

巻頭言

1 科学・技術と社会の接点

白川英樹

時論

2 浦賀沖に見える日本のエネルギー問題

金田武司

解説

24 原子力発電新規導入国の原子力人材育成に対する日本の支援の現状 —より安全な原子力発電導入へのサポート

原子力発電の新規導入を目指している国は数多くあり、事故を含め多くの経験と技術をもつ日本には人材育成への協力の要請が多く寄せられている。これに対する日本の現状と課題を紹介する。

鳥羽晃夫

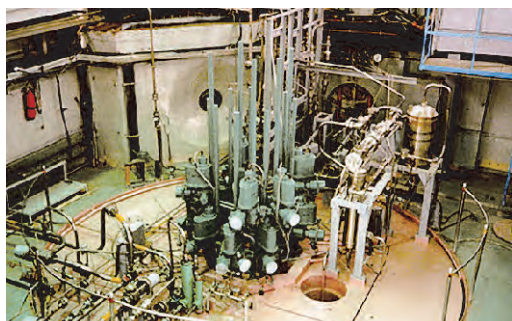
解説シリーズ

最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構 (4)

32 今こそ、高速炉の話： 持続性あるエネルギー供給へ

「もんじゅ」では50年にわたる活動を通じて膨大で多岐にわたる技術成果を得てきた。これまでに蓄積された知見・技術を、今後の高速炉の実用化に向けた研究開発に確実に活用していくことが必要である。

根岸 仁ほか



カザフスタンでの EAGLE 計画で
使用した IGR 試験施設

講演

10 コミュニケーションの基本 —「私」が「私たち」になるとき

コミュニケーションで最も大切なことは、それを担う双方の間に共同体意識を生むことであり、共に未来を作り出してゆくという意識を持つことである。

岸田一隆

特集

未来につなぐ福島県の放射線教育の取り組み

15 福島県教育委員会の放射線教育の取り組み

1F 事故を経て、福島県教育委員会が取り組んできた放射線教育や防災教育の内容や、福島県内の小学校・中学校で実践されている放射線教育の実施教科について紹介する。

阿部洋己

17 探究的に学び、未来を切り拓く コミュタン福島の放射線教育

コミュタン福島は、福島県の「今」を伝える展示室と探究的な体験研修を通して、正しく放射線を理解させ、福島環境を知り、創り、発信する役割を果たしてきた。

佐々木清

20 放射線教育の広がりと継続性への課題

福島県では地域の実情に応じた放射線教育が行われてきた。1F 事故から9年たち、今後の放射線教育をどう位置づけていくかを考える。

山口克彦

22 放射線と福島の現状を学ぶ 教育モデルについて

風評は放射線への不安以外の何者でもなく、その本質的な対策は放射線について学ぶことを抜きには語れない。これを乗り越えていくためにも、高校生に対する放射線と福島の現状に関する教育を充実させる必要がある。

原 尚志

Zoom 越しの連帯
パンデミックでの気付き
新型コロナウイルスとスロバキア
サイエンスの真髓と“cram”
目に見える, 見えない
「ためにする」批判を見分ける

井内千穂
小澤杏子
妹尾優希
鳥居千智
服部杏菜
服部美咲

報告

51 福島若者は原子力に何を感じているか—夢と課題

1Fの廃炉や地域の再生・復興に貢献する人材の育成をめざす福島高専の教育の実際、対話活動を通して感じたこと、原子力、エネルギー政策に対する学生の思いについて語る。

赤尾尚洋ほか

55 福島復興・再生に向けて—震災後9年を振り返る—
地元と寄り添う福島特別プロジェクトの活動

福島の住民の方々の帰還および帰還した住民の方々の安心を深めるためのコミュニケーション活動を進めてきた長崎大学と環境省の活動と合わせて福島特別プロジェクトの活動を紹介します。福島事故の影響を改めて考える。

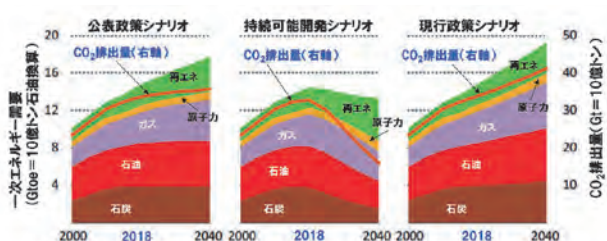
藤田玲子ほか

Short Report

61 IEA「2019年版世界エネルギー見通し」概要

IEAは世界のエネルギーの現状について、温暖化対策等の目標から大きく乖離しているとし、脱炭素化を中心としたエネルギー・システムの抜本的な変革を求めた。

小林雅治



世界のエネルギーとCO₂排出量の見通し

サイエンス

36 電磁ノイズの発生メカニズムの解明と来たるべきノイズレス社会

現代社会は電磁ノイズであふれている。回路設計やコンピュータ設計ではそれを力づくで抑え込み、熱として捨てている。そのメカニズムを理解した上で、ノイズレス社会を実現できないだろうか。

土岐 博

連載講座 よくわかる PRA
—うまくリスクを为了能に (3)

42 外部ハザードについて考えるべきこと

今回は外部ハザードについて、リスク評価におけるハザードの選定や評価として適用されるリスク分析について概説するとともに、一例として火山降灰ハザード評価について示す。

高田 孝, 山野秀将, 成宮祥介

連載講座 核セキュリティ入門 (3)

46 核セキュリティのための核物質検知技術

核セキュリティの向上のために、放射線計測技術を用いた核物質検知技術の研究開発が進められている。このうち今回は京都大学と原子力機構で行われている研究開発について紹介する。

高橋佳之, 小泉光生

理事会だより

64 理事会の活動について

中島 健

- 4 News, 部会等の活動報告
- 60 From Editors
- 65 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 新入会一覧, 2020年度役員紹介, 第53回(2020年度)学会賞受賞候補者推薦募集, 英文論文誌 (Vol.57, No.8) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

科学・技術と社会の接点

巻頭言



©菅野 和彦

日本学士院 第2部第5分科

白川 英樹 (しらかわ・ひでき)

東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。筑波大学第三学群長、内閣府総合科学技術会議議員、日本学士院会員などを歴任。2000年にノーベル化学賞。専門分野は高分子化学、物質科学。

2000年3月に停年退官するまでの34年間、教育・研究活動に専念した。退官を間近に控えた数年間、研究や研究室の整理を続けながら、心の奥底にオリのように溜たまっていた一抹の気がかりと34年間におよんだ研究生生活について反省を覚えることがあった。

一抹の気がかりというのは、中学校の卒業文集『道しるべ』に「世の中で役に立つ安価な新しいプラスチックを合成したい」と書いたことであった。中学生のころの想いは、それまでは知られていなかった導電性高分子の合成という予想外の形で実現した。この作文を書いた1951年わずか3万トン弱だったわが国のプラスチックの生産量は46年後の1997年には1,522万トンに膨れ上がり、その後は1,000万トンを推移している。社会や家庭で使われるようになったおびただしい量の各種プラスチックはダイオキシン公害やマイクロプラスチックによる海洋汚染などの負の側面をあらわにした。「安価に作れるようになったら、社会の人々にどんなに喜ばれる事だろう。日常品のあらゆる方面に利用されるだろう。」と、『道しるべ』に書いたそのプラスチックが公害の元凶としてやり玉に挙げたのである。高分子合成に携わった科学者としてこれらの出来事は青天の霹靂であった。

なぜこのような事態に至ったのかを反省すると、おぼろげながら国民の科学・技術に関する理解度(いわゆる科学技術リテラシー)が十分ではないため、科学・技術に潜む負の部分に科学者・技術者だけでなく社会全体が注目してこなかったことに主因があると考え、この向上が急務であると考えに至った。

大学で行った研究成果は専門分野の学会で忠実に発表・報告をしてきたが、社会に向けた活動はというと成果の一端さえも披露することはなかったという反省に立って、退官後にできることを二つ考えた。一つは小・中・高および大学生など次世代を担う若い世代に自然科学の楽しさを味わい興味を抱くきっかけとなるべく、実験教室の開催である。日本科学未来館での特別実験教室や各地の科学館家博物館での実験教室や講演を続けている。

もう一つは科学・技術と社会の接点を根本から知り考える必要性を痛感し、たまたま新聞のべた記事に掲載されていた日本科学技術ジャーナリスト会議(JASTJ)が主催する科学ジャーナリスト塾の開催に気付いて応募、2003年度開催の第2期と2004年度の第3期に入塾して、科学ジャーナリズムのあり方の一端を学んだ。科学ジャーナリスト塾の目的は科学技術ジャーナリストや科学技術コミュニケーターの養成にあるとはいえ、「どのような科学や技術があり、これらの何をどのように社会に伝えるか」ということを実地に経験・訓練するための講座である。いまさら科学ジャーナリストになる気は毛頭もなく、いわば野次馬的な立場での塾生だったが、科学ジャーナリズムで最も大切なことは「科学者・技術者と一般市民の間を取りもつコミュニケーションで何が重要か」を学ぶことができたことであった。

科学者・技術者は研究・開発等の成果を専門家に伝えることは得意であるが、私自身がそうであったように自分の成果を非専門家や一般市民に伝えることは苦手である。すべての科学者・技術者が科学ジャーナリストや科学コミュニケーターになる必要はないが、せめて中高生に自分の成果をわかりやすく伝えるためにはどうしたらよいかを考えてみてはいかがだろうか。そうすれば次世代の若者は科学・技術をどう使いこなしたらよいかを学ぶことができるようになるだろう。

(2020年6月21日記)



浦賀沖に見える日本のエネルギー問題



金田武司 (かねだ・たけし)

株式会社ユニバーサルエネルギー研究所
代表取締役社長

1990年東京工業大学大学院総合理工学研究科
エネルギー科学専攻博士課程修了(工学博士)。
三菱総合研究所次世代エネルギー推進室長な
どを経て2004年から現職。

専門はエネルギー技術・経済評価、事業モデル
分析、エネルギー・環境政策。

はじめに

エネルギー問題を知りたいと思えば浦賀水道を眺めれば良いと思っている。そこに日本がたどってきた歴史があり、今があり、未来が見える。わたしは正月には観音崎から浦賀水道を眺めることにしている。見えてくるのはひっきりなしに続くLNG(液化天然ガス)タンカーの往来である。思えばここは日本人が初めて石炭動力「黒船」と出会った場所でもある。海を見ながら思いをはせた事を書いてみたい。

●飽きない眺め

東京湾の「首根っこ」浦賀水道。くびれの先端が観音崎。そこには無数の砲台の跡が残る。そこからは対岸の富津が見える。観音崎から少し東京湾に入ると横須賀。米国第七艦隊が鎮座する。そして、眼前の猿島は島全体が要塞であり江戸時代から第2次世界大戦まで重要な役割を果たした。

ここ浦賀水道は1日に500隻の大型船が航行する。これがいかに異常な量であるか考えてみた。世界の貨物船が通過するマラッカ海峡でも1日320隻である。待ち時間がほとんど無い地下鉄丸ノ内線新宿駅の時刻表(荻窪方面)を見てみた。これでも1日300本である。

さて、浦賀水道を航行するタンカーは1日大体120隻。ほとんどがLNGタンカーである。原子力発電がほぼ停止したいま、主な発電用燃料となっているLNG輸入量の約5割がここを通過するらしい。オーストラリアから15日、ペルシャ湾から20日かけ命がけでたどり着いた浦賀水道。お帰りなさい！

●LNGタンカーのからくり

そんなタンカーの往来を眺めていると、改めて「先進国でエネルギーインフラが他国とつながっていない国は日本だけ」なのだと実感できる。到着するこのタンカーだけが日本の生命線である。

宿から海を眺めながら息子と娘に「なんでLNGタンカーばかりなの？」と聞いてみた。「あの中にはマイナス162度に冷やされた液体の天然ガスが入っている」。これがヒントである。長時間貯蔵して気化した分は捨てる

ことになるので、もったいないから必要な時に必要なだけちょこちょこ持ってくる。まるで牛乳や生鮮野菜の様である。

比較的小型のLNGタンカーはひっきりなしに燃料を発電所に運ぶことになる。貯められる量は2週間から最大20日程度である。見ている前でLNGタンカーは富津に向けて舵を取った。

●黒船はなぜ横須賀に来たのか

ところで、なぜ黒船がここに来たかは海を見れば納得である。日本の「首根っこ」だからである。大砲を搭載した巨大な戦艦4隻で開国を迫る「ペリー劇場」。場所として最適である。

「泰平の眠りを覚ます上喜撰たった四杯で夜も眠れず」。はじめて見る戦艦4隻。江戸中が大騒ぎだったという。日本人は石炭が動力源として利用できることを初めて知り、石炭の威力を前に戦っても勝ち目はないことを思い知った。翌年初めての国際条約「日米修好通商条約」が締結された。

●石油の時代

「昭和の時代は石油とともに始まり石油とともに幕を閉じた」と言われる。誰もが考える日本の危機は敗戦と二度にわたるオイルショックだろう。両者ともに石油と深く関わっている。第2次世界大戦で日本が目指したものは東南アジアの石油資源のタンカーによる輸送であった。戦況の悪化とともに浦賀水道に戻ることでできるタンカーは次第に減り、最後のタンカーが撃沈されたとき戦争を遂行する意味は失われた。

浦賀水道にはそんな歴史もあった。エネルギー資源の無い日本にとって生命線はタンカーである。それは今も変わらない。タンカーが無事に浦賀水道を通過する風景は平和の風景でもある。

●オイルショック

戦後、日本は東南アジアから中東へと石油調達先を変えた。オイルショックはその最中に起きた。1973年10月7日は日本人にとって寝耳に水の日となった。原油価格が70%値上がりしたのである。1ヶ月の間に原油価格

は4倍となり、戦後の高度経済成長はこれで終わった。第1次オイルショックである。

オイルショックの頃、東京は暗かったことを覚えている。3.11直後の輪番停電のように東京タワーの照明は消え、新宿の地下街も地下鉄の駅も暗くなった。テレビ局は深夜番組をやめ、ガソリンスタンドはほぼ休業だった。食料もエネルギーもない大消費地東京は特に大きなパニックになった。

●「省エネ」「新エネ」「原子力」

オイルショックで学んだことは何だったか？ まずは、買ってきたものを大事に使う「省エネ」である。それが、エネルギー機器の効率、電気製品の省エネを飛躍的に向上させ、日本の産業技術の基盤となり、転んだ日本はただでは起きなかった。

次に、自給できるエネルギーとして新エネルギーである。日本は新エネルギー開発のパイオニアとなり諸外国が後に続いた。セキュリティはお金に換えられないという経験が新エネルギー開発を加速した。

そして、原子力。原子力発電は自給と見なせる。ウランは海外から買ってくるにしても、原子炉の中で新たな燃料が誕生し、一度装荷すれば3年ほど発電を継続することができる。日本は新たな「カード」を手に入れ、80年代の経済成長を支えた。

●農業が教えてくれる

ところで、農林水産の分野では「食料自給率」という言葉が日本農林規格(JAS法)で定義されている。例えば牛肉。日本で牛を育てただけでは自給にカウントしない。なぜか。牛を育てるためには「飼料」が必須であり、飼料が自給できない限り牛肉を「自給」とは見なさない。

一方で、「食料国産率」という定義もある。これは農林水産品が最後に日本で加工され、日本から市場に出たら国産となる。例えば、ウナギを例に取ればヨーロッパで稚魚が捕獲され、中国で成長し、最後に(例えば)浜名湖で少し養殖されれば国産品となる。しかし、自給率にはカウントされない。

●新エネルギーは自給なのか

さて、オイルショックで自給が期待された新エネルギーの使命はその後どうなったか。例えば太陽光発電。いま国内で販売されてる太陽光発電のモジュールの82%が中国など海外製である(2020年一般財団法人太陽光発電協会)。国内で組み立てれば国産、海外から持ってきたものをそのまま売れば外国製なので、国産を好む国内マーケット向けに組み立てを国内で行うメーカーも多い。しかし、世界市場ではほとんどが中国など海外製であり日本企業の存在感はほとんど無い。

事業を推進するために固定価格買取制度がある。国民から集める巨額な追加負担「賦課金」2.4兆円(2019年)が原資となるが資金は国内メーカーに渡ることは無くほと

んどが海外へと流れる。追加的な負担は2030年には3兆円とされる。新型コロナによる壊滅的な経済危機のなか国内の産業振興に十分な貢献がないのであれば新エネルギー政策は再考に値すると考えている。

●新型コロナが教えてくれた

LNG一本に頼る現在、補給が止ればタンクは2週間から20日で空になる。原油と同様流通过程に大きなリスクが潜んでいることをコロナショックが教えてくれた。最後にそのことを整理しようと思う。

日本が石炭火力を利用することに世界的な批判が集まっているので金融機関の多くは石炭火力に投資しないとしている。また、原子力発電はほとんど停止している。さらに新エネルギーは日本では国民負担によって成立する産業であり国内への経済波及が少なく、日本では産業として自立していない。

このような状況下、新型コロナによる需給バランスの崩壊は大きな経済損失を生んだ。原油取引ではじめて価格がマイナスとなった(4月20日WTIニューヨーク原油先物市場)。お金を払って引き取ってもらおうということである。

原油、LNGは取引のルールとして買ったものは必ず引き取る。しかし、原油を取引している人の一部はタンクを持っていない帳簿上の取引である。需要減でタンクは満杯となり引き取り手を探すまではタンカーは海上をさまよった。

市場価格が暴落したら安く買えるというものではない。最大のユーザーである電力会社は長期間一定の値段で購入する契約をしているためである。余ったら買ってくれる人を探す、見つかったとしても市場が暴落しているのだから逆ざやとなる。

世界的に外食産業が休んでいるので乳製品の行き場が無くなったというニュースが流れた。そして多くの牛が殺処分された。これもまたエネルギー同様、需給の微妙なアンバランスが引き起こした悲劇である。

●浦賀水道の未来

LNGに過度に依存する日本のエネルギーの危うさが新型コロナウイルスで見えてきた。しかし、日本には危機を乗り越えてきた経験と処方箋がある。その度に自給・自立の重要性を再認識しつつわが国は危機を乗り越えた。そんな諸外国に無い歴史を持っている。オイルショックでは世界で最も影響を受けたが「省エネ」「新エネ」「原子力」により経済を復興させ、産業技術の飛躍的向上により製造業の足腰を強くすることに成功した。浦賀水道で見えるものは日本のエネルギーミックスそのものである。航行する船を見ながら自給の意味と子供たちに引き継ぐべき社会を考えなければならない。子供たちの時代、平和な浦賀水道であって欲しいと願っている。

(2020年6月29日記)

コミュニケーションの基本 「私」が「私たち」になるとき

青山学院大学 岸田 一隆

2019年12月に開催された「再処理・リサイクル部会セミナー」における岸田の基調講演の内容を、その時の講演のスタイルとともにまとめた。コミュニケーションの基本構造から解き明かし、伝え方や心構えについて注意を払うことを解説した。大切なのは、コミュニケーションを担う双方の間に共同体意識を生むことであり、共に未来を作り出してゆくという意識を持つことである。そのためには、自らも変わる準備がなくてはならない。

KEYWORDS: *science communication, presentation, ice break, back-casting, nuclear power*

I. はじめに

本稿は、2019年12月10日に開催された「日本原子力学会：第15回再処理・リサイクル部会セミナー」の中で、筆者(岸田)によってなされた基調講演の内容と、そこに込められた意図についてまとめたものです。なお、その日の基調講演のタイトルは本稿のタイトルと同じものでした。

部会セミナーの終了後に行われたアンケートによりますと、基調講演の感想は好意的なものが多かったようです。内容に共感する旨の感想もいただきましたが、特に目立ったのは「わかりやすかった」という感想でした。実は、この「わかりやすさ」は講演の構造にからくりがあります。そこで、本稿では基調講演の内容を記述するだけにとどまらず、講演の構造をそのまま模した形で文章化して、そのからくりを解説することにしましょう。

II. 部会セミナーの基調講演

講演それ自体は4つのパートに分かれていました。「感覚の違い」「コミュニケーション」「変わらない意見」「ひとつのチーム」の4つです。ですが、それだけではありません。これら4つのパートを挟み込むようにして5つの短いブレイクを配置しました。すなわち、【ブレイク1】「感覚の違い」【ブレイク2】「コミュニケーション」【ブレイク3】「変わらない意見」【ブレイク4】「ひとつのチーム」【ブレイク5】というのが全体の構造です。

以降、本稿では各パートについて記述する部分では講

演の内容を要約し、ブレイクについて記述する部分ではブレイクの企画とその意味について解説します。

【ブレイクと解説】

冒頭がいきなりブレイクのスライドです。しかも、昆虫が並べられているだけの図です。ここで、筆者は「これが何に見えますか」という質問を投げかけました。会場から答えはありませんでしたが、さすがに突然だったので無理ありません。答えは「昆虫をミッキーマウスに見えるように並べたもの」でした。やや無理があるかもしれませんが、そう思えば見えなくもない図でした。

これは一見、全く意味のないクイズのように感じた人もいたでしょう。ですが、これはワークショップ等でよく使われる「アイスブレイク」と呼ばれる技法です。

これはあまり学会講演向きではないように思われます。実際、部会セミナーのほとんどの聴衆はとまどっているようでした。ですが、後述するように、ブレイクには大きな意味があります。特に、一般市民とコミュニケーションをとる場合には、何らかの形でブレイクの機能を取り入れるようにしてください。

1. 感覚の違い

コミュニケーションを行う場合、コミュニケーションに参加している人々の間に、基礎知識はもちろんのこと、同じ感覚を有していることを前提としてはいけません。特に、原子力の科学コミュニケーションの場合、原子力を専門とする人たちと一般市民の側との間には大きな感覚の違いがあります。

そもそも、原子力には「圧倒的な負のイメージ」が纏わりついています。核兵器のイメージに始まり、原発事故

や高レベル放射性廃棄物に至るまで、印象を悪くする材料には事欠きません。これは原子力分野に携わる側の人々も認識していることではないでしょうか。

そうは言うものの、原子力エネルギーはこれからの人類に必要な不可欠であり、多くのプラスの側面がマイナス面を凌駕する。そのように思っている原子力関係者も多いでしょう。ですが、少なくない国民がそうは思いません。福島第一原発事故、増え続ける汚染水、関西電力の原子力発電所にまつわる不透明な金銭の流れなどを経て、すでに原子力は時代遅れで不要なものだと考えています。原子力の是非を論じること自体が過去のものであり、今さら議論やコミュニケーションの必要性など感じられません。

こうした事態を改善するためには、科学的な事実を積み上げて真摯に説明するのが最善の道だとも思いません。それは大切なことですが、それだけでは不十分です。それどころか、最も大切なことが欠けています。それは「人間に対する信用」です。たとえば、iPS細胞の研究でノーベル生理学・医学賞を受賞した山中伸弥教授を例にとってみましょう。iPS細胞の研究が再生医療に役立つという側面も大切ですが、人々はそれ以上に山中伸弥教授の人となりを信頼しているのです。元ラグビー選手の故・平尾誠二氏との友情、研究支援呼びかけのためのマラソン出場、新型コロナウイルスに関する熱心な情報発信。こうしたことが山中教授への信頼を醸成しています。コミュニケーションにおいては、正しいデータや知識や事実を伝えれば済むわけではなく、互いの信頼感が必要不可欠なのです。原子力の技術以上に、原子力に関わる人間が信用できないと言われてしまうと、そこから先のコミュニケーションが成立しにくいのです。

さらに、一般市民、特に若者たちとの間に大きな感覚の違いが感じられるのが「時間スケール」です。たとえば、第5次エネルギー基本計画には、今後の近未来の計画に加えて、2030年や2050年という未来を見据えた記述がなされています。私にはその部分の内容が、現在の延長線上に発想した変化のないものにしか感じられませんでした。私が日常接している大学生の半数は21世紀生まれです。彼らにとって、2045年は人工知能の知性が人間を超える「シンギュラリティ」の年です。エネルギー技術も何もかも、全く変貌を遂げていて当然だと思っています。彼らからしてみれば、エネルギー基本計画に書かれた2050年の未来は、「スーパーコンピューターを『蒸気機関で造られた巨大な建造物』として発想している前世紀の滑稽な夢想」としか感じられないでしょう。どちらが描く未来が正しいか、という問題ではありません。それぐらい大きな感覚の違いがあるということです。

【ブレイクと解説】

次のブレイクで示したのは、自動車保険のCMの画像でした。対面式で顧客と契約を結ぶタイプの保険ではなく、電話オペレーターと顧客との相談(もしくはネット経由)で契約を結ぶタイプのもののようです。画像は電話オペレーターが映っていましたが、問題はそこではありません。映像の隅に添えられた文字が問題でした。

その文字の連なりは小さ過ぎて読めないのです。CMでは「その場合でしたら保険料はこの価格になります」とオペレーターが説明していましたが、実際にはさまざまな例外や複雑な条件があるはずで、それを表示しなければ虚偽広告になってしまうのでしょうか。必要な情報量が多く、必然的に小さな字になっているのです。しかしながら、たとえそうだとすると、読めない文章に何の意味があるのでしょうか。

実は、会議やセミナーなどのプレゼンで示されるスライドの中には、自動車保険のCMと大差ないものが少なくありません。さすがに読めないほどの小さな文字であることはまれにしかありませんが、読むのに努力を要するスライドはかなりの数あります。そして、読み終わる前に、次のページへ変わってしまいます。

私のスライドはそれとは対極で、ページの表題以外はほとんど画像のみです。部会セミナーの担当者から「もらったスライドからは、どんな話をするか見当がつかない」と言われました。それでよいのです。スライドはあくまでも材料です。その材料を元に、講演者が聴衆とコミュニケーションするのです。細かいデータや資料は、別途配布すれば事足ります。そして、最小限にまで削ったスライド上の文章は「読ませるもの」ではなく「見せるもの」であることを意識すべきでしょう。

人は人の心とコミュニケーションしたいのです。聴衆に相対しているのはスライドではなく、講演者自身です。人間に対する信用を育む上でも、スライドには気をつけてください。くれぐれも、自動車保険のCMにはなりませんように。

2. コミュニケーション

まず、コミュニケーションの基本形がどのような構造になっているかを考えてみることにしましょう。コミュニケーションの登場人物には「送り手」と「受け手」がいて、双方向に情報交換がなされるというのが基本構造だと考えられます。しかし、もう少しきちんと分析すると、以下のようになっています。

- (1) A → B
- (2) A B 理解・共感
- (3) A B' 内面の変化
- (4) A ← B'

最初の送り手を「A」とすると、「A」から「B」へ「何か」が伝わります。「何か」というのは情報だとも思えるかもしれ

ませんが、後述するように、狭い意味での情報だけではありません。次に、「B」はその「何か」に対して理解、または共感をします。さらに、「B」は伝わった「何か」のために内面が変化して、「B」という存在に変わります。最後に、「B」は受け手から送り手になり、別の「何か」を返します。

この4つの過程のうち、第2段階と第3段階が「受け手の学習過程」です。コミュニケーションにおいて決定的に大事なのが、この「受け手の学習過程」です。もし、いかなるメッセージに対しても、それが理解も共感もされなかったら、コミュニケーションは成立しません。また、たとえ理解されたとしても、それによって受け手に何の変化も生じないのであれば、やはりコミュニケーションは成立しません。コミュニケーションの成否を握っているのは受け手なのです。

送り手にできることは第1段階のみです。すると、送り手はコミュニケーションに対して何もできないかというと、そうではありません。受け手の学習過程を機能させるために、伝えるべき「何か」の「伝え方」に十分に気を配る必要があるのです。そして、そのために、受け手についてよく考えて理解することが必要です。さらに、伝わっている「何か」の中身についても考えなくてはなりません。

コミュニケーションには2つの機能があります。「情報伝達のコミュニケーション」と「共感・共有のコミュニケーション」です。これら2つの機能では、伝わっている「何か」が違います。情報伝達のコミュニケーションが伝えているのは「情報・知識・データベース化可能なもの」です。一方、共感・共有のコミュニケーションが伝えているのは「感情・感覚・倫理・価値観・規範」です。前者と後者では処理する脳の部位も違います。言語化できるメッセージは、あくまで前者のみです。

これら2つの機能はどちらも大切なものです。しかしながら、専門家が正確な情報や科学的知識やエビデンスを駆使して説明しようとしている時、前者の機能のみに注意を払っている状態になっています。では、後者の機能を働かせるにはどうすればよいのでしょうか。

共感・共有のコミュニケーションを成り立たせるためには、受け手の感覚にもアピールしなくてはなりません。大きな感覚の違いを理解した上で、送り手は受け手に対して、情報だけでなくニュアンスを伝えなくてはなりません。太陽光発電と火力発電の生み出せるエネルギー密度の違いを示すには、数値や簡便な図だけでは不十分で、メガソーラーの大海原のような風景を一緒に見せた方が遥かに効果的です。日本と北欧を単純に比較してはいけないのは、その人口が桁で違うからですが、そのスライドに北欧の風景を添えておくと、より印象に残ります。リスクの大小について論じる時には「損失余命」という量を示すことで、聴衆は自分の人生の長さの長短

として納得することができます。

ですが、それ以上に大切なのは、共感・共有のコミュニケーションの本質が「全人格コミュニケーション」であるということです。人間の脳の特性のひとつは共感力の強さです。それゆえ、人は人の心とコミュニケーションしたがるのです。人間がそこに存在することが重要なのです。その意味で、科学コミュニケーションでは「科学」以上に「科学者」を知ってもらうことが大事です。

【ブレイクと解説】

TED という団体をご存知でしょうか。世界的な講演会を主催している非営利団体で、著名人も多数講演しています。このブレイクで示したのはマイクロソフトの創業者、ビル・ゲイツ氏の TED での講演会の様子です。

大切なのは講演の中身ではありません。ビル・ゲイツ氏の立っている位置と彼の身体や顔の向きです。彼はスライドを背景に従え、その前方に立ち、聴衆に向かって話しかけています。これが大切なのです。スライドはあくまでも単なる材料です。本当にやらなくてはいけないことは、講演者と聴衆の、つまり、人と人とのコミュニケーションです。

こうしたことは、学術的な講演であっても気をつけるべきことだと筆者は思っていますが、一般市民との交流のように、共感・共有のコミュニケーションが必要な場面では決定的に重要なことです。講演者が聴衆に背を向けて、たくさんの細かい文字が書かれたスライドを読みながら講演したならば、それは完全に負けだと肝に銘じておいてください。

3. 変わらない意見

情報伝達のコミュニケーションと共感・共有のコミュニケーションを駆使して、受け手の理解や共感を得ることができたとします。これで、受け手の学習過程の最初の段階は無事に終了しました。次の学習過程は受け手の内面の変化です。

一般に、「伝えるべき中身」と「その伝え方」に十分気を配り、受け手が理解や共感という学習を機能させたならば、内面の変化は自然に生じるものです。ところが、ここでコミュニケーションにおける最大の障害が現れることがあります。それは、「コミュニケーションによって意見を変えるつもりがない登場人物」の存在です。コミュニケーションによって内面が変わることがない、すなわち、コミュニケーション以前に結論が決まっていた、それを一切変えるつもりがないのであれば、そもそも、コミュニケーションに何の意味があるでしょう。

