

巻頭言

1 迫り来るシンギュラリティと人類の未来

松田卓也

新会長あいさつ

2 原子力の「再構築期」を目指して

岡嶋成晃

時論

4 Unknown unknowns・信頼・中間集団

開沼 博

6 脱炭素化に向けた再生可能エネルギーの限界と原子力の必然性 —一人新世 (Anthropocene)—

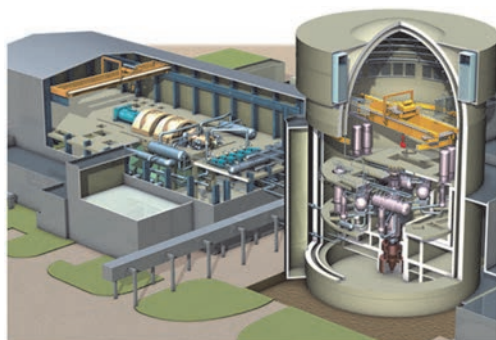
松井一秋

解説

14 最近の原子力動向：第3世代炉が本格化—露中台頭の中，SMR 開発に注目

昨年，中国では5基の最新の第3世代炉が発電を開始し，原子力規模で世界3位に躍り出た。近年，露中が台頭する中で，米英加は2020年代半ば以降の商用展開を目指してSMRの開発を進めている。

小林雅治



VVER-1200 (ロシアATOM)

解説

20 竜巻に対する原子力発電所の設計条件について

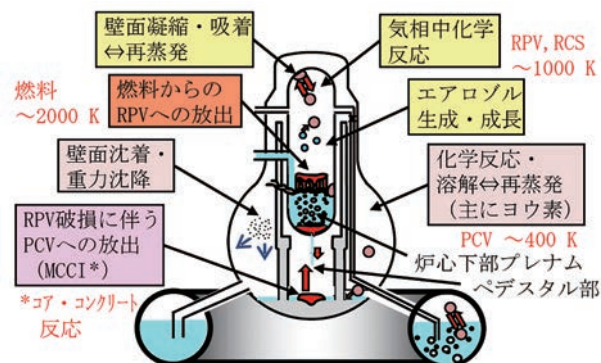
竜巻が原子力発電所に及ぼす影響を評価するための設計条件を解説する。特に，日米の設計竜巻風速および竜巻飛来物の設計衝突速度の設定法・設計値の違いを説明し，今後の課題について提言する。

江口 譲

25 核分裂生成物と燃料デブリの比較 —福島第一原子力発電所の廃炉作業時に留意すべき核分裂生成物の影響—

1Fの廃炉はデブリの存在箇所を同定して取り出し，安全に保管することで終結する。作業を進めてゆくうえで障害となるのが，セシウムをはじめとする放射性の核分裂生成物だ。

「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」
研究専門委員会



炉内各所におけるFPのふるまいの概念図

解説シリーズ

電子顕微鏡の現状と将来展望 (2)

35 電子線ホログラフィーによる材料解析

電子線ホログラフィーは電子波の干渉を用い，観察対象の電磁場や歪みを高い分解能で観察することができる手法である。本手法は材料機能発現の根幹を明らかにし，次世代材料の開発に有用な知見を与えると期待される。

谷垣俊明

31 Column

「蓄エネ技術が着々と力を蓄えている？」
「スロバキアとオーストリア間の国際送電」
「基礎研究をたくさんしたい」
「「考える」ことを諦めない」
「ダークをホープへ転じる旅」
「物理の時間・生物の時間」
「好奇心と科学」
「無関心と寛容」

井内千穂
妹尾優希
鳥居千智
服部杏菜
服部美咲
坂東昌子
マイケル瑛美
渡辺真由

解説シリーズ

最先端の研究開発 量子科学技術研究開発機構(6)

39 核融合エネルギーの実用化に向けた研究開発の進展(その2)

核融合エネルギーの実用化に向けた研究開発として、今回と次回は日欧両極により国内で実施されている幅広いアプローチ活動を解説する。これは発電実証を行う原型炉の実現とITER計画の支援を目的とした国際研究協力プロジェクトである。



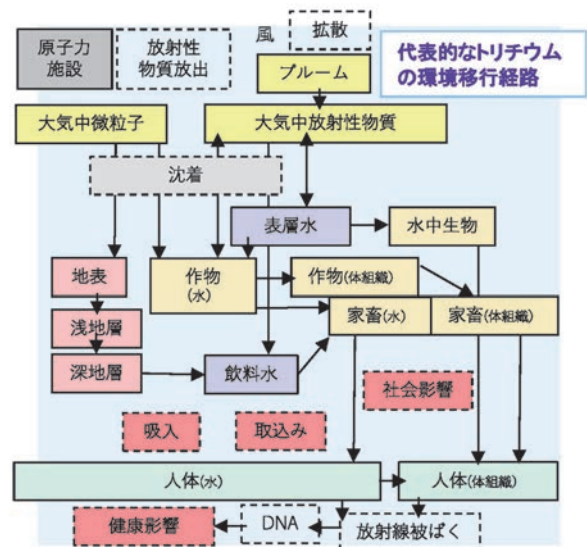
松本太郎, 東島 智 超伝導中心ソレノイド

連載講座 核融合トリチウム研究最前線 (12/ 最終回)

44 トリチウム研究の将来展望

トリチウム研究の現状と今後について工学、環境、生物、社会を含めて概観する。法規制を十分に守っても、定常放出による周辺環境での濃度上昇の検出は不可避であり、影響評価と社会による理解・合意、継続的な施設の運営による経験・信頼の蓄積が必要である。

小西哲之



報告

51 環境科学に関わる学生・若手研究者たちが考える保健物理・環境科学研究

原子力・放射線分野に携わる学生と若手研究者が、保健物理・環境科学の技術上または研究上の課題点について講演を行った。

三輪一爾ほか

FOCUS

国内外の原子力教育事情(7/ 最終回)

56 イタリア・ミラノ工科大学の場合

二ノ方 壽

日々是好日～福島浜通りだより(4)

59 紡いでいく暮らし

吉川彰浩

理事会だより

61 2019 年度新たな体制で活動開始

近江 正

視点 <社会> を語る(5)

60 社会を外側から語るか、内側から語るか

齋藤圭介

- 8 News
- 30 From Editors
- 62 会報 原子力関係会議案内、新入会一覧、共催行事、人事公募、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

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>

迫り来るシンギュラリティと人類の未来

巻頭言



神戸大学名誉教授

松田 卓也 (まつだ・たくや)

京都大学大学院理学研究科博士課程修了。
同大助教授、神戸大学理学部教授、日本天文学会理事長を歴任。現在は AI2 オープンイノベーション研究所所長、NPO あいんしゅたいん 副理事長を務める。

シンギュラリティが近づいている。シンギュラリティとは何か？それは人により様々な定義があるが、私は人工知能(AI)、ロボット技術、生物工学などの進歩により、現状の人間よりはるかに高知能な存在(超知能)が生まれること、そしてそれで社会が大きく変化することと定義したい。人類はこれまで、さまざまな革命の変革を経てきた。道具の使用、火の使用、言語の発明、農業の開始、産業革命などである。つぎにくるのがシンギュラリティ革命である。それはそれまでの革命とは違って、人類を一段の高みにあげる可能性がある。

米国の宇宙物理学者のマックス・テグマークは最近、「ライフ 3.0」という本を書いた。ライフ 1.0 はバクテリア、2.0 は人間、そして 3.0 が超人類である。シンギュラリティ以降に人類は超人類に飛躍するという。人工知能が自分自身のアルゴリズムを書き換えることができるようになると、AI の能力が指数関数的に増大する。なぜならアルゴリズムの改良時間が、アルゴリズムの能力に反比例するからだ。これを知能爆発とよぶ。それは制御されない核反応に似ている。シンギュラリティ概念を喧伝している米国の発明家レイ・カーツワイルによれば、シンギュラリティは 2045 年に起きるといふ。AI の国際会議で専門家たちのアンケートをとった結果、シンギュラリティの時期として過半の人は 2055 年と答えた。2 年後の会議ではそれが 2047 年に早まった。つまり今世紀の半ば頃までには、シンギュラリティが起きるといふのが過半の専門家の意見である。

最近の AI の進歩を見ていると、その進化速度は恐るべきものだ。例えば 2016 年に英国のディープマインド社の AI アルファ碁は韓国のイ・セドル九段に四勝一敗で勝った。その前年に専門家に、AI はいつになったら囲碁で人間のトッププロに勝てるかというアンケートが取られた。答えは平均 12 年で、最短の回答でも 5 年であった。実際は 1 年後にはトッププロを破った。その後もディープマインド社の快進撃は続く。2017 年にはアルファ・ゼロが発表され、囲碁の他にチェスと将棋でも人類を圧倒した。しかも全くのど素人の段階から、人に学ぶことはなく独自に学習を重ねて 8 時間で、人間を圧倒できるレベルになった。囲碁の歴史は 3000 年というから、それを 8 時間で走り抜けたのだ。もっとも人工知能の専門家の中にはシンギュラリティは起きないとか、起きるとしても来世紀以降であろうと主張する向きもある。それに対しては原子核物理学の大家ラザフォードが 1933 年に、原子核エネルギーを利用することは不可能であると講演したことをあげよう。それを聞いたレオ・シラードは翌日には連鎖反応の理論を思いついた。そして 1938 年には核分裂が発見され、1942 年にはフェルミが原子炉を作り、1945 年には日本に原子爆弾が投下された。飛行機の開発の歴史を振り返ろう。初の機械飛行に成功したのはライト兄弟で 1903 年のことであった。しかし 1896 年に流体物理学の大家のケルヴィン卿は、機械飛行は不可能であると主張していたのだ。

英国の有名な SF 作家のアーサー・クラークの唱えた三法則がある。その第一法則は「高名で年配の科学者が可能であると言った場合、その主張はほぼ間違いない。また不可能であると言った場合、その主張はほぼ間違っている。」

新会長あいさつ

原子力の「再構築期」を目指して



2019 年度会長
岡嶋 成晃 (おかじま・しげあき)

2019 年度第 41 代の会長に就任いたしました岡嶋成晃です。

本会発足 60 周年を迎え、また平成から令和へと新たな時代を迎えた節目に会長に就任しましたことに、身の引き締まる思いです。

さて、4 月 25 日に開催された 60 周年記念シンポジウムの「学会 60 年の歩み—震災に向き合って—」において、これまでの 60 年間の俯瞰の後、今後の原子力学会の在り方として、向こう 10 年は「原子力の信頼回復と新たな未来を切り拓く『再構築期』を目指す」として今後取り組むべき五つの課題が示されました。

私は、「再構築期」の初年度として、社会に役立つ原子力・放射線技術の追究に加え、この五つの課題に対して、次のように取り組んでいきます。

1. 専門家の立場からの提言と理解活動の促進

本会は、科学技術の社会応用を図る工学分野の学会です。すなわち、社会との関係を絶って研究や担当業務のみに取り組むような姿勢を見過ごすことは出来ません。原子力が社会に役立つこと、人類の持続的発展に大きな役割を担うことを、専門家として、社会に提言することが重要と考えます。

すでに、この 4 月には、地球環境問題について検討した結果を提言としてまとめ、中間報告を行いました¹⁾。このように、我が国のエネルギー確保、国民経済・文化的生活の維持発展、世界的な地球環境問題などの多方面からの総合的な検討を通して原子力の必要性を考え、その検討結果である現実的な解と課題を広く社会に示して行くことが重要かつ必要と考えます。このような提言に結びつく活動をさらに進めていきます。

重要な原子力の理解活動については、一般の人々に原子力技術と利用に関する信頼と理解を深めて頂くにあたって、専門家として「どのような情報をどのように発信するか」を、情報の受け手の立場に立って取り組むように努めます。とりわけ、福島に関しては、一般の人々が、現状を正しく知った上で、誤った情報や思い込みなどによって人々の記憶にこびりついたイメージ認識を改めなければ、福島の真の復興には繋がらないであろうと思います。この点からも、情報発信には全力を挙げて取り組んでいきます。

2. 1F 廃炉の促進と福島復興への支援

原子力エネルギー利用に対する国民理解の回復には、福島の廃炉の促進と周辺地域の復興が必須であり、本会として、これに全力を挙げて協力して行くことが重要です。

特に、今年度から次年度には、事故炉廃炉に関して燃料デブリ取り出し方法が確定されようとしています。この廃炉に向けて、安全かつ円滑に進むように技術的・専門的な貢献を行うことと、周辺地域の復興に向けた支援が、本会として重要な責務であると考えます。これまでの福島特別プロジェクトや福島第一原子力発電所廃炉検討委員会による活動、また、福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会(36 学協会参加)を通じ、本件における的確な情報発信や提言、技術協力等を行っていきます。

3. 放射線利用・放射線防護の研究の促進

原子力利用とは、エネルギーとしての利用のみならず、放射線利用も科学技術の社会応用を図る、すなわち、原子力が社会に役立つことであり、人類の持続的発展に大きな役割を担っています。

その放射線利用に目を向けると、従来の半導体開発等に加え、福島での適用を目指した放射線検出器とその応用技術開発や量子線を利用したセンサー技術の高度化、新たな材料開発等のマテリアルサイエンス

分野、核医学等の医療分野、農業や食品分野を始めとするバイオテクノロジー分野、加速器を用いた研究開発や産業応用などにおいて、著しい進歩がみられます。

これらを継続すると共に、低線量放射線による生物への影響に関する研究などの放射線防護の研究の促進をはかっていきます。

4. 教育・人材育成の継続と技術伝承

今後の原子力技術の維持発展には、人材育成、技術継承は必要不可欠です。しかし、現実に目を向けると、「我が国における研究炉の役割中間報告書(平成28年3月)」²⁾および「我が国における大学等核燃およびRI研究施設の在り方について中間報告書(平成30年度)」³⁾で明らかなように、大学や研究機関において、教育研究資産が減少しつつあるとともに、その維持が困難になっており、将来に不安があるとともに、研究炉の再稼働の遅れから、種々の研究の進展に少なからず影響を及ぼしています。また、原子力技術は様々な科学技術を総合したものであることから、構成する各要素の科学技術すなわち基盤技術の強化・維持発展が、原子力の技術基盤形成において非常に重要です。

これらの現状を踏まえ、原子力アゴラ調査専門委員会とその下部組織である分科会、新設軽水炉に向けた検討を行い提言するWGや原子炉における機構論的限界熱流束評価技術研究専門委員会を始めとする様々なテーマでの専門委員会活動を活性化するとともに、これらに若手研究者が積極的に参加できるようにして、知識基盤の充実化と継承を進めます。また、原子力施設の再稼働や継続的な安全性向上、安全確実な廃止措置への寄与に関わる活動にも積極的に取り組んでいきます。

技術継承では、実際の設計・モノ作りの経験が重要であるにもかかわらず、我が国による発電炉新設はここ10余年なく、また、試験研究炉では20年以上新たな炉が建設されていない状況であり、非常に重要なOJTの機会が失われている状況です。原子力分野では、今後、座学を治めるも実践経験の少ない技術者が多数輩出されるという危機的状況を迎えそうです。

この危機意識を会員相互で共有しつつ、人材育成・技術伝承に努めていこうと思います。その上、学生教育、たとえば、若い人がエネルギー問題を学び考える教育の実施への支援、また初等中等教育でのエネルギー学習の支援などについて、その具体的な取組みを検討していきます。また、若い人達が、国際的に活躍できるように、様々な支援の継続等を進めます。併せて、昨年度から開始した福島関連で蓄積した知見の世界への発信も継続していくとともに、これまでに蓄積された知識や技術の保存、すなわちアーカイブ化について検討を始めます。

5. 会員数維持の活動

最近の経営改善および皆様のご理解・ご協力・ご努力によって、一時の財務危機からは脱出したものの、ここ数年にわたって毎年約100人の会員減少が続いているところ、昨年度は約200人の会員減少でした。その上、少子高齢化、理科離れ、団塊世代の退職などを反映し、若手が少ない(20~40歳までの正会員は全体の21%)状況です。また、女性比率が4%と少ないことも課題です。

このような課題の解決に向けて、YGNなどの若手活動の強化、ダイバーシティへの取り組み、会員サービスの向上を図ります。特に、HPの更新は急務であり、会員のメリットを明確に示していきます。

これら五課題への取り組みを通して、原子力分野からの国連の持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals: SDGs)の一部に貢献し、将来の世代によりよい地球を残すことに寄与していきたいと考えます。

最後に、繰り返しになりますが、「原子力の信頼回復と新たな未来を切り拓く『再構築期』」の初年度として、これまで以上に確固とした基盤を築き、約6,500名の原子力学会会員が、所属機関にとらわれず、役割分担しつつベクトルを合わせ進むことで、示された個々の課題に率先して一つ一つ確実に取り組んでいくための先達としての役割を努めていきたいと思っています。どうぞ、よろしくお願いします。

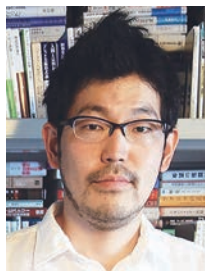
参考資料

- 1) http://www.aesj.net/document/com-s_agora-earth190424.pdf
- 2) http://www.aesj.net/document/com-s_agora20160331.pdf
- 3) http://www.aesj.net/document/com-s_agora-ri_thk_1_181126.pdf

(2019年7月1日記)



Unknown unknowns・信頼・中間集団



開沼 博 (かいぬま・ひろし)

立命館大学衣笠研究機構准教授

1984年福島県出身。東京大学大学院学際情報学府博士課程単位取得退学。福島大学特任研究員等を経て現職。著書に『はじめての福島学』『福島第一原発廃炉図鑑』など。他に東日本国際大学客員教授等。

福島第一原発事故後の重要なテーマの一つである風評の問題はいまだに解決する兆しをみせていない。風評とはいかなる社会現象なのか。その答えに迫る上で、考えるべき問いがある。

あなたは家族や知人に福島県産の食べ物や福島県への旅行をおすすめできるか――。

そう問われたらどう答えるだろうか。家族でも同僚でも良い。ぜひ聞いてみてもらいたい。

「そんなことできるに決まってるじゃないか。実際に福島のをあえて買ったり、旅行にいったりもしているよ」と答える人もいるだろう。しかし、その「常識的な感覚」は必ずしも常識ではない。

三菱総合研究所が2017年8月に「2020年オリパラで求められる福島復興・放射線リスクミ研究」において実施した調査では、東京在住者の中で福島産の食べ物を家族や子どもにたいしてすすめる時に、放射線が気になるからためらうという人は35%、同じく友人や知人にすすめるのをためらうという人は33.1%いる。同じく、福島への旅行についてすすめるのをためらうのは、家族、子どもに対しては36.9%、友人、知人に対しては32.7%もいる。

3~4割が福島産品、福島旅行を人にすすめるのをためらうという数字はけっして誤差の範囲と見過ごすことが許容される範囲にはないだろう。

この調査ではもう一点、興味深い事実も浮かび上がる。

(誰かにすすめるのではなく)自分で福島産品を食べるか、福島旅行をするか、と問いを変えると、ためらう割合は減る。最大で8.7%ほどとその割合も小さくはない。

つまり、「自分で食べる・行くってことなら別に良いんだけど、人にすすめるのはちょっと・・・」という「過剰な配慮」の構造が福島産品・福島旅行への忌避の一因としてあることも示している。

この「過剰な配慮」は一般の消費者だけにあるわけではない。流通の現場においても同様の構造が連鎖しより問題を固定化している。

農林水産省が行った「平成30年度福島県産農業作物等

流通実態調査」の報告書によれば、流通に関わる業者が、自分(=納入元)が扱っている福島の商品について、それを買ってくれる業者(=納入先)に対して、自分よりもネガティブに評価しているのではないかと考えているということが明らかになった。

例えば、福島のコメは美味しいし価格も手頃だと思って実際にそれを買った仲卸の業者がいて、加工業者に売ろうとしている、としよう。その時に、仲卸は「これは良いコメであることは間違いない。でも、加工業者は福島のものとなると嫌がるんじゃないか。他の地域からのものより安く買いたいとか、そもそも買いたくないと思うんじゃないか」と忖度する。その仲卸業者の意識は単に意識として終われば良いが、実際には「こんな気づきが必要なら次からは福島以外で生産されたものを扱おう」とか「値下げ交渉されても受け入れるしかないかな」とか、現場での行動にも変容をもたらす。結果、取り扱いが減ったり価格が下がったりする。そしてそれは、生産者→卸売→仲卸→加工→小売→外食→消費者という流れ全体の中で連鎖し、現実をネガティブな方向に変えていく。そうやってしまえば生産者だけが頑張ったり、消費者だけが意識を変えたりすればどうにかなるわけではない、一つの忖度のシステムとして固定化している。

風評とは、結果として、経済的損失と偏見・差別という形で可視化されるものであるが、その背景にあるのは、過剰な配慮の連鎖の構造であり、それが時間経過の中で忖度のシステムとして固定化したものだ。これは積み重ねられてきた実証的な調査・研究が明らかにしたものにほかならない。

福島第一原発による被害の中で、最後まで残る問題は何か。恐らく「福島第一原発の廃炉」とこの「風評」がそのツートップだ。これらはともに長期に亘って向き合わざるをえない課題だが、その背景にあるのは、これらが「何がわからないかがわからない」=Unknown unknownsの塊としてはじまっているということにある。

福島第一原発事故からの復興の困難さは、参照すべき過去の事例の不足にあることは改めて言うまでもない。

ただ、チェルノブイリ、TMIといった直接的な原発事故の事例にとどまらず、米国や欧州の核燃料や放射性廃棄物を扱う原子力関連施設で進められてきた廃止措置等の事例から広く学んだり、過去の公害やBSE問題に象徴されるような非原子力分野における生活の場への科学的リスクの発露に関連する事例にも目を配ったり、あるいは福島の地域社会で課題を解決すべくなされてきた様々な試行錯誤の中で見えてきた成功事例に光を当てたりする中で、復興の道筋が少しずつ見えてきたこともある。「何がわからないかがわからない」状態から脱してきたわけだ。

Unknown unknownsの領域にある諸問題を、あらゆる努力を払いながら少しずつ「わからないけれども何を解き明かすべきかは把握している問題」Known unknownsの領域にうつし、「対処のしようがわかった(対処すれば解決できる)問題」known knownsの領域にまで移していく。そして、新たな「何がわからないかがわからない」=Unknown unknownsに光があたるようにして、それにとりかかっていく。この良い循環が今後も持続的に続くことが「福島第一原発の廃炉」と「風評」の抱える問題の解決には求められる。先に述べたような風評についての実証的な研究の積み重ねはその一例と言えるだろう。

その上で、この循環の中で得られた知見を社会全体に生かしていくことも重要なわけだが、それも簡単ではない。何が必要か。

それは破壊された信頼の回復に尽きる。ここで言う信頼とは、「個人間の信頼関係」や政治・行政や科学的専門知といった「社会システムへの信頼」、あるいは個人々々の中の「自己信頼」も含む。

先にあげた「付度のシステムの固定化」の根本にあるのは「信頼」の破壊だ。信頼とは「複雑性縮減の装置」だ。本来、全く違う生い立ちや思考様式や人間関係を持つ個人同士でコミュニケーション(ここで言うコミュニケーションとは、いわゆる会話やメールのような意味にとどまらず、カネを払う/払われるという経済的コミュニケーションなど含めた広義のコミュニケーションを指す)を成立させること自体、奇跡的なものだ(という見方を社会学ではする)。「全く違う生い立ちや思考様式や人間関係を持つ個人同士でコミュニケーション」をするのは複雑性で溢れている。これは一見、成立しそうにもないが、これを成立させるには複雑性を縮減する必要がある。その背景にあるのが信頼だ。信頼が確保されるほどコミュニケーションを阻害する制約(=複雑性)は消えていき、コミュニケーションはスマートになる。つまり、信頼はあらゆるコミュニケーションの潤滑油的な役割を果たす。逆もまた然りで、信頼が破壊されると、様々な位相において、普段は無視できていた複雑性が浮き彫り

になりコミュニケーションは困難になる。「風評」の問題もそうだし、科学的事実が伝わらない故に本来解決して良いはずの課題が擬似問題化されて棚上げされて延々解決しないでいるような様々な現実も、背景にはこの信頼の問題、複雑性縮減の装置の不具合の問題が横たわっている。

では破壊された信頼を回復するには何をすればよいのか。重要なのは信頼が成立しているプロセスを可視化していくことだ。農作物の風評払拭のために作物の線量を測定してそのデータを誰でも参照できるようにする。実際に農作業しているところや農家の素顔をメディアを通して、あるいは田植え体験会や収穫・試食イベントでのリアルな接触を通して見せる。福島の観光地が賑わっている様子や避難指示が解除された地域、福島第一原発構内で多くの人や車が活発に行き来している様子を見る機会を増やし、さらにそれを見た人の口コミを広げていく。そういった「信頼が既に成立し様々なコミュニケーションが立ち現れているプロセス」を可視化していく作業は既に行われてきているし、今後もより拡大されていくべきだろう。

同時に、新たな中間集団を形成していくことも重要だ。中間集団とは、政府・行政のような「お上」と、社会を構成するそれぞれの住民・個人との中間に入るものであり、地域の自治会や同業者団体、労組がそうであるし、学会もその一つだ。社会にある様々な課題を解決し、社会を営んでいるのは政府・行政、あるいは大企業と個人だけではない。そこに還元されないような大小様々にある中間集団も重要な役割を果たしている。しかし、この中間集団は、一般的には近代化の中で壊れていく。社会学ではこれを個人化と呼ぶ。

かつては中間集団が、そこに所属する人々がつながりあいながら、様々なことを学び課題に取り組む場であったし、困ったときには互助の場ともなってきた。しかし、価値観や暮らし方・働き方が多様化し社会の流動性が高まる中で中間集団の維持は容易ではなくなり、中間集団に所属せずにバラバラな個人として生きる、そうせざるをえない人が増え個人化が進んでいる。そのほうがしがらみから自由に生きられるという側面もあることがそれを後押しする。

しかし、バラバラな個人で構成される社会において、ひとたび信頼が破壊されれば、その回復の糸口は見出しにくい。先にあげたような「信頼が成立しているプロセスの可視化」は、単発のもので終わりがちだが、それを持続的にするには、そこに様々な中間集団が関わったり、新しい中間集団が構築されていくことが望ましい。中間集団が持つような小さな範囲での相互の信頼関係はその状況を再度回復するきっかけになるはずだ。

(2019年6月10日記)



脱炭素化に向けた再生可能エネルギーの限界と原子力の必然性

—人新世 (Anthropocene)—



松井 一秋 (まつい・かずあき)

日本原子力学会フェロー
エネルギー総合工学研究所研究顧問
OECD/NEA-NDC 議長, IAEA/TWG-LWR
議長, GIF-PG 前メンバー

何年も前の話でいつのことだったかも確かではないが、世界エネルギーモデルの議論をしていたことがある。やれ資源量は、賦存量はだの原子力の導入速度は、高速炉の利用可能性だの議論だが、その中で再生可能エネルギー、特に太陽光(PV)について、将来パネルの値段が安くなって世界中の海にでも敷き詰め、そしてそれを送電線でつなげば世界のエネルギー問題は解決するのではないかという議論もあった。当時 PV のパネルや発電端コストは高かったこともあって、原理的にはこういうこともあるのかしらぐらいの議論で終わったような気がする。地球全体で見ればどこかでは太陽が照っていて、そこでの電気を需要地へ送ればよいという話である。南米アルゼンチンのパタゴニアでは信じられないほどの風が吹くそうで、そこに風車を並べて発電する。電気需要が周辺にはあまりないようで、水の電解プラントを作って水素を作り、その水素を液化して日本に持ってくるという構想も全く夢物語とは言えまい。確かに特に経済性、いつ投資が回収できるのかや、エネルギーの偏流の問題が立ちはだかっているのだろう。

人類はその繁栄のため、要するに地球並びに人類を除くその生き物たちを多く犠牲にしている。昨今の温暖化問題でも地球は高熱を発して怒り心頭寸前なのかもしれない。それにしてもよくもまあ掘りまくって掘りまくって、化石資源をががつと追いかけてきたものだ。しかもかなり短いときの間で。もっともそのおかげで今日、この世界、ことにいわゆる繁栄する先進国では物じゃぶじゃぶで金余りときている、があるわけだが。結局のところ、膨大に繁殖した人類は地球環境そのものを変えつつあるといつてよい。善悪の問題ではない、単に客観的な展開ということである。外来生物の侵入によるその土地の生態系ひいては環境が変わってしまうということとの共通点もありそうだ。

地球の歴史は、太陽やその惑星系と同じく 46 億年だ

そうだが、化石や地層から区分する地質時代としては、現代は新生代・第四期・完新世だそうだ。新生代はおおよそ 6,600 万年前、中生代・白亜紀の生物、恐竜の大絶滅というエポックによって分けられている。生き物の絶滅としてはこれは 5 番目ということになっていて、現代は第六の大絶滅期にひた走っているようである。過去の大絶滅は大きな隕石が落ちたりとかの地球環境の変動によるものだが、今回は犯人がはっきりしている。地質的にも変化がすでに表れていて、もはや完新世は脱している。「人新世 (Anthropocene)」ではないかとも言われている。炭酸ガス濃度急上昇による環境の変化が地質的な刻印を残すということだが、もうひとつ、核兵器実験による微量のプルトニウムが地層で検出可能で、新生代は 1945 年から始まるという論がある。いくら地球が怒ろうが、人類は後戻りすることはないのではないのか？はいご破算にしてとして、江戸だの縄文時代に戻れるわけがない。

さて福島事故から 8 年、わが国では直後、原子力発電停止による電力供給危機が騒がれたが、大量の輸入化石エネルギーで何とかしのいでいる。この状態はいわば緊急避難であって、持続可能ではないのは自明なのだが、暑さのど元過ぎればなんとやらで、まあ何とかかなるのでは、あるいは私の知ったことではないもね、というなんとも嘆かわしい状況である。人為的な炭酸ガス放出を停止ないし抑制しようというなら、単純化すると、化石エネルギーを使わずに、再生可能エネルギーか原子力かということになる。そして、原子力は事故が怖いし、危ない廃棄物が出るので敬遠したい、風車や太陽パネルは相当みっともないことになるのかもしれないが、しかし怖い、危険よりはましじゃないか、という落ちか？

風車や太陽パネルは地域レベルで、外部からの安定的なバックアップが期待できる環境でしか利用できないとする時代は少しずつ後退しつつあるのは事実である。し

かしドイツのエネルギー政策(ヴェンデ)の破綻を見ても(シュピーゲル誌), かなり革命的なエネルギー貯蔵技術の実用化と大量導入が必要となる, それでも原子力に代表される安定的な電源の位置づけが変わることはないと思われる。

本誌でも紹介した現実の国レベルのグリッドにおける, 原子力と再生可能の共存システムについての OECD/NEA の研究, 「原子力と再生可能エネルギー: 電力システムの脱炭素化におけるシステムの影響」¹⁾, システムとしての経済性と脱炭素政策に向けての提言からなる, によると,

「電力卸売市場が規制緩和済みの OECD 諸国は, 急速な脱炭素化とそのための適正な投資を実現すべく難題に直面している。その原因は大きな固定費を要する技術は比較して不利になっていること, 確固たる炭素価格の不在, 電力システムへの影響を無視した間欠性再生可能技術への過大な政策的支援が指摘される。その中で, 再び規制見直しのリスクもあり, 明確な電力市場改革ロードマップが必要であり, 次の 5 本の柱に留意が求められる。

1. 効率的な供給のための現在の短期的な電力市場の維持; その中で, 低炭素技術への投資を促す明確な制度の組み込み。
2. 炭素価格の導入; 制度の問題で, 政治的な抵抗が大きい, 即効性のある手立てであり, 当面 CO₂(炭酸ガス)1 トン当たり 50 ドル程度が妥当か。(我が国のクレジットは 2019 年初めで 1,800 円まで上がっている)
3. 適正な発電設備, 柔軟性(機動性), 送配電設備を確保するための長期的な枠組みの整備; ネットワークのデジタル化, 電池, DSM(電力需要管理システム)の開発導入なども含む。
4. 低炭素技術への長期的な投資を促進する適正なメカニズムの創生; CRM(容量メカニズム), FIT, PPA(電力販売契約), CFD(差金決済取引), 債務保証など。
5. システムコストの内部化

この研究対象のシステムは電力貯蔵の揚水と他国との電力融通も考慮していて, 間欠性の再生可能エネルギーとして, 風力および太陽光の電力としてのシェアとして, 1 割, 3 割, 5 割, 75%まで入れてどうなるかを見ている。まあ 3 割で相当きついと見れるが, 将来電力貯蔵や融通のためのデジタル化などを期待して, 4 割までとして残り, 6 から 7 割には原子力や, CCS や CCUS(炭素隔離利用貯蔵)を前提とした化石燃料としている。かなり再生

可能エネルギーに対して甘いように見えるが, 大衆が描く幻想に思いをはせるとこうなるということか?

