)を調達するための市場である。電力の自由化と発送電分離に伴い、電源を持たない一般送配電事業者による調整力の確保という行為は、必要不可欠となる。それを中立的かつ効率的に行うための市場と言える。すでに、一般送配電事業者は、2016 年 10 月より、周波数維持義務を果たすのに必要な調整力をエリア別に公募により確保している。需給調整市場はそれを広域的に行うために創設される市場である。

需給調整市場で扱う調整力は多岐にわたり³⁾、様々な Δ kW 価値が取引される。売り手は、そのような調整力を有する発電事業者であり、買い手は一般送配電事業者のみとなる市場である。

どのような調整力がどの程度必要となるかは、買い手である一般送配電事業者のニーズに基づくが、それは技術的観点に基づいて決められる。

需給調整市場は、2020 年以降に、現在の公募の仕組みを移行させる形で、商品(調整力の種類)ごとに順次、取引を開始する予定である。

3. 容量市場

「容量市場」は、安定供給に必要とされる将来の供給力を効率的に確保することを目的に創設される市場である⁶⁾。競争環境下の卸電力市場からの収入だけでは、市場参加者が十分な供給力(予備力)を確保しておくことが困難になるとの懸念があったためである。

容量市場では、供給力としての kW の価値が取引されるが、それは将来に確保すべき供給力で、日本では基本的には 4 年先の供給力を確保することになっており、建設予定の電源もオークションに参加できる。ただし、4 年先に発電能力を有していることを確認するための要件(リクワイアメント)があり、要件を満たさなかった場合にはペナルティの対象となる。確保する供給力(目標調達量)は、信頼度基準に基づいて決められる。

主な売り手は、4 年後に供給力としての発電能力を有する電源であるが、デマンドレスポンス(DR)も一種の供給力として売り手で参加することが可能である。買い手は、形式上は広域機関となるが、その費用を負担するのは小売電気事業者である。小売電気事業者には、顧客

のピーク需要のシェアに応じて、容量市場の価格(調達費用)を負担することが義務付けられる。その需要は、目標調達量や新規電源の建設費などを考慮して、広域機関が事前に設定する需要曲線に反映されることになる。

容量市場は広域機関によって運営され、2020 年度に、4 年先に必要となる容量のオークションを開始する予定である。

4. 非化石価値取引市場

「非化石価値取引市場」は、電力分野の環境適合の目標である 2030 年度非化石電源比率 44% に向け、小売電気事業者に非化石電源の一定の調達を義務付けた上で、その達成を後押しするために創設される市場である⁷⁾。小売電気事業者全てが一定の非化石電源を建設して、その発電した電力を販売することで、全体で非化石電源比率を達成することが困難なためである。

非化石価値取引市場では、非化石電源で発電する電力の非化石価値を証書化し、それを電気の価値とは分離して取引する。売り手は、非化石電源を所有する発電事業者となるが、非化石電源は、FIT 対象電源と非 FIT 対象電源の 2 つに分け、それぞれで市場を運営する。買い手は、小売電気事業者である。

取引は JEPX で行われ、FIT 対象電源については、年に 4 回のオークションが行われる。そのオークションでは、買い入札の価格を高い順に並べて、売り入札を上回らない分が約定量となるが、約定した場合は、それぞれの買い入札価格が約定価格となる「マルチプライスオークション方式」を採用している。

すでに、FIT 対象電源については 2017 年度に発電された電気を対象に 2018 年 5 月から運用が始まっている。非 FIT 対象電源については、2020 年度にオークションを開始する予定になっている。

V. 電力市場の全体像と課題

新市場について、それぞれの目的や取引する商品と価値、売り手と買い手などを整理したのが表 1 である。市場であるがゆえに、そこで競争を促し、効率的な取引が行われることが期待されるのであるが、ベースロード市場は、基本的には原子力発電を含むベースロード電源を所有する大手事業者と新電力の競争の促進を通じた経済効率性の向上が目的である。他方、需給調整市場と容量市場は安定供給の確保、非化石価値取引市場は環境への適合と、それぞれ公益的課題への対応を目的とする市場となっている。すなわち、安定供給については、新たに供給力としての kW の価値と調整力としての Δ kW の価値を取引する市場で、十分な供給力と調整力の確保を図り、環境適合については、非化石価値を取引する市場で、エネルギーミックスと統合的な電源構成を通じた非化石電源比率の達成を図ることとしたのである。従来の

表1 新市場の概要

	ベースロード市場	需給調整市場	容量市場	非化石価値取引市場
対応する公益的課題	競争の促進による経済効率性の向上	短期の安定供給の確保	中長期の安定供給の確保	環境適合のエネルギーミックスの達成
具体的な課題	旧一般電気事業者と新電力のイコールフッティング	系統安定化に必要となる調整力の確保	十分な供給力の確保	非化石電源比率の達成
取引する商品(価値)	旧一般電気事業者のベースロード電源の電力(kWh価値)	調整力(Δ kW価値)	4年先に発電能力を有する供給力(kW価値)	非化石証書(非化石価値)
売り手	旧一般電気事業者	調整力を有する発電事業者など	供給力を有する発電事業者など	非化石電源を有する発電事業者
買い手	新電力	一般送配電事業者	小売電気事業者	小売電気事業者

電力供給において、明確な境界もなく一体で取引されていた様々な価値(kWh 価値, kW 価値, Δ kW 価値, 非化石価値)を明示的に分けた上で、個別に対応する市場において、効率的な取引を目指すこととしたのである。

市場では、本来、自由な競争が行われ、その結果として、効率的な資源配分がもたらされるが、系統工学的に十分とされる供給力や調整力を確保するとは限らず、また、国の二酸化炭素の排出削減目標を達成するエネルギーミックスを実現するとも限らない。そこで、市場参加者に一定の取引の義務を課すなどした上で、いわば予定調和的にエネルギー政策の3つの目標(安定供給、環境適合、経済効率性)を電力システムにおいて同時達成しようとしているのである。それは、それぞれの市場において決定される価格に基づいて、市場参加者が合理的に行動した結果として実現すべきものである⁸⁾。そのような狙い通りの結果をもたらすには、個々の市場の制度設計が適切になされ、市場間で整合性が図られることが必要といえる。

既存の小売電力市場と卸電力市場に加え、複数の新市場が短期間に創設され、全体として整合的に機能するかどうかについては懸念の声もある。諸外国でも、市場の制度設計をめぐる試行錯誤を続けてきた経緯があり、わが国でも実際にすべての市場で取引が始まってみないとわからないことが多いと思われる。

他方で、市場が創設されてきた以上、発電事業者とし

ては、自らの電源がこれらの市場で十分な収入を獲得できるかどうか重要になってくる。そのためには、各市場の詳細設計を理解し、収支に与える影響を見極める必要がある。

－ 参考資料 －

- 1) 電力・ガス取引監視等委員会、第41回制度設計専門会合 事務局提出資料～自主的取組・競争状態のモニタリング報告～(平成31年4月～6月期)、2019年。
- 2) 東京商品取引所、電力先物取引の概要、2019年。
- 3) 総合資源エネルギー調査会、電力・ガス事業分科会、電力・ガス基本政策小委員会制度検討作業部会、第二次中間とりまとめ、2019年。
- 4) 日本卸電力取引所、間接送電権取引市場について、2019年。
- 5) 日本卸電力取引所、ベースロード市場について、2019年。
- 6) 電力広域的運営推進機関、容量市場の概要について、説明会資料、2019年。
- 7) 日本卸電力取引所、非化石価値取引市場について、2018年。
- 8) 服部徹、電力システム改革における新市場創設の意義と課題－市場メカニズムの活用をめぐる議論の展望－、電力経済研究 No.66,2019年。

著者紹介



服部 徹 (はっとり・とおる)

電力中央研究所・社会経済研究所
(専門分野/関心分野) 公益事業論、電力市場の制度設計、ネットワーク規制、電力経営

サイエンスよみもの

核分裂発見 80 周年

— 混乱, 高揚そして沈黙までの 7 年間 —

東京工業大学 吉田 正

80 年の時を経た今となっても、核分裂発見の物語は分かりにくい。ここで扱う両大戦のあいだの 7 年間(1934~1940 年)はナチスの全権掌握から開戦までの苛烈な時代に一致し、発見に至る経緯はこの時代背景めきには理解しにくい。いつ、誰が、どう決定的なことを成したのかに焦点をあわせ、核分裂の発見という現代の我々にも計り知れない影響を与えた出来事を、人々の果たした役割や時代推移の節目ふしめに注意を払いながら見てゆく。

KEYWORDS: *nuclear fission, neutron, radium, barium, fission product, transuranic elements, Hahn, Meitner, Strassmann, Frisch*

I. はじめに

7 年前の夏、欧州原子核研究機構の大ホールには多数の科学者・報道陣が集まり、インターネットで世界が注視するなか、ヒッグス粒子発見の決め手となったデータがスクリーンに大写しされ、世紀の発見が宣言された。

一方、核分裂の発見にまつわる物語には 80 年の時を経た今となっても分かりにくさがつきまとう。発見者はオットー・ハーンとリーゼ・マイトナーの 2 人とされたり、シュトラスマンとフリッシュの名がこれに加わったりする。だがこの発見でノーベル賞を得たのはオットー・ハーンひとりであった。当時の状況を考えればドイツ人ハーンと亡命ユダヤ人女性の共同受賞などあり得なかったろう。だがこのうち誰を核分裂の発見者だと考えるにせよ、この 4 人が執筆に関わった核分裂に関わる多くの論文のうち、本稿で紹介する最終結論に該当する 4 論文は全て 1939 年 1 月~5 月に刊行されている。したがって、今年 2019 年が核分裂発見 80 周年であるとする根拠は十分であろう。この 4 報に、この 4 人以外の名は著者として現れない。

一方、本稿が扱う 7 年間(1934~1940 年)は異常な時代であった。主要舞台はドイツのベルリン。その前年(1933 年)には当時世界で最も民主的とされたワイマール憲法のもとでヒトラーが合法的に(あるいは法の不備

を巧妙に突いて)首相の座に就き、議会政治の息の根を止めて狂気の時代に向けて走りはじめていた。1939 年にはドイツ軍がポーランドに侵攻し、翌年 1940 年にはパリが陥落する。そのような時代であった。

II. 中性子照射実験, 混乱の始まり

物語はベルリンから遠く離れたローマに始まる。1934 年、市中のパニスペルナ通りにあったローマ大学物理学教室。2 年前にチャドウィックがポロニウム 210 からのアルファ線をベリリウムに当てて中性子を創生・発見していた。原子核が陽子と中性子から構成されていることも分かってきた。エンリコ・フェルミとその仲間たちは新しい実験手段として中性子に注目する。彼らは、のちに CERN の創設者の一人となるアマルディ、反陽子の発見でノーベル賞を得ることになるセグレなど、多士済々であった。フェルミ達は水素から始めて、あらゆる元素を中性子で照射し、生成物の放射特性を精査した¹⁾。用いた中性子源は 6 mm 径のガラス管に封入されたベリリウム粉末とラドン。Rn のアルファ崩壊で生じる Be の(α, n)反応に由来する中性子である。熱中性子を必要とする実験では、線源とサンプルを手に研究所の中庭にあった金魚の池(養魚池とする資料も)に皆で入り込み、池の水で中性子を減速させて実験した逸話が知られている。金魚には何の被害もなかったという。

解釈の難しい実験結果をもたらしたのは最も重いウランだった。フェルミらは照射済みサンプル中にそれぞれ 10 秒、40 秒、13 分、90 分の半減期を持つ同位体を確認

The Discovery of Fission, 80 Years Ago ; Seven years of confusion, uplifting and silence : Tadashi Yoshida.

(2019 年 9 月 7 日 受理)

した。とうぜん核分裂なぞ夢想だにしておらず、これらはウランと原子番号 Z が 1 ないし 2 しか変わらない重い元素の同位体であり、このうち「13 分、90 分半減期は原子番号が 92 より大きな元素(すなわち超ウラン元素)であろう」と結論した¹⁾。仮にネプツニウム ($Z=93$) を同定していれば快挙であったであろうが、この時代、フェルミの天才をもってしてもまだそこまで詰めることは不可能だった。ネプツニウムは 6 年後、パークレーの Edwin McMillan と Philip Abelson により発見・命名された。だがこの超ウラン元素という思い込みが(後知恵で言うのだが)核分裂の発見を遅らせたことは一面の真実である。この時、照射によって原子番号 Z は 1 ないし 2 しか変化しないとした彼らの前提を批判し、原子核が大きく複数個に「裂ける」(核分裂という言葉はまだ無い)可能性を示唆した女性がいた。イダ・ノダックである²⁾。ノダックはレニウムの発見などで既に名を知られた化学者だったが、その批判は顧みられず、核分裂が俎上に上がるまでそれから更に 5 年の時を要する。ノダックはレニウムとともに $Z=43$ 元素(今でいうテクネチウム)の発見も宣言したが、当時これは疑わしいとされて彼女の上記の主張もわりを食ったのだとする論者もいる。ちなみに $Z=43$ 元素は 1908 年に小川正孝によって発見され「ニッポニウム」と命名されたが後に否定された。 $Z=43$ は 20 世紀を通じ何かと話題の多い元素であった。

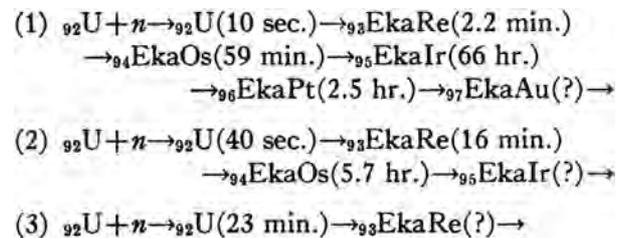
フェルミ達の実験に強い関心を示したのが本稿の主役の一人リーゼ・マイトナー(Lise Meitner, 1878-1968)である。マイトナーはウィーンでユダヤ系弁護士の三女に生まれた。ウィーン大学に進学し、物理学で、女性としては同大学史上 2 人目の博士号を得た。ボルツマンの講義の熱心な聴講者であったという。1907 年にベルリンにやって来て、苦勞のすえ、既に放射線化学で実績をあげていたオットー・ハーン(Otto Hahn, 1879-1968)との共同研究に着手する。前後の経緯については文献³⁾に詳しい。本稿はこの著作に多くを負っていることを言い添えておく。