このような状況は原子力の科学コミュニケーションにも見られます。原子力の科学コミュニケーションでは、ともすれば「事業者による説明会」と「反対派による反対集会」に二極化する傾向があり、互いに意見が交わりま

せん。また、米国における根強い非科学の存在でも、科学コミュニケーションは同様の問題に直面しています。「進化論を否定する創造論」「地球平面論」「温暖化懐疑論」などさまざまな非科学が米国には存在していますが、それらを信じている人たちはコミュニケーションによって自分の意見を変えるつもりはありません。

米国の非科学を分析した研究によりますと、科学に対する態度はその人の政治信条に大きく影響されています。米国の保守派とされる人々(共和党支持者を中心としたグループ)は、1990年以降、科学への不信感を強く募らせているそうです。彼らに対して科学的知識の普及は何の力にもなりません。それどころか、教育が進めば進むほど理論武装が進み、意見は変わらないまま頑なになっていきます。

このように、コミュニケーションの当事者が自分の結論を変えるつもりがない状況で、どのようなやり方が考えられるかを大学生たちに考えてもらったことがありました。中でも筆者が感心した意見は「結論の戦いは一度棚上げして、理由の出し合いを行う」というものでした。互いに結論を変えるつもりがない状態では、結論を戦わせる議論は不毛に終わります。そこで、理由や根拠を「結論から離れて列挙」し、それぞれについて精査するというのです。場合によっては、そうした「理由や根拠」を解決するために、「全く新しい代替案」が出てくる可能性もあるでしょう。これができれば、しめたものです。

この代替案は互いがひとつのチームとなって精査して生まれたものです。当初、自らの意見を変えるつもりがなかったはずの人々が、内面を変化させることによって、練り上げたものです。その代替案ができあがった時点で、ある程度のコンセンサスも形成されています。

地球温暖化をめぐる環境問題について、米国大統領のドナルド・トランプ氏とスウェーデンの環境活動家のグレタ・トゥンベリ氏は反対の立場をとっています。ですが意外なことに、この二人のコミュニケーションのスタイルは似通っています。どちらも相手の陣営を敵とみなして非難するというスタイルです。共同体を意図的に分裂させ、敵と支持者を明確化して戦うやり方です。このやり方では、相手の内面を変化させることは不可能です。不毛な罵り合いだけが続いていきます。

豊かなコミュニケーションを成立させようと思うならば、ひとつのチームとして同じ問題に立ち向かわなくてはいけません。「私」が「私たち」にならなくてはいけないのです。そして、自らに「変わる準備があるか」と自問することが大切です。

【ブレイクと解説】

このブレイクで示したスライドは、日本人なら誰でもわかるスライドでした。ラグビーの日本代表がワールドカップのスコットランド戦に勝利して、決勝トーナメン

ト進出を決めたときの喜びの集合写真です。

このスライドを見せながら、「彼らはどういう人たちですか」と日本人の聴衆に質問すると、10人に尋ねれば10人全員が「ラグビーの日本代表です」と答えます。さて、これは当たり前のことでしょうか。

たとえば、同じスライドを1980年代、もしくは1990年代の日本人に見せたら、どう答えるでしょうか。おそらく、「日本代表」という答えは少ないのではないのでしょうか。「世界選抜の混成チームですか」という質問が返ってくるかもしれません。なぜなら、少なくない数の選手の風貌が日本人に見えませんが、実際に日本国籍ではない人たちもたくさんいるからです。

ラグビーの代表資格を得るのには、国籍以外の要素を満たすことで可能のため、このようなメンバー構成が生まれています。現代の日本人の多くは、このラグビー独特のルールを知っているということもあります。ですが、そんなルールよりも、彼らを「自分たちの仲間」として意識していることが大きいと思います。日本人にとって、マイケル・リーチ選手は日本の頼れるキャプテンなのです。だから、私たちは彼らを何の躊躇もなく「日本代表」と呼べるのです。

私たちがひとつのチームとなるのに必要なのは、「共同体意識の形成」だけです。これさえあれば、血縁も地縁も国籍も必要ありません。

4. ひとつのチーム

第二次世界大戦後、民主主義国家として生まれ変わった日本ですが、75年を経過した今でも、民主主義は本当の意味では根付いていないという意見を耳にします。というのも、誰もが「自分の意見」を自由に出すことまではできていますが、「自分の参画」が不十分だということです。自分の国の行方を誰かに任せるのではなく、自分自身で考えなくてはいけないということです。

国民がそのような気持ちになれないのは、自分たちでは国を変えられないという失望感のためです。中央省庁の官僚や有識者会議のメンバーや内閣閣僚たちが政策を決め、国民はそれに従うだけという図式です。こうした図式が、国民から当事者意識を奪い、政治に対する無関心を助長させています。

いきなり、一般の人々に対して、世の中の行方を左右する政策を自分で考えろと言っても、戸惑ってしまうだけでしょう。ですが実は、もっと気楽に考えてよいのです。筆者は、一般市民との対話の場において、ワークショップ形式で「どんな未来でも自由に想像してみてください」と問いかけることにしています。さらに、「それらは科学技術で実現することができます」と語ります。

藤子・F・不二雄による「ドラえもん」の原作は1970年に生まれました。不可能なことを可能にする夢のような道具がたくさん出てきました。実は、それらの多くは現

代では実現されているのです。たとえば、「タケコブター」という空を飛ぶ装置ですが、「一人乗りドローン」のようなものが同じ機能を担えます。「翻訳コンニャク」は「自動翻訳機」です。「立体コピー紙」は「3D プリンター」です。「糸なし糸電話」の役割は、「スマートフォン」が想像を遥かに凌駕した形で実現しています。

科学技術は「望む未来」を現実化する力があるのです。ですが、「望む未来」そのものを発想しているのは科学技術者ではありません。科学技術者が考える未来は、往々にして現在の科学技術の延長線上です。このような未来予測を「フォアキャスティング」といいます。フォアキャスティングでは、驚くようなイノベーションは生まれません。それに、科学技術者だけが未来を考えるのでは、一般の人に参画する余地がありません。

そのようなやり方ではなくて、「あるべき未来」「望ましい未来」を最初に発想するのです。これは、一般の人々にもできることです。そして、そんな未来から現在に向かって過去方向に道筋を見極め、中間目標を明確にします。このやり方を「バックキャスティング」といいます。バックキャスティングこそが、社会課題を解決し、すばらしいイノベーションを生み出します。実現の方は科学技術が果たします。このやり方であれば、未来は自分たちで作れます。人々の間に当事者意識が生まれます。

ただし、世の中の行方を左右するわけですから、多くのことを学び、深く考えなくてはなりません。一般の人々たちにとって、そんなことが可能でしょうか。

これも心配するにあたりません。当事者意識が芽生えれば、人は指図されなくとも、自発的に勉強し始めるからです。たとえば、子育てです。どの母親も初めての子どもに対しては全てが未経験のことです。ですが、必死になって学び、なんとかやり遂げます。小児医学や脳科学や発達心理学や教育学やスポーツ指導などのプロでもないのに、あらゆることに気を配り、育て上げます。なぜなら、子育ては人任せにできない「自分ごと」だからです。子育て全体に対する責任感に導かれ、親たちはごく自然にあらゆることを学んでいきます。

共感・共有のコミュニケーションの最終目的は、双方が「自分ごとである」という当事者意識を持つことです。そして、ラグビー日本代表のように「ワンチーム」、すなわち運命共同体として世の中の未来に責任を持つことです。共同体意識の形成こそが全ての鍵です。

さて、むしろ専門家の側にそれだけの覚悟があるのでしょうか。コミュニケーションをしようとしている聴衆

を運命共同体だとみなしているのでしょうか。相手の人生とともに生きるぐらいの責任感があるのでしょうか。未来と一緒に作るという気構えがあるのでしょうか。

エネルギー政策という大きな話題であったとしても、策定・遂行する側の内面に変化の余地が一切ないのだとすれば、コミュニケーションはそもそも成立しません。そのことをしっかりと心に留めておいてください。

【ブレイクと解説】

最後のブレイクでは、なぜ今回の講演に「ブレイク」を入れたのか、その理由を明らかにしました。理由の第一は、聴衆の集中のためです。人間の集中力の持続時間は14分程度だと言われています。そこで、14分程度で1回のブレイクを入れるようにしました。理由の第二は、共感・共有のコミュニケーションのためです。アイスブレイクのような、一見、意味のないような企画でも、それによって聴衆の緊張がほぐれます。また、ラグビー日本代表のスライドを見せたシーンでは、講演者と聴衆の間に何か共通の感情が芽生えたことでしょう。こうして「ひとつのチーム」の種が生まれます。

このようなブレイクの効果を過小評価せずに、積極的に取り入れてみてください。

Ⅲ. 後日談

ブレイクをわざとらしく挿入しなくても、その機能を盛り込むことは十分に可能です。

2020年2月25日に筆者の大学の学生グループは、日本原燃株式会社の増田尚宏社長を招いて講演してもらいました。増田氏は講演の冒頭で、「これらの写真はなんだと思いますか」というクイズを出しました。これは、世間のネットリテラシーについての話題に関連したもので、「Fukushima nuclear accident」で検索をかけても、福島原発事故とは違う画像がたくさん検索に引っかかるということを示したものでした。私はこれを見て「うまいアイスブレイクだ」と感じました。

増田氏の講演には、他にも多数の感心するポイントがあったのですが、ここでは割愛します。

著者紹介

岸田一隆（きしだ・いっただ）

青山学院大学

（専門分野/関心分野）科学コミュニケーション、文明論、原子核物理学



福島県教育委員会の放射線教育の取り組み

福島県立本宮高等学校

(前 福島県教育庁義務教育課)

阿部 洋己

東日本大震災により発生した福島第一原子力発電所の事故以降、福島県では子どもたちの健康や生活に対する放射線の影響を、現在および将来において最小限に食い止めることが極めて重要な課題となっていた。これまでの学校教育では、放射線に関する教育が十分に実施されていなかった。そのために、福島県教育委員会として取り組んだ放射線教育や防災教育についての具体的な内容や、福島県内の小学校・中学校で実践されている放射線教育の実施教科について紹介する。今後も、子どもたちの新たな夢や希望の実現のために、福島発の放射線教育を創造し、推進していきたい。

KEYWORDS: *Radiation Education, Prefecture Education Bure*

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(以下 1F とする)の事故の影響により臨時休業となった福島県内の市町村立学校数は、平成 23 年 4 月 16 日時点で小学校 30 校、中学校 15 校、平成 23 年 9 月 1 日時点で小学校 10 校、中学校 6 校、平成 24 年 4 月 1 日時点で小学校 8 校、中学校 4 校であった。被災した児童生徒の本県における他校での受入れ状況(国公私立)は、平成 23 年 5 月 1 日時点で、小学校 2,891 人、中学校 1,607 人、平成 23 年 9 月 1 日時点で、小学校 3,113 人、中学校 1,605 人、平成 24 年 5 月 1 日時点で、小学校 2,865 人、中学校 1,507 人であった。他都道府県での受入れ状況(国公私立)は、平成 23 年 5 月 1 日時点で、小学校 5,785 人、中学校 2,014 人、平成 23 年 9 月 1 日時点で、小学校 6,577 人、中学校 1,991 人、平成 24 年 5 月 1 日時点で、小学校 6,693 人、中学校 2,120 人である。また、1F の事故に由来する放射線の問題は児童生徒の屋外活動にも影響を与えていた。学校においては、屋外での活動を制限するとともに、運動会等の学校行事を中止または延期したり、プールでの活動を中止したりするところが増え、児童生徒にとっては伸び伸び活動できないことや夏の暑さに対するストレス、放射能に対する不安や緊張など健康に悪影響を及ぼす状況もあった。

II. 福島県教育委員会における放射線教育と防災教育の取組

1. 喫緊の課題への対応に向けた放射線教育

東日本大震災により発生した 1F の事故以降、福島県

では、子どもたちの健康や生活に対する放射線の影響を、現在および将来において最小限に食い止めることが極めて重要な課題となっていた。これまでの学校教育では、放射線に関する教育が十分に実施されていなかった。このため、多くの人々にとって、放射線等に関しての知識はあまり持ち得ていない状況であった。空間線量率の単位や、放射線、放射性物質、放射能等の基本的な用語ですら、教育関係者もほとんど知識を持たない状態からのスタートとなった。各学校では、校舎内や校庭等の空間線量率の測定や、それらに基づいての子どもたちの屋外活動の制限などを手探りで進めていた。

そのような中、放射線に起因する喫緊の重要な課題解決に向けて、指導の拠り所となる指導資料の早期の作成や、それらを元にした教員研修の実施に向けての取組がスタートした。「放射線等に関する指導資料」は、平成 23 年 11 月発行の第 1 版、平成 24 年 8 月発行の第 2 版、平成 26 年 3 月発行の第 3 版、平成 27 年 3 月の第 4 版、平成 28 年 3 月の第 5 版が作成された。

平成 25 年度～28 年度は、「放射線教育推進支援事業」により本県の放射線教育を推進した。その主な内容は、次の(1)～(4)の内容である。

(1)実践協力校による授業実践例の開発

(2)研修会・協議会等の開催

・指導者養成研修会(年 1 回開催)

・地区別研究協議会(教育事務所毎に年 1 回開催、各校 1 名参加)

(3)運営協議会の開催(年 6 回開催)

(放射線教育の方向性等を協議、実践協力校の情報共有、他)

(4)研修会や授業実践で使用する教材等の整備

特に、(4)の教材として、動画教材である「放射線教育用学習教材」を DVD として配付し、導入時等に使用で

Radiation Education of Fukushima Prefecture Education Bure : Hiroki Abe.

(2020 年 4 月 28 日 受理)

きるようにしている。

2. 「生き抜く力」を育む防災教育の推進

防災教育については、震災以前から各学校に対し防災マニュアル作成等の災害時への備えをするよう働きかけ、それぞれの学校でも地域の実情や児童生徒の実態に合わせた防災マニュアルの自校化や避難訓練の実施等を行っていた。今回の震災では、停電による放送設備の使用不能、想定を大きく超える津波からの避難等、普段の訓練を大きく超える状況下での避難を強いられる学校が多かった。また、情報通信手段も絶たれてしまった状況下においては、それぞれの現場で即座に判断して対応する事の重要性が強く感じられ、教師や児童生徒に自ら考え、自ら判断し、自ら行動する能力を育成するための防災教育へのレベルアップが急務となってきた。

そこで、平成 25 年度は「防災学習推進支援事業」を実施した。その内容としては、指導資料の作成と、研修の機会の設定である。指導資料は、防災教育の学習内容を教育課程に位置づけ、教科指導等における学習を推進するための指針や例示を目的としたものである。研修は、新たな防災教育の指導について、各校の防災教育等の担当者の啓発を目的とした。

なお、指導資料の作成については、平成 25 年 3 月に文部科学省が発行した「生きる力を育む防災教育の展開」を参考に、当時上越教育大学教授の藤岡達也先生に執筆と監修をお願いし、教育事務所や教育センター等の担当者が作成委員として担当し、作成にあたった。

平成 26 年度～平成 28 年度の『「生き抜く力」を育む防災教育推進事業』は、前述の「防災学習推進支援事業」を継続するものである。放射線教育推進支援事業との連携を強化し、防災教育指導資料の活用をはかるための研修会の実施や、具体的な実践について先進的な取り組みを広く紹介するための実践協力校の指定、家庭や保護者への啓発と児童生徒の防災意識の高揚を目的とした防災個人カードの作成と配付等、防災教育の一層の充実をねらい展開した。その主な内容は、次の(1)～(4)の内容である。

- (1) 実践協力校による研究授業等の実践
- (2) 運営協議会の開催(5 回開催)
- (3) 地区別研究協議会の開催(7 教育事務所毎)
- (4) 防災個人カード、指導資料の作成と配付

3. 放射線教育の実施教科

東日本大震災後の平成 24 年度より、福島県内の公立小学校・中学校を対象とした放射線教育の実施状況調査を行ってきた。平成 30 年度の調査結果では、主な実施教科については、以下のようになっている。

<小学校>

学級活動 70 %，総合的な学習の時間 18 %，
理科 3 %，生活 3 %

<中学校>

学級活動 32 %，理科 31 %，
総合的な学習の時間 15 %，社会 5 %，
保健体育 5 %，技術・家庭 3 %

小学校の実施教科は、調査開始から 7 年間、大きな変化は見られず、学級活動と総合的な学習の時間で約 9 割を占めている。中学校は、学習指導要領の理科に放射線についての学習が明記されているので、当初から多かったが、社会、保健体育、技術・家庭など幅広い教科での実践に広がっている。

学級活動の安全教育を中心に平成 24 年度から福島県内の小学校や中学校でスタートした放射線教育であるが、今後はより多くの教科で、さまざまな場面を捉えて幅広く実践されることが望ましいと考えている。

Ⅲ. おわりに

平成 29 年度以降、放射線教育と防災教育を一本化した事業、「地域と共に創る放射線・防災教育推進事業」として継続して取り組んでいる。本事業は、復興・創生期間である令和 2 年度まで継続されることになっている。令和 2 年 3 月現在、避難先で教育活動が未だに継続して行われている学校がある本県は、教育界においてもまだ復興の道半の状況にある。また、震災後の 1F の廃炉作業等に今後長期間かかることが予定されている。そこで行われている国や民間の総力をあげた体制で進められている作業に注視しながら、子どもたちの新たな夢や希望の実現のために、福島発の放射線教育を創造し、推進していきたい。

－ 参考文献 －

- 1) 福島県教育庁義務教育課 放射線教育・防災教育関連情報について
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/edu/gimukyoiku29.html>
- 2) 東日本大震災の記録と復興への歩み(平成 25 年、福島県)。

著者紹介



阿部洋己(あべ・ひろき)

福島県立本宮高等学校
(専門分野/関心分野) 理科教育・情報教育・放射線教育/安全教育・道徳教育

探究的に学び、未来を切り拓くコミュタン福島の放射線教育

福島県環境創造センター交流棟 佐々木 清

甚大な被害を与えた福島第一原子力発電所事故から早9年半。福島県内の空間線量率は、除染作業と放射線の減衰によって減少するとともに、苦難を乗り越え復興に向けた取り組みが具体的に前進している。福島県環境創造センター交流棟(愛称:コミュタン福島)は、「対話」と「共創」を基本に据え、福島県の「今」を伝える展示室と探究的な体験研修を通して、正しく放射線を理解させ、福島を知り、創り、発信する使命を持っている。そこで、これまで企画・運営してきた探究的な学びの実際と、放射線も含めた子どもたちの未来を切り拓く「学びの連続性」の取り組みを紹介させていただく。

KEYWORDS: Radiation Education, Commutan Fukushima, Future, Inquiry Learning

I. はじめに

福島県環境創造センター交流棟(コミュタン福島)は、開館して5年目を迎えた。これまで、放射線に関する正確な理解を促進し、福島県の現状を伝えることを目的とした展示室とともに、探究的な体験研修を備えた施設として、多くの学校団体等の見学・視察を受け入れてきた。また、イベント等を開催するとともに、アウトリーチ活動等により福島県内外でPR活動を重ねてきた結果、今年4月までに34万人もの来館者を迎えることができた。

II. 探究的に学ぶ放射線教育

1. 5+1のコミュタン福島展示室エリア

コミュタン福島の展示室は、図1のように5つのエリ



図1 展示室エリアの紹介図

アが設けられており、今年になって6つ目となる「触れる地球」のエリアが増えた。

2. 4つの「放射線」領域体験研修

現在「放射線領域」の体験研修は、以下の3つを提供している。今年度は、これに4つ目が加わった。

- (1)身の回りの物の放射線を測定してみよう。
- (2)霧箱で放射線の飛跡を観察しよう。
- (3) α 線・ β 線・ γ 線を遮へいする物を探ろう。
- (4)放射線(γ 線)から身を守る方法を実験で確かめよう。

開館当初から、指導者による一方的な説明による実験を避け、あくまでも児童生徒による探究的な体験研修を行ってきた。まず、予想を立て、その理由を考えてから実験や測定を行ってきた。次に、データを比較し、なぜそのような結果になったか児童生徒間で対話させながらできるだけ自ら課題解決を図れるように支援するなど、児童生徒の主体的な「探究の過程」を大切にしてきた。これにより、児童生徒は、放射線に興味・関心を抱き、探究意欲を高め、真剣に放射線について学んできた。

ここで、生徒の主体性を活かし、探究的に進める中学校「放射線測定」の実際(図2)について紹介する。

3. 面白い放射線 Science Table, Craft, Show

気兼ねなく来館者に放射線を学んでもらおうと、以下の学習材を開発してきた。

(1) Science Table :

- ①ペットボトルで簡易霧箱を作ろう。
- ②放射線探索ゲームで放射性物質を探そう。

Radiation Education at "Commutan Fukushima" - Unlocking the Future through Inquiry Learning : Kiyoshi Sasaki.

(2020年4月30日 受理)



※「減塩」とは、食塩相当量の半分をカリウムに置き換えてつくった塩

図2 中学校体験研修「放射線測定」の実際

(2) Commutan Craft :

- ①放射線モデルストラップを作ろう。
- ②X線装置でレントゲン写真を撮ろう。

(3) Science Show : 放射線ってなあに？ Part1

4. 教職員向け放射線教育研修の実施

福島第一原子力発電所事故の概要と基本的な放射線について学ぶことができるコミュタン福島では、今年度より毎年約300名の栃木県連合教育会教職員の方々を迎え、放射線教育と防災教育の教職員研修会を開催している。

Ⅲ. 未来を切り拓く放射線教育

1. 福島県環境創造センター3機関合同放射線出前授業

福島県環境創造センターは、コミュタン福島(交流棟)に本館と研究棟が併設されている。そこで、日本原子力研究開発機構(JAEA)と国立環境研究所(NIES)とコミュタン福島の3機関が合同で、郡山市立郡山第六中学校へ出向き、放射線出前授業を実施している。昨年度1年生は、学級ごとに本館とコミュタン福島スタッフによる放射線測定の実験を行った。2年生は、学年全体でJAEA職員による原子力発電所についての講話を聞いた。3年生は、学年全体でNIES職員による放射線動態の講話を聞いた。それぞれ福島県の放射線に関する課題を取り上げ、未来に向け放射線の課題の解決に向けた情報を専門家から学ぶ機会を設けることができた。

2. コミュタン福島の施設を活用した個別課題放射線学習の支援活動

コミュタン福島の近くに、富岡町から避難してきた児童生徒が在籍する小・中学校三春校がある。生徒一人一人が抱えている放射線の不安や悩み等を解決するため、コミュタン福島の施設を活用した個別課題研究を進めて

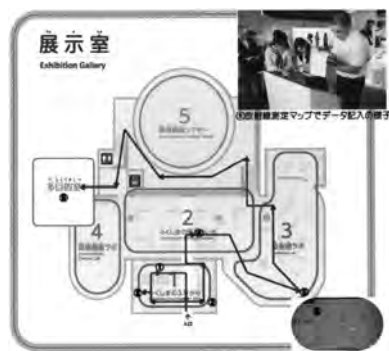


図3 学びのマップ例

いる。来館する前に「学びのマップ」(図3)を基に、課題解決に向けての情報源の位置を確かめ、効率的な動線を話し合いながら個人毎に指導した。来館後生徒たちは、収集した情報を整理し、とても分かりやすい個人レポートをまとめて発表し、情報を共有した。

3. 小・中・高放射線「学びの連続性」をめざす人材育成

夏休みを中心に理科自由研究を行う小学生が多い。そこで、理科自由研究相談会を開催して研究テーマの作成や観察実験方法などの相談に応じている。また、観察記録や実験データのまとめ方や考察の仕方を助言している。さらに、完成した理科研究作品をB1版方眼紙にまとめ、口頭発表を含めたポスターセッションを実施するなど、児童の科学的な表現力を向上させている。

また、中学生になると、放課後部活動等で時間が費やされ、残念ながら小学校の理科自由研究で培った「科学の芽」が途絶えてしまう場合が多い。そこで今年から部活動は、土曜か日曜日のいずれかが休部となるので、この時間を活用してコミュタン福島では、放射線など小・中・高校で身に付けた学びを連続的に結びつけるような「学びの連続性」(図4)を構想し、「サイエンスアカデミア」や「サイエンスコミュニケーター養成講座」を開設し、未来を切り拓く子どもたちのための学習する機会を設け、積極的に情報を発信している。

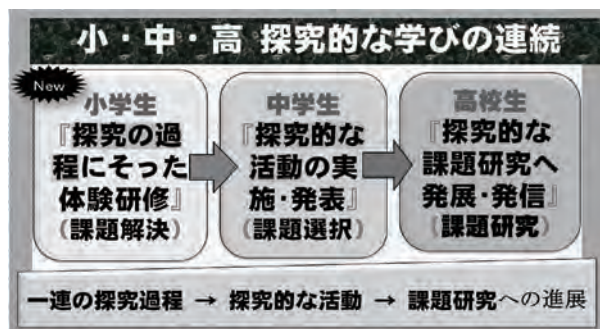


図4 小・中・高「放射線の学び」の連続性

IV. おわりに

放射線や環境について更なる知識の普及をめざし、今年度から来館者の年齢層や知識の習熟度に応じた展示案内プログラムを作成している。皆さまのご来館を心よりお待ちしておりますとともに、ご意見を賜りたい。

なお、コミュタン福島の詳細については、右に掲示したQRコードの情報を閲覧してほしい。



－ 参考文献 －

- 1) 佐々木 清, 「福島に学ぶ, 未来を切り拓くコミュタン福島の放射線教育」放射線教育フォーラム ニュースレター NL-75 p.14(2019).

著者紹介



佐々木清 (ささき・きよし)
福島県環境創造センター
(専門分野)理科教育
(研究分野)環境教育・放射線教育



書籍販売のご案内

■『放射線遮蔽ハンドブック—基礎編—』

一般社団法人日本原子力学会 「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会編
A4判 370 ページ, CD-ROM 付, ISBN978-4-89047-161-4, 定価 5,500 円(税込)

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

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

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

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

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

■『放射線遮蔽ハンドブック—応用編—』

一般社団法人日本原子力学会 「遮蔽計算の応用技術」研究専門委員会編
A4判 420 ページ, CD-ROM 付, ISBN978-4-89047-173-7, 定価 5,500 円(税込)

「遮蔽計算の応用技術」研究専門委員会では、4 年の歳月をかけて「放射線遮蔽ハンドブック—基礎編—」の続編出版にこぎつけました。内容は以下の通りです。

1 章「概要」、2 章「設計手順および計算の選択ならびに注意点」、3 章「高度な計算手法」、4 章「ベンチマーク実験と解析」、5 章「原子力施設の遮蔽設計例」、6 章「RI、加速器施設の遮蔽設計例」、7 章「施設の放射化」、付録 1～5 には各種データ、コード利用のための検証問題集などを収録しています。

ご購入は日本原子力学会ホームページより注文書をダウンロードのうえお申し込みください

<http://aesj.net/hp/>



放射線教育の広がり と 継続性 への課題

福島大学 山口 克彦

福島県では2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故以降、義務教育課程から高等教育に至る各校種において積極的に放射線教育が進められてきた。その内容は単に放射線の物理的な側面に留まらず、地域の実情に合わせた幅広いものとなっている。一方で、事故から9年が経過し、今後の学校教育の中でいかに放射線教育を継続的に行っていくべきかが近年の課題として浮上している。これまで福島県で培ってきた放射線教育を維持し、また全国的に広げるための方法として、既存の学校カリキュラムに無理なく挿入できる放射線教育を構築する必要があると考えている。

KEYWORDS: *Radiation Education, School Curriculum*

I. 序論

2011年の東京電力福島第一原子力発電所(1F)事故を契機として、福島県では福島県教育委員会を中心として積極的な放射線教育を進めており、これまでに多くの実践事例を積み重ねてきたところである¹⁾。1F事故直後の試行錯誤の時期を経て、現在は各地域に合わせた放射線教育の広がりが見られるようになった。一方で、1F事故から9年が経ち今後の放射線教育をどのように位置づけていくべきか新たな課題も現れている。福島県における放射線教育を概観し課題を確認することは、単に1F事故との関連として捉えるだけでなく、全国的にどのように放射線教育を展開していくかを検証するケーススタディになると思われる。

II. 福島県における放射線教育の特徴

1. 地域性を考慮した放射線教育の広がり

福島県の県土は広く、1Fに近い太平洋沿いの「浜通り」と内陸に位置する「会津」地方とでは1F事故後の環境が大きく異なり、事故後の影響と直面した課題にも違いが見られる。例えば、浜通りでは多くの町村で長期にわたる避難が実施されたことから、避難先に開校されたある小学校では「なぜ避難する必要があったのか」「将来帰還する場合に知っておかなければならないことは何か」という視点での放射線教育が実施された。特に自分たちの故郷を意識しつづけてくれることを願う「故郷学習」の一環として位置づけられていた。一方で会津地方では、1F事故後も線量が低く、直接的には生活環境には

ほとんど影響が見られなかったが「風評被害」「いじめ」といった社会的観点を含めた放射線教育が小学校において行われていた。また、いわき市の中学校では原子力防災を意識した放射線教育、郡山市の中学校ではキャリア教育の一環として廃炉に関わる先端技術を見せる放射線教育などが行われている。いずれも自然放射線や放射線防護三原則などの基礎知識の上に、地域の課題に合わせた放射線教育を行うことで、児童・生徒に身近な問題として認識させたいとの期待がある。

2. 高等教育機関における放射線教育の強化

福島大学、福島工業高等専門学校(福島高専)では1F事故後に文部科学省や日本原子力研究開発機構(JAEA)と協力し、放射線管理に強い人材育成の輩出に努めてきた²⁾。例えば福島大学では2017年からの3年間で28名が放射線取扱主任者資格試験に合格しており、その後JAEAや電力関係企業に就職し福島県の復興に関わる卒業生も増加している。また、理科教員を目指す学生も放射線実習を受ける教育プログラムを実施している。更に福島大学、福島高専ともに一定レベルの放射線の知識を身につけた者を海外大学に派遣し、学内では困難な放射線実習などを体験させているところである。理工系分野のみならず廃炉ミッションを展開していくために必要となる社会の構成員として活躍できる人材となることを期待しているところである。

3. 1F事故から9年を経て浮上してきた課題

上述のように義務教育課程から高等教育に至るまで福島県内ではさまざまな放射線教育が実施されてきた。しかし、9年を経たことにより1F事故が風化した歴史として埋没し放射線教育が後退してしまうのではないかと、という危機感があることは否めない。これは、すでに小

Issues on the spread and continuity of radiation education :
Katsuhiko Yamaguchi.

