ATOMOΣ 日本原子力学会誌 2020.8

巻頭言

1 科学・技術と社会の接点
白川英樹

時論

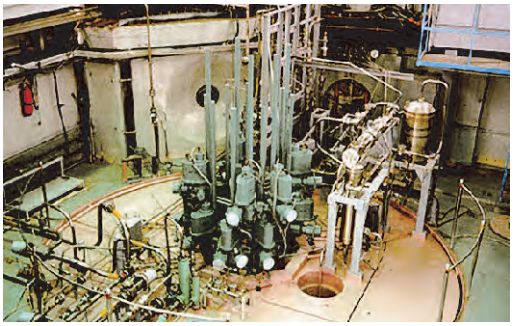
2 浦賀沖に見える日本のエネルギー問題
金田武司

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，福島の環境を知り，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

29 Column

Zoom 越しの連帯 井内千穂
パンデミックでの気付き 小澤杏子
新型コロナウイルスとスロバキア 妹尾優希
サイエンスの真髄と “cram” 鳥居千智
目に見える，見えない 服部杏菜
「ためにする」批判を見分ける 服部美咲

報告

51 福島の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，福島事故の影響を改めて考える。

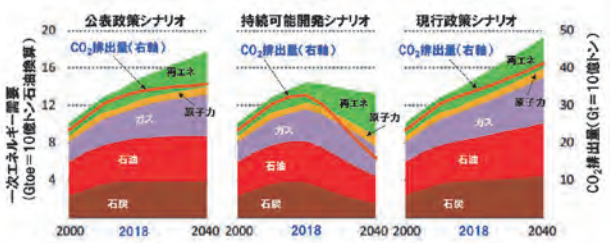
藤田玲子ほか

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 CO_2 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 ―うまくリスクを使えるために（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がったのである。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るに至った。

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）

時論

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はじ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の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。セキュリティー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，補給が止まればタンクは2週間から20日で空になる。原油と同様流通過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れは大きな経済損失を生んだ。原油取引では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が，見つかったとしても市場が暴落しているので売ったら逆ざやとなる。

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）

講演

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 つの短いブレークを配置しました。すなわち，【ブレーク 1】「感覚の違い」【ブレーク 2】「コミュニケーション」【ブレーク 3】「変わらない意見」【ブレーク 4】「ひとつのチーム」【ブレーク 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，ブレークについて記述する部分ではブレークの企画とその意味について解説します。

【ブレークと解説】

冒頭がいきなりブレークのスライドです。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もありません。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「アイスブレーク」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，ブレー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，何らかの形でブレー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

The Basics of Communication：Ittaka Kishida.
（2020 年 4 月 22 日 受理）

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たち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っていません。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思うかもしれません。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。

【ブレークと解説】

次のブレークで示したのは，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。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，たとえそうだとしても，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トするのです。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トしたいのです。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思うかもしれ

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変わり，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いけません。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トしたがるのです。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。

【ブレークと解説】

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。このブレー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て，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。

【ブレークと解説】

このブレー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し，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も可能なため，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」だ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」が不十分だというのです。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，「タケコプター」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でしょうか。未来を一緒に作るという気構えがあるでしょうか。

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。

【ブレークと解説】

最後のブレークでは，なぜ今回の講演に「ブレーク」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 回のブレー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。アイスブレークのような，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。

このようなブレー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

ブレー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「うまいアイスブレークだ」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・いったか）
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や監修をお願いし，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，福島の環境を知り，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。