我が国の陸上風力のポテンシャルは約 2 億 kW, 年間発電量約 2,000PJ とのことで, 非現実的ではあるがその半分 1,000PJ に対応する蓄電池システム(1 日ごとの充放電, @ 10 万円/kWh)を導入すると約 280 兆円, 風力発電の方が kW 当たり 30 万円とすると 62 兆円, 合計で約 340 兆円に上る。(電力時事通信, 5 月 8 日 2019 年, エネルギー総合工学研究所橋崎部長による試算)今年度の一般会計予算は約 100 兆円と比べてもかなり高額であることがわかる。毎年 3 兆円強出して 100 年かかる勘定である。

最近の書店で平積みになっていたアトキンソン氏の「日本人の勝算」でも指摘されているように, わが国の国際的な比較競争力は相当沈下してしまっていて, もはや見る影もない。生産性の改善, 向上が急務で, そのための抜本的な施策が求められ, 実際すでに政策となったり, 最低賃金の値上げなど提案されているものもあるようである。その際, きちんとした統計なり分析に基づくいわゆる EBPM(Evidence Based Policy Making)「できるだけ証拠に基づいた政策を立案する」が, 人々の理解を得るためにも効果的とされている。

確かに政治は大衆から遊離しては成り立たないのは事実としても, エネルギー政策, 原子力政策において, きちんとした統計なり分析に基づく EBPM が, ことに我が国において求められているのは自明ではないか。杓子定規の規制やコンプライアンスなどによる生産性の低下は, 大衆迎合の衆愚となりえて, 将来に禍根を残す。多分施政者はわかっているのだろうが, やはりポピュリズムが怖いということか, 令和の始まりにあたり, 我が国の新たな成長を促す構造変革を成し遂げるきっかけにしたいものである。

ちょうどこの原稿を書き上げようとしていた 5 月 28 日に, OECD/NEA とは兄弟関係にある IEA, 国際エネルギー機関は今まで必ずしも原子力エネルギーについて理解があったとは言い難かったが, ついにここにきて原子力なくしては地球温暖化リスクが高いと表明した報告書を公表した。(Nuclear Power in a Clean Energy System, May 2019)

(2019 年 5 月 29 日 記)

－ 参考文献 －

- 1) Nuclear Energy and Renewables: System Effects in Low-carbon Electricity Systems, <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2012/7056-system-effects.pdf>



東電、福島第二の廃炉を正式決定

東京電力の小早川智明社長は7月24日に福島県庁を訪問し、内堀雅雄知事に福島第二原子力発電所の4基を廃炉にする方針を伝え、内堀知事は30日にそれを了解した。これを受けて東電は31日に開いた取締役会で、4基の廃炉を正式に決定した。

福島第二原発は1982年から1987年にかけて運転を開

始。東日本大震災時には1回線だけ残っていた外部電源の活用などにより、地震発生から4日後には冷温停止し、その後は運転を停止していた。また、小早川社長は昨年6月に福島県の内堀知事に対し、廃炉の方向で検討に入ることを伝えていた。

(原子力学会誌編集委員会)

エネ調基本政策分科会、エネルギー動向で意見交換

総合資源エネルギー調査会の基本政策分科会(分科会長＝榊原定征・東レ社友/元社長・会長)が7月1日、6か月ぶりに開催され、昨今のエネルギーを巡る動向に関し意見交換を行った。

6月29日に閉幕したG20大阪サミットを前に、6月15、16日に、「G20持続可能な成長のためのエネルギー転換と地球環境に関する閣僚会合」(G20軽井沢会合)が開催された。7月1日の分科会では、G20軽井沢会合で環境と成長の好循環やエネルギー転換の重要性について合意されたことを資源エネルギー庁が説明したほか、最近のエネルギー安全保障・地政学を巡る動向・変化を、(1)需給構造、(2)地政学リスク、(3)環境認識、(4)テクノロジー、(5)日本の立ち位置——に整理し、委員に意見を求めた。

需給構造、地政学リスクを巡る最近の世界情勢として、資源エネルギー庁は「米国のエネルギー純輸出国化」、「中東情勢の緊迫化」などを例示。寺島実郎氏(日本総合研究所会長)は、「ホルムズ海峡は、日本に輸入される石油の80%、LNGの25%が通るが、米国に向けてはもう一滴の石油も通っていない」と国情の違いを指摘し、日本として新たなエネルギー戦略を検討していく必要性を強調した。

4月に福井県知事に就任し今回初めて同分科会会合に

出席した杉本達治氏は、昨夏策定の第5次エネルギー基本計画で掲げる「2030年度に原子力比率22～20%」や40年超運転の実現に向け「国の動きがみえてこない」としたほか、使用済み燃料問題や原子燃料サイクルについては「放置されたままのようにみえる」と、国の原子力政策に対する姿勢を厳しく指摘。国民理解活動の促進とともに、昨今の原子力関連学科の衰退や原子力プラントの長期停止・廃炉の進展にも言及し、将来を見通した人材育成や立地地域振興策の拡充などを求めた。

G20軽井沢会合では、高レベル放射性廃棄物問題に関し、「最終処分の実現は、原子力を利用するすべての国の共通課題」との観点から、世界の主要な原子力利用国の政府が参加する「最終処分国際ラウンドテーブル」を立ち上げることで賛同が得られ、第1回ラウンドテーブルが10月中旬にOECD/NEA協力のもと、パリで開催される運び。これに関して、総合資源エネルギー調査会の放射性廃棄物ワーキンググループ委員長を務めた増田寛也氏(東京大学公共政策大学院客員教授)は、処分場立地の適性を色分けした「科学的特性マップ」の公表から間もなく2年が経つところ、「具体的な勉強会立ち上げの必要もある」などと述べた上で、ラウンドテーブルによる国際的知見の共有が解決の糸口となる期待を述べた。

(資料提供：日本原子力産業協会)

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

欧州原産会議、脱炭素化を前提とした経済実現でマニフェスト

フォーラム(欧州原子力産業会議)は6月26日、経済成長や雇用を維持しつつ、欧州が2050年までに脱炭素化を達成するには、新たに約1億kWの原子力発電設備設置に向けた投資が必要などとする欧州原子力産業界の共同マニフェストを公表した。

これは欧州連合(EU)加盟国の政策立案者に対して、同産業界のリーダー達が取りまとめたもの。EUの執行機関である欧州委員会(EC)は昨年11月、2050年までに近代的で有望、かつ競争力のあるカーボン・ニュートラル(CO₂の排出量と吸収量が同量)な経済を目指した戦略的長期ビジョン「クリーン・プラネット・フォー・オール」を採択していた。

フォーラムのY. デバゼイユ事務局長はこれを「非常に野心的な目標」と評価し、脱炭素化のために利用可能なツールはすべて最大限に活用することが重要だとした。その上で、「原子力が地球温暖化との闘いにおいて極めて有用な資源であることは国際的に認知されており、我々原子力産業界としても自らの責務を果たす準備は出来ている」と宣言。同ビジョンの目標達成を阻む可能性がある障害は、原子力産業界とともに克服していくことを呼びかけている。

フォーラムはまず、欧州経済の脱炭素化を実現するには、低炭素な発電技術すべてに対する投資が重要になると指摘。これは欧州の既存の原子力発電所における運転の長期化に加えて、相当量の新規原子力発電設備の建設を意味するとした。具体的には約1億kWが新たに必要だと述べており、どちらも欧州の原子力産業界や関係機関、EU加盟国が一丸となって取り組むことにより、達成できるとフォーラムは認識。その際、原子力産業界が努力を傾注すべき点として、以下の項目を挙げている。

- ・必要量の原子力発電設備を期限通りに、競争力のあるコストで設置する。
- ・その他の部門の低炭素化で原子力産業界が支援可能な分野を特定するため、欧州で研究開発と技術革新を進める。
- ・エネルギー供給保証に貢献する。
- ・責任ある方法で使用済燃料と放射性廃棄物の管理を続ける。
- ・人的資源を維持するとともに、確保のための投資を行う。

・欧州域外の市場に向けて、原子力技術や技能を輸出するための盤石な基盤を構築する。

それと同時に、EUに対しては以下の点を実行するよう勧告している。

- ・2030年や2040年までの中期的CO₂排出抑制目標も含めて、EU電力部門における2050年のカーボン・ニュートラル化目標を受け入れる。
- ・欧州原子力共同体(ユーラトム)も含めて、明確で一貫性のある安定したEUの政策枠組を維持する。
- ・低炭素で競争力のある発電オプションすべてに対し、投資を促進する市場の枠組を開発し、実行に移す。
- ・送電網の安定化に資する原子力の役割を理解した上で、再生可能エネルギーの発電シェア拡大に繋がるような、安定した低炭素エネルギー・ミックスの実現を支援する。
- ・小型モジュール炉(SMR)などの将来技術も含め、欧州が原子力技術面でリーダーシップを維持するための強固な産業戦略を策定・実行する。
- ・原子力技術の継承や世代交代を確実にを行うため、若い世代を原子力産業界に呼び込むための支援を行う。

【米国】

TVAのSMR用事前サイト、安全面の審査をクリア

米原子力規制委員会(NRC)のスタッフは6月14日、テネシー峡谷開発公社(TVA)が同州のクリンチリバー原子力サイトで、小型モジュール炉(SMR)の立地を想定して申請していた「事前サイト許可(ESP)」について、発給を妨げるような懸念はないとする安全評価報告書の最終版(FSER)を発行した。

NRCスタッフはすでに今年4月、この申請の環境影響面についても問題はないとの評価報告書・最終版(FEIS)を発行済みであることから、FSERの発行により、同サイトでのESP審査は技術的側面の審査がほぼ完了。NRCは今年の夏にFSERとFEISに関する公聴会を開催し、2020年10月から始まる2020会計年度の第2四半期にも、NRCの委員5名がESP発給について最終判断を下すと予想されている。

TVAが2016年5月に申請書を提出した際、実際に建設するSMR設計を特定しておらず、4種類の軽水炉型SMR設計の採用を仮定した「プラント・パラメーター・エンベロープ(PPE)」方式を活用。ここでは、バブコック & ウィルコックス(B&W)社製のSMR設計「mPower」、ニュースケール社製「ニュースケール・パ

News

ワー・モジュール」, ホルテック社製「SMR-160」, およびウェスチングハウス社製 SMR のパラメーターが技術情報として提示されていた。

TVA は 2013 年 2 月, 「mPower」の認可申請準備に向けて B&W 社と作業契約を結んでいたため, 同設計が採用されると見られていた。しかし, 追加で出資する企業が集まらず, 2017 年に同設計の開発プロジェクト終了がメディア情報として伝えられている。

2016 年の申請書によると, TVA はクリンチリバー原子力サイトにおいて単機出力が 80 万 kWt を超えない SMR, あるいは 2 基以上の SMR で合計出力が 242 万 kWt(電気出力 80 万 kW)を越えないものを建設する計画。これに対して NRC スタッフは, 以下の結論を勧告事項として FSER に明記している。すなわち,

- ・PPE に含まれている SMR 設計であれば, 周辺住民の健康や安全をリスクにさらすことなく建設・運転が可能である。
- ・「放射性雲からの被ばくに対する緊急時計画区域」について, NRC スタッフは TVA が提案する(従来とは異なる)避難対象区域の区分方法を妥当と認めており, ESP 申請に関する FSER は発行すべきである。
- ・クリンチリバー原子力サイトに対する ESP を発給すべきである。

エネ省, 2019 年度の先進的原子力研究開発で 5 千万ドル

米エネルギー省(DOE)は 6 月 27 日, 国立研究所や大学等における先進的原子力技術の研究開発プロジェクトに対し, 2019 会計年度の支援金として 4,930 万ドルを投資すると発表した。

あらゆるエネルギー源を活用するという全方位的エネルギー戦略の中で, DOE は原子力が重要な部分を占めると認識しており, 将来を見据えた先進的原子力技術の開発に毎年投資支援を行っている。今年は原子力関係の研究開発と施設利用, 分野横断的技術やインフラの開発など, 25 州における 58 件のプロジェクトを対象に選定。初期段階の研究開発を支援することにより, 原子力発電が今後も長期的にクリーンで信頼性が高く, 一時的な機能不全等から復帰する力(レジリエンス)も強い電源であり続けられるよう支援していく考えだ。

2009 年以降, DOE 原子力局がこの関連で行った投資は, 今年の支援額も含めて 6 億 7,800 万ドル以上。これらは, クリーン・エネルギー開発における技術革新で米国がリーダーシップを維持するとともに, 原子力関係の次世代エンジニアや科学者を教育訓練するために活用されている。

DOE の投資は毎年, 関係イニシアチブの「原子力エネルギー大学プログラム(NEUP)」, 「原子力エネルギー実践技術(NEET)」, および「原子力科学ユーザー施設(NSUF)」を通じて行われている。

NEUP としてはまず, 大学の主導により 23 州で行われている 40 件の原子力研究開発プロジェクトの支援に 2,850 万ドル以上を提供。今回は, 小型モジュール炉(SMR)や熔融塩炉, 鉛冷却高速炉関係のプロジェクトが主流。全米でもトップクラスの科学・エンジニアリング関係学部とその学生に, 民生用原子力部門における革新的技術やソリューションの開発機会を与える。

DOE はこのほか, 7 件の大学主導プロジェクトに対して, 研究炉と関係インフラの改善用に 160 万ドルを提供。ここでは, 大学の研究炉 25 基と研究・訓練用インフラについて, 安全性や性能の改善と学生の教育訓練に関わる性能のアップグレードが行われるとした。

DOE はまた, 国立研究所と大学が実施する NEET 関連の研究開発プロジェクト 5 件に, 合計 450 万ドルを供給する。これらのプロジェクトでは, 新型炉用の先進的なセンサーや計装設備の開発, 機器の製造方法, および材料物質の開発など, 分野横断的な課題に取り組むことになる。

DOE はさらに, 原子燃料や材料物質の適用調査に NSUF を活用するという大学主導のプロジェクト 2 件, 国立研が主導する 1 件, および産業界が率いる 3 件を選定。中性子とイオンの照射試験や照射後試験施設, シンクロトロン・ビーム設備, 試験の設計・分析に必要な技術支援などについて, 施設と専門的知見を活用するこれら 6 件の合計で, 1,000 万ドル以上を提供する。

これに加えて, 6 件のうち共同で研究開発が行われる 3 件に対しては 1 件につき 50 万ドルずつ, 合計 150 万ドルを拠出。また, NEUP の研究開発プロジェクト 2 件については, NSUF 施設の利用基金として合計 300 万ドルを支援するとしている。

【英国】

温室効果ガス排出量を 2050 年までにゼロとする法案可決

英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)は 6 月 27 日, 国内すべての温室効果ガス(GHG)排出量を 2050 年までに実質ゼロとすることを, 法的拘束力のある目標として掲げた法案が可決・成立したと発表した。

同法案は, GHG 排出量を 1990 年レベルから少なくとも 80%削減するとした「2008 年気候変動法」の改正法となるもの。BEIS が 2017 年 10 月に公表した「クリーン成長戦略」を前進させる内容で, GHG の排出量削減を図

りつつ低炭素産業を中心に経済成長も維持するという「グリーン成長」を、英国の近代的な産業戦略の中心部分に据えている。目標に法的拘束力をもたせたのは、世界主要7か国(G7)のなかでも英国が最初であり、その他の国が追従すべき道を英国が先駆的に開拓中だと強調している。

BEISの発表によると、英国は産業戦略を通じて GHG 排出量をすでに 42%削減した一方、72%増という経済成長を達成。2030 年までに環境保護関係の仕事に従事する「グリーン・カラー」雇用が 200 万人規模に拡大し、低炭素経済に関わる輸出総額も年間 1,700 億ポンド(約 23 兆 1,800 億円)に成長すると見込んでいる。

2050 年までに GHG 排出量の実質ゼロ化という目標は、世界でも最も意欲的なものの一つだが、これは独立の立場の諮問組織である気候変動委員会が勧告していた。実質ゼロということは、大気中に放出された GHG が植樹政策や二酸化炭素の回収・貯蔵(CCS)等の技術により相殺され、バランスの取れた状態になることだと説明している。

今回の法案は、下院・省別特別委員会の R. リーブス委員長が 6 月 12 日付けで議会に提出していたが、英国原子力産業協会(NIA)の T. グレイトレックス理事長はその際、「(原子力産業界にとって)間違いなく有益なニュースだ」とコメント。「原子力発電所は数十年にわたって、一貫して信頼性の高い低炭素なエネルギーを大規模に供給してきたが、GHG 排出量の実質ゼロを達成する上でも重要な役割を果たす。だからこそ、経年化が進んだ既存の原子力発電所のリプレースで、政府が必要な支援を提供することが非常に重要になる」とした。また、「新規の原子力発電所が建設されれば、我々が必要とする低炭素電力が供給されるだけでなく、英国中で数千人規模の雇用が継続的に提供されるだろう」と強調していた。

【ベルギー】

送電会社、脱原子力後の発電容量不足を警告

ベルギーのブリュッセルに本社拠点を置く送電会社のエリア・グループは 6 月 28 日、ベルギーの総発電量の約 50%を賄っている商業炉全 7 基を予定通り 2025 年末までに全廃した場合、発電容量の不足分がこれまでの予測よりも拡大するとの調査結果を公表した。

同社の発表によると事態の緊急性は増してきており、電力の供給保証を持続するには体系的なセーフティ・ネットが必要になるとした。このため、5 月の総選挙で発足したばかりの暫定政権と次期連邦政府に対しては、

深刻な容量危機に陥ることを避けるため、必要となる資源をすべて期限までに必ず確保することを要求。昨年講じられた努力にも拘わらず、ベルギーでは脱原子力の時期を遅らせるシナリオも含めて、現段階でいかなるシナリオにも対応する準備ができておらず、もはや時間的猶予はあまり残されてないと訴えている。

調査結果のキーポイントとしてエリア社は、ドイツなどの近隣諸国で石炭火力からの離脱が加速しているため冬季の電力輸入に悪影響がおよび、ベルギーが脱原子力への対応で 2025 年時点に必要な容量は、2017 年後半に実施した前回調査の 360 万 kW から 390 万 kW に拡大したと指摘。また、近隣諸国の脱石炭火力の加速は、脱原子力達成前の 2022 年から 2025 年の期間でさえ、ベルギーで 100 万 kW を超える追加容量が必要になることを意味するとした。

このような必要性を考慮すると、連邦政府が今後、容量補填メカニズム(CRM)の導入努力を続けることは非常に重要で、CRM によりベルギーは、2025 年以降もエネルギーの供給保証を維持するための、堅固なセーフティ・ネットを得るとしている。

この件に関してエリア社は、たとえ原子力設備の一部を更新した場合でも、必要な設備容量を期限までに全面的に準備するための投資(体系的介入)は必要であり、連邦政府が CRM の早期導入を最優先とすることを要請。エネルギー市場を容量市場で補うような規模の大きい CRM の導入は、脱原子力後のエネルギー供給を保証する際、効果的なソリューションになるとした。また、この CRM は採用技術面で中立的でなければならず、コストも可能な限り低く、かつ欧州連合(EU)の法律に沿ったものでなくてはならないとしている。

また、連邦政府に対する「実施要請」のなかでエリア社は、例えばドール原子力発電所 4 号機やチアンジュ 3 号機の運転期間を延長するなど、脱原子力を一層緩やかに進めるという代替シナリオも効果が大きいとした。ただし、この場合でも相当量の代替容量が必要になるほか、運転認可を更新するなど、原子炉のアップグレードが必要。シナリオそれぞれについて適切な方策が要求され、その影響や取られるべきアクションについても明確でなければならないため、代替容量を確保するのと同じ様に、原子力発電所の所有者と直ちに協議を開始することが重要になると同社は指摘している。

【ハンガリー】

パクシュ発電所 2 期工事で付属施設の建設工事開始

ハンガリー唯一の原子力発電設備であるパクシュ発電

所で、2期工事(5, 6号機)の建設工事を担当する国営MVMグループのパクシュⅡ開発会社は6月20日、建設サイトにおける準備作業の一環として、補助建屋や事務棟、倉庫など80以上の関係施設の建設工事を同日に開始したと発表した。

120万kW級のロシア型PWR(VVER)を2基建設予定の同プロジェクトは、運転期間を延長して稼働している1期工事の4基(各50万kWのVVER)を、最終的にすべてリプレースすることになる。

補助建屋等の建設工事と並行して、これら2基の建設許可を申請するため、パクシュⅡ開発会社はロシアのASEエンジニアリング社と緊密に連携し、約30万ページにおよぶ採用設計の技術文書を作成中。国家原子力庁(HAEA)に申請書が提出されるのは来年以降と予想されており、最初のコンクリート打設が行われるのは、早くても2021年になると見られている。

ハンガリー政府は2014年1月、この増設計画をロシア政府からの融資により実施すると発表、翌月には総工費の約8割にあたる最大100億ユーロの低金利融資について両国が合意した。12月には双方の担当機関が、(1)原子炉建設のエンジニアリング・資材調達・建設(EPC)契約、(2)完成炉の運転・管理契約、(3)燃料の供給契約を締結している。

しかし、欧州連合(EU)の執行機関であるEC(欧州委員会)が2015年11月、これらの契約が公的調達に関するEU指令に準拠しているかや、EU域内の競争法における国家補助規則との適合性についても調査を開始。ECはそれぞれについて、翌2016年11月と2017年3月に承認裁定を下したものの、その他の問題も解決する必要性があったため、プロジェクトの実施は当初計画から少なくとも3年遅れている。

ハンガリーはパクシュ原子力発電所で総発電電力量の約50%を賄っており、同発電所の拡張プロジェクト全体を管轄するJ. シュエリ(無任所)大臣は、ハンガリー国民と国営企業が信頼性の高い国内電源から安価な電力を得ることは、ハンガリー経済の競争力を高める上で必要不可欠との認識を示した。

【チェコ】

政府、ドコバニ増設計画の資金調達任務を国営電力に指示

チェコ政府は7月8日、ドコバニ原子力発電所(51万kWのロシア型PWR×4基)でリプレース用原子炉2基を増設する計画について、国営電力であるCEZ社のグループが100%子会社を通じて建設資金を調達するという投資家モデルを承認した。

これは、今年からA. バビシュ首相が議長を務めている「原子力発電所の建設に関する常設委員会」の勧告に従ったもので、これにより新規の原子力発電設備建設に関する協議は具体的な準備を行う段階に移行。同委員会が職務を遂行できるよう、2019年から2020年までの期間に3,570万チェコ・コルナ(約1億7,000万円)の予算を拠出するほか、政府はドコバニ2期工事の建設契約について、2020年末に入札を実施するための準備を進めている。また、投資金の回収問題により2014年に頓挫したテメリン原子力発電所3, 4号機増設計画についても、同常設委員会の勧告に基づき、ドコバニ発電所の拡張後についても着手可能な状態としておく考えを表明している。

チェコ政府は、十分な電力供給とエネルギー自給を保証するには、新たな原子炉が必要であると認識。2015年5月の「国家エネルギー戦略」のなかで、現在約35%の原子力発電シェアを2040年までに6割近くまで上昇させていかねばならないとしたほか、その翌月に閣議決定した同戦略のフォロー計画「原子力発電に関する国家アクション計画(NAP)」では、化石燃料の発電シェアを徐々に削減する将来のエネルギー・ミックスにおいて、原子力が再生可能エネルギーとともに果たす重要な役割が強調された。同計画では、テメリンとドコバニ、2つの既存原子力発電所で1基ずつ、可能であれば2基ずつ増設する準備を始める必要があるとしており、2037年までに1号機が閉鎖されるドコバニ発電所については特に、優先的に増設を行う方針である。

チェコ政府は今回、原子力関係の政府コミッショナーであるJ. ミラ氏を中心とする専門家チームとして、新たに原子力や原子炉建設等の分野で著名な専門家5名を指名。常設委員会用に承認した予算の中には、2022年までの同チームの経費が含まれている。

同じ日に産業貿易省が公表した資料によると、政府は今後、政府が資金調達するのと同じ条件でCEZ社の子会社が新規原子炉建設で信用取引を行えるよう、同グループと契約を結ぶ。政府としては、増設にともなう法制面と規制環境面の安定性を保証する方針だが、英国政府がヒンクリーポイントC原子力発電所建設計画で採用した差金決済取引(CfD)のように、行使価格との差額を返金するといった考えはない。

今回選択した投資家モデルが、欧州連合(EU)域内の市場規則に適合しているかという点については、欧州委員会(EC)と今後、協議を行うことになったとした。建設契約を手配する準備段階においては、資金調達面の助言チームや専門家、十分な財源などが確実に必要となるため、新しい原子炉の性能合理化や関連するリスクなどについて分析しなくてはならないとしている。

【フィンランド】

最終処分場建設計画、地上の使用済燃料封入施設に着工

世界初の使用済燃料最終処分場をフィンランドのユーロヨキで建設しているポシバ社は6月25日、地上設備となる「使用済燃料封入プラント」の建設に着手すると発表した。

これに伴い、処分場建設サイトの地下450m地点にある岩盤地質や水文学特性の研究調査施設「ONKALO」で掘削した区画にも、最終処分の開始に必要なシステム等を設置する計画。プロジェクトの成功には、安全な最終処分コンセプトの開発で十分な経験を持つ専門家や、プロジェクト管理面等でもプロの人材が必要であることから、同社はこれらの作業についても近い将来、契約を結ぶ予定である。また、現在のスケジュールで、同社は2023年頃に処分場の操業開始を見込んでいるが、これには別途、操業許可の取得プロセスが必要になるとしている。

フィンランドでは、CO₂を出さない原子力発電所で発電する前提条件として、発電所の利用期間全体にわたる管理義務が設けられている。このため、国内でロピーサとオルキオト、2つの原子力発電所をそれぞれ操業するフォータム社とティオリスーデン・ボイマ社(TVO)は、使用済燃料最終処分の実施主体となるポシバ社を共同で設立した。

同社は2000年に、オルキオト原子力発電所の近郊エリアを処分場の建設サイトに選定。同じ年に政府が最終処分プロジェクトを「原則決定(DIP)」したの続き、議会も2001年に同DIPを承認した。ポシバ社は2012年12月、地下約400～450m地点に深地層処分場を建設する許可申請書を政府に提出しており、2015年11月に同許可を取得。翌2016年11月から、総工費約5億ユーロ(約609億円)の建設工事を開始した。

同処分場は、地上の使用済燃料封入プラントと3種類の地下設備で構成される。封入プラントでは、輸送キャスクを受け入れた後、使用済燃料を最終処分用キャニスターに入れ替えるが、この作業は燃料取り扱いセル内で厳密に行われる。また、処分用キャニスターの内部には、使用済燃料集合体とともにアルゴン・ガスが充填され、蓋の部分を電子ビームで溶接。溶接部の密閉性は、X線や超音波などの非破壊検査で点検することになる。

ポシバ社によれば、同プラントは燃料の封入途中で何らかの事象が発生した場合でも、環境中に危険な量の放射性物質が放出されないよう設計されており、点検をパスしたキャニスターは、リフトかアクセス・トンネル経由で深地下の処分施設まで運ばれると説明している。

【ロシア】

ロスアトム社、トルコ初の原子力発電所用に人材教育

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は7月4日、トルコ初の原子力発電所として建設を請け負ったアックユ発電所(120万kW級のロシア型PWR×4基)で勤務する人材の教育訓練を同社の技術アカデミーで開始したと発表した。

ロスアトム社は同発電所1号機の建設工事を2018年4月から本格的に開始しており運転開始は2023年を予定。同発電所のための人材育成サービスは、建設プロジェクトの一環として提供しているもので、トルコ共和国の建国100周年にあたるこの年までに、合計1,300人の専門家を育成する計画である。

同発電所では今年の夏から秋にかけて、2号機の本格着工が計画されており、同社は現在、トルコの規制当局から建設許可が下りのを待っている。2号機が着工した後は3号機の建設許可を2020年第1四半期に取得する計画で、この頃までに4号機の建設許可申請を行うことになる。

ロスアトム社の技術アカデミーでは、理論を学ぶための原子力発電所訓練プログラムが6つ組まれており、今後6か月以内に初回分のトルコ人原子力科学者70余名が、ロシアのオブニンスクにある国立原子力研究大学(MEPHI)でプログラムを受講する。このほか、民間原子力発電公社のロスエネルゴアトム社が操業するレニングラードとカリーニンの両原子力発電所で、インターンシップ研修を受けるとしている。

また、MEPHIの系列であるオブニンスク原子力工科大学を卒業したトルコ人専門家も、一部はアックユ発電所で勤務する。同発電所における人材の受け入れ・訓練の実施要件として、これらの若手専門家は精神生理学的試験と知識レベルの審査を受けているところ。初回分の訓練プログラムは今年末まで継続され、終了時には試験が行われるとしている。

最近の原子力動向：第3世代炉が本格化

露中台頭の中、SMR 開発に注目

日本原子力産業協会 小林 雅治

昨年、中国で三門原子力発電所 1, 2 号機と海陽 1, 2 号機、さらに台山 1 号機が相次いで発電開始し、中国は原子力発電規模で日本を抜き、世界 3 位に躍り出た。これらの原子炉は米国ウエスチングハウス (WH) 製 AP1000 と仏フラマトム製 EPR で、他国に先駆けての発電開始となった。いずれも所謂「第 3 世代炉」と呼ばれるもので、同炉の本格化時代に入ったとも言える。近年の原子力発電所の建設・輸出では、ロシアと中国の台頭が著しい。一昔前に原子力開発を先導してきた米英加は最近、2020 年代半ば以降の商用展開を目指して、小型モジュール炉 (SMR) の開発を熱心に進めている。本稿では、これらの動きを概括的に紹介する。

KEYWORDS: *Generation III reactors, Reactor technology evolution, GIF, ABWR, APWR, AP1000, CAP1000, EPR, APR1400, VVER-1200, HPR-1000, SMR*

I. 発電用原子炉の推移

発電用原子炉は、その登場から進化・発展を遂げてきた。通常、開発段階に応じて第 1 世代炉から第 4 世代炉に分類されている。

第 1 世代炉は、1950～60 年代頃に開発された初期の原子炉で、出力も概して小型であった。英国のコールダーホール 1 号機 (マグノックス炉, 6 万 kW, 1956 年発電開始)、米国の SHIPPINGPORT 炉 (PWR, 10 万 kW, 1957 年発電開始) やドレスデン 1 号機 (BWR, 21 万 kW, 1960 年発電開始) などが該当する。英国のウィルファ 1 号機 (マグノックス炉, 50 万 kW, 1971 年発電開始) が 2015 年に運転終了し、全ての第 1 世代炉が引退した。

第 2 世代炉は、1960 年代後半から 1990 年代頃に建設された原子炉で、現在世界で運転中のほとんどの原子炉が第 2 世代炉である。出力は数十万～100 数十万 kW と多彩で、炉型的には、一般の PWR, BWR に加えて、カナダ型重水炉 (CANDU)、ロシア型 PWR (VVER)、ロシア型黒鉛減速沸騰軽水冷却チャンネル型炉 (RBMK)、英国の改良ガス炉 (AGR) などが該当する。例えば、米国のカルバートクリフス 1, 2 号機 (PWR, 各 91.2 万 kW) はそれぞれ 1975 年、76 年に発電開始した。日本の福島第二 1～4 号機 (BWR, 各 110 万 kW) は 1981～86 年に発電

開始した。第 2 世代炉の多くは、当初の設計寿命として 30 年あるいは 40 年として建設されたが、その後、安全性、信頼性等を確認の上、運転期間を 10～15 年ずつ延長して運転を続けている。多くの場合、改修や安全対策工事が施されている。特に米国では、最初の運転認可期間が 40 年だったが、現在では約 90 基の原子炉が 60 年の運転認可を取得しており、さらに 6 基が 80 年の運転認可を申請中である。

第 3 世代炉は、第 2 世代炉を進化させた改良型炉で、安全性・信頼性・経済性が向上している。日本が官民で (米企業とも協力して) 開発した改良型 BWR (ABWR) である東京電力の柏崎刈羽 6, 7 号機 (各 135.6 万 kW) が、第 3 世代炉の先駆けとして 1996 年に発電開始した。

第 3 世代炉のうち特に経済性を向上させたものは「第 3 世代+炉」とも呼ばれている。なお、原子炉の世代別分類は概略的なもので厳格な定義はないようである。

中国が米国 WH から導入した AP1000 (125 万 kW, PWR) である三門 1, 2 号機、海陽 1, 2 号機、フランスから導入した EPR (欧州加圧水型炉) である台山 1 号機 (175 万 kW) が、2018 年に相次いで発電を開始した。いずれも AP1000 および EPR の初号機としての世界初稼動で、第 3 世代 (+) 炉時代の幕開けとして、象徴的に見られた。今後、このような第 3 世代炉が世界的に広く建設・利用される。

第 4 世代炉は、第 3 世代炉に続く原子力システムの概念で、経済性、安全性、持続可能性 (省資源性、廃棄物の

Recent World NPP Trend ; Period of Generation III (+) Reactors and Active SMR Development : Masaharu Kobayashi.
(2019 年 4 月 8 日 受理)

最小化)、核拡散抵抗性などで優れた性能を有する原子炉として、2030年代以降の実用化を目指して開発が進められている。「第4世代原子力システム国際フォーラム(GIF)」は、2002年に6つのシステムⁱを選定し、国際協力の枠組みにおいても開発を進めている。

II. 第3世代原子炉

主な第3世代炉とその開発者、開発状況を表1に示す。在来の軽水炉タイプの小型モジュール炉(SMR)も第3世代炉に含まれるが、後で簡単に触れる。

1. 日本(ABWR, APWR)

日本では、ABWRは柏崎刈羽6, 7号機に続き、浜岡5号機と志賀2号機が、それぞれ2004年、2005年に発電開始した。ほとんど建設が終わっている島根3号機は、新規制基準による安全審査の合格を待っているところである。ABWRと並行して開発されたAPWRは、当初、敦賀3, 4号機や川内発電所の増設炉として計画されていたが、福島第一事故後は延び延びになっている。

日本ではABWR, APWRに続く、次世代の高性能軽水炉としてHP-ABWR, HP-APWRの開発が進められ

た。電気出力170~180万kW、運転サイクル24ヵ月、設計寿命80年、時間稼働率97%、過酷事故対策として静的安全設備などを特徴としていたが、福島第一事故後は開発が停止している。

なお、ABWRは、台湾でも1999年に着工されたが、政治的影響などにより、建設が遅れた。現在、ほぼ完成状態にあるが、民進党政権の脱原子力政策により、運転は難しい状況にある。

2. 韓国(APR1400)

韓国最初の第3世代炉(APR1400)となる新古里3号機は2008年に着工した。途中、電気ケーブルの品質不正問題などのために建設が遅れ、発電開始したのは2016年1月だった。

新古里3号機着工の翌2009年12月、韓国水力原子力発電(KHNP)を含む韓国電力公社のグループが、国際競争の末に、アラブ首長国連邦(UAE)からAPR1400, 4基の受注を勝ち取った。バラカ1~4号機として、2012年から毎年1基ずつ着工した。既に1号機は完成しているが、運転に万全を期すため、人材育成に注力しており、早ければ2019年内に運転開始の見込みである。その後、

表1 主な第3世代炉とその開発動向

	原子炉	開発者	万 kWe	開発の現状
運転中	ABWR	米 GE/日立 東芝	138	柏崎刈羽 6, 7, 浜岡 5, 志賀 2: 1996~2005 年発電開始 島根 3, 大間: 建設中(安全審査中) 台湾・龍門 1, 2: 建設中(ほぼ完成したところで中断) 米設計認証 1997 年, 英設計認証 2017 年 日立, 英ウィルヴァ建設計画凍結を決定(2019 年 1 月)
	APR1400 (PWR)	韓国 KHNP	145	韓国・新古里 3 号機: 2016 年 1 月発電開始 韓国・新古里 4, 5 号機, 新蔚珍 1, 2 号機: 建設中 UAE・バラカ 1~4 号機: 建設中(1 号機は 2019 年運転見込み)
	VVER-1200(PWR)	ロシアトム (ギドロプレス)	120	露ノボボロネジ II-1, レニングラード II-1: 2016~18 年発電開始 ベラルーシ, トルコ, バングラデシュで建設中
	AP1000	米 WH	125	中国・三門 1, 2 号機, 海陽 1, 2 号機: 2018 年発電開始 米ボーグル 3, 4 号機: 建設中
	EPR(PWR)	フラマトム(EDF)	175	中国・台山 1 号機: 2018 年発電開始 フィンランド・中・英・仏で建設中(オルキロト 3 など)
建設中	華龍一号 (HPR1000) (PWR)	CNNC & CGN	117	中国の主力輸出炉としても位置付け 中国・防城港 3, 4 号機, 福清 5, 6 号機: 建設中 パキスタン・カラチ 2, 3 号機: 建設中
計画中	Atmeal (PWR)	三菱重工業&フラマトム	115	仏で設計承認 2012 年 2 月 トルコ・シノップで計画中(契約中止の可能性)
	APWR	三菱重工業	153	日本・敦賀などで計画中 EU 設計認証(EU-APWR), 2014 年 10 月
	CAP1000/CAP1400	SNPTC/SPIC	100/140	AP1000 の中国版 中国・石島湾 1, 2: CAP1400 計画中(2019 年建設開始予定) 中国・三門 3, 4, 海陽 3, 4 など: CAP1000 計画中
	ESBWR	GE/日立	160	米フェルミ 3, ノースアナ 3: 検討又は保留中 米設計認証 2014 年 9 月
	EC6(PHWR)	CANDU エナジー	75	CANDU モデル改良型, カナダ設計認証 2013 年 6 月

ⁱ ガス冷却高速炉(GFR)、鉛冷却高速炉(LFR)、溶融塩炉(MSR)、ナトリウム冷却高速炉(SFR)、超臨界圧水冷却炉(SCWR)、超高温炉(VHTR)