(2020年5月1日 受理)

学生において1F事故は出生前の出来事となってきたこと、大学生においても当時子ども時代の記憶はおぼろげであること、そして教育現場としても学校に要望される他の要素が増える中で放射線教育を優先的に行う困難さ、などの各種要因がある。しかし、これまで培ってきた福島県の放射線教育は1F事故という日本にとって未曾有の事態を受けて現場レベルで構築してきた貴重な知的財産であり、時代の流れとともに衰退していくのを看過するべきではないと考える。むしろ、これまでの知見を継続的に学校教育に位置づけられる無理のない教育カリキュラムへ昇華させることができれば、他県の学校教育においても活用できる、より普遍的な内容となると期待される。

Ⅲ. これからの放射線教育として考えていくべきこと

福島県で実施されたさまざまな放射線教育から抽出できることとして下記の点が挙げられる。

- ・自然放射線や放射線防護三原則などの基礎知識を共通理解として押さえておく必要があること
- ・原子力に限らずエネルギー問題や医療など各地域の課題として認識できるアプローチが有効であること
- ・理科的な分野だけでなく社会科、家庭科、防災教育、キャリア教育など多角的に扱うことができること
- ・1時間丸ごと放射線教育に充てなくても、他の学習内容に追記することで教育機会を増やせること
- ・「放射線教育を」行うのではなく、「放射線教育で」

既存の学習内容を深め学力上昇につなげられること

以上のことを進めるためには、各教科の単元を精査し放射線教育と関連付けられる内容を洗い出した上で、発達段階を追って紐付けられる体系作りが涵養である。特に高等学校の理科では物理に限らず、生物・地学分野でも放射線との関連づけが可能な内容が多いにも関わらず、これまで積極的に接続を意識した教材が作成されてこなかった感がある。まずはコラム的な挿入からでもよいので取り上げられるように検討したい。

いくつか具体例を挙げておこう。例えば小学校3年生の理科には「日なたと日かげ」という単元があり、可視光が物体に遮られる初等的な現象が提示される。この段階で放射線にまで対象を広げる必要はなく、光が物体によって遮られる認識を持たせることが後に遮蔽体への理

解に繋がるであろう。特に中学校1年の理科で光を扱う場合に、多くの教科書では目に見えない光にも触れており γ 線と日かげを組み合わせた概念形成を促すことも可能と思われる。また小学校6年生の算数では、「いろいろな単位」を扱う単元があり、その中で単位の接頭語についても触れている。福島県では体積の単位として1mm方眼工作用紙を用いて1辺が10cmのサイコロを作り、1L、1mL、1 μ Lの高の違いを目視することから1 μ Svの小ささを実感させる取組が行われており、放射線への理解だけでなく、広く学力向上に寄与することも期待できる。

高等学校の生物では「遺伝子とそのはたらき」において、細胞周期の各期の特徴についても扱っており、放射線の影響をどの期が一番受けやすいかといった発展的な課題と結びつけることが可能であろう。また、高等学校の物理においても「原子核と放射線」の単元だけでなく、例えば「運動量の保存」の単元で衝突が取り上げられる際に、中性子が水素原子核によって止められやすい事実に触れるなど、関連付けられる事象が幅広くあるといえるだろう。

以上はほんの一例であるが、あらためて学校教育の各科目・単元を見直すことで、さまざまな現象や概念が放射線への理解に結びつけられることを意識し、無理のない放射線教育の継続・発展に繋げられることを主張したい。多角的な視点から是非多くの方のご助言を得たいと考えているところである。

－ 参考文献 －

- 1) 福島県教育委員会による放射線教育の指導資料 HP：
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/edu/gimukyoku29.html>
- 2) 福島大学共生システム理工学類放射線資料「廃炉について考える」HP：
<http://www.sss.fukushima-u.ac.jp/phys/>

著者紹介



山口克彦（やまぐち・かつひこ）
福島大学共生システム理工学類
（専門分野/関心分野）物性物理学・放射線計測

放射線と福島の実状を学ぶ教育モデルについて

福島県立安積高等学校 原 尚志

福島県立高校の理科教員として、生徒たちに福島第一原子力発電所事故後の放射線や福島の実状について学ぶ場を設けてきた。この中でアンケートとして、福島県民健康調査の質問事項を尋ねたところ、約3割の生徒が福島県民の「後年影響」に懸念を示した。この結果は、福島県内の高校生に対して、放射線や福島の実状についての学びの場を設ける必要性を示している。このような教科横断的で地域課題的な学びは、「総合的な探究の時間」で展開するのがふさわしい。課題研究に取り組む高校生のテーマとして、放射線や福島の実状に関するテーマを取り上げることも有効である。風評の払拭のためには、このような放射線や福島の実状に関する学びの充実こそ求められる。

KEYWORDS: Radiation, Education, High School Students, Fukushima

I. はじめに

筆者は福島県立高校の理科教員として、生徒たちに福島第一原子力発電所事故後の放射線や福島の実状について学ぶ場を設け、その活動を度々報告してきた¹⁾。昨年異動により勤務校が変わったが、新たに同僚となった千葉教諭は、2018年以来積極的に放射線の授業に取り組んでいる²⁾。両者ともに学習内容には、放射線だけでなく福島の実状について学ぶ場を設けてきたが、課外活動で放射線をテーマに課題研究に取り組む生徒への指導が中心であった筆者とは対照的に、千葉は理科の授業時間を利用して校内の一般の生徒を対象に指導してきた。今回同一校に勤務することになり、互いに視点を補い合うことができ、望ましい放射線教育について考察することができたので、この場を借りて報告したい。

II. 高校生の放射線についての意識

授業について述べる前に、福島県内高校生の放射線に対する意識の実状の一端を述べる。図1は千葉の2018年の授業実践²⁾で行われたアンケートの抜粋で、タイトルの質問事項は、福島県立医科大学が2011年から福島県民に対して行っている「こころの健康度・生活習慣に関する調査」³⁾の質問事項の一部(問14)と同じである。

結果が2校にまたがるのは、2018年4月の千葉の異動によるものだが、2校の結果を見ると「可能性が高い」「可能性は非常に高い」と答えた割合は28%、29%とほぼ同じで、約3割が「後年影響」があると見ている。これは福

島県が公開している先の調査結果³⁾の34%、三菱総合研究所が公開している東京都民に対する調査の同質問の結果⁴⁾46.5%に比べれば小さいものの、いまだに福島県内に、それも筆者の身近に県民の「後年影響」を懸念する高校生が3割もいるのかとの思いが拭えない。本稿には詳細を記さないが「遺伝影響」についても同様であった。

原発事故後、福島県教育委員会では「放射線教育推進支援事業」を立ち上げ、協力校による授業実践の収集や指導者養成などに取り組んできたが、対象は義務教育であり高校は含まれていない⁵⁾。さらに千葉の報告²⁾によれば、小中学校で「放射線の授業を受けていないまたは不明」と答える生徒も35%ほどあり、放射線に関する基礎的知識が十分定着しているとは言えない状況である。そもそも放射線の量的把握は小中学生には少し難しく、高校生が学ぶのにふさわしい内容であろう。

「風評」への対策が課題である福島においては、まず福島県内の高校生に原発事故後の放射線と福島の実状について、正確に理解させる必要がある。

III. 授業実践

筆者らが授業実践で重視するのは以下の4点である。

- ①計測を通した学校や自宅の線量の確認
- ②福島第一原子力発電所と中間貯蔵施設について学ぶ
- ③風評とその払拭に向けた取り組みについて学ぶ
- ④体験の振り返りと意見交換を通した体験の共有化

①は線量の「相場観」の育成は、放射線による健康不安の払拭には欠かせない。教室や自宅の線量を知ってこそ、事故後の福島の線量を、実感を持って把握できる。特に学校や自宅の線量マップを作成し、他と比較することが「相場観」の形成に有効である。ただし線量マップを

Effective Teaching Model for Learning Today's Fukushima after 3.11 : Takashi Hara.

(2020年4月30日受理)

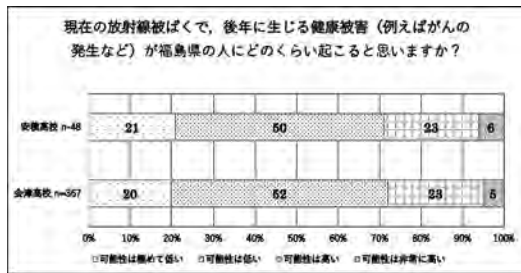


図1 後年影響

(出典)千葉惇, 物理教育 67(4), p.236 図4より筆者作成

簡単に作成できる国産線量計はまだなく開発が急がれる。②は、取り出されたデブリや運び込まれた大量の除染土をどうするかなど、国民的議論が避けられず、解決に長期を要する問題である。次世代を担う高校生には、現状を学び、問題を共有して欲しい。③では、福島が頭を悩ませる風評とは何か、どこにどのように影響が及んでいるかを学び、乗り越える方策は何かを共に考える。そして④は、生徒が自ら学んだ事を再確認し、さらに互いに深めあう場として設定している。

この様な授業の成果については、例えば教室の線量計測を主軸とした千葉の授業実践²⁾の結果として、福島県産の食品に対する不安を持つ生徒の人数が減った報告がある。2019年の実践においては、別稿にて詳細な報告と分析を計画中である。

IV. 体験学習

放射線や福島の現状を学ぶ活動では、生徒の体験や見学活動を盛り込みたい。見学場所として、環境再生プラザ(福島市)、環境創造センター(田村市)、リプルン(富岡町)、中間貯蔵工事情報センター(大熊町)などが挙げられる。2019年の安積高校の活動では、授業の後、希望者を対象として、上記施設の一部と福島第一原子力発電所、および中間貯蔵施設の見学会を実施した。もちろん、実施にあたっては、移動手段の確保、見学申し込みや保護者の承諾など色々と手続が必要となる。しかし実施できれば多くの生徒が、現場に立ち実際に目することで心をゆさぶられ、事故影響の大きさを感じ、被災した人々と復興のために努力する人々への思いを深めてくれる。そして廃炉や被災地の復興に貢献する気持ちを強めてくれる。2019年の見学の詳細とそのまとめ、参加生徒の感想などについては、本校ホームページに掲載した報告⁶⁾をご覧頂ければ幸いである。

V. まとめに替えて

現在、福島第一原子力発電所の処理水の放出や除染土壌の再生利用が課題となっている。報道によれば、いずれも住民から風評への不安の声があり、実施は時期尚早

とのことである。事故後9年経過してもなお消えない風評に、どう対応したら良いのか。そもそも風評は放射線への不安以外の何者でもなく、その本質的な対策は放射線について学ぶことを抜きには語れない。先に掲げた「後年影響」や「遺伝影響」についても、問いかけるだけでなくそれに対する学びの場を設けなければ、風評を払拭できないのではないかと。風評払拭こそ福島復興の大きな課題である。この課題を乗り越えていくためにも、まず高校生に対する、放射線と福島の現状に関する教育を充実させる必要がある。このような教科横断的で地域課題的な内容は、「総合的な探究の時間」で取り上げるのがふさわしい。ぜひ福島県内の高校で「総合的な探究の時間」での実践事例を重ねていきたい。そこでは福島県内の高校教員の頑張りも期待されるところである。

そして原子力学会と放射線に関わる学会の方々には、引き続き高校生の学びの充実に支援をお願いしたい。特に「総合的な探究の時間」では、放射線や福島の現状を研究テーマに課題研究を行う生徒が出てくると期待される。その様な生徒たちに、放射線と福島の現状に関する出前授業や研究テーマの提示、研究活動の指導、学会に高校生セッションを設けるなど発表の場の提供をお願いしたい。教育が充実し、放射線への理解が進まなければ風評の払拭も進まないと考えるのは、筆者だけだろうか。

－ 参考文献 －

- 1) 原尚志他, 福島県内外の高校生個人線量比較 2016, 物理教育 66(1), 6-11, 2018. 他に, 原尚志, 福島高校の放射線教育, 日本原子力学会誌 ATOMOS, 60(1), 7-8 2018.
- 2) 千葉惇, 福島の復興と放射線についての授業の実践, 物理教育 67(4), 235-240, 2019.
- 3) 平成 29 年度こころの健康度・生活習慣に関する調査結果報告, <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/336444.pdf>
- 4) 三菱総合研究所, 東京五輪を迎えるにあたり、福島県の復興状況や放射線の健康影響に対する認識をあらためて確かにする必要がある, 2019, https://www.mri.co.jp/knowledge/column/dia6ou000001qdm3-att/MTR_Fukushima_1911.pdf
- 5) 福島県教育委員会, 放射線教育・防災教育関連情報について, <https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/edu/gimukyoiku29.html>
- 6) 福島県立安積高等学校, SSH 活動日誌, 2019 年 8 月 4 日・6 日「国際高校生放射線防護ワークショップ」, https://asaka-h.fcs.ed.jp/blogs/blog_entries/index/page:7?frame_id=344

著者紹介



原 尚志 (はら・たかし)

福島県立安積高等学校

(専門分野/関心分野) 福島高校在任中に東日本大地震を経験。以後部活動で放射線計測や福島の現状を学ぶ生徒の指導にあたる一方、総合学習の時間を利用して放射線の教育にも取り組んできた。2019 年より現職。

原子力発電新規導入国の原子力人材育成に対する日本の支援の現状

より安全な原子力発電導入へのサポート

原子力国際協力センター 鳥羽 晃夫

福島第一事故の後でも地球環境保全やエネルギーセキュリティの観点から原子力発電の新規導入を目指している国は多く存在しており、事故を含め多くの経験と技術を有している日本に対する人材育成への協力の要請が多く寄せられている。これに応じて多くの国内の機関が人材育成への協力を行って来ており、継続した貢献に対する感謝が寄せられている。しかし日本全体としての協力の整合性等、原子力人材育成ネットワーク等を通して解決すべき課題がある。

KEYWORDS: JN-HRD.Net, IAEA, Milestone document, Nuclear Infrastructure +

I. 新規導入国と人材育成について

エネルギーセキュリティの確保、地球環境保全の観点から新規に原子力発電の導入を開始、あるいは検討している国は国際原子力機関(IAEA)によれば28カ国存在している。その中で今年 UAE とベラルーシの2カ国が原子力発電所の初号機を運転開始しようとしている。原子力発電所を導入するためには、多くのインフラを整備する必要がある、IAEA は新規導入国における整備のガイドラインとしてマイルストーンドキュメントと呼ばれる文書を発行し、導入段階を3つのフェーズに分けて、整備すべき19項目について各段階で達成しておくべき事項を明示し、新規導入国がその達成状況を確認できるよう INIR (Integrated Nuclear Infrastructure Review) と呼ばれるレビューミッションを提供している。また新規導入国においても、この文書をバイブルのように基本文書として尊重しており、特に UAE はこの文書に忠実に整備を行った最初の実施例として注目されている。この文書は新規導入国のみならず、南アフリカのように最初の導入から次期の計画までずいぶん時間が経ってしまったため、状況が変化し新たに建設を行う場合に必要なインフラの整備が必要となった国々においても参照されている。

The status of Support Activities to Human Resources Development of Nuclear Newcomer Countries by Japan : Akio Toba.

(2020年4月30日 受理)

これらの19項目の中に当然人材育成は含まれており最も重要な事項となっている。UAE においては初号機の工事自体は2年目に完成していたものの、運転要員の育成が不十分だったことが原因の一つとなり運転開始が今年となっている。原子力発電所を新規に導入するために必要な人材の数は、契約形態(EPC, BOO 等)や国情により異なってくるが、NEPIO と呼ばれる政府推進組織、規制組織およびそれを支える TSO と呼ばれる技術支援組織、発電所の建設・運転の主体となる組織にプロジェクトの進捗に沿ってある程度の数が必要となってくるため、せっかく育てた人材を他の分野に流出させないためにも育成のタイミングが重要となる。なお、新規導入国では原子炉物理や原子力工学の技術者が初期の推進役となることが多いため、こうした人材の育成だけで原子力発電所の導入が行えるという誤解がよく見られ、原子力発電所を建設・運転していくためには機械、電気、化学等広い技術分野の人材育成を行うことが重要であるということを理解してもらう必要がある。

II. JICC による新規導入国の人材育成への協力について

原子力国際協力センター(JICC)は2010年に設立された団体で、新規導入国に対するインフラ整備等のための協力事業を直接実施すると共に、新規導入国に対する日本の協力の窓口の役割を果たしている。

1. IAEA との協力事業(多国対象)

IAEA の Nuclear Energy 局には NIDS (Nuclear Infrastructure Development Section)があり、年間 78 ものトレーニングコースをホスト国と呼ばれる原子力先進国との協力により実施している。また同じ局の NKMS (Nuclear Knowledge Management Section)でも多くの NEM スクールや NKM スクールを実施している。JICC ではこの NIDS と協力してメンタリングコースを 5 回にわたり実施してきた。このメンタリングコースでは研修生 2 人から 3 人に一人の割合で日本人の経験豊かなメンターをつけ、一緒に日本の多くの原子力施設を訪問し毎日記載を義務付けられた日報の添削を行うと共に、最終日のプレゼンの指導を行った。また若狭湾エネルギー研究センターと共同で比較的上級クラスの人材を対象にポリシースクールを 3 回実施した。これら 2 つのコースは参加者からの評判も良かったが、IAEA との話し合いにより新コースとして統合され後述する原子力人材育成ネットワークとして実施しているインフラコースとなっている。このインフラコースは大きく分けて 2 種類あり、前述の IAEA のインフラ 19 項目をすべてカバーする入門コースと 19 項目のうちの特定の項目に絞ったコースがある。昨年は特に人材育成のやり方そのものを教える Systematic Approach to Training (SAT) コースと IAEA の文書 INSAG-27 を参考に原子力安全達成のための組織間の関りの大切さを教える Stakeholder Interaction (SI) の 2 つのコースを実施している。(図 1)

また原子力人材育成ネットワークの事業として東京大学、JAEA、JAIF と共に先の IAEA の NKMS との Japan-IAEA Nuclear Energy Management School を実施している。

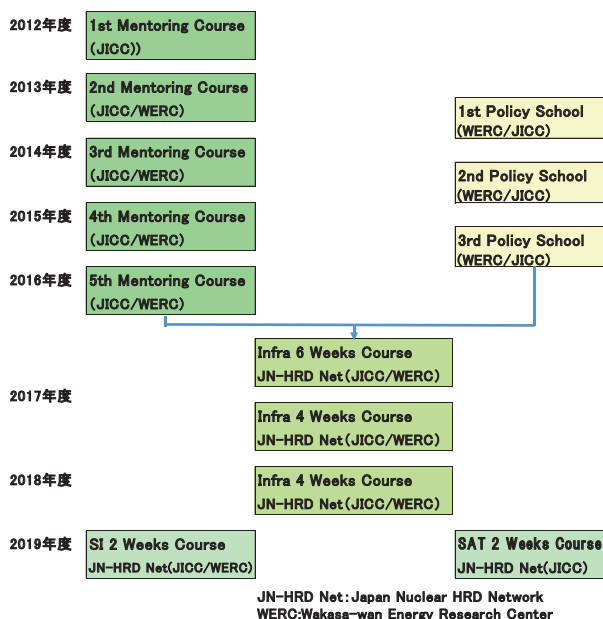


図1 IAEA との共催コースの経緯

2. JICC 独自事業(多国対象)

JICC では「福島第一原子力発電所事故の学びと教訓」を統一テーマとして 2011 年度以降毎年新規導入国を中心に 20 名程度の方を招いて、原子力安全の知識の普及と日本の技術の紹介を目的とした JICC 基盤セミナーを 9 回にわたり実施してきた。このセミナーには国内の地震、津波、火山といった自然災害の専門家や IAEA の耐震安全センターの方等を講師に迎え講義を頂くと共に、必ず福島第一原子力発電所の訪問を行い、事故についての正しい知識を得て頂くようにしている。また再稼働を果たした発電所を訪問して、新規規制基準要求に適合するために行った対策をハード面およびソフト面の両方から紹介すると共に、発電所周辺の方の再起動へのご理解を得るために行った活動について説明頂いている。今までのセミナーへの参加者は約 20 カ国、150 名以上に達している。またこのセミナーのフォローアップとしてジャカルタにおいて近隣諸国を含めた多数の参加者に対して SPEEDI の紹介および使用経験を説明している。

3. JICC 事業(二国間協力および複数国対象)

日本への招聘に比べて新規導入国で開催する現地セミナーの場合にはより多く、あるいは学生の方等も含めた広範な現地の方に出席いただく事ができる。そこで JICC では現地機関が主催するセミナーや教育プログラムに講師を派遣するのみならず、原子力安全(特に福島第一事故の学びと教訓とその反映)、国民理解、経済性等をテーマとしたセミナーをポーランド、インドネシア、タイ、フィリピンといった新規導入検討国において実施している。原子力安全については、いわゆる Fukushima50 のうちの 1 人の方を講師に迎える等事故を経験した日本からならではの生々しい話を含めた内容で実施してきた。国民理解については、新規導入国の首都だけではなく相手国の要望に応じて立地候補地点を含むエリアの中心都市等でも実施し、地方自治体や出先機関の方、関係大学等からの出席を頂いている。また講師として日本の地方自治体や電力の広報の最前線の方にも参加頂き、経験を紹介しこの分野の人材養成の一助となっている。また新規導入国によっては、現時点におけるニーズに応じた特化したテーマについてのイベントを望むケースがあり(UAEにおける緊急時医療等)、この場合にはより双方向的なワークショップの形で行われることもある。ポーランドのワルシャワにおける人材育成のワークショップはその例であり、政府関係者に加えて、大学や研究機関の方と討議を行い、人材育成を行っても具体的プロジェクトが不確定なためその受け皿がない等の問題が指摘され、人材育成のタイミングの重要性が再認識された。

日本への招聘による人材育成については東海大学にお願いして国際原子力開発(JINED)と共に行ったベトナム電力公社(EVN)向けコアメンバー教育が最もまとまった

形の人材育成として挙げられる。この教育では2年間にわたり若手職員を日本に招き、大学における日本語教育および原子力の基礎知識の教育、産業界の講師による実務知識の講義、最後に原子力発電所およびプラント機器製造現場における実習を行うという内容で、3期にわたり約30名を超える人材育成が行われた。ベトナムのプロジェクトは中断されてしまったが、このコアメンバー教育の際に得られた経験とノウハウは今後新規導入国への協力を行っていくうえで貴重なものとなっている。

ポーランドに対しては、主に原子力発電導入のためポーランド国営電力PGE社を主体に設立されたPGE EJ-1社の人材育成のための協力を行っている。当初は火力分野からの異動者を対象とした入門コースを行い、一巡した後はアドバンスドコースとして先方から要望のあった立地評価、耐震評価、品質マネジメントシステム、放射性廃棄物管理等のテーマを絞った研修を実施している。

またカザフスタンに対しては日本原子力発電の研修センターにお願いして、教育用シミュレータを含む電力会社向け研修施設を活用した教育コースを毎年実施しているほか、フィジビリティスタディや技術評価等の分野を絞った訓練のニーズに応えたコースも実施している。この仕組みを利用して、インドネシア、タイといった複数の国を同時に対象に研修を実施した。こうした複数の国を対象とした場合にはそれぞれの国により人材育成の程度の差があることがあり、注意を払う必要がある。

Ⅲ. 国内機関による人材育成への協力について

JAEAの原子力人材育成センターはアジアの国々を対象に講師育成研修8週間(原子炉工学Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ)6週間(原子力/放射線緊急時対応)6週間(環境放射能モニタリング)というまとまった研修を国内で毎年行っており、さらに育成された講師による各国でのフォローアップ研修により多くの人材育成を実施している。その総数は5,000人以上にも達している。また1から4週間の原子力技術セミナーを福井県および茨城県において実施しており、こちらにもアジアの国々からの多くの研修生が参加している¹⁾。

JAEA 核不拡散・核セキュリティ総合支援センターは所有するVRシステムや核物質防護実習フィールドを活用した核セキュリティコース、保障措置・国内計量管理制度コース、核不拡散に関わる国際的枠組みコースのトレーニングをアジアの国々を中心に提供している²⁾。

若狭湾エネルギー研究センターでは、IAEAと福井県との間の人材育成に関わる覚書に基づき、新規導入国を中心とした人材育成を実施している。上記のJAEA原子力技術セミナーの福井県における実施場所となると共に、JICCからは安全基盤セミナーやPAセミナーを新

規導入国に対して実施してもらってきた³⁾。

原子力安全研究協会では国際原子力安全交流対策(技術者交流)として1~6ヵ月にわたる新規導入国からの技術者の受け入れを長期にわたって実施してきている。

外務省においては、海外人材育成支援として、IAEAとの間で福島県に指定された緊急時対応能力研修センター(CBC)での研修支援、アジア・大洋州における地域協力枠組(RCA)を通じた支援、技術協力員の受入れ支援等が行われている。

日本の大学では長年にわたる留学生の受け入れに加えて、以下のようなIAEAと協働した新規導入国の人材育成に対する貢献を行っている。

東京大学では大学院の専攻に対して原子力版MBAともいえるIAEA Nuclear Management Academyの認定を受けており、新規導入国を含む多くの国の学生の教育を行っている。また英訳した原子力工学のテキストを出版すると共にIAEAのWebに公開して、多くの国から利用が可能のようにしている。

東海大学では、IAEAと原子力安全教育の分野で協定を締結して、国際原子力安全基準の研修コースを毎年度開催するとともに、アジアとわが国の若手人材を対象に原子力・放射線安全リーダーシップの国際スクールの実施に協力している。

産業界では、日本原子力発電が研修センターを利用した新規導入国の研修を長期にわたり実施してきている。

またプラントメーカー各社も、各国における寄付講座、日本国内での研修生受け入れを通じて新規導入国の人材育成に努めている。

こうした日本からの協力は長期間にわたり粘り強く実施されており、特に関係の深いアジアの国々からは深く感謝されている。インドネシアなどでは原子力に関わる主要機関の長が皆、日本への留学や駐在経験を持っているようなケースも見受けられる。ただ他の原子力発電技術の輸出に積極的でかつプラントメーカーが各国1社に統一されている、ロシア、フランス、韓国等と比べた場合には、以下のような点で見劣りをするのが否定できない。

- ① 各機関の提供するプログラム間のつながりがなく、あるいは関係が示されていないといった点でバラバラ感があり日本の国全体として統一のとれたプログラムが提供できていない
- ② 英語で講義できる講師の数が限られている(特に原子力発電実務のような実学の部分)

こうした点から次に記す原子力人材育成ネットワークの更なる活用が求められている。

IV. 原子力人材育成ネットワーク・海外人材育成分科会の活動について

2010年に国の呼びかけにより、わが国の関係機関の相互協力に基づく「原子力人材育成ネットワーク」が設立され、各機関が一体となって各種の原子力人材育成活動・事業等を効率的かつ効果的に推進することになっている。現在84の機関が参加しているこのネットワークの目的の中に、IAEA等と連携しながら、海外の新規原子力導入国における人材育成支援を推進することが挙げられている。この目的を達成するためのネットワークの分科会として海外原子力人材育成分科会が設けられており、東京大学大学院上坂教授を主査に20を超える組織が参加して年3回の会合等の分科会活動が行われている⁴⁾。

この分科会では分野別、実施期間別のデータベースに加えて、参加各機関の海外に対する活動の見える化を行い、活動の不足部分、重複部分を明らかにするための分析型(マトリックス型)データベースを作成し対象国のフェーズ別、対象者(政府関係者、規制関係者、大学研究所、電力等に分類)、提供する教育・訓練の分野別に整理を行った。この分析型データベースを分科会での活動に活かすと共に、海外向けの英文パンフレットにおける主要情報として活用している(図2)。

当初これらのデータベースは分科会独自のデータベースとして作られていたが、現在はネットワーク全体の

データベースに統合され公開データとしてネットワークのHPにおいてアクセスできるようになっている。

なお、分科会ではこうした情報交換や分析のみならず分科会として独自の海外人材育成事業を実施しようということとなり、前述のIAEAとのインフラコースの実施につながっている。

V. まとめ

日本においては原子力発電新規導入国のニーズに応じた人材育成への協力を長期間にわたり一貫して、継続的に実施してきている。対象国は伝統的にアジアの国々を中心としているが、最近では東ヨーロッパや中東が加わり、また特にIAEAと協力しての事業ではアフリカや中南米の国々にも広がっている。これらの活動は新規導入国の人々から高く評価されている。

こうした協力を行っていくうえで、新規導入国の人材育成計画とマッチした形で、あるいは必要な場合には人材育成計画の作成そのものも支援して行うことが重要である。また年齢や職責等研修生として相応しい人を受け入れ、プログラム終了後もきちんとフォローアップをしていくことが望まれる。

新規導入国への支援は他の原子力発電国からも行われており、例えばロシアでは1から7年に及ぶ多くの人材育成コースが整理された形で提供されている。こうした国々と比較した場合に日本からの支援は研修期間が短いものを中心であり、よりまとまった形での支援プログラ

<Target: Phase 3 Countries>

Major Items	Objects	NEPIO- Administrative or Governmental Staff	Regulatory Staff
National Position		ID:2 The Wakasa Wan Energy Research Center(WERC), Japan, English, 3 weeks	ID:2 The Wakasa Wan Energy Research Center(WERC), Japan, English, 3 weeks
		ID:3 The Wakasa Wan Energy Research Center(WERC), Japan, English, 1 week	ID:3 The Wakasa Wan Energy Research Center(WERC), Japan, English, 1 week
Safeguards		ID:1 The Wakasa Wan Energy Research Center(WERC), Japan, English, 4 weeks	ID:1 The Wakasa Wan Energy Research Center(WERC), Japan, English, 4 weeks
		ID:2 The Wakasa Wan Energy Research Center(WERC), Japan, English, 3 weeks	ID:2 The Wakasa Wan Energy Research Center(WERC), Japan, English, 3 weeks
		ID:7 IAEA, Japan, English, 1 week	ID:7 IAEA, Japan, English, 1 week
		ID:10 ISCN, Japan, English, 2 weeks	ID:10 ISCN, Japan, English, 2 weeks
		ID:13 ECJRC, ISCN, Each Country, English, 1 week	ID:13 ECJRC, ISCN, Each Country, English, 1 week

図2 マトリックス(一部抜粋)

ムの作成が、特にインターンシップ等を含めた発電実務面の教育訓練に対して必要であると考えられる。また日本の国全体としてみた場合の一貫性が不十分であり、せっかくの努力を新規導入国からより高く評価してもらえるように、他の原子力発電国からの協力に見劣りしないように日本全体としての協力プログラム間の整合性を持たせていくことが望まれる。

こうした必要性に応えるために、原子力人材育成ネットワークの分科会等において検討が行われているが、まだまだ多くの課題が残されていると思われる。分科会活動の更なる活性化、あるいは原子力人材育成ネットワークに新設された戦略ワーキンググループでの検討等を通じて改善が図られ、新規導入国の人材育成に対する協力がより効果的に行われ、各国において安全な原子力発電技術の導入が図られることを期待する。

－ 参 考 資 料 －

- 1) JAEA 原子力人材育成センター HP
<https://nutec.jaea.go.jp/>
- 2) JAEA 核不拡散・核セキュリティ総合支援センター HP
<https://www.jaea.go.jp/04/iscn/org/intro.html>
- 3) 福井県国際原子力人材育成センター HP
<http://www.werc.or.jp/outline/soshiki/kokusai/>
- 4) 原子力人材育成ネットワーク HP
<https://jn-hrd-n.jaea.go.jp/>

著 者 紹 介



鳥羽晃夫（とば・あきお）

（一財）原子力国際協力センター

（専門分野/関心分野）原子力発電新規導入国への基盤整備協力



書 籍 販 売 の ご 案 内

■『原子力がひらく世紀(第3版)』

一般社団法人日本原子力学会編，2004年発行，B5判 406 ページ，定価 2,000 円(税込)