III. 困難な時代、超ウラン元素の呪縛

フェルミ達の実験に触発されたマイトナーは、ハーンにウランの中性子照射実験を提案し、同じ年に 2 人は世界史を変えることになる実験に着手した(図 1)。以下に示す(1), (2), (3)は 3 年後に文献⁴⁾で提唱された中性子照射後の元素改変系列であり、マイトナーとハーンが始めた長い実験と試行錯誤の歴史、その前半の要約である。文献^{3, 5)}でもそのまま引用されている。ここでは見安さの観点で 5) から孫引するが内容はオリジナル⁴⁾と全く同一である。この時期の論文に多用される“Eka”は「1」を意味するサンスクリット語で、周期律表の一段下を意味する。当時そこにはまだ空欄が多く、EkaRe などは空欄を埋めるための当時の仮称である。マイトナー、



図 1 実験室でのマイトナー(左)とハーン



ハーン、新たに加わったシュトラスマン(Fritz Strassmann, 1902-1980)の 3 人はこの時はまだウランに中性子を当てて生成されるのは超ウラン元素であると確信していた。現在のあと知恵によれば、半減期 23 分の ${}^{239}\text{U}$ に始まる(3)のみが超ウラン元素に至る道で、 ${}_{93}\text{EkaRe} (?)$ とあるのが ${}^{239}\text{Np}$ である。これは半減期 2.36 日のベータ崩壊で ${}^{239}\text{Pu}$ に至るはずである。そして(1)は半減期 10 秒の、(2)は 40 秒の Uranisotop(原文のまま)であり、各々互いに異なった半減期を持つ Substanz(実体)を經由して $Z=93, 94, 95, 96, 97$ などのより高次の超ウラン元素に至るとしている。同じ ${}_{94}\text{EkaOs}$ (現代名プルトニウムに対応)でも、(1)での半減期 59 分が、(2)では 5.7 時間となっている。 ${}^{238}\text{U}$ が中性子を捕獲して生成する ${}^{239}\text{U}$ (正確な半減期は 23.45 分)が、そのあと異なった同位体ないしはアイソマーを辿ってより高次の超ウラン元素に改変して行くというのは今となっては理解しにくいことだ。しかし論文執筆当時(1937 年 5 月受理)、事態はまったく未解明であり、同位体とアイソマー(同じ同位体に属する寿命の長い励起状

態)の区別も明確でなかったりする。だがこの論文は核分裂発見への大きな一里塚となった。

IV. 核分裂生成バリウムの発見

この論文刊行の7ヶ月後(1938年2月), ヒトラーはオーストリア首相を別荘に呼びつけてドイツとの合邦を要求し, 3月にはドイツ軍がオーストリアを占領する。これによりマイトナーは故国とその市民権による保護を同時に失った。迫害を心配する周囲の勧めもあり彼女は公私の全てをウィーンとベルリンに残したままスウェーデンへの亡命を決意する。7月13日, ハーンに送られてベルリンを立ち, 文字通り命からがらでドイツを去る。4ヶ月後の11月にはドイツ各地で「水晶の夜」の暴動が起きる。間一髪だった。「この事件によりドイツにおけるユダヤ人の立場は大幅に悪化し, 後に起こるホロコーストへの転換点の一つとなった。ちなみに, 水晶の夜という名前の由来は, 破壊されたガラスが月明かりに照らされて水晶のようにきらめいていたことによる」と Wikipedia にある。亡命先のスウェーデンでの日々は惨めなものであったようだが, 物理学者であるマイトナーと化学者であるハーンの学問上の手紙のやり取りは続き, 我々はこのやり取りの詳細を文献³⁾等で知ることができる。

残されたハーンとシュトラスマンの実験研究の集大成が文献⁶⁾である。2人はそれまでの超ウランへの言及を最少限に抑え, 新たな三つのラジウム同位体の発見について述べる。ラジウムはウランの中性子捕獲後に2回の α 崩壊によって生成したものと論ずる。ウラン($Z=92$)からラジウム($Z=88$)なら原子番号は4減っており確かに2回の α 崩壊で辻褃があう。図2は同文献からの引用で, Ra II, Ra III, Ra IVが新たに見つけられたものであり, 各々の半減期が測定された。これらはベータ崩壊してAc(アクチニウム)さらにTh(トリウム)になるとされた。それにしても, このハーンとシュトラスマンの論文(以下HS論文)はとても奇妙な論文である。全体の3分の2が過ぎたあたりで突然論調が変わる。「しかし我々はここで結果の奇妙さに躊躇しながらも新たな論考を提示しなければならない」と前置きし, 節の終わ

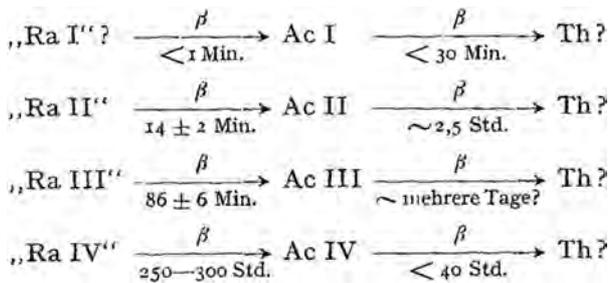


図2 バリウム発見直前にハーンとシュトラスマンが模索した四つのラジウム同位体とその崩壊様式⁶⁾(Std. は Stunden で時間, Tage は日の意味)

表1 変形した周期律表の一部: ランタンおよびアクチニウムの後にはそれぞれランタノイド, アクチノイドを続けて記し, 他と区別するためグレーで示した。ちなみに Np は当時まだ未発見で EkaRehnum と呼ばれていた。

1 (IA)	2 (IIA)	3 (IIIB)				
Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirconium	Niobium	Molybdenum	Technetium
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc
Cesium	Barium	Lanthanum	Cerium	Praseodymium	Neodymium	Promethium
Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm
Francium	Radium	Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Eka-Rhenium
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	ekaRe

りで「化学者として我々は新たな生成物はラジウムではなくバリウムそのものであると言わざるを得ない」と記す。さらに議論を進め「化学者として我々は上の崩壊様式(図2のこと)を改訂し, Ra, Ac, Thに替えて Ba, La, Ceと記載しなければならない」と断言する。読者には, では図2はいったい何だったのか?との思いがよぎる。これが中性子照射されたウランウムサンプル中に, あるはずのないバリウム($Z=56$)が発見されたという化学者としての苦節の宣言なのである。論文中に原子核の分裂を示唆する言及はあるが明言は避けられている。ではなぜバリウムなのか。中性子照射サンプルの分析にあたっては沈殿剤として塩化バリウムが用いられた。表1で分かるようにバリウムは周期律表で目的としたラジウムの真上に位置している。そして, U, Pa, Th, Ac それに超ウラン元素が沈殿物から分離できることが期待された。しかし図2の RaI, RaII, RaIII, RaIV はどのような方法でもバリウムから分離することが出来ず, これらはラジウムではなくバリウムの同位体そのものであると判断せざるを得なくなったのである。そうなれば当然 Ra \rightarrow Ac \rightarrow Th という図2の崩壊系列は, 表1で一段上の Ba \rightarrow La \rightarrow Ce という崩壊系列に差し替えなければならない。これは核物理の側面からは容認しがたいことだっただろう。著者らは「化学者として(Als Chemiker...)」という言葉で論文の結論とともに二度も繰り返す。それは化学者としての矜持を示す言葉であると同時に, 物理学者への訴えかけでもあったのだ。今やドイツ第三帝国の内と外に分かれたかつての盟友マイトナーとその甥フリッシュ, そして彼の指導者だったニールス・ボーアがこれに答える。

V. 高揚の四ヶ月とその後

HS論文が投稿されたのが1938年12月22日, 受理されたのが翌39年1月6日である。この間, ハーンはマイトナーに実験の経過を逐一伝えていた。マイトナーは自分がもはや実験に関われないこと, 亡命先のスウェー

デンでは実験を行える環境にも立場にもないことに苦しみつつ、甥でコペンハーゲンのボーアのもとで働く物理学者フリッシュ(Otto Robert Frisch, 1904-1979)と密接に協力しながら、ハーンとシュトラスマンの結果に真剣に向きあう。

一方、ハーンとシュトラスマンは(一説には)マイトナーからのコメントにヒントを得て、Ba→La→Ce路線を推し進め、バリウムの二つの同位体(質量数 139, 140)とランタン、それにバリウム($Z=56$)の片割れ($Z=92-56=36$)であるクリプトンの孫娘核である放射性ストロンチウムと更にその娘核イットリウムの存在を照射済みウランサンプル中に確認する。そして、ほぼ同様の(現在の言葉で言う)核分裂生成核種が照射済みトリウムサンプル中にも存在することを確証する。これらの結果は時を置かず *Naturwissenschaften* 誌に投稿された。1939年1月28日に受理されたこの論文⁷⁾では、もはや躊躇なく *abspalten*(裂ける, 割れる), *Aufspaltung*(割れること, 分裂), *Bruchstücke*(破片, 断片)など、核分裂を思わせる言葉が頻繁に使われている。しかし核の分裂挙動への直接の言及は慎重に避けられている。これは、分析化学者としての立場の堅持とも取れるが、筆者には、かつての盟友マイトナーに下駄を預けるといふか、彼女への配慮であったように思われてならない。しかしこの思いは甘いのかもしれない。ハーンは研究所、自分たちが積み上げた研究実績、そして命にすらのかかる政治的な危険を避けるため、亡命者マイトナーとの関係を極力否定しようとしていた、とする記述もまた多いのである。

少し時を遡り 39年1月6日のフリッシュからマイトナーへの手紙³⁾。

比例増幅器で「反跳」核「分裂片」を(直接)検出しようというのですが、どう思います? こうした核はすべて、約 100 メガ電子ボルトの運動エネルギーを持っているはずで、そうすると信じられないイオン数になり、ウランのアルファ(線)バックグラウンド(があっても)見ることができる……。金曜日[1月6日]ボーア先生とまたこの問題について細かいところまで議論しました。

(文献³⁾ p.261, 文中括弧は本稿筆者)

フリッシュはこの実験に成功し、核分裂片の生成を直接検出した。結果は、ボーアをやきもきさせるほど遅れて *Nature* 誌 5月20日号に掲載されている⁸⁾。これに先立って同誌 2月11日号に掲載されたのが有名なマイトナー・フリッシュ論文⁹⁾である。ここに初めて *Fission* という言葉が登場し、ボーアの液滴モデルを援用して重い原子核の核分裂が説得力を持って説明されている。

本稿筆者はここまできて初めて核分裂が発見されたこ

ととなり、発見者はハーン、マイトナー、シュトラスマン、フリッシュの4人であると考えている。しかし、まさにハーンとシュトラスマンの生きたこの時代のドイツは、戦時下の、ユダヤ人絶滅すらを目的の一つとした、それも世界史上最も異様な独裁政権のもとにあり、一片の道理さえ通らない世界であったことは忘れるわけにはいかない。

同じ年 1939年の春、ボーアは渡米する。彼の憂慮(フリッシュは分裂片をすでに「見た」がまだ論文になっていない!)にかかわりなく、核分裂の発見はボーアに同行した Rosenfeld の口を通じて³⁾米国の物理学者の間に瞬く間に広がった。追実験は各所で成功し、核分裂反応に伴って中性子が発生すること、そしてその数、²³⁵U の決定的な役割、遅発中性子の存在、核反応断面積、さらには連鎖反応の可能性などが次々と明らかになって行った。そして、ボーア自身とホイーラーは古典力学の枠内で、核分裂という現象の大枠を見事にしかもあつとと言う間に説明し切った¹⁰⁾。ここに本来そうであるべき量子力学の方法が導入されるには戦後、それも 1960年代の Strutinsky の仕事まで待たなければならない。核分裂現象のより厳密な理解はこれが起点となったと言える。1940年1月に刊行された、本稿の指針ともなった Turner の核分裂研究の広範なレビュー⁵⁾には「ここには 1939年12月6日までにプリンストンに届いた論文を収録した」とあるが、1939年に刊行された論文数は約 100報。それまでの 1934-1938年の5年間に刊行された論文数約 30を優に凌駕する。さらに次の年 1940年にはマンハッタン計画の時代が始まり、学術雑誌から核分裂の文字が急速に消えてゆく。

核分裂の兆候を得ながら発見までに要した5年間。冒頭に名前を挙げたセグレ(Emilio Segre, 1905-1989)は、自らも深く関わった核分裂発見までの5年間の物語を振り返り 50周年記念講演(Physics Today, 1989年7月号所収)をこんな言葉で結んだ。“Above all, it seems to me that the human mind sees only what it expects”。セグレは更に冒頭で引いたイダ・ノダックにも言及する。あの批判は“prescientific(科学以前!)”なレベルであったし、自分で追試することも出来たはず(なのにしなかった)と辛辣である。が、でもあのとき批判を受け止めていれば? と自問する。しかし、セグレが中性子照射実験に関わった頃から大戦までの苛烈な時代推移を考えれば、これは科学史上の最大の“*If...?*”の一つであるだろう。

VI. おわりに

ハーンとマイトナーが属したカイザー・ウィルヘルム・ゲゼルシャフトは戦後マックス・プランク・ゲゼルシャフトに改組され、ハーンはその初代会長となる。リーゼ・マイトナーは若い頃からずっとプランクに私淑

していた。リーゼがハーンとともにプロトアクチニウム 231 ($Z = 91$) を発見したばかりのまだヨーロッパが穏やかだった時代の手紙³⁾。

ハーン様・・・昨夜はプランク先生のお宅に伺いました。(家庭音楽会の)演目は、シューベルトとベートーベンの三重奏。見事でした。バイオリン(を弾いた)のはアインシュタインでした。・・・

この時リーゼ 38 歳。その 50 年後、1968 年 10 月、オットー・ハーン逝去。老いたマイトナーを支えていた甥のフリシュはハーンの死を叔母にあえて伝えなかったという。3ヶ月後、リーゼ・マイトナー逝く。共に 89 年の生涯であった。1997 年には 109 番元素がマイトナーにちなんでマイトネリウムと命名される。

－ 参考文献 －

1) E.Fermi, E.Amaldi, O.D'Agostino, F.Rasetti, E.Segre, *Proc. Roy. Soc.*, A146 (1934) 483-500.