2～4号機も順次運転入りする予定である。

ちなみに韓国の現在の文在寅政権は脱原子力政策を取っているが、原子力輸出は推進する方針である。

3. ロシア (VVER-1200)

ロシアの第3世代炉である VVER-1200 の初号機となるノボボロネジ II-1 号機は 2008 年に着工し、2016 年に発電開始した。2 基目のレニングラード II-1 号機も 2008 年に着工し、2018 年に発電開始した。

ロシアは、これらの VVER-1200 を国内だけでなく、積極的に輸出している。具体的には、ベラルーシでは、オストロベツ 1, 2 号機がそれぞれ 2013 年、14 年に着工した。バングラデシュでは、ルプール 1, 2 号機がそれぞれ 2017 年、18 年に着工した。トルコでは BOO 方式によるアックユ 1～4 号機の輸出が決まり、1 号機が 2018 年に着工した。エジプトではエルダバア 1～4 号機の建設が計画されるなど、ロシア製炉は世界各地に販路を広げている。

VVER-1200 は、プラントモデルの AES2006 で呼ばれることもある。ロシアは VVER-1200 をさらに進化発展させた後継炉として VVER-TOI を開発中である。

参考までに、VVER-1200 の鳥観図と主な諸元を図 1、表 2 に示す。コアキャッチャーや二重格納容器、静的安全装置などを備え、運転期間も 60 年、運転サイクルは

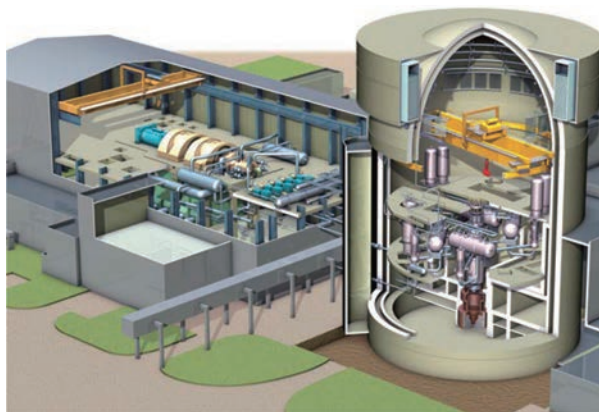


図 1 VVER-1200(ロスアトム)

表 2 VVER-1200 の主な諸元

・ 運転期間 60 年
・ 熱効率 34.8%
・ 燃料集合体 163 体
・ 原子炉出口温度 329℃
・ 燃焼度 ～70GWD/t
・ 4 ループ
・ 燃料交換サイクル 24ヵ月
・ コアキャッチャー装備
・ 水素再結合器
・ 静的安全装置(空気循環受動崩壊熱除去装置など)
・ 二重格納容器
・ 建設期間 54ヵ月未満(シリーズ建設の場合)
・ 設備利用率 92%

24ヵ月、設備利用率は 90%を超えている。

4. 米国 (AP1000)

米 WH が開発した AP1000 は、まず中国において、三門 1, 2 号機、海陽 1, 2 号機として、いずれも 2009 年に着工して、2018 年に発電開始した。

米国内での AP1000 の建設は、中国よりも数年遅れて 2013 年にボーグル 3, 4 号機とサマー 2, 3 号機が、着工した。米国では 30 数年ぶりの新規着工として注目された。しかし、30 数年の空白期間は、人材やプロジェクト管理面の弱体化を招いたようで、建設費の増加や建設期間の長期化に悩まされた。その結果、サマー計画は 2017 年 7 月、建設中断に追い込まれた。ボーグル計画は建設続行が決定され、ボーグル 3, 4 号機は 2021 年、22 年に発電開始の見込みである。なお、原子炉压力容器や蒸気発生器は韓国からの輸入品である。

AP1000 建設費の想定外の上昇による巨額負債を抱えた WH は 2017 年 3 月破産申請した。WH の親会社であった東芝も大幅欠損に陥り、東芝は WH を手放した。

米国では電力需要の伸びの鈍化、電力市場問題、安価なシェールガス革命などの影響で、多くの AP1000 の建設計画が中止または保留状態になった。東芝・WH による英国でのムーアサイド計画(AP1000, 3 基)もキャンセルされた。WH はその後、カナダ系投資ファンドによって買収され、再建を進めている。

5. フランス (EPR)

欧州加圧水型炉(EPR)は、仏アレバ(当時、仏フラマトムと独シーメンスの合弁会社)が中心になって開発した 160 万 kW の大型 PWR で、国際競争の末に、その初号機がフィンランドのオルキオ 3 号機として 2005 年に着工した。2 基目がフランスのフラマンビル 3 号機として 2007 年に着工、3, 4 基目が中国の台山 1, 2 号機として 2009 年に着工した。

しかし、オルキオ 3 号機は西欧では 10 数年ぶりの新規着工であり、詳細設計の準備や品質管理などの問題に遭遇し、当初の 2012 年の運転予定が大幅に遅れている。2019 年 3 月、フィンランド政府がやっと運転認可を発給するまでに漕ぎつけた。建設費も高騰し、当初の約 32 億ユーロの固定契約額が 3 倍近くに膨れ上がった。フラマンビル 3 号機の運転入りも同様に遅れている。

こうした動きを尻目に、中国の台山発電所は 2018 年 6 月、EPR として世界で初めて発電開始した。フィンランドとフランスでの失敗経験を活かすと共に、中国では発電所の建設が継続的に行われていたことが、人材・技術の維持とプロジェクトの計画的推進につながった。

EPR を採用した英国のヒンクリーポイント C1 号機は 2018 年 12 月に着工した。

オルキオ 3 号機の建設費高騰問題や福島第一事故

後の原子力開発停滞の影響を受けて、アレバは経営難に陥り、経営再建の結果、原子炉事業部門はフランス電力(EDF)傘下に入り、2018年1月、旧社名のフラマトムに改称された。新生フラマトムへの出資割合は、EDF75.5%、アシシステム5%、三菱重工業19.5%である。

6. 中国(華龍一号, CAP1000/CAP1400)

(1) 華龍一号

中国は国産化と技術導入を並行して原子力開発を進めてきた。旧核工業部(省)の組織を受け継いだ中国核工業集団(CNNC)が自主国産化を進め、中国広核集団(CGN)が仏商業炉の導入国産化を進めた。CNNCが開発したACP1000とCGNが開発したACPR1000+は、中国政府の指導により統合・発展して「華龍一号」となった。

華龍一号を採用した福清5、6号機、防城港3号機が2015年に、防城港4号機が2016年に着工した。これらは、2019～20年に発電開始予定である。華龍一号はHPR1000とも呼ばれ、今後、数地点で建設入りする見込みである。

中国が知的財産権を保有する華龍一号は、中国政府の目指す原子力(輸出)強国の目玉商品となっており、巨大経済圏構想「一帯一路」とも絡めて、多くの国に輸出攻勢している。

パキスタンでは、華龍一号炉、2基(カラチ2、3号機)が2015年と16年に着工した。英国では2015年10月、ブラッドウェルB発電所として2基の建設計画が決まり、英規制当局による華龍一号の包括的設計審査(GDA)が進行中である。ブラッドウェルB計画は、先進国である英国への原子力輸出ということで、中国は特に力を入れている。アルゼンチンにも1基の輸出が決まっており、2020年には着工の見込みである。

(2) CAP1000/CAP1400

中国が米WHから三門1、2号機、海陽1、2号機向けにAP1000を輸入した時、中国国家核電技術公司(SNPTC)へのAP1000の技術移転も同時に行われた。所謂中国版AP1000がCAP1000で、その大型炉がCAP1400となる。但し技術移転条件としてCAP1000は中国国内建設用、CAP1400が輸出用となっている。

当初、中国内の数カ所でもAP1000を連続的に建設する予定であったが、最近CAP1000又はCAP1400に変更したようである。SNPTCは2015年、中国電力投資集团公司(CPI)に吸収されて、国家電力投資集団(SPIC)になった。

7. その他

以上の他、ロシアのVVER-1000は一般的に第2世代炉であるが、VVER-1000の内の原子炉モデルV-428とV-412は第3世代炉と言われており、中国の田湾1～4号機(2006～18年に発電開始)、インドのクダングラム

1、2号機(2013、16年発電開始)が該当する。クダングラム3号機が2017年に着工した。

中国がカナダから輸入したCANDU6も第3世代炉で、秦山Ⅲ-1、2号機としてそれぞれ2002、03年に発電開始した。仏炉の導入国産版として中国CGNが開発したCPR1000+やACPR1000も第3世代炉で、それらを採用した陽江3～5号機が2015～18年に発電開始した。

この他、水冷却炉タイプの小型モジュール炉(SMR)も第3世代炉に属する。アルゼンチンがCAREM25(2.5万kW)、ロシアと中国がそれぞれ、KLT-40S(3.5万kW×2基)とACPR-50S(6万kW)を浮揚式原子炉として建設中である。なお、中国が石島湾で建設中のHTR-PM(20万kW)は高温ガス炉なので第4世代炉になる。

III. 世界市場を席卷する露中、遅れる欧米

前章で主な第3世代炉の開発状況を見てきたが、ロシアと中国の活況ぶりが際立つ一方で、日米仏の苦戦が目立つ。カナダもかつての輸出に活躍した姿が見られない。

表3に、1990年代以降の世界各国の原子炉の発電開始基数の推移を示す。第3世代炉の先駆けとして柏崎刈羽6、7号機が発電開始した日本の1990年代は、発電開始基数も多く、世界で先導的立場にあった。しかし、2000年後は開発も鈍化し、福島第一事故の2011年後の発電開始炉はゼロである。

中国の原子力開発は、最初の原子力発電所である秦山1号機が発電開始した1991年に始まった。当初は慎重に原子力開発を進め、2010年代に入って開発が加速している。

韓国とインドは、平均して着実に原子炉開発を進めている。

ロシアは、1991年12月の旧ソ連崩壊による経済混乱で、原子炉開発もしばらく停滞していたが、2007年12月の国営原子力企業ロスアトム設立頃から活性化してきた。国内建設と輸出の両面で目覚ましく活動している。

フランスは、1999年迄は国内建設では日本と並んで世界の先頭に立っていたが、2000年以降の新規発電開始は皆無である。米国、カナダ、英国も同様に1990年代半ば頃から停滞状態に陥り、その後(2016年の米国の1基を除いて)発電開始炉は1基もない。

その他諸国で発電開始している国は、ほとんどが旧東欧諸国と途上国である。

極論すれば、20世紀までは日欧米の先進国が原子炉開発を先導してきたが、21世紀は露中が台頭してきた。表3に示すように、発電開始基数の露中の世界シェアは、1990年代9%、2000年代33%が、2010年代には74%に拡大している。現在建設中のシェアでは35%に下がっているが、近年は途上国での新規導入が増えつつあるこ

表3 世界各国における送電開始原子力発電所基数の年別推移

年	基	日本	中国	韓国	インド	露	仏	英	米	加	その他諸国	備考
1990	56	10 ○○				○	○○○		○○	○○		中露の 比率 9%
1991		4 ○	○				○				○	
1992		6 ○○			○○		○			○		
1993		9 ○○○○	○			○	○		○	○		
1994		5 ○○	○	○							○	
1995		5 ●		○	○			○			○	
1996		6 ○○○					○		○		○	
1997		3		○			○○					
1998		4		○○○							○	
1999		4		○	○		○				○	
2000	33	6			○○○						○○○	33%
2001		3 ○		○		○						
2002		6	○○○○○	○							○	
2003		2	○○○	○								
2004		5 ◎	○			○					○○	
2005		4 ○○		○	○							
2006		2	◎		○							
2007		3	◎		○						○	
2008		0										
2009		2 ○			○							
2010	57	5	○○	○	○	○						74%
2011		7	●○○		○	○					○	
2012		3	○	○○								
2013		4	○○○		◎							
2014		5	○○○			○					○	
2015		10	○○○○○ ○○○	○		●						
2016		10	○○○○○	◎	◎	◎			○		○	
2017		4	○○○								○	
2018		9	○○○○○ ○○			○○						
現在 建設中	55	○○	○○●○○○ ○○○○○ ○○○	○○○ ○○	●○○ ○○○ ○	○○○ ○○○	○	○	○○		○○○○○○○ ○○○○○○○ ○○○○○○○	35%

その他諸国 1990年代発電開始：1基(ブルガリア、メキシコ、ウクライナ、ルーマニア)、2基(スロバキア)、計5カ国6基

2000年代発電開始：1基(ブラジル、パキスタン、ルーマニア)、2基(チェコ、ウクライナ)、計5カ国7基

2010～18年発電開始：1基(イラン、アルゼンチン)、3基(パキスタン)、計3カ国5基

現在建設中：4基(UAE)、2基(スロバキア、バングラデシュ、ベラルーシ、パキスタン、台湾)、

1基(フィンランド、ブラジル、アルゼンチン、トルコ)、計10カ国・地域18基

原子炉の分類：○第2世代炉 ◎第3世代炉 ●第4世代炉

(出所)IAEA/PRIS(Power Reactor Information System)、WNA(World Nuclear Association)データをもとに作成(2019年1月現在)

とを意味している。一方で、これら途上国で建設中の原子炉の多くが露中製であることを考慮すると、やはり露中の優勢ぶりが頷ける。

21世紀に入って、新規原子力発電国になったのはイラン(2011年)のみである。現在建設中の国として、ベラルーシ、バングラデシュ、トルコが含まれているが、この3カ国は2019～23年には原子力発電国の仲間入りする見込みである。なお、3カ国で建設中の原子炉はいずれも第3世代炉のVVER-1200である。この他にも複数の国が新規に原子力発電の導入を計画・検討しており、新規導入国時代に入ったとも言える。

表4に、主要国の原子炉輸出基数の推移を示す。最近

表4 原子力発電所供給国の輸出基数の推移

供給国	発電開始炉(基)			建設中 (基)	計画中 (確定基数)
	1990 年代	2000 年代	2010 ～18年		
ロシア	2	4	5	7	20
中国		1	3	2	6
フランス	2	2	1	4	5
米国	2		4	(2)	
カナダ	4	3			
韓国				4	
ドイツ		1			
チェコ	2			2	
計	12	11	13	21	31

では、ロシアが圧倒し、中国が勢いを増しており、フランスが何とか面目を維持している状況で、米国やカナダは見る影もない。韓国は UAE への 4 基の輸出獲得のあとがどうなるか関心がもたれる。日本は残念ながら比較の対象にもなっていない。

露中が世界の原子力市場で圧倒的地位を占めているのは、国営の原子力企業が国策に基づき原子力開発を進めていることが大きい。資金面や人材・産業育成、経済協力などのトータルな取り組みで、国際影響力を発揮している。政府首脳等(大統領や国家元首ら)による輸出外交も熱心である。

このような状況を背景に、米国の政府や産業界には、数年前から危機感が高まっており、かつてのリーダーシップの発揮・復活を求める声が強まっている。昨年 9 月には米議会で、民間の原子力研究開発・実証を促進する「原子力イノベーション能力法 (Nuclear Energy Innovation Capabilities Act of 2017, NEICA 2017)」が成立した。最近では、本年 2 月 12 日には、米原子力産業界の大手企業のトップらがホワイトハウスでトランプ大統領と懇談し、米国企業がリーダーシップを取り戻し、原子力輸出に勝利していく方策について協議した。3 月 27 日には、その名もずばりの「原子力エネルギーリーダーシップ法案 (Nuclear Energy Leadership Act, NELA)」が、合計 15 名の超党派議員による連名で改めて上院委員会に提出された。今後の米国の動きが注目される。

IV. 小型モジュール炉 (SMR) の開発

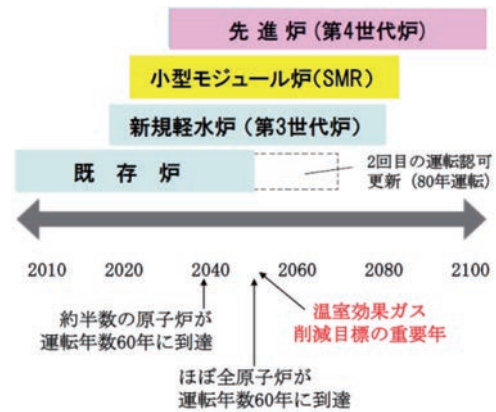
最近、原子力発電所の資本コストを下げ、小規模電力網への電力供給の観点などから、小型モジュール炉 (SMR) への関心が高まっている。特に米英加では、政府も積極的に SMR の開発に取り組んでいる。その背景には、露中が世界の原子力市場を席巻している中で、原子力技術・産業で世界を主導していくとの認識も伺える。

OECD 原子力機関 (NEA) は 2016 年に報告書「小型モジュール炉の可能性：短中期的市場見通し」を発表し、2035 年の世界市場の規模を 900 万～2,100 万 kW と想定している。また、IAEA 発行の 2018 年版報告書「小型モジュール炉の技術開発の進歩」は、水冷却炉タイプの SMR として 26 炉、水冷却炉以外的高温ガス炉タイプや高速炉タイプ、溶融塩炉タイプなどの SMR として 30 炉を紹介している。

ここでは、紙数の関係で、米国での SMR 開発状況を簡単に紹介する。

エネルギー省の許認可技術支援プログラム (LTS) や原子力イノベーション加速ゲートウェイ (GAIN) イニシアティブ、更には高等研究計画局の ARPA-E 計画などを通じて、SMR の開発・許認可面での支援が行われている。

図 2 に示すように、米国では、現行の軽水炉が 60 年あるいは 80 年運転した後の引退に備えて、新規軽水炉 (第



(出所) 米原子力エネルギー協会 (NEI)、2017 年

図 2 米国における原子炉の導入見通し (例)

3 世代炉) や SMR の導入を考えている。SMR は単に、既存炉の補完だけでなく、老朽化した石炭火力 (中小出力のものが多く) の代替や、さらには小規模電力需要対応や小規模電力会社にとって魅力的となっている。

ニュースケール製 SMR (電気出力 5 万 kW、一体型 PWR) を国立アイダホ研究所に 12 モジュール (計 60 万 kW) 建設するユタ州公営電力共同体 (UAMPS) のプロジェクトが具体化に向けて進んでいる。順調にいけば、2020 年にはニュースケールの SMR が NRC の設計認証を受け、同年半ばには建設運転一括許認可の申請が行われる見込みである。

今後、ホルテックが SMR-160 (PWR)、X-エナジーが Xe-100 ペブルベッド SMR (50MWe 高温ガス炉) の設計認証を NRC に申請する見込みである。

テネシー峡谷開発公社 (TVA) は、クリンチリバーサイトへの SMR の将来の立地を目指して、早期サイト承認 (ESP) 申請を 2016 年に NRC に行っており、早ければ年内にも承認される可能性がある。具体的な SMR 炉型は未定だが、BWX テクノロジーズ、ホルテック、ニュースケール、WH の軽水炉型 SMR から選択される模様である。

諸外国の SMR への関心は高く、米国企業は、英国、カナダだけでなく、ウクライナ、ヨルダン、ルーマニアなどとも協力して、建設可能性調査を進めている。

電気出力が 3 万 kW 程度以下のマイクロ原子炉に対する関心も高い。遠隔地や軍事基地、バックアップ用などとして考えられている。特に軍事施設では、対サイバー攻撃やレジリエンス性に優れ、期待が寄せられている。

著者紹介



小林雅治 (こばやし・まさはる)

日本原子力産業協会

(専門分野・関心分野)

世界・各国の原子力開発動向

竜巻に対する原子力発電所の設計条件について —設計竜巻風速などの設定における日米の考え方の比較—

電力中央研究所 江口 譲

竜巻が原子力発電所に及ぼす影響を評価するための設計条件について解説する。まず竜巻とはどのような気象現象かを概説し、その強度の定量化法、記録方法について説明する。次に、竜巻による物的被害事例や日米の人的被害の違いについて紹介するとともに、米国の原子力発電所が実際に被った竜巻被災事例を紹介する。最後に、日米の設計竜巻風速および竜巻飛来物の設計衝突速度の設定法・設計値の違いについて説明し、今後さらに検討すべき事項について提言する。

KEYWORDS: *Tornado, Nuclear power plant, Design wind speed, Enhanced Fujita (EF) scale, Tornado-borne missile, Design missile speed*

I. はじめに

本章では、竜巻とはどのような気象現象かを説明し、その強度の定量化法、記録方法を説明する。

1. 竜巻の特徴

竜巻とは、積雲や積乱雲の底部と地面や海面との間に発生する渦状の強風を指す。竜巻の中心付近は外部よりも気圧が低下するため、大気中の水蒸気が凝縮し、漏斗雲とよばれる細長い雲が地面や海面付近まで伸びる場合もある。また、地面付近では地表の砂塵や飛来物が巻き上げられるため、竜巻の位置を視認することができる。米国では中西部の大平原地帯で巨大な竜巻が多く発生し、日本では海上や平野部で比較的多く発生している。

竜巻の発生機構は、水平方向に軸を有する渦巻きが大気的不安定性(上昇気流)によって立ち上がることで説明できる。水平方向に軸を有する渦は鉛直方向に風速が大きく変化する領域で発生する。なお、晴天時に発生するつむじ風は直射日射によって暖められた地面付近の空気塊が上昇することにより発生する現象であり、竜巻ではない。この他、火山噴火や火災に伴って発生する大規模な渦や山の斜面(地形影響)によって発生する大規模な渦が知られているが¹⁾、これらは大気的不安定性に起因するものではなく、極めて稀な自然現象である。

Design conditions of tornado hazard for nuclear power plants :
Yuzuru Eguchi.

(2019年5月8日 受理)

2. 竜巻強度の尺度

竜巻の地上面での強度は世界的にフジタスケール(Fスケール)で評価されてきた。竜巻は予め発生時間や発生場所を特定することはこれまで困難であったことから、竜巻が地上の建物や物体に及ぼした被害からFスケールの階級を判断する手法が用いられてきた。各Fスケールの階級には風速範囲(1/4マイル平均風速)が設定されているが、実際の風速を反映していないとの指摘が1970年代後半ごろからあり、現在ではFスケールは日米等では使用されていない。Fスケールに代わる尺度として、米国では2007年2月より、カナダでは2013年4月より改良フジタスケール(EFスケール)が公式に使用されており、日本では2016年4月1日に気象庁が日本版改良藤田スケール(JEFスケール)の使用を公式に開始した。

JEFスケールでは木造住宅・自動車・電柱などの30種類程度の被害指標DI(damage indicator)が選定されており、JEFに関するガイドライン²⁾で設定されている各DIの被害度DOD(degree of damage)によって風速(代表値、下限値、上限値)を定めることができる。例えば、DIが木造の住宅または店舗の場合、DODが「目視でわかる程度の被害、窓ガラスの損壊(DOD=1)」と判定されれば、竜巻風速(3秒平均風速)の代表値、下限値、上限値はそれぞれ30m/s、25m/s、35m/sと評価できる。また、DODが「上部構造の著しい変形又は倒壊(DOD=8)」と判定されれば、同様にそれぞれ75m/s、55m/s、85m/sとなる。

参考資料3)によると、JEF スケールの策定では「過去の突風事例との比較を容易にするために、藤田スケールと統計的継続性を保つことを要件とし、過去の被害事例215件について、藤田スケールで推定した風速とJEF スケールで推定した風速の回帰分析を行い、同じ被害からは同じ階級が得られるように回帰式および階級区分の風速幅を求め、表5の結果を得た。」としている。参考資料3)の表5には各JEF スケール階級の風速範囲が記載されているが、JEF5(JEF スケール階級5)の上限風速は定められていない。JEF スケール階級 n の下限風速 V_L と上限風速 V_U は以下の式で表される。

$$V_L = 14n + 25 \quad (n=0, 1, 2, 3, 4, 5) \quad (1)$$

$$V_U = 14n + 38 \quad (n=0, 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

例えば、JEF スケール階級3の風速範囲は $n=3$ より67m/s～80m/sとなる。JEF スケールはF スケールとの統計的継続性を保つことから、過去にF3(70m/s～92m/s)と判定された多数個のF3事例の風速をより正確に判定できたと仮定した場合、その速度範囲はJEF3の風速範囲(67m/s～80m/s)内に概ね収まるものと考えられる。ただし、個別の竜巻事例は必ずしもJEF3の風速範囲に対応する保証はない。この統計的継続性は米国、カナダのEF スケールを踏襲したものであり、フランスのEF スケール案でも同様の統計的継続性が考慮されている。このF スケールとEF スケールの相関関係については図1に示す風速の関係が提示されている。統計的継続性は米国の竜巻ハザードの評価で考慮されており、過去のF スケールの記録データをEF スケールに読み替えて竜巻風速の年超過確率を評価している⁴⁾。この結果に基づき、米国原子力規制委員会(NRC)は2007年3月に規制ガイド⁵⁾の設計竜巻風速ならびに竜巻飛来物の設計衝突速度を改訂している。

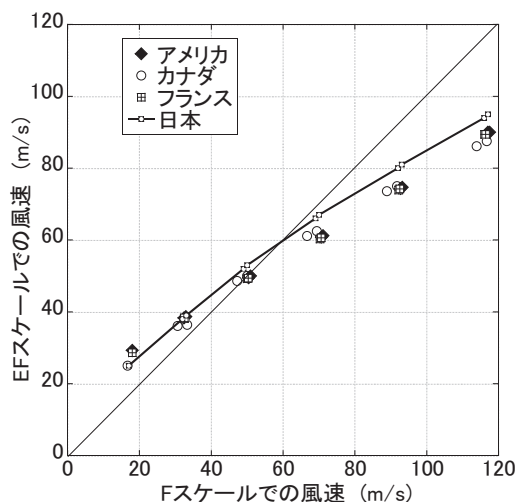


図1 F スケールとEF スケールでの風速の相関関係
(各階級の風速範囲の上限値、下限値をプロット)

3. 竜巻特性データの記録

日本での1961年以降の竜巻を含めた突風については気象庁が「竜巻等の突風データベース」として記録しており、気象庁のWebサイトの「ホーム > 各種データ・資料 > 竜巻等の突風データベース」のページに掲載されている。初期の30年間は一定規模以上の被害が発生した事例(F スケールでF2以上の事例や死亡者が発生した事例等)のみについて記録されている。1991年以降は、観測・情報収集したすべての突風事例(主に竜巻)が記録されている。さらに、2007年以降は、インターネット情報や一般市民からの写真情報・報告も含められており、事例数は急激に増加している⁶⁾。この突風データベースの2016年3月までの記録では、各事例について①現象区分、②発生日時、③発生場所(市町村)、④F スケール、⑤被害幅(m)、⑥被害長さ(km)、⑦主な被害状況(死傷者数、住家全半壊数)、⑧総観場(気圧配置等)が記載されており、さらに詳細情報として発生場所・消滅場所の緯度・経度や発生時刻・消滅時刻なども付記されている。2016年4月以降の記録でも、同様に各事例の①～⑧が記載されているが、④ではF スケールの代わりに風速とJEF スケールが記載されている。また、現地調査の報告が付記されている事例もあるが、詳細情報は今のところ付記されていない。2016年3月までの突風データベースでF3と判定されている事例は5件、同年4月以降でJEF3と判定されている事例は1件のみであり、これまでF4以上およびJEF4以上の記録はない。

II. 竜巻による被害

本章では、竜巻による物的被害事例や日米の人的被害の違いについて紹介するとともに、米国の原子力発電所で実際に発生した竜巻被災事例を紹介する。

1. 一般的な人的・物的被害

竜巻による一般的な物的被害は、JEF スケールの被害指標DIとして挙げられている住宅・車両・電柱・広告板・樹木などに対して発生する。被害の程度はJEF ガイドライン²⁾に記載されているように風速に依存するが、JEF0(JEF スケールの最低階級)の下限風速 V_L が25m/s(式(1)で $n=0$ の場合)であるので、瞬間風速(3秒平均風速)が概ね25m/sを超えると物的被害の可能性が生じるものと考えられる。配電柱以外の電力設備への被害としては、2013年9月2日に埼玉県越谷市を通過したF2竜巻により66kV送電設備(4回線)に鉄塔部材変形や電線短絡の被害が発生した事例が報告されている⁷⁾。

国内での最悪の人的被害は、2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町で発生したF3竜巻による9名の死亡事例である。佐呂間町若佐地区の新佐呂間トンネル作業事務所・宿舎(2階建て軽量鉄骨造の仮設建築物、3棟)が竜巻経路上にあり、3棟のうち2棟が全壊したた

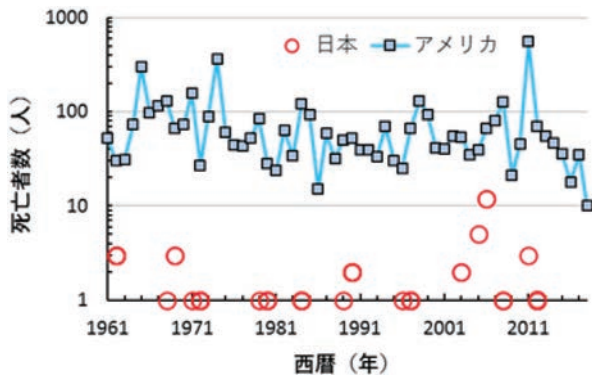


図2 日米の竜巻による年間死者数の推移

め、工事関係者に多数の死傷者が発生した。

米国での竜巻被害は甚大であり、例えば2011年5月22日にミズーリ州Joplinで発生したEF5の複数竜巻によって158名が死亡したとされる。図2に1961年から2018年までの日米の竜巻による年間死者数の比較を示す。縦軸は対数軸で表示しており、年間死亡者が0人の場合はプロット点がない。日本では年間死亡者が0人の年の割合が約70%であるのに対して、米国では平均的に年間80人近くの死亡者が発生している。人口密度や国土面積の違いを考慮すると、日本での竜巻による各人の死亡リスクは米国に比べて2桁程度低いことが推定できる。

2. 原子力発電所の被災事例

米国では、原子力発電所での被災事例がいくつか報告されているので、以下にその概要を紹介する。

1978年4月17日にミシシッピ州で建設中のGrand Gulf原子力発電所(BWR, 912MWx2基)の近くをF3の竜巻が来襲し、開閉所の損傷が発生した。また、冷却塔の最上部の一部が欠落し、地上に崩落した。この原因は、コンクリート流し込み用のクレーンが冷却塔の内側にあり、このクレーンが風圧により倒壊して、冷却塔の上部に衝突したためである。冷却塔自体は風圧による損傷は受けていない。

1990年3月13日にイリノイ州のQuad Cities原子力発電所(BWR, 912MWx2基)の近くをF3の竜巻が通過し、敷地境界のフェンスが破損するとともに、建屋の屋根の一部が飛散し放射性廃棄物処理エリアのダクトに接触した。また、1996年5月10日にもF1の竜巻がQuad Cities原子力発電所の付近で発生し、燃料交換フロアの2次格納隔壁の表面材の一部が損傷している。

1998年6月24日にオハイオ州にあるDavis-Besse原子力発電所(PWR, 898MW)付近にF2の竜巻が来襲し、開閉所の損傷により外部電源喪失となり原子炉は自動停止した。非常用ディーゼル発電機により安全システムへ電力が供給された。光ファイバーの電話回線も竜巻により破損したため、米国NRCへの警戒宣言の連絡は運転

員の携帯電話(マイクロ波回線)で行っている。

2010年6月6日にミシガン州のFermi 2号機(BWR, 1,198MW)にEF1の竜巻が来襲し、送電線5回線のうち4回線が破損して原子炉は自動停止し、非常用ディーゼル発電機が起動している。また、タービン建屋や冷却塔に損傷が発生している。

2011年4月16日にバージニア州のSurry1, 2号機(PWR, 799MWx2基)にEF3の竜巻が開閉所付近を通過し、外部電源喪失となった。その後、原子炉は自動停止し、非常用ディーゼル発電機により安全システムへ電力が供給された。この他、約100ガロンの燃料用油が地上タンクから、約200ガロンの油が変圧器から流出している。

2011年4月27日にアラバマ州HamiltonでEF4～EF5の竜巻が発生し、Browns Ferry 1～3号機(BWR, 3基合計3,297 MW)から約3km離れた送電設備の破損により原子炉は自動停止した。Browns Ferry 1～3号機の外部電源は1週間近く利用できず、ディーゼル発電機を120時間以上稼働させる必要があった。

III. 設計風速・飛来物衝突速度の設定方法

1. 設計竜巻風速の設定方法

強風の設計風速はハザード曲線(各風速に対する年超過確率)に基づき決定される場合が多い。台風などの場合は、気象官署やアメダス地点での過去の測定記録から極値解析を用いてハザード曲線を計算することができるが、竜巻の発生頻度は非常に低いため、評価対象地点での過去の記録(発生した事例)は通常存在しない。そこで、評価対象地点と同様の竜巻発生特性を有する広い領域を竜巻検討地域として設定し、この竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録に基づき竜巻風速のハザード曲線を計算する。まず、気象庁「竜巻等の突風データベース」等に記録されている各竜巻のFスケール、被害痕跡の長さ、被害痕跡の幅のデータに基づき、竜巻検討地域内でN年間に竜巻によって風速V以上となったと考えられる被害面積の合計 $A(V)$ を推定する。竜巻検討地域の面積を A_0 とすると、評価対象地点での竜巻風速Vに関する年超過確率 $H(V)$ を以下のように求めることができる。

$$H(V) = \frac{A(V)}{NA_0} \quad (3)$$

ただし、この式は特定の1点での年超過確率を表すものであり、原子力発電所や送電線のように面積や長さを持つ評価対象の場合は、その一部でも竜巻風速がV以上となる確率を求める必要がある。例えば、長さBの線状構造物が評価対象の場合はBに比例する項を式(3)に加える必要があり、この項はライフライン項とよばれる。

米国NRCの規制ガイド⁵⁾で引用されている設計竜巻

風速の設定方法⁴⁾の評価フローを図3に示す。竜巻検討地域は緯度幅、経度幅がそれぞれ2°(約200km)の矩形形状の地域である。Fスケールで記録されたデータをEFスケールの風速に換算した上で各竜巻被害痕跡を長方形でモデル化し、各長方形内で幅方向と長さ方向に風速分布を有することを考慮して $A(V)$ を定めている。また、竜巻経路が常に長さ61m(200ft.)の線状構造物に直交すると仮定したライフライン項を加味している。以上の方法で得られたハザード曲線を用いて年超過確率 10^{-7} に対応する竜巻風速を得ている。次に、この竜巻風速の地域的な分布特性に基づき米国を3つの地域(地域Ⅰ～Ⅲ)に分けて、地域別の設計竜巻風速を設定している。米国NRCの規制ガイド⁵⁾に掲載されている地域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの具体的な設計竜巻風速はそれぞれ103m/s、89m/s、72m/sである。つまり、米国では各発電所のでハザード曲線の評価する必要はなく、各発電所が位置する地域(Ⅰ～Ⅲ)によって設計竜巻風速を一意に決定することができる。

日本の竜巻影響評価ガイド⁸⁾で引用されている設計竜巻風速の設定方法⁹⁾の評価フロー(代表例)を図4に示す。日本では海岸線付近で竜巻が多く発生することから、竜巻検討地域は海岸線から沖方向へ5km、陸方向へ5kmの帯状の領域とすることとしている。評価ガイド⁸⁾の中では、国内または竜巻検討地域内での既往最大の竜巻風速 V_{B1} (図4の②-1)も考慮することが求められる