この世に存在するすべての物質に共通する、微細で基本的な構造を解明しようとして、科学者たちが18世紀以来根気よく続けてきた努力は、今から約100年前にアンリ・ベクレルが自然放射線を発見するに及んで、一層の現実感を伴って加速されることとなった。原子物理、または原子科学とよばれるこの分野は、20世紀に入って驚くべき発展を遂げ、われわれの宇宙観を一新し、広い可能性を開拓したのである。歴史的には原子爆弾という、不幸な産物を経過したものの、現在ではその応用は工業、農学、医学での放射線利用、およびエネルギー源としての原子力発電に及んでいる。これらの応用をまとめて原子力の平和利用と呼んで、これをやさしく、じっくり解説するのが、本書の意図するところである。（『発刊の言葉』より抜粋）

ご購入は日本原子力学会ホームページより注文書をダウンロードのうえお申し込みください
<http://aesj.net/hp/>

■『原子力のいまと明日』

丸善出版株式会社出版，B5判 329 ページ，定価 2,200 円(税込)

日本原子力学会では、原子力と放射線についてのわかりやすい解説書『原子力がひらく世紀』を20年前に刊行し、好評のうちに現在『改訂3版』を発売中です。

その後、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえた新たな解説書を刊行すべく教育委員会を中心に検討が進められ、2019年3月「原子力のいまと明日」を上梓いたしました。

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

『原子力のいまと明日』は、丸善ネットストア、Amazon、
そのほかオンライン書店などでお買い求めいただけます。
日本原子力学会事務局からの直販は行っておりませんので、ご注意ください。



Zoom 越しの連帯

フリージャーナリスト 井内 千穂

新型コロナ禍の収束がいまだ見えない4月。各種イベント、シンポジウム、セミナーから会議、打ち合わせ、飲み会にいたるまで中止になり、外で人と会って話すことができない。仕事上も困っているが、自分の身を守り、医療崩壊を防ぐために、今は極力ステイホーム。医療現場やライフラインの最前線で奮闘する方々に感謝しつつ、在宅ワークにいそむ日々である。それほどテクノロジーに強いわけでもなかったが、必要に迫られて、zoom(ズーム)というビデオ会議ツールにもすっかり慣れた。

そんなテクノロジーを活用したオンラインセミナーが花盛りである。フィルターバブルとは言わないまでも、日頃の付き合いや仲間内のやり取りだけでは、いつの間にか触れる情報が偏ってくる。そうかと言って、未知の会場に足を運び、見ず知らずの輪に飛び込むには時間も気力も足りない。その点、オンラインなら家に居ながらにして初めての「場」に気軽に参加できる。中でも若者たちが運営するあるセミナーは、社会問題を構造化してとらえ、コロナ禍による困りごとを共有して一緒に考えようという極めて建設的な場だった。4月中毎晩、幅広い年代の参加者が200人以上集まり、テンポの良いトークセッションに耳を傾けながらチャットやツイッターを通じて活発なやり取りが続いた。

原発問題にしる政治課題にしる、ややもすると賛成か反対の声ばかり目立ち、「どちらとも言えない」層は無関心なのかと思っていたが、そうとは限らない。異なるコミュニティと接点を持つハードルが下がっているのはオンラインならではの。コロナ禍中の幸いな発見である。

Column

パンデミックでの気付き

東京学芸大学附属国際中等教育学校 高校3年 小澤 杏子

誰もが半年前は予想もしていなかった新型コロナウイルス。私は、最後の高校生活の新学期を未だ迎えられず、自粛を続けている。学業にブレーキがかかってしまったことや体育祭や文化祭などといったイベントが今まで通り実施できないこと、6年間続けてきた部活動を急遽引退させられたことなどに対して、やり場のない怒りと悲しみを感じてしまっていた。自粛生活の最初の数週間は、主体的にこのパンデミックを捉えていた。

しかし、最近ではこの現状を俯瞰的に考えられるようになった。ここ数週間のニュースや新聞記事を見返すことで、私たちは未来の社会の教科書に載る時期を体験していることに気付けた。バブル崩壊やリーマンショックなどを体験したことのない私にとっては、初めて歴史の出来事を身近に感じることができた。

そこで、私の人生の中で新型コロナウイルス以外でどのような悲痛な出来事があったのかを思い返してみた。一番最初に思い浮かんだのは、東日本大震災と福島第一原子力発電所事故である。当時、私は幼かった上に偶然震源地から遠いところにいたので、地震がもたらした被害は実感できていなかった。原発事故に関しても、ヒアリングや講義に参加したことで初めて「自分ごと化」できた気がする。今回のパンデミックも、いずれは教科書の1ページとなり、次の世代に語り継がれる。現状と向き合い乗り越えようとしている(乗り越えた)世界中の人たちの努力を、決して忘れてはいけない。これは、パンデミックだけではなく他のどんな出来事にも共通して言えることである。私が体験した地震とその被害も、責任持って語り継ごうと改めて思えた。

新型コロナウイルスとスロバキア

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。新型コロナウイルスの緊急事態宣言に伴い、多くの地域で教育機関の臨時休学が相次いでいます。ウイルスが目に見えない脅威であること、長期の休学や休業、噂やフェイクニュースによる情報混乱など、新型コロナウイルスを取り巻く状況は、2011年の福島第一原子力発電所事故時に似ている点がいくつかあります。本稿では、私が在籍するコメニウス大学医学部で、自宅待機要請期間中に医学生教育を担保するために行われた対策について紹介します。またいつ起こるか分からないパンデミックや災害時の教育実施方法の参考になるかと思います。

スロバキアでは2月19日に初の感染者が認められ、3月15日に緊急事態宣言が政府より発令されました。コメニウス大学では、緊急事態宣言前の3月5日の時点で3月中の授業は中止になることが知らされました。その後、3月中は本来5月中旬に終業する予定であった授業の延期が考えられている旨が伝えられましたが、緊急事態宣言の延長に伴い3月29日より、通年で行われる医師国家試験を含めた試験や実習の全てをオンラインで実施し、予定どおり5月15日に夏季学期を終業することが決まりました。実習単位の取得方法は、各学科で決定するとされ、オンラインで授業を行う学科もあれば、実習日数分のレポート課題で単位取得ができる学科もありました。オンライン口頭試験は、生徒1人づつスカイプやMicrosoft Teamsのサービスを利用して行われ、学科によっては試験官1人が質問し、もう1人がカンニングをしていないか生徒の動作をチェックしていたりしました。筆記試験も、決められた時間にMicrosoft Teamsにログインし、選択肢問題を解くといった方法で行われています。

Column

サイエンスの真髄と“cram”

大阪市立大学 鳥居 千智

サイエンスの真髄と向き合える——待望した大学生活が始まった。

「日本の大学は入るのは難しいけど卒業は簡単。単位を取るのは楽」と聞いていたので、受験期よりはゆとりを持てるのかな。ならば尚更しっかり勉強しようと思っていた。しかし始まってみると事情は全く違った。サイエンスの扉を開ける学力がつくのは嬉しいことで、内容も面白い。が、授業は俄然難しい。毎日遠隔授業のパソコンの前で頭をひねっている。わたしはこの大学に後期試験で受かった。狭き門を通過したという自負があったものの、いま全く余裕が無い。というより、受験のときに使った勉強があまり役に立ってないように思えないのだ。あんなに一所懸命やったのに。

ふとある日“cram”という英単語が目に残った。その意味は“詰め込み”だが、なんと“日本などの学習塾”という意味もある。日本の学習形態に対する外国の見方が凝縮されているように思える。今の日本の入試制度は皮肉られても仕方ないのかもしれない。

あんなに一所懸命やった受験勉強はどうも今現在の大学の授業の理解には役立っていない。身をやつした受験勉強は、サイエンスの真髄の扉を開ける鍵に繋がっていないようにさえ思える。

今これまでのセンター入試が廃され、“知識の量だけでなく、自ら問題を発見し、答えや新しい価値を生み出す力”を試すようなものに変更されようとしている。とても良いことだと思う。

ひるがえって、私たちが没入した受験勉強って一体なんだったのだろう——その答えも私は大学生活の中で見出したいと思っている。

目に見える，見えない

福島県立安達高等学校 3年 服部 杏菜

小学生の時、放射線が目に見えたらいいのになと思っていた。空気中にあるものも、食べ物の中に入ったものも。なんだ、放射線は数値として可視化できているじゃないかと思うが、当時はただただ「わかりづらい」という印象しか持てなかった。だからこそ、数字なんかで媒介せず直接目に見えるほうが「わかりやすい」と思っていた。そしたらこんなに不安がることもなくなるだろうと考えていたのだ。しかしこれは「放射線は少しでもあれば危険」だと勘違いしていたがゆえの、それこそ危険な思考回路だ。そんな勘違いをしたまま仮にこの目で直接放射線が見えたとしたら、たしかに不安は消えるが、それは明確な恐怖に変わるだろう。では実際に不安を取り除くためには何が必要だったのか。それは、危害が予想される量を知ることだ。それを知った上で計測値を見ると、途端にそれはわかりやすいものになり、不安は最小限に抑えることが出来る。0にならないのは、絶対はないという未来に放たれたリスクを無意識に意識しているからだだろう。実はそれが一番の不安要素だったりもするのだが。

高校生である今、目で見えることよりも数字を信頼することは多々ある。時間が良い例だ。われわれは太陽の傾きよりも時計に時間の正確性を求める。もちろん太陽の傾きありきの時計だが、いつの頃から数字のほうがわかりやすいとを感じるようになった。それは紛れもない、その仕組みと単位を知ったからだろう。

Column

「ためにする」批判を見分ける

フリーライター 服部 美咲

新型コロナウイルス感染症の流行拡大を受け、世界各国が対策を講じている。日本でも、専門家会議や医療の前線で、多様な分野の専門家が力を尽くす。未知の敵への対策であり、当然完璧は求められない。反省が役に立つこともあるだろう。ただ、政争のための専門家会議批判や、医療従事者や保健所へのバッシングなど、インターネット上には不要不急かつ有害無益な記事も目立つ。

福島県内での院内感染事例の記者会見で、市や病院の対応の不備^な詰人を詰る人がいた。世界中が模索する新興感染症対策において「対応に一切の不備なし」と断言したなら、それこそ不誠実の誹りを免れない。別の分野の専門家が、厚生労働省の対策班メンバーの計算や言い回しなどの欠陥を切り取って問題視する言説も目にする。これら「ためにする」批判の先で、誰の命が守られるのだろうか。東京電力福島第一原発事故後の東京電力や放射線防護などの専門家への過剰な攻撃を思い出す。廃炉や放射線の問題を政争の具にした先に、被災地に住む人々の幸せな日常があるとは思えない。

新型コロナウイルス感染症やその対策に関するさまざまな意見や報道があふれている。危機的状況を打開するための建設的な提案なのか、政治的な意図の濃い言説なのか、あるいは個人の功名心や嫉妬から出たバッシングであるのかを見極めることも必要だ。そして、一般のわれわれは、手洗いや外出自粛などの基本動作に加え、ときには情報の過密という4つ目の「密」からも離れることを心掛けたい。

最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構

第4回 今こそ、高速炉の話：持続性あるエネルギー供給へ

日本原子力研究開発機構 根岸 仁ほか

「もんじゅ」は2018年4月に、廃止措置段階に移行した。わが国初めてのナトリウム炉の廃止措置であり、約30年をかけて進める大事業である。「もんじゅ」では、設計や開発、製作、建設および40%出力運転などの50年にわたる活動を通じて膨大で多岐にわたる技術成果を得てきた。これまでに蓄積された知見・技術を決して散逸させることなく、今後の高速炉の実用化に向けた研究開発に確実に活用していくことが必要である。

KEYWORDS: *Fast reactor cycle, Severe accident, Sodium, Monju, Joyo, High level waste, Minor actinide, Passive safety, Safety design criteria*

I. 燃料を増殖し廃棄物を減容する

純国産化めざした高速炉サイクル

高次化したプルトニウムなど熱中性子では核分裂にくい核種にも有効な高速中性子による核分裂反応と、それに伴い発生する豊富な中性子を活用したのが高速炉技術である。その使用済燃料からプルトニウムとウランを回収して混合燃料を製造する再処理技術と燃料製造技術を合わせて、高速炉サイクル技術と言う。この技術体系が確立すれば、消費した燃料よりも多くの新燃料を生み出し、持続的なエネルギー供給が可能となる。

また、高レベル放射性廃棄物に含まれる長寿命核種の分離回収と、短い半減期の核種への核変換を行うことで、廃棄物を減容し有害度を低減できる。わが国ではエネルギー安全保障や環境負荷低減をめざして、この高速炉サイクルを純国産技術として確立するための技術開発を進めてきた。

高速中性子の照射場「常陽」

高速炉開発のカギの一つが、冷却材である液体金属ナトリウムの取り扱い技術である。この技術を開発するために旧動力炉・核燃料開発事業団は、高速実験炉「常陽」を建設。これまでに約7万1,000時間におよぶ安定的な

運転を達成した。この間に使用済み燃料の一部を再処理して再び「常陽」に装荷する小規模な高速炉サイクルの輪を実証し、高速炉サイクルの技術基盤を構築した¹⁾。

現在は新規制基準への適合性審査に向けた準備を進めているが、高速中性子の照射場として世界トップレベルの性能と高精度の照射量・照射温度の制御技術を持つ「常陽」の運転再開には、国内外から大きな期待が寄せられている。

「常陽」で得られた成果は、原型炉「もんじゅ」のプロジェクトに引き継がれ、性能試験の中で40%出力までの運転を達成した。しかし、「もんじゅ」はその後、東日本大震災後の新規制基準対応が必要になり、その対応に要する時間と費用については不確定要素も大きく、今後の高速炉研究開発は「もんじゅ」の運転再開によらない新たな方策で必要な知見を獲得すること、一方「もんじゅ」は原子炉としての運転再開はせず、今後、廃止措置に移行するが、あわせてその機能を出来る限り活用し、今後の高速炉研究開発における新たな役割を担うよう位置付けるとの方針が国により示された。これに沿って国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」)は、「もんじゅ」の廃止措置に関する基本的な計画を策定し、廃止措置に移行することになった。

「もんじゅ」は100%出力には至らなかったものの、ナトリウム取り扱い技術を含め高速炉サイクル技術に関する多くの知見を蓄積してきた²⁾。その上で、原子力機構では安全性強化や廃棄物の減容・有害度低減を目指した研究開発や、米国や仏国などとの国際協力を推進している。

Now is the time of Fast Reactor: Hitoshi Negishi, Hideki Kamide, Seiichiro Maeda, Hirofumi Nakamura, Tomoyuki Abe.
(2020年3月11日受理)

■ 前回のタイトル

第3回 原子科学の最先端を拓く

Ⅱ. 自然循環で炉心冷却する受動安全を実現

高温でも液体状態を保持するナトリウム

原子力機構の大洗研究所では、40年以上にわたってナトリウムを扱う試験を実施しており、近年では240トンのナトリウムを保有する試験施設AtheNaを整備している。大洗研究所と敦賀総合研究開発センターでは、その安全な取扱いのために訓練が定期的に行われている。

固体ナトリウムを包丁で切ると、その断面は金属光沢をしている。3mm角ほどに切ったナトリウムに水をかけるとパチンと火花を飛ばして跳ねる。水と激しく反応するので注意が必要だ。ナトリウムを中華鍋のような燃焼皿においてガスバーナーで温めると溶けてさらに高温になると燃え出す。その炎の高さは数センチメートルと低く、ナトリウムの広がりを抑えれば、油のように高く燃え広がることがない。原子力機構ではナトリウムの燃焼実験を積み重ね、湿分などの条件に応じた燃焼特性を予測する解析手法を開発し、その精度を確認している。

大気圧下で水は100℃で沸騰するのにに対し、ナトリウムは880℃で沸騰する。つまり、圧力を加えなくても高い温度まで液体の状態を保持でき、高温の配管がもし破れても圧力で外へ吹き出すことはない。漏れたナトリウムを保持する容器や金属の壁で覆うだけで、それ以上漏れ出ることを防ぐことができる。また、ナトリウムは熱の伝わりやすさが水の100倍もあり、その分小さな熱交換器で熱を次の系統に伝えることができる性質をもつ。この二つの特徴は、冷却材にナトリウムを使う高速炉の大きなメリットになる。

ナトリウムの利点と自然の力で炉心を冷やす

福島第一原子力発電所の事故が大きくなった最大の要因は、原子炉の核分裂反応の停止には成功したが、その後の崩壊熱、すなわち核分裂破片が安定化する過程で徐々に出てくる熱を取りきれなかった点にある。

ナトリウムを使う高速炉では、前述のように圧力が高くないので配管が壊れてもナトリウムの液位を確保できる。あとは熱交換器があれば、空気より温度が500℃も高いナトリウムから空気に熱を伝え、高い排気筒を通して無尽蔵の大気が熱を外へ逃してくれる。ナトリウム側も炉心で熱く軽くなることで高い所に置かれた熱交換器に到達し、冷たく重くなることで自然に炉心に戻る。(自然循環)つまりポンプを使わず電源がなくても自然の力で炉心を冷やすことができる。

大洗にある高速実験炉「常陽」ではフルパワーの状態から核分裂を停止し、この自然循環で確実に炉心が冷やせることを確認している³⁾。さらに高速炉の安全性を高め、その実用化を目指す。昨年には、炉心の一部が溶けて閉塞するような事態においても安定して炉心を冷却で



図1 ナトリウム
(金属光沢をもった液体ナトリウムが流れる様子)

きることを調べるナトリウム試験をフランスとの共同研究として実施し、自然対流により炉心規模で温度分布が平坦化する特性を確認した⁴⁾。

Ⅲ. 独自性の高い研究への取り組み

高レベル廃棄物の処分が最大の課題

高レベル放射性廃棄物の処分は、原子力が抱える最大の課題の一つとなっている。使用済み核燃料を再処理した際に発生する廃液中には、アメリシウム(Am)やキュリウム(Cm)などといった核種が含まれる。マイナーアクチニド(MA)と呼ばれるそれらの核種は半減期が極めて長く、長期間にわたって放射線と熱を出し続ける。そのことが、高レベル放射性廃棄物の処分を難しくしている。

このやっかいなMAを処理する切り札の一つとして考えられているのが高速炉である。高速炉では、豊富な高いエネルギーの中性子を利用して、プルトニウムなどと同様にMAを核分裂すること、言い換えれば、燃やすことができ、エネルギー源として利用しながらMAを減らすことができる。また、高速炉サイクルの中でMAを循環させて利用し、高レベル放射性廃棄物から発熱量が高いMAを取り除くことで、高レベル放射性廃棄物処分場の廃棄体の間隔を大きく縮めることができ、処分場の面積は大幅に小さくなる。

処分場の放射能が天然ウランと同じレベルになるまでには数十万年かかると想定されているが、人体への有害度の高いMAを取り出せば、それは数百年オーダーにまで短縮される。これらによって高レベル放射性廃棄物処分の負担や将来世代へのリスクを大幅に小さくすることができる。

長半減期のマイナーアクチニドを抽出

これを実現するためにはまず、高レベル放射性廃液中からMAを分離する技術が必要になる。しかし、高レベル放射性廃液の中には、MAと似た化学的挙動を示す希土類元素が含まれることから、MAの分離はたやすくはない。

これを可能にするため私たちは、MAを抽出するために多孔質シリカ粒子表面に抽出剤を塗布した吸着材を用いた抽出クロマトグラフィと呼ばれる技術を開発し、こ



図2 東海村の研究施設で回収した長半減期の MA 溶液

れを使って茨城県東海村の高レベル放射性物質研究施設 (CPF)において「常陽」の照射済燃料から、図2に示すようにグラムオーダーの MA を回収することに成功した⁵⁾。抽出クロマトグラフィは、希釈剤が不要となり、廃液の発生が抑制され、また、装置をコンパクトにできる等の特徴を持ち、経済性向上が期待できる新しい技術である。このような新しい技術で実際に高レベル廃液から高い回収率で MA を分離回収するのは、世界的に見ても貴重な実績といえる。

さらに、高い放射能や発熱を有する MA を含むベレットを作る際には、グローブボックスでは対応できず、ホットセルにて完全に遠隔で製造する技術、原料粉の発熱に対応する技術が必須となる。このため、マイクロ波を使った脱硝・転換に引き続き原料粉の造粒を一元的に処理する技術、金型に直接潤滑剤を塗布するベレット成型技術などを採用することで、従来に比べて製造工程数を抜本的に削減するとともに、製造の過程で発生する二次的な廃棄物の発生量を大きく減らす革新的な技術開発に取り組んでいる⁶⁾。

私たちは高レベル放射性廃液から回収した上述の MA を含む燃料を茨城県大洗町の試験施設にて製造し、再び「常陽」で照射し、隣接する照射後試験施設で MA の核変換挙動データなどを取得する小規模 MA サイクル実証試験を進めている⁵⁾。この試験で得られるデータは世界的にも先進的な知見として期待されている

IV. 世界の高速炉開発を安全分野でリード

炉心溶融時でも放射性物質を環境に放出させない「炉心燃料が溶けるような過酷な事故が発生しても、放射性物質が環境に放出されないよう閉じ込める」。これはナトリウム冷却高速炉開発の初期段階から各国が掲げてきた目標だ。この目標を確実に達成するため、高速炉特有の問題である再臨界事故を防ぐことに日本は世界で初めて挑戦した。

燃料集合体は何℃で溶けるのか。溶融した燃料はどのように流れるのか。溶けた燃料が集まることによって起こる再臨界事故を防ぐためにどうしたらよいのか。理論と数値計算により模擬することはできても、これを確認

するには実際に燃料集合体を溶かしてみるしかない。

EAGLE (Experimental Acquisition of Generalized Logic to Eliminate of re-criticalities)と名付けられたカザフスタン共和国国立原子力センター(カザフ NNC)と日本の高速炉炉心安全性実験プロジェクトは、1995年からの検討を経て1998年に開始された。カザフ NNC が持つ実験用原子炉施設 (IGR: Impulse Graphite Reactor) で燃料集合体規模の高速炉燃料を溶かし、そのふるまいを把握する一大プロジェクトである。

カザフスタンと共同で実験

日本とカザフ NNC は試行と議論を重ねることで安全性の確保、条件設定、溶かした燃料の分析方法などの課題を解決し、世界で初めて再臨界事故を防ぐ高速炉設計が可能であることを示した。燃料集合体内に燃料排出用のダクトを取り付けることで、溶けた燃料が炉内にたまり再臨界が起こるのを防ぐことができる⁷⁾。また、EAGLE で得られたデータは原子炉容器内で損傷燃料を安定に冷却・保持できる研究にも活用され、この成果をまとめた論文⁸⁾は日米の原子力学会が主催した NUTHOS10 国際会議において最優秀論文として表彰された。

高速炉の安全設計クライテリア標準を提唱

世界の高速炉開発を見渡せば現実のものとなりつつある国も出てきた。最も開発が進むロシアは2015年に実証炉 BN-800 を稼働させた。中国、インドも共に2030年代の実用炉の運転開始を目指し開発を進めている。米国も原子力開発の国際的なイニシアティブをとるために新たな多目的試験炉 (VTR: ナトリウム冷却高速炉) プロジェクトを始動するとともに高速炉を含む新型炉の実証炉建設計画を開始した。日本も将来の実用化を見据え、国内民間企業が行うイノベーション開発や米、仏との協力においての各種照射ニーズに応えるべく「常陽」の運転再開の準備を進めている。

世界で高速炉技術が実用化に向かう中、最重要課題とも言えるのが高速炉の安全設計だ。2010年、原子力機構は「もんじゅ」や高速炉の実用化研究開発の経験を基に世界の第4世代原子炉システムの開発国(現在の加盟は13か国)とEUからなる Generation-IV International Forum (GIF)に、その構築を提唱し先導した。その結果、ナトリウム冷却高速炉の「安全設計基準」のベースとなる「安全設計クライテリア」とそれを具体化する「安全設計ガイドライン」が GIF の承認を受けて構築された⁹⁾。これらは、構築の過程で GIF 加盟国の規制機関や OECD, IAEA からのコメントを受けて改訂するとともに、構築後も Version 改訂が進んでいる。

これにより、国際標準となる高速炉の安全要求全体系の整備も見えてきた。

日本は「もんじゅ」の廃炉が決まったものの、今もナト



図3 IGR 試験施設(EAGLE 計画にて利用)

リウム冷却高速炉開発における世界の一翼を担い続けるとともに、シビアアクシデント時の安全確保をはじめとして包括的な安全システムの設計面では世界をリードし、安全性に優れた高速炉の実現へ向けて貢献を果たし続けている。

V. 「もんじゅ」の財産と夢を受け継ぐ

枢要技術を確立し、ノウハウも蓄積した

これまでの「もんじゅ」の建設などを通じて、原子力機構では高速炉発電システムの成立性を日本で初めて確認し、ナトリウム取り扱い技術、高温構造設計手法などのナトリウム冷却ループ型炉の枢要技術を確立した。また、原子炉容器などの大型薄肉構造物、蒸気発生器などの大型ナトリウム機器の製造や運転に関するノウハウが参加した各社に蓄積された。核燃料サイクル技術としては、軽水炉使用済み燃料から得られる多様な同位体組成のプルトニウムを利用した MOX 燃料によって炉心を構成し、炉物理試験によりその特性を確認した。

さらに、これまでの運転などの知見をもとに世界標準となる高速炉用維持規格の開発と規格化支援、高速炉の安全設計要件の開発を行い、世界をリードする役割を果たしてきたといえよう。

「負」の教訓も生かす

「もんじゅ」の設計・開発、製作および建設の各段階においてはこれまで、ほぼ 100 % の成果が得られており、これらは今後の高速炉の開発に幅広く適用できる。今後、廃止措置中に取得される技術情報も同様である。

また、「もんじゅ」の運営ではナトリウム漏えい事故後の対応や保守管理不備により、社会の信頼を失った。私たちはそのことも「もんじゅ」の残した教訓として真摯に受け止め、今後の「もんじゅ」の廃止措置を安全かつ確実に進めていく。特に、運営上の課題として抽出された有益な情報の収集・活用体制、技術の確実な継承と更なる高度化、社会の関心・要請を適切に運営に反映できる強力なガバナンス等については、今後の高速炉の実用化に向けた研究開発にも着実に反映していく。

－ 参考文献 －

- 1) https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/fr/pdf/002_01_02.pdf
- 2) 日本原子力研究開発機構, “高速増殖原型炉もんじゅ: その軌跡と技術成果”, JAEA-Technology 2019-007, 2019.
- 3) M. Sawada, H. Arikawa, N. Mizoo, “Experiment and analysis on natural convection characteristics in the experimental fast reactor JOYO”, Nuclear Engineering and Design, 120 (2-3), pp.341-347, 1990.
- 4) <https://www.jaea.go.jp/02/press2019/p19042201/>
- 5) M. Takeuchi, Y. Sano, S. Watanabe, H. Kofuji, T. Koizumi, T. Mizuno, “Minor actinides recovery from irradiated fuel for SmART cycle test”, Proceedings of ICAPP2017 No.17392, Apr. 24-28, Fukui and Kyoto, Japan (2017).
- 6) K. Sudo, T. Takano, K. Takeuchi, Y. Kihara, M. Kato, “Development of Pressing Machine with a Die Wall Lubrication System for the Simplified MOX Pellet Fabrication Method in the FaCT Project”, Proceedings of GLOBAL 2011 No. 387512, Dec. 11-16, Makuhari, Japan (2011)
- 7) T. Suzuki, K. Kamiyama, H. Yamamoto, S. Kubo, Y. Tobita, R. Nakai and K. Koyama, “A scenario of core disruptive accident for Japan sodium-cooled fast reactor to achieve in-vessel retention,” J. Nucl Sci Technol. Vol. 51, No. 4, pp.493-513 (2014).
- 8) Y. Tobita, K. Kamiyama, H. Tagami, K. Matsuba, T. Suzuki, M. Isozaki, H. Yamano, K. Morita, L. Guo and B. Zhang, “Development of the Evaluation Methodology for the Material Relocation Behavior in the Core Disruptive Accident of Sodium Cooled Fast Reactors,” Proc. the 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10), Okinawa, Japan, December 14-18, 2014, NUTHOS10-1220.
- 9) 第4世代ナトリウム冷却高速炉の系統別安全設計ガイドラインの構築, 第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計ガイドライン研究専門委員会, 日本原子力学会誌, Vol.60, No.12 (2018).

著者紹介

所属は全て、日本原子力研究開発機構

根岸 仁 (ねぎし・ひとし)

(専門・関心分野) 高温構造設計, プロジェクト管理

上出英樹 (かみで・ひでき)

(専門・関心分野) 高速炉熱流動, 試験研究, 原子炉設計, 国際協力

前田誠一郎 (まえだ・せいいちろう)

(専門・関心分野) 燃料サイクル技術開発, 燃料設計

中村博文 (なかむら・ひろふみ)

(専門・関心分野) 核燃料サイクル, 社会科学

安部智之 (あべ・ともゆき)

(専門・関心分野) 燃料サイクル, 原子炉の廃止措置

サイエンスよみもの

電磁ノイズの発生メカニズムの解明と来たるべき ノイズレス社会

大阪大学核物理研究センター 土岐 博

現代社会は電磁ノイズであふれています。電磁気学は100年以上も前に確立されているにも関わらず、回路設計やコンピュータ設計では考慮されておらず、ノイズは力づくで抑え込んでいます。使用した電力の大部分は放射ノイズとして、さらに熱として捨てられています。この書物では、ノイズ発生のメカニズムを、数式を使わないで明らかにします。ノイズの物理を理解した上で、ノイズ削減の方法を提案します。来るべきノイズレス社会では電線は地中化されノイズに邪魔されない安全な空間が実現しています。

KEYWORDS: *Electromagnetically induced noise, Normal-mode, Common-mode, Common-mode Noise, EM Radiation Noise, Symmetric Three-Line (S3L) Circuit, Maxwell's equations, 3D conductor transmission-line theory, Noise-free Society, Underground Installation of Power Transmission Cables*

I. はじめに

現代社会は電磁ノイズであふれています。普段は気づかないですが、カーラジオ(AM放送)をつけて街中を走っていると、時々放送が聞こえなくなるくらいのノイズが入ってきます。ノイズは家庭からも放出されています。電気代が安いというLEDはノイズを撒き散らしています。エアコンは夏も冬もフル回転していますが、電気を切り刻んで加工する技術(チョッピング技術)がノイズの源になっています。コンバータ・インバータ技術のおかげで電気代は安くなっています。その一方でノイズは野放図に放出されています。ノイズは電磁エネルギーの一つの形態です。エネルギーの無駄使いになっているばかりではなく、熱となり電気製品の温度を上げることにもつながります。

電気回路は100年以上もの間使われています。電気回路の基礎理論になっている電磁気学はMaxwellやHeavisideにより100年以上も前に完成しています。基礎理論がわかっており、これだけの長い間使われている電気回路でなぜ今でもノイズの問題を抱えながら電気を使っているのでしょうか。この記事ではノイズの発生メカニズムを根本から理解するところから話を始めます。

Mechanism of electromagnetic noise and its reduction for noiseless society : Hiroshi Toki.