- 2) I. Noddack, *Zeitschrift für Angewandten Chemie*, 37 (1934) 635-655.
- 3) R.L.サイム(鈴木淑美訳), リーゼ・マイトナー, 嵐の時代を生き抜いた女性科学者, シュプリンガー・フェアラーク東京(2004).
- 4) L.Meitner, O.Hahn, F.Strassmann, *Zeitschrift für Physik*, 106 (1937) 249-270.
- 5) L.A.Turner, *Rev. Mod. Phys.*, 12 (1940) 1-29.
- 6) O.Hahn, F.Strassmann, *Naturwissenschaften*, 27 (1939) 11-15.
- 7) O.Hahn, F.Strassmann, *Naturwissenschaften*, 27 (1939) 89-95.
- 8) O.R.Frisch, *Nature*, 143 (1939) 276.
- 9) L.Meitner, O.R.Frisch, *Nature*, 143 (1939) 239-240.
- 10) N.Bohr, J.A. Wheeler, *Phys. Rev.*, 56 (1939) 426-450.

著者紹介



吉田 正 (よしだ・ただし)
東京工業大学
(専門分野/関心分野)核データ・核物理,
炉物理, 同位体分離



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－

(11月5日 第4回 論文誌編集幹事会)

- ・9月16日から10月15日までに英文論文誌に20報, 和文論文誌に1報の新規投稿があった。
- ・第7分野の編集委員追加が理事会で承認された。11月から新体制で審査を進める。
- ・英文化WGの進捗状況が報告された。出版会社に関して検討を進めている。
- ・エディターズチョイスの進め方に関して報告された。当面は学会賞候補論文を紹介することとする。
- ・論文誌 Special Issue 実施要領と申請書の改訂案を幹事会承認とした。
- ・英文誌の掲載料改定や和文誌冊子体の継続および今後の編集方針等に関して, 若手編集委員からなるWGを組織し意見を聴取することとする。

(11月5日 第5回 学会誌編集幹事会)

- ・2020年3月号, 2021年3月号の企画案の説明と検討を行った。引き続き検討継続していく。
- ・学会誌本文のフォントサイズ変更について, 事務局から説明があった。他学会誌でもフォントのサイズが同じこともあり, 状況を随時確認し, 必要があれば検討を進めることとした。
- ・核燃料部会より連載講座執筆の承諾の返事があり, 部長である宇整理事にご説明いただいた。
- ・コラムの掲載については今後も継続していくこととした。
- ・巻頭言, 時論, その他の記事企画の進捗状況を確認し, 掲載予定について検討した。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

基礎から分かる未臨界

第3回 未臨界度測定の違い

名古屋大学 遠藤 知弘,
近畿大学 左近 敦士

原子炉物理学分野において、これまでに提案されてきた未臨界度測定手法について解説し、既存手法の課題を述べる。未臨界度測定法は、静的手法、動的手法、炉雑音解析手法に分類される。各手法にはそれぞれ利点・欠点があるため、対象とする測定体系や状況に応じて適切な測定手法を選定したり、組み合わせて使用したりすることが重要である。

KEYWORDS: *subcriticality, neutron multiplication factor, subcritical experiment, point kinetics, reactor noise, prompt neutron decay constant*

I. はじめに

1. 未臨界度測定とは？

未臨界度とは、「臨界からどれだけ余裕があるか」を定量化した指標であり、負の反応度 $-\rho = (1 - k_{\text{eff}})/k_{\text{eff}}$ で定義される (k_{eff} : 実効中性子増倍率)。未臨界度を測定するためには、核分裂連鎖反応に関連した測定可能な量 (例えば、体系内を飛び交う中性子の数) を計測する必要がある。こうして計測された量から、原子炉物理学の理論に基づいて $-\rho$ を推定する方法が「未臨界度測定」である。

中性子源が全く無い未臨界体系を考えた場合、体系内を飛び交う中性子の数はいずれゼロとなるだろう。ただし、未臨界であることは分かっても、未臨界度 $-\rho$ の絶対値 (どれだけ深い未臨界なのか?) は分からない。一方、何らかの中性子源が存在する未臨界体系では、①中性子源の強度、②計測器の検出効率、③計測時間、そして④未臨界度に応じて、多かれ少なかれ中性子計数を測定できる。しかし、計数された中性子をどのように活用すれば「未臨界度の深さ(大きさ)」を推定することができるのだろうか？

本稿では、このような疑問を解消する一助として、原子炉物理学の分野でこれまでに考案されてきた未臨界度測定手法について、広くご紹介したいと思う。

2. 測定手法の分類

未臨界度測定手法として、これまでに様々な方法が提

案されてきたが、それぞれに一長一短があり、万能な方法は無いのが現状である。提案されてきた未臨界度測定手法を大まかに分類すると、以下の3通りに分類することができる。

- イ 静的手法：定常状態における中性子計数率の測定結果から、未臨界度を推定する手法
- ロ 動的手法：過渡変化時における中性子計数率の時間変化から、未臨界度を推定する手法
- ハ 炉雑音解析手法：定常状態における中性子計数の時間的揺らぎの情報から、未臨界度を推定する手法

以降のII～IV節において、各未臨界度測定手法について概要および利点・欠点を説明する。

II. 静的手法

1. 中性子源増倍法

中性子増倍率 k の体系において強度 S [neutrons/s] の中性子源が存在し、十分な時間が経過した後の定常状態を考えたとして。本連載の第1, 2回で説明しているように、体系内に存在する全中性子数は、中性子源強度 S に比例し、核分裂連鎖反応により $1 + k + k^2 + \dots = 1/(1 - k)$ 倍だけ増幅されている。従って、この体系内に検出効率 ε の中性子検出器を置けば、測定された中性子計数率 P は $P \approx \varepsilon S / (1 - k)$ と表現できる形となる。この原理に基づいて、定常状態で計測された中性子計数率 P から中性子増倍率 k を求める手法を「中性子源増倍法」と呼ぶ¹⁾。

本手法で k を推定するためには、 εS の絶対値 (核分裂による子孫を除いた、始祖中性子のみ由来した計数率) を別途与える必要がある。例えば、他の測定手法や数値解析により中性子増倍率 k_0 が既知となっている基準体系があれば、この体系で測定された基準計数率 P_0

Subcriticality - from basics to applications(3) ; The ABC's of Subcriticality Measurements : Tomohiro Endo, Sakon Atsushi.

(2019年7月1日 受理)

■前回タイトル

第2回 未臨界炉の中性子増倍

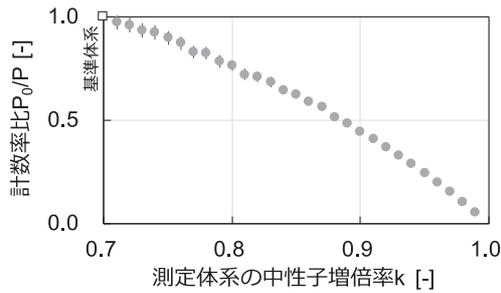


図1 中性子源増倍法の概念図

を用いて校正することで、測定体系の k を $(1-k) \approx (1-k_0)(P_0/P)$ と簡便に推定できる。図1で示したように、測定体系が極めて臨界に近くなれば ($k \approx 1$)、計数率 P が非常に大きくなり計数率比 P_0/P がゼロとなる。この原理が「逆増倍法」と呼ばれる臨界近接の監視手法に用いられている。

中性子源増倍法は非常に簡便な手法であるものの、校正用に中性子増倍率 k_0 が既知の基準体系が必要、すなわち、計数率比 P_0/P の情報だけでは未臨界度を相対的にしか測定できないという欠点がある。また、基準体系と測定体系で ϵS の値が異なる場合には、換算された未臨界度に誤差が生じることになる。加えて、測定体系の未臨界度が深くなるにつれて、核分裂反応率の空間分布が中性子源の位置に大きく依存した形状となるため、中性子源や中性子検出器の位置によって逆推定された中性子増倍率 k が異なるという現象が生じる。深い未臨界体系では、上述したような空間依存性の影響が大きくなるため、検出器位置の配置方法も課題となる。

2. 指数実験法

核分裂連鎖反応が終息する未臨界体系では、中性子源からの距離が遠くなるほど中性子の数が減っていくことになる。例えば、 z 軸方向に一様な体系を考え、その下端に中性子源を配置したとする。この場合、図2で示したように、中性子源からの距離 z に対して中性子計数率が指数関数的に $\exp(-\gamma z)$ の形状で減衰する形となる。体系の中性子増倍率 k が1に近づくにつれて、核分裂連鎖反応もより持続するようになるため、指数関数的な空間減衰も緩やかになる。従って、空間減衰定数 γ [1/cm] の大きさを測定することで、体系内の未臨界度に関する情報を求めることができる。このように、定常状態における計数率の空間分布を測定することで未臨界度を推定する手法を「指数実験法」と呼ぶ²⁾。空間減衰定数 γ から未臨界度への換算については、 z 軸方向の形状バックリング B_z^2 と呼ばれる値と、反応度への換算係数 K を用いて $-\rho = K(B_z^2 + \gamma^2)$ により求めることができる。

指数実験法も、中性子の空間分布を計測するだけで未臨界度が測定可能という利点があるものの、以下で挙げる欠点がある。まず、計数率の空間分布を測定するため

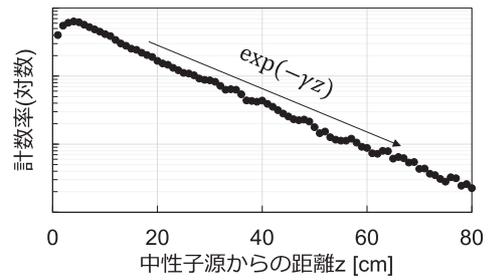


図2 指数実験法の概念図

に、複数の地点での計数率測定が必要不可欠となる。また、空間減衰定数を求めたい z 軸方向については、均一かつ単純な体系が望ましい。また、空間減衰定数 γ から未臨界度を得るためには、あらかじめ数値計算を活用する等の方法で、換算係数 K を求めておく必要もある。

III. 動的手法

1. 逆動特性法

未臨界体系において何らかの過渡変化に伴って中性子増倍率 k が変化した場合、体系内の中性子数も時間とともに変動することとなる。簡単のために、体系内を飛び交う中性子の相対的な空間分布・エネルギースペクトルが時間とともに変化しないと近似すれば、体系内の中性子数 $n(t)$ の時間変化は、「一点炉動特性方程式」と呼ばれる以下の連立微分方程式により記述することができる。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = -\lambda_i C_i(t) + \frac{a_i \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} n(t) \quad (2)$$

β_{eff} : 実効遅発中性子割合 [-], Λ : 中性子生成時間 [s]

$C_i(t)$: 第 i 群の遅発中性子先行核数 ($1 \leq i \leq 6$),

λ_i : 第 i 群の遅発中性子先行核の崩壊定数 [1/s],

a_i : 第 i 群の遅発中性子先行核の相対収率 [-].

(1),(2)式の肝は、核分裂反応が起こる中性子増倍率の時間変化を考える場合、核分裂とほぼ同時に放出される即発中性子と、核分裂から遅れて放出される遅発中性子(「遅発中性子先行核」と呼ばれる核分裂で生じた特定の放射性核分裂生成物が、 β 崩壊した際に放出される中性子)を分けて取り扱う点にある。(1),(2)式に基づくことで、入力値として①反応度 $\rho(t)$ の時間変化、②一点炉動特性パラメータ ($\beta_{\text{eff}}, \Lambda, \lambda_i, a_i$)、③中性子源強度 S を与えれば、中性子数 $n(t)$ の時間変化を予測することができる。

この発想を逆転させて、未臨界体系における中性子計数率 $P(t) = \epsilon n(t)$ を入力として、未臨界度の時間変化を逆に推測することができないだろうか? 例えば、(1),(2)式を変形することで、反応度 $\rho(t)$ は中性子計数率 $P(t)$ を用いて以下のように表すことができる。

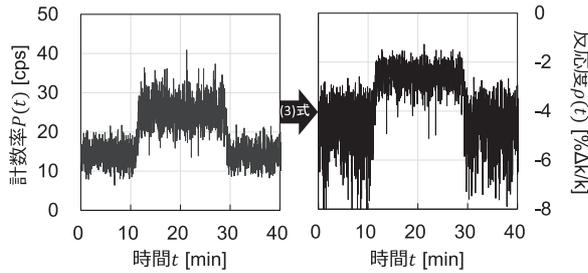


図3 逆動特性法の適用例

$$\rho(t) = \beta_{\text{eff}} + \Lambda \frac{d}{dt} (\log P(t)) - \frac{\beta_{\text{eff}}}{P(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i a_i \int_{-\infty}^t P(t') e^{-\lambda_i(t-t')} dt' - \frac{\Lambda \epsilon S}{P(t)} \quad (3)$$

(3)式に基づくことで、 $P(t)$ の計測値(図3左)に対して時間微分や時間積分を計算することで反応度 $\rho(t)$ (図3右)を推定できる。このような逆問題により未臨界度を逆算する手法を「逆動特性法」と呼び、本手法を測定原理とした「反応度計」³⁾は臨界状態近傍の原子炉における反応度監視に利用されている。

未臨界体系に対して逆動特性法を適用する際の注意点を以下で述べる。まず、一点炉動特性パラメータ β_{eff} と Λ の値は測定体系(核分裂性核種の種類や中性子エネルギースペクトル等)に依存して変化する量であるため、あらかじめ体系情報に基づいた数値解析により β_{eff} 、 Λ を評価せねばならない。併せて、実効的な中性子源強度 ϵS の情報も必要となる。また、(3)式において β_{eff} 、 Λ 、 ϵS は時間に依らず一定と近似しているため、これらが時間とともに変化したり、パラメータの不確かさが大きかったりする場合には、 $\rho(t)$ の逆推定結果に誤差が生じる。さらに、体系の未臨界度が深い場合には、空間依存性の影響が大きくなる問題に加えて、中性子計数率が低くなることで逆推定した $\rho(t)$ の統計的ばらつきも大きくなる(図3)。

2. パルス中性子法

中性子源として、パルス中性子源(加速器駆動により一定周期 τ でパルス状に中性子を発生させる中性子源)が利用できる場合には、中性子計数率の時間変化を分析することで、未臨界度に関する情報を得ることができる^{4,5)}。

一点炉動特性方程式(1)式において遅発中性子先行核数 $C_i(t)$ を無視した式から理解できるように、未臨界体系にパルス中性子源を打ち込んだ後は、核分裂連鎖反応が時間ともに終息する。従って、図4で示したように、即発中性子の数は時間に対して時定数 $\alpha \approx (\beta_{\text{eff}} - \rho) / \Lambda$ で指数関数的に $\exp(-\alpha t)$ で減少することになる。体系が臨界に近づけば、連鎖反応もより長く持続するため、即発中性子の時間的減少も緩やかに(α が小さく)なる。この時定数を即発中性子減衰定数 α と呼び、 α から未臨界