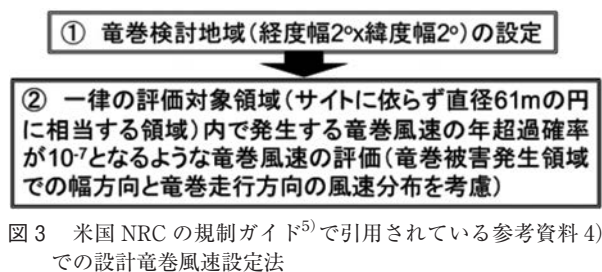


図3 米国NRCの規制ガイド⁵⁾で引用されている参考資料(4)での設計竜巻風速設定法

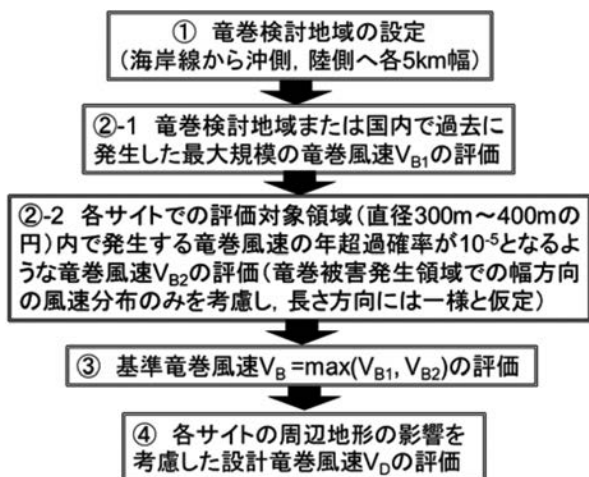


図4 日本の竜巻影響評価ガイド⁸⁾に沿った設計竜巻風速の評価フロー(代表例)

が、米国NRCの規制ガイド⁵⁾にはこのような要求は存在しない。また、日本のハザード曲線の計算方法⁹⁾では、風速分布が竜巻被害痕跡内で幅方向のみにあり、長さ方向には風速分布が一様であるとの保守的な仮定を用いている。さらに、評価対象は各サイトの安全関連施設を包含する直径300m~400mの円で代表されており¹⁰⁾、評価対象が直径61mの円に相当する米国の評価方法に比べて日本の評価方法の方がより保守的である。従って、以上の保守的な仮定を考慮すると、日本の評価方法で年超過確率 10^{-5} に対応する設計風速 V_{B2} は、同じ竜巻特性データに対して米国の評価方法を用いた場合の年超過確率 10^{-7} に対応する風速と概ね同等と考えられる。

以上の評価で得られた既往最大の竜巻風速 V_{B1} とハザード曲線に基づく設計風速 V_{B2} の内、大きい方を基準竜巻風速 V_B とし、さらにサイト周辺の地形影響を考慮したものを設計竜巻風速 V_D とする。なお、日本の評価ガイド⁸⁾では、Fスケールで記録された過去のデータをJEFスケールの風速に換算した上で V_{B1} や V_{B2} を算出することは今のところ許容されていない。

2. 竜巻飛来物の設計衝突速度の設定方法

竜巻が発生すると地上の無拘束の物体や拘束力の弱い物体が浮上・飛散し飛来物となる。また、建物等の一部が風圧や飛来物で破損すると、破損物が飛来物となる。このような竜巻飛来物が原子力発電所の安全性に影響を及ぼさないような設計とする必要がある。

米国NRCの規制ガイド⁵⁾では、鉄球・パイプ・自動車等を代表竜巻飛来物として選定し、地域Ⅰ～Ⅲでの各代表竜巻飛来物の設計衝突速度を設定している。各地域での3種類の飛来物に対する設計衝突速度は図5の縦軸の値である。なお、横軸は物体の飛散しやすさを表す飛行定数(竜巻飛来物の受風面積と抗力係数の積を質量で除し

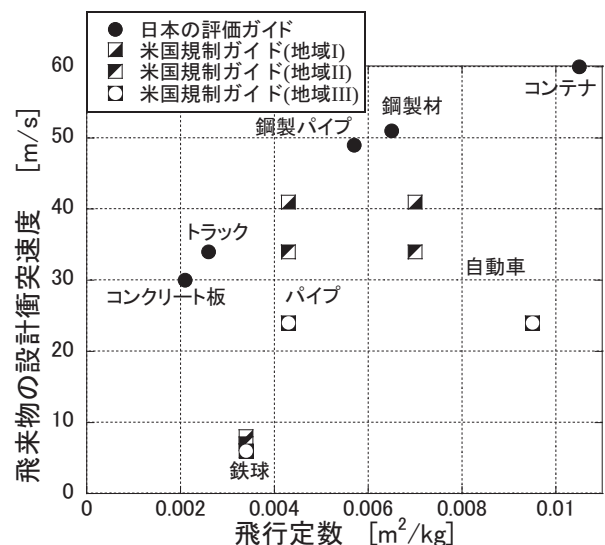


図5 日本の評価ガイド⁸⁾と米国NRC規制ガイド⁵⁾に記載されている竜巻飛来物の設計衝突速度

た量)の値に対応する。一方、日本の評価ガイド⁸⁾で例示されている飛来物はコンクリート板、トラック、鋼製パイプ、鋼製材、コンテナの5種類であり、これらの設計衝突速度としては図5の●の値が例示されている。この設計衝突速度(設計竜巻風速 100m/s)は、すべての飛行定数の範囲において米国の地域Ⅰの設計衝突速度(設計竜巻風速 103m/s)よりも大きくなっている点に注目する必要がある。

日米ガイドに掲載されている設計衝突速度の設定方法で用いられた評価フローは概ね共通である。つまり、竜巻の風速場を数値的にモデル化し、モデル風速場の中の高さ 40m から対象とする飛来物を放出して、飛来物が地面に落下するまでを数値解析で評価する。この飛来物が地面に落下するまでに到達した最大の水平速度を設計衝突速度としている。日本の設定方法では、高さ 40m の広範な位置から多数の対象飛来物を放出する。つまり、最も大きな水平速度が発生する初期位置を選択していることになる。一方、米国の設定方法では、高さ 40m の1つの特定位置に、対象とする飛来物を置いて評価する。この背景には飛来物の初期位置として最悪条件を選択する必要はないという確率的な考えがある。つまり、竜巻飛来物による重要施設等の損傷は、竜巻の来襲・飛来物の存在・飛来物の浮上・特定方向への飛散・衝突・損傷などの多くの偶然的な事象が重なることが必要となることを考慮したものである。図5に示す日米の設定方法で得られた結果の違いの原因の一つは、この物体初期位置の選択法の違いにある。

この他の原因としては、日本の設定方法⁹⁾で用いられている風速場は長時間平均の風速が設計竜巻風速の値(100m/s)となるように調整されている点である。具体的には、仮想的な小型竜巻実験装置を対象として非定常乱流場を数値的に解析し、得られた渦状の風速場の時間平均・周方向平均の最大値が 84m/s になるように定数倍して、16m/s の一様風を全域に加えたものである。竜巻風速は被害発生に要する数秒間で平均した瞬間風速値で定義されるものであり、例えば1時間平均の 100m/s の風速を3秒平均の瞬間竜巻風速に換算すると 140m/s 以上になるものと見積もられる。つまり、評価ガイド⁸⁾の例示値の計算で用いられた竜巻風速(長時間平均風速 100m/s)は実際の設計竜巻風速(3秒平均瞬間風速 100m/s)よりもかなり保守的なものとなっている。

IV. まとめと今後の課題

設計竜巻風速は、米国では要求するハザードレベルに対応する風速のみで決定されるのに対して、日本では既往最大(サイトでの既往最大ではなく、全国または竜巻検討地域での既往最大)の風速も考慮することが求められている。また、竜巻飛来物の設計衝突速度の設定においても、米国では飛来物が発生・衝突する事象が極めて

稀であることを考慮した設定方法が用いられているが、日本では確率的な要素は考慮せずに衝突速度が決定論的に設定されている。過剰な竜巻防護対策は他のリスクの増大につながる可能性もあるため、日本においても確率的な側面を考慮した合理的な設計評価法の構築が今後必要になるものと考えられる。

また、米国 NRC の規制ガイド⁵⁾では過去の F スケールの竜巻記録を EF スケールに変換して得られたハザード評価結果を利用しているが、日本の評価ガイド⁸⁾ではこのような読み替えは今のところ許容されていない。今後、JEF スケールの統計的継続性を竜巻ハザード評価に適用する上での問題点の有無についてさらなる調査・研究が行われることが望まれる。

— 参考資料 —

- 1) 小林文明, 竜巻—メカニズム・被害・身の守り方—, 成山堂書店, 2014.
- 2) 気象庁, 日本版改良藤田スケールに関するガイドライン, 2015年12月.
- 3) 田中恵信, 突風の風速推定に向けた取り組み～日本版改良藤田スケールの策定～, 日本風工学会誌, 第41巻第2号(通号第147号), 2016.
- 4) Pacific Northwest National Laboratory, Tornado Climatology of the Contiguous United States, NUREG/CR-4461 Rev.2, 2007.
- 5) U.S. Nuclear Regulatory Commission: Regulatory Guide 1.76, Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- 6) Tamura, Y., Matsui, M., Kawana, S., Kobayashi, F., Statistical properties of tornados in Japan and tornado risk model for nuclear power plants, Proc. of The 14th International Conference on Wind Engineering, No. 03726, 2015.
- 7) 山崎智之, 久保田邦裕, 白石智規, 松本憲, 二村喜博, 井上典久: 竜巻による送電用鉄塔の損傷メカニズムに関する検討, 平成26年電気学会全国大会講演論文集, Vol.7, pp.147-148, 2014.
- 8) 原子力規制委員会, 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド, 原規技発第13061911号, 2013(改正: 原規技発第1812177号, 2018).
- 9) 東京工芸大学, 平成21～22年度原子力安全基盤調査研究(平成22年度)竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書, 2011.
- 10) 平口博丸, 野原大輔, 杉本聡一郎, 江口譲, 服部康男, 沿岸立地原子力発電所の竜巻風速ハザードモデル TOWLA の開発, 電力中央研究所報告 O15005, 2016. (<https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/O15005.html>)

著者紹介



江口 譲 (えぐち・ゆずる)

電力中央研究所 地球工学研究所, 原子力リスク研究センター
(専門分野/関心分野) 流体工学, 風工学, 確率論的リスク評価, 熱流動工学, 雪氷工学

核分裂生成物と燃料デブリの比較

—福島第一原子力発電所の廃炉作業時に留意すべき 核分裂生成物の影響—

「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会

福島第一原子力発電所の廃炉作業は、まずは、燃料デブリ(デブリ)の存在箇所を同定し、これらを安全かつ確実に取り出して、最終的に安全に保管することで終結する。約40年にわたるデブリ取り出し作業では、環境への放射性物質の飛散を最小限に抑え、同時に作業従事者の放射線被ばくを最小に抑制することが必須である。廃炉作業を進めてゆくうえで障害となるのが、放射性の核分裂生成物(FP)である。本稿では、デブリとFPの特性を紹介すると共に、FPをデブリ随伴FPと構造物等への付着FPとに分け、従事者の外部および内部被ばくに係る指標をインベントリ、線量換算係数などの積で定義する簡易評価手法を提示し、廃炉作業に係わる重要な核種を選定した。外部被ばく抑制には ^{137}Cs 、内部被ばく抑制には ^{90}Sr のほか ^{241}Am などの一部アクチニドへの対応が重要であることを示し、これらの核種についての研究課題を提示した。

KEYWORDS: *fission products, fuel debris, severe accident, decommissioning, occupational exposure*

I. はじめに

福島第一原子力発電所(1F)の廃炉作業を進めるにあたっては、燃料デブリ(デブリ)の存在箇所を同定することが必須である。原子炉容器(RPV)あるいは格納容器(PCV)内のデブリの分布位置は、シビアアクシデント(SA)解析コードによる予測とミュオンを用いた測定等で推定はされているものの、その正確な位置は、今後の調査により少しずつ明らかになってゆくものと考え¹⁾。一方で、作業を進めて行く上で障害となるのが、Csを初めとする放射性の核分裂生成物(FP)である。もともと燃料体に存在したFPのうち、 ^{131}I や ^{137}Cs などの揮発性のFPは事故進展の過程でRPV内、PCV内に飛散し、デブリ中にはウラン、超ウラン元素(TRU)と揮発性の低いFPなどが燃料被覆材や構造物の酸化物や金属等と混在して含まれる。廃炉作業を進めるにあたって

は、取り出し対象とするデブリのみでなく、FPの挙動にも十分配慮し、放射性物質の飛散、被ばく抑制を図ることが必須である。

本稿では、まずデブリとFPの基礎特性と事故時のふるまいを述べた上で、両者の挙動を比較し、FPの分配傾向の整理を行った。さらに、炉内でのFP分布の差異、廃炉作業時のデブリおよびFPの挙動、その取扱い、被ばくへの影響、環境への影響についての現状知見をまとめた。

II. 燃料デブリの基礎特性と事故時のふるまい

1. シビアアクシデント時の燃料ふるまい

SA時に炉心が露出し、温度が上昇し続けると、高温部の被覆管が膨れて破裂し、希ガスがRPV内に放出される(図1²⁾)。崩壊熱に加えてジルカロイ-水蒸気反応に伴って発生する熱により炉心温度がさらに上昇すると、被覆管や炉心構成材料の酸化に加えて、炉心構成材料間で融点よりも低い温度で溶け始める。燃料-被覆管界面では、熔融ジルカロイ中に UO_2 が溶け始め、被覆管外面の酸化膜が破損すると同時に、燃料棒内部の熔融燃

Comparison of fission products and fuel debris ; From the viewpoints of their effects on decommissioning work : Research Committee on Fission Product Behavior under Severe Accident.

(2019年6月6日 受理)

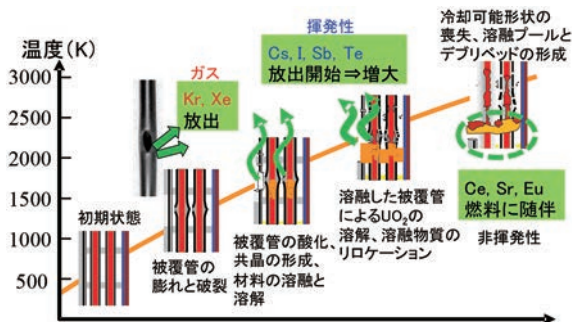


図1 SA時のデブリ形成過程FPのふるまいの概念図

料(U-Zr-O)が燃料棒外の下方向へ移行(リロケーション)し、炉心損傷が拡大する。冷却可能な炉心形状が失われ、溶融プールやデブリベッドが形成される場合がある。UO₂燃料ペレットに保持されていたFPの一部は、酸素ポテンシャルや蒸気圧に応じて気相へ移行する。RPV下部に移行した溶融金属や溶融酸化物は、RPVの貫通部等を破壊して一部はペDESTALに落下して、コンクリートと反応してMCCI(炉心溶融・コンクリート相互作用)生成物を形成すると推定されている。酸化されずにペDESTALに落下したZr等の溶融金属は、コンクリートから放出される水蒸気によって酸化されると推測されている。なお、一部の燃料棒は、未溶融のまま残ることがある。

制御棒は、B₄Cとステンレス鋼製被覆管の共晶反応により、Feを主成分としホウ素(B)を含有する低粘性融体を形成し、燃料棒に先行して炉心下方へ移行する。

2. デブリの性状

TMI 2号機やチェルノブイリ4号機のデブリに加えて、SA模擬試験(Phébus-FP試験等)や実験室規模で調製した模擬デブリについて、機械的特性(硬度、破壊靱性等)や熱特性(融点、熱伝導率等)、物理的特性(密度、結晶構造等)、化学的特性(溶解性、酸化性等)に関する性状データが蓄積されている。また、国際共同研究プロジェクトPreADESでは、各国専門家によるデブリ性状データの整理が進められている³⁾。

1F-1～3号機(BWR)とTMI-2(PWR)の炉心構成材料のモル比(U/Zr/Fe/Bor Ag-In-Cd)は、それぞれ31/39/25/5と50/37/9/4であることから⁴⁾、1Fのデブリに占めるZrとFeの割合は相対的に高いと考えられる。炉心溶融物質の主成分はUO₂とZrO₂の固溶体である。急冷条件では立方晶(U, Zr)O₂が単相のまま保持されやすいが、徐冷条件ではUリッチの立方晶(U, Zr)O₂とZrリッチの正方晶(+単斜晶)(Zr, U)O₂に相分離しやすい。また、炉心溶融物質が水中に落下して急冷されると、小規模では粒子状になり大規模では溶融固化物質の表面のみが粉体化しやすい。なお、高温の(U, Zr)O₂には、Fe, Gd, Caが一定量固溶する。

1号機PCVのペDESTAL外側の底部から回収された堆積物からは、立方晶(U, Zr)O₂や正方晶(Zr, U)O₂のU含有粒子が、2号機オベフロ養生シートからは立方晶(U, Zr)O₂や立方晶UO₂のU含有粒子がそれぞれ確認されている。これらの観測結果は、既存のデブリ性状や状態図の知見と整合すると考えられている。

(U, Zr)O₂等の酸化物のデブリに対し、金属質のデブリは、溶融進展時の酸化状況に応じて、Zr-(Fe, Cr, Ni)系金属間化合物あるいは(Fe, Ni)系合金等を形成する。実験と熱力学解析より、BはZrまたはFeと高硬度のホウ化物を形成して金属質デブリ中に析出する可能性が指摘されている。

炉心溶融物質とコンクリート界面の近傍では大きな温度勾配が生じ、到達温度に応じた階層構造を形成する可能性がある。コンクリートは1,200℃以上から液相が形成され始めてガラス化するとともに、主成分のSiO₂と(U, Zr)O₂との反応生成物の固相線温度は(U, Zr)O₂の約2,500℃から2,000℃前後まで低下することが推測される。

デブリ性状の主な課題として、デブリサンプルの代表性、マクロ性状、経年変化挙動、取出時の粉体化、臨界管理に重要な核種の分布が挙げられる。1Fデブリサンプル分析を継続することにより、事故時の到達温度や酸素ポテンシャル等が評価され、デブリ分布や事故進展の解明、合理的なデブリ取出し工程の策定等が期待される。

Ⅲ. 核分裂生成物の基礎特性と事故時のふるまい

1. SA時のFPのふるまい

図2に燃料損傷あるいは溶融に伴って放出されたFPの炉内各所におけるふるまいの概念図を示す。燃料温度の上昇、炉心の溶融に伴い、Cs, I等の揮発性FPは大部分がRPV内へ放出される。一方、Sr等の揮発性の低いFPは、その大部分が溶け落ちた燃料に随伴して移行し、デブリ内に残存する。Phébus-FP試験によれば、炉心インベントリに対するCsの放出割合は60～80%である

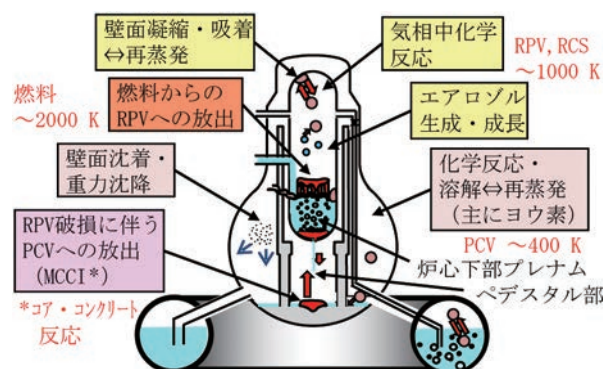


図2 炉内各所におけるFPのふるまいの概念図

一方、Sr の放出割合は1%以下である⁵⁾。RPV 内に放出された FP は凝縮、化学反応等による物理化学変化を伴いながら原子炉冷却系(RCS)を移行し、PCV に到達する。一方、RPV 破損に伴って PCV 内に移行したデブリからも、MCCI 等に伴って FP が放出される。

(1) RCS における FP の移行

RPV 内に放出された FP は、気相中の化学反応によって化学形態を変えながら RCS を移行する。一方、RPV 内のように比較的高温な領域においては、ステンレス鋼等の構造材とも化学反応を起こして吸着する(化学吸着)。これらの化学挙動には、デブリ形成過程で溶融した制御棒から放出される B が影響する可能性が指摘されている。また、FP は低温部に移行するに伴って過飽和となり、壁面への凝縮、エアロゾル化といった物理形態の変化が生じる。これらの吸着または凝縮挙動は、FP の化学形態(揮発性)に依存し、また、温度や雰囲気の変化によっては再蒸発が生じる可能性もある。RCS においては、これらの現象が同時に起こるため、FP のふるまいは非常に複雑である。

(2) PCV 内における FP 挙動

温度が 400K 前後である PCV 内においては、ガス状 FP を除く FP の大半はエアロゾルとして存在し、重力沈降、熱泳動等により壁面に付着する他、注水等によって水相に移行する。通常、PCV 内のエアロゾル挙動は、各メカニズムの理論式を解くことで求められる。I については PCV 内でも化学反応を起こし、それに伴って水相への溶解や再蒸発が生じる。

(3) RPV 破損に伴う PCV 内への FP の放出

模擬デブリの加熱試験である Phèbus-FPT4 試験⁶⁾では、デブリ内の Cs の 80%以上が放出され、Mo 等の中揮発性 FP についても、RPV への放出と同等の放出が見られた。また、MCCI を模擬した ACE 試験⁷⁾では顕著な Te の放出が見られたが、その他の FP は殆ど放出されなかった。

2. 1F 事故により明らかとなった課題の例

(1) Cs 化学挙動に対するホウ素の影響

1F では制御棒材から放出された B が RCS 内の Cs と結合して CsBO₂を形成し、Cs 化学形態に影響を与える可能性が指摘されている。また、B は RCS 内に沈着した CsI と化学反応を起こし、結果としてガス状 I の再浮遊を引き起こすとされている。このため、RCS 内の Cs 化学挙動評価の精度を向上させるため、Cs-I-B-Mo-O-H 系における化学反応速度データベースの構築等が行われている⁸⁾。

(2) 構造材への FP 吸着、付着、浸透メカニズム

1F の廃炉では除染や廃棄物処理等の観点から、RPV 内に残存した FP の性状に係る情報が必要となる。FP の構造材への吸着、付着および浸透メカニズムを解明するための研究が行われている。RPV 上部におけるス

テンレス鋼への Cs 化学吸着については、Cs がステンレス鋼中の微量成分である Si と結合して非水溶性の Cs-Fe-Si-O 系化合物を形成することが分かっている⁹⁾。また、コンクリートへの Cs の付着・浸透メカニズムについても、現象把握およびモデル化が進められている。

(3) 水相を介した FP の放出挙動

1F において、FP の大半は水相に存在しているとされている。その要因としては、デブリ中に存在する Sr 等の FP が浸出(リーチング)によって水相に放出されるため、また注水によって構造材に吸着又は付着した FP が水相に移行するためと考えられる。これらの水相を介した FP の放出挙動を解明するため、デブリからのリーチング挙動等に関する研究が実施されている。

IV. デブリと FP の分布の比較・整理を通じた廃炉作業時における FP に関する研究課題の検討

1. 比較・整理の方法

FP 元素とデブリ構成元素の物理化学特性が異なることから、FP とデブリの原子炉内での分布は異なる。このため、1F のデブリ取出し等においては、デブリ分布とは別に FP の分布を評価し、主に放射線源としての影響を評価することが重要である。そこで、FP のインベントリ等を考慮して代表的な FP を選択し、それらが図 3 に示すような「デブリ随伴 FP」および「付着 FP」の 2 つの FP 分布区分を形成すると仮定した。代表的な FP が、どちらの区分にどれだけ分布し、放射線源としてどのような影響を与えるかについての簡易的な指標の時間変化を計算し、FP 分布評価のための今後の研究課題案を検討した。

指標は以下の計算式により「デブリ随伴 FP」および「付着 FP」ごとに計算した。

「付着 FP」:

インベントリ × 放出率 × 線量換算係数

「デブリ随伴 FP」:

インベントリ × (1 - 放出率) × 線量換算係数

代表的な FP として、1 号機に対して計算されたインベントリの値¹⁰⁾を参考として、¹³⁷Cs、¹³⁴Cs、⁹⁰Sr、²⁴¹Am、²³⁹Pu、²³⁸U、^{125m}Te、¹²⁹I、¹⁰⁶Ru、¹⁴⁰Ba、¹⁵⁴Eu を選定

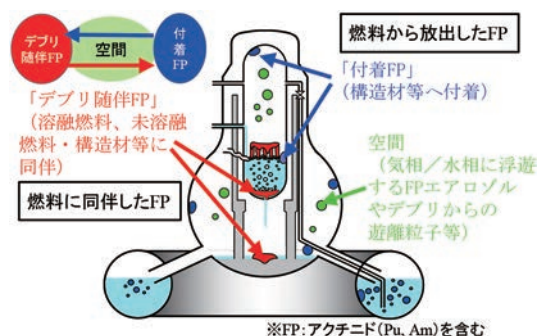


図3 FP 分布の影響評価のための区分

した。なお、本報においては Am や Pu 等のアクチノイド元素も便宜上 FP と称することとする。放出率としては、NUREG-1465¹¹⁾に示された BWR 事故時ソースタームにおける早期から晩期までの放出割合を合算したものを使用した。また内部被ばくに係る線量換算係数として、ICRP-72 に示された公衆成人の吸入摂取に係る 3 種のタイプの粒子に係る線量係数¹²⁾のうち最も大きな値を使用した。外部被ばくに係る線量換算係数は、グランドシャインによる実効線量係数の値¹³⁾を使用し、¹³⁷Cs および ¹⁴⁰Ba についてはそれぞれ娘核種である ^{137m}Ba および ¹⁴⁰La の値を加えた。

2. 指標の計算結果

図 4 および 5 に、それぞれ「付着 FP」の外部被ばくに係る指標および「デブリ随伴 FP」の内部被ばくに係る指標の時間変化を示す。尚、Am と Pu は同伴すると仮定している。図 4 より、「付着 FP」の外部被ばくに関しては、シャットダウン後は ¹³⁴Cs や ¹⁴⁰Ba 等の指標が高いが、10 年経過後には ¹³⁷Cs が支配的になることが分かる。一方、図 5 に示される「デブリ随伴 FP」の内部被ばくに関しては、²⁴¹Am、²³⁹Pu、⁹⁰Sr 等燃料から放出されにくい FP の指標が高い。

指標の計算結果をまとめたものを表 1 に示す。表には

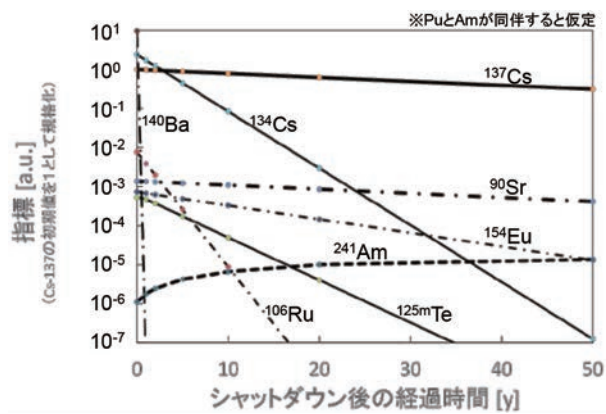


図 4 「付着 FP」の外部被ばくに係る指標の時間変化

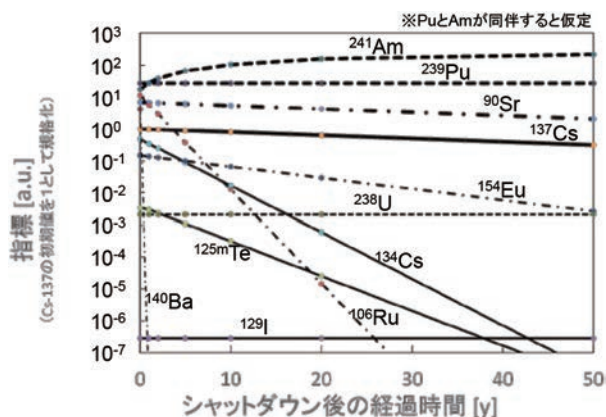


図 5 「デブリ随伴 FP」の内部被ばくに係る指標の時間変化

特に事故時ソースタームの観点で重要となる短期的 (シャットダウン後 1 年程度) な指標についても参考として示すが、本検討においては長期的な指標について述べる。表より、「デブリ随伴 FP」の内部被ばくを除きいずれも ¹³⁷Cs の影響が支配的であること、²³⁹Pu、²⁴¹Am および ⁹⁰Sr の内部被ばくへの影響が大きいこと、¹⁰⁶Ru は 10 年程度経過すれば影響は小さいこと等が分かる。

3. FP 分布とその変化に与える課題の検討

表 1 に示した指標の不確かさは大半が FP の燃料からの放出および移行挙動に起因するものであることから、分布とその変化の評価における課題についても同様に FP の放出移行挙動に係るものとなる。

Cs や Te についてはステンレスやジルカロイ等と高温で化学的に反応すること、Mo 等他の FP や B 等は Cs、I 等と化学反応を生じることなど、これら化学的挙動については FP 挙動全体に影響を及ぼす重要課題として認識されている¹⁴⁾。さらに、数十年間に及ぶことが予想されるデブリ取出し作業期間中には、付着 FP の水分への溶出や作業時の圧力変動による再浮遊、長期間の酸化等によりチェルノブイリ原発事故で生じたデブリ表面の変性とそれによる放射性物質の再浮遊等、空間への FP 放出を介して分布状態変化に与える挙動を考慮する必要がある。

このため、長期において有意な指標となった ¹³⁷Cs、⁹⁰Sr、²³⁹Pu および ²⁴¹Am の 4 つについて、これまでに知られている燃料からの放出・移行挙動に加えて、廃炉までの数十年にわたる長期の移行に影響を与える要因等についても考察した。FP の移行挙動については、付着 (燃料からの放出、化学吸着もしくはエアロゾルとして物理吸着) と再放出 (水相への浸出、気相への再浮遊等) の 2 つのプロセスに分け、それぞれ表 2 および表 3 に示す。

Cs については、構造材等に付着した Cs 化合物の安定

表 1 指標の計算結果のまとめ

	長期 (シャットダウン後 30 年経過)				短期 (シャットダウン後 1 年経過)			
	デブリ随伴 FP		付着 FP		デブリ随伴 FP		付着 FP	
	外部	内部	外部	内部	外部	内部	外部	内部
¹³⁷ Cs	◎	—	◎	◎	○	—	○	◎
¹³⁴ Cs	—	—	—	—	◎	—	◎	○
⁹⁰ Sr	—	△	—	○	—	○	—	○
¹⁵⁴ Eu	△	—	—	—	△	—	—	—
²³⁹ Pu	—	○	—	△	—	◎	—	△
²⁴¹ Am	—	◎	—	◎	—	◎	—	—
¹⁰⁶ Ru	—	—	—	—	○	○	—	—
¹⁴⁰ Ba	—	—	—	—	△*	—	△*	△*

◎：指標が最大

○：最大指標に対して ~1 桁指標が小さい

△：最大指標に対して 1 桁程度指標が小さい

—：最大指標に対して 1 桁以上指標が小さい

△*：シャットダウン後 1 年経過までに急激に指標が低下

表2 FP 付着に係る核種別の課題

^{137}Cs
- 事故時の化学吸着生成物(Cs-Si-Fe-O)とその安定性(水溶性等)¹⁵⁾ - エアロゾル中のCs化合物形態(Cs-B/Mo/Si-O)とその安定性(再浮遊性, 水溶性等)
^{90}Sr
事故時の特定条件(塩化物生成, 還元条件)における揮発性変化と炉内構造物との化学的相互作用¹⁶⁾
^{239}Pu ^{241}Am
事故時の燃料からの放出, 移行特性

表3 FP 再放出に係る課題

再放出に影響を与える付着物の特性
- 固着物(化学吸着生成物等)の水溶性等 - エアロゾルの再浮遊特性(周囲の衝撃等) - デブリ表面の物理・化学状態
再放出に与える長期的な観点での影響
- デブリ切削時の熱・機械的作用による局所的な高温等 - 放射線影響によるデブリや付着物表面の性状変化 - 水分, 雰囲気等による表面の相状態, 微細構造変化

表4 廃炉作業時の放射性物質管理の留意事項

分類	項目	デブリ随伴FP	付着FP
F/P 分布	1 放射能分布	固体の表面線量率は ^{137}Cs 等の高 γ 線放出核種で決まるが, その残存率は小さい。 ^{90}Sr 等の β 線放出核種の残存率大。	^{137}Cs 等の高 γ 線放出核種の残存率は比較的大きいが, 汚染水への移行が大きい。
	2 存在形態	主として固体中に存在。取り出し作業中に一部粉体化。難溶性であるが一部溶解。飛散性は比較的軽微だが, 破碎作業時に一部飛散の可能性あり。	粒子として壁面に付着。一部可溶性であり汚染水へ移行。広範囲に分布。揮発性のFPの飛散には注意が必要。ガス状のFPへの対応も必要。
作業対象	3 取扱い方法	燃料デブリは取り出しの主対象。ただし, 残存するFPは阻害要因。	FPは燃料デブリ取り出しの阻害要因であり対象外。場合により作業前除染が必要。
影響評価	4 臨界管理	重点評価項目であり, 管理が必要。	臨界評価は不要。
	5 被ばく影響	α 核種, β 核種を含み, 内部被ばくへの配慮が必要。外部被ばくは ^{137}Cs , ^{154}Eu 等が主要線源。体積線源であり, 線源強度に比して線量率は小さい。	β 核種の内部被ばくへの配慮が必要。外部被ばくは ^{137}Cs が主要線源。面積線源であり, 線源強度に比して線量率は大きい。
	6 環境影響	直接的な影響は比較的小さい。流出に対しての影響も比較的軽微。	ガス・粒子としての飛散, 汚染水としての拡散に留意。特に流出による汚染水への影響が大きい。

性(水溶性, 固着性)を評価することが重要である。また ^{90}Sr , ^{239}Pu および ^{241}Am については揮発性が低く大半がデブリに随伴していると考えられるものの, 事故時の特定条件, あるいはデブリ切削加工時等の局所条件での挙動について評価しておくことが望ましいと思われる。

再放出に影響を与える各種のFPの特性や挙動についてはこれまで体系的な研究がなされておらず, 今後の課題である。特に, 事故後数10年にもわたる長期間のFPの系統内の移行, 付着箇所の同定, および付着形態の把握が強く望まれる。

V. 廃炉作業時の放射性物質管理の留意事項

廃炉作業の今後の進展においてはデブリ取り出しが主体となるが, 放射線影響(被ばく管理)や汚染インベントリ(廃棄物管理)の観点からは, 先に規定した「デブリ随伴FP」と「付着FP」の双方について, FP挙動および分布を把握することが必須である。表4に放射性物質管理の留意事項をまとめて示す。

VI. まとめ

1. FP分布を「デブリ随伴FP」と「付着FP」に区分し, 被ばく影響等を簡易的に評価するための指標を試算して, アクチニドを含むFPの長期間にわたる重要度

を検討した。

2. デブリ随伴FPからのFPの再放出等, FPとデブリの両者にまたがるFPおよびデブリの特性・挙動評価についても留意した研究が重要であると考ええる。
3. 今後の廃炉作業の計画, 遂行に当たっては, 以下のステップで, デブリおよびFP分布の把握を深化させて, フレキシブルな対応を準備することが重要と考える。
 - 1) 廃炉計画時には, 核種の存在量と存在場所を推定して計画する。
 - 2) 廃炉作業の進捗とともに, 存在量と存在場所の把握精度を向上させ, 併せて, 存在形態を把握する。
 - 3) 廃炉作業の具体化に沿い, 上記1), 2)の情報に基づき, 廃炉作業従事者の外部および内部被ばくおよび環境への影響を適切に評価する。
 - 4) 上記2), 3)に則り, 適宜, 廃炉作業, 工程の見直しを図ることが肝要である。

(執筆担当: 高木純一(東芝エネルギーシステムズ), 中村勤也(電力中央研究所), 高野公秀(日本原子力研究開発機構), 宮原直哉(日本原子力研究開発機構), 逢坂正彦(日本原子力研究開発機構), 内田俊介(日本原子力研究開発機構))

－ 参 考 文 献 －

- 1) IRID, 「総合的な炉内状況把握の高度化(平成 29 年度成果報告)」, http://irid.or.jp/_pdf/20170000_01.pdf
- 2) F. Fichot, et al., Nucl. Eng. Technol., 38(3) 733-751 (2006).
- 3) NEA Preparatory Study on Analysis of Fuel Debris (PreADES) Project, <https://www.oecd-neo.org/jointproj/preades.html>
- 4) F. Tanabe, J. Nucl. Sci. Technol., 49, 18-36(2012).
- 5) A-C. Grégoire, et al., Ann. Nucl. Energy, 61, 63-74 (2013).
- 6) P. D. W. Bottomley et al., Nucl. Eng. Technol., 38, 163-174 (2006).
- 7) J. K. Fink, et al., OECD/CSNI Report NEA/CSNI/R (92) 10, Forschungszentrum Karlsruhe (1992).
- 8) N Miyahara, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 56, 228-240 (2019).
- 9) F. G. Di Lemma, et al., Nucl. Eng. Design, 305, 411- 420 (2016).
- 10) 西原 健司, ほか, JAEA-Data/Code 2012-018, (2012).
- 11) L. Soffer, et al., NUREG-1465, (1995).
- 12) ICRP Publication 72, Annals of the ICRP, 26, (1995).
- 13) K. F. Eckerman and J. C. Ryman, Federal Guidance Report No.12, EPA-402-R-93-081, (1993).
- 14) L. E. Herranz, et al., Nucl. Eng. Design. 288, 56-74 (2015).
- 15) K. Nakajima, et al., "Study on chemisorption model of cesium hydroxide onto stainless steel type 304", 27th Int. Conf. Nucl. Eng. (ICONE-27), Ibaraki, Japan, May 19-24 (2019).
- 16) A. Mohamad, et al., "Chemical trapping of Sr vapor species by Zr cladding under a specific chemical condition", Int. Topical WS on Fukushima Decom. Res. (FDR2019), Fukushima, Japan, May 24-26 (2019).