(2020年4月26日 受理)

その上で、どのようにすればノイズを削減することができるかを書きたいと思っています。

II. ノイズの発生メカニズム

現代のノイズ事情の原因はどこにあるのかを知るために、現在の電気の使い方から議論を始めたいと思います。図1によく見かける回路図を書きます。図1(a)は左側に電源 e があり、抵抗 R_S が書かれています。ここでは簡単な回路になっていますが、もっと複雑な集中定数回路の場合もあります。左端の電気信号は1本線導体で右側に送られて、抵抗 R_L で表現されている集中定数回路で電気的な仕事をするという回路になっています。左端と右端には集中定数回路であるグラウンドが接続されており、実際にはグラウンド平面(いわゆるベタアース)などが想定されています。しかし、集中定数回路で示されたグラウンドは基準であるため常に電位が等しく、1本線導体に流れた電気信号は瞬間的に戻ることを意味します。

図1(b)では電気信号が戻ってくる部分も伝送線路で結ばれていて、2本線の伝送線路になっています。その上で左側で2本目の線だけが集中定数回路のグラウンドに接続されています。この際には集中定数回路で示されたグラウンドは単純に電位ゼロの基準と考えられています。一般的にはアースを取るための回路周囲の筐体などが想定されています。この1本線回路も2本線回路も電気の

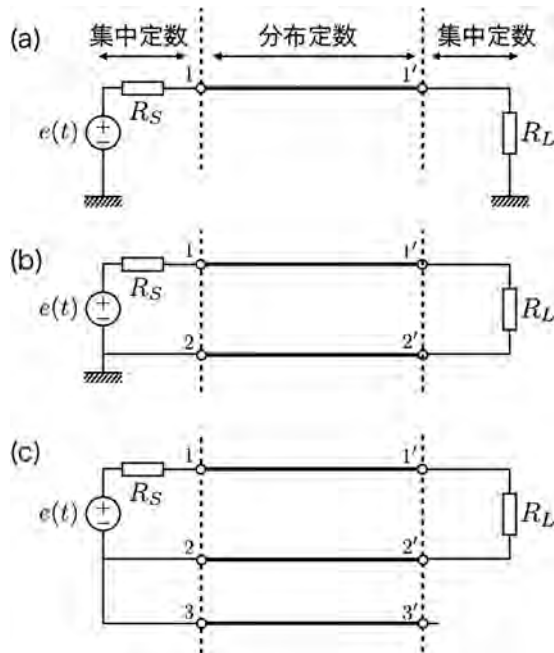


図1 (a)通常の伝送理論で教えられる回路図です。グラウンドがベタアースを想定していることが多いので、グラウンド部分は集中定数回路的に考えられることが多いです。(b)信号が戻ってくる部分も考慮されており、戻り線を分布定数回路としてとらえている図です。(c)環境(例えば回路ケース)を考慮し3本目を加えた場合の回路図。通常は電気信号を担う電荷は環境とも相互作用しているので、われわれの研究ではこの回路図を用います。

利用方法としてよく見かけます。

このどちらもの考え方は共通していて、グラウンドでは電気信号は時間的に変化していないことが想定されています。

実際のグラウンドでは電気信号は時間的に変化していないのでしょうか。実際にはこの2つの回路からノイズが出ていることを経験します。電磁ノイズは電磁波として空中に放出されるものと、伝導ノイズとして回路内を伝わっていくものがあります。アースをしている先の導体平面で電気信号が走っていないという仮定が間違っている可能性があります。ノイズといえども電気現象なので物理的に記述できる可能性があります。そのためには導体平面に信号が走ることを記述できるように、自由度を増やして考える必要があります。

そこで、図1(c)のように3番目の伝送線路を考えることにします。想定は回路の周辺にある導体や回路を取り囲む金属箱です。本稿の後半では3番目の導体を平面に置き換えた場合を議論します。しばらくの間はこの3番目の伝送線路を加えた場合に電氣的にどのようなことが起こるのかを議論したいと思います¹⁾。

Ⅲ. コモンモードの定式化

電気回路内の信号を考える場合、ノーマルモードとコモンモードという言葉を用いて議論する場合が多くあり

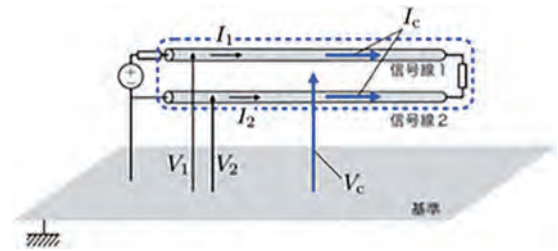


図2 一般的なコモンモードの扱い。コモンモード電圧 V_c は、基準導体から見た2本線で表された回路の電圧であり、コモンモード電流 I_c は、2本線で表された回路に同じ向きに流れる電流の和で表されます。電荷保存則があるので、このコモンモードの戻りの信号は平面導体を通して流れているはずですが。

ます。特にコモンモードはどこを走っているかが不明であり、ノイズの主要原因だと考えられています。しかし、ノーマルモードやコモンモードは定性的に議論される場合が多く、明確な定式化による議論は多くありません。そこでまず、本稿で取り扱うノーマルモードとコモンモードを、一次元伝送線路を用いて説明することにします。通常の伝送線路における信号は、電信方程式で記述されるように電圧 V と電流 I であり、それぞれ導体間の電位差と導体間に同じ大きさ逆向きに流れる電流を表しています(図1(b))。これらは差の物理量でありディファレンシャルモードと呼びます。ここでは、ノーマルモードと書くことにします。 V は基準である導体と信号線との間の電圧であり、 I は信号線と基準導体に同じ大きさ逆向きに流れる電流です。ノーマルモードは理想導体とみなされている基準から見た相対的な物理量であり、基準導体では物理的な変化は起こっていないとみなされています。2本線回路(図1(b))ではコモンモードは定義できません。

電気回路内の信号は差の物理量であるノーマルモードが用いられていますが、図2に示すように回路内を同じ向きに流れる和の電流も存在し、それはコモンモードもしくはサムモードとも呼ばれています。電荷保存則があるので、このコモンモードの戻りの信号は平面導体を流れているはずですが。コモンモードの存在は Jones と Bolljahn によってマイクロ波の電信に用いられる差動伝送線路内で確認されました²⁾。コモンモードが電磁ノイズの原因となることが認識され始めたのは、Paul と Bush が、回路内を伝搬するコモンモード電流が回路からの不要な外部放射の主な原因になることを理論的に証明したことから始まります³⁾。さらに、Bockelman と Eisenstadt が、コモンモードがノーマルモードに変換され電磁ノイズの原因となることを実験的に明らかにし、コモンモードとノーマルモードを定式化しています⁴⁾。ここまでは、基準導体には何も電気信号が走っていないという仮定が入っています。したがって、コモンモードの存在はわかったが、どのようにして電磁波放出が起こるのか、どれくらいの大さきのコモンモードが生じて、

どれくらいのコモンモード信号がノーマルモードに変換されるのかの定量化ができませんでした。

われわれの手法では、前述したとおり、議論を簡単にするために図2の基準導体を1本の伝送線路(信号線3)とみなし、一次元多導体線路の問題としてとらえています¹⁾。さらに信号線3を「基準」(つまり電位がゼロ)として考えるのではなく、3つの伝送線路が電位(U_1 , U_2 , および U_3)および電流(I_1 , I_2 および I_3)をもつ伝送線路とします。ここで基準は電磁気学に従って無限遠とすると、電磁波の放出ノイズまでもが記述できます。このような3本線の構造では、ノーマルモードおよびコモンモードの電圧(V_n および V_c)および電流(I_n および I_c)をそれぞれ以下の式で定式化できます。コモンモードの電位や電流には3番目の線の電位と電流が定義に加わっています。コモンモードの戻りの信号は3番目の線の流れています。

$$V_n(x) = U_1(x) - U_2(x) \quad I_n(x) = \frac{1}{2}(I_1(x) - I_2(x))$$

$$V_c(x) = \frac{1}{2}(U_1(x) + U_2(x)) - U_3(x) \\ I_c(x) = \frac{1}{2}(I_1(x) + I_2(x) - I_3(x))$$

これまでは無限大の大きさを持つ理想グラウンドとして用いられていた基準導体を考慮することができるようになります。こうすることで、変数が1つ増えることとなりますが、実際に境界条件を考えるとときには、むしろスッキリとした形で理論構築を行うことができます。事実、これまでは、Heavisideが導出した電信方程式を用いたコモンモード解析が行われていましたが、コモンモードの経路である基準導体は理想導体であるとしていたため、コモンモードを定量的に扱うことができませんでした。上のようにノーマルモードとコモンモードを定式化しましたが、われわれの定義ではコモンモード電圧 V_c と電流 I_c は信号であり、コモンモード信号がノーマルモードに変換されたときにコモンモードノイズとして観測できるとみなしています。つまり、コモンモードノイズが生じないようにするためには、コモンモード信号をゼロにするだけでなく、コモンモードからノーマルモードに移らない条件を見出すことが重要となってきます。

上述した $V_n(x)$ および $V_c(x)$, $I_n(x)$, $I_c(x)$ を3本線の多導体電信方程式に適用すると、伝送線路間におけるノーマルモードとコモンモードの間での信号のやり取りが記述できます。ノーマルモードとコモンモードの電圧と電流で書かれた電信方程式を見ると一般にはこれらのモードは結合します。実際にその様子を図3に示します。

図1(c)の3本線回路の左側から100Vの矩形波を入れた時に、インピーダンスマッチングを取ってある右端

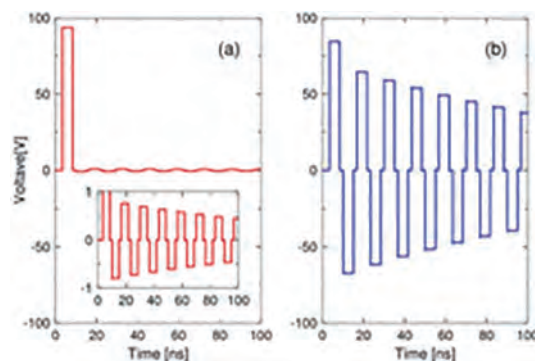


図3 図1(c)の回路で $e=100$ V の矩形波を入れた時のインピーダンスマッチングを取っている時の右端での電圧の時間変化を示しています。(a)ノーマルモード電圧(b)コモンモード電圧です。計算の詳細は論文⁵⁾を参照してください。

でのノーマルモード電圧(a)とコモンモード電圧(b)が時間の関数でプロットされています。まさしく3番目の線が信号を運んでおり、コモンモードでは右端でリング現象が起きていることが見えています⁵⁾。その結果ノーマルモードに信号が侵入することで約1%のリング的なコモンモードノイズがノーマルモード電圧に現れています。外部導体の影響を無視した時に入ってきているコモンモードノイズは多かれ少なかれ、このような現象によって引き起こされています。

それではどのようにすれば、ノーマルモードとコモンモードの結合が切れるのでしょうか。われわれはノーマルモードとコモンモードで書かれた伝送線路理論を持っています¹⁾。この理論から言えるのは、電線1と電線2の形状と材質が全く等しいことと、電線1から電線3までの距離と電線2から電線3までの距離が等しいことが満足されれば、電信方程式では2つのモードの結合が切れて、ノーマルモードだけの方程式と、それとは独立のコモンモードだけの方程式になります。すなわち3本線の伝送線路を作り、3番目の線を中心として電線1と電線2を配置するとコモンモードノイズはノーマルモードには侵入しないことが証明されます。すなわち、3本線対称回路にすることでコモンモードノイズを削減することができるということが理論的に証明されています。

IV. 集中定数回路と3次元構造を持った金属導体の接続

われわれのグループでは電磁ノイズ発生メカニズムに関する理論および数値計算、実験に関する研究を進めています。われわれは一般的に使われている回路(図3)でどのようにコモンモードが生じているか、またどのようにすればノイズが減少するかの研究を推進しています。特に、伝送線路と集中定数回路の接続部や電磁波放射という観点からは、時間領域での解析が重要であると考えています。時間領域における解析を行う際の重要な点は、分布定数回路と集中定数回路の接続部分の取り扱い

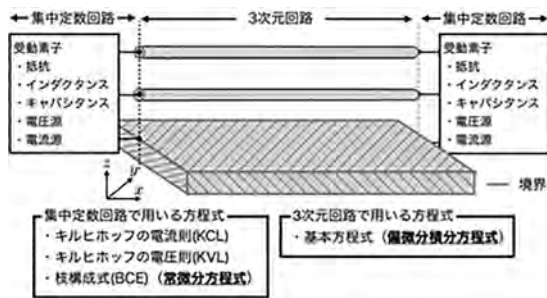


図4 電気回路における集中定数回路と分布定数回路の境界の模式図。集中定数回路は任意の導体境界に接続されています。集中定数回路(常微分方程式)と伝送線路や導体(偏微分方程式等)をどのように接続して理論や計算手法を行うかがわれわれのグループの課題です。

をどうするかがあります。つまり、分布定数回路は偏微分方程式(アンテナ効果を含む電磁場放射が入るとこれに積分項が加わる)で記述され、集中定数回路は常微分方程式で記述されるので、接続部分での取り扱いが複雑になります(図4)。この境界条件における課題を解決するために、これまでに分布定数回路の部分を中心定数回路として取り扱う方法がこれまで存在していましたが、われわれのグループでは、電磁ノイズ発生メカニズムを追求するには、分布定数および集中定数それぞれが従う微分方程式で解くべきであると考え、伝送線路に任意の集中定数回路を接続できる手法を開発しました^{6, 7)}。この方法では、回路理論で用いる接続行列を利用することで、伝送線路との接続を可能にし、数値計算への拡張も可能になります。この方法は1次元伝送線路だけでなく、任意の2および3次元導体に接続された集中定数回路にも適用可能になります。

最近、集中定数回路との境界におけるコモンモードノイズの発生の問題をさらに系統的に調べました⁸⁾。コモンモードからノーマルモードへの変換は、集中定数回路と導体の境界部分でも発生します。つまり、どのような素子がどのような形状や配置の伝送線路や導体に接続されているかで、コモンモードノイズの発生が決まります。これは直感的には当然のように思えますが、境界におけるコモンモード発生を解析的に求めるのは難しいです。そこで、まずは簡単なケースとして、3本線の1次元伝送線路において、それぞれの伝送線路に抵抗がつながっているような回路を考えます(図1(c))。この図では単純な集中定数回路になっていますが、全ての接続条件を考慮するため、3本線回路の境界の全てのノードが電圧源と抵抗で接続されているとします。その上で、境界条件もノーマルモードとコモンモードで表現します。2本線の1次元伝送線路では境界では、反射係数 Γ を特性インピーダンスと抵抗との関係式で与えることができます。インピーダンスマッチングの条件も反射係数で与えられ、境界での信号の振る舞いが計算できます。3本線になるとかなり複雑になりますが、キルヒホッフの法

則を使って計算することができます。接続条件式として反射係数行列 Γ を定義することができます。その中身は抵抗行列 R とインピーダンス行列 Z であり、ノーマルモードとコモンモードの変数で表現できるようになります。 Γ の非対角要素がゼロでない場合にはノーマルモードとコモンモードのカップリングが生じ、コモンモードノイズが生じます。これは、単純に伝送線路の特性インピーダンスと負荷のインピーダンスを一致するだけでは電磁ノイズの発生を抑えられるわけではないことを意味しています。つまり伝送線路内での電磁ノイズの発生を抑えるには Γ 非対角要素がゼロになるような回路構成を、集中定数と伝送線路の双方から検討することが重要となります。非対角要素をゼロにする条件の一つとしては、伝送線路を対称に配置し、(インピーダンスを整合させながら)集中定数回路を決定すればよいことがわかっています。

V. 集中定数回路と3次元構造を持った金属導体の接続

ここまでは、環境を1次元導体とみなして、定量的な計算をしてきました。3本線回路にし、電子部品や伝送線路を3番目の線を中心として対称に配置することで、コモンモードノイズを削減できることを述べてきました。現実には図4で示すように、2本線回路の近くにある導体は平面(箱も含む)であることが一般的です。そこで、われわれは、任意の形状の2次元および3次元導体に、任意の集中定数回路を接続することができる方程式を開発してきました⁹⁾。図5に薄い2次元導体が2つ(幾つでも良い)ある場合の回路系を示しています。マクスウェル方程式を使って電位(スカラーポテンシャル)・ベクトルポテンシャル・電流・電荷の従う偏微分方程式を書きます。それを図5に示すように有限の微小サイズのセルに分割し、それぞれのセルが従う差分化された連立の方程式に変換します。この連立方程式を数値計算で解きます。ある程度のセルサイズでの数値計算はサイズを小さくしすぎると計算コストがかかるので、接続条件を工夫してできるだけ高速に計算できるように定式化しました。そこでは、集中定数回路が接続されていない部

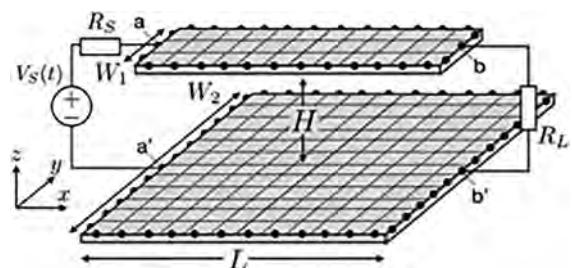


図5 薄い2つの2次元導体の場合の回路系が示されています。数値計算で伝送現象を取り扱いますが、たくさんのセルに分解してそれぞれの電位や電流を計算します。

分での計算を省略できる手法を解析的に導き出しました。われわれの方法と類似の方法として、部分要素等価回路法 (Partial Element Equivalent Circuit Method; PEEC 法) があります¹⁰⁾。PEEC 法とわれわれの方法との違いは、電位係数の計算方法が異なることと、PEEC 法は導体部分を集中定数の等価回路に変換していますがわれわれは直接偏微分方程式を解いているところにあります。この3次元導体を扱えるプログラムは非常に重要であり、いろんな場合の電気信号の振る舞いを記述できます。1次元の3本線回路で計算した場合も計算できますが、3番目の線を平面に変えて、2本線回路でのノイズの振る舞いを計算することができます。1次元の3本線回路で計算した結果と定性的には変わらない結果を得ています。われわれのグループはいろんなケースでノーマルモードでのコモンモードノイズを計算することが可能です。これらの計算から言えるのは、信号を走らせている回路をできるだけ、環境に存在する導体から離すことが重要です。その場合に、2本線回路では電子部品を2本線のどちらにも同じ位置で同じ性質を持ったものを配置することが必要です。そこにズレがあると必ず、環境との間でコモンモードが励起されることになります。その意味では、3本線回路を使い、3番目の線を中心線として、対称の位置に同じ性質を持った電子部品を配置するというのが一番わかりやすい方法だと考えられます。その際に3本線回路をユニットとし、そのユニットをできるだけコンパクトに作り、さらに環境にある導体から距離を取るということで、コモンモードノイズを最大限に削減することが可能になります。

VI. 来たるべきノイズレス社会

「来たるべきノイズレス社会」では必要な信号のみが空間を飛び交っており、必要ではないノイズは可能な限り削減されています。そこではノイズレベルが小さくなり、小さいシグナルでも受けることが可能になります。ノイズレベルが低いと作る信号の強度を小さくすることが可能になり、使う電力は小さくなります。

ノイズレス社会では何が可能になるのでしょうか。通信は電子機器の最も重要な部分です。車の自動運転がわかりやすいのでその例で話をすることにします。車の前にある障害物をカメラが検知するとします。その信号はブレーキ回路に運ばれて、必要だと判断される場合にはブレーキを作動させます。その際、最初にカメラから送り出す信号は車の中を走っているノイズレベルより高くないといけません。信号を作るところに大きなエネルギーを使うことになります。ブレーキ回路に運ばれる途中で外部から余計な信号が入ってくると信号が乱れます。最初に送り出す信号はこの邪魔者の存在も考慮してより強い信号を作る必要があります。受け取った信号をブレーキ回路が確認してブレーキを作動させることに

なります。ノイズレベルが高くシグナルに匹敵する大きさのノイズが入ってくると自動運転では致命傷になることがあります。うまくいっている場合でも常に大きな電力を使うことになります。これが現在のノイズ対策です。とにかく、邪魔なノイズはより大きな信号(電力)を使うということで力づくでノイズを押さえ込んでいると言えます。

ノイズレス社会ではノイズレベルが小さい値に低減されています。送り出す信号はノイズレベルを超える必要があるものの、小さな電力で良いことになります。受け取った信号は自信を持ってシグナルと判断でき、必要な行動に移すことができます。ノイズレス社会は環境に優しい社会とも言えます。電力の消費を最大限に抑えることで目に見えるメリットがあります。スマホやコンピュータの電力消費の速さには驚かされている人も多くいることでしょう。コンピュータのノイズレベルを下げる如果能够できればスマホ充電頻度が1ヶ月に1回の時代が到来することになります。生活は一変することでしょう。これが「来たるべきノイズレス社会」の姿です。

VII. まとめ

「来たるべきノイズレス社会」の姿とそれを実現する技術について、あまり詳細に入らないように書いてみました。原子核理論研究者であった私にとっては初めて電磁ノイズの話加速器物理の研究者である佐藤氏から教わったときにはノーマルモードもコモンモードも全く知りませんでした。これらの言葉を理解するために2006年に3本線集中定数回路の論文を書きました¹¹⁾。この段階において、3本線回路にして初めてコモンモードの存在を数式で表すことができることを勉強しました。この段階でもすでに3本線回路を考えると、電子部品を3番目の線に対称の位置に配置するとノーマルモードとコモンモードは分離することを学ぶことができました。次は伝送線路におけるコモンモードの役割を理解する必要がありました。ヘビサイド理論で表現されている伝送線路理論ではこのノーマルモードとコモンモードを定式化することは容易ではありませんでした¹²⁾。これが現在の伝送線路理論でノイズを扱うのを困難にしていることがわかりました。しかも、電気回路からは輻射ノイズが出ています。その現象を取り扱うためにはマクスウェル方程式から伝送線路理論を導出する必要がありました¹⁾。

ここまでは理論的にどのようにノーマルモードとコモンモードが結合するのかの研究でした。その後は、実際の回路ではどれくらいのノイズがノーマルモードに混入するのかを定量的に示すことを行いました。そのために、集中定数回路と分布定数回路を結合させる定式化を行いました。さらには、導体が平面の場合の定式化を行いました。これらの研究でシグナルはまさしく波動とし

て導体内を伝わる現象をいろんな場合で示しました^{5~9)}。これらの研究を通して、根本的にノイズを削減するには3本線対称回路を使う必要があることを示しました。

電気回路のさらに厄介なのは回路から電磁波が放出されることです。マクスウェル方程式で伝送線路理論を表現することで電磁波輻射を定量的に計算できるはずですが、実際に計算しようとするとな数値計算が破綻をきたします。つまり数値計算が不安定であるという問題にぶつかりました。この問題は非常に難しく、回路理論の業界ではこの壁を最近まで打ち破ることができませんでした。最近では数学者もこの問題に取り組んでいて、われわれのグループでは、今ではどのようにすればこの数値計算の不安定性を防ぐことができるかもわかっています。

このノイズ削減の一連の流れを理解するにはこれまでの電気回路理論では対応できないことを経験しました。そこで、新しい回路理論の教科書を書くことにしました¹³⁾。ノイズ削減の技術そのものを導入することは、そんなに難しいものではないと思います。しかし、実際に2本線回路の常識を覆して、3本線対称回路の概念を実社会に導入するには、各人が回路理論をしっかりと自らで把握することが最も大事なことだと思っています。近い将来に環境に優しい「ノイズレス社会」が実現することを心から願っています。

－ 参考資料 －

- 1) H. Toki and K. Sato, Journal of the Physical Society of Japan 81 (2012)014201.
- 2) E. M. T. Jones and J. T. Bolljahn, IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques 4 (1956)75-81.
- 3) Clayton R. Paul and Donald R. Bush, In IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 4 (1987)197-203.
- 4) David E. Bockelman, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 3 (1995)1530-1539.
- 5) S. Kitora, M. Abe and H. Toki, AIP Advances 4 (2014)117119.
- 6) H. Toki and M. Abe, Journal of the Physical Society of Japan 85 (2016)034801.
- 7) M. Abe and H. Toki, Scientific Reports 9 (2019)118.
- 8) S. Jinno, S. Kitora, H. Toki, and M. Abe, Scientific Reports 9 (2019)17891.
- 9) S. Jinno, S. Kitora, H. Toki, and M. Abe, Scientific Reports 9 (2019)15036.
- 10) A.E. Ruehli, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 22 (1974)216-221.
- 11) K. Sato and H. Toki, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 565 (2006)351-357.
- 12) H. Toki and K. Sato, Journal of the Physical Society of Japan 78 (2009)094201.
- 13) 阿部真之, 土岐博:「電気回路と伝送線路の基礎」丸善出版 (2018).

著者紹介



土岐 博 (とき・ひろし)

大阪大学

(専門分野/関心分野) 原子核物理の理論、電磁ノイズ、生体への放射線影響、突然変異とガンの機序研究

連載
講座よくわかる PRA
～うまくリスクを使えるために～

第3回 外部ハザードについて考えるべきこと

東京大学 高田 孝,
日本原子力研究開発機構 山野 秀将,
原子力安全推進協会 成宮 祥介

第3回では、外部ハザードについて、リスク評価におけるハザードの選定や評価として適用されるリスク分析について概説するとともに、一例として火山降灰ハザード評価について示している。また、リスク評価の目的は原子力施設の安全性の確保や向上であり、外部ハザードのリスク評価から得られた情報を用いたリスク対処に対するプロセスについても考察を行った。

KEYWORDS: PRA, External hazard, Risk

I. はじめに

地震や津波等の自然災害や、航空機落下等の人為的な原因に伴う原子力施設外からの施設の安全に対する脅威は、一般に外部ハザードと呼ばれる。これらの外部ハザードは基本的にその発生頻度において不確かさが大きく、決定論的な安全の考え方だけではなく、外部ハザードによりもたらされるリスクを評価することで、より安全への対処を合理的に実施することが可能となる。本報では、リスク評価において考慮すべき外部ハザードの考え方について解説するとともに、関連する課題について考察する。

II. 外部ハザードとリスク評価

1. 外部ハザードの定義

JIS 8051 : 2015 (ISO/IEC Guide51 : 2014)「安全側面-規格への導入指針」¹⁾ではハザードとは、「危害(人への傷害若しくは健康障害、又は財産および環境への損害)の潜在的な源」である。また日本原子力学会標準「外部ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基準 : 2014」(以下、「外部ハザード評価方法実施基準 2014」

という)²⁾では、外部ハザードの定義として「発電所外部で起きるハザード」となっている。従って、外部ハザードの定義は、「原子力施設の外部で発生する危害の潜在的な源」となる。

施設の外部で発生しうるハザードには自然由来のものと、人為由来のものに分けられる。表1に外部ハザードの例を示す。

本来、外部ハザードには人為ハザードとして、テロ行為等のセキュリティにかかる項目(表1中の「意図的な不法行為」)が含まれる。施設の安全に関するリスク評価(安全性評価)では、一般にセキュリティに関するものは別扱いとなっているが、安全とセキュリティに関する情報共有は重要であり、セキュリティの性質上、公開の場での議論は難しいが、具体的な評価を含め今後の課題であると言える。

なお、外部ハザードの具体例は国際的に全て一致しているものではない。例えば、他ユニットからの火災やミサイル等の扱いは施設外の観点で微妙となる。ただし、リスクを考える上で重要なことは、全体として網羅的に

表1 外部ハザードの分類と例

外部ハザード	
自然ハザード	人為ハザード
・地震 ・津波 ・外部火災 ・強風 ・火山噴火 ・隕石落下 ・生物学的現象 ・異常気象 ・その他	・原子力施設以外での爆発 ・原子力施設以外での化学物質放出 ・航空機落下 ・意図的な不法行為 ・その他

For Better Understanding of PRA - Guidance for Better Usage and Application of PRA (3) ; Consideration of external hazard in PRA : Takashi Takata, Hidemasa Yamano, Yoshiyuki Narumiya.