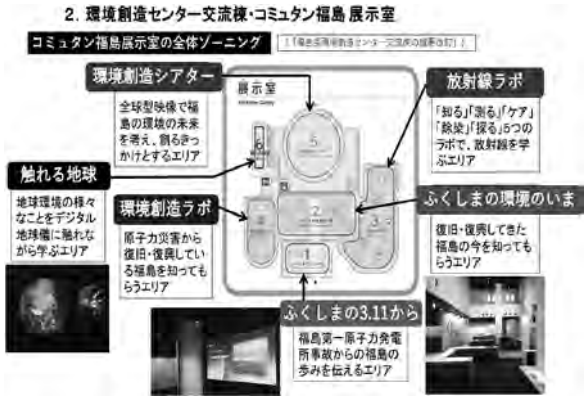


図１　展示室エリアの紹介図

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。

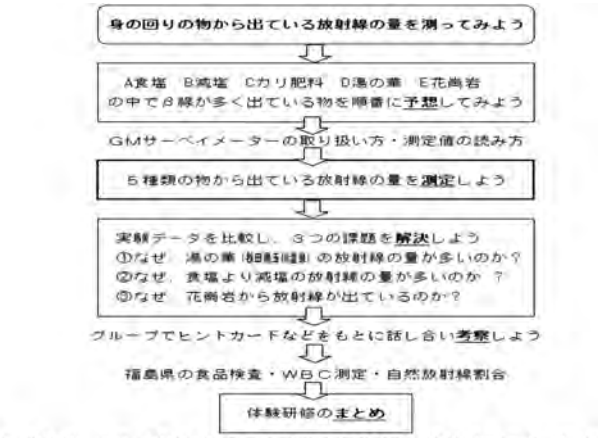
3．面白い放射線 Science Table，Craft，Show

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

⑵ Commutan Craft：

①放射線モデルストラップを作ろう。

② X 線装置でレントゲン写真を撮ろう。

⑶ 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。生徒一人一人が抱い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。

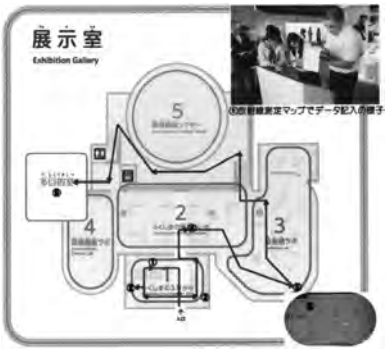


図 3　学びのマップ例

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。

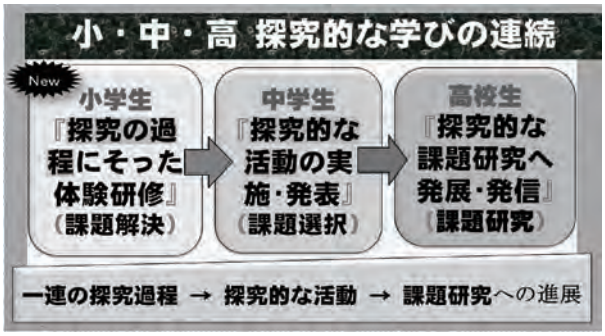


図 4　小・中・高「放射線の学び」の連続性

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申し上げるとともに，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，「福島の過去に学び，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ていること，大学生においても当時の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性があること
- 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 1 mm 方眼工作用紙を用いて 1 辺が 10 cm のサイコロを作り，1 L，1 mL，1 μL の嵩の違いを目視することから 1 μSv 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みなさま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/gimukyoiku29.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

放射線と福島の現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現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，放射線や福島の現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，放射線や福島の現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現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現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現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現状の一端を述べる。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現状について，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)

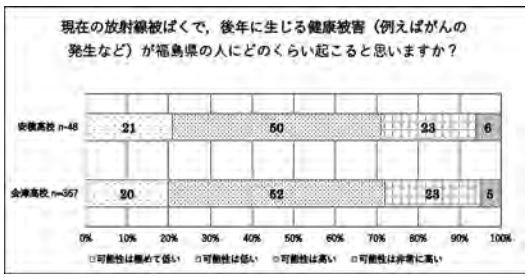


図１　後年影響
（出典）千葉惇，物理教育 67(4)，p.236　図４より筆者作成

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，被災した人々や復旧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。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 ATOMOΣ，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ことが必要，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。

解説

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。これに応え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ヵ国存在している。その中で今年UAEとベラルーシの2ヵ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り，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。