From Editors 編集委員会からのお知らせ

－ 最近の編集委員会の話より －

(7 月 18 日論文誌全体会議)

- ・新年度編集委員長から着任の挨拶があった。
- ・編集長から、編集委員会の実績の紹介と、英文誌、和文誌、国際会議論文誌の出版状況の経過、および新年度の主要な活動目標、編集委員の役割等が説明された。
- ・副編集長から、Pre-Screening や担当編集委員の役割、審査の注意点についての解説があり、その後、質疑応答があった。
- ・英文誌出版社の Taylor&Francis 社から最新の Publication Report の報告があった。2018 のインパクトファクターは 1.246 に改善した。
- ・事務局より、新任委員を対象に Web 審査システム ScholarOne Manuscript の使用方法の説明があった。
- ・第 7 分野の編集委員交代を承認した。

(8 月 6 日第 1 回 論文誌編集幹事会)

- ・5 月 16 日から 7 月 15 日までに英文論文誌に 60 報、和文論文誌に 4 報の新規投稿があった。
- ・第 7 分野を主とした論文審査分野の見直し案に対するコメントを反映して、最終案を決定した。第 7 分野の編集委員体制の整備状況を見て、実

施する。

- ・原子力関連ジャーナルの分析をもとに、インパクトファクターの向上策を検討した。
- ・英文化 WG の進捗状況が報告された。理事会に製本および配布先等説明資料を提出する。
- ・学会賞論文賞の推薦方針を確認した。
- ・和文誌掲載論文の英訳転載の申し出を承認した。掲載料は通常通りとする。
- ・英文誌出版関連での手続きや校正ミスが報告された。厳重に申し入れをすることとした。

(8 月 6 日第 2 回 学会誌編集幹事会)

- ・学会誌のアンケート結果のうち、理事会所掌範囲の回答を纏めた資料の提出があり、編集長から説明された。次回理事会に提出し、委員長から報告してもらうこととした。
- ・19 秋企画セッションの記事執筆の打診状況の報告が事務局からあった。
- ・来年度も引き続き学会誌アンケートを実施することとした。
- ・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>

蓄エネ技術が着々と力を蓄えている？

フリージャーナリスト 井内 千穂

再生可能エネルギーのうち、太陽光発電や風力発電などは、天候や風況という自然の変化により時々刻々、四季折々変動する発電量を平準化するために蓄電池設備が必要であり、その技術とコストがネックになるという。6月上旬、友人が事務局を務める蓄エネルギー技術の国際会議に行ってみた。

世界各国からの蓄エネエキスパートにより、エネルギー貯蔵に関する最新の海外市場動向、技術情報が次々に発表される。中国を中心に電気自動車(EV)の販売台数が凄い勢いで伸びており、蓄電池の価格はどんどん下がっているとか。AI技術をベースにしたソフトウェアで複数の蓄電池を群制御し分散型エネルギーの最適制御オペレーションを提供するという英国のITベンチャーが日本の商社とも資本業務提携するなど、小さな範囲でなら発電量の平準化を可能にするシステム開発は進められており、こういったベンチャーにとって、再エネ・蓄エネ分野はビジネスチャンスの宝庫のようだ。また、80℃から120℃の温水を利用した発電と蓄エネというスウェーデン企業の話も興味深かった。

現実的な技術の話のほか、さる大学教授から、「広大な土地とふんだんな太陽光に恵まれた国(オーストラリアなど)に太陽光発電パネルを敷き詰め、その電気を水素蓄電タンカーで日本に海上輸送する」という壮大なパートナーシップのアイデアが披露された。原油や天然ガスのように、「電気」をタンカーで運ぶというのだ。本気？ コストもエネルギー安全保障も事故のリスクも廃棄物の問題も抜きの空論だと思ったが、これぐらい「なんでもあり」で未来を構想する場において、蓄エネ技術はネックではなくキーであり、そこかしこで精力的に語り合うビジネスマンたちも妙にエネルギーがみなぎっていた。

Column

スロバキアとオーストリア間の国際送電

コメニウス大学医学部英語コース 妹尾 優希

スロバキアよりこんにちは。前回の投稿では、モホフツェ原子力発電所の運転をめぐりスロバキアとオーストリアの国家間で争いが起きているとお話ししました。実は、原子力発電所を巡っての両国の論争は今回が初めてではなく、約30年にも及ぶ確執があります。

以前にも紹介しましたが、欧州での国際送電の歴史は長く、スロバキアでは1952年のチェコスロバキア社会主義共和国時代からスロバキア南部のノヴェ・ザームキ市とハンガリー北部のキシュグマンド市で送電網の運用が開始されています。現在、スロバキアは欧州送電系統事業者ネットワーク(ENTSO-E)と呼ばれる欧州と周辺国の36カ国を繋ぐ膨大な電力取引連盟と、中東欧電力供給機構(CENTREL)というチェコ、ハンガリー、ポーランド間の送電網によって電力を融通しています。

オーストリアとの国境沿いに位置するストゥパバ市には国際送電用の変電所が設置されており、チェコのソコルニツェ市の変電所と繋がっています。1990年にストゥパバ市変電所の着工が始まった当初は、60km先のウィーンと送電網で繋ぐことが予定されていました。しかし、1995年のモホフツェ原子力発電所1・2号機の建設に、オーストリアが反発したことで計画は白紙になっています。この、ストゥパバ＝ウィーン間の送電網は、本来スロバキアと西欧の国々を繋ぐ、スロバキアの電力輸出入の中核となる存在であったため、送電網の接続に向けたオーストリア政府との交渉が幾度となく重ねられています。もっとも、近年オーストリアは、輸入時も原子力発電からの電力ではない保証書付きの電力のみ輸入するなど、原発フリーに向け更に力を入れており、スロバキアとオーストリア間の送電網の開通の実現は難しそうです。

基礎研究をたくさんしたい

京都女子高等学校 3 年生 鳥居 千智

基礎研究が「役に立たない」と見られているようだ。財政難もあり国は「役に立つ」研究を重視し始め、3 年前基礎科学研究の原資となる、国立大学の運営費交付金や教員の削減を行おうとしたそうだ。

しかし、大学に対してはそこまでしなくても良いと思う。大学はもし、役に立たない研究であったとしてもむしろそういう研究を促すためにあるものではないのだろうか。技術の開発は企業など大学以外でもすることができ、そもそも大学は主体性を持って学びたいことを突き詰めるためにあると思うからだ。人々が、特に若い世代がのびのびと研究できる場が大学だと思う。

また、基礎研究が役に立たないものだとは思わない。基礎研究はいつどうやって発展するか分からないという面があるようだが、基礎研究から応用した、日々の生活に活かされている技術は身の回りにたくさんある。

また、こうも思う。基礎研究で得た成果から応用につなげやすくする環境を整えることが先なのではないか。今、基礎研究が役に立ちにくいとされているのは、基礎研究自体が役に立ちにくいのではなく、それを技術の開発などに導く環境が足りないだけなのではないか。長い目で見てはこちらの方が利益もあるはずだ。

これから大学に入っていく側としても、応用につなげやすい環境になるにはどうすればいいか考えていきたいものだと思う。

Column

「考える」ことを諦めない

福島県二本松市安達高校 2 年生 服部 杏菜

先日受けた進研模試国語の評論で、興味深い内容が書かれていた。科学における権威と我々のあり方について展開されていたのだが、特に、読みながら首をブンブン縦に振ってしまう箇所があった。「人は権威にすがりつき、安心してしまいたい、そんな心理をどこかに持っているのではないかと思うのだ。抛りどころのない『わからない』という不安定な状態にいるよりは、とりあえず何かを信じて、その不安から逃れてしまいたいという指向性が、心のどこかに潜んでいる。権威主義は、そこに忍び込む。」まったくその通りだなと思った。現に私も今、こうしてこの文章によりかかっているのは、潜在的なそういう心理が作用しているからなのかもしれない。ただ私の場合、少なからず「考える」という行為を全うしているふりをしているのでギリギリセーフだろう。問題は、その後の思考を完全に遮断してしまうことだ。我々非科学者はどうしても、科学的な分野になると「専門家に任せておけば大丈夫だろう」と、その先を強制的にシャットダウンしてしまう。大丈夫じゃなかったから、原発事故後ひどい混乱を招き、それがあんなに私たちを苦しめていたというのに。急に具体的な話になってしまったが、本当にこれは非科学者の間で比較的広範囲にわたって蔓延しているであろう、言わば他力本願的思想なのではないかと思う。私たちはもう少し危機感を持った方がいい。もちろん専門家は私たちよりはるかに豊富な知識を持っているわけだから、当然その人の意見は根拠も説得力もある。しかし、それをあたかも「科学の詰まるところ」と認識してはいけないのだと思う。でないといつか誰かの思惑によって簡単に騙されてしまうかもしれない。

ダークをホープへ転じる旅

フリーライター 服部 美咲

「白雪姫」や「シンデレラ」, 「塔の上のラプンツェル」など, ディズニーアニメには, グリム童話を原作にするものが多い。しかし, 編纂当初のグリム童話には, 子供たちを怖がらせて教訓を与えるための物語が少なくなかった。残酷な描写や性的な表現, 不条理で後味の悪いダークストーリーである。一方, 現代の子供たちを虜にするディズニーアニメは, 残酷さとは縁遠い。魅力的なディズニープリンセス, 躍動感に溢れるアクションシーン, 全てがハッピーエンドに繋がっている。

昨今, 災害や事故の爪痕を巡る「ダークツーリズム」が密かな人気だ。ダークツーリズムは, 誰もが持つ怖いもの見たさや暗い好奇心を満たしてくれるのかもしれない。数年前, 震災と原発事故に見舞われた福島をダークツーリズムの対象とする動きもあった。

現在, 福島では, 津波に被災した沿岸部や, 原発事故後に避難指示の出た地域を巡るツアーが数多く企画される。県は, 「ホープツーリズム」としてこれを推進するⁱ。震災と原発事故の記憶だけではなく, 再び立ち上がり, 復興の道を歩み出す人々の希望に触れる旅である。福島県の各地を訪れれば, 「この土地に相応しいのは, ダークツーリズムではなく, ホープツーリズムだ」と誰もが納得するはずだ。

残酷なグリム童話は, 希望溢れるディズニーアニメに語り直された。未来を担う子供たちに伝えたいのは, 恐ろしい寓話ではない。苦悩の先に立ち上がり, 歩みだす希望の物語である。

ⁱ 「今, 福島に行くということ」阪本健吾, 2018 https://synodos.jp/fukushima_report/22360

Column

物理の時間・生物の時間

NPO あいんしゅたいん 坂東 昌子

私たちは, 環境の情報を脳の一時保存に格納し整理し保存領域に収める。この世に生まれてこの方, 休む間もなく情報が蓄積する。個々の脳は対象物を正確に反映してはいないが, その中で共有する情報はほぼ正確だ。これを法則化する作業が科学の営みといえる。それは私とあなたを入れ替えても不変だ。ここに対称性の基本がある。しかし, 異質な情報に遭遇すると驚き, 新情報が付加される。子供は毎日が驚きの連続だが, 大人はそうはいかず蓄積速度が減る。この速度が人の時間感覚だ。大人の場合は, 時間に対して脳の感じる時間が短い, 子供の1年は長く感じる。今を未来に繋ぐのが驚きだ。新事態や思いがけない展開に出会うと, 情報量が増え更新されが, この過程で実はエネルギーを消費しているのだ。「生き物とは何か」(本川達雄)には, 「エネルギーを使えば使うほど時間が速くなる」とあり, 生物から始まって社会環境の時間まで論じている。

物理学ではよく時間と空間をまとめて「時空」という4次元で捉えるのだが, この中で時間は特別だ。空間は前にも後ろにもいけるが, 時間だけは後ろに戻れない。時間は過去から未来に流れて行って逆戻りできない。この「時間の矢」は, 宇宙進化(ホーキングら)やエントロピー(プリゴジンら)と関連して論じられているが, 大きな謎の一つだ。どちらもエネルギーと関係していると思うと好奇心がむらむらとわく。

私は, 定年後, 新分野「放射線の生体影響」の研究を始め多くの異分野の方々と知り合い, 驚きの連続だ。齢には関係なく1年前の自分は遠い昔と感じる。湯川秀樹の色紙「今日1日生きることは1歩進むことでありたい」とある。その哲学が読めてきたような気がした。

好奇心と科学

東京学芸大学附属国際中等教育学校 6 年生 マイケル 瑛美

私たち人類の発展は科学によって支えられてきた。好奇心、社会貢献、様々な思いがあっただろう。しかし、科学の発展には何よりも科学者の存在が欠かせない。

原爆の父と呼ばれる物理学者のオッペンハイマーはその容姿端麗さからも広く知られている。当時の時代背景から、科学の戦争利用などの非人道的利用が問題となり、オッペンハイマーを始めとする科学者たちは科学における倫理的側面を重要視するようになった。一方で、水爆を産み出すことに没頭していたのが、後に水爆の父と呼ばれるエドワード・テラーだ。彼はオッペンハイマーと同じ物理学者であり、同じ研究室で研究を行っている時期もあった。エドワード・テラーは自らの好奇心に従い、より強力で、無限のエネルギーを産み出すことにこだわっていた。けれども、彼の異常なほどの科学への好奇心が社会には受け入れられなかった。

私たちは、歴史から何を学ぶのであろう。これまでも、これからも科学に対する好奇心が科学の発展を支え、現代の私たちの生活を支えていることは事実だ。けれども、科学への好奇心、利益だけに気をとられすぎると、社会に受け入れられない。倫理的側面を同時に発展させていかなければ、科学の平和利用はあり得ないと思う。

Column

無関心と寛容

東洋大学社会学部 渡辺 真由

大学生活が始まってから1年と少しが経った。東京の生活にも少し慣れてきた。大学2年になってから、震災復興系のテーマを扱うゼミに入った。しかし、私以外全員首都圏出身のため、東北三県のような震災を経験していない。現地の様子を事前に知ろうとする姿勢もあまり感じられない。私は、地元にも通じる事があると考えこのゼミを選択したのだが、周囲はそうでもない、むしろ無関心で気怠そうにしているのだと気付いた。どこか悲しくなった。

弟が今年の夏、アメリカ留学プログラムに参加する事になった。「自由」テーマで各自簡単なプレゼンをする選考会が事前にあったが、無事通過したそうだ。弟が選んだテーマは「福島食材について」。実際に首都圏に住んでいる知人に聞き取り調査をしたので紹介しようと思う。「トマトなどの農作物はよく見かけるので買っている」「水産物はまだ少ないので頑張って」「全袋検査しているので安心してお米も食べている」「産地は特に気にせず、必要なものを買っている」「嫌煙も特別視もしていない」。など、積極的に手に取ってくれる方から、特に気にしないという方まで様々な意見が集まった。知人やその知り合いが調査対象だったため、少し結果に偏りはあると思うが「頑張って欲しい」「特別視もしていない」など、ネガティブが少なく寛容な意見が多かったのが嬉しかった。

無関心と寛容は紙一重だ。8年経った今、全く何も思わない人もいるし、状況を知った上で良い意味で特に何も思わない人もいる。このページを読んでいる方は後者であろう。

私自身、このコラムを執筆していて辛いとき、あまり考えたくない思い出したくないことも少なくはなかった。しかしこの700文字が、寛容さに繋がるきっかけになればと思う。

電子顕微鏡の現状と将来展望

第2回 電子線ホログラフィーによる材料解析

日立製作所 谷垣 俊明

電子線ホログラフィーは電子波の干渉を用い、観察対象の電磁場や歪みを高い分解能で観察することができる手法である。本手法は材料機能発現の根幹を明らかにし、次世代材料の開発に有用な知見を与えると期待される。近年開発された電子線ホログラフィーの先端手法として、従来法では観察できない参照領域から離れた領域を観察可能にする分離照射電子線ホログラフィー、電磁場を三次元的に観察する手法、収差補正器を搭載した1.2MVホログラフィー電子顕微鏡による高分解能磁場観察法とその応用を紹介し、最後に将来展望を述べる。

KEYWORDS: *Electron, Electron microscope, Electron holography, Tomography*

I. 背景

電子線ホログラフィーは電子顕微鏡レンズの収差を補正し分解能を向上させることを目的とし、Gaborにより1948年に発明された。本手法は試料情報を含む電子波の干渉像であるホログラムの記録と、記録したホログラムから試料を透過した電子波の振幅と位相を再生する二段階の手順で行われる。ただし当時の電子顕微鏡は電子線ホログラフィーを実現するために必要な電子源の輝度が十分ではなかったため、Gaborはホログラフィーを電子顕微鏡ではなく光学顕微鏡で実証した。輝度の高いレーザー光の実現により、光の分野でホログラフィーの応用が急速に進み、1971年にGaborはホログラフィーの開発成果でノーベル物理学賞を受賞した。

ようやく電子顕微鏡で電子線ホログラフィーが実現したのは、尖った針先から電子を電界放出する輝度の高い冷陰極電界放出形電子銃が開発された以降の70年代後半になってからである。その後、電子線ホログラフィーは電場観察や磁場観察の手法としての応用が進み¹⁾、近年では回折波を干渉させる方法により、材料内部の歪み観察もできる²⁾。また、収差補正器が実用化した2000年以降も、補正器で補正することができない収差を後処理で補正し原子配列を高精度に観察する、Gaborが発明した本来の目的での応用が行われている。

本報告では近年開発した電子線ホログラフィーの先端手法を紹介し、最後に将来展望を述べる。

II. 分離照射電子線ホログラフィー

電子線ホログラフィーのホログラムは、試料を透過した電子波である物体波と真空などの参照領域を通過した参照波を、バイプリズムの作用で重畳させ干渉させることで得られる(図1a)。バイプリズムは平行平板の間に設置した電極フィラメントに電圧を印加することで、フィラメントの左右を通過する電子波に偏向作用を与えることができる。簡略化のため図1では平行平板とレンズを図示せず電子波の伝播を模式的に示している。この際、干渉縞(ホログラム)を得ることができる物体波と参照波の試料面上での距離は、試料面での電子波の横方向の可干渉距離で制限される。図1では観察できる領域を分かりやすく示すため、干渉性が得られる電子波の伝播を模式的に太線で示している。太線で示す電子波の外側にあたる領域は電子線ホログラフィーで観察することができず、従来は試料の端近傍しか観察できなかった。この制約は電子線ホログラフィーの応用を妨げる大きな問題であった。

この問題を解消するため、分離照射電子線ホログラフィー³⁾(図1b)を開発した。この手法では電子源と試料の間に照射系バイプリズムを設置し、このバイプリズムの作用で電子波を分離し、片方の電子波で観察箇所を狙って照射し、もう片方の電子波を参照波とし参照領域を通過させる。その後、試料と記録面の間に設置された

Material Analysis by Electron Holography : Toshiaki Tanigaki.
(2019年5月15日 受理)

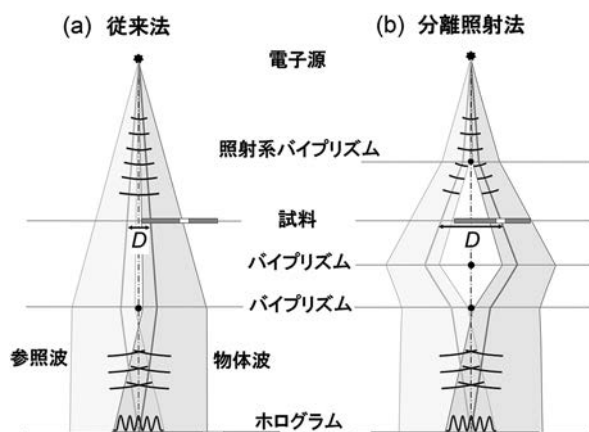


図1 分離照射電子線ホログラフィーの模式図

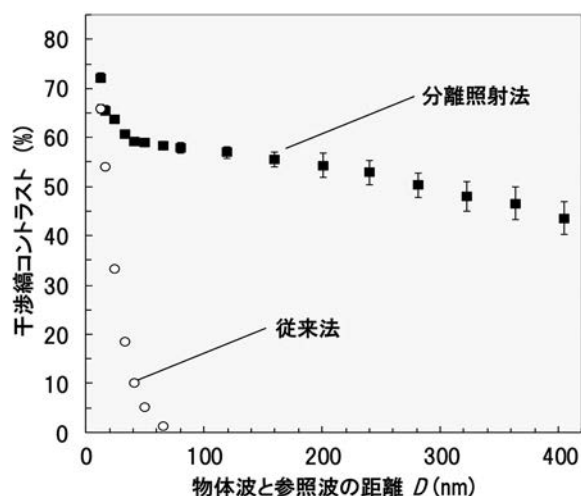


図2 電子線ホログラフィーの干渉縞コントラスト

バイプリズムの作用で物体波と参照波を重畳させてホログラムを得ることで、干渉性を保持したまま試料面での物体波と参照波の距離を離すことができる。

従来法と分離照射電子線ホログラフィーで得たホログラムの干渉縞コントラストを図2に示す。従来法では物体波と参照波の距離を離すと急激にコントラストが低下するのに対し、分離照射法では物体波と参照波の距離を離してもコントラストが保たれる。この特性により分離照射電子線ホログラフィーを用いると、試料の端から離れた領域を観察することができる。

一つの応用例として電磁鋼板の観察例³⁾を図3に示す。電磁鋼板はモータや変圧器などに使用されており、エネルギー変換に貢献する材料である。電磁鋼板中に析出物があると、磁壁が析出物にピンギングされ電磁鋼板の性能が低下するため、ピンギング状態の解析は電磁鋼板の開発において重要である。このピンギングされた状態を観察するためには、試料エッジから離れた領域を観察する必要があるが、従来法では観察することができなかった。分離照射電子線ホログラフィーの適用により、ピンギングされた状態の磁束線を定量的に観察することができた。

より高精度の電磁場観察を目的とし、電子源と試料の

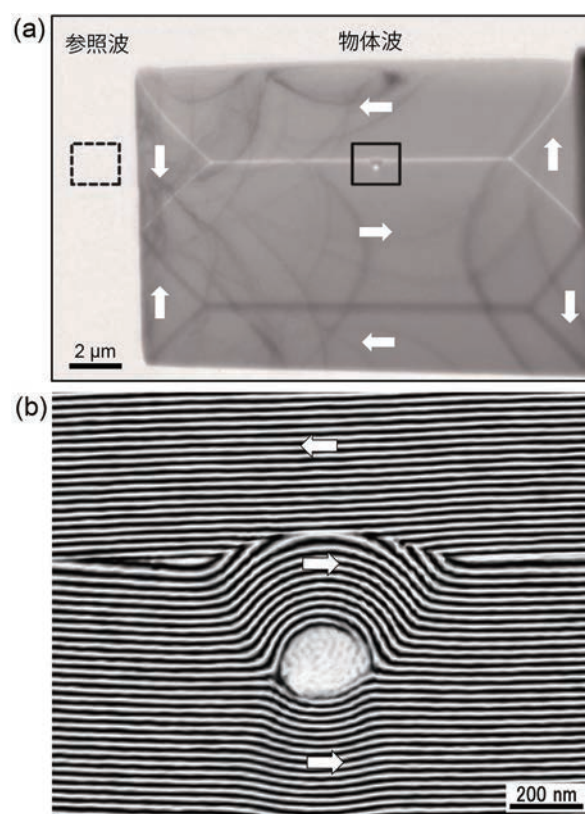


図3 分離照射電子線ホログラフィーで観察した電磁鋼中のピンギング領域での磁束線分布。矢印は磁場の向きを示す。

(a) 低倍率で観察した Lorentz 顕微鏡像

(b) 図(a)中に黒四角枠で示したピンギング領域の観察結果。白黒の線は磁束線に対応している。

間に二本のバイプリズムを設置する、二段分離照射電子線ホログラフィー⁴⁾も開発している。この手法は照射系バイプリズムのフィラメントが試料面を作る Fresnel 縞を除去する光学系を構築し、Fresnel 縞によるアーティファクトを除去したものである。

Ⅲ. 三次元電磁場観察

我々の生活を支える材料は三次元構造体であり、材料中の電磁場構造が三次元的な構造を有する場合、その詳細な理解のためには三次元観察が必要となる。また近年、ナノスケールの磁気的な渦であるスキルミオンが次世代低消費電力メモリの候補として注目されているが、そのような磁気渦の三次元構造を解明することは基礎研究としても応用研究としても重要である。この三次元観察を行うためには、観察対象を様々な方向から観察し、得られた投影像のデータセットから三次元構造を再構築するトモグラフィーという技術がある。電子線ホログラフィーとトモグラフィーを組み合わせることで、電磁場の三次元的な観察は90年代から行われているが⁵⁾、実用的な技術になったのはデジタル計測技術とデータ演算速度が向上した2000年頃になってからである。

電場や電位のようにベクトル成分をもたないものを三次元観察する場合には、一つの回転軸で180度の角度範

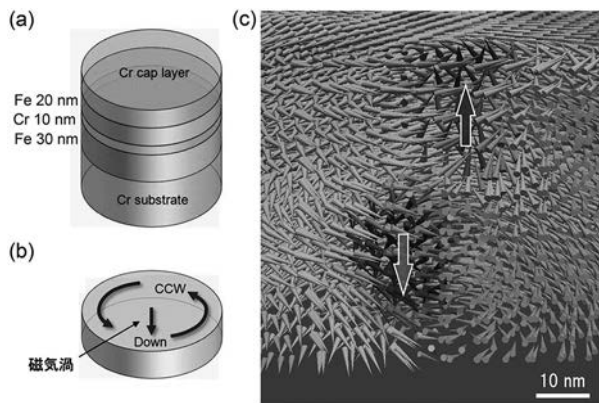


図4 磁気渦の三次元観察

(a) 試料の模式図 (b) Fe 円盤内の磁場の模式図
(c) 磁気渦中心の三次元磁場分布

囲で投影データを取得すればよい⁶⁾。一方、ベクトル成分(B_x , B_y , B_z 成分)を持つ磁場を三次元的に観察する場合には、少なくとも二つの回転軸でトモグラフィー計測することにより、二つのベクトル成分(B_x , B_y 成分)を三次元的に再構築し、その結果を使い残りのベクトル(B_z 成分)を Maxwell 方程式により計算で得る必要がある⁷⁾。この際、電子波は電場と磁場の影響を受け変化するため、観察された電場と磁場情報を何らかの方法で分離する必要がある。その代表的な手法が、試料を表裏から観察する方法で、電場は表裏で同じ投影成分になるのに対し、ベクトル成分を持つ磁場の情報は表裏で観察結果の符号が反転する特性をうまく使うものである。具体的には表と裏の観察結果の和の半分が電場情報、表と裏の観察結果の差の半分が磁場情報となる。従って、磁場を三次元的に観察するには、二つの回転軸でそれぞれ 360 度の角度範囲で投影データを取得する必要がある。

三次元観察においては、超高圧電子顕微鏡の高い透過能がより厚い試料を観察するために有効である。1MV ホログラフィー電子顕微鏡による三次元磁場観察の一例として、磁気渦の三次元観察結果⁸⁾を紹介する。超高圧電子顕微鏡用二軸 360 度回転ホルダーによる磁気渦の三次元磁場観察試料として、二枚の Fe 円盤(直径 180 nm)が Cr 層で区切られている試料(図 4a)を作製した。作製した Fe 円盤内での磁場は時計回り(CW)か反時計回り(CCW)で回転し、中心では Up か Down の向きに立つと予想される。図 4b は CCW と Down の場合を模式的に示している。作製した試料を二軸トモグラフィー観察し得た磁気渦の三次元構造を図 4c に示す。それぞれの Fe 円盤内の磁場ベクトルが三次元的に再構築されており、どちらの円盤も内部で反時計回りに回転する磁場があることが分かった。また、それぞれの円盤の中心部には磁気渦が観察され、磁気渦の中心における磁場の向きが反対方向であるため、それぞれの磁気渦が反発し上下で位置がずれている様子も観察された。観察した試料構造での安定な磁化状態をシミュレーションした結

果、観察された結果は一つの安定状態であることが確認された。本結果は本手法により複雑な磁場を三次元的に観察することができることを示す。

IV. 収差補正 1.2MV ホログラフィー 電子顕微鏡による高分解能磁場観察

電子線ホログラフィーの分解能は電子顕微鏡そのものの分解能と、干渉縞間隔や再生条件などのホログラム計測条件で決まる。しかし、ホログラム計測条件は調整することができ制約条件とならないため、分解能を上げるために求められることは高い分解能の電子顕微鏡を開発することである。電子線ホログラフィーで究極の分解能を実現するため、FIRST 外村プロジェクト(2010~2014 年)で収差補正器を搭載した 1.2MV ホログラフィー電子顕微鏡を開発した⁹⁾。開発した電子顕微鏡は高分解能観察用と磁場観察用に二つの試料ステージを有する。高分解能観察位置は対物レンズの強い磁場内に試料を置くため、試料の磁氣的構造が壊れ磁場観察ができない。一方、磁場観察用位置は試料に磁場が印加されない状態で観察することができ、試料の磁氣的構造を観察することができる。高分解能観察位置での分解能は 43pm で、磁場観察位置での分解能は 0.24nm である。

磁場観察位置で Au(111) 格子面間隔(0.24nm)の分解能を有することより、原子レベルでの磁場観察実現への期待が高まるが、実現には困難な壁が立ちあがる。それは、前述したように磁場観察では、裏表の観察を行うことで電場情報と磁場情報を分離する必要があることである。低い倍率の観察ではこの表裏観察は比較的容易に行うことができるが、原子分解能での磁場観察になると、同じ原子列を電子線に対して同じ関係で表裏を観察することは大変困難である。実際にはサブナノメートルレベルの分解能を求められる観察から表裏観察は実施困難になる。

この課題を解決するため、近年、パルス磁化反転法を開発した。この手法は、試料近傍に設置した磁場印加コイルで瞬間的に強い磁場を試料に印加し、試料内の磁化方向を反転させることで、表裏観察を行わずに、磁場成分の観察結果の符号を反転させるものである。試料内の磁化方向が反転するだけなので、試料と電子線の間隔を保つことができると機械的な試料保持の安定度が保たれることが本手法の強みである。これにより高い分解能での磁場観察が可能となった。

本手法を CoFeB/Ta の多層膜中の磁場観察に応用した例を紹介する¹⁰⁾。CoFeB と Ta の界面はスピントロニクス研究分野で注目を集めている。しかし、その界面の構造と磁氣的状態に関しては、マクロ計測しかこれまで行われていなかった。そこで開発したパルス磁化反転法を使い、界面の構造と磁氣的状態の関係を調べることに

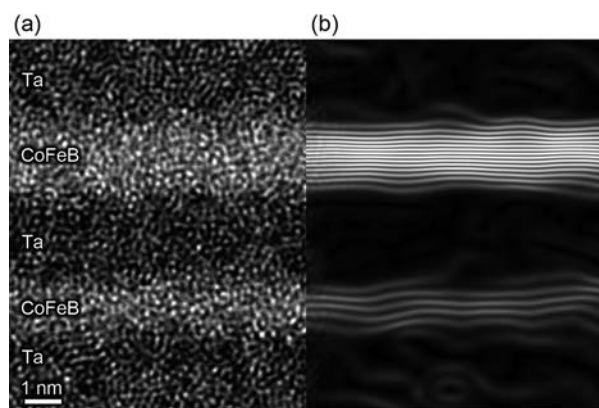


図5 CoFeB/Ta多層膜の高分解能磁場観察結果

(a)透過電子顕微鏡像

(b)磁場分布の観察結果。白線は磁束線に対応している。

した。

試料として CoFeB の膜厚を 0.5nm, 1.0nm, 2.0nm と変えた CoFeB/Ta の多層膜をスパッタ法で作製した。作製した試料の 1.0nm と 2.0nm 膜厚の部分の透過電子顕微鏡像を図 5a に示す。CoFeB と Ta の界面はコントラストがなだらかに変化しており、組成が混合していることが分かった。高分解能磁場観察結果を図 5b に示す。ホログラムの計測条件は干渉縞間隔を 0.22nm とし、再生条件は干渉縞間隔の 3 倍までの情報を取り込む条件とし、磁場観察としては分解能 0.67nm での観察であった。図 5b に示される線は投影された磁束線であり、CoFeB 膜内で面内方向の磁束線が観察された。また、磁束線の間隔が磁場の大きさに比例しており、CoFeB/Ta 界面で磁場が弱くなっている様子が観察された。また、1.0nm 膜厚の CoFeB 膜内の磁場の方が、2.0nm 膜厚の CoFeB 膜内の磁場より弱いことが分かった。電子線ホログラフィーの強みとして組成の混ざり具合を投影電位情報から概算することができる。それぞれの膜に対して混ざり具合を解析したところ、1.0nm の膜では膜の中心まで Ta と混合してしまっており、そのため磁場強度が低下していることが分かった。このように、電場と磁場成分を分離する必要があることは、電磁場観察で課題になる場合があるが、一度それらを分離することができれば、構造や組成と磁場分布の関係を高い分解能で解析することができ大変有用であると言える。

V. まとめと将来展望

電子線ホログラフィーの先端技術として、分離照射電

子線ホログラフィー、三次元電磁場観察、収差補正 1.2MV ホログラフィー電子顕微鏡による高分解能磁場観察を紹介した。いずれの手法も電子線ホログラフィーの適用範囲を拡大するものであり、様々な分野で活用されることを期待する。

最後に今後の展望について述べる。電磁場観察の基礎的な空間分解能はハード開発により向上した一方、より微弱な電磁場を観察するため高感度化が求められている。現在、高度情報処理技術を電子線ホログラフィーに適用し、電磁場観察の感度を向上させる研究を JST CREST (代表研究者：九大村上恭和教授)で進めている。具体的には AI や機械学習による高感度化や、タンパク質やウィルスの構造解析で成功した単粒子解析の概念を電子線ホログラフィーに応用し、感度を向上させる研究を行っている。本研究により近い将来、原子分解能で高感度に電磁場観察ができるようになると期待している。

謝辞

本研究は内閣府総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものです。また、本研究の一部は JST CREST (JPMJCR1664) の支援を受けたものである。

－ 参考文献 －

- 1) A. Tonomura, Electron Holography 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- 2) M. Hÿtch et al., Nature 453 (2008) 1086.
- 3) T. Tanigaki et al., Appl. Phys. Lett. 101 (2012) 043101.
- 4) T. Tanigaki et al., Ultramicroscopy 137 (2014) 7.
- 5) G. Lai et al., J. Appl. Phys. 75 (1994) 4593.
- 6) T. Tanigaki et al., J. Electron Microsc. 61 (2012) 77.
- 7) R. Tsuneta et al., Microscopy 63 (2014) 469.
- 8) T. Tanigaki et al., Nano Lett. 15 (2015) 1309.
- 9) T. Akashi et al., Appl. Phys. Lett. 106 (2015) 074101.
- 10) T. Tanigaki et al., Sci. Rep. 7 (2017) 16598.