(2020年3月10日 受理)

■前回タイトル

第2回 リスクと不確かさ

検討することであり、カテゴリとしての線引きそのものを厳密にする必要は必ずしもない。

2. 外部ハザードの選定

原子力施設の安全性を評価する上では、考えられる全ての外部ハザードに対して、そのリスクを評価する必要は必ずしもなく、グレーディッドアプローチの考え方に基づき、評価すべきハザードとその評価方法について選定することが合理的となる。ここでは、外部ハザード評価方法実施基準 2014²⁾に基づき、その考え方を概説するとともに、課題について考察する。

(1) 潜在的なハザードの同定

まず、潜在的な単一および複合外部ハザードを網羅的にリストアップする。その際、対象とする施設固有の外部ハザードや、新たに観測された外部ハザードおよび新知見から想定される外部ハザードの有無を確認することが重要となる。

なお実施基準では、複合ハザード(Combined hazard)として、IAEA SSG-3³⁾をもとに、共通の原因で同時期に発生するもの(原因共有事象)とそのハザードの発生(発現)により他のハザードを誘発するようなもの(随伴事象)の観点から整理されている。一方で、単一ハザードの同時期発生は、施設の安全に影響を及ぼす規模の同時発生の確率は極めて小さいため除外されている。しかしながら、一つのハザードの発生により施設が影響を受けた場合、その影響を拡大させる、あるいは最初のハザードでは致命的とならないが、他のハザードが発生した場合には影響を拡大させる別のハザードは、単独で発生する時よりも小さい規模で施設に影響を及ぼすことが考えられる。これらの影響が独立ではない複合ハザードの考慮については、その取り扱いの考え方の整理が今後必要になると思われる。

(2) ハザードの特性分析による選別

次に、同定されたハザードに対して、幾つかの要素に着目した特性分析を行い、リスク評価を行うハザードを同定する。実施基準では、以下の要素が提案されている。

- ・外部ハザードの“発生”
- ・外部ハザードの“到達”
- ・外部ハザードの“プラントへの影響”

本選別の段階では、定性的な評価で十分であり、目的とするリスク評価に有意かどうかの判断を行うことになる。なお、施設のリスクを評価する観点では、最新知見の反映を含め、継続的な見直しが重要であり、本選別も定期的にその十分性を見直すことが必要である。

また施設に対する“影響”については、個々のハザードの“作用”の観点で整理することで、同様なハザードのグループ化が容易となる。

3. 外部ハザードのリスク評価

2. で選定された外部ハザードに対して、そのリスクを評価するが、選定されたハザード全てに対して、PRA に代表される詳細な定量的リスク評価が必要とはならない。実施基準では、発生頻度、施設に対する影響、および事故シナリオの観点で以下に示すいずれかの手法を用いることとしている。

- (1) ハザード発生頻度分析もしくは影響度分析によるリスク判断
- (2) 裕度評価
- (3) 決定論的な CDF 評価
- (4) PRA 等の詳細なリスク評価

なお実施基準では原子力発電所を対象としているため、(3)において CDF (炉心損傷頻度, Core Damage Frequency) 評価となっているが、これは個々の原子力施設において放射性物質の外部への放出に関するリスク指標に置き換えるものとする。

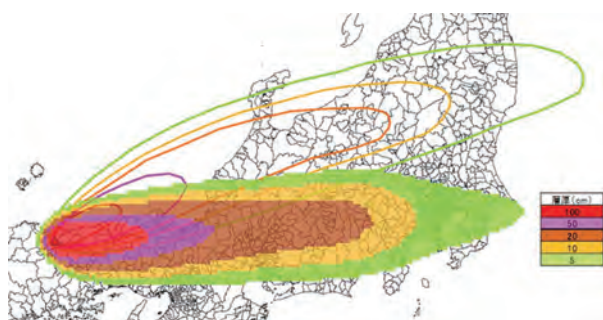
(1)～(3)において、対象とするリスクが無視できないと判断された場合、(4)で示される PRA 等を用いたリスク評価が必要となる。言い換えれば、実現可能な適切な対処によりリスクに対する十分な裕度が達成できるものについては、詳細なリスク評価は不要となる。

PRA の活用を含めた合理的なリスクの判断(うまくリスクを使うこと)のためには、関連するステークホルダー間で、上記(1)～(3)と(4)との判断基準に関する合意形成を行うことが重要となる。また、外部ハザードは不確かさが大きいことを考慮し、運用実績や最新知見を踏まえた定期的な判断基準の見直しと、判断基準が見直された際の既存施設の対処の考え方の整備が必要となる。

Ⅲ. 外部ハザードの評価例(火山降灰)

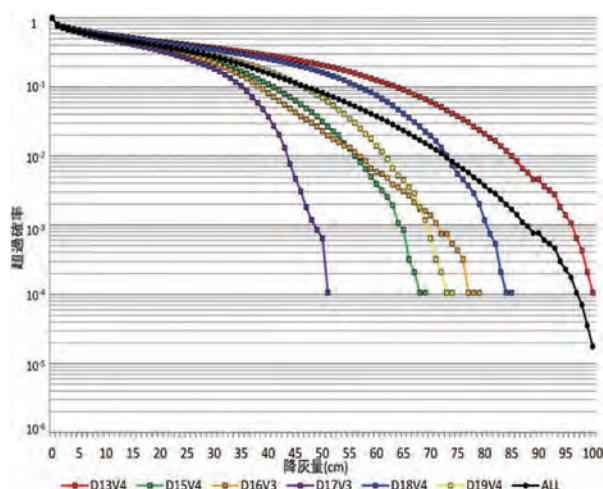
以下では、外部ハザードの評価例として、火山に伴う降灰について示す。火山に伴う降灰事象では、軽水炉においては補助系(非常用発電機や冷却系としての空気フィルタ等)の機能喪失が、ナトリウム冷却高速炉においては最終除熱源(空気)の損失が発生する。降灰事象では、降灰の濃度と継続時間がリスク評価上重要となる。降灰ハザード評価では、火山の発生頻度については地質学的調査をもとに、降灰時の濃度と継続時間については数値シミュレーションを援用している。

降灰のシミュレーションには Tephra2⁴⁾を用いた。降灰に影響を及ぼす入力値としては、噴出量、噴煙柱高度、平均粒径ならびに粒径分布があり、これらをパラメータとした感度解析を行い、地質調査からの推定と比較することで、現象を再現する6条件を選定した⁵⁾。図1に降灰量の比較例を、図2に6条件での条件付き降灰量の超過確率の評価結果、ならびにその平均(降灰モデル値)を示す。



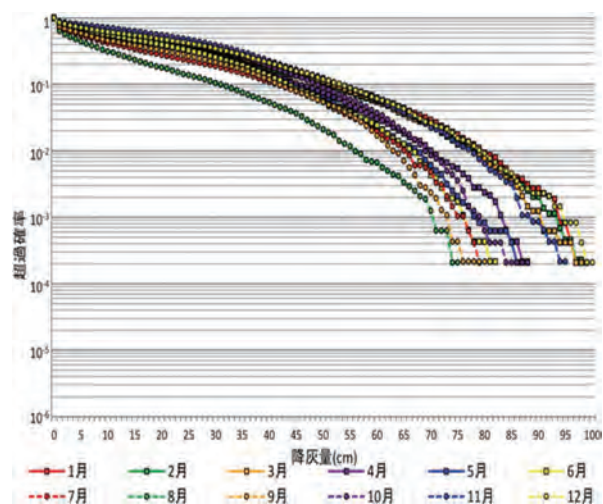
(出典：原子力機構，平成 25 年度文科省事業，P. 3. 2. 2-31)

図1 Tephra2を用いた降灰評価⁵⁾
(ラインが地質調査結果からの推定)



(出典：原子力機構，平成 26 年度文科省事業，P. 3. 2. 2-22)

図2 入力パラメータの不確かさ⁶⁾



(出典：原子力機構，平成 26 年度文科省事業，P. 3. 2. 2-22)

図3 季節による風向きの不確かさ⁶⁾

降灰は、上空の風向きによっても変化する。このため、1年間の気象データをもとに、プラント位置での降灰量の変化を図3の通り計算し、それらの平均を求め⁶⁾、噴火の発生頻度(地質学的知見より推定、 2.1×10^{-4} /年)を乗じることでハザードを求めている。

IV. 外部ハザードに対する対処

外部ハザードのリスクを評価する目的は、原子力施設の安全性をより確実に把握し向上させることである。リスクを安全性向上にうまく活用するためには、リスク評価から得られた知見を具体的な対処として施設に反映することとともに、対処を実行した結果をフィードバックするプロセスを確立する必要がある。

図4に、リスクマネジメントのプロセス(ISO31000:2018)⁷⁾を踏まえた外部ハザードに対する対処について示す。プロセスの基本構造としては、「0. 目指すべき目標」、「1. リスク特定・分析」、「2. リスク評価」、「3. リスク対応：対処の検討」、「4. リスク対応：対処の実施」および「5. 新知見収集・分析」のステップとなっている。

このプロセスを効果的に実施するためには、リスク情報を活用した統合的な意思決定(IRIDM; Integrated Risk-Informed Decision Making)のプロセスが適用できる。2. で得たリスク情報を用いて3. において対処を選ぶ際に、リスク評価結果に加え、対処実施に必要な費用、効果、工期、社会の意見などを考慮して決める、というプロセスが該当する。また個々のステップにて問題が発生した場合、例えば複数のリスク解析手法から一つを選ぶなどの場合にも、IRIDM プロセスを適切なエレメントを選択して用いることが可能と考えられる。

V. おわりに

本稿では、原子力施設の安全性確保の観点からリスクとして取り扱われる外部ハザードの選定や用いられる評価の考え方について概説した。また外部ハザード評価の例として、火山降灰ハザードの評価について説明するとともに、得られたリスク評価を活用した安全確保に向けた対処の考え方も併せて考察した。

本来、外部ハザードには、セキュリティとしての「意図的な不法行為」も含まれており、公の場での議論は難しい側面はあるものの、安全とセキュリティの情報共有は今後の課題として挙げられる。

また現状においては、原因共有事象や随伴事象の観点としての複合ハザードについては考慮されているものの、考慮すべき複合(重畳)の考え方についても継続した議論が重要と考えられる。

－ 参考資料 －

- 1) 日本工業規格，JIS8051: 2015 (ISO/IEC Guide51: 2014)，2015.
- 2) 日本原子力学会，日本原子力学会標準 外部ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基準：2014，AESJ-SC-RK008: 2014, 2014.

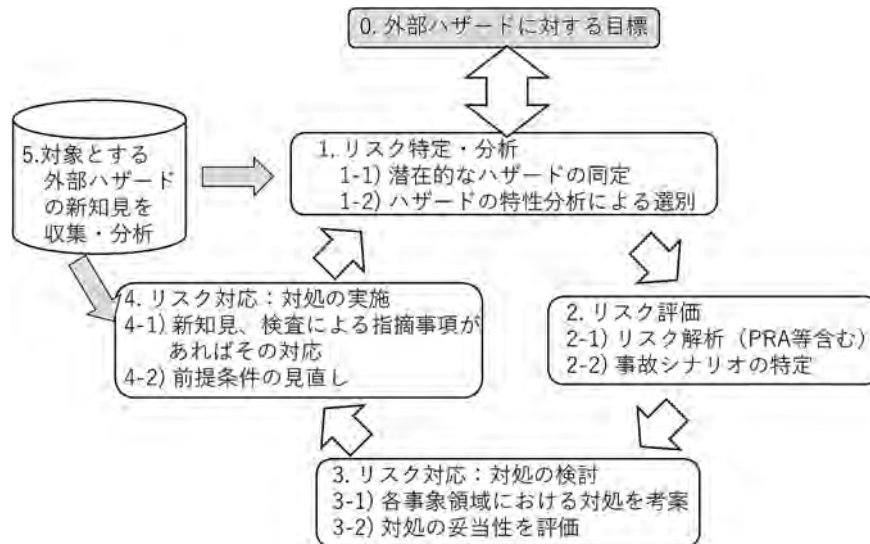


図4 外部ハザードへの対処のプロセス

- 3) IAEA, Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standard SSG-3, 2010.
- 4) Bonadonna, C. and Houghton, B. F. Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits, Bull. Volcanol., 67, 441-456, 2005.
- 5) 日本原子力研究開発機構, 平成 25 年度文部科学省原子力システム研究開発事業「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の開発」平成 26 年 3 月.
- 6) 日本原子力研究開発機構, 平成 26 年度文部科学省原子力システム研究開発事業「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の開発」平成 27 年 3 月.
- 7) 日本工業規格, JIS Q3100: 2019 (ISO 31000: 2018), 2019.

著者紹介



高田 孝 (たかた・たかし)
 東京大学
 日本原子力研究開発機構
 (専門分野/関心分野) 原子力安全工学,
 リスク評価, 熱流動, 数値シミュレーション



山野秀将 (やまの・ひでまさ)
 日本原子力研究開発機構
 (専門分野/関心分野) 原子力安全工学,
 リスク評価, シビアアクシデント評価



成宮祥介 (なるみや・よしゆき)
 原子力安全推進協会
 (専門分野/関心分野) リスク評価,
 リスクマネジメント, 規格標準

連載
講座

核セキュリティ入門

第3回 核セキュリティのための核物質検知技術

京都大学複合原子力科学研究所 高橋 佳之,
日本原子力研究開発機構 小泉 光生

核セキュリティの向上に関して、世界的にソフト・ハード双方でさまざまな対策が行われている。今回は、不法な核物質を検知するための技術開発について、放射線計測技術の観点から開発が進んでいるわが国の研究開発の動向について解説を行う。京都大学では、中性子計測による核物質検知手法を新たに開発し、これらの手法を用いた核物質検知システムの開発を行っている。原子力機構においては、核共鳴蛍光非破壊分析法を用いた核物質検知システムの開発を行っており、さまざまな試験を通して成果を挙げている。核物質検知技術は、安全・安心の社会構築に向けたインフラ技術として、わが国でも更なる研究開発が求められている。

KEYWORDS: *Nuclear Security, Special Nuclear Material, Active Neutron Method, Threshold Energy Neutron Analysis (TENA), Delayed Neutron Noise Analysis (DNNA), Nuclear Resonance Fluorescence (NRF), Laser Compton Scattering (LCS)*

I. はじめに

原子力技術は、発電をはじめとしてさまざまな産業に用いられており、世界各国において、われわれの日常生活にとって欠かせないものとなっている。その一方、原子力技術は兵器として転用された場合、人類にとって多大な脅威となる。1990年代以降、ソ連の崩壊とロシアの核管理の不徹底により、ルース・ニュークス (loose nukes) と呼ばれる旧ソ連諸国をめぐる核関連物質の密輸や盗難、核兵器本体の紛失疑惑が相次ぎ、これらがテロリストの手に渡り不法な核実験などの行為に利用される可能性が国際社会で認識され始めた。さらに、2001年に米国で発生した9.11同時多発テロ事件をきっかけに、IAEA (国際原子力機関) を中心として、それまでの「核物質防護」ではなく、核テロ対策の意味合いが強い「核セキュリティ (核物質、その他の放射性物質、その関連施設およびその輸送を含む関連活動を対象にした犯罪行為又は故意の違反行為の防止、検知および対応¹⁾)」という概念が、広く使われ始めた²⁾。

原子力の平和的利用を拡大するためには、核兵器への転用が可能な核物質の取り扱いや核兵器開発につながる

技術の拡散を伴ってしまうため、原子力利用の平和的恩恵を受けるためにも、世界的に核セキュリティの取り組みを一層強化していくことが重要視されている。例えば、2014年3月の核セキュリティサミットでは、管理の強化が宣言されるなど、テロ組織への核物質の流出を防ぐための取り組みは近年各段に強化されている。しかし、万が一核物質がテロリストの手に渡ってしまった場合には、現在のテロ対策インフラに導入されている検知装置ではウラン235を検知することはできない。検知装置には、高い発見能力、低い誤警報率、短時間での検査等が求められており、9.11以降、米国では精力的に、あらゆる核物理現象を利用した核分裂物質検知技術の研究開発が進められているが、高濃縮化することで大量破壊兵器として用いられる可能性のあるウラン235に対しては、現在のところわが国のみならず世界的にも有効な検知装置は存在しない。

これらを受け、わが国においても、放射線計測技術等を用いた核物質検知技術の研究開発が進められている。本解説では、わが国での現状として、京都大学 (Ⅱ章) と日本原子力研究開発機構 (Ⅲ章) で行われている核検知技術の研究開発について紹介する。

Ⅱ. 中性子計測による核物質検知手法

1. アクティブ中性子法

中性子を用いた核物質検知手法として、測定対象となるウラン (U) やプルトニウム (Pu) からの自然壊変によって放出される中性子を測定して核物質の検知を行うパッ

Introduction to Nuclear Security (3) ; Nuclear material detection technique for nuclear security : Yoshiyuki Takahashi, Mitsuo Koizumi.

(2020年1月27日 受理)

■ 前回タイトル

第2回 核セキュリティ強化に向けた取り組み

シブ中性子法がある。しかし、自発核分裂により発生する中性子量は、U のみの場合は自発核分裂がほとんど起きないため、測定される中性子は極めて微量であり、核物質検知は困難である。そこで、測定対象物を中性子や γ 線などで照射して核物質に核反応を誘起し、その結果発生する中性子を検出することで核物質の分析を行う方法がアクティブ中性子法である。アクティブ中性子法は照射線源強度を増大することにより核分裂により発生する中性子量を増やすことができ、分析感度を高めることができるので、一般にパッシブ中性子法よりは感度が高い。また、照射する中性子として高速中性子を用いれば透過性が高いので、容器内の対象物や大きな対象物や高密度の対象物などの測定が可能となる。これまでに開発されているアクティブ中性子法を用いた核物質検知手法の例を示す。

・DN(Delayed Neutron)法

核分裂によって生じる遅発中性子を測定することにより核物質の有無を判断する手法である。核分裂によって生ずる中性子のうち、遅発中性子の割合は全体の U を対象とした場合 0.7 % ほどと低いため、検出効率を高めることが本測定手法の問題点である。

・DDT(Differential Die-away Technique)法³⁾

中性子の熱化にかかる時間遅れを利用した計数法である。照射パルス立ち上がり後に遅れて発生する核分裂中性子を計測し、核物質の有無を判断する。

・エネルギー弁別法

低速中性子を試料中に照射し、核物質が存在した場合に核分裂による入射中性子以上のエネルギーを持つ中性子が現れた時、核物質の存在を判断する手法である。問題点としては、熱中性子の場合と比べて高速中性子の検出効率が低いことである。

・中性子雑音解析を用いた核物質検知手法

核分裂の影響により測定される中性子がポアソン分布からどれだけずれているかを解析することにより、核物質の有無を判断する手法である。

京都大学では、上記に示した手法のうち、エネルギー弁別法と雑音解析手法を改良した閾エネルギー中性子弁別法と遅発中性子雑音解析を用いた核物質検知手法を新たに開発した。以下にその方法について簡単に説明する。

2. 閾エネルギー中性子弁別法

核燃料物質に中性子を照射すると、核分裂反応によって平均約 2 MeV の高エネルギー中性子が発生する。そこで、入射中性子に 2.45 MeV の単色中性子を放出する D-D 中性子源を使用することによって、核物質の有無を、照射する 2.45 MeV 中性子のエネルギーより高いエ

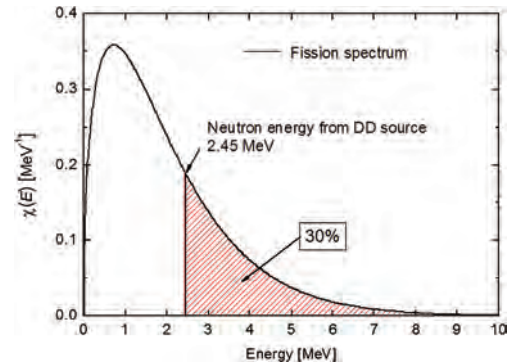


図1 閾エネルギー中性子弁別法概念

ネルギーの中性子の有無で判定する方法が閾エネルギー中性子弁別法 (Threshold Energy Neutron Analysis: TENA) である。2.45 MeV の中性子がウラン 235 やプルトニウム 239 といった核物質と核分裂を起こした場合の核分裂中性子スペクトルは、図1のような最大約 10 MeV までの連続エネルギー分布をもった形で表される。対象に核物質がある場合、図中の斜線部のように、2.45 MeV より大きいエネルギーをもった中性子が検出される。一方、対象に核物質がなければ、原理的には 2.45 MeV より小さいエネルギーをもった中性子しか存在しない。従って、図1の斜線部の領域にあるような 2.45 MeV 以上のエネルギーをもった中性子を測定することができれば、核物質を検知することが可能となる。

京都大学エネルギー理工学研究所では、慣性静電閉じ込め型核融合装置 (Inertial Electrostatic Confinement fusion device) の開発を進めており、これを核物質検知システムの中性子源として使用する。本装置は小型でトリチウムなどの放射性物質を使用しない点など、ポータブル型の核物質検知装置の開発などにも適している。検出器には、従前から高エネルギー中性子測定に使用されている有機液体シンチレータや、新しく開発した張力準安定性流体検出器を使用し、S/N 比改善のための研究開発を進めている。

3. 遅発中性子雑音解析手法による核物質検知

中性子雑音解析手法は、原子炉の動特性パラメータや未臨界度測定で使用されている方法で、中性子の時系列データから、解析により核分裂の連鎖反応の有無を判定する方法である。原子炉内の中性子数の時間変化は、核分裂反応による中性子発生や吸収反応による中性子消滅などの中性子と原子核との核反応が確率事象であり、また、核分裂により発生する中性子の個数(ウランの熱中性子による核分裂の場合は平均 2.4 個)が確率事象であるため、定常出力での運転中の原子炉においても、検出器のカウントを時間関数として示すと平均値の周りに不規則な揺らぎが存在している。この原子炉内における中性子数の不規則な揺らぎは中性子炉雑音(または炉雑音)

と呼ばれるものであり、この揺らぎの中に原子炉の動特性などに関する情報が含まれている。炉雑音から原子炉の情報を得る手法を中性子雑音解析手法(以下、雑音解析手法)とよび、これまでファインマン α 法(Feynman- α 法)、ロッシ α 法(Rossi- α 法)や周波数解析法等が考案されている。

Feynman- α 法^{4,5)}は分散対平均法とも呼ばれ、ある時間間隔(ゲート幅と呼ぶ)において検出された中性子カウンターの分散と平均の比(以下、分散対平均と呼ぶ)を計算し、この値を時間間隔の関数として求める手法である。例えばAm-Beのような放射性物質の崩壊(この場合はAmの α 崩壊)により発生する中性子の場合、放射性物質の崩壊がポアソン分布に従うため検出される中性子のカウンターのポアソン分布となり、その場合は分散と平均が等しいため分散対平均の値は1となる。しかし、核分裂の連鎖反応がある場合には中性子計数率分布はポアソン分布からずれて、この値は1にはならない。この1からのズレの度合いをY値と定義する。そして、時間間隔に対してY値をプロットし、それを理論的にフィッティングすることで即発中性子減衰定数 α を求めることができる。この解析は比較的容易であり、また、パルス中性子源を用いた場合のフィッティング式も存在するため、本手法における核物質検知ではこの方法を採用した。

新しく考案した遅発中性子雑音解析手法(Delayed Neutron Noise Analysis)は遅発中性子領域に着目した雑音解析であり、外部からの中性子源として、2.節で紹介したD-D中性子源のような加速器などによるパルス中性子源を使用する。パルス中性子源を使用した場合、検出器で得られた時系列データは、即発領域のカウントと遅発領域のカウントが交互に存在する。即発領域とはパルス打ち込み後中性子のカウントが立ち上がったのちに指数関数的に減衰する部分でありこのカウントは主に即発中性子によるものである。一方、遅発領域とは、即発中性子の減衰に比べ、減衰が緩やかである遅発中性子が支配的な領域である。この即発領域のカウントは、計数率が高いため、検出器の不感時間の影響によりカウントの数え落しが存在すること、また、パルス入射直後は体系内での中性子束分布が基本モードになっていない(すなわち、中性子源位置の影響を強く受けた中性子束分布になっている)ため、精度の良い測定が難しいとされている。そこで、パルス入射時刻を時系列データ中に記録し、この数え落としが存在する即発領域のカウントを除去すれば、数え落としの少ない遅発領域のカウントのみを抽出することができる。この遅発領域のカウントを利用して雑音解析を行なったものが遅発中性子雑音解析である。核物質が存在する場合、遅発領域は遅発中性子先行核から発生する中性子とその中性子を中性子源にして核分裂の連鎖反応により生じた即発中性子によってカウン

トが維持されている。この遅発中性子先行核から出る遅発中性子が発生する統計的変動はポアソン分布であるが、遅発中性子先行核の周囲に存在する核分裂性物質により核分裂連鎖反応が生じるため、検出されるカウンターの頻度分布は非ポアソン分布となる。よってこの遅発領域において雑音解析を行い、Y値を評価することにより、核物質の存在が検知できる。京都大学では、複合原子力科学研究所にある臨界実験装置を用いて、高濃縮ウランによる実証試験を実施した。その結果、通常の雑音解析法では検知できなかった核物質を遅発中性子雑音解析法で検知できることが分かった⁶⁾。

Ⅲ. 核共鳴蛍光非破壊分析法

1. 核共鳴蛍光

原子力機構では、文部科学省「核セキュリティ強化等推進事業費補助金」の一環として技術開発を行っている。その一つは、レーザー・コンプトン散乱ガンマ線をプローブとした原子核共鳴蛍光散乱(Nuclear Resonance Fluorescence: NRF)による核検知・測定技術開発である。これは、核種特有のガンマ線吸収・放出を用いるため、核種を選択的に測定することができる。また、高エネルギーのガンマ線を使用するので貫通力が高く、粒子放出の閾値以下のガンマ線エネルギーを使用するので、照射による放射化がほとんどないという点に特徴がある。今後、原子炉使用済燃料等に含まれる核物質の測定や、貨物中に隠ぺいされた核物質の検知などに適用する技術の有力な候補になると考えている。これまで、原子力機構、量研、KEK、兵庫県立大学とで、研究を進めてきた。本章では、これまで行ってきたNRFの技術開発について簡単に紹介する。

2. 核共鳴蛍光散乱

NRFは、原子核が特定のエネルギーのガンマ線を吸収し、励起状態になった後、ガンマ線を放出して脱励起する現象である。図2に示すように核種(U-235や、Pu-239など)によって、それぞれ異なる励起エネルギー

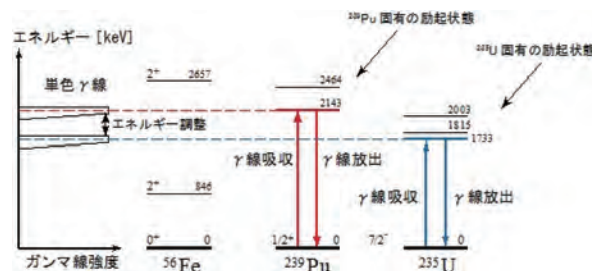


図2 NRF概念図

Pu-239やU-235等の核種には固有の励起状態が存在し、励起エネルギーに等しいガンマ線が照射されると、ガンマ線の吸収・放出が起きる。測定対象以外の核種では、励起エネルギーが異なるためNRFは起こらない。

の状態が存在するため、測定したい核種の励起エネルギーに等しいガンマ線を照射すると、その核種のみを脱励起することができる。したがって、脱励起の際に放出される散乱されたガンマ線を計測することにより非破壊で核種の検知・測定が可能となる。

3. レーザー・コンプトン散乱によるガンマ線ビームの発生

NRFにより核物質の非破壊検知・測定を行うには、任意のエネルギーの(できれば単色に近い)大強度のガンマ線が必要である。核検知・測定に適用する1 MeV以上の準単色ガンマ線を発生できるエネルギー可変光源としては、レーザー・コンプトン散乱(Laser Compton Scattering; LCS)が唯一の技術である。

図3は、LCSの原理を模式的に示したものである。加速器で光速近くまで加速した電子とレーザー光を衝突させると、電子によって散乱されたレーザー光は、電子の運動エネルギーを受け、高エネルギー光子となる。LCSで発生するガンマ線のエネルギーは、電子ビームのエネルギーやレーザーの波長、散乱角によって決定され、コリメーターによりガンマ線を切り出すと、単色に近いガンマ線ビームを引き出すことができる。

高強度LCSガンマ線を得るには、電子線、レーザー共に高強度でかつ高密度なビームを用いかつ高繰り返しで衝突させる必要がある。そこで、原子力機構、量研、KEKは、エネルギー回収型リニアック(ERL)で電子ビームの密度を上げるとともに、レーザー蓄積装置を用い高密度レーザービームと高繰り返しの衝突を可能とする技術を開発(図4、5)した⁷⁾。

KEKつくばキャンパスのコンパクトERL(エネルギー回収型リニアック)で行った実験では、電子ビーム(20 MeV, 57 μ A)を最小30 μ mの微小サイズでレーザービームと162.5 MHzの高繰り返しで衝突させた。電子ビームの進行方向でエネルギー6.9 keVの準単色X線を取り出し、それを測定した結果、毎秒 2.6×10^7 個のX線が発生したことが分かった⁷⁾。このことから、ERLの最大電流10 mAで運転した場合には、毎秒 10^9 個に近いX線の発生を期待できると想定される。将来、電子エネルギーを350 MeV程度、13 mAに上げ、レーザー強度の向上(蓄積したビーム強度で700 kW)を実現

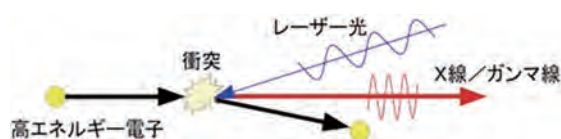


図3 レーザー・コンプトン散乱の原理
高エネルギー電子とレーザー光子との衝突により、光子は散乱され、その際に電子から得たエネルギーで反対方向に散乱されるガンマ線となる。

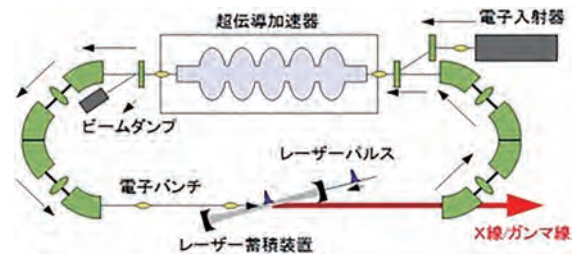


図4 LCSガンマ線の発生原理

電子入射器からの電子ビームは、超伝導加速器で加速された後、LCSガンマ線の発生に用いられる。さらにその後、電子ビームは再び超伝導加速器へ導かれるが、その際、電子が減速されるタイミングで超伝導加速器へ電子を入射することで、電子のエネルギーを回収する。減速された電子ビームは、ビームダンプへ捨てられる。装置の全長は25 m程度になると考えている。

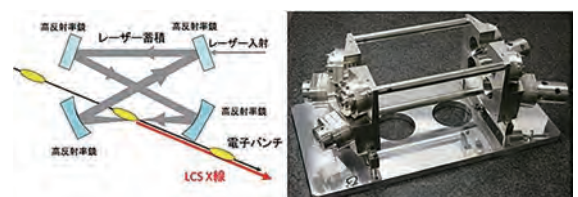


図5 レーザー蓄積装置

入射されたレーザーパルスは、4枚の高反射率鏡で作られる閉軌道(約1.8 m)を周回する。この周回するレーザーパルスと新たなレーザーパルスの入射を精密に一致させ次々と重ねることで、蓄積されるレーザーパルスの強度を増すことができる。

すれば、図2に示すような核物質のNRFに必要な2-3 MeVの高強度準単色高強度ガンマ線(毎秒 10^{13} 個)を発生することができると考えられ、文献8で提案された直径2 cmのガンマ線ビームによる核検知を効率的に進められる。

4. シミュレーションコードの開発

NRFを用いた実用装置の設計においては、LCSガンマ線を試料に入射してNRFガンマ線を検出するまでを、シミュレーションを用いて検出器の配置などを最適化し、また混在物などの影響を考慮する必要がある。しかしながら、NRFの核データの整備はあまり進んでおらず、また、NRFを組み込んだシミュレーションコードは存在していなかった。そこで、開発コードの組み込みが可能で、汎用性の高いGeant4で開発を進めてきた⁹⁾。実際にNRF測定を行う場合、測定試料は単体で置かれることはなく、何らかの構造物や不純物に囲われている。そのため、NRFではないガンマ線弾性散乱が、測定のバックグラウンドとなる。このような弾性散乱には、レーリー散乱、原子核トムソン散乱、デルブリュック散乱がある。1 MeV以上のエネルギー領域では、デルブリュック散乱が主たる寄与となる。しかしながら、ガンマ線の弾性散乱を評価する計算コードに、デルブリュック散乱が考慮されているものがなかったため、これらの

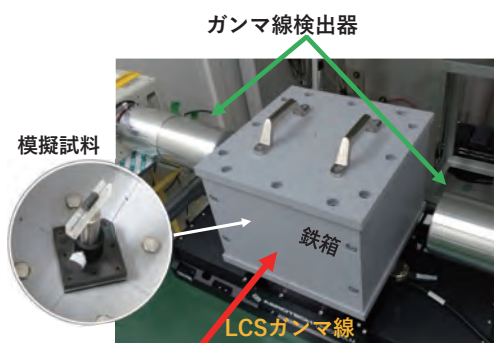


図6 NRF 核検知実証試験

自動ステージ上に約 30 cm の鉄の箱(正面と横一面は厚さ 1 cm, 後方と他の面は厚さ 3 cm)を設置, その中に模擬試料を入れた。入射ガンマ線のビーム径は Φ 4 mm で, NRF を鉄箱の両横にあるガンマ線検出器で測定した。

弾性散乱過程の寄与をすべて足し合わせて微分断面積を求める計算コードを Geant4 に実装した¹⁰⁾。

5. 核共鳴蛍光散乱の核検知技術への適用

港湾等において重遮蔽物(コンテナなど)の中に隠された核物質の持ち込みの防止は, 核セキュリティにおける課題とされている。一般に, コンテナなどに核物質や放射性物質が隠ぺいされているかどうかを調べるためには, モニタリングポストなどを通して調べられる。モニタリングポストは, ガンマ線や中性子の検出器であり, 放射線を放出する物質の検知に有効である。しかしながら, 巧妙に隠された核物質については, 検知することができない。X 線を使ったイメージング技術も開発されているが, 重元素と核物質を識別することができない。それに対し, NRF 技術を用いると核物質かどうかを確実に判断することができる。例えば, 海上輸送コンテナ(鉄 5 mm 厚)の X 線検査で怪しい部位が見いだされたときに, コリメーターを通した毎秒 10^{11} 個の LCS ガンマ線ビームを照射すると, 容器に隠された 1 kg の U-235 を 1 点につき数秒でサーベイできると考えられる⁸⁾。

そのことを実証するため, 兵庫県立大学のニュースバル施設において LCS ガンマ線ビームを用い, 図 6 に示すような鉄箱に入れた模擬試料 Pb-208(直径 8 mm 円柱)の検知試験を行い, それに成功した。

IV. おわりに

本解説では, 京都大学と原子力機構で進められている核物質検知技術の開発の現状について紹介した。このような技術は, テロに屈しない安全, 安心の社会を実現するための次世代インフラとして非常に重要であり, テロに対してこのような検知装置を保有し配備すること自体が, テロの企みを躊躇させる意味でも極めて有効である。世界的にニーズも高まっている今, わが国としても積極的に研究開発を進め, 核セキュリティ向上に対してグローバルに貢献していくことが望まれている。

－ 参考文献 －

- 1) 原子力委員会「核セキュリティの確保に対する基本的考え方について」
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/bougo/siryo/bougo25/ssiry01.pdf>
- 2) 宇佐美正行「核セキュリティをめぐる国際的取組の進展～核テロ対策強化の経緯と今後の課題～」立法と調査 No.309.
- 3) K.A. Jordan, et al, *NIM* 3, pp436-444 (2008).
- 4) Feynman, R.P., et al, *Journal of Nuclear Energy*, 3, pp64-69. (1956).
- 5) T.Misawa, et al, *Annu. Rep. Res. React. Inst. Kyoto Univ.* Vol. 27(1994).
- 6) T. Misawa, et al, Proc. of 2012 IEEE-NSS.
- 7) T. Akagi, et al, *Phys. Rev. Accel. Beams* 19, 114701 (2016).
- 8) H.H.Negm et al, 2015 IEEE Int. Symp. on Technologies for Homeland Security.
- 9) T.Shizuma et al, *NIM A* 737 (2014) 170, and T.Hayakawa et al, *NIM A* 621 (2010) 695.
- 10) M. Omer and R. Hajima, *Nucl. Instr. Meth. B* 405, 43-49 (2017).