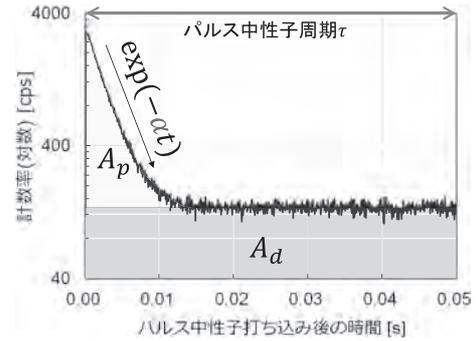


図4 パルス中性子法概念図

度 $-\rho$ を換算する手法を Simons-King 法と呼ぶ⁵⁾。ただし、未臨界度へ換算するためには、あらかじめ①数値解析により一点炉動特性パラメータ (Λ 、 β_{eff}) を評価しておくか、②中性子増倍率が既知の体系で α を測定し臨界状態における $\alpha_{\text{crit}} = \beta_{\text{eff}} / \Lambda$ を求めておく必要がある。また、パルス中性子を周期的に打ち込み続け、体系内の遅発中性子先行核が定常状態となれば「面積比法」と呼ばれる手法も利用できる⁴⁾。本手法では、パルス中性子1周期の間に検出された中性子計数(計数率の時間積分値)について、①即発中性子に起因する成分(図4の面積 A_p)と②遅発中性子に起因する成分(図4の面積 A_d)の2つに分離する。ここで、2つの面積比 A_p / A_d と未臨界度の間には以下の関係がある。

$$\frac{A_p}{A_d} \approx \frac{-\rho}{\beta_{\text{eff}}} \quad (4)$$

従って、面積比法の場合には、中性子計数の面積比 A_p / A_d を測定することで、反応度を β_{eff} で割った「ドル単位の未臨界度」の絶対値を測定できるという大きな利点がある。ただし、測定体系の未臨界度が深くなるにつれて、空間依存性の影響が大きくなる点に注意が必要がある。

3. ソースジャーク法

①未臨界体系に装荷した中性子源を瞬時に引き抜く、あるいは②加速器駆動中性子源のビームを停止するといった手段で、中性子源強度 S を瞬間的にゼロにできる場合には「ソースジャーク法」と呼ばれる手法によりドル単位の未臨界度測定が可能である⁶⁾。

まず、中性子源を引き抜く前の定常状態における中性子計数率 P_0 を測定する。その後、時間 t_{out} において中性子源を瞬時に引き抜いたとする。この場合、中性子源に起因した即発中性子成分は無くなるものの、未臨界体系内には遅発中性子先行核が蓄積された状態となっている。従って、図5で示すように、引抜直後の中性子計数率はゼロではなく、遅発中性子起因の計数率 P_d まで瞬時に減少することになる(この現象を即発跳躍と呼ぶ)。その後は、遅発中性子先行核が崩壊して無くなるまで、体系内の中性子は指数関数的にゆっくりと減少する。こ

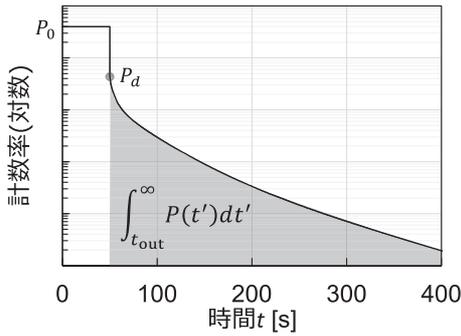


図5 ソースジャーク法の概念図

ここで、一点炉動特性方程式(1),(2)式に基づくことで、①中性子源を引き抜く前の計数率 P_0 および②中性子源引抜直後の時間 t_{out} から中性子計数率がゼロとみなせる時間(およそ数百秒)までの積算計数 $\int_{t_{out}}^{\infty} P(t') dt'$ を用いた「積分法」により、ドル単位の未臨界度を測定することができる。

$$\frac{-\rho}{\beta_{eff}} \approx \frac{P_0}{\int_{t_{out}}^{\infty} P(t') dt'} \sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{\lambda_i} \quad (5)$$

面積比法の場合と同様に、ソースジャーク法(積分法)もドル単位未臨界度の絶対値が測定可能な手法である。ただし、遅発中性子先行核の減衰を待つ必要があるため実時間監視手法として適用できない点が欠点となる。

IV. 炉雑音解析手法

1. Feynman- α 法

核分裂反応が起こる未臨界定常体系において中性子計数を繰り返し測定し続けたとしよう。得られた計数値は統計的にばらつくが、核分裂連鎖反応の存在する時間領域では中性子数が密に存在するため、中性子増倍率 k が1に近づくにつれて時間的粗密の差異がより大きくなる。このように、核分裂連鎖反応に起因して生じる特徴的な「中性子数の時間的揺らぎ」を「原子炉雑音」と呼ぶ。「ある事象と別の事象の間に相関がなく独立」で、「単位時間あたりの発生確率が時間的に一定」とみなせる状況(例:ある時間幅内で放射性核種が崩壊する総数)では、その測定量は統計学的にポアソン分布に従うことが良く知られている。この場合、測定量の平均と分散は等しく、分散/平均の比は1となる。一方、原子炉雑音が従う性質をよく調べてみると、ポアソン分布とは異なる統計学的性質が潜んでいる。この理由は、原子炉雑音の場合には、ある事象(ある中性子の検出)と別の事象(別の中性子検出)の間に核分裂連鎖反応に起因した中性子相関があるため、事象間が独立ではなくなるためである。原子炉雑音のマクロな性質として、例えば、ある時間幅 T 内に起こった中性子検出数 $C(T)$ の平均 $\langle C(T) \rangle$ と分散 $\sigma^2(T)$ を調べてみると、平均よりも分散のほうが大きく

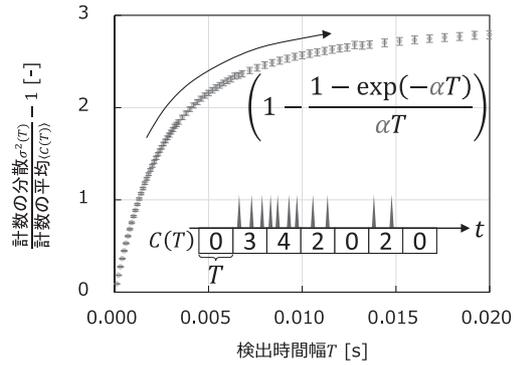


図6 Feynman- α 法の概念図

なる。この性質に注目し、「中性子相関量 Y 値」として分散/平均の比から1を引いた量 $Y(T) \equiv \sigma^2(T) / \langle C(T) \rangle - 1$ を定義し、図6で示したように、検出時間 T に対する $Y(T)$ の変化を分析することで、即発中性子減衰定数 α を測定できる。この手法を「Feynman- α 法」あるいは「分散対平均法」と呼ぶ⁷⁾。

Feynman- α 法の利点として、パルス中性子源のような特殊な装置を必要とせず、未臨界定常状態において α を測定可能な点にある。例えば、運転停止中の原子炉を考えたとしても、ウラン(U)燃料内には①²³⁸Uの自発核分裂、②U同位体の α 崩壊と軽元素が起こす(α, n)反応といった中性子源が内在しているため、微弱な中性子計数を測定し続けることで α が測定可能である。ただし、 $Y(T)$ の変化を分析して α を求めるため、 α の大きさに応じた形で検出時間幅 T を注意深く選ぶ必要がある。

欠点としては、 α の値からは未臨界度の大小を相対的にしか測れないため、 $-\rho$ の絶対値に換算するためには、一点炉動特性パラメータ (Λ, β_{eff}) の数値解析あるいは臨界状態における α_{crit} が別途必要となる点が挙げられる。

2. Rossi- α 法

Feynman- α 法は、ある時間幅 T 内で検出された中性子計数の平均・分散といったマクロな性質に注目した手法である。一方、原子炉雑音の時間的変動をマイクロに分析してみると、単位時間あたりの中性子検出確率が時間的に一定ではない。ある中性子検出があった直後では、その近辺で一連の核分裂連鎖反応に起因する中性子家系が存在している可能性が高いため、続いて中性子検出される確率が高くなる。すなわち、中性子検出器を「釣り竿」として考えれば、ある魚(中性子)を釣った直後では、その魚群(中性子連鎖反応の家系)に属する別の魚を続けて釣り上げやすい状況となっている。中性子が検出された時刻情報を収集可能な装置を利用できれば、ある中性子検出と別の中性子検出の時間間隔 τ を調べて、時間間隔 τ に対する頻度分布を求めることができる。こうして測定された頻度分布は、図7で示したように、時間間隔

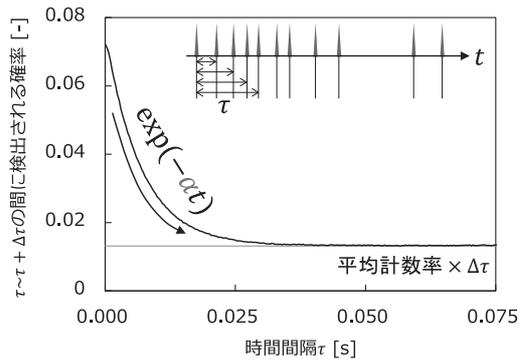


図7 Rossi- α 法の概念図

τ に対して指数関数的に減少することから、この時定数より即発中性子減衰定数 α を測定することができる。本手法は Rossi- α 法と呼ばれており⁸⁾、利点・欠点としては Feynman- α 法と同様である。

V. まとめ・今後の課題

本記事で説明した各測定手法のまとめとして、以下の3つの観点で特徴を整理した結果を表1に示す。

イ 実時間監視のしやすさ：

◎非常に容易 ○容易 △やや難しい ×困難

ロ 測定装置の簡便さ：

○簡便 △やや特殊 ×特殊な装置が必要

ハ k_{eff} 絶対値測定の可否(基準体系の要否)：

○不要 ×必要

これまでに提案され、活用されてきた測定手法にはそれぞれ利点・欠点があるため、測定対象とする体系・状況に応じて、適切な測定手法を選定したり、組み合わせ使用したりすることが重要となる。例えば、近畿大学原子炉(UTR-KINKI)のように中性子源の瞬時引抜が可能な体系であれば、最初にソースジャーク法で未臨界度

表1 各測定手法の特徴

分類	手法名	イ	ロ	ハ	特記事項
静的 手法	中性子源増倍法	◎	○	×	k_{eff} が既知の基準体系が必要
	指数実験法	△	△	×	複数地点での測定が必要
動的 手法	逆動特性法	◎	○	×	β_{eff} , Λ , ϵS の評価, 計数率の時間変化測定が必要
	Simmons-King 法 面積比法	○	×	×	加速器中性子源が必要
	ソースジャーク法 (積分法)	×	△	○	中性子源の瞬時引抜が必要
炉雑音 解析	Feynman-法, Rossi-法など	○	○	×	α から k_{eff} への換算 (β_{eff} , Λ) が必要

の絶対値を測定し ϵS の値を校正した後に、中性子源増倍法または逆動特性法を適用することで、未臨界度の実時間監視が実施できる。

最後に問いかけとなるが、本稿で紹介した既存の未臨界度測定手法をそのまま活用して、①東京電力福島第一原子力発電所(1F)の燃料デブリ取出作業時、あるいは②将来の核変換処理システムとして研究されている加速器駆動システム(ADS)の運転時、等における未臨界度監視が容易に実現できるだろうか？筆者らが考えるに、既存の測定手法には以下に挙げるような、重要な課題が残されている。

- そもそも、未臨界度の絶対値を測定可能な実用的手法は限定され、体系の動的変化(特殊な装置)を必要とする。
- 未臨界が深くなるにつれて、空間依存性の影響が大きくなり、未臨界度の測定結果が検出器位置によって大きく変化する。
- 測定体系の不確かさが大きい、あるいは情報が不明な場合、事前の数値解析結果には不確かさが生じざるを得ず、数値解析結果を活用した未臨界度推定結果の誤差要因となる。

例えば、課題 A) に関する近年の研究例として、さらに高次の統計量(分布の「歪度」)を活用した炉雑音解析による未臨界度の絶対値測定手法が挙げられる⁹⁾。また、1F 燃料デブリに関連した測定手法として、放射性希ガス(^{88}Kr , ^{135}Xe)の放射能比を利用した測定手法が近年考案されているが、燃料(^{235}U 核分裂)と中性子源(^{244}Cm 自発核分裂)における「核データ(核分裂収率)の違い」といった、新たな観点に基づいた手法である¹⁰⁾。課題 B) については、未臨界体系で測定される中性子増倍率の定義そのものを見直し、中性子源増倍法や面積比法における空間依存性の影響を軽減した検出器配置を探索する試みもある¹¹⁾。課題 C) については、ベイズ推定に基づいたデータ同化により、測定結果を取り入れることで、不確かさが大きな事前情報を、より不確かさが少ない事後情報へと更新していくアプローチも取り込まれつつある^{10, 12)}。

上述した課題を解決していくためには、本稿で説明した各測定手法の「いろは」をよく学んだ上で、「守破離」が必要となる。燃料デブリ取出や ADS などの未臨界度監視技術に関する近年の取り組みについては、これ以降の連載記事において、より具体的に紹介する予定である。

— 参考資料 —

- 1) 向山武彦, 中野正文, 溝尾宣辰, 他, 高速炉体系における大きな負の反応度の測定(II): 中性子源増倍法, JAERI-M 6067, JAEA, (1975).

- 2) T. Suzuki, "Subcriticality determination of low-enriched UO_2 lattices in water by exponential experiment," J. Nucl. Sci. Technol., 28(12), pp. 1067-1077 (1991).
- 3) E. Suzuki, T. Tsunoda, "A reactivity meter and its application," J. Nucl. Sci. Technol., 1(6), pp. 210-218 (1964).
- 4) N. G. Sjöstrand, "Measurements on a subcritical reactor using a pulsed neutron source," Arkiv för Fysik, 11, pp. 233-246 (1956).
- 5) B.E. Simmons, J.S. King, "A pulsed neutron technique for reactivity determination," Nucl. Sci. Eng., 3(5), pp. 595-608 (1958).
- 6) W.S. Hogan, "Negative-reactivity measurements," Nucl. Sci. Eng., 8(6), pp. 518-522 (1960).
- 7) R.P. Feynman, F. de Hoffmann, R. Serber, "Dispersion of the neutron emission in U-235 fission," J. Nucl. Energy, 3(1-2), pp. 64-69 (1956).
- 8) J. D. Orndoff, "Prompt neutron periods of metal critical assemblies," Nucl. Sci. Eng., 2(4), pp. 450-460 (1957).
- 9) T. Endo, A. Yamamoto, M. Yamanaka, C. H. Pyeon, "Experimental validation of unique combination numbers for third- and fourth-order neutron correlation factors of zero-power reactor noise," J. Nucl. Sci. Technol., 56(4), pp. 322-336 (2019).
- 10) Y. Morimoto, M. Akaike, S. Takeo, H. Maruyama, "Proposal of a statistical evaluation method for the criticality of the Fukushima Daiichi nuclear power plants," Nucl. Technol.,

[in press] (2019).