著者紹介



谷垣俊明 (たにがき・としあき)

日立製作所 研究開発グループ

(専門分野/関心分野)電子顕微鏡の開発と物性研究への応用。特に現在は電子線ホログラフィーの開発と応用研究を推進している。

最先端の研究開発 量子科学技術研究開発機構

第6回 核融合エネルギーの実用化に向けた
研究開発の進展(その2)

量子科学技術研究開発機構 松本 太郎, 東島 智

量子科学技術研究開発機構における核融合エネルギーの実用化に向けた研究開発の進展として、第5回の原型炉研究開発戦略およびITER計画に続き、第6回と第7回では日欧両極により日本国内で実施されている幅広いアプローチ活動について解説する。幅広いアプローチ活動は、発電実証を行う原型炉の実現とITER計画の支援を目的とした国際研究協力プロジェクトであり、サテライト・トカマク計画、IFMIF/EVEDA、およびIFERCの3つの事業から構成されている。この中で第6回は幅広いアプローチ活動の概要と、サテライト・トカマク計画として、2020年初プラズマ達成を目指して今まさに建設の最終段階を迎えているJT-60SA装置について紹介する。

KEYWORDS: *Fusion Energy, BA, JT-60SA, Satellite Tokamak Programme, ITER*

I. BA 活動

幅広いアプローチ(Broader Approach: BA)活動は、フランスで建設が進められている核融合実験炉ITERの支援と、核融合エネルギーの平和利用の早期実現を目的として、日本と欧州原子力共同体(EURATOM)により、日本国内で実施されている国際研究協力プロジェクトである。BA活動は、サテライト・トカマク計画(STP)事業、国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動(IFMIF/EVEDA)事業および国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)事業の3つの事業から構成されている。

量研は、文部科学大臣から日本の実施機関として指定を受け、STP事業を那珂核融合研究所(茨城県那珂市)で、そしてIFMIF/EVEDA事業およびIFERC事業を六ヶ所核融合研究所(青森県六ヶ所村)で受け入れるとともに、欧州の実施機関(Fusion for Energy:F4E)と共同で、各事業の装置の機器調達、組立・据付、運転等を含む事業全般を実施している。

BA活動は、2007年6月に日欧政府間のBA協定の発効とともに開始され、現在12年余りが経過しており、当初の事業計画(BAフェイズI)は2020年3月で終了する

Progress on Research and Development towards realization of Fusion Energy(2): Taro Matsumoto, Satoru Higashijima.

(2019年6月6日 受理)

予定となっている。日欧実施機関および関係機関による密接な連携により各事業が順調に進められていることから、欧州域内においては、効果的な国際科学協力のモデルと認識されている。現在日欧間で、これまでの各事業の着実な進捗を踏まえ、2020年4月から5年間で想定してBAフェイズIIとして実施するために、各事業の新たな事業計画の検討が進められている。

更に日本では、IFMIF/EVEDA事業の成果をもとに、原型炉段階への移行判断に必要な14MeVの中性子照射データの取得を目指して、核融合中性子源A-FNSの検討を進めている。

II. 初プラズマに向かうJT-60SA建設

1. JT-60SA計画の目的

JT-60SA計画は、日欧のBA活動のSTP事業と、わが国のトカマク国内重点化装置計画の合同計画である。那珂研にある臨界プラズマ試験装置JT-60を日欧が製作した機器を用いて超伝導装置に改修し(図1)、(1)ITERの技術目標達成のための支援研究、(2)原型炉に向けたITERの補完研究、(3)これらによってITER・原型炉開発を主導する人材の育成が目的である。

(1)ITER支援研究では、(投入エネルギーと生成エネルギーが等しくなる)臨界条件クラスの高性能プラズマを長時間(100秒程度)維持する実験をITERに先行・並

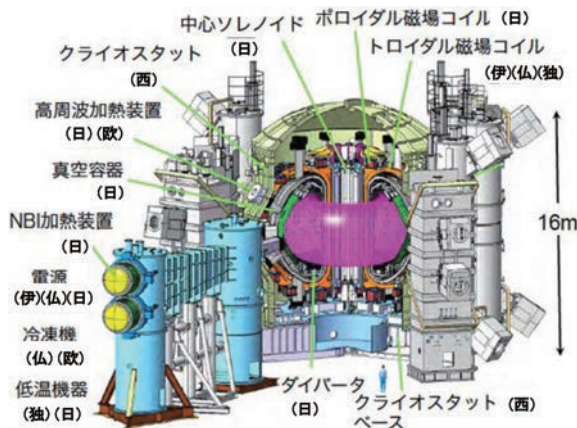


図1 JT-60SA 装置鳥瞰図と日欧の製作分担

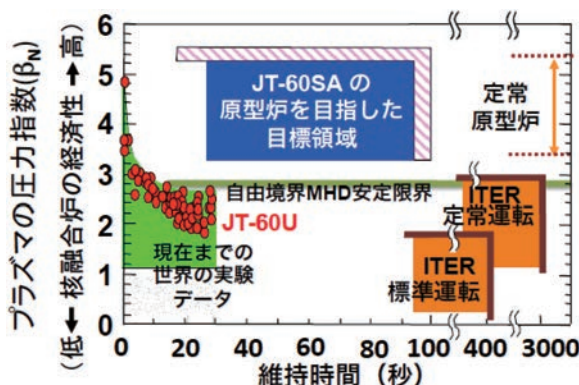


図2 JT-60SA の高圧力プラズマ長時間維持の目標領域

行して実施して、ITER 計画を効率的に進めるために必要な運転手法などの技術的知見を得る。(2)ITER 補完研究では、原型炉と比較して低い圧力を想定して設計された ITER では行うことの難しい「原型炉で必要となる高出力密度を可能とする高圧力プラズマの長時間維持」を実現し(図2)、ITER と JT-60SA で得られた双方の知見を用いて、原型炉の運転領域と制御手法を確立する。

JT-60SA の特長は、超伝導かつ大型のトカマク、高形状ファクターを含むプラズマ形状の大きな自由度、高パワー・長時間かつ多彩なプラズマ加熱・電流駆動・運動量注入、高いプラズマ安定制御性能、そして高い熱・粒子制御性能等である。ITER は重水素(D)と三重水素(T)を用いたDT 核融合反応による燃焼プラズマの実現を最大のミッションとする計画であるため、プラズマ性能との観点では保守的な設計となっている。他方、JT-60SA は、正に ITER のサテライトとして、柔軟にかつ先進的で挑戦的な研究を進める役割を担っている。

2. JT-60SA の性能

JT-60SA のプラズマの大きさは ITER の約 1/2(体積では約 1/8)の 130m^3 、プラズマ電流 (I_p) の最大値は ITER の約 1/3 の 5.5MA であり、ITER 完成までは世界で一番大きなトカマク装置となる。図3に世界の超伝導トカマク装置を示す。JT-60SA のアスペクト比(A: プラズマ大半径と小半径の比)は 2.5 より大きい領域で柔

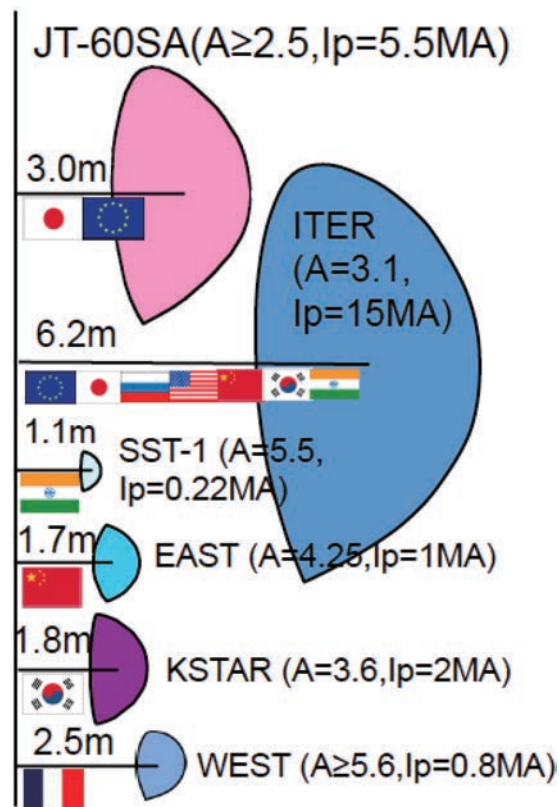


図3 世界の超伝導トカマクのプラズマ断面
SST-1(印), EAST(中), KSTAR(韓), WEST(仏)は稼働中。

軟に変更可能であり、ITER や他のトカマク装置との比較実験も容易である。

JT-60SA 装置は段階的に増強する計画であり、最終的には、プラズマ加熱は合計 $41\text{MW} \times 100$ 秒の高パワー・長パルス入射となり、世界のトカマクで最も多彩な加熱・電流駆動・運動量注入が可能である。非常に高い熱負荷に曝されるダイバータ部は、遠隔保守による脱着が可能なカセット方式を採用し、高熱流束下での熱・粒子制御を可能とする W 型構造であり、その材料は高熱流束に耐える炭素繊維複合材(CFC)を採用している。その後の実験の進展を踏まえて、ITER や原型炉と同様のタングステン材に取り替える計画である。

3. 建設状況

JT-60SA の機器製作と組立は、2020 年 3 月の装置完成、2020 年 9 月のプラズマ実験開始に向けて計画どおり順調に進展しており、機器の製作精度や組立精度の高さも大変良好である。核融合プラズマの適切な制御のために許される誤差磁場の値は、1 万分の 1 (10^{-4}) のオーダーと非常に小さく、JT-60SA の大きさは凡そ 10m であるため、凡そ数 mm が機器製作や据付けで目指す誤差となる。

これまでこの目標を全て満足しており、例えば、その寸法ゆえに国内道路を輸送できないため那珂研内で製作した日本製超伝導平衡磁場(EF)コイルは、最も大型のコイルで直径 12m であり、その真円度の誤差は 0.3mm と非常に小さな値を得ている(図4)。この超伝導導体の

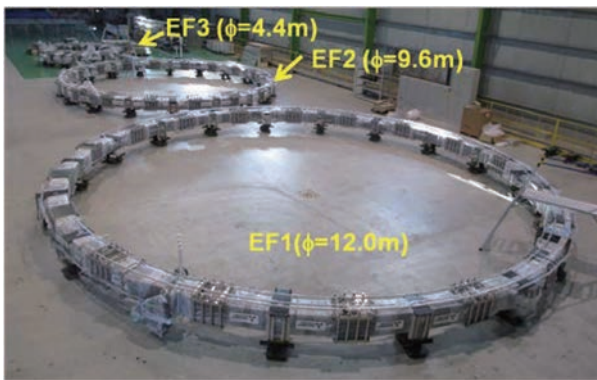


図4 完成した上側 EF コイル 3 体



図5 回転クレーン(上部)

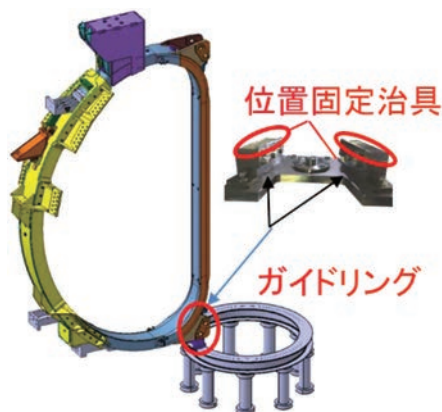


図6 TF コイルの仮設置の方法

巻線には、製作のための新たな建屋の中にクリーンルームを設け、新たに開発したレーザー精密計測を行う超伝導体曲げ機を用いた。

また、高さ 7.5m×幅 4.5m の D 形状の欧州製超伝導トロイダル磁場(TF)コイルの組立では、回転クレーン(図 5)を使ってガイドリングに沿って TF コイルを導入し、位置固定治具を用いて仮設置した後(図 6)、図 7 に示す TF コイルの G, A, B, C の各点をレーザー計測し、TF コイルの電流中心位置を基準としてコイル位置や傾きをシム等で調整して位置決めする据付け技術を開発し、全 18 体の TF コイルを組立精度 $\pm 1\text{mm}$ という非常に高い精度で組み立てた。この超伝導大型トカマク装置の組立手法は、ITER 組立に適用できる貴重な知見として高い評価を受けている。

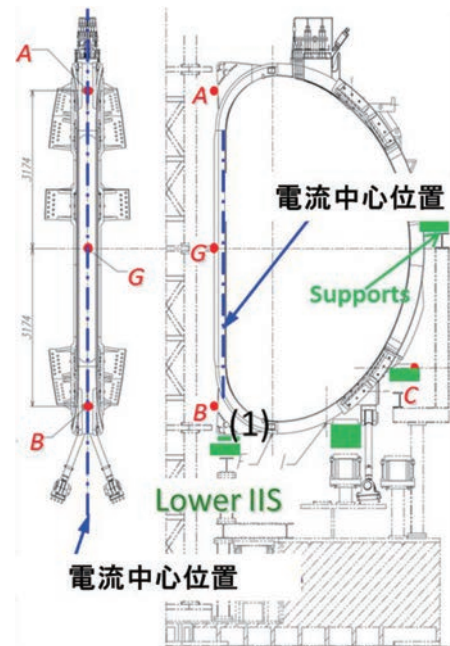


図7 TF コイル位置決めのためにレーザー計測した G, A, B, C の 4 点と TF コイルの電流中心位置

トカマク本体組立の手順を示す(図 8)。スペイン製のクライオスタットベース(基礎架台)(直径 13m, 重量 260 トン)が 2013 年 1 月に那珂研に搬入され、本体室に据え付けた。このクライオスタットベースの製作精度も大変高く、JT-60SA の各機器を組み立てて行く上面の誤差は 0.6mm である。このクライオスタットベースの精度は、リブ構造の支持を採用することによる軽量化かつ部品に分解できる設計とするとともに、出荷前にスペインにて仮組みを行って上面を加工することにより実現できた。次にクライオスタットベース上に、日本が製作した下側の EF コイル 3 体を仮設置した。その後、二重壁の大型構造物である真空容器(VV)セクターを順次溶接して接続し、TF コイルを組み込むための 20 度分の開口部を除き 340 度分の組立を完了させた。なお、真空容器セクターの溶接接続に当たっては、事前に R&D を実施して溶接変形および溶接縮みを把握した。そして、2016 年末よりフランスおよびイタリア製の TF コイルのトカマク本体への据付けを開始し、2018 年夏に全 18 体を据え付けた。

特に、最終 18 体目の TFC コイルは、最終 20 度セクターの真空容器や真空容器熱遮蔽体(VVTS)と一体化して(図 9)本体(340 度セクター)に取り付ける必要があり、事前に VVTS および TFC を個別に本体に仮組みし、隣り合うセクターとのギャップ長などを測定し、真空容器の接続調整板や TF コイル締結板を製作するとともに、あわせて、VV, VVTS, TF コイル間のギャップを調整したものである。具体的には、VV, VVTS, TF コイルを一体化したセグメントを 20 度ギャップから挿入し、① TF コイルの位置を決めて固定、② VVTS の位置を



図8 JT-60SA トカマク本体組立の手順とその進捗

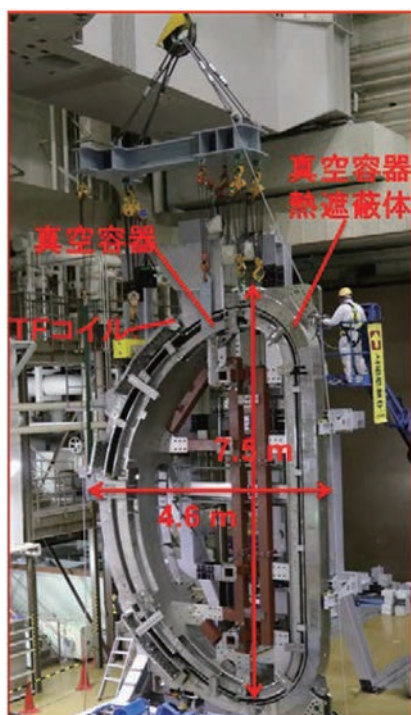


図9 最終20度セクターの真空容器(VV), 18体目のTFコイル, 真空容器熱遮蔽体(VVTS)を一体化したセグメント

決めて固定, ③二重壁を有する真空容器の外壁および内壁は, 溶接によりトロイダル(横)方向に約4mm縮むことを考量して設計した調整板を介して溶接(図10), という手順を踏んだ。なお, 全てのTFコイルは, フランス

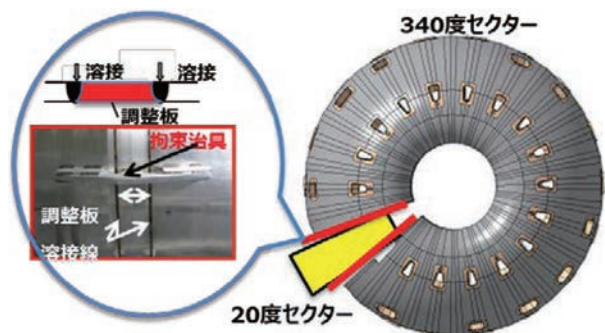


図10 最終20度セクターのVVの溶接方法

のCEAサクレー研究所にて低温試験を実施し, その超伝導性能を確認している。その後, 日本製の上側のEFコイル3体(図4)を据え付け, プラズマを計測するためのポートなどを取り付けた。

現在のJT-60SAの建設状況を図11に示す。今後, 日本製超伝導中心ソレノイド(図12)を据え付けた後, トカマク本体全体を覆うスペイン製クライオスタット胴部と日本製上蓋を組み立てて装置が完成する予定である。

このトカマク本体組立と並行して, 4.5Kで9kWの冷却能力を有するフランス製冷凍機設備の据付および試運転が完了するとともに, イタリア製およびフランス製超伝導コイル用電源設備も据え付け, 日本製電源との組合せ試験もこれまでに完了した。特に, 冷凍機設備の試運転では, 通常運転状態における36時間継続運転試験, 真

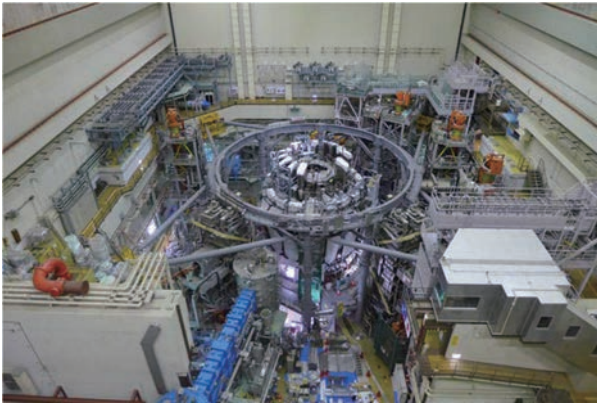


図 11 JT-60SA 建設の現在の状況



図 12 据付けを待つ超伝導中心ソレノイド(外側部分は治具)

空容器の 200℃ ベーキングに対応した模擬熱負荷 (43kW-130kW@80K) における 36 時間継続運転試験, JT-60SA 本体で発生する 60 秒パルスおよび 100 秒 (6.5kW@4.5K) パルス熱負荷試験を実施して, その性能を確認した。

4. JT-60SA 研究計画と運転に向けた取組み

JT-60SA の研究計画は, 「JT-60SA リサーチプラン」として公開している¹⁾。これは, 国内および欧州の研究コミュニティとの幅広い共同検討体制を構築し, 最近改訂された ITER のリサーチプランや日本の核融合原型炉研究開発ロードマップとも整合させつつ, 2018 年 9 月に完成した JT-60SA リサーチプラン Ver.4 である。共著者数は, 435 名で, 日本 174 名 (18 研究機関), 欧州 261 名 (14 カ国, 33 研究機関) である。

また並行して, JT-60SA のコミッショニングについても準備を進めている。コミッショニングを段階に分け, 各機器・設備で進める個別コミッショニング, JT-60SA の全体制御を担う統合制御を通じた自機器・設備と他機

器・設備間で実施するリンケージ試験, JT-60SA 組立作業後に実施する統合コミッショニングについて検討を進めている。特に, 統合コミッショニングでは, クライオスタットの真空引きから初プラズマまでに実施する作業内容とその実施手順案の詳細化を進めるとともに, 初プラズマ生成後に取り組むべき壁調整の確立, プラズマ電流の立ち上げ・立ち下げシナリオの検討, プラズマ平衡制御性の確認, その他プラズマを用いた機器の信頼性検証等について検討を進め, 欧州とも協力して, 統合コミッショニングの実施要領書を作成した。

加えて, JT-60SA の運転開始を来年に控え, JT-60SA を活用した全日本的な核融合人材の育成に関する議論を深めている。量研内に設けた大学の先生方にもご参加いただいている専門部会・委員会における議論を基に, 国内外の研究者・学生が滞在する Onsite Laboratory を含む国際プラズマ研究交流センターの設置等を核とした「核融合研究開発のための人材育成プロジェクト設立の提言」をまとめ上げた。本内容については, 昨年開催された第 35 回プラズマ・核融合学会年会において核融合人材育成に関するシンポジウムを実施して国内コミュニティへご紹介するとともに, 意見の集約に努めた。

Ⅲ. まとめ

臨界プラズマ条件を達成した大型のトカマク型試験装置である JT-60 の運転が 2008 年に完遂してから早 10 年以上経過し, 日欧協力で進める JT-60SA の建設も順調に進み, オリンピックイヤーである来年 2020 年より JT-60SA 運転を開始できるところまでようやく来た。JT-60SA の運転が開始した後は, 炉心プラズマ研究のみならず核融合工学のテストベットとして, 共同研究等を通して国内研究者の皆様にも是非ご参画いただきたいと考えている。

— 参考文献 —

- 1) http://www-jt60.naka.qst.go.jp/jt60/html/res_plan_jt60sa.html

著者紹介

松本太郎 (まつもと・たろう)

量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー部門
(専門分野/関心分野) プラズマ物理/事業マネジメント, ITER と BA の政府間国際交渉



東島 智 (ひがしじま・さとる)

量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー部門
(専門分野/関心分野) 炉心プラズマ研究およびトカマク炉工学



連載
講座核融合トリチウム研究最前線
—原型炉実現に向けて—

第12回(最終回) トリチウム研究の将来展望

京都大学 小西 哲之

トリチウム研究の現状と今後の展開と課題について、炉内の工学研究のみならず、環境、生物影響、社会との関係まで視野を広げて概観する。核融合炉ではトリチウムは法規制を十分に守っていても一定量のトリチウムを定常放出するため、周辺環境モニターで濃度上昇が検出されるのは不可避であり、その影響の評価と社会による理解、合意まで含めて考える必要がある。工学のみならず環境、生物関連研究や社会との連携の進展は、核融合原型炉の実現に向けて、着実なトリチウム取り扱い技術と経験の蓄積に基づく展開を開始する段階を迎えている。

KEYWORDS: *tritium, concentration, dose, background, environment, biological effect, social acceptance, fusion plant*

I. はじめに

核融合原型炉に向けたトリチウム工学の研究は、ここまでの一連の連載で見てきたように、技術開発としては順調に進展しているといえるだろう。しかし、我が国における最大のトリチウム取り扱いプラントとなる原型炉の設置に向けては、総合技術としての成熟は決定的に不足する恐れがある。とりわけ第1回で林が指摘しているように、原型炉の工学 R&D に向けた施設が我が国にはないので¹⁾、その環境と社会に定着した経験、ハンドリングの実務は、これから着手し、そこでの蓄積を待たねばならない。国際協力プロジェクト ITER に参加したときから、多くの核融合技術は唯一 ITER の場で研究され、その経験と技術情報が参加各極に移植可能であるという仮定に基づいている²⁾。工学技術としてのトリチウムプラントもその例に漏れない。この一連の連載講座で示された多くの最近の研究成果もまた、ITER の場で本格的な核融合環境で実証され、不具合やトラブルへの対応を通じて洗練され、我が国の原型炉に持ち込まれることになる。

しかし一方では、長い期間をかけて施設を運転し、技術者や運営者の経験を蓄積し、地元社会の理解と信頼を着実に育てるといって、「地付きの」技術としての成熟も、

核融合実現に向けて不可欠である。それは我が国固有のトリチウム施設として、現在 JAEA 東海にあるトリチウムプロセス研究棟(TPL)や、富山大学、九州大学などの大学研究施設、あるいは東海・六ヶ所の再処理工場やふげんなどの数10年に及ぶ実績の延長にある。これら施設は設計、建設し、小さなトラブルを経験し克服して安全に運転してきた産業界やそれを信頼して受け入れてきた地元や我が国の社会全体で、貴重な経験と信頼を積み蓄積してきた。また一方、この期間に工学研究と並行して環境生物影響も含めた広範なトリチウム研究の進歩も、我が国社会がトリチウムを理解し、制御する上で大きな役割を担ってきたのである。それらを中断なく今後も維持するのみならず、現代から未来に向けた価値観に合わせ、次の大きな進歩を一刻も早く開始しなければ原型炉段階に間に合わない。それどころか、研究活動の維持、人材の育成、経験の継承という意味では、今やこれら重要な研究資産が途切れようとしている。本稿では、今後核融合研究に必要な「将来展望」として、工学のみならず、トリチウムの環境、生物、社会影響も含めた視点で、必要となるであろう原型炉に向けた取り組みを考察する。

II. 放射性物質管理のパラダイム転換

1. 「福島」とトリチウム

我が国における原子力施設の立地を考えると、福島第一原子力発電所の事故は、原子力関係者のみならず我が国の環境、社会、国民との関係において決定的な影響を及ぼしている。放射能と放射線、被曝の関係に関する理解は飛躍的に増進し、例えばベクレルとシーベルトが

Research Frontier of Tritium for Fusion Reactor toward the DEMO reactor (12) ; Future Prospect of Tritium Research :
Satoshi Konishi.

(2019年5月29日受理)

■前回タイトル

第11回トリチウム管理

区別されるようになり、また日本国民の多くが、自分の住む環境、食品について放射性物質の存在を意識し、必要なら調べられるようになった。原子力施設は、絶対安全神話から離れ、通常時および異常事象において、放射性物質を放出し、それが環境や食品を介して国民に放射線被ばくを与えうるものとして捉えられるようになったのである。福島サイトでは2018年時点でトリチウムを約 $2\text{g}(7 \times 10^{14}\text{Bq})$ 含む100万トンの水が蓄積されており、この処理方法、特に環境放出についてはいまだに意思決定がなされていない³⁾。ここで重要なことは、トリチウム含有水をたとえ放出し、それが環境中で拡散したところで、周辺住民をはじめ一般公衆には、ほとんど被ばく量を与えないことが理解されているにも関わらず、処理方法が決定していないという事態である。

福島では農産物、水産物の放射能は全数測定され、わずかでも検出されたものは出荷されず、そもそも山菜以外では放射性物質はほぼ検出されていないにもかかわらず販売は極めて困難になっている。農水産物への影響(風評被害)が被ばく量よりも圧倒的な重要度で懸念され、それが仮想ではなく現実の損害を発生している。今後の核融合開発を含む放射性物質の取り扱いに、この事実は重要な示唆を与える。放射線被ばくによる健康被害の防止を軸に施設は規制され、設置者は装置施設の設計・製作・運転を行うことには変わらない。しかし、環境での検出量、あるいは風評被害がより重要で考慮すべき対象として、決定的な影響を与えるため、それらを考慮してステークホルダーとしての社会と合意することが、新たな放射性物質管理の方法論として必要となったのである。

2. 原子力施設と周辺環境

従来の放射性物質取り扱いにおいて、その安全管理の基本は被ばく管理であり、その対象は施設、それも特にその出口、境界である。排気や排水を法定限度を十分下回る濃度で放出するとともに、周辺住民の被ばく量が十分低いこと、実質的には有意に増加しないこと、が目標とされ、実際それがこれまで概ね守られてきた。これは、発電所だけでなく、例えば廃棄物処理処分施設などでも同様であり、放出量を可能な限り少なくし、人体への影響をAs Low As Practically Achievable(ALARA)とすることが大原則であった。本連載講座の第1, 8, 9, 11回で解説された技術や考え方も基本的にそうした「施設側の」技術である。もちろん、環境を無視しているわけではなく、事前に仮想的な放出量や主要放出核種を設定し、その環境動態や、その環境での移行経路を安全側に評価し、それに対して十分少ない放出濃度を技術的に確保することによって十分低い被ばく量(Sv)を担保しているのである。規制対象である排出核種はある程度の(例えば2桁程度の)尤度を持ってその排出限度濃度が管

理され、それがサイト境界で測定確認されている。サーベイメーターの表示も普通、線量率(Sv/h)である。またそれ以前に、サイト内で作業従事者の被ばくも管理されているが、これは施設内の問題であり公衆には影響しない。

放出核種は濃度さえ規制範囲内であれば、十分に公衆の安全が確保される。さらに核種の放出総量も規制の対象となる。これは地元協定として締結されることが大方であるが、運転計画と併せ、地元の原子力施設の受け入れにおいて合意に基づいて決められる。ITERも例外にもれずこの方法論で設計されており、現在設置国フランスの規制に従って規制当局への申請と安全審査が進行している。軽水炉相当の規制が多く、点で適用されておりかなり厳しいが、一方、核燃料再処理に伴う継続的なトリチウム放出の経験国であり、我が国における原型炉と類似とは限らない。

いずれにしても放射性物質管理は施設からの放出を制御し、住民の被ばくリスクを低減することを軸に構築されている。放出された放射性物質の施設外挙動についてはその拡散や移行は自然環境や外部条件によるものとして、施設側から能動的に考えられるわけではない。原子力施設の責任は、当然その管理能力の及ぶ範囲として、基本的には施設を法令や地域との合意に基づいて施設を安全に運営することに限られる。

3. トリチウム施設と環境影響の特徴

ここで、トリチウムという放射性物質の持つ特性は、際立った問題を提起することになる。すなわち、トリチウムは「与えられるSvに対して放射能Bqが極めて高い」。濃度限度は水で $60,000\text{Bq/L}$ 、つまりほぼ検出限界であるバックグラウンド濃度、 $\sim 1\text{Bq/L}$ の10万倍近い。トリチウムは天然にも年間 70PBq 程度が大気上層で生成するため、原子比で 10^{-18} 程度は地表近くの天然水や生体内で検出される。これに核実験等の人工源が加わって現在のバックグラウンドは昔より高くなっている。この濃度のモニタリングはこれまで高度な熟練や技術が必要であったが、測定機器の進歩により、飛躍的に低い濃度で検出できるため、バックグラウンドの数倍以上あれば特段の予備知識や技術なしでも市販の液体シンチレーションカウンターで分析が可能になった。

図1にトリチウムの環境移行経路をコンパートメントモデルの考え方に基いて示す。代表的なコードはNORMTRIである⁴⁾。施設から放出されたトリチウムは、大気経由であれば降雨や拡散によって地表近くの人間の生活圏に到達し、水や植物を介して、呼吸、接触、飲食により体内に取り込まれる。外部被ばくは無視して差し支えない。ここで重要なことは、 μSv レベルのほとんど無視できる被ばく量であっても、環境中のトリチウム濃度はバックグラウンドより桁違いに大きく、容易に

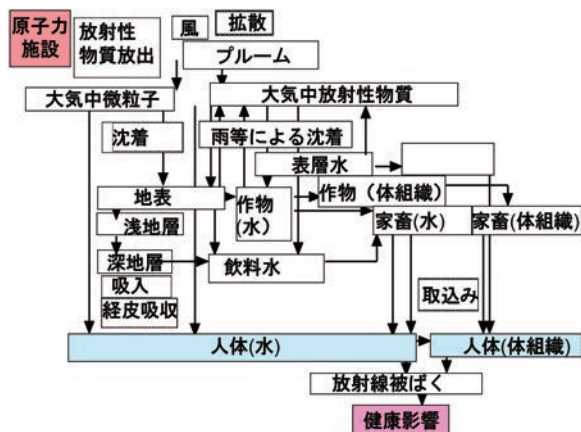


図1 代表的なトリチウムの環境移行経路。各存在形態とその経路をコンパートメントであらわしている。

検出可能であって、それが十分に法令や排出基準を守っていた結果として発生するということである。

4. 原型炉とトリチウム安全技術

過去、特にトリチウムを扱い始めた当初の処理法は単純に希釈放出が中心で、それで被ばく管理上の問題はなく、濃度限度は容易に達成されてきた。核燃料再処理工場では年間数10g オーダーのトリチウムを含む排水が発生し、それは希釈によって十分管理目標値を達成できるので排出されている。トリチウム取扱量が濃度、総量ともに格段に多い重水炉システムや将来的には核融合では、必要に応じて同位体分離等の処理を経る必要が生じることがあるが、放出するときは同等の濃度であろう。最近では高度な技術を用いた同位体分離等を経た放出で要求が満たされているが、その時代ごとに技術的に可能で経費的にも妥当な方法が選択されてきた。本講座の(9)もその好例である。実際には排水を海中等で放出する場合、排水自体は濃度限度よりトリチウム濃度が高いことがあるが、放出点は水中であり、直ちに周辺の海水等での希釈拡散により十分環境中での濃度は低く保たれる。