著者紹介



高橋佳之 (たかはし・よしゆき)

京都大学複合原子力科学研究所
核セキュリティ・保障措置関連技術の開発・放射線計測技術の応用に従事。専門分野は放射線計測。



小泉光生 (こいずみ・みつお)

日本原子力研究開発機構 核不拡散・核セキュリティ総合支援センター
核セキュリティ・保障措置関連の技術開発, 原子核分光研究等に従事。専門分野は原子核物理学。

報告

福島若者は原子力に何を感じているか —夢と課題—

福島工業高等専門学校 赤尾 尚洋ほか

日本原子力学会シニアネットワーク連絡会(SNW)は、東京電力福島第一原子力発電所が位置する福島浜通り地区にある唯一の工学系高等教育機関である福島工業高等専門学校(福島高専)において継続的に対話会を実施してきた。同高専では、第一原子力発電所の廃止措置、地域の再生・復興に貢献する人材の育成に重きを置き教育を実施してきており、これに応える学生は真摯かつ優秀である。こうした、次世代を担う若者に夢を与える教育がいかになされ、それを受けた福島若者が将来の原子力について何を思い、また、地元生まれ育った視点から福島はエネルギー政策にどうかかわってきたのかについて対話会の参加者から報告してもらい、意見の共有を図った。

KEYWORDS: *severe accident, decommissioning, education, risk communication*

I. 若者が地域の将来に希望を持つために教育ができること

福島工業高等専門学校(以下 福島高専)は、東日本大震災において重大事故が発生した福島第一原子力発電所が位置する福島浜通り地区に位置しており、唯一の工学系高等教育機関でもある。震災から9年が過ぎる中、震災復興のニーズ、特に数十年かかると言われる福島第一原子力発電所の廃止措置を担う人材を育てることが福島高専の重要な課題の一つとなっている。

福島高専は平成27年に文部科学省の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業(廃止措置研究・人材育成等強化プログラム)」に採択され、「廃炉に関する基盤研究を通じた創造的人材育成プログラム-高専間ネットワークを活用した福島からの学際的なチャレンジ-」として全国31高専と連携し、5年間の基盤研究を通じた人材育成を進め、廃炉に関する人材育成や基盤研究を推進するために「廃止措置人材育成高専等連携協議会」を組織している。

福島第一原子力発電所の廃炉について、一人でも多くの若い学生に目を向けてもらうために福島高専が中心となり「廃炉創造ロボコン」を企画し、日本原子力研究開発機構 檜葉遠隔技術開発センターを会場として毎年開催している(図1)。この廃炉創造ロボコンには全国の高専だけでなく、海外大学からも参加があり年々盛り上がり



図1 廃炉創造ロボコンの様子(2019年12月)

を見せ、国内外の注目を集めている。

また、文科省の「国際原子力人材育成イニシアチブ事業」にも採択されており、福島高専だけでなく県内の大学生を対象とした「グローバルな視点から原子力関連企業とバックエンド事業を理解する実践的人材育成」を推進し、毎年カナダやイギリスに学生を送り出し、現地の状況を肌で感じ、日本の原子力政策や産業のあり方を考える機会を提供している。さらに、浜通り地域を「イノベーション・コースト」として世界に誇れる「浜通りモデル」とするためにも、地域企業でのインターンシップと留学経験を持ったグローバルな人材を長期的に育成することを目的として、浜通り地域の産学官が連携・協力し、「福島浜通りグローバル人材育成事業推進協議会」を設立し、文部科学省や連携企業の支援を受けて毎年数多くの学生(いわき市内の大学生や浜通り出身の県外の大学生含む)を海外留学に派遣している。上記活動に加えて、以下でも紹介する、原子力シニアネットワーク連絡会との連携活動を通じて、若い世代がリアルな現場感覚を獲

Feeling of Fukushima's young generation on nuclear ; Dreams and Issues : Takahiro Akao, Shigekazu Suzuki, Takao Tsuboya, Mio Kasai, Chihiro Shigeishi.

(2020年4月26日 受理)

得する貴重な機会となっている。

浜通り地域を安心・安全に暮らすことが出来る“ふるさと”として再生し、復興のために貢献する人材を育成することがわれわれ福島高専の使命である。そのためには教員自らがその理想を実現する当事者でありつづけ、座学だけではなく実践を伴った教育を関係各位の協力を得ながら、これからも推進していきたい。その結果として、福島の若者が将来への希望を抱き、積極的に地域の復興に貢献してくれることを切に願っている。
(執筆担当：赤尾尚洋、鈴木茂和(福島高専))

II. 福島高専との対話会を通じて感じること

2015年7月に福島工業高等専門学校(福島高専)實川資朗教授(当時)より日本原子力学会シニアネットワーク連絡会(SNW)およびエネルギー問題に発言する会の合同講演会で「福島高専での廃炉などとの向き合い方および技術者養成の進め方」と題する講演を頂いた。この講演を契機に、同校鈴木茂和准教授(機械システム)のご指導の下に「廃炉工学」の授業の一環として学生との対話会「対話イン福島高専」が同年の2015年12月より始められた。その後、福島高専における学生との対話会は、鈴木先生に加えて赤尾尚洋教授(機械システム)の協力を頂き毎年継続的に開催されてきた。

学生との対話会は、2005年以来全国の20を超える大学・高専のご支援のもとに、およそ6,000名の学生や教員とおよそ1,800名(延人数)のシニアが参加してきた。その間、2011年2月の東日本大震災とそれに引き続く大津波による東電福島第一原子力発電所の事故を挟み、大きく変化した原子力を取り巻く社会環境変化の中で実施している。

ここでは、これまで5年にわたる「対話イン福島高専」の開催報告書例¹⁾などをもとに、福島高専の学生との対話会に参加した筆者らシニアが感じているところを述べてみたい。

1. 福島高専との対話会開催の経緯

福島高専における学生との対話会は、表1に示すように2015年から本年1月まで5回にわたり開催されている。

2. 対話会の意義

SNWの学生との対話会は、次世代を担う気概を学生諸君が自ら育む手助けをするために原子力開発に生涯を

捧げたシニアの経験と考えを学生に対面で伝える試みである。また、原子力開発の歴史を知る機会が少なくなった世代にエネルギーと環境問題に対する原子力の果たす役割を伝え、併せて若者の考えを聞く双方向性が実現できることに意義があるものと考えている。学生との対話会は多くのシニア原子力専門家が活動している日本であればこそ初めて可能な試みとも言える。ちなみにSNW活動は、300名のメンバーがボランティアで参加している。

3. 対話会の構成

「対話イン福島高専」は、週日の午後をあて4年生以上の文系および理系の学生が開催日程の都合で30~50名が参加している。高専4年生は大学1年生の年齢であるが、理系は「廃炉工学」を受講するなど工学者としての将来を見据え学業に勤しんでいる。また、参加学生の半数近くが情報関係の文系学科などに在籍する女子学生であることも特徴である。50分程度のSNWメンバーによる基調講演1件および5~6名ずつに別れた150分程度のグループ対話で構成される。グループ対話には、SNW本部およびSNW東北のシニア専門家2名程度をグループ毎に配属している。

4. 基調講演およびグループ対話のテーマ

取り上げるテーマは、基調講演としては、「エネルギー安全保障と温暖化対策」、「原子力発電所の安全」、「軽水炉の高経年化対策と廃炉」、「プルトニウム利用と核燃料サイクル」、「最終処分問題」などを選定している。また、グループ対話は、基調講演テーマに加えて「低線量放射線問題」などを取り上げている。20年1月の対話会におけるグループ対話では、トリチウム問題も取り上げた。テーマの設定は、高専側の希望にできるだけ沿うように心懸けている。

5. 対話会の振り返り

例年、対話会開催後に次年度によりよい対話会を実施するために参加学生やシニアにアンケートの形で感想を求めている。学生からは、「原子力を支えたシニアの思いを受け継げる」、「シニアと言うより有識者との対話は有用である」などシニアとの対話の必要性に極めて肯定的な感想を得ている。また、「学生の力量に合わせて

表1 対話会開催の経緯

2015年7月	SNW例会における福島高専のご紹介(福島高専・實川教授)
12月	対話イン福島高専2015開催
2017年1月	対話イン福島高専2016開催
2018年1月	対話イン福島高専2017開催
2019年1月	対話イン福島高専2018開催
2020年1月	対話イン福島高専2019開催



図2 グループ対話の様子

もっと分かりやすく話して欲しい」など、ともするとシニア側が難しい専門用語を多用したり、話が長すぎたりするなど反省点も多い。

さらに、学生およびシニアに共通して、次のような特筆すべき貴重な感想が寄せられている。

- ▶ エネルギー・原子力について授業時間が十分でない
のでシニア(有識者)との対話会の意義は大きい。
- ▶ エネルギー問題の知識が十分でないまま地球環境問題を取り上げている傾向があり、それは偏った知識を持つことにつながる。
- ▶ 学生はSNSを通じメディアから情報を入手する傾向があるため、事実に基づく情報による対話が重要である。

福島高専は、福島第一原子力発電所の廃炉を抱えわが国でも特に原子力関連の授業に力を入れている大学・高専である。エネルギー安全保障の重要性が指摘される今日、「対話イン福島高専」を通じて学生およびシニア双方から寄せられた感想は、福島高専に特有な感想ではなく、わが国の大学等に共通な根が深い課題であるように考えられる。(執筆担当：坪谷隆夫(SNW))

Ⅲ. 若者から見た将来の原子力について

筆者は、在学中に原子力関連の授業の履修やプロジェクト参加など積極的に原子力分野に関わった。これらの経験より、人々が原子力について知らないという実態が原子力に対する負のイメージを助長していると感じた。原子力問題は複雑で、解決策を講じるには、科学的な側面以外にも社会的、経済的側面などから包括的に問題を分析する必要があると考える。カリフォルニア大学では、多様な分野から学生を募り、原子力の脅威や原子力に対する政府の方針等を幅広く学ぶプログラムを毎年開講している。このような取り組みを世界的に発展させ、学際的かつ国際的な議論を展開することは、複雑化する原子力の問題解決に必要であり、積極的に取り組むべきだと考える。

1. 無知の知

まず、原子力を専攻していない筆者が原子力分野に関わるようになったきっかけについてお話ししたい。2016年にカナダへ語学留学をしていた時²⁾、カナダ人の友人が福島には人が住んでいるのかと聞いてきた。情報の格差の大きさに愕然としたと同時に、確固たる証拠や自信を持って福島が安全であることを説明できなかった自分の無知さに情けなさを感じた。この出来事をきっかけに福島県民として原子力について知るべきであると思い、学校の選択授業や課外活動で原子力に関わるようになった。フィンランド留学中には、福島高専の先生のご協力の下、核の最終処分場「オンカロ」が建設されているオルキルオト原子力発電所へのスタディーツアーを企画した。ツアーでは、オンカロの建設現場に勤務する専門家

の方が同行し、オルキルオト原子力発電所の敷地内にある、低・中レベル放射性廃棄物の処分場やオンカロに関する資料の展示室の見学をさせていただいた。原子力に関して全くの無知だった私にとってこの経験は大きく、世界に向けて福島状況を正しく伝えるには、より深く原子力分野について学ばねばならないと確信した。

原子力分野での活動を始めて明らかになったことは、学生の意識の差である。福島高専には原子力人材育成の授業やプロジェクトなどが多数存在し、学生は自由選択式に参加することができる。進路として原子力分野を選択していく学生の多くは、この機会を生かし、基礎知識から卒業研究に関わる専門知識に至るまで多くのことを学ぶ。一方で、このような事業に対して消極的である学生もいる。彼らには目の前に山積している問題が見えていないように見受けられる。実際に、筆者が昨年学生を対象に行った除去土壌問題についての認知度調査では、一部かなり問題を他人事として認識していると読み取れる内容の回答もあった。

福島から距離が離れるほど、原子力の問題は他人事のように扱われている現状はいまだ払拭されていない。実際に福島を訪れた多くの外国人が来日前に家族や友人に反対されていたと話している。日本との距離に伴って情報は希薄になっていき、やがては届かなくなる。情報格差は国境を越えればさらに大きくなる。そして無知の状態は「原子力＝事故」という負のイメージが誇張されるのを助長していると考える。この格差を小さくしていかなければ、負のイメージ払拭は困難であると考えられる。

2. 原子力分野に必要なこと

他の学生と共に原子力分野のプロジェクト³⁾に参加していく中でわかったことは、原子力分野の抱える問題の複雑さである。原子力の抱える問題は技術だけではなく、社会的・経済的側面における課題もはらんでおり、原子力の問題に関わる全ての分野による包括的なアプローチをかけなければ、建設的な議論が実現しないと考えられる。今後原子力分野において必要なことは、学生への教育であることは明白であるが、原子力に関する教育は技術系の学生のみが対象になるべきではなく、経済や経営、社会学、法学、心理学など一見係わりの無いような学問からの学生をも巻き込み学際的なディスカッションを実現することが重要であると考えられる。

ここで重要なことは、インプットだけでなく各分野に属する学生の知識や意見をアウトプットし合うことで新たな知見を得るということである。原子力の抱える複雑な問題に対して解決策を講じるためには、これまでにはなかったイノベーティブな観点およびアイディアが必要不可欠になると考えられるからである。カリフォルニア大学サンディエゴ校では、他分野の学生を対象とした公共政策と原子力の脅威に関する教育カリキュラム、Public Policy & Nuclear Threats boot camp (以下、PPNT boot

camp とする)⁴⁾が毎年夏に開講されている。PPNT boot camp では、国際保障措置や核抑止論、アメリカの原子力安全政策、核拡散防止体制など原子力分野における社会的問題の側面も含めた包括的な知識を学ぶとともに、学生たちのアウトプット時間を設けられている。

このように多分野の学生が一堂に会し、議論をすることで多様な観点から原子力分野における問題について話し合われる機会となり、新たな視点によるアイデアの創出を促す可能性を秘めていると筆者は考える。学際的かつ国際的な議論により、課題へのアプローチの幅や興行きが変わっていくと考える。このような議論が実現し、多くの若者たちが目の前の問題を可視化できる日が来ることを信じて今後も活動を続けていきたい。

(執筆担当：嘉齊 滯(福島高専))

IV. 福島におけるエネルギー政策について思うこと

福島第一原発事故から10年が経過した。私は事故後、福島県に暮らし続けている。この10年で私は色々なことを思い、感じながら暮らしてきた。福島県から県外に転校し戻ってこない同級生がまだいること、学校や公園にあるモニタリングポストなども今や当たり前の風景になっていることなど10年がたった今でも原発事故の遺産は街・人々の生活で色濃く残っている。

小学生だった頃の自分は、原子力発電は必要ない、廃止すべきと考えていた。明確に意見した経験は当時ないが私はそう思っていた。理由は単純で「嫌」であったからである。同じ小学校の友達がこぞって転校したこと、小学校最後の運動会が中止に終わったこと、半年以上体育が学校の廊下であったことなど2010年代とはあまりにもイレギュラーな学校生活であったためかそれが非常にストレスとなり「全て原発のせいだ」と考えるようになっていた。また、それはいわきに来た原発避難者にも言えていて、最初こそ「避難続きで可哀想」、「急に知らない土地に可哀想に」など思っていたが、仮設住宅に並ぶ外車の数々、スーパーでの避難者の店員に対する横暴な態度、非常に豪華な一軒家を建てたなど原発避難者のさまざまなエピソードを見たり聞いたりしていくうちに原発避難者に対する差別的な意識を持つようになった。それは自分だけでなく周りの友達も同様に考えていたことから、いかに差別意識が浸透していたかがわかるであろう。なお、現在は私を含めほとんどの人々は差別意識を持っていないことを留意しておいてほしい。

一方大学生となり、情報、情勢、社会的背景などさまざまな角度で物事を見るようになった今は、原子力発電は現代日本に「まだ」必要だと私は考えている。日本は今後、原発事故の反動や環境問題などから太陽光や風力などの自然エネルギー発電の発電割合を増やし、最終的には自然エネルギーベースの社会へとエネルギー転換を図っていくことになる。

しかし自然エネルギーは地産地消が最も効率的で現在の電力システムには不向きで今後本格的に導入するにはこれまでとは違った新しい電力システムを造る必要があると考える。しかし新システムを構築するにも膨大な時間が必要になるため暫くは従来のシステムのままであるが、それが火力発電に依存し続けるのは電力の安定供給や経済などさまざまな観点から見てもリスクが大きすぎる。よって原発を再稼働し電源構成を正常化すればリスクが減るためメリットになる。新システムに移行し自然エネルギーが十分な発電割合になった時、いままで活躍した原発を廃炉にすればエネルギー転換の成功といえると思う。最初に「まだ」とつけたのはいずれ原発がなくても賄える社会にするための布石であるからである。

(執筆担当：重石智大(日本大学))

－ 参考文献 －

- 1) 対話イン福島高専 2019 報告書
http://www.aesj.or.jp/~snw/gakusei_taiwa/document2019/fukushima_kousen2019/fukushima2019rep.pdf
- 2) Government of Canada [2020] “Travel advice and Advisories (Japan)”
(<https://travel.gc.ca/destinations/japan>)
(2020年3月31日確認)。
- 3) University of California Burkle Centerurl for International Relations [2015] “UC Institute on Global Conflict and Cooperation Public Policy & Nuclear Threats Boot Camp”
(<https://www.international.ucla.edu/burkle/article/150992>)
(2020年3月31日確認)。
- 4) UC San Diego Institute on Global Conflict and Cooperation [2020] “Public Policy and Nuclear Threats Boot Camp”
(<https://igcc.ucsd.edu/training/ppnt/index.html>)
(2020年3月31日確認)。

著者紹介

赤尾尚洋 (あかお・たかひろ)

福島工業高等専門学校 機械システム工学科
(専門分野/関心分野)機械強度学

鈴木茂和 (すずき・しげかず)

福島工業高等専門学校 機械システム工学科
(専門分野/関心分野)材料学

坪谷隆夫 (つばや・たかお)

日本原子力学会シニアネットワーク連絡会
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処理・処分/バックエンド政策

嘉齊 滯 (かさい・みお)

福島工業高等専門学校
(専門分野/関心分野)ビジネスコミュニケーション学

重石智大 (しげいし・ちひろ)

日本大学
(専門分野/関心分野)建築学

(55)

う。実施期間は当初、中間貯蔵施設が設置され、運用されるまでの期間としたが、現在も活動を続けている。事故直後の本PJの活動は既報を参考にして欲しい^{1, 2)}。

2. 発刊・提言や見解

前報²⁾でも述べたように、チェルノブイリ事故後に欧州連合(EU)がまとめたEURANOSプロジェクトの除染技術に関する詳細なデータシートを調査・翻訳した「除染技術カタログ Ver.1」³⁾(2011年10月24日)を発刊した。また、環境省の「除去土壌の保管に関するガイドライン(2011年12月第1版)」をベースとし、必要に応じてクリーンアップ分科会の検討に基づく推奨事項を付加した仮置場に関する解説資料「一仮置場 Q&A—除去土壌の仮置き場についての疑問にお答えします」⁴⁾(2012年5月23日)を作成した(いずれの資料も後述する環境再生プラザで公開している)。

事故直後に実施した提言については前報²⁾にまとめたが、事故後5年が経ち、帰還困難区域を除く区域の避難を解除する方針が明らかにされる半年前に、本会2016年秋の大会にて、今後に向けた6項目の見解を公表した(日本原子力学会「2016年秋の大会」2016年9月9日)(表1)。

3. シンポジウム

福島特別PJの大きなミッションの1つはコミュニケーション活動である。コミュニケーション活動の一環として、事故直後は福島県と共同で「安全・安心フォーラム」(2011年度)や「除染の推進に向けた地域対話フォーラム」(2012年度)を実施した。2012年5月14日に「第1回除染の推進に向けた地域対話フォーラム」(於：コラッセふくしま)からは福島特別PJが主体となり、福島の住民の方々に分かり易い情報を提供するために、環境省、福島県、関係市町村などと協力してシンポジウムをすでに13回開催してきた。2017年3月28日には風評被害を払拭するため、初めて消費地である東京で「消費者のギモン—福島県産ってどうなの?」を開催した。

しかしながら、帰還困難区域などを除いた区域の避難

表1 震災後5年をふまえた除染・帰還・復興に関する見解6項目

見解6項目	
1	帰還住民の個人線量の調査、きめ細やかな情報提供
2	帰還困難区域の取扱いを見直し将来見通しを示す時期がきていることから、区域の詳細モニタリングによる線量率マップ作成、住民と自治体への情報提供
3	住民の要望に応えるきめ細やかな除染、里山の除染、進捗情報の提供
4	廃棄物中間貯蔵の安全対策、輸送量低減のための減容など合理的な処理方策の検討、輸送・貯蔵の作業の安全確保、事故時対策、最終処分場の検討
5	放射線に関する正確な情報の持続的発信、相談員制度の活用、自治体の情報共有、浜通り地域への除染、廃炉に関する情報拠点の設置
6	市町村・県・国が一体となった積極的な復興計画、教育・就業の場、医療・介護、移動手段の確保、商業施設、産業の誘致、地域をリードできる将来世代の養成

指示が解除された2017年4月以降は浜通りにおいて、シンポジウムより、より小さな規模での集会が有効であると考え、2019年7月13日には富岡町にて交流イベントを開催し、帰還した住民の生の声を町役場に伝える試みを行った(詳細は長崎大学の活動にて述べる)。

4. 環境再生プラザへの専門家派遣

福島県の除染を推進するための活動として福島県と環境省が共同で運営する環境再生プラザ(旧除染情報プラザ)へ土、日曜日および祝日に専門家を派遣する活動を2012年1月25日のオープンから今まで実施してきており、すでに派遣した専門家の延べ人数は1,000名を超えている。この活動は環境再生プラザを訪問する住民などの来館者に専門家として正確な情報を提供することを目的に継続して実施してきているが、派遣されるクリーンアップ分科会のメンバーも最新の除染情報に触れる良い機会となっている。なお、前述の本PJで作成した種々の資料はここに保管、公開されている。

5. 稲作試験

福島事故で最も大きな打撃を受けたのは農産県である福島県の農業であった。しかしながら、本会には農業関連の研究者がほとんどいないため、福島事故により放出、飛散したセシウム(Cs)の農業に及ぼす正確な影響を把握することは難しいと考えた。そこで事故の翌年からJAふくしま未来(旧JAそうま)と協力し、南相馬市馬場の水田を借りて稲作試験を実施してきた。当初は10,000 Bq/kgを超える汚染土壌もサンプリングされたが、日本の水田の土壌は肥沃な粘土質なため、土壌から稲への移行係数は国際原子力機関(IAEA)でまとめた海外の値に比べて1桁少ない0.01以下であり、稲へのCsの移行は大変小さいことを示した。2012年~2018年度までの玄米のCs(Cs13+Cs137)の濃度変化は1/5~1/17.5にまで低下した。Csの濃度変化に対するカリウム(K)の影響など新しい知見も得ている。

6. 今後

これまで行ってきた福島の住民に寄り添った活動が、福島の再生・復興の一助となることを願っている。今後は帰還困難区域の再生・復興への協力と、トリチウム水で問題となっている水産物に対する風評被害の払拭に努力していきたいと考えている⁵⁾。

Ⅲ. 福島復興に向けた長崎大学の取り組み

福島事故直後から長崎大学は福島における原子力災害医療体制の構築に協力するため、福島県立医大に医師、看護師、診療放射線技師や放射線防護学の専門家をいち早く派遣してきた。混乱した福島において放射線被ばくと健康影響についてのクライシスコミュニケーションを

行うために原爆後障害医療研究所の教授2名を派遣して福島県健康リスク管理アドバイザーとして福島県において放射線の影響などについて講演活動を行った。

2011年末に福島事故炉の冷温停止を見通すことができるになると、避難した住民の帰還への取り組みを自治体が始める中、いち早く帰村宣言を発表した川内村との連携を2011年12月から開始した。

1. 川内村における活動

まず長崎大学は、村内の居住区域における土壤中放射性Cs濃度の測定や空間線量率の測定をもとにした外部被ばく線量を推定し、帰還の妥当性について評価した。住民の帰還が始まった2012年4月以降は村内外の住民を対象とした放射線についての講演会を行い、住民の不安に対する質問や疑問に対し説明を行い、川内村の遠藤雄幸村長や役場職員をサポートし、帰村を早めるように努めた。2012年5月からは放射線被ばくと健康影響に精通した保健師を川内村に長期派遣し、戸別訪問を通じたリスクコミュニケーションを実施した。この保健師の長期派遣、すなわち村内に住み込み、避難している住民の不安に応える活動は、福島県の住民帰還のモデルとして川内村以外でも広く周知、評価されるようになった。

2013年4月に川内村と長崎大学は包括連携協定を締結し、川内村内に「長崎大学復興推進拠点」を設置した。この拠点の目的は、環境放射能測定や個人被ばく線量評価などを通じた住民の外部被ばく線量評価と、食品等の放射性物質濃度評価を通じた内部被ばく評価に加え、それらの結果をもとにしたきめ細かいリスクコミュニケーションの実施による復興支援であった。

前述の保健師が川内村に3年間にわたり常駐し、リスクコミュニケーションの中心的な役割を担った。具体的には川内村役場が開催する住民向けの説明会に村長や役場職員らと共に保健師が同行し、住民の不安の解消や疑問に答える活動を村内外で行った。福島事故当初、放射線被ばくによる健康影響などの情報が限られていた中、保健師が常駐することにより、住民の要望にすぐに応えられるような体制を整えたことは原子力災害からの復興において非常に重要であったと考えている。このような活動により、川内村は現在、事故前に比較して約80%の住民が帰還しており、「福島復興のモデルケース」として高く評価されている。川内村において、長崎大学が進めてきた「住民、自治体と専門家が一体となった原子力災害からの地域の復興への取り組み」は本学原爆被害者医療、チェルノブイリ支援活動を通じて得られたノウハウを応用したものである。

2. 富岡町や大熊町における活動

2017年、長崎大学は事故から6年後に帰還を開始した福島県富岡町にも復興推進拠点を設置し、川内村と同様



図2 交流イベント「富岡の環境再生を目指して」

に、住民の被ばく線量の評価を通じたリスクコミュニケーション活動を展開している。本会の福島特別PJが昨年2019年7月13日に富岡町学びの森で行った地元の住民との小規模な車座集会である「日本原子力学会交流イベント「富岡の環境再生を目指して」」においても、第二部のテーブルトークにおいて復興推進拠点の折田真紀子助教がファシリテータを担った(図2)。帰還した町民の悩みや帰還していない町民の考えなど忌憚らない意見を引き出せたと考えている。

2019年7月からは同年帰還を開始した、原発立地自治体である大熊町の支援も開始するなど、川内村の復興推進支援活動によって得られたノウハウを他の自治体へ水平展開している。原子力災害からの復興には「住民、自治体と専門家の連携」が極めて重要であることを改めて強調したい⁶⁾。

IV. 福島における環境省の除染等の進捗について(2020)

福島事故後、2011年8月に政府は放射性廃棄物汚染対処特別措置法を制定、同法に基づき発電所敷地外(所謂オフサイト)の福島県内などの人の生活圏に飛散、沈着した放射性物質(主にCs)が付着した土壌などの除去作業を実施してきた。本稿ではこれまでの経緯を振り返り、今後の課題について述べる。

1. 除染の主な経緯

福島事故以降、福島第一原子力発電所周辺地域には避難指示区域が発電所からの距離や線量に応じて設定され

たが、2011 年 8 月の特別措置法の発効、翌 2012 年 1 月からの本格施行に基づき、避難指示区域内 11 市町村の区域内に除染特別地域が、県内 104 市町村に汚染状況重点調査地域が設定された。除染特別地域は発電所から 20 km 圏内および空間線量率が年間 20 mSv を超える地域で国(すなわち環境省)が直接除染することにし、除染事業が進められた。除染特別地域以外で空間線量率が年間 1 mSv を超える地域を汚染状況重点調査地域とし、市町村などが除染することになった。

2017 年 3 月までに帰還困難区域を除く避難指示区域内の除染は終了し、大熊町と双葉町および帰還困難区域を除く地域の避難指示が解除された。2017 年 7 月以降、帰還困難区域内に設定された特定復興再生拠点区域内での除染、家屋解体が開始された。

除染により発生し、福島県内の仮置場などに保管されている除去土壌など約 1,400 万 m^3 については、大熊町と双葉町にまたがる 1,600 ha の中間貯蔵施設に 30 年間保管することとし、2015 年 3 月から土壌などの搬入が開始された。以降 30 年以内に福島県外に最終処分することとしている。中間貯蔵施設は双葉工区と大熊工区から構成され、土壌貯蔵施設、廃棄物貯蔵施設と仮設焼却施設、仮設灰処理施設などが含まれるが、搬入開始当時は施設はおろか用地取得もできていない状況にあった(図 3)。