DOI: 10.1080/00295450.2019.1580529

- 11) T. Endo, A. Yamamoto, Y. Yamane, "Detected-neutron multiplication factor measured by neutron source multiplication method," Ann. Nucl. Energy, 38 (11), pp. 2417-2427 (2011).
- 12) 池田卓弥, 遠藤知弘, 山本章夫, 山中正朗, 佐野忠史, 下哲浩, "粒子フィルタ法を用いた未臨界度, 中性子生成時間, 外部中性子源強度の同時推定," 日本原子力学会 2019 年春の年会, 2J05, 茨城大学水戸キャンパス, 2019 年 3 月 20 日 ~ 3 月 22 日.

著者紹介



遠藤知弘 (えんどう・ともひろ)

名古屋大学 工学研究科

(専門分野/関心分野) 原子炉物理学, 臨界安全/未臨界度測定, 不確かさ定量評価, データ同化



左近敦士 (さこん・あつし)

近畿大学 原子力研究所

(専門分野/関心分野) 原子炉物理学, 原子炉物理実験/炉雑音解析, 反応度測定, 加速器駆動未臨界炉



書籍販売のご案内

■『東日本大震災における原子力分野の事例に学ぶ技術者倫理』

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

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

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

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

○ご購入は日本原子力学会ホームページ 書籍販売のページよりお申し込みください○

<http://www.aesj.net/publish/shopping>



米国原子力発電所の最近のパフォーマンス —既存炉を最大限に有効活用—

日本原子力産業協会 大野 薫

世界最大の原子力発電国である米国は、1957年の原子力発電開始以来、発電炉の基数が増加し、1990年には111基とピークに達した。その後、運転中の基数は減少しているものの、原子力発電設備容量はあまり変わらず、原子力発電量は過去10年間、8,000億kWh前後を維持している。こうしたなか、2018年の原子力発電量は8,071億kWh、設備利用率も92.6%と共に過去最高を記録した。本報告では、近年の好調な運転実績向上に貢献している主な取組である設備利用率の向上と出力向上、運転認可更新(運転期間延長)の3点について紹介する。

KEYWORDS: Capacity Factor, Nuclear Power Generation, Emissions-Free Electricity, (Subsequent) License Renewal, Power Uprate, Outage Time

I. 米国の原子力発電開発の経緯

米国では2019年7月現在、97基・約1億kWの原子力発電所が運転中である。米国では近年、原子力発電の新規建設(発電)開始はほとんどなく、原子力開発は停滞状態にある。IAEA/PRIS(発電炉情報サービス)のデータに基づき、これまでの米国の原子力発電所の発電開始と閉鎖の推移を概観する(図1)。

米国では1957年、WH社製炉の SHIPPINGPORT、GE社製炉の GE バレシトスの運転開始以降、PWRとBWRを中心に建設してきた。開発初期は年間1~2基(多い時には4~5基)が発電開始し、1970年代に入ると石油ショックや電力需要の増大等の影響により急拡大し、多い時には年間12基が運転開始した。

しかし、反対運動の高まりやブラウズフェリー1号機の火災事故(1975年)、そしてTMI2号機の事故(1978年3月)等の影響により、原子力開発は減速し、1978年の8基を最後におよそ35年間、新規着工がゼロの状況が続いた。と言っても、1980年代は、事故以前に着工していた多くの原子力発電所が発電開始し、1990年まで毎年複数基が継続して発電開始、1990年には111基と最大基数となった。ピークに達した1990年以降、発電開始した原子炉は、1993年と1996年に各1基、2000年代に入ってから2016年に1基のみという閑散とした状況が続いている。なおIAEA/PRISのデータでは、最大基数を迎える1990年は111基となっているが、米エネルギー省エネルギー情報局(DOE/EIA)のデータでは112

基となっている。

一方、1990年以降、電力市場自由化・規制緩和に伴う競争激化や安価な天然ガス火力の台頭、補助金を受けた再生可能エネルギーの拡大により、原子力発電所の採算性が悪化、原子炉の閉鎖(退役)数が増加し、米国の運転中原子炉の基数は減少の一途を辿る。具体的には、1990年代に9基、2000~2019年7月までに8基、計17基が退役している。この結果、米国の運転中原子炉の基数はピーク時の1990年に比べて、差し引き(正味)14基減少し、現在の97基となった。

なお新規発電開始ではないが、長期停止していたブラウズフェリー原子力発電所について、2号機が1991年、3号機が1995年、1号機が2007年にそれぞれ運転再開を果たしている。

新規着工については、1985年に建設中断したワッツバー2号機(PWR, 120.0万kW)が2007年に建設再開したことを除くと、1978年以降新規着工はゼロが続き、ようやく2013年に4基が新規着工した。これは実に、35年ぶりの着工となる。しかし、これら4基(ボーグル3,4号機とサマー2,3号機、いずれもAP1000)のうち、サマー2,3号機については2013年のWH社破綻の影響を受け、スカナ電力が2017年7月、両機の建設を断念したため、現在建設中は、ボーグル3,4号機の2基のみである。

II. 2018年の米国の原子力発電量が過去最高 —8,071億kWhを記録

このように米国の原子力発電を取り巻く状況が厳しいなか、米国の原子力発電所の運転実績(パフォーマンス)は、優れた成果を挙げている。DOE/EIAが2019年3

Current Performance of the U.S. Nuclear Fleets ; Excellent Use of the Existing Reactors : Kaoru Ohno.

(2019年10月7日 受理)

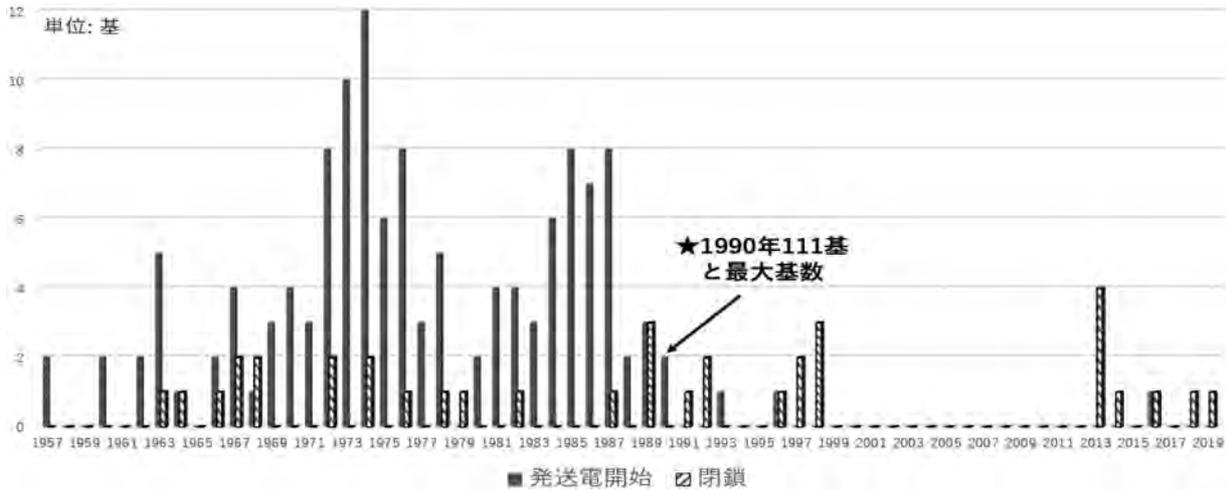


図1 米国の原子力発電所送開始/閉鎖の年別推移
出典：IAEA/PRIS のデータをもとに作成

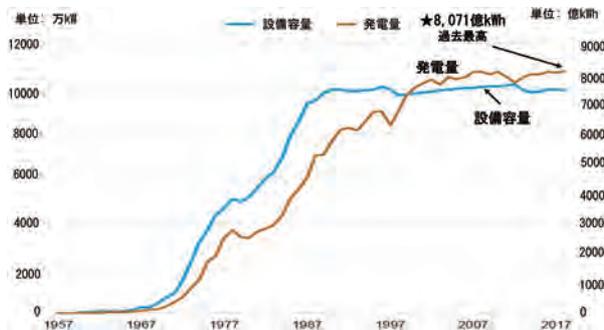


図2 米国の原子力発電設備容量と原子力発電量の推移
出典：DOE/EIA ウェブサイト資料の一部追記

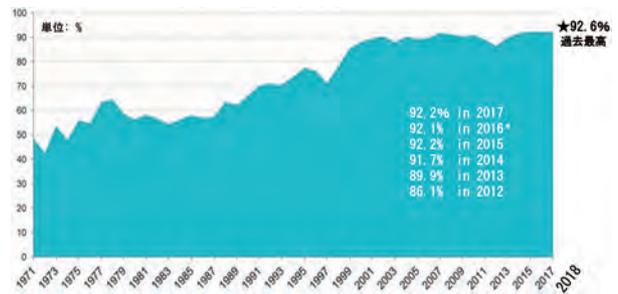


図3 米国の原子力発電所の平均設備利用率の推移
出典：NEI ウェブサイト資料の一部追記

月に発表した2018年の米国の原子力発電量は、2010年のピーク時(8,070億kWh)を若干上回る8,071億kWhとなり、設備利用率も92.6%と過去最高を記録した(図2)。米国原子力エネルギー協会(NEI)によると、米国の原子力発電は全電力の19.3%を供給し、カーボンフリー電力のシェアは55.2%と他電源のなかでも最大の割合を占めている。これは、CO₂排出量に換算すると、5億2,800万tのCO₂排出回避に相当する。

このように、2018年は、米国にとって記念すべき原子力発電の記録樹立の年となったが、これらは原子力産業界を中心とした関係者の統一した努力の賜物であり、既存資産の有効活用成果と言える。米国の運転実績向上に向けた具体的な主な取組として挙げられるのは、設備利用率の向上と出力の向上、運転認可更新(運転期間延長)の3点である。

Ⅲ. 既存炉活用の動き

1. 設備利用率の向上

米国では、1970年代および1980年代にトラブルを始めとする様々な要因により、原子力発電所の平均設備利用率が50%台と低迷していたが、プラントの改造や定期検査・燃料交換作業の効率化により、運転実績の改善を

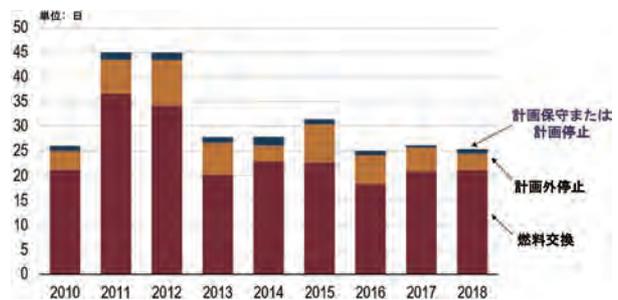


図4 米国の原子力発電所の平均停止期間
出典：DOE/EIA ウェブサイト資料の一部追記

果たしている。2000年代に入ると、平均設備利用率は90%前後と高い水準で推移しており、良好な設備利用率を誇っている(図3)。

また過去3年間における米国の原子力発電所の平均停止期間の平均を見ると、25日程度であり、単純計算すると時間稼働率はおおよそ93%と高い稼働率となっている(図4)。

米国の原子力発電所は通常、18~24ヶ月のサイクルで運転しており、多くの場合、電力需要の低い春と秋に燃料交換を実施し、原子炉の運転期間中に施設の更新や修理、その他のメンテナンス作業を完了させ、停止期間を最適化している。なお米国では一般的に、リスク評価を実施後、停止期間の短縮等を目的に、運転中保守の実施

が認められている。DOE/EIAによれば、2017年の実績ではあるが、次の6基の燃料交換停止時間が20日未満であった。ピーチボトム3号機(15日)、ボーグル1号機(16日)、ナインマイルポイント(17日)、クアド・シティーズ(18日)、ドレスデン(18日)、TMI1号機(19日)。1970年代および1980年代には、燃料交換に伴う運転停止期間が平均して3ヵ月以上にも及んだことを考えると、隔世の感がある。

過去を振り返ると、1960年代から70年代前半にかけて、米国の原子力発電所は、4~5年の工期で、1基あたり5億ドルの建設費で完成した。しかし70年代後半から80年代前半になると、工期は10~12年、建設費は50億ドルにまで跳ね上がった。その主な要因として挙げられるのは、①早急な原子力発電開発(わずか数年のうちに、20万kW級原子炉を100万kW級に拡大)、②原子炉技術の高度化やブラウンズフェリー1号機の火災事故およびTMI2号機の事故に伴う規制要件の増加、である。特に、TMI事故の影響は大きく、建設中のプラントは新たに追加された規制要件を満たすことが要求されたため、再設計や追加工事を余儀なくされ、建設スケジュールは遅滞し、建設費の高騰を招いた。また事業者自身の原子力発電プロジェクトに対するマネジメント不足や電力需要自体の鈍化、さらに反対運動の影響も加わり、建設プロジェクトは全般的に低迷。金利は2桁に上昇した(1980年代前半には20%に達した)。IAEA/PRISによると、1977年~1990年にかけて建設途中で中止・取消となった原子力発電所は、30基以上に上る。

しかし、事業者は過去の経験(多くは日本からの教訓と良好事例)から学び、また業界を挙げての取組、具体的にはINPO(1979年)やNEI(1994年)の設立等を通じて、技術や運転管理、情報共有・管理、社会とのコミュニケーション、規制や政治等々、原子力を巡る様々な問題に関して専門情報や知識を結集し、業界全体で一元的な取組を行うことによって、現在、運転実績は好調を極め、規制当局による許認可手続きも大幅に合理化されるに至っている。とりわけ、NEIを介して諸問題に対して組織化した取組を行ったことが、情報の積極的な共有や誤りに対して公正に対応することと相まって、原子力産業の優秀な運転実績をもたらした要因の一つであると言われている。