図2に、核融合プラントの一般化簡略化したトリチウムフローを示す。発電プラントは排熱を大量の冷却水ないし冷却塔からの排気として環境に放出する。核融合炉の定常運転で環境に拡散しうる主要核種はトリチウムで、これを法定限度内に抑えることは、設備とコストはかかるが技術的には不可能ではなく、設置者はこの図の領域から外に出るすべての液体、気体についてトリチウム濃度を管理する。核融合プラントは環境放出レベルから純粋に近いトリチウムまで極めて広い濃度範囲のトリチウムを大量に取り扱うため、同位体分離機能は必須であり、常に能動的な同位体濃縮プラントが稼働して定常運転を行うのでこの能力は必ずある。

核融合プラントの設計、設置においては通常時放出だけでなく異常時も考えなければならないが、実は異常時でもこの単純化したモデルは一般性を失わないこと

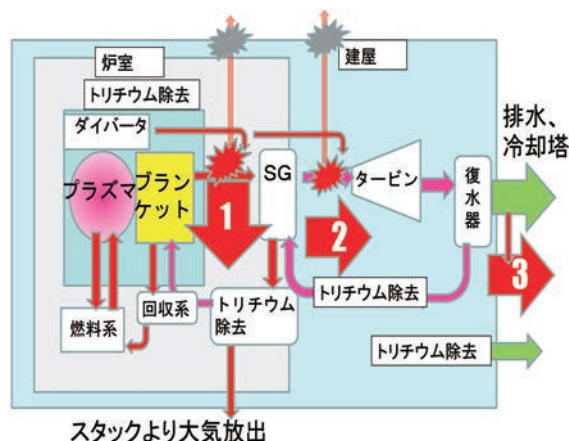


図2 一般化した現在の核融合原型炉のトリチウム処理プロセス。通常時と異常時では、プラント内の経路と量に差はあっても、環境放出に関して本質的な差はない。

が、核分裂炉を考えた場合の大きな相違である。核分裂炉のシビアアクシデントのような、確率が低く甚大な結果となりうる事象では、通常時と大きく異なる炉心溶融や圧力容器の崩壊、水素や水蒸気による爆発などを想定する必要がある、放出核種も通常時と全く異なる。

一方核融合プラントでは、放射化したタンゲステン等のダストを除けば通常時、異常時を含め放出されて環境に拡散して甚大な汚染を引き起こしうる核種は同じトリチウムである。多重のコンファインメント設備における破壊や機能障害があってもトリチウム放出経路に一部のバイパスと放出量の拡大が生じるが、量的な、あるいは経時的な差はあっても基本的な環境影響において経路や質的な差は大きくない。例えば周辺での通常時被曝がマイクロシーベルトレベルであれば事故時でも1mSv以下、トリチウムの主要化学形態がトリチウム水(水蒸気)という意味でも同じであり、飲料水や大気、場合によっては食物中のトリチウム濃度を制限値以下とすることで安全性は担保される。核分裂炉では異常事象に対する多重の防護が安全対策の中心であり、通常と異なるFPの放出防止には通常運転と異なる装置も利用される。核融合では通常時も異常時も、放出されるのはトリチウムであり、環境にもバックグラウンドがあるため通常放出と異常は連続的と言える。

そこで、通常時を想定してトリチウム放出管理を法令や管理基準を十分な尤度を持って厳守したとしても、核融合炉(トリチウム施設)が通常運転においてバックグラウンドよりかなり高い濃度でトリチウムを常時放出し続ける、ということを考えれば、被曝が問題にならないレベルで周辺環境におけるトリチウム濃度が徐々に上昇しその範囲が拡大する、ということを認識しなければならない。年間総量規制にしても、一定期間内の放出が了解された範囲内であればそれを長期間続けても問題にはならない。しかし、「一年あたり」の放出を守っていれば翌年ゼロからまた計量できる規則と異なり、環境において

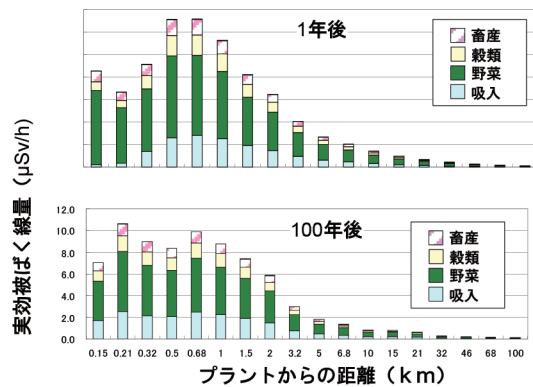


図3 定常放出トリチウムの環境における蓄積と拡散。単年度放出の数10倍で平衡に達するまで、トリチウム濃度は上がり続ける。

は、環境水による同位体希釈とトリチウムの壊変と競争してトリチウムは蓄積し続け、また環境に広がり続ける⁵⁾。図3は毎年1gのトリチウムを100mの高さで継続的に大気中に放出したときの陸域での100年の長期被ばく線量の変化である。法定限度内(5,000Bq/m³)で放出し続けた場合、濃度は敷地境界で10Bq/m³、100km遠方で0.1Bq/m³くらいの空气中濃度で一定値に達する。この時の被ばくは主に食物経由で高々10μSvであるが、それは、この従前のバックグラウンドより明らかに濃度の高い環境での食物が定常的に食べられていた時の話である。核融合炉を設計建設し運転する主体の一義的な技術的責任は施設内の装置や設備に限られる。環境濃度は、放出限度を守っていれば十分低く保たれるが、その上昇は検出が容易であり、放出源は明らかである。設置者として、それが周辺環境や社会に対して引き起こす影響については、その量と性質を理解し、制御し、それを社会と事前に合意する必要があることはおそらく避けられないものと考えられる。

Ⅲ. トリチウムと環境

1. 人工環境と環境防護

ICRPは2007年のPublication108において、環境防護の考え方を導入した⁶⁾。それまで人体の被ばくのみを対象としていた放射線防護の体系に加えて、環境中の放射性物質の濃度に着目し、標準植物、標準動物の概念を通して環境の放射線防護の概念を提示している。一方、防護対象を人間とその活動と考えたときにも、環境放射能の存在は大きく影響を与えている。

図1に示したように、トリチウムは複雑な経路を通して人体に到達し、放射線被ばくを与える。人体や社会への影響を考えたとき、トリチウムの移行経路として重要なのは、手つかずの自然環境よりも、むしろ人工的な環境であり、人の活動の関与する経路である。例えば、定常放出トリチウムの様々な経路の中でも人体に最も大き

な預託線量を与えうるのは飲料水であり食物である。これは、プルームの拡散や降水、といった自然環境とともに、飲料水の取水、農地における灌水和生産、水圏における水産物の捕獲など、人的活動や環境の影響が大きく支配する。地表近くの水についても、通常の降水や湿性沈着などとともに、地表の舗装、排水、河川水や地下水の利用など、特に人口が多い地域では人工的な環境の与える影響は大きい。

これまでのコンパートメントモデルでは一般化した自然環境を扱うことが多く、実際のトリチウム放出施設を考えたとき、その周辺の人工的環境はあまり重視されてきたとはいえない。しかしこのモデルではトリチウム移行挙動としてその時定数を定義するだけで、かなり広範な範囲の環境や現象を記述することができる。気象や植生の自然条件だけでなく、人工物による水の移行、水田や牧草地、森林など異なる土地利用とその産物によるトリチウムの人体への移行量の評価はサイト特性に応じて可能である。図3に示した結果は施設からの環境放出トリチウムが主としてスタックからである場合である。このほかに排水についても長期の環境挙動は予測しうる。排気も排水もゼロにすることはできないが、環境への影響を考慮し、排出方法や化学種など、工学的な対応にフィードバックすることが可能であり、またそれが社会の理解を得るには必要となるであろう。

2. トリチウム環境挙動と工学

特に前述のようにトリチウム放出施設側では、工学的にトリチウムの放出量と濃度を低減し制御することに多くの技術的努力が費やされている。しかし今後、原型炉等を実際に立地する場合には、その周辺の環境や住民の生活、生産活動へのトリチウムの影響は考慮する必要があるだろう。

現在までに、コンパートメントモデル等を用いたトリチウムの環境挙動の研究は大きな進歩を遂げているうえ、各コンパートメントにおけるトリチウム移行挙動のデータはかなり蓄積され、また環境モニタリング研究によって検証されている。今後は、それらの知見をもとに、環境制御や防護の戦略を実際に立案することが必要であり、可能である。例えば河川や地下水など、飲料水の取水源は限られている。飲料水のトリチウム濃度が関心の対象になりうるならばトリチウム放出経路として飲料水の取水と関連しにくい方法を選ぶ。図3に示したように、長期のトリチウム施設周辺の被ばく量は主に食物によって与えられるが、それは法定限度をはるかに下回る濃度での放出環境での食物を食べ続けた場合の仮想値である。現実には稲作が主要な地域であれば水田、特にそこで収穫物に移行しにくいようなトリチウム放出法を考慮する必要があるだろう。海洋への放出では想定される水産物への移行可能性の少ない地点や方法、時間を漁業

の実際の操業パターンと調整し、水産物でのトリチウム検出の可能性を最小化することもできよう。

現在までに、核分裂原子力の利用では、発電に伴う排熱の排出に、大きく分けてクーリングタワーによる大気への放熱と海洋放出の技術が利用されている。核融合でもそれぞれにつきプロセスとしての検討がなされ、放出先のトリチウム濃度を考慮して経路を選択することはできる。これが、前章で示した、「放出後の環境挙動を考慮した工学的な方法」となる。

例えば海洋放出の場合、トリチウムに特異的な状況として、大量の水による同位体希釈が発生するため、環境でのトリチウム濃度上昇はかなり検出されにくい。また ITER では、排水処理設備 WDS (Water Detritiation System) において深冷蒸留塔による同位体分離を採用しており、相当量のトリチウムは、水素の形で塔頂部より放出される⁷⁾。この場合、HT の化学形のトリチウムは放線菌等、地中の微生物の影響を受けなければ、人間の生活圏のトリチウム水に移行する可能性は極めて低くなる。放出量や濃度を法定限度より低くしても大気放出では図3にみたように環境で検出されることがかなり確実であるトリチウムでは、その分布や挙動は重要になりうる。工学的なトリチウム除去と制御についても、環境への放出後の経路やその選択を、地域での人間の活動と整合すること、特に人間の生活圏におけるトリチウム濃度の上昇を可能な限り避けることは必要であろう。特に飲料水や生産物への経路を分析し対策すれば、環境影響の問題はかなり軽減することができるはずである。

3. OBT とトリチウム

トリチウムは、水素の化学形では人体に吸収されにくいいため許容濃度が約 10,000 倍高い、つまり有害性がそれだけ低い。逆にトリチウム化有機物 (Organically Bound Tritium, OBT) は生物学的半減期が水の約 10 日に対し 60 日と長く、大きな預託線量を与えるため有害度が大きいとされている。トリチウムの工学的な除去方法として酸化プロセスを選択した場合、有機物 (炭化水素等) は一般に酸化されにくく、触媒塔は高温で運転される。スクラバーでは、親水性でない化合物は除去されない。

環境中で炭化水素由来の OBT (メタンなど) の多くは生体に代謝されにくい、水として取り込まれたトリチウムが光合成で有機化することで OBT が生成される。このため環境モニタリングでは植物体を粉碎し、燃焼してトリチウム水を測定している。ところがこの OBT は大部分が細胞壁を構成するセルロースであり、人間など、反芻性のある草食動物以外の体内では代謝しない。一政らは重水環境での栽培実験で、稲の生活史上、開花期に近い限られた時期のトリチウム水が米穀中に取り込まれることを報告している⁸⁾。

自然界でトリチウム水は同位体希釈を受け、一方生物

による濃縮は起こらないとされている。しかし水中放出において高濃度トリチウム水を代謝した植物プランクトンがあり、それを選択的に捕食する魚類がいれば、OBT 経由でのトリチウムは生物学的濃縮を受け、同位体希釈に従わずに水産物に蓄積したり遠方に輸送されることがありうる。環境 OBT 研究は大きな進歩を遂げてきたが、まだ OBT 経路が完全に解明されているわけではない。定常トリチウム放出が人体に与える被ばくが ingestion 経由中心になることを考慮すると、環境濃度と平衡したトリチウム濃度の食物摂取を前提としたモデルでは実態より相当に過大評価する恐れがあり、また一方、環境濃度の発がん確率上昇効果を抑制する方策が十分立案可能でもある。

IV. トリチウム生物影響と社会

1. トリチウムの生体内挙動と被ばく

放射線被ばくの生体影響は、線量当量 (に場合により線質係数や影響臓器を考慮して) で一元的に評価され、管理されている。その基盤となるのは広島長崎の高速中性子を含む高線量率被ばくと、 γ 線や x 線による実験データが中心である。一方、トリチウムは平均 5.8 keV の水中 (生体中) 飛程 5 μ m ほどの β 線のみを発する。核融合に関連する環境中トリチウムで問題になる濃度では、プラント内インベントリの相当量を放出するような想定外大事故でも高々 mSv オーダーで、LNT (直線閾値なし) 仮説によってのみ発がん確率が推定される領域であり、かつ極めて低線量率である。

現在、低線量放射線による発がんメカニズムはかなり詳細に解明されており、その端緒が DNA 二重鎖損傷であって、その後多段階の変異と細胞生理や生物学的過程の末、長期間かかって発がんに至ることが知られている。つまり、トリチウムに関してはその「影響臓器」は μ m スケールで見たときの DNA と考えることもできるのであって、他の核種と放射線リスクはかなり異なる可能性がある。

2. トリチウムの発がん性とリスク評価

トリチウムの生物学的な影響指数 (RBE) は、かなり大きなばらつきがあるが、様々な実験に基づいて現在は RBE $\sim$ 2 が用いられることが多い。しかしトリチウムの健康リスクは、体内トリチウムの化学形で大きく異なる。

この違いを図4に模式的に示す。自然界で代謝性の OBT が合成される機会が少ないことを考えれば取り込まれるほとんどが HTO である。それは組織内自由水を通過するので DNA や核に取り込まれる可能性は極めて小さく、その短い飛程で DNA を損傷する割合も小さい。同じ被ばく量に対し、その発がんリスクが体内を透

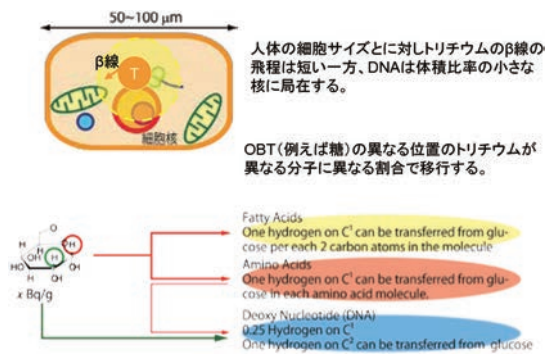


図4 細胞内でのトリチウムによるDNAの損傷経路。HTOからのベータ線は核のDNAを損傷する確率は低い。糖などの特定位置のトリチウムのみがDNAに取り込まれる。

過する他の γ 線や中性子と大きく異なりうることは認識すべきであろう。もちろんトリチウム水による活性酸素の発生やバイスタンダー効果など、DNAが直接関与しない経路もあるが、それらはまた他の化学的カルシノゲンの影響と区別しがたい。一方、OBTは生体構成物質に入りやすいことが知られているが、これは標識チミン実験など、特殊な化合物の例である。代謝性のあるOBTの代表は糖であるが、DNAに入る経路、割合はかなり限られている⁹⁾。

前述のように自然界のOBTとして分析検出されているものはその多くが我々が摂食しても代謝しないセルロースであり、農産物の可食部にあってもなお発がん性リスクは過大評価されやすい。さらにそれを含むとわかった食物は忌避されがちとなろう。現在のモデルではまだ低濃度トリチウムの発がんリスクの評価には至っておらず、今後トリチウムの社会的な影響まで含めたりリスク制御の方法論は重要な課題となると考えられる。

3. 社会との合意形成と風評

第Ⅱ章でみたように、トリチウムは放射線による被ばくが健康リスクとして捉えられないレベルの濃度でもバックグラウンドより相当に高く、検出が可能であるため、トリチウムの社会的な管理は、施設からの放出量や濃度ではなく、最終的に人体に達する食品や飲料水、あるいは居住環境での濃度が指標となると考えられる。もちろん、風評被害では全く放射性物質が検出されなくても産地名だけで食品が忌避されることは福島で経験されている。しかし天然に存在する核種であるトリチウムはゼロにすることはもととできない。科学的な指標の設定は必須であり、それが社会との合意形成の出発点である。

福島以降、我が国の飲料水の放射能は0.1mSvを基準としてセシウムで20Bq/kg以下とされているが、トリチウムについては決まっていない。世界的には飲料水のトリチウム濃度限度は表1に示すように約5桁の開きがある¹⁰⁾。その基盤になるのは継続的に飲食を続けた場

表1 世界の飲料水中トリチウム濃度限度

国名	濃度限度 (Bq/L)
オーストラリア	76,103
フィンランド	30,000
WHO	10,000
スイス	10,000
ロシア	7,700
カナダ(オンタリオ)	7,000
アメリカ合衆国	740
EU	100

合の健康影響であるが、現状は他の核種と同等の被ばく量、またはそれよりかなり厳しい数字となっている。低濃度トリチウムの影響の評価は科学的には今後の進展が期待される。それは被ばく量で評価しているものとはかなり異なると思われるがまだ十分ではなく、それがこのような大きな開きと過大なリスク評価の原因と考えられる。しかしたとえば、トリチウムが農産物のそれも可食部に有意に高く検出される場合、それが例えば同じ食物のカリウム40や、あるいは食品が本来持つ他の発がん性化学物質(例えばアルカロイドなど)に比べて発がん確率の上昇が問題にならない程低くなるような濃度限度を設定する一方、それを達成できる放出経路、放出方法を選ぶことは、工学と環境生物研究を総合すれば現在でもかなり可能になっている。

風評被害は、トリチウムの引き起こす被害リスクとして健康被害が問題にならないレベルで発生し、おそらく最大の損害をもたらす。核融合炉開発にとっても、トリチウム取り扱い技術が如何に進歩し、法令や許認可は十分にクリアしても、最終的にトリチウムの影響、社会的リスクを十分に社会に説明し合意を得られなければ立地はおぼつかない。これまで見てきたように、核融合炉ではトリチウムの環境放出は避けることができない一方、環境中濃度、飲料水や農水産物中の濃度は環境と技術の最新知見を合わせればかなり良く制御でき、社会に十分説明できれば適切な濃度目標設定は不可能ではない。

現に表1に示されたような数値はそれぞれの社会において合意され受け入れられた数字である。また我が国を含む多くの国で、 $10^{12} \sim 10^{15}$ Bq/yのトリチウムはこれまで合意に基づいて環境に放出されている。食品や飲料水でトリチウム濃度は問題になっていない。これらは社会的に共有される事実と理解であり、一朝一夕に醸成できるものではないが、これまでも世界各地でそうしてきたように、長い年月をかけて安全に施設を運転し、様々なトラブルに対処しながら地元との相互理解を進めてきた社会では十分可能なはずである。重要なのは、施設の設計・運転主体が施設内にとどまらず、周辺住民の立場にも立って、環境濃度と影響を説明し責任を持つことである。

第Ⅲ章で見たように、トリチウムの環境挙動は、放出

前の工学的なプロセス選択や設計で、ある程度制御が可能である。さらに第IV章のように生物学的な代謝過程を考えれば、トリチウムを環境に放出しても、実際の健康影響に全く問題を与えない方法を選択できる。排気でも排水でも、法令を守って放射性物質を排出するだけではなく、その環境中の分布や経路は、周辺の住民の生活から遠ざけ、生産物や飲料水、体内での濃度を事前に予測し、影響を未然に抑えることができる。しかしそれらの知識は、それを社会に事前に説明して理解を得られてこそ、初めて有効になるのである。

V. まとめ—今後の課題と展望

こうしてみてきたように、原子力・核融合トリチウムの研究とその制御は、工学だけではなく、環境や生物の理解を通じて一般社会との相互理解と合意の上に成立するものであり、20世紀後半から福島第1原子力発電所の事故を経て、大きな進歩と変化を経験して次の核融合原型炉の段階に進むところに来ている。研究としては工学も、環境生物影響も、大きな進歩を遂げている。社会との対話の方法論も、原子力全体で大きく変わりつつある。研究者の責務は単に新たな学術知識を獲得してそれを学会に発表したり核融合炉開発に反映するだけではない。研究者技術者自身やその家族はまた、放射性物質を扱う施設の立地地元住民でもあり、自身を含む運転者、作業従事者の安全を守りながら、周りの人々とともにトリチウムの理解と取り扱いの熟練をコミュニティとして目指すことも含む。さらにはそうした相互理解は留学生や国際交流を通じて世界的に広げていくこともできよう。世界的に見ても、再処理工場や重水炉などのトリチウム施設は、定常的にトリチウムを放出しながらも、社会との良好な関係と理解を保ちながら、技術を向上してきたのである。

現在のトリチウム研究の最大の課題というか危機的な状況は、この経験、人材、地元との関係が失われつつあるということである。ここでレビューした研究、特にトリチウムの環境生体影響の科学は1980年代に始まる科研費をはじめとした核融合研究の中での極めて広いス

コープの広がりを持っていたが、その支援は途切れて久しい。今世紀に入って新たなトリチウム施設はほとんど建設されていない。福島第一原子力発電所の事故と、核融合トリチウム研究の進展から必然的に導き出される新時代の放射性物質管理のパラダイムは、工学研究ばかりでなく、環境生物影響の研究者と、それらの成果を総合して社会との双方向のコミュニケーションをとることが必要とされるが、その担い手が決定的に不足している。今後数年の世代間の取り組みと社会との連携が命運を握るといえるであろう。

— 参考資料 —

- 1) 林巧, 日本原子力学会誌, 60(7), 日本原子力学会, 2018.
- 2) 原型炉研究開発ロードマップについて(一次まとめ), 文部科学省, http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2018/11/08/1408259_1.pdf, 2018.
- 3) 多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会 説明・公聴会 説明資料, 福島県, <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/287006.pdf>, 2018.
- 4) W. Raskov, Description of NORMTRI, : KfK-Report 5364, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1994.
- 5) S. Konishi, T. Shibata, K. Noborio, Y. Yamamoto, Fus. Sci. Technol., 60(4), ANS, 2011.
- 6) 酒井一夫(監修) ICRP Publication 108, 日本アイソトープ協会, ISBN978-4-89073-258-6, 2017.
- 7) M. Glugla et al., Fus. Eng. Des., 82, Elsevier, 2007.
- 8) Michiko Ichimasa et al., DOI10.11513/jrrabst.203.0.432.3, 放射線影響学会, 2003.
- 9) T. Shibata, K. Noborio, Y. Yamamoto, S. Konishi, Fus. Sci. Technol., 60(3), ANS, 2010.
- 10) Canadian Nuclear Safety Commission, Tritium in Drinking Water, <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/health/tritium/tritium-in-drinking-water.cfm>, 2014.

著者紹介



小西哲之 (こにし・さとし)

京都大学エネルギー理工学研究所
(専門分野/関心分野) 核融合工学, エネルギーシステム評価, サステナビリティ学

報告

環境科学に関わる学生・若手研究者たちが 考える保健物理・環境科学研究

東京大学大学院, 日本原子力研究開発機構 三輪 一爾, 他

本報告は, 原子力学会 2019 年春の年会にて実施した, 保健物理・環境科学部会の企画セッションの内容をまとめたものである。本企画セッションでは, 原子力・放射線分野に携わる学生および若手研究者 6 名が, それぞれの専門的知見を通して見た保健物理・環境科学の技術上または研究上の課題点について講演を行った。講演後には会場全体で保健物理・環境科学研究における「ニーズ調査の重要性」と「今後の研究に対する取り組み」について議論した。

KEYWORDS: *Health physics and environment science, Radiation distribution measurement, Radioactive Cesium, Airborne radiation monitoring, Isotopic composition, Existing exposure situation*

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(以下, 1F)事故以降, 保健物理・環境科学は我が国の大きな関心事のひとつとなっている。当分野が担う研究領域は事故炉の廃炉, 放射性物質による大規模な環境汚染に起因する問題, 例えば, 除染, 人への健康影響評価, 環境への影響など多岐にわたっている。これらの課題の解決のためには放射線計測, 健康影響, リスクコミュニケーションなどの多方面からのアプローチが求められる。そこで, 様々な専門知識を持った人材が集結し, これらの課題解決にあたる必要がある。さらに, 保健物理・環境科学研究は一過的な対応ではなく継続した研究が求められるため, 当分野を担う若手研究者の育成も重要である。

以上の背景から, 本企画セッションでは, 原子力・放射線分野に携わる学生および若手研究者が, 環境科学に関連したそれぞれの専門的知見を通して見た保健物理・環境科学の技術上または研究上の課題点について講演を行った。講演後のディスカッションでは, 会場から広範な意見を頂いた上で, 保健物理・環境科学研究の課題の抽出と, 今後の展開についての議論を行った。

II. 講演概要

1. 1F 廃炉のための放射線分布測定研究

1F 敷地内および原子炉建屋内では, サーベイメータを用いた作業環境の線量率分布測定が定期的に行われて

いる。しかし, サーベイメータが測定できるのは「測定点」での線量率のみであり, 放射線源の位置情報を得ることは難しい。高線量率のホットスポット(局所的に放射性物質が集積している箇所)が測定点の線量率を引き上げている場合もある。そのため, 測定点の線量率に加えてホットスポットの分布を測定することは作業者の被ばく線量低減の観点から重要である。以上の背景から, 1F 高線量率環境下での放射線計測技術について基礎・応用の両面から開発を進めている。

1F 原子炉建屋内の高線量率環境下で, ホットスポットを遠隔で可視化するため, 小型軽量コンプトンカメラの現場での実証試験を進めてきた。コンプトンカメラは, 散乱体と吸収体の 2 つのセンサに対するエネルギー付与位置と付与量から放射線の飛来方向を特定するデバイスである。原理的にコリメータが不要なため, ピンホールカメラなどの γ 線イメージャーと比較して, 小型軽量化の観点から有利である。実証試験では, γ 線センサに GAGG($\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$) シンチレータ, 光センサに MPPC(Multi Pixel Photon Counter)を用いた小型軽量コンプトンカメラをクローラー(キャタピラ式)ロボットに搭載し, 1F1 号機原子炉建屋内で測定試験を実施した。放射線の飛来方向を遠隔で測定するだけでなく, フォトグラメトリⁱなどの周辺環境 3D モデリング技術と融合させることにより, 1F 原子炉建屋内でのホットスポットの 3D 可視化に成功した¹⁾。今後は, 単体では γ 線の飛来方向の情報しか得られず線源強度の算出が困難なコンプトンカメラの欠点を補うため, 3D-LiDARⁱⁱなどを併

Student and Young researcher's view of research on health physics and environment science : Kazuji Miwa, Yuta Terasaka, Kotaro Ochi, Akira Futenma, Miyuki Sasaki, Jun Hirouchi.
(2019 年 5 月 28 日 受理)

ⁱ 物体を様々な方向から撮影した写真を用いて 3D モデルを作成する技術

用して汚染源までの距離情報も同時に取得し、遠隔での汚染強度の評価法を検討する。

さらに、制動 X 線による外部被ばくに寄与する ^{90}Sr などの純 β 線放出核種の分布測定、構造物の多い 1F 原子炉建屋内の汚染分布測定を目指し、シンチレーション光ファイバによる一次元放射線分布測定の基礎研究も進めている。シンチレーション光ファイバは光ファイバ状のプラスチックシンチレータである。ファイバ両端への光の到達時間差から放射線入射位置を測定する飛行時間法により、汚染分布を一次元的に測定する。本研究では、飛行時間法の高線量率場への応用を目指し、高線量率場での偶発同時計数特性の評価を実施した。今後は飛行時間法に加え、構造物の多い原子炉建屋内で求められる設置の自由度や高線量率測定に優れた新しい測定手法についても検討する予定である。(寺阪祐太)

2. 水底の底質中放射性セシウム分布のモニタリング技術について

地表面に沈着した放射性セシウムは、降雨による土壌侵食によって河川に流入し、時間の経過とともに湖沼に蓄積する。湖沼の底質中放射性セシウムの分布は、湖沼の面積、土地利用、流入および流出口の数などの条件により変化すると考えられる。湖沼のどこに、どれだけ分布しているかを知ることは、放射性セシウムの蓄積量を推定する上で必要な放射性セシウムの総量や、下流域への移行状況を推定する上で重要である。従来、湖沼における底質中放射性セシウム分布をモニタリングする際、採泥器により底質試料を採取し、Ge 半導体検出器で試料を分析していた。対象とする湖沼の規模が大きいほど、従来法では全体の放射性セシウムの分布を網羅的に知るのに時間がかかってしまう。そのため、いち早く除染や浚渫の必要性を判断するために、より迅速かつ簡便に汚染実態を把握する手法の開発が望まれる。

底質試料を採取することなく、底質表面で放射線検出器を用いて γ 線スペクトル測定を行うことで、直接的に底質中放射性セシウムの分布を推定する in situ 測定技術を開発した。従来法では、ため池内 20 地点でのモニタリングに約 1~2 週間かかっていたが、本手法では約 2 日でモニタリングをすることができる。本技術により、底質中表層放射性セシウム濃度と放射性セシウムの深さ分布の情報を同時に取得することができる。放射性セシウム濃度は、 γ 線スペクトル上の放射性セシウムの全吸収ピークの計数率と、同地点で実際に採取した表層底質試料中放射性セシウム濃度の関係から、換算係数 ($\text{Bq kg}^{-1} \text{ cps}^{-1}$) を算出することで換算した。放射性セシウムの深さ分布は、 γ 線スペクトルのエネルギー帯毎の計数

率比と、底質中放射性セシウムの深さ分布の関係から、換算係数 (g cm^{-2}) を算出することで換算した²⁾。深さ分布は実効的重量緩衝深度により求めた。実効的重量緩衝深度は、不均一な放射性セシウムの深さ分布も評価できるように、底質の密度、深さ、含水率、放射性セシウム濃度について考慮している。

前述の換算係数を用いて γ 線スペクトルを解析した結果(表層放射性セシウム濃度と放射性セシウムの深さ分布)と実際の底質試料中放射性セシウムの分析結果は良い一致を示した。次に、ため池水底で γ 線スペクトル測定を行い、換算係数を用いて水底の底質中表層放射性セシウム濃度と実効的重量緩衝深度の分布マップの作成を試みた。本技術により、ため池底の放射性セシウム分布を可視化することによって、自治体、農業関係団体、研究機関等組織のニーズに応じた情報を提供できる。例えば、自治体であれば、「どのような場所に放射性セシウムが蓄積しやすいか」という情報である。また、放射性セシウムの深さ分布は、経時的な変化を確認できるだけでなく、除染や浚渫の必要性の判断する上で、現場にとって必要な情報である。本技術の適用により、広範囲の底質中放射性セシウム分布の網羅の評価、中長期的なモニタリングの継続を引き続き実施していく。(越智康太郎)

3. 有人ヘリコプターを用いたモニタリングについて

有人ヘリコプターを用いた放射線モニタリング(以下、有人ヘリモニタリング)等の緊急時モニタリング結果は、原子力災害時における住民等に対する防護措置の実施判断や環境への放射線影響評価に活用される。有人ヘリモニタリングは広範囲を迅速に測定できるため、日常生活圏のみならず比較的高線量率となっている場所や、森林・山間部などの人の立入り困難なエリアにおいても適用できる。このような利点から、1F 事故直後に有人ヘリモニタリングが実施され、放射性核種の沈着状況が明らかとなった。1F 事故から 8 年以上経過した現在も、原子力災害に備え、緊急時モニタリングのツールとして本技術を活用するために、データ取得方法や解析手法の精緻化が継続的に行われている。

有人ヘリモニタリングは NaI(Tl) シンチレーション検出器、GPS を組み込んだ RSI システムをヘリ機内に搭載し、対地高度 300 m を基準にしてフライトする。取得した γ 線計数率に対し、宇宙線、空気中ラドン壊変生成物、およびヘリから飛来する γ 線(バックグラウンド成分)の寄与の除去、空気減弱補正、地上 1 m 高さでの測定値(以下、地上測定値)との比較による空間線量率換算を行い、地上 1 m 高さにおける空間線量率を算出している。従来の解析手法では、測定地域が平坦という仮定がされている。しかし実際には起伏があり、起伏の大きい地形下では地上で測定される空間線量率よりも有人ヘリ

ⁱⁱ レーザー光の反射を利用して対象物までの距離を測定し、周辺環境を 3 次元的に把握する技術。

モニタリングによる空間線量率が過大に推定された。空間線量率の換算精度を向上させるために、従来の解析手法の改良を行っている。例えば、地形の起伏を考慮に入れた解析手法を過去の有人ヘリモニタリングデータに適用した結果、空間線量率の過大評価が改善された³⁾。

有人ヘリモニタリングを緊急時モニタリングのツールとして運用するにあたり、住民等に対する適切な防護措置の実施判断や環境への放射線影響評価に資するためになるべく正確かつ迅速に線量分布を提供する必要がある。そのため、解析手法の改良をどこまで進め、データ解析の迅速性との両立をどう考えるべきかなどの検討すべき課題がいくつかある。例えば、解析手法の改良に関して、日本国土の約70%は森林であり、森林による遮へい効果が有人ヘリモニタリングに及ぼす影響は比較的大きいと考えられることから、それを考慮した補正手法などを検討していきたい。本講演で紹介に至らなかった地表面における放射性セシウム沈着量の算出手法、空気中ラドン壊変生成物による γ 線の影響を弁別する手法等については、既往の報告書⁴⁾の“4.6. 放射性セシウムの沈着量への換算方法”，“9. ラドン除去手法のシステム化”を参照されたい。(普天間章)

4. 上空からの放射線測定の高度化

1F 事故以降、有人ヘリコプターや無人ヘリコプターなどを用いた上空からの1F周辺のモニタリングが行われている。3. で示したように、従来の解析方法の測定地域が平坦であるという仮定では、地上測定値と上空からの測定による推定値が大きく異なる問題があった。この問題を解決するため、地形の起伏および森林の遮蔽などの効果を考慮した逆問題解析を用いた解析手法が開発されている⁵⁾。逆問題による解析手法は、従来法に比べ計算時間はかかるものの、より地上測定値に近い推定値が得られている。迅速かつ精度の良い推定値を提供するために、機械学習を用いた換算手法の開発も行われている。機械学習による換算は、データセットが得られている測定状況の場合、地上測定値と良い相関を示すが、学習データが十分ではない測定状況の場合、換算値の信頼性は低い。今後、データセットを増やしていくことで、より地上測定値に近い推定値への換算が可能になると考えられる。

これらの換算手法における換算値の精度評価は、地上測定値があるポイントと、上空測定換算値を比較することで評価を行っている。地上測定値が得られていない状況における上空測定換算値の信頼性を評価する手法は確立されておらず、正解値が無い場合において測定および換算した値がどの程度の信頼性があるのかを、数値的に示す手法を今後検討する必要があると考えられる。

また無人機を用いた上空からの放射線測定は、緊急時の区域設定などのための放射線モニタリングに有効な手

段と考えられるが、現状の測定システムでは災害時にすぐ適用できる状況にはなく、要素技術開発が必要である。例えば現状、無人機で測定したデータをリアルタイムで情報共有する機能がないため、システム構築および機器開発が必要である。また、無人機の長距離通信および長時間飛行やそれらの運用手法など、必要となる技術は多岐にわたる。今後これらの課題を解決することで、福島における事故の経験を生かした緊急時の防災ツールの開発を進めることができると考える。(佐々木美雪)