2. 除染事業の規模

2018 年 3 月までに福島県内外での除染により発生した除去土壌は約 1,700 万 m^3 に達し、除染作業員は延べ 3,210 万人、2018 年度までに計上された予算は 2 兆 9 千億円にのぼる。当初、用地交渉が難航した中間貯蔵施設用地については、2019 年 9 月までに全体の約 7 割の土地について契約がなされた。用地交渉と並行し、取得用地の形状に順応して分別施設、貯蔵施設、焼却施設などが建設され、除去土壌などの搬入も進められてきたが、長期間の避難を余儀なくされ、さらに国策のためにふるさとの土地家屋を放棄することになった住民の苦しみをけして忘れてはならない。

3. 今後の課題

(1) 中間貯蔵施設への除去土壌の搬入

2018 年度末までに 260 万 m^3 超が搬入され、2019 年度 400 万 m^3 、2020 年度も概ね 400 万 m^3 の搬入を見込み、2021 年度には帰還困難区域を除き、福島県内の仮置場などに保管されている除去土壌などの搬入を概ね完了する予定である。除去土壌の輸送にはトラック一日 2,000 台程度による運搬が想定され、安全な輸送と適切な土壌の保管が当面の課題となる。

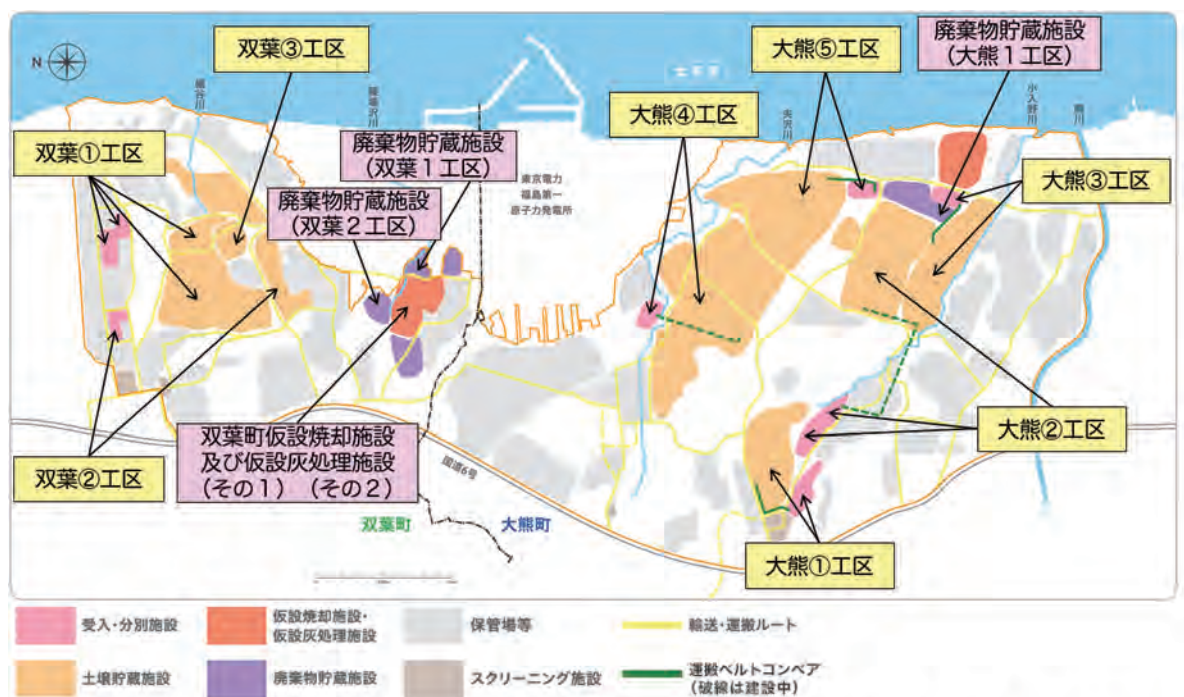
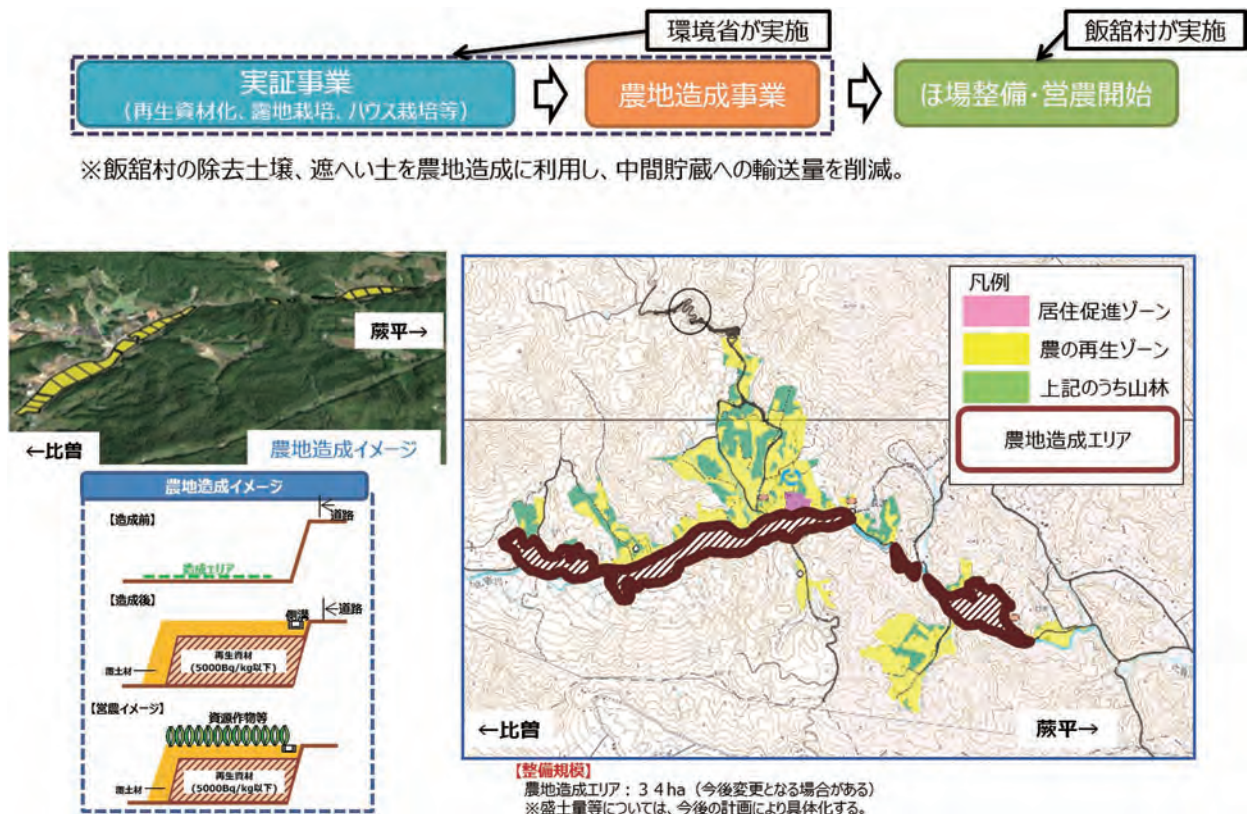


図 3 中間貯蔵施設の配置図¹¹⁾

図4 再生利用実証事業¹²⁾

(2) 除去土壌の再生利用

搬入開始から30年以内の土壌などの福島県外最終処分への道筋を見出すため、低線量の除去土壌については、公共事業の基盤材などへの再生利用を進め、処分量の減容化を進めることが課題となっている。中間貯蔵施設に2019年7月までに搬入された除去土壌などの状況を見ると、約350万 m^3 の8割が8,000 Bq/kg 以下となっている。

飯舘村における村内除染除去土壌を活用してかさ上げし圃場整備された農地での実証事業では実際に花卉を栽培し、線量が基準値を越えないことを確認している(図4)。

(3) 避難指示区域解除後の帰還など

大規模な公共事業は、一般に「地図に残る仕事」と表現されることがある。福島における除染は、発電所敷地外に広範囲に飛散した放射性汚染物質を除去するという、日本史上他に類例のない大規模で特異な公共事業であるが、「地図に残らない仕事」である。あるいは地図に残してはならない仕事かもしれない。除染による空間線量の低下、その後の地域の線量の状況を計測し、地域の再生、復興が進められるよう、帰還する住民などの不安に丁寧に対応すると共に、国内外に、福島の地域再生状況の理解を広く促すことが課題と考える⁷⁾。

V. おわりに

福島事故から9年が経ち、東京以西では福島の状況が報道される機会が減ってきている。私たち原子力に関わる仕事に就いている者は福島事故による福島の住民の方々が受けた苦難を忘れることなく、福島の再生・復興に協力していくことが重要である。“福島の再生・復興なくして原子力の再生はない”という言葉のを忘れず、福島のオフサイトの再生にご協力いただいている長崎大学の方々や環境省の方々に感謝すると共に、旧避難指示区域を含めた福島の住民の帰還が増え、地域の再生が進むことを願っている。

－ 参考資料 －

- 1) 田中知, 藤田玲子, 「福島特別プロジェクトの立ち上げ」日本原子力学会誌, Vol.54, No.10, 640-641 (2012).
- 2) 福島特別プロジェクト, 「福島特別プロジェクトの活動と今後の展開—福島県の環境回復を目指して—」同上, Vol.56, No.3, 193-205 (2014).
- 3) クリーンアップ分科会, 「除染技術カタログ Ver.1.0」(2011年10月24日)
http://www.aesj.or.jp/information/fnpp201103/chousacom/cu/catalog_ver1.0_20111024.pdf
- 4) クリーンアップ分科会, 「一仮置場 Q&A—除染土壌の仮置き場について疑問にお答えします」(2012年5月23日)
<http://www.aesj.or.jp/information/fnpp201103/chousacom/cu/kariokibaqanda20120514.pdf>
- 5) 2020年春の年会予稿集 3I_PL01.

- 6) 2020 年春の年会予稿集 3I_PL03.
- 7) 2020 年春の年会予稿集 3I_PL02.
- 8) 小沢晴司, 「除染の進捗状況について ふるさと福島の再生に向けて」, 日本原子力学会誌, Vol.57, No.6 (2015), 25-28.
- 9) 小沢晴司, 「福島環境回復活動の状況について」, 日本原子力学会誌, Vol.59, No.1 (2017), 33-36.
- 10) 小沢晴司, 「福島のはとわに浄らか」, 信仰誌月刊知恩, 2月号 (2019), 4-13.
- 11) 図 3. 中間貯蔵施設の配置図
<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/about/>
- 12) 図 4. 飯館村長泥地区における再生利用実証事業
<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/recycling/project/iitate.html>

(福島特別 PJ メンバー: 飯本武志, 井上正, 太田宏一, 佐賀井美都, 三倉通孝, 佐藤修彰, 田中隆則, 田中治邦, 布目礼子, 平岡英治, 服部隆利, 山下祐司)

著者紹介



藤田玲子 (ふじた・れいこ)
元(株)東芝。
第 36 代日本原子力学会会長。
(専門分野/関心分野) 乾式再処理, 分離・核変換。オフサイト除染。



高村 昇 (たかむら・のぼる)
長崎大学原爆後障害医療研究所
(専門分野/関心分野) 被ばく医療学, 社会医学, 内科学/原子力災害からの地域復興・リスクコミュニケーション



小沢晴司 (おざわ・せいじ)
東北地方環境事務所長(前福島環境再生本部長), 福島大学
(専門分野/関心分野) 地域環境政策, 景観史, ランドスケープ, 菌類



From Editors 編集委員会からのお知らせ

ー最近の編集委員会の話題よりー

(7月7日 第1回 論文誌編集幹事会)

- ・5月16日から6月15日までに英文論文誌に28報, 和文論文誌に2報の新規投稿があった。
- ・新年度の委員会担当理事として, 伊藤主税委員長が紹介され, 挨拶があった。新顧問, 新任分野別責任者から自己紹介があった。
- ・英訳公表事業の進捗状況が報告された。Vol.3の翻訳が進行中である。Vol.1と4の製版について打ち合わせをした。
- ・英文誌特集号の状況が報告された。
- ・若手編集委員から「学会が発行する英文誌」をどう評価しているかに関する意見聴取結果の概要が報告され, 意見が交換された。
- ・英文誌の2019インパクトファクターが1.564と向上したことが報告され, 維持向上に関して意見が交換された。
- ・第12分野のSubject Classificationの改訂を進めることとした。
- ・今後の委員会, 幹事会等の進め方について説明された。

(7月7日 第1回 学会誌編集幹事会)

- ・新年度にあたり, 伊藤委員長, 佐相副委員長から自己紹介があった。
- ・2021年1月号から4月号にかけて掲載予定の「福島原発事故から10年」の記事企画の説明があった。
- ・学会誌アンケート回答結果を確認した。
- ・新企画案「原子力の未来を予測する, 創る」について編集長から説明があった。企画内容が10年シンポジウムと重複しないように, 今後引き続き検討していく。
- ・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。Web座談会などの提案があり, 企画を進めていくこととなった。
- ・コラム記事について今後の執筆者体制について検討。スケジュール, 著者の選定を進めていき, 今後も継続していくこととした。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

Short Report

IEA「2019 年版世界エネルギー見通し」概要

日本原子力産業協会 小林 雅治

国際エネルギー機関(IEA)の「2019 年版世界エネルギー見通し」(WEO2019)は、世界のエネルギーの現状について、温暖化対策等の目標から大きく乖離しているとして、脱炭素化を中心としたエネルギー・システムの抜本的な変革を求めている。将来のエネルギー像についてのシナリオ分析から、単一の解決策はなく、色々な技術・燃料の総合的な取り組みが必要であり、各国政府の強力な政策が不可欠であると強調している。

I. 最近のエネルギー動向のポイント

WEO2019(World Energy Outlook 2019)は、まずエネルギーの現状が理想から大きく乖離していると指摘している。具体的には、世界全体で温室効果ガス排出量削減の必要性が高まっているにもかかわらず、エネルギー関連の排出量が増加し化石燃料依存度が増大している。このほか、あらゆる人々にエネルギーを提供するという目標に対して、現実には 10 億近い人々が依然として電気のない生活を送っていることや、石油市場では供給が安定している一方で地政学的緊張と不確定要素に対する不安材料が持続していることを指摘している。

米国のシェール生産量の増加により、OPEC(石油輸出国機構)とロシアの生産シェアは低下している。とは言え、依然世界は中東の石油・LNG 供給に大きく依存しており、ホルムズ海峡は、特に燃料の輸入依存度の高い中国、インド、日本、韓国などのアジア諸国にとっての大動脈であり続ける。

WEO2019 はまた、世界のエネルギー効率改善の機運の弱体化を警告し、世界経済のエネルギー原単位(経済活動 1 単位当たりのエネルギー消費量)の改善を強く訴えている。これが持続可能な開発につながる重要な要素と強調している。

今回の WEO2019 は、地域特集としてアフリカを取り上げている。今後 20 年間でアフリカの都市部の人口は 5 億人以上増加、アフリカ全体の人口は 20 億人を突破し、中国やインドを上回る。アフリカの人口増加やインフラ開発がエネルギーにもたらすインパクトは、世界のエネルギー展望にとって重要になり、アフリカの動向に目が離せない。

II. 3 シナリオでエネルギー・気候分析

WEO2019 は、2040 年を見通した世界のエネルギー像を 3 つのシナリオで分析し、気候変動との関係(CO₂ 排出)を示している(図 1)。

1. 現行政策シナリオ

現行政策シナリオは、世界で現在実施されている政策がそのまま継続していくと想定するシナリオ(所謂現状維持ケース)で、エネルギー需要が 2040 年まで毎年 1.3 % ずつ増加する。石炭を始めとする化石燃料消費が依然として増加し、それに伴う CO₂ 排出量も大幅に上昇し続け、地球温暖化防止、すなわち「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃ より十分低く保ち、1.5℃ に抑える努力をする」というパリ協定の目標達成には程遠い。パリ協定は、できるかぎり早く世界の温室効果ガス排出量をピークアウトし、21 世紀後半には実質ゼロにすることを目指している。

2. 公表政策シナリオ

公表政策シナリオ(WEO はこれまで新政策シナリオと呼んでいた)は、最近公表されたエネルギー政策の意図や目標が実現されると想定するシナリオ。エネルギー需要は、毎年 1 % ずつ増加し、2040 年には現在の約 1.25 倍になる。増加分は、石炭以外の全ての燃料・技術によって賄われる(増加分の 50 % は再生可能エネルギー、35 % はガス、など)。石油需要の世界的な伸びは 2025 年以降鈍化し、2030 年代には燃料効率化や自動車の電化の圧力を受け、横ばいになる。石炭は開発途上国での根強い需要のため、現状水準をほぼ維持する。

公表政策シナリオでは、電力需要がエネルギー需要全体の 2 倍以上のペースで増加し、電力が現代における経済活動の中心になる。

クリーン技術の増加で、CO₂ 排出量の増加は緩やかになるが、2040 年までにピークを迎えることはなく、パリ協定の目標は達成できない。

このシナリオでは、2040 年時点でも世界の何億もの人々が電気のない生活をし、大気汚染で早死にする人が相当数に上り、温暖化がもたらす深刻な影響も定着する。

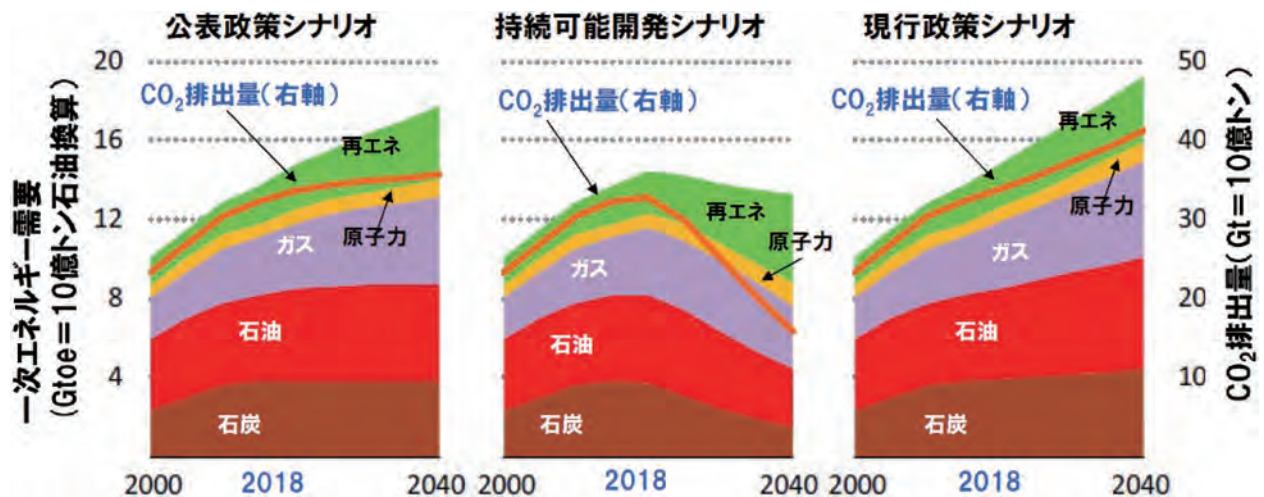


図1 世界のエネルギー需要とCO₂排出量の見通し
(各図の横軸は西暦年を表す)

表1 世界の電源別発電電力量と発電設備容量の見通し

	発電電力量								発電設備容量							
	2018 年		2040 年						2018 年		2040 年					
	実績		TWh			%			実績		GW			%		
	TWh	%	現	公	持	現	公	持	GW	%	現	公	持	現	公	持
石炭	10,123	38	12,923	10,431	2,428	30	25	6	2,079	29	2,630	2,171	1,153	21	17	7
石油	808	3	603	490	197	1	1	1	450	6	268	239	240	2	2	2
ガス	6,118	23	10,186	8,899	5,584	24	22	14	1,745	24	2,908	2,651	2,304	23	20	15
原子力	2,718	10	3,597	3,475	4,409	8	8	11	419	6	489	482	601	4	4	4
再エネ	6,799	26	15,485	18,049	26,605	36	44	67	2,517	35	6,087	7,233	10,626	48	55	69
内水力	4,203	16	5,923	6,098	6,934	14	15	18	1,290	18	1,758	1,822	2,090	14	14	14
風力	1,265	5	4,258	5,226	8,295	10	13	21	566	8	1,537	1,856	2,930	12	14	19
太陽光	592	2	3,658	4,705	7,208	9	11	19	495	7	2,465	3,142	4,815	19	24	31
合計	26,603	100	42,824	41,373	38,713	100	100	100	7,218	100	12,658	13,109	15,478	100	100	100

TWh=10 億 kWh, GW=100 万 kW, 現=現行政策シナリオ, 公=公表政策シナリオ, 持=持続可能開発シナリオ

3. 持続可能開発シナリオ

持続可能開発シナリオは、パリ協定、全ての人のエネルギー・アクセス、および大気質の清浄化の目標達成に必要な施策が実施されると想定するシナリオ。

他のシナリオと同じ経済成長であるが、強力なエネルギー効率政策により、2040 年のエネルギー需要は現在よりも減少する。ガス需要は 2030 年まで増大するが、その後減少に転じる。石炭利用の大幅減少に伴い、低炭素エネルギーのシェアが増大する。

持続可能開発シナリオに見られるように、急速な CO₂ 排出量の減少を実現するには、エネルギー効率やクリーンエネルギー技術を重視する一層野心的な政策行動が必要である。

Ⅲ. 電力の見通しと低炭素化の進行

公表政策シナリオでは、世界の電力需要は、2040 年まで年率 2.1 % (一次エネルギー需要の増加率の 2 倍) で増加し、電化率 (最終エネルギー消費に占める電力の割合) は、2018 年の 19 % から、2040 年には 24 % になる。持続

可能開発シナリオでは、電力の役割は更に増大し、2040 年の電化率は 31 % に達する。

2040 年までの世界の電力需要の増加の約 90 % は、開発途上国に起因するが、それでも途上国の一人当たりの電力需要は、先進国の 6 割程度である。

電力供給は引き続き低炭素化へ移行する。公表政策シナリオでは、2018 年から 2040 年までの電力需要の増加の 4 分の 3 を再生可能電源が占める。再生可能電源のシェアは 2018 年の 26 % から、2040 年には 44 % に増大する。「太陽光+風力」のシェアは、コスト低下と政府の支援政策により、7 % から 24 % に増大する。

石炭火力の発電量は横這いで、そのシェアは 2018 年の 38 % から、2040 年には 25 % に減少する。

公表政策シナリオでは、2035 年頃に太陽光が、石炭やガスを抜き最大の発電設備容量を持つ。風力発電設備容量は 3 倍に増える。

世界の石炭発電設備はほぼ横這いである。主にアジアでの 7.1 億 kW の開発が、先進国での退役を丁度上回る形になっている。

公表政策シナリオでは、世界の電力部門における CO₂ 排出量は、発電量が 60 % 増えるにもかかわらず、2040 年まではほぼ一定。これは再生可能電源のシェア増加と化石火力発電所の効率向上による。炭素強度(単位発電量当たりの CO₂ 排出量)は、現在の 475 g/kWh から 2040 年には 310 g/kWh に減少する。持続可能開発シナリオでは、炭素強度は急減少し、100 g/kWh 以下になる。

持続可能開発シナリオでは、原子力と二酸化炭素回収・利用・貯留(CCUS)付き発電所の利用がさらに増加し、低炭素電源のシェアは約 85 % になる。

IV. 原子力も一定の役割、SMR 動向も注視

公表政策シナリオでは、2040 年の世界の原子力発電量は約 30 % 増加するが、発電量シェアは現在の 10 % から 8 % へと、わずかに減少する。

先進国では、原子力は現在最大の低炭素電源(発電量シェア 18 %)であるが、2040 年には風力、水力に続く 3 番目の電源となる。

開発途上国の原子力発電量は 2040 年には現在の 2.5 倍になるが、発電量シェアは 5 % 程度を維持する。

公表政策シナリオでは、原子力設備容量は現在の 4.2 億 kW から 2040 年には 4.8 億 kW に増加する。この間、原子力設備容量は、先進国では 1/4 減少し、開発途上国では 2 倍以上に増加する。一方、持続可能開発シナリオでは、原子力は 2040 年に 6 億 100 万 kW に増加する。

WEO2019 は、先進国において、もし原子力への更なる投資が行われず、運転期間延長や新規建設が進まなければ、先進国の原子力設備規模は 2040 年には現在の 1/3 になると予測する。この結果、CO₂ 排出量の増大につながり、クリーンなエネルギー・システムへの移行が一層難しくなり、費用も膨大になると警鐘を鳴らしている。

原子力設備規模の増加は、主に中国、インド、ロシア、中東が牽引する。多くの先進国では、既存プラントの高経年化による退役や新規プラント建設の経済性への懸念から、原子力規模が減少しつつある。しかし、先行投資が比較的少なく、給電可能な低炭素電源としての小型モジュール炉(SMR)が近年関心を集めている。

主要国・地域別に見ると、中国が、世界の原子力開発

を牽引する。中国は 2030 年頃には、米国や EU を抜き、世界最大の原子力国になる。

米国は、既存の原子炉群の平均運転年数がほぼ 40 年で、ボーグルの 2 基建設完了後の大型炉の新規計画が見当たらないため、原子力規模は減少する見込み。幾つかの州で原子力支援政策が出ているものの、原子力発電量シェアは、2018 年の 19 % から、2040 年には 11 % に落ちこむ。

EU では、原子力発電が 2018 年に EU の電力の 25 % を供給した。幾つかの加盟国は、原子力発電量シェアが 50 % 以上を占めている。原子力の段階的廃止計画がドイツ、ベルギー、スペインで発表されている。フランスは原子力発電量シェアを 50 % に下げる方針である。

日本の重要課題は、2011 年の福島事故を受けて停止中の原子炉群の再稼働である。2019 年 5 月現在、9 基が再稼働を果たした。テロ対策施設の設置期限問題で、原子炉の再稼働ペースに不確実性が増している。

V. 結び—政府の先導的役割が不可欠

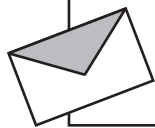
WEO2019 は、持続可能な未来に向けてのエネルギーシステムの変革には、政府の主導的な役割が重要であるとして次のように述べている。

世界のエネルギー需要の広がりを見ると、単純で単一の解決策はなく、複数の燃料と技術によって、大幅な CO₂ 排出量の削減は達成される。政策当局・規制当局は技術変化のペースに遅れず、柔軟かつ機敏に対応しなければならない。エネルギー効率の大幅改善が、持続可能な開発シナリオに近づける重要な要素である。エネルギー・システム全体を転換するには、省エネ、CCUS、水素、原子力などより幅広くエネルギー技術を進歩させる必要がある。

これらには政府の先導が不可欠である。個人、市民団体、企業、投資家のイニシアティブが変化をもたらすことはできるが、最も重要な立場にあるのは政府である。政府こそが、エネルギー分野のイノベーションと投資を決定する条件を設定する。

(2020 年 4 月 24 日 記)

理事会だより



理事会の活動について

本日(5月14日)、新型コロナウイルス感染拡大防止のために全国に出されていた緊急事態宣言が39県において解除となることが決まりました。とはいえ、まだまだ楽観できる状況ではありません。本稿が掲載される頃には、落ち着いた状況になってもらいたいと願うばかりです。また、医療関係者等の事態収束に当たっている皆様、社会インフラ維持のために尽力されている皆様に、この場を借りて感謝の意を表します。本稿では、新型コロナウイルスのため半ば活動停止に追い込まれている状況の中で、理事会がどのような活動をしているのか、トピックスを紹介します。

理事会について

理事会は理事(現在18名)、監事(現在2名)および事務局長で構成されており、「理事会運営規程」によると、その任務は本会の「会務遂行に関し、管理、運営の基本方針を決定する」こととなっています。理事は各々複数の会務を分担し、その会務を実施する主体となる常置委員会等の担当理事となります。例えば、理事会主催のイベント(年会等での理事会セッションなど)は企画担当理事が委員長を務める企画委員会が具体的な実施案を作成し、理事会の承認のもと、企画委員会が中心となって実施しています。

今年度の年会・大会等への対応について

新型コロナウイルスのために、これまでに多くの活動が制限されており、本会のイベントや会合も3月以降はほとんどが中止または、延期となっています。理事会も、年8回程度の会合(理事会)を開催していますが、3月の会合はメール審議となり、5月はウェブ会議となる予定です。現在の理事会メンバーは昨年6月の総会から活動を開始したわけですが、最後の3ヶ月は、いわゆる3密を避けるため、従来どおりの活動が難しい状況となっています。そのような状況の中、理事会としての意思決定が必要な事態が多く発生しており、その最初の事案が3月16日～18日に福島大学で開催予定だった「2020年春の年会」の中止決定でした。これを理事会で決定したのは2月下旬で、年会開催まで1ヶ月を切っていました。当然ながら、プログラム編成、会場の準備、参加事前受付などがすでに行われており、ほぼ準備が完了した状態でした。一方、新型コロナウイルスの影響は2月下旬の時点ではまだ少なく、感染者数は全国で累計で100名程

度であり、その後の大幅な感染者数の上昇は想像できない状況でした。そうした中、会長の呼びかけにより、副会長、担当理事に加え、年会の現地委員等による打合せを行い、他学会の状況も踏まえて、年会開催の可否について議論致しました。私も副会長として参加しましたが、当初は、懇親会等は自粛するにしても、ここまで準備した年会を中止する必要まではないだろうと考えていました。しかしながら議論の中で、参加者が全国から集まり、かつ長時間密集した状況となってしまうこと、またマスクや除菌用アルコールなどがすでに入手困難であり、主催者として十分な感染防止策がとれないことなどが明らかとなり、さらに、万一感染者が発生した場合の学会としての対応が非常に難しいとのことから、中止という方針を決定し、全理事の了解を得て、中止が正式に決まりました。この年会中止を受けて、3月上旬に予定していた廃炉に関するシンポジウムが延期されるなど、本会活動に大きなインパクトを与えました。3月以降の感染拡大の様子はご承知のとおりで、あとから見れば非常に適切な判断だったと言えますが、私としては意思決定の難しさを痛感しました。

なお、現在は、9月16日～18日に九州大学で開催予定の2020年秋の大会の開催方式について、担当理事(部会等運営委員会委員長)を中心に、検討を進めているところです。この会合は、今後の本会主催の会合のモデルになるものといえます。

福島原発事故後10年に向けて

来年3月11日は、東京電力福島第一原子力発電所の事故から丸10年となります。これに向けた本会としてのイベントを準備するために、昨年9月より検討を開始しています。この検討には、理事会、企画委員会の他、福島第一原子力発電所廃炉検討委員会、編集委員会、若手連絡会も参加しており、いわゆるシンポジウム開催のほかに、本会の事故調査委員会が出した提言のフォローや学会誌における福島原発事故特集号の発行など、複数のイベントが企画されています。理事会では、企画委員会とともに、シンポジウムの内容を検討しているところですが、来年春の時点で、新型コロナウイルスの影響がどのようになっているか見通せないところであり、開催の方法も含めて幅広い検討が必要です。皆様からのご提案も期待しています。

(京都大学 中島 健)