2. 出力向上

米国では2019年7月現在、164件の出力向上(熱出力増強合計:2,376万4,000kWt)が認可されており、これによる電気出力の合計増加分は、792万1,300kWeと100万kW級の原子力発電所で約8基相当になる。出力向上は、1977年からストレッチ型(計装設定値の変更)による2件の出力向上が実施され、1990年以降で約700万kW分の出力向上が行われた(図5)。

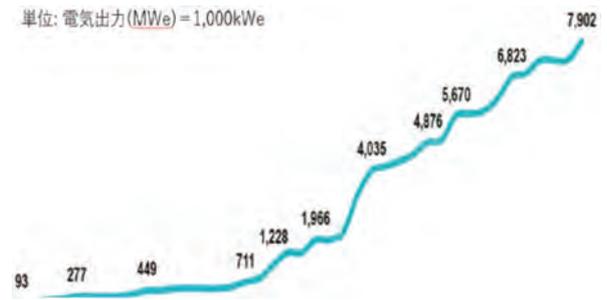


図5 米国の原子力発電所における出向上の推移(累積)
出典: NEI ウェブサイト資料

表1 出力向上の種類とこれまでの実施件数

出力向上の種類	これまでの実施件数
測定精度改善型MU	66件
ストレッチ型S	64件
設備拡張型E	34件

出典: NEIの資料をもとに作成

1990年以降は新規発電開始が殆どなく、米国の原子力発電所の基数が減少(10基以上)した時期にあたることから、発電設備容量の減少分を出力向上が補填したとも言える。この出力向上と過去最高を記録した設備利用率により、2018年の原子力発電量が過去最大となった。

しかし、一方、今後の出力増強の申請見通しは、2020年までにわずか6万kWと縮小している。昨今の卸売電力価格の低迷や電力需要の伸びの鈍化により、プラント所有者は、既存炉の出力増強に対する投資を鈍らせている。

米国の出力向上には次の3種類があり、そのうち、測定精度改善型MUと呼ばれるタイプが最も多く実施されている(表1)。また同一炉で複数タイプの出力向上が実施されている。①測定精度改善型MU(Measurement Uncertainty Recapture): 測定誤差の修正による出力向上(熱出力の増加率~2%増加)、②ストレッチ型S(Stretch): 計装設定値の変更による出力向上(同: ~7%増加)、③設備拡張型E(Extended): 高圧タービン、復水ポンプ、モーター、発電機、変圧器等のバランス・オブ・プラント(BOP)の大規模改修による出力向上(同: ~20%増加)。

3. 運転認可更新(運転期間延長)

また米国では原子力発電所の運転期間延長(20年)が一般的に行われている。2019年7月現在、94基(合計出力: 9,517.1万kW)の原子力発電所で運転認可が更新されており、3基(同356.8万kW)で運転期間延長の申請が予定されている(図6)。さらに、米国では2度目の運転期間延長も可能となっており、このうち6基(同563.4万kW)が80年運転をめざしている(表2)。一方、20年の運転期間延長を申請し、認可されたものの、経済性等を理由に閉鎖に追い込まれている原子炉もある(図6)。

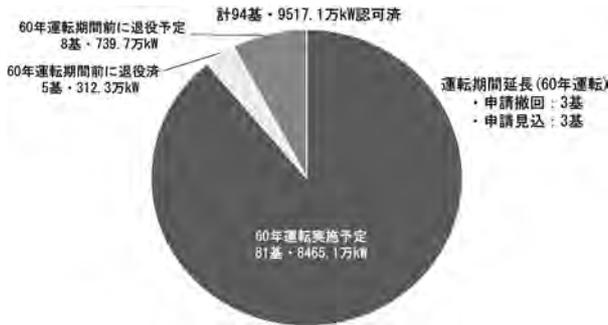


図6 運転期間延長(60年運転)をした米国の原子力発電所
出典: NRC ウェブサイト, JAIF「世界の原子力発電開発の動向 2019」をもとに作成

表2 2度目の運転期間延長(80年)を申請中/申請予定の原子力発電所

発電所名	炉型	グロス出力(万kW)	所有者	運転開始年	申請年月
ターキーポイント3	PWR	76.0	FPL	1972	2018年1月
ターキーポイント4	PWR	76.0	FPL	1973	2018年1月
ビーチボトム2	BWR	118.2	エクセロン/PSEG	1974	2018年7月
ビーチボトム3	BWR	118.2	エクセロン/PSEG	1974	2018年7月
サリー1	PWR	87.5	ドミニオン	1972	2018年10月
サリー2	PWR	87.5	ドミニオン	1973	2018年10月
ノースアナ1	PWR	99.8	ドミニオン	1978	2020年10~12月(予定)
ノースアナ2	PWR	99.4	ドミニオン	1980	2020年10~12月(予定)

出典: NRC ウェブサイト, JAIF「世界の原子力発電開発の動向 2019」をもとに作成

米国の原子力発電所の最初の運転認可は40年と設定されているが、これは技術的な制約に基づくものではなく、主に経済性を考慮して設定されたものである。運転期間延長の申請は、あくまで自発的なものであり、プラント所有者が規制当局の原子力規制委員会(NRC)の要件や費用対効果等を勘案し、判断する。またNRCのウェブサイトによれば、運転認可の更新を適時に行うことは、それらが適切と判断された場合、21世紀前半における米国のエネルギー供給を確保するためには、重要であるとしている。実際、現時点で約半数の原子炉が40年超運転を実施中であり、そのうち3基が間もなく50年の運転期間を迎えようとしている(図7)。

米国では今後、2040年までに約半数の原子力発電所の運転年数が60年を迎えるが、NEIが2016年5月に14

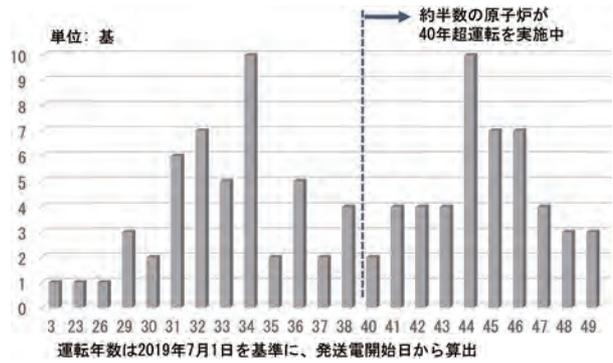


図7 米国の運転中原子力発電所(97基)の運転年数
出典: IAEA/PRIS のデータをもとに作成

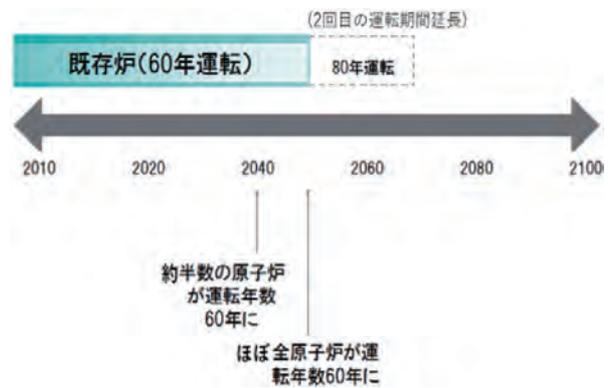


図8 米国の既存原子力発電所の運転状況
出典: NEI「Nuclear by the Numbers」(2018年4月)の一部追記

の電力会社を対象に2度目の運転期間延長の申請に行った調査によれば、2047年までに21のプラント/サイトが申請見込みで、その多くは2030年までに申請が行われる見通しである(図8)。

著者紹介



大野 薫 (おおの・かおる)
日本原子力産業協会 情報・コミュニケーション部
(専門分野/関心分野) 海外の原子力動向

「原子力をめぐる動向や今後」を記事化 学会誌アンケート結果のまとめ

原子力学会誌では2016年秋より第2期のアンケートを実施しており、いただいた回答については、順次結果を紹介しています。今号では2018年7月～2019年6月号に対して寄せられた回答の概要と、これまで編集委員会に寄せられた意見や要望の概要および編集委員会による対応について紹介します。

I. アンケート結果

1. 回答者数とその構成

2018年7月～2019年6月号のアンケート回答者数は、延べ623名(各号平均52名)でした。回答者の年齢・所属組織の構成を図1, 2に示します。

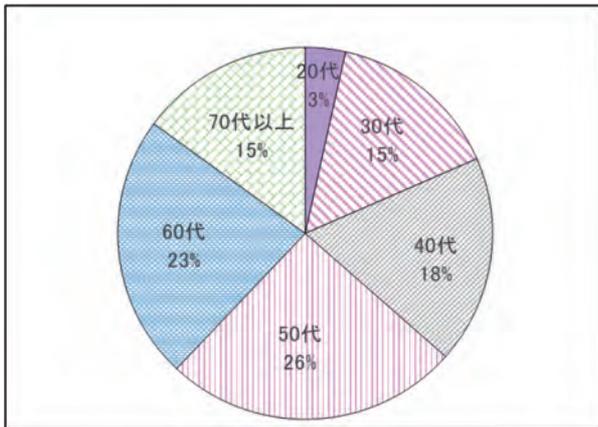


図1 回答者数の年齢構成(2018年7月～2019年6月号)

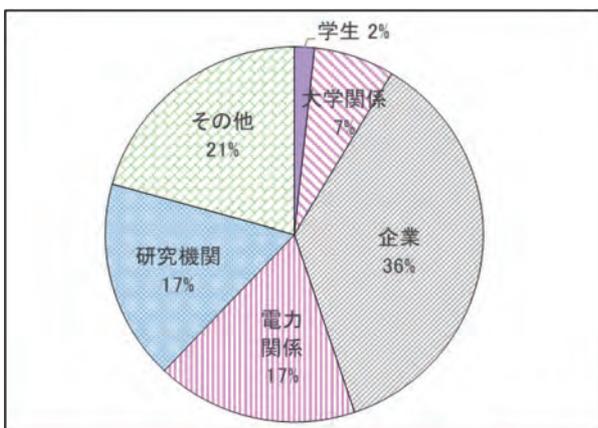


図2 回答者数の所属組織(2018年7月～2019年6月号)

2. 各号で好評だった記事

各号で好評だった記事(上位5件)の記事種別を総合的にみると、表1のようになりました。特集が圧倒的に多く、次いで、時論、巻頭言が好評だったことがわかります。各号で最も好評だった記事についても、表2に示す

表1 好評だった記事の記事種別

記事種別	件数
特集	23
時論	12
巻頭言	8
解説	7
談話室	4

ように、特集、時論、巻頭言がほとんどを占めています。これらの記事以外では、座談会が好評でした。

II. 学会誌に対するご意見

学会誌アンケートでは、①学会誌の記事企画や記事の内容についての意見、②今後、学会誌に掲載を希望する記事、③編集委員会への要望や意見の3種類の自由記入欄を設け、学会員のご意見を伺っています。

今号では、2018年7月～2019年6月号で頂いた意見や要望の主なものと、それに対する編集委としての対応状況や対応方針について紹介します。

【学会誌の記事企画や内容について】

- ・最近の時論がとても興味深いものばかりで勉強になる。今後も面白い話を期待している。
- ・専門分野を深くというより、今後関心が高まりそうな方向のポータルの記事も面白いのでは。
- ・もっとアカデミックな内容を増やして欲しい。
- ・最近では学際的な内容や専門でなくても興味を惹かれる内容が多く面白いと感じる。一方、学会誌的な専門性の高い記事は減っているのではと思うので、バランスの良い記事作りをしていただければ良いと思う。
- ・同じ事象やテーマに対し、多様な切り口からの論考をシリーズ化された記事を望む。
- ・原子力技術に肯定的な意見、技術的に批判的な意見、どちらもフラットな眼で判断して掲載して欲しい。
- ・原子力に対するパブリック・インボルブメントの学会での推進を希望する。
- ・社会との原子力に関する合意形成の方法について企画してほしい。
- ・明らかに震災を境に意識が変わって、それが紙面に反

表2 各号で好評だった記事

年号	記事種別	タイトル
2018年7月号	巻頭言	今、本当に求められているもの—科学的知識の必要性
2018年8月号	特集	甲状腺がん発症のメカニズム 1. 多段階発がん説
2018年9月号	巻頭言	風評被害とトリチウム
2018年10月号	巻頭言	原子力とマスコミの現場
2018年11月号	時論	田中角栄が挑んだ資源立国
	特集	福島第一発電所事故後の福島県における小児・青年期の甲状腺がん疫学調査研究について 1. 過去の甲状腺がん疫学研究情報
2018年12月号	談話室	福島第一原発を視察して
2019年1月号	座談会	国家的なリーダーシップの不在が根底に—「もんじゅ」の失敗を総括する
2019年2月号	時論	我が国の電力・エネルギー政策に求められる「現実感覚」
2019年3月号	特集	原子力の危機は、「民主主義のコスト」
2019年4月号	特集	原子力の安全性向上のための技術開発
2019年5月号	時論	日本の原子力と日本原子力学会の60年を振り返る
2019年6月号	巻頭言	中間貯蔵事業と立地地域

映されている。好意的にとらえている。

- ・原子力の信頼回復のために、学会は何をすべきなのか、を発信し、その活動状況をもっともっと掲載してほしい。
- ・原子力規制庁も学会誌を通じて、原子力規制に対する思いを発信してほしい。
- ・新検査制度の動向は、原子力発電所だけでなく、全原子力産業に影響するので、継続して取り上げてほしい。
- ・甲状腺がん発症のメカニズムを読んだが、医学用語が多くてよくわからなかった。医学用語の説明をサイエンスコミュニケーター等に依頼してみてもどうか。
- ・原子力施設立地地点の市町村長さんの思いを連載してほしい。
- ・Columnは、学会誌なのだから、毎回同じ人ではなく、いろいろな人の記事を載せるべき。
- ・Columnは毎回楽しみにしている。情趣的、詩的、牧歌的であり、何より人間らしさで溢れている。
- ・原子力業界が女性への理解を促したいという事情は理解するが、女性による記事を選択的に掲載することは、機会均等の観点から問題があると思う。
- ・原子力に関する誤解や思い込みをただす記事を掲載してほしい。
- ・高速炉の特集では推進派と反対派の2者が共存した紙面は、ほかではなかなかないと思う。
- ・原子力を人文科学の視点から見た記事や、日本の原子力史を掲載してほしい。
- ・テロ対策の記事が必要ではないか。
- ・福島原発事故に対し、他人事のようにふるまっている学会員が多い。事故の復旧に対して、原子力学会員一人一人が少しでも、貢献できるようなことはないか。
- ・福島第一原子力発電所事故の未解明事項に関する現状報告の記事掲載を希望する。
- ・「福島復興に向けた「風評被害」への対応—春の年会で