5. 事故初期における住民への影響を評価する 上での緊急時モニタリングの課題

緊急時モニタリングは、原子力施設事故が発生した際、原子力災害による環境放射線の状況に関する情報収集、防護措置の実施の判断材料の提供、原子力災害による住民等と環境への放射線影響の評価材料の提供を目的に行われる。測定項目は線量率、大気中放射能濃度などである。線量率は放射能濃度に比べて容易かつ迅速に測定できるため、事故初期には多くの地点で測定される。しかし、線量率のみでは測定時点でブルームが通過しているかどうかの判断ができず、さらに核種組成の情報が欠如する。特に核種組成は、線量率が今後どのように変化するのか、内部被ばくの一種である甲状腺被ばく評価などに使用できる。よって、可能な範囲で線量率のみならず核種組成の情報を抽出すべきと考えられる。核種組成の情報を抽出する例として、モニタリングポストに設置されているNaI(Tl)シンチレーション検出器で測定された波高分布の解析がある。波高分布は、線量率を構成している核種およびその割合(核種組成)の情報を有している。波高分布を解析した結果、推定精度の向上は未だ必要であるが、大気中放射能濃度を核種別に概ね推定することが可能であった⁶⁾。しかしながら、検出器の特性上、NaI(Tl)検出器では $10 \mu\text{Gy h}^{-1}$ 以上の高線量率場では核種分別できない。1F 事故時には、 $10 \mu\text{Gy h}^{-1}$ 以上の地域も存在したため、高線量率場でも核種組成の情報を取得するための手法を確立し、さらに上記で示した波高分布解析と類似の手法を用いて、現在よりも迅速かつ詳細に住民への影響を推定可能であるかを検証する必要がある。

内部被ばくを評価するためには、核種組成に加えて、ヨウ素の化学形態の組成の情報も必要である。ヨウ素は大きく3つの化学形態ⁱⁱⁱ⁾に分類される。これらの放射能から吸入摂取による実効線量への換算係数はそれぞれ異なっており、さらに環境中での挙動も異なる。チェルノブイリ事故時に測定されたヨウ素の化学形態の組成は、場所と時間によって異なっていた。この原因の一つとし

ⁱⁱⁱ⁾ I_2 などの元素状ヨウ素、 CH_3I など有機状ヨウ素、粒子状ヨウ素

て、各ヨウ素の環境中での挙動の違いが挙げられる。さらに、ヨウ素の化学形態によって建物への侵入割合、フィルターによる捕集効率も異なる。ヨウ素の各化学形態に対する環境中での挙動をより詳細に把握することができれば、防護措置の効果および内部被ばく量のより正確な算出に役立つと考える。(廣内 淳)

6. 現存被ばく状況における放射線防護の課題の抽出

1F事故により、現在の日本には現存被ばく状況にあると考えられる地域が存在する。既存の放射線安全管理の方針は、歴史的には計画被ばく状況を想定して組み立てられ、その考え方を他の被ばく状況にも適用できるように、少しずつ視野を広げて進化させてきた経緯がある。したがって、実在する複雑な現存被ばく状況下での活動に関して、放射線防護の手段として既存の法令やその適用に関する考え方を、そのまま踏襲するにはまだ十分ではない場合もあり得る。現実直面している被ばく環境における放射線防護の考え方の整理を進め、必要となる新しいルールの策定が望まれている。現存被ばく状況を含む環境における防護の考え方を論理的に整理することは、将来、原子力災害等が発生した際の合理的な防護に繋がる。整理のためのケーススタディとして、現存被ばく状況における、放射性物質で汚染した物の搬出⁷⁾や廃棄物の管理⁸⁾についての検討がなされてきた。

現存被ばく状況における防護のケーススタディとして、放射性物質で汚染した物品の再生利用に関する可能性を検討した。現存被ばく状況における汚染した物品の再生利用を検討する上では、計画被ばく状況にて実施されているクリアランスとは異なった考え方のもとで再生利用が行われる場合も考えられるので、解決すべき放射線防護上の課題が多く生じる可能性がある。それらの課題の中から、現存被ばく状況として扱うことのできる環境をより具体的に表現するための考え方について検討した。

現存被ばく状況における放射線防護を考える上では、どういった環境と状況が「現存被ばく状況」に該当するのかを明確に整理しておく必要がある。現存被ばく状況の定義はICRP Publ.103において「管理についての決定をしなければならない時に既に存在する、緊急事態の後の長期被ばく状況を含む被ばく状況」と定義づけられている。しかし、この定義だけでは、被ばくレベルの観点からその環境を現存被ばく状況とすべきか否かを判断することはできない。ICRP Publ.103では現存被ばく状況における放射線防護の参考レベルとして $1\sim 20\text{ mSv y}^{-1}$ を示しているものの、被ばく線量が 1 mSv y^{-1} 以下の場合、防護対策をとらなくてよいとの明らかなコンセンサスはない^{iv}。現存被ばく状況を適用できる環境をより明確にするための追加的な考え方として、「現存する線源

によって、環境中の人の被ばく線量が放射線防護上有意に上昇しうる状況」といった視点が利用できないかを提案した。このことは、現存線源による追加線量が 1 mSv y^{-1} 以下となる環境でも、その環境を現存被ばく状況として整理できるかもしれないことを示す。なお、放射線防護上有意な被ばく線量については別途、検討が必要である。

本提案に対して、会場からは「現存被ばく状況を適用する環境の判断にはステークホルダーの関与が重要である」、「現存被ばく状況以外の状況の定義への影響の可能性はないか」といった意見が出た。(三輪一爾)

III. ディスカッション

会場を含めたディスカッションでは、主に「ニーズ調査の重要性」と「今後の研究に対する取り組み」について議論された。

各分野の研究者が各々様々な技術を開発しているのは素晴らしいものの、測定に関するニーズの調査が足りていないとの指摘があった。原子力発電所事故直後の緊急時モニタリングを例に挙げると、測定することに対するニーズである。何の情報をどのタイミングで出さなければならないのかという分析があった上で、「現状ここが足りないので、そこに対して技術開発すべき」といった俯瞰的な視点が必要である。他の部会ではロードマップに該当するものが存在することから、保健物理・環境科学部会でもニーズの面から考えた際に「5年後、10年後あるいは20年後にこういった技術ができていなければならない」といった目標がクリアになるようにすべきである。これらのモニタリング技術の精度や時間の問題は、サイエンスやエンジニアリングだけでは解決できない。本部会は研究テーマが多岐にわたることから、測定のニーズに答えるために複数の分野でコラボレーションしながら、問題を解決していくような道筋を立てる必要がある。また、ニーズを考える上で、誰が顧客になるかという点が重要である。事故が起きた際に、誰がどうやって、どういった体制で測定するか、そのようなプランを誰が作るべきかを考える上で、どの機関がどういった技術を持っているか、という観点から考えることも重要である。

今後の研究に対する取り組みを考える上で、1F事故の知見を通して、サイエンスとして面白い研究への派生に関する言及が少なかったと指摘があった。例えば、無人ヘリによるリモートセンシングは、稲の生育状態の調査や天然放射性核種に着目した田んぼの土壌の性質の評価に使用できる。現存被ばくについては、現在の都市の空気汚染の健康影響と放射線の現存被ばくの体系がどの

^{iv} 過去には介入免除レベル 1 mSv y^{-1} がICRP Publ.82において提唱されているが、現存被ばく状況との関連での具体的な議論はない

ように整合していくべきかなどの議論である。事故後に行われた ^{137}Cs の動態研究の知見を活かし、 ^{137}Cs をトレーサーとして中長期的な土砂移動のモニタリングといった地球科学の分野への派生や、総務省が進めている5.7 GHz 無線通信技術を活かすことで、写真や動画、 γ 線スペクトルなどの複数データの同時取得を利用した、より高精度なモニタリング技術を開発することで防災分野への派生も期待できる。いずれにせよ、若手が中心となり部会の枠にとらわれることなく分野横断的に研究を進めることで、サイエンスとして面白いものを生み出すことができると思う。

IV. まとめ

本セッションには40名程度が参加し、注目度の高いセッションとなった。本セッションはこれまでの企画セッションとは異なり、発表者全員が若手研究者であり、各人が研究を行っていくうえで浮き彫りになってきた課題について講演した。今回のセッションを通じて、若手研究者がどのように研究を進めていくべきか、どういった点に注意すべきなのかを再確認できる場となった。今回のセッションで学んだことを次の世代に伝えていきたいと感じた。ディスカッションでも話題に挙がったが、技術の更新が著しい中で、われわれはその技術を甘えて利用するだけではなく、その技術を利用して最終的にどのように評価すべきか、その技術をどのように継承・発展・応用していくかを考える必要がある。また、課題を解決していく上で、現場に従事し、自由な発想で解決の糸口を発見できる若手研究者からの視点の重要性を感じ、他分野とのコラボレーションの可能性、新たな研究分野の開拓などを積極的に発信していきたい。

－ 参考資料 －

- 1) Y.Sato et al., Radiation imaging using a compact Compton camera mounted on a crawler robot inside reactor buildings of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, J. Nucl. Sci. Technol., 2019.
- 2) K. Ochi et al, Development of an Analytical Method for Estimating Three-Dimensional Distribution of Sediment-Associated Radiocesium at a Reservoir Bottom, Anal. Chem., 90, 10795-10802, 2018.
- 3) A.Ishizaki et al., Application of topographical source model for air dose rates conversions in aerial monitoring, J. Environ. Radioact., 180, 82-89, 2017.
- 4) 普天間章, 他, 平成29年度原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Technology 2018-015, 日本原子力研究開発機構, 2019.
- 5) M. Sasaki et al, Development of analysis method for airborne radiation monitoring using the inverse problem solutions Prog. Nuc. Sci. Technol., 6, 63-67, 2019.
- 6) Y. Terasaka et al., Air concentration estimation of radionuclides discharged from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station using NaI (TI) detector pulse height distribution measured in Ibaraki Prefecture, J. Nucl. Sci. Technol., 53, 1919-1932, 2016.
- 7) 放射線防護標準化委員会, 現存被ばく状況における汚染した物の搬出のためのガイドライン, H28. 6. 2.
- 8) 杉山大輔, 現存被ばく状況における廃棄物管理の放射線防護の枠組み, Jpn. J. Health Phys., 47 (1), 30-33, 2012.

著者紹介

三輪一爾 (みわ・かずじ)

東京大学, 日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)放射線防護, 廃棄物埋設処分, 等

寺阪祐太 (てらさか・ゆうた)

日本原子力研究開発機構, 名古屋大学

(専門分野/関心分野)放射線計測

越智康太郎 (おち・こうたろう)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)放射線計測, 分析化学

普天間章 (ふてんま・あきら)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)放射線計測, 放射線教育

佐々木美雪 (ささき・みゆき)

日本原子力研究開発機構, 名古屋大学

(専門分野/関心分野)放射線計測

廣内 淳 (ひろうち・じゅん)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)放射線防護, 環境放射能

Focus 国内外の原子力教育事情 (7/最終回)

イタリア・ミラノ工科大学の場合

ミラノ工科大学 二ノ方 壽

KEYWORDS: *Italy, Referendum, Energy Engineering, CeSNEF, MSc, Academism*

I. はじめに

ミラノ工科大学ボビザキャンパスの一画に、放射線防護・計測・計装、加速器、核工学・核化学・核医学・環境科学などの基礎・応用の研究開発国際拠点となるべく原子力工学実験研究棟 B18(図 1)が完成したのは 2015 年 3 月。G7 の中で原子力を放棄している唯一の国の大学に、最新の原子力研究施設が加えられたのである。原子力エネルギーに背を向けたとはいえ、国境を接する国々は原子力発電国であるし、原子力研究を行っても何も不思議ではない。しかしこの種の施設が最近新たに大学に建設されたのは欧州ではイタリアのみである。おそらく世界的に見ても他に類を見ないであろう。もう一つ、意外な事実がある。それは欧州最大の原子力工学専門課程は、これといった原子力産業がないイタリアのミラノ工科大学にあることである。

以下に、そのミラノ工大の原子力工学教育体制や事情の概略を記す。なお文中に現れる数字は断らない限り 2018 年現在のデータである。

II. レファレンダムと原子力放棄事情

イタリアの原子力開発の歴史は古い。民間による原子力研究が始まったのが第二次世界大戦直後、50 年代半ばには原子力発電計画が国家プロジェクトとして立ち上がり、60 年代初期に PWR, BWR, マグノックス炉が発電を開始しているのである。しかし 1986 年のチェルノブイル事故に端を発した国民投票(レファレンダム)は原子力の放棄に繋がってしまった。だが、投票の争点はあくまで既存の法律条文廃止の是非を問うたのであって、原子力利用のような国家戦略の是非の判断を国民に求めたものではない。こうした投票結果の効力はイタリアの国民投票制度に定められていることであり、ローマ法典以来長い間に培われてきた知恵に基づくものと考えられる。つまり、原子力を放棄することにより社会がどう変化し、国民生活にどう影響するか等の判断を国民に委ねることには多少無理があるということであろう。

Nuclear Engineering Education in Polytechnic University of Milano, Italy : Hisashi Ninokata.

(2019 年 3 月 26 日 受理)



図 1 原子力工学実験研究棟 B18

しかしながら、原子力の放棄は経済活動停滞に直結、国の活力低下を加速したと思われる。慢性的な高い失業率は下がらず、南北の格差は拡大。こうした状況下、多くの識者の努力によって漸く復活しようとしていた原子力発電が、2011 年 3 月の福島原子力発電所事故により復活の命脈を絶たれてしまったことは記憶に新しい。

結果、原子力分野に限らず若い技術者の活躍の場が益々狭められていったことは想像に難くない。このような国で若者を惹きつける原子力工学教育がどう行われているのだろうか。

III. ミラノ工科大学エネルギー工学科・部門

ミラノ工科大学は 1863 年に設立され、エンジニア・建築家・産業デザイナーの養成に注力する欧州屈指の工科大学である。全 7 つのキャンパスに通う学生総数は約 42,500 名(工学部 32,000 名, 建築学部 6,500 名, デザイン学部 4,000 名), うち 6,000 名が留学生。教授, 准教授, 助教授は約 1,300 名, 教育補助研究員は 1,400 名を数える。

2008 年にボビザキャンパスに誕生した新しいエネルギー工学科・部門は、旧エネルギー工学科, 電気工学, 原子力工学, 化学・材料・化学工学など各学科のエネルギー関連部門が合流・合体してできたもので、エネルギーの生産・管理・節約・高効率利用・原子力・ナノテク/新材料から燃焼の触媒化学, エネルギー貯蔵, スマートシティなどの基礎(学部で共通教育)から応用(大学院で専門教育)に関する理学・工学の殆ど全分野に跨る横

断的な組織である。指導に携わる教員数は約 350 名、学科・部門としては大所帯である。

原子力工学教育はそれまで独立の学科の中で実施されてきたが、2008 年以来、エネルギー工学部門の大学院体制に組み込まれて他の学科との連携を強調している。

原子力に興味を持つ学生が最近増えてきたと筆者は感じている。おそらくエネルギー工学の中に原子力工学が学問として存在していることが鍵で、学部時代に一般的な物理、化学、情報、生物や基礎工学を学んだ学生達は、核、放射線を冠した分野の姿を、学んだ知識の延長線上にしっかりと捉えているのではないかと思う。

IV. CeSNEF と修士課程教育の概要

イタリアの原子力教育は 1956 年、ミラノ工大レオナルドキャンパスに設置した修士課程と直後の博士課程に始まる。1957 年に建設された国内初の研究炉(50kW)はミラノ市内中心部に近い同キャンパスで 1959 年から 79 年まで稼働した。CeSNEF (Centro Studi Nucleari Enrico Fermi)とは、当時の原子力工学部門の総称で、ボビザ地区に移ってからグループの名称は引き継がれている。なお、70 年代初頭までに他の大学や研究所で合計 14 基の研究炉が稼働を始め、大半は既に退役しているが、未だいくつかが現役である。その一つがミラノ近郊のパビア大学にあるトリガ炉(250kW)で、そこでは CeSNEF の学生が原子炉実習に励んでいる。

修士課程入学者数は毎年凡そ 35 名前後を保ってきたが、近年入学者の増加傾向がみられ、16~17 年における入学者は 46 名、17~18 年は 65 名である。65 名の出身内訳はエネルギー工学科卒業生 13 名、物理学科 16 名、材料工学科 8 名、他学科から 13 名、他の国内大学の卒業生 5 名、外国大学から 10 名(留学生)である。特に留学生が増えたのは、大学院の講義が英語に変わったことが大きい。10 年ほど以前から英語での講義に変えるといいながら、数年前までイタリア語で講義する場面が多くみられた。このことは欧州域内交流プログラムからの希望学生すら少なかった理由の一つに挙げられていたのである。

修士課程 1 年目に炉物理や動特性、放射線計測や防護の共通科目を履修後、2 年目に 3 つに分かれた専修コースへ希望に応じて配属される。17~18 年入学者の場合、原子力プラントコースへ 13 名(中小型炉、鉛炉、熔融塩炉など)、同材料コース 21 名(物性、放射線防護など)、同システム物理コース 31 名(核融合プラズマなど)であった。研究室への配属は修士論文研究に専念する 2 年目の後半が一般的である。聞き取り調査によると、学生の興味は高い順にプラズマ・核物理、核医学、核融合炉、核分裂炉とあり、学生の興味がそのまま配属に反映されている。軽水炉等、稼働中の原子炉に直接関わる科目が少ないのは国情と時代の流れを反映したものであろう。

欧州諸国の高等教育機関の交流を盛んにして教育の質を上げることを目的にしたエラスムス計画、その一環として、1989 年に立ち上げたヨーロッパ単位互換制度 ECTS というものがある。欧州諸国のほとんどが本制度を法制化し、ECTS を高等教育段階の学修量の指標(単位)としたり課程修了の要件などに用いたりしている。ミラノ工科大学でも、履修した単位を欧州域内の他の大学に転送する場合、標準的な学生が 25 時間の学修によって獲得すると見込まれる成果を以て 1 ECTS に換算する。例えば 5 ECTS の科目を履修することは、40~45 時間授業を受け、予習・復習・宿題・課題学習などに 80~85 時間を費やして、合計 125 時間の学修を行うことに対応する。

修士課程の平均的學生に課せられる学修時間は 1 学期 30 ECTS~750 時間、年間 60 ECTS~1,500 時間、修士号を取得するまでの 2 年間では合計 3,000 時間となる。なお、ミラノ工大原子力工学では入学から 2 年で修士号を取得する学生は平均して入学者全体の約 80%、修了者の約半分が毎年博士課程へ進学する。

学生は在学期間中にインターンシップで研鑽を積むことが推奨されていて、欧州域内のエラスムス計画に参加する学生が 10 名、修士論文研究を海外(含日本)のメーカーや研究所で実施する例が多く、20%以上の学生が国外での経験を積む。国内では、修士課程の半分をトリノ工科大学、残りの 1 年をミラノ工大で過ごす Poly²Nuc プログラムや、原子力工学科を有するピサ大学、トリノ工大との間で結ばれた共同研究コンソーシアム CIRTEN を利用する他、多くの機会が用意されている。

V. 人材供給

修士課程修了者の殆どが原子力の仕事を望むが、なかなか希望が叶えられないのは仕方ない。しかし非原子力のイタリア国内で引く手あまたで就職率は 100%。海外で就職する割合は 20%強。原子力の仕事にこだわるのはとくに博士課程修了者に当てはまるが、その多くが EU 圏内、米国のメーカー、研究機関や大学の教職に就いている。そして彼らの世界での活躍には目を見張るものがある。イタリア国内の停滞に比べ、技術が海外では高い評価を得ると同時に人材供給で他国の発展に寄与するねじれ現象の例といえよう。

ミラノ工大の修士課程修了者の評判が高く、博士課程に進学したい学生がいたら是非採用したいので紹介してくれ、というのは米国の大学教授である友人から直接聞いた話である。こうした評判は嬉しいが、ねじれのことを考えると単純に喜んでばかりもいられない。

教育第一、研究第二はイタリアの大学の伝統のようである。講義の中身には部門によるチェックが入る。講義の合間には聴講する学生と常日頃の面接や面談が推奨される。教育に追われ、研究に没頭できないとぼやく先生

も多い。教育者が豊かな現場研究経験を持っていることは理想で望ましい。学生の信頼もそこに生まれる。筆者はこのような関係が構築できれば申し分ないと思う。しかしながら、7年間ミラノ工大に在職して、研究あつての教育という考え方は聞いたことがない。むしろ、教育あつての研究というのが前提のようだ。事実、教員の教育への情熱と努力が学生の原子力への興味を引き起こし、優秀な人材の輩出に繋がっている。

VI. おわりに

冒頭に引用した新原子力工学実験研究棟 B18 のスポンサーはイタリアの文科省だ。予算は約 25 億円、その予算措置は福島原子力発電所事故以前から確定しており、その後もキャンセルされなかった。

原子力工学は学問である。イタリア政府は原子力発電を放棄しても原子力工学は放棄しないのである。科学・技術や学問を尊重する DNA がそうさせているのだろうか、毎年学生が原子力工学を学びに入学してくる以上、イタリア文科省は国内 8 大学にある原子力工学専門課程の教育と研究に予算を配分しているのである。

文科省と学生に支えられているとはいえ、国内に原子力産業がない以上、いつかは息切れする可能性もある。

原子力工学コースの体質強化を図らなければならない。そのため欧州域内競争の資金獲得の普段の努力に加え、現在検討しているのは留学生を増やすことである。ミラノ工大の建築や電気・情報分野には、中国のいくつかの交通大学との間で既に締結、実行されているダブルディグリープログラムというのがあるが、同プログラムを原子力工学の分野へ拡大しようとしているのはその一環である。学生が本プログラムに在籍すると、最初の 1 年はミラノ工大で、2 年目には中国の大学で講義を受け、3 年目にインターンシップ実習の後、ホスト大学での修士論文研究を実施することになる。その研究成果に対し二つの大学が修士号を授与するわけだ。いずれは本プログラムを中国だけでなく、より広範な他の国々の大学との間にも広げていきたいと考えているところである。

著者紹介



二ノ方壽 (にのかた・ひさし)
イタリア・ミラノ工科大学教授
(専門分野) 原子炉炉心熱流動工学、
数値解析



書籍販売のご案内

■『東日本大震災における原子力分野の事例に学ぶ技術者倫理』

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

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

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

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

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





～福島浜通りだより～(4) 紡いでいく暮らし

一般社団法人 AFW 吉川 彰浩

福島県の浜通り地方の沿岸部は太平洋と阿武隈高地地帯に挟まれ、山間部と海とがとても近い形状をしている。桜咲く春はいつの間にかに過ぎ、深緑の山々と気持ちの良い潮風とが合いまった中で、どの地域でも田んぼづくりが始まってきた。

水を張った田んぼからは初夏を告げる歌声として、騒がしいカエルの合唱が聞こえてくる。長閑さの中に身を置き、しばらく眺めていると普段の身の周りの忙しさをそっと紛らせてくれるように感じる。

私は双葉郡楡葉町で友人たちと田んぼを作っている。今年3年目に入った。これまで田んぼに触れる機会が無かったわけではない。家で少しばかりの米を作っていたが、それは祖父母や義理の父母のお手伝いをしていただけで、本格的に自らが農業というものを始めたのは3年前からになる。心安らぐ風景だと心底思えるようになったのは、自らが農業を始めたことが大きく関係している。今回のコラムはそんな若輩農業者が書いたものと受け取ってもらいたい。

楡葉町は東京電力福島第一原子力発電所の事故により全町避難を経験した場所だ。今でこそ、当たり前前に農業をすることができるが、8年前には一切の農業を諦めざるを得ない時間があつた。今でも最初に田んぼに水を入れた時の感動を覚えている。源流は阿武隈高地から流れる木戸川の水だ、この源流にある川内村も同じ様に全村避難を経験している。その水が何十kmも流れ、6年ぶりの田んぼに沁み入っていく。渴ききった土はどんどんと吸収していく。水張が終わるとまるで鏡のように周囲の風景を写し込んでいた。原風景がそこにあった。水が張られた田んぼに感動を覚えたのは、この時が初めてのことだ。その感動は苦労をもって浮かんだものではない。その当たり前の裏側に豊かな自然があること、それを活かすのは人の営みと学んだからだ。たった一枚の田んぼにも沢山の繋がりがあって成り立っている。

数週間後、カエルの大合唱が始まった。友人が「吉川さん、気づきました？田んぼを始めたから聞こえるんですよ」と大切な問をくれた。問われたのは意味だ。お米を作るということが生態系を守ることにつながっている。何気ない暮らしの中には沢山の生き物が暮らしている。原子力発電所の事故がもたらした破壊は、また守り育てることが出来るという事だとも考えさせられた。先人が残してくれたものを紡いでいく、今私はその紡ぎ手の当事者にいるのだとも。

実は筋肉痛を堪えながらコラムを書いている。数日前



に3年目の田植えを終えたばかりだからだ。毎年、田植えを全て機械ではやらず、一部は手植えを仲間内で楽しもうと企画している。大きな呼びかけはしない。復興という旗印の下、イベントとして行う時代は過ぎたものと思っているからだ。

大切なことがある。お米一つにどんな繋がりがあるのか、それに気づけた時、人生は豊かだと感じられる。

今年は40名ほどの人が来てくれた。子供から大人まで幅が広い、年齢も職業も住んでいる場所も違う、この繋がりは震災によって生まれたものだ。

手植えの時代ではない、それ故に殆どの人が初体験でもある。初めて田んぼの土に触れその暖かさを感じていた。苗を植えながら、こんなに小さいものがお米に変わるのですねと感動をしていた姿があつた。穢れとして扱われたものが、本質には人を感動させるものであることを感じ得たのだと思った。

1.5反ほどの田んぼが2時間ほどで苗で埋まった。気がつけば誰もが泥だらけになっていた。皆一緒に同じ目線になれるのは手植えのだいご味の一つだ。この日、達成感と清々しさが溢れ、会ったばかりの人達が笑いながら語り合っていた、小さな協働作業が人の縁を深めたに違いない。

子供たちはそんな大人達をそっちのけで、水路に入り遊び回っていた。どうやら田植えに飽きて、次の獲物を見つけたようだった。そんなことをしていると転んで怪我するからね！と親御さんの注意も空を切り、言ったそばから足をすべらし、転んで大笑いをしていた。それを見て自分も思わず吹き出してしまった。

筋肉痛が数日前の騒がしさを思い出させてくれる。この痛みは心地が良い。そしてかけがえのない思い出がまた一つ出来た。次は秋の収穫だ。また思い出を積み重ねていくと思うと早速ワクワクとしている。

(2019年5月20日記)

視 点

〈社会〉を語る

第5回 社会を外側から語るか、内側から語るか

岡山大学 齋藤 圭介

社会というものは、手で触れることも目でみることもできません。そうした捉えどころがない社会という対象を、もっとも適切に語れるのは誰でしょうか。また、社会を適切に語る視点とはいかなるものなのでしょう。

なにも社会学者だけが社会を語っているわけではありません。多くの人々もまた、家族、恋人、同僚、友人との会話のなかで社会を日常的に語っています。働いている人に限らず、大学生、高校生、中学生、はては小学生だって、社会を語ることがあります。たとえば小学生がゴミのポイ捨てをやめよう！と発言したとすると、彼／彼女は、現代社会についての考察をしているともいえます——住んでいる街でゴミのポイ捨てが横行している現状把握をしたうえで、それへの解決策の提示をしているのですから。

そう考えると、社会を語ることが社会学者の仕事だとは言いにくなります。社会学者が語る社会と非社会学者が語る社会には何か違いがあるのでしょうか。もし社会学者が語る社会と非社会学者が語る社会がまったく同じであれば、社会学者という職業はいらなくなるのでしょうか。

もちろん、社会学者は非社会学者とは異なる仕方では社会を語っています。社会学の歴史は、社会を語る方法を洗練させてきた歴史ともいえます。社会学者は、手で触れることも目でみることもできない社会を語る方法について、特別な訓練(≒社会学的教育)を受けています。結論を先取りすれば、社会学者は社会を語るさい、社会を自覚的に内部観察しています。

内部観察とはいったい何でしょうか。社会学の歴史を振り返りながら紹介しましょう。もともと社会学(仏 *sociologie*, 英 *sociology*)という単語は、仲間・つながり(羅 *socius*)を対象にする学問(希 *logos*)として、19世紀前半に A. コントによってはじめて用いられました。それ以前は、社会を対象とした学問のことを社会物理学(仏 *physique sociale*)と呼んでいました。社会物理学という響きからも連想できるように、自然科学をモデルにして社会について思考をしていたのです。社会には明確な規則性があって、それは客観的に観察できるものであり、その法則に従えば混乱した社会を再組織化できる、という考え方です。換言すれば、エンジニアが大きな飛行機の設計図を描くかのように、社会学者は目の前に社会というモノを置いて、社会を設計できるという発想です。社会の外から社会そのものを客観的に観察できると考えていたのです。とうぜん、社会になにかおかしい箇

所があれば、部分的に修復をして、完全な社会を作れるとも考えていました。社会を外側から眺めて論じることができるかのように考えるこの当時の社会学者の観察方法は、外部観察と呼ばれます。

しかし当たり前ですが、社会学者といえども他の人々と同じように、社会を語るよりもさきに社会の中で生活しています。特定の人間関係もあれば、利害関係もあるでしょう。社会学者のみが高みにたって社会全体を見下ろして、360度にわたり社会を客観的に観察できるなんてとても思えませんよね。

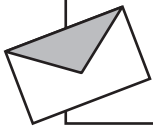
おおむね M. ヴェーバーや E. デュルケムという社会学の巨匠が活躍を始めた19世紀末から20世紀初頭以降の現代社会学は、社会学者もまた社会の内部にいてことを前提にしたうえで、社会についての考察をはじめます。それゆえ、エンジニアが対象物を眺めるようには、社会学者は社会を眺めることができないということを強く自覚しています。いまの社会学は、外部観察を諦めるところからスタートしたといってよいでしょう。社会学者も社会のなかにすでにおり、そうした内側からしか社会を観察せざるをえないわけです。この視点のことを内部観察といいます。

この内部観察を前提にすると、完全な社会像を描くことは社会学者でさえできません。どこまでいっても、特定の立場からみた社会を論じるしかないからです。そのため社会学者の研究というのはつねに仮說的といえます——普遍的な解を求めることを放棄している、といってもよいでしょう。

言うは易しで、この内部観察という視点はなかなかやっかいです。社会を内側から観察するといっても、その社会へのまなざしが自分の半径5メートルくらいまでしか届いていない場合、自分の身近で生じたことに基づいて社会一般を論じてしまいがちですし、社会との距離が0メートルまで縮んでしまうと自分が考えたことがそのまま社会だ！という暴論になってしまいます。他方で、社会と距離を取り過ぎると、一昔前の外部観察の視点に陥りやすいのです。社会学者には適度な社会との距離が求められていますが、適切な距離を保ちながら社会を語れることは思いのほか難しいものです。

現代社会学の視点は、外部観察ではなく内部観察から出発しています。社会学者と非社会学者の社会の語り方の違いは、内部観察をするさいの社会との距離の取り方にあるといえるでしょう。

理事会だより



2019 年度(令和元年)新たな体制で活動開始

新役員の選任

令和元年6月14日に開催された第9回総会において、新役員7名(理事6名、監事1名)が選任され、留任・再任役員13名と合わせて20名の新体制で活動を開始しました。

総会当日に新体制にて第1回理事会を開始し、会長・副会長を選出するとともに、各役員の担当も決定しました。各役員の担当業務は下記の通りです。

役 職	氏 名	所 属
会長(福島連絡会、国際)	岡嶋成晃	JAEA
副会長(支部、YGN)	中島 健	京大
副会長(学術、廃炉)	山口 彰	東大
副会長(ダイバ、経営改善)	藤澤義隆	中部電力
理事(編集、国際、企画)	伊藤主税	JAEA
理事(教育、学術)	宇埜正美	福井大
理事(総務、標準)	近江 正	原電
理事(財務、標準、会員)	川村愼一	日立 GE
理事(会員、編集)	小山正史	電中研
理事(企画、教育)	佐治悦郎	MHI NS エンジ
理事(財務、福島)	三倉通孝	東芝
理事(支部、YGN、部会)	澤 和弘	北大
理事(総務、倫理、支部)	高木宏彰	関西電力
理事(部会、フェロー)	玉田正男	QST
理事(部会、会員、広報)	千葉 敏	東工大
理事(広報、倫理、ダイバ)	土田昭司	関西大
理事(福島連絡会、企画、廃炉)	中山真一	JAEA
理事(広報、ダイバ、福島)	布目礼子	原環センター
監事	中田耕太郎	東芝
監事	星野 剛	日本原燃

総会の開催

総会では、定款の定めに従い議長に会長が指名され、次に、2018年度事業報告・計算書類が審議されました。議案承認後に、岡嶋新会長から就任に当たり所信が述べられ、「本年創立60周年を迎えた日本原子力学会は原子力の信頼回復と新たな未来を切り拓く『再構築期』を目指す初年度として、社会に役立つ原子力・放射線技術の追究に加え、各課題解決に取り組んでいく」との力強いメッセージが会員に発せられました。

次に、学会の節目の重要な一年間を会長として務められた駒野氏を推薦会員に推挙し承認されました。同氏は、学会60周年を迎えるにあたりこれまでの学会活動を総括するとともに今後の活動の方向性を提言するなど重

要な課題に取り組まれ、大きな成果を挙げられました。

その後に報告事項として、2019年度の学会活動全体の事業計画、および収支予算の概要が報告されました。

最後に学会の理事会および委員会活動に長年積極的に参加、尽力されました田中治邦前理事に対し学会長より謝意が述べられ感謝状が贈呈されました。

今年度の主要な取り組み

2014年度に立ち上げた「福島第一原子力発電所廃炉検討委員会(廃炉委)」を中心に、今後長期にわたり取り組まれる廃止措置－福島第一事故炉の廃炉－への学術的提言の発信や、学会事故調の課題のフォローに引き続き取り組んでまいります。また、「福島特別プロジェクト」の活動を通じ、国や国内外の関連機関と協力し、周辺住民の皆様への技術的支援、わかりやすい広報、行政への提言などを積極的に推進していくとともに、本会が関連学協会に提案した福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会について、幹事学会として体制づくりを進めつつ学協会間の連携強化を図ります。

その他、本年9月の秋の大会(富山大学)、来年3月の春の年会(福島大学)開催を含め学術および技術の調査・研究ならびに標準の制定、活発な部会・連絡会活動、支部活動、フェローによる自主的活動に加え、迅速な広報活動、技術倫理の普及・定着ならびに男女共同参画に関する調査・啓発活動、国際活動として海外学協会との積極的な交流や国際的な組織へのわが国を代表しての参加、国際会議の主催準備なども実施します。

当学会の財務状況については、理事会直轄の組織を設けて収入の増加と支出の削減などを継続的に実施しておりますが、学会員漸減の傾向にあり、収支は厳しい状況が継続しています。このため、引き続き、会員サービスの向上を図りつつ、一層の効率化を進めるとともに、新設された教育会員の入会促進、賛助会員の増強、新規事業の開拓等の活動を継続し、長期的に安定した学会運営の基盤確立を図るとともに原子力・放射線の平和利用に関する理解の活動の強化を図ってまいります。

(総務担当理事 近江 正)

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