の理事会セッション」のように、学会セッションの中でも社会的な影響が大きい内容について、このような記事にして頂けると嬉しい。

【今後、学会誌に掲載を希望する記事】

- ・原子力学会の大会等で発表のあった、X線装置を使った橋の劣化診断等や、AIを用いた画像診断等。
- ・重粒子線がん治療について。
- ・第5次エネルギー基本計画や余剰プルトニウム問題など、今現在の原子力の課題について。
- ・原子力発電所におけるセキュリティ対策の在り方。
- ・福島の健康に関する科学的調査と今後の課題について。
- ・巨額の国費を投じて作られた福島原発の「凍土遮水壁」は、費用対効果が疑問視されている。専門家による「凍土遮水壁」とコンクリート製の遮水壁の費用対効果の比較記事を載せて欲しい。
- ・一般社会では、再生エネルギー＝善、原子力＝悪という印象で議論されることが多い。電力というエネルギーの特性を踏まえたエネルギー論を発信してほしい。
- ・原子力産業の基盤確立のためには、若手に原子力関係国家資格者(原子炉主任、核燃料取扱、放射線取扱)を取得してもらうのが一番なので、試験の要点・対策などを継続して特集していただきたい。
- ・学会の今後について、学会や各部会の人口分布(年代別ではなく年齢別)や学会財政状態を取り上げて特集してほしい。人口規模相応に縮小していくのか、研究者や技術者の獲得に力を入れるのか。
- ・海外を中心とした研究動向、トレンド等。
- ・会長の記者会見の議事録を載せてはどうか。
- ・石川迪夫氏の「考証 福島原子力事故炉心溶融・水素爆発はどう起こったか」が出版されたのを機に、炉心溶融メカニズムをテーマにした座談会の続編記事を。

- ・海外の情報も積極的に掲載してほしい。とりわけ中国の動向には関心をもつ。
- ・若い人に興味を抱いてもらうために、魅力ある原子力の姿を示してほしい。
- ・原子力事業者や大学等にスポットを当てて、事業内容や研究内容を紹介するような連載を希望する。
- ・廃止措置は、日本の原子力を考える上で大きな課題となっている。もっと、廃止措置を取り上げてほしい。

【編集委員会への要望や意見】

- ・学会誌を早く電子化してほしい。バックナンバーも電子版で読みたい。
- ・雑誌の表紙の「ATOMOS」が何を意味するのか分からない。
- ・低レベルの放射線の人間の健康に対する影響については学会としての見解がまとまっておらず、これが国民の大きな不信を買っている。
- ・低線量被ばくに関して現状でわかっていること、わかっていないことを整理して紹介してほしい。
- ・医療関係者の被ばく管理について。
- ・ANFURDの参画学会が最後の学協会連絡会で紹介があったが、このANFURDの方向付けがあいまいなままのような気がする。課題設定してそれに向けて力を結集しないとせつかくの連合が無駄になるのではないか。課題設定の例としては、学会の福島事故調査報告書のコメント、またはバージョンアップ、原子力防災の方法の検討、住民の避難訓練の方法検討が考えられる。
- ・創立60周年特集に掲載されたいろいろな意見および反響をまとめて、原子力学会として何をすべきかを明確にすることが必要だと考える。
- ・将来にわたる日本の原子力エネルギー計画を真剣に取りあげてほしい。
- ・原子力委員会が従来は行ってきた、原子力発電とサイクルのシナリオ、課題を評価し、個別最適ではなく、全体最適の方向性の提示をしてほしい。

【編集委としての対応状況や対応方針】

学会誌アンケートではさまざまなご意見や記事企画提

案をいただいております、大変感謝いたします。

学会誌編集委員会ではこれまでのアンケート結果などを参考にして、東京電力福島第一原子力発電所の現況や事故原因と今後の対策、福島の現在と未来、風評被害、福島県における甲状腺がん疫学調査の研究、軽水炉の安全性、新型炉の開発動向、高レベル廃棄物管理、人材・教育問題、司法と原発の問題、社会との対話、世界の動向、海外で活躍する技術者の手記、各部会による最新の状況、国内の研究機関による研究最前線の紹介、コラム、学会春の年会や秋の大会での企画セッションなどを掲載しています。

さらに2019年3月号においては学会創立60周年を機に、学会や原子力界のこれまでの歩みを総括する特集を掲載しました。

また、ご質問のありました「ATOMOS」の由来については、原子力学会HPの学会誌のページ(<http://www.aesj.net/publish/atomos>)に以下のように記載しています。

“原子力学会誌のタイトル「ATOMOS (アトモス)」は、ギリシャ語でこれ以上「分割できない」という意味で、英語のアトム(原子)の語源ともなった言葉です。約2,400年前、古代ギリシャの哲学者デモクリトスは、物質をどんどん細かく分けていくと、それ以上には分割できない最小の単位があると考え、これを「アトモス」と名づけました。原子力学会誌では2007年から、この名称を使用しています。”

なお、学会誌の電子化については現在、原子力学会HPの学会誌の「立ち読み」のページ(<http://www.aesj.net/publish/atomos/tachiyomi>)で、目次と主要記事を1ヶ月後に掲載しています。また、J-STAGEには発行から半年後に全文掲載をするための準備を進めています。本件については数年前に他学会の状況や、費用対効果等の調査を行い、その結果をもとに「立ち読み」ページへの掲載、J-STAGE掲載準備を行っていますが、今後とも学会誌の購読形態は、適時再評価・検討をしていきます。アンケートについては今後も実施しますので、会員の方のご意見を引き続きお願いいたします。

(本誌 小林容子、佐田務)

談話室

原子力の新卒採用：学生に伝えたい“やりがい”

日本原子力産業協会 坂上 千春, 中村 真紀子

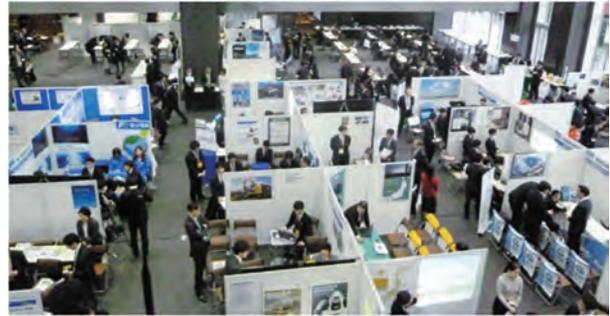
人材を求めてやってきた企業は年々増えて、東京、大阪で延べ80社。一方で、やってきた学生は両会場合わせてここ数年ほぼ横ばいの339人。原産協会が今年実施した原子力に特化した合同企業説明会の参加企業と来場者の数字だ。

このセミナーは原産協会が関西原子力懇談会と共催で、原子力産業界の人材確保支援と原子力産業への理解促進を目的に実施しているもの。2006年度から始め東京と大阪の2か所で開催している。初回の参加企業は25社、来場者は200人だった。その後、来場者も参加企業も年々増加。2010年度にかけては、原子力の海外展開などの「原子力カルネサンス」に注目が集まったことなどから、大幅に増加し1,903人、65社に達した。しかし、福島第一原子力発電所事故後は来場者、参加企業ともに激減。2011年度は496人、53社。2012年度は388人、34社と低迷する。

参加企業については2013年度から増加。2018年度には過去最高の80社に達した。一方、学生は2013年度以降は300~400人前後で推移している。

一言でいえば、原子力産業界からの人材確保のニーズは高いものの、学生からの人気は原発事故以降、回復していない。さらに、ここ数年の学生数の減少には、採用環境の変化(就活の早期化や採用ルートの多様化など)が影響していると考えられる。

最近の来場学生の学科や専攻は原子力・エネルギー系が多く約4割、電気・電子系が2割、化学系、文科系、機械系などがこれに続く。ここ数年に大きな変化はない。2010年度の学生数ピーク時には、電気・電子系が最多約400名で約2割、次いで機械系が約350名、文系、原子力・エネルギー系と続き、化学系、数学・物理系など多様な分野から学生が集まっていた。専攻分野の多様性が



会場(ブース)の様子

減少した事も現在の人材確保における問題点のひとつだ。

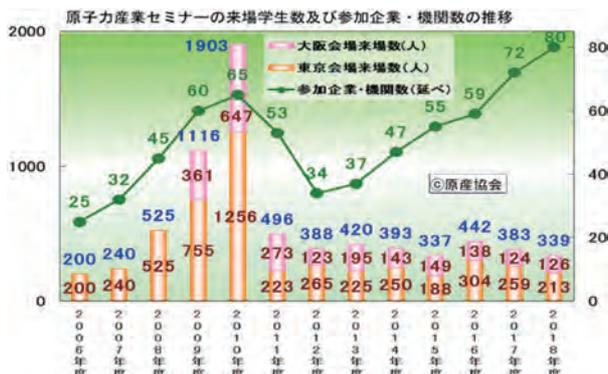
大学別では、2018年度には福井工業大学がトップで、東海、東京都市、福井、近畿の各大学、香川高専の順となり全85校であった(前年度は102校)。参加企業は電力関連が17社、重電メーカーが4社、プラント・エンジニアリング企業などが23社、原子力規制委員会などの公益・独立行政・研究法人が9団体であった。

参加した学生からは、「学内セミナーでは聞くことができない企業について知ることができた」、「これまで主要電力会社のことしか知らなかったが、関連企業や子会社にも魅力的な企業が多いことを知った」、「3月以前に行ってもらえれば他の就職活動とかぶらない。2月中旬だとありがたい」、「原子力に限定されている点で良かったが、出展企業のパリエーションが少ないという点で物足りなかった」などのアンケート回答があった。また、参加企業の満足度は、「期待を上回った」が5%、期待通りが40%、「まあまあ」が51%、「期待はずれ」が1%、「その他」が3%となっている。

原産協会では、こうした学生や企業の声を踏まえ、今年度は「原子力産業セミナー2021」の開催日を前倒しし、2020年2月1日(土)に東京・新宿で、2月16日(日)に大阪・梅田で開催を予定している。

また、学生の就活志向が、大規模な採用イベントから、より早い段階での企業インターンシップや業界研究セミナーなどに変化している現状に対応して、原産協会では、関連企業と協力して、業界研究セミナーや個別の大学内セミナー実施等により、原子力産業で働くことの魅力、やりがいを学生に伝える活動で学生の関心喚起に努めている。

(2019年9月6日記)



談話室

IAEA インターンシップ体験記 世界トップレベルの場での国際感覚の醸成

東京工業大学 三成 映理子,
早稲田大学 福田 貴斉

I. はじめに

平成 30 年文部科学省原子力人材育成等推進事業「グローバル原子力人材育成ネットワークによる戦略的原子力教育モデル事業」の一環として、国際原子力機関 (IAEA) の燃料サイクル核物質課 (Nuclear Fuel Cycle Material Section: NFCMS) (三成)、核データ課 (Nuclear Data Section: NDS) (福田) にて、それぞれ業務に当たった。各々、業務を通して、国際機関で働く上での文化的背景の違いや限られた時間内で如何に自身の存在意義を創出できるのか等苦勞した。今回の経験をを通して認識した、国際感覚醸成の重要性を具体例を交えて紹介する。

II. 燃料サイクル核物質課での経験

1. NFCMS での業務概要

NFCMS では、Nuclear Fuel Cycle Simulation System (NFCSS) という多様な核燃料サイクルを想定した際の、U や Pu の各工程における質量評価をする独自のシステムを開発しており、そのシステムの保守・開発を行っている。実習中は NFCSS の新たな機能を更新し、放射性廃棄物からの崩壊熱と環境影響を定量的に評価する機能を追加することを目的に、システム開発に関する業務に就いた。具体的な作業としては、先ず使用済燃料中の核種の生成量計算に ORIGEN2.2UPJ を使用し、得られたデータに基づいて崩壊熱と毒性の計算を行い、計算結果を Excel にまとめ、操作手順をマニュアル化した。作成した Excel 表とマニュアルは現在 NFCSS のシステム上でダウンロード可能となっている。NFCSS 開発全体を通して、多くの職員と業務上での関わりを持てたこと、また、マニュアル作成では TECDOC といった IAEA の技術報告書の作成とレビュー対応が如何に大変かを肌で感じる事が出来、貴重な経験となった。

また、研修中は数多くの打ち合わせに参画し、議事録の作成を行った。インターンシップ期間内にマニュアルを完成させることができたこともあり、上司や同僚から高い評価を得ることができた一方、作業中に改めて自分の語学力が不足していること、更に専門性を身につけなければならないことを改めて認識した。語学力のスキルアップと専門性の向上を今後自身の課題としたい。

2. 国際機関ならではの体験

ウィーン国際センター (VIC) で働く方々の国籍は様々であり、様々な文化的背景を持つ職員やインターン生と共に業務を行う機会を多く得ることができた。とりわけ驚いたのは、女性職員の多さである。オフィスが個室だということもあるが、女性職員が子供と出勤し、自室に子供を連れてきていることも多く、特に金曜日はコアタイムが 14 時までのため、その傾向が顕著であった。日本でも働き方改革が進められているも、国連機関においては、取り組みが一步進んだ印象で、女性の働き方の柔軟性が認められていたように思う。「子供が社会に迷惑をかけないよう誰か(例えば保育園)が管理すべき」、のではなく、国際機関に限らずヨーロッパ全体で「子供は社会で見守るべき」という風潮があるように感じた。

また、印象的だったのは、多くの職員が任期付き採用という点である。日本においては終身雇用といった特有の雇用慣行が取られているため、最初は不安にはならないのだろうかとも思ったが、実際は、任期があるからこそ生産性が上がるのではないかと考える。私自身、3ヵ月という限られた期間だったからこそ、全力で取り組むことが出来たと考える。自分一人でじっくりと考える時間も重要だが、分からなければ相談、出来たことは報告するという基本的なことにもスピード感が生まれ、興味があれば躊躇せず手をあげるという自主性は海外においては非常に重要だと感じた。実際、手を挙げていなければ、参加出来なかった会議もあれば学ぶ機会を逸することもあった。今後のキャリアにおいてもそうだが、学生研究生活においても、臆せずにきちんと自身の考えや成果を発信していくことに努め、主体性を持って多様な専門家と協働していきたい。

III. 核データ課での経験

1. NDS での業務概要

NDS では、様々な核反応に関するデータ (核データ) を収集・整理・公開することを通して加盟国の原子炉の性能評価や放射線応用技術の高精度化などに貢献している。実習中は数多くある核データの中でも、Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR) に登録されている核分裂

生成物収率データの完備性の向上を目的に約3カ月の業務に従事した。全ての核エネルギー利用の基礎となる核データの理論について知見を深めることができただけでなく、大規模なデータを扱うためのプログラミングスキルの習得・実践や、同僚や上司と英語で相談しながら仕事を進めるなど、極めて貴重な経験ができた。

海外、それだけでなく国際機関でのインターンシップともあり着任当初は不安や心許なさに苛まれることもあったが、豊富なインターン生の受け入れ経験があるIAEAのスタッフの方々の手厚いサポートに助けられた。加えて、課内部での人間関係に恵まれ、上司や同僚との綿密なコミュニケーションと試行錯誤を経て、最終的には指導員の方にも満足していただける成果を出すことができた実感しており、今後の自信にもつながった。

2. インターン生コミュニティの存在

インターン生にとって、インターンシップの業務自体は当然重要だが、中長期的に滞在するのであれば、オフの過ごし方も経験の幅や満足度を大きく左右する。オフの過ごし方に大きな影響を与えるのが、コミュニティへの参画であると私は考える。しかし、VIC内に散らばるインターン生を見つけるのは容易ではない。そこで、インターン生により自主的に運営されているSNSを基盤にした「インターン生コミュニティ」を活用した。このようなプラットフォームの活用により普段関わることのできないインターン生同士が集い、定期的で開催されているコーヒープレイク、バー、スポーツや遠征などのアクティビティに参画することができ、その後もインターン生間での情報交換が可能となる。加えて、新参者のインターン生がウィーン生活でのヒントを得たり、時には物件の紹介がなされたりと、実践的な側面も兼ね備えている。



図1 インターン生コミュニティで出会った仲間
(左端が福田)

特に、比較的シャイなアジア圏からのインターン生は、ともすると所属部署と家との行き来だけでコミュニティが閉じてしまうことも少なくないが、このようなコミュニティの存在のおかげで、私を含め多くの若者が、同年代の仲間を見つけることができたのではないかと考える。恩恵の受け方は人それぞれだが、私は積極的に利用し、メンバーが見つけた「無料コーヒープレイク」の情報を耳にすると駆けつけ、毎週金曜は仕事終わりにバーに集まり、週末にはそこで出会った仲間と隣国へ旅行に行くなど、極めて有意義で思い出深いオフを過ごすことができた。今後、海外機関のインターンシップ等に参加する学生には、是非、現地での同年代のコミュニティを見つけて参加することをお勧めする。仮にない場合でも、自分でコミュニティを創るといった積極的な姿勢が海外では必要だと考える。

IV. 会得したこと

私たち2人に共通して、IAEAに集まっている様々な国の専門家と積極的にコミュニケーションを取ることが出来たため、専門知識の獲得だけでなく、特にコミュニケーション能力の向上や国際感覚の醸成につながった。また、インターンシップ前は、国際機関をどこか雲の上の存在のように考えていたが、実際に行ってみると、臆せずきちんと自身の考えや成果を発信していくことで、十分通用することも分かった。依然として非常に門戸が狭いことは事実であるが、学生のうちにIAEAといった国際機関でインターンシップを経験することで、国際機関にて働くことの意義やキャリアパスの広がりを感じる事が出来たのは非常に有益であった。

日本の原子力業界は東京電力福島第一原子力発電所の事故からの復興・再生、国内原子力技術の海外展開や放射性廃棄物の処分等、様々な課題を抱えているが、今後も世界とコミュニケーションを図り、より良い原子力利用のあり方を模索しなければならない。その意味で、今後の日本の原子力業界に貢献したいと志す学生・若者が国際機関等におけるインターンシップを通して、コミュニケーション能力の向上だけでなく、世界規模で広く物事を考えるという巨視的な視点を養うことは極めて重要だと考える。原子力分野で活躍し、ひいては国際社会を牽引するエンジニア・研究者に必要な不可欠なスキルであり、私たち自身の今後のキャリアにも間違いなく有意義に働くと思っている。

(2019年8月16日記)

談話室

リケジョの思い(8) 知らないことを調べる習慣

こんにちは。口町です。今回は研究室で学んだ、知らないことを調べる習慣について書こうと思います。恥ずかしながら身につけてきたのは最近のことでした。

研究の過程では調べることが欠かせません。読む論文もインターネット上で調べます。世界中の研究者たちによる膨大な論文の中から、関心のあるテーマについて書かれた論文を検索し、探し出します。読む論文を決めたら印刷して読んでいきます。論文のほとんどは英語で書かれています。わからない英単語は辞書を引いて調べます。読み進めていくと、専門用語も登場します。また調べます。こちらは辞書だけでは足りないことも多くあります。単に和訳しても、その定義がわからないことが多いからです。必要に応じて専門書や他の論文を参照しま

す。専門用語の意味がわかったら、また次へ…。

こうして調べ続けていると、だんだんと日常でも調べずにはいられなくなってきます。私は大がつくほどの面倒さがりやです。しかし研究で調べることに慣れてくると、他の場面で知らない言葉に出会ったときにも、うずうずするのは。しばらく見ないふりをしているもその言葉が気になって、文章を読んでも目が滑ります。「あの言葉の意味はなんだろう。私は何か大事なことをしていない気がする。」といううずうずと、「まあいいか…意味は大体イメージできればいいや。」という億劫さの間でせめぎ合いが生じます。結局、せめぎ合い自体が苦しくなり、辞書に手を伸ばします。実際に調べてみると、新しいことを知ることができて、しかも文章の意味

がより鮮やかになります。「おお、そういうことか…！」知るといのは嬉しいものです。次に知らないことが出てくると面倒ながらもやはり調べてしまいます。そんなことをしているうちに、知らないことを調べる習慣が身に付きつつあります。

よく「語彙力をつけるには知らない言葉を調べなさい」という話を聞きます。研究のおかげで知らない言葉を調べるようにはなりましたが、結果として語彙力がついたかどうかは不明です。日々調べては忘れ、また調べては忘れを繰り返しています。しかし、たとえ語彙力がどうであれ、新しいことを知るとか、目の前なのが少しわかるようになることは、それだけで嬉しいものです。今は面倒さと嬉しさの等価交換ですが、いずれは何も気にせず調べられるようになるだろうと思います。それまでは、しばし修行の日々です。

著者紹介

口町和香 (くちまち・わか)
北海道大学理学院物性物理学専攻、修士1年です。統計物理学と研究を学ぶ傍ら、科学コミュニケーションを手掛けています。





～福島浜通りだより～(7) 共に歩いている

一般社団法人 AFW 吉川 彰浩

この夏、私が代表を務める一般社団法人 AFW にインターンをしたいと地元浜通りの学生から声がかかった。

元東京電力職員が代表を務め、福島第一原子力発電所と地域を題材とした取組を続けていることは、HP 上にも書いている。

生い立ちを聴くと、同発電所の事故により現在も帰還困難区域が残る大熊町の出身だという。8年前、当時彼女は小学生。大熊町出身であることで抱える、悩みや苦しみも話してくれた。

私の生い立ちと彼女の生い立ちは原子力事故というもので繋がっている。その繋がりは反発力を生む関係に思えた。なぜ AFW なのかを聞いてみた。原発のある町で生まれ育った者として、原発事故を経験した町の再建に貢献したいという思いと、「被災者」というラベルを貼られる世界観の中で、大熊町出身であると言える自信をつけたい、そうした思いを抱きながら、地域と原子力発電所というテーマで自己を見つめ直すことも踏まえて、AFW で学びたいというものだった。

インターンの申し出を受けなければならないと感じた。この8年を持って自分は何を地元の若者に伝えられるようになったのかも、このインターンで見つめ直そうと思った。

奇妙な関係性のインターンが始まった。3週間にわたり、日中の殆どを彼女と過ごすことになった。その一時のことを今回お送りしたい。

今年、一部避難解除となった大熊町の大川原地区にフィールドワークに訪れた。彼女を連れて町を歩いた。町の再建を願って植えられた向日葵畑の中を歩くと、夏の暑い日差しに照らされながら、そよ風に吹かれ、ゆらゆら揺れている。ミツバチが忙しそうに飛び回っている。当たり前前の夏の風景が広がっている。

大川原小学校の跡地を見つけた。小学校があったのは明治時代。子供達が駆け回っていた風景を思い浮かべて、うっそうとした森の中を歩いた。

大熊町の水源でもある大倉ダムに向かう道、ざる菊で「カエリマシタ」という文字が描かれた民家を見つけた。そのカエリマシタという言葉が彼女とじっと見つめた。「ふるさとに帰るとはどの様な意味なのだろうね」と呟いた。

道中、小川においてみた。物語の中にあるような風景が広がる。透き通った冷たい水。苔むした枝にトンボが静かに止まっている。美しい。その一言しかでない風景に身をおいだ。



仮設の商店があった。覗くと少しばかりの日用品とブランド物の化粧品が並んでいた。気の良い親子がどうぞ中に入ってとお茶を出してくれた。在りし日の大熊町の姿をお互いに語り合う。ごく近い場所で人生がすれ違っていたことも分かった。大熊町を何ら周り気にせず話した。

建設が進む災害公営住宅群の中を歩いた。バリアフリーの綺麗な住宅が並んでいる。庭には花や野菜が植えられていた。声をかける。なんてことのない世間話をする。新しく開発する住宅についてあれこれ教えてくれた。今日はどうしたのと言われて、大熊町を散歩して遊んでいますと答えると、くったくのない笑顔で、いいねと返ってきた。

新しく出来たばかりの役場に顔を出す、目が合った職員がたまたまインターン生の同級生のお母さんだった。久しぶりの再会を喜び、ありがたいことに館内を色々案内してくれた。これからの大熊町をもっと盛り上げていきたいと、話してくれた。

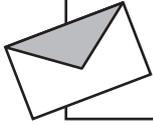
丸一日を大川原地区で過ごした。気が付けば彼女と私の中にあつた距離感が縮み、自然と会話が進んでいった。今日はとても楽しかったと言ってもらえた。それは私にとっても同じだった。自分の中にあつた恐れは、彼女と大熊町を訪れたことでどこかへと吹き飛んでいった。

ほんの少し目を向ければ心動かされる風景が町には広がっている。勇気を出して話しかけてみれば、出会えてよかったと思える人達がいる。地域の中に素晴らしい人・物・事は無限にある。

忘れてはならない過去とこれからは繋がっている。そして誰かと共に歩いている。

(2019年8月31日記)

理事会だより



学会における人材育成，教育委員会の紹介

昨年6月より学会教育委員会(以後、教育委員会)委員長をしている関係で、本年6月より理事を務めさせて頂いております。ここでは、教育委員会活動の紹介と学会員の皆様へのご協力をお願いをさせていただきます。

教育委員会のミッションとしては、学会の事業目的、「公衆の安全をすべてに優先させて、原子力および放射線の平和利用に関する学術および技術の進歩をはかり、その成果の活用と普及を進め、もって環境の保全と社会の発展に寄与する。」に資する人材育成、原子力および放射線技術者・研究者の継続研鑽並びに市民の原子力・放射線リテラシーの向上のための教育機会・コンテンツを提供すること。また、目的を共有する諸機関による創設・作成を支援することです。主な教育委員会活動は、以下の4つに分けることができます。

初等中等教育小委員会活動：1F事故の直前に改訂した「原子力が開く世紀」の姉妹版として、1F事故の推移と現状、廃炉への道のりや人体から産業まで様々な分野への放射線の影響、あわせて福島県における風評被害の実態等について記述された「原子力のいまと明日」の発刊作業を進めて参りました。お陰様で本年3月20日に出版されましたが、好評につき2,000部の増刷が決まっております。2020年春の年会(於福島大学)までには間に合いますので、ぜひご購入をお願いします。また、初等中等教育小委員会では、中学・高校の理科や社会の教科書における「エネルギー・環境・原子力関連記述に関する調査と提言」を行っています。昨年度は高校の地理歴史、公民の教科書を調査し、その結果は今年、文科省へ説明に行く予定です。これらの活動には、教育委員会の枠を超えた多くの学会員の皆様のご協力の下で行っており、この場を借りてお礼申し上げます。

高等教育小委員会活動：主に大学生、高専生の原子力教育インフラの充実を図ることが主な活動です。数年前になりますが文科省の競争的資金により「学会教科書」を作成しました。現在、これは学会のHP (<http://www.aesj.or.jp/text.html>) よりだれでも自由にダウンロードできるようになっていますので、ぜひご活用ください。また、高専で使用している原子力教科書の英訳にも協力させて頂き

ました。さらに、原産が毎年行っている原子力セミナー(就職説明会)についても毎年議論し、どうすれば学生を原子力関係に進学、就職させることが出来るか等を議論してきました。また原子力学会の大会・年会会場で原子力関係の教員が一同に集う原子力教員協議会(教員協議会)とも連携をとっています。ここ数年は、内閣府等の外部機関から教員協議会を通じた大学関係者へのアンケート調査の橋渡しも行っており、関係者の皆様には今後ともご協力のほどよろしく申し上げます。

技術士関係：原子力・放射線部門の技術資格取得支援のため、原子力学会主催の技術士制度・試験講習会を開催しています。また、技術士の皆様の協力の下、過去の試験問題に対する解説をHPへ掲載するなどしておりますので、ぜひご活用ください。また、原子力技術者・研究者向け継続研鑽(CPD)のために、学会内の各委員会や部会等からCPDプログラムにふさわしい行事に関する情報を提供してもらい、受講者には教育委員長名で証明書を発行しています。今後もCPDプログラムに相応しい行事があればぜひお知らせください。

その他：教育委員会にはその他にもシニアネットワーク、ダイバーシティ、YGNのメンバーも委員として参加しており、それぞれの活動に協力しています。

福島事故からもう8年になります。原子力系大学・大学院に進学する学生の数も事故前の水準に戻りつつありますが、ここに来てその学生の質に疑問を投げかける声が聞かれるようになりました。要するに昔と比べて、原子力系大学・大学院で学生の確保を重要視するあまり、卒業・修了の要件を下げているのでは無いかということです。教育委員会では、今後も原子力教育のあるべき姿を追求していくとともに、学生の確保からより高みを目指す学生の育成へと方向を変えながら、学会員の皆様とともに議論して行きたいと思っておりますので、よろしくご協力をお願いします。

(福井大学・宇埜正美)

「理事会だより」へのご意見、ご提案の送り先
rijikaidayori@aesj.or.jp