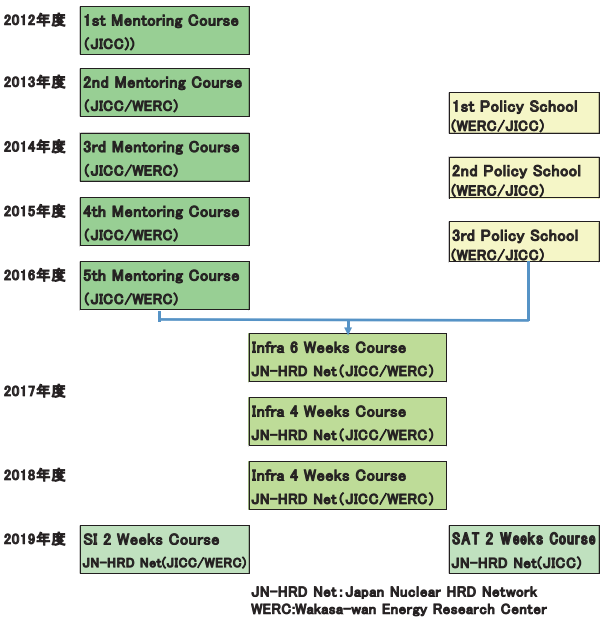


図 1　IAEA との共催コースの経緯

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ヵ国，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，一巡した後に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，品質マネージメントシステム，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，フィー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なようにしている。

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ことが否定できない。

① 各機関の提供するプログラム間のつながりがない，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が中心であり，よりまとまった形での支援プログラ

<Target: Phase 3 Countries >

対象者

Objects / Major Items	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

分野別

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はいるが，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，在宅ワークにいそしむ日々である。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。

原発問題にしろ政治課題にしろ，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。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ィルス。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ィ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の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。オンライン口頭試問は，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る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留まった。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変わり，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，いつの頃か数字のほうがわかりやすいと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を詰(なじ)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。

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

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し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。3 mm 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発して跳ねる。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)]。



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）

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 を含むペ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ペ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. Yamamo, 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て，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。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。

Mechanism of electromagnetic noise and its reduction for noiseless society：Hiroshi Toki.
(2020年4月26日 受理)

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ンドが接続されており，実際にはグランド平面(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

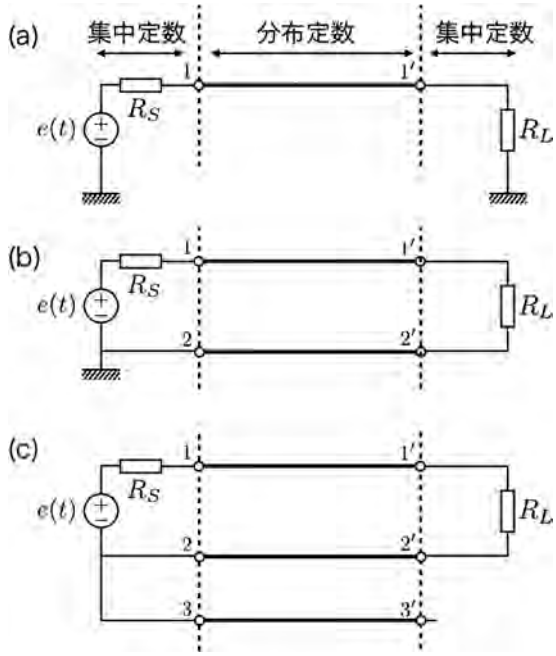


図1　(a)通常の伝送理論で教えられる回路図です。グランドがベタアースを想定していることが多いので，グランド部分は集中定数回路的に考えられることが多いです。(b)信号が戻ってくる部分も考慮されており，戻り線を分布定数回路としてとらえている図です。(c)環境(例えば回路ケース)を考慮し3本目を加えた場合の回路図。通常は電気信号を担う電荷は環境とも相互作用しているので，われわれの研究ではこの回路図を用います。

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気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。

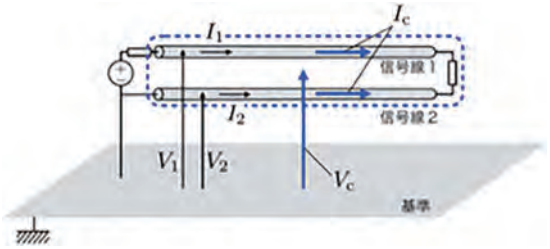


図2　一般的なコモンモードの扱い。コモンモード電圧 V_c は，基準導体から見た2本線で表された回路の電圧であり，コモンモード電流 I_c は，2本線で表された回路に同じ向きに流れる電流の和で表されます。電荷保存則があるので，このコモンモードの戻りの信号は平面導体を流れているはずです。

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。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，どれくらいの大きさ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V_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番目の線を流れています。

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

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

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

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つ増えることになりますが，実際に境界条件を考えるときには，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100 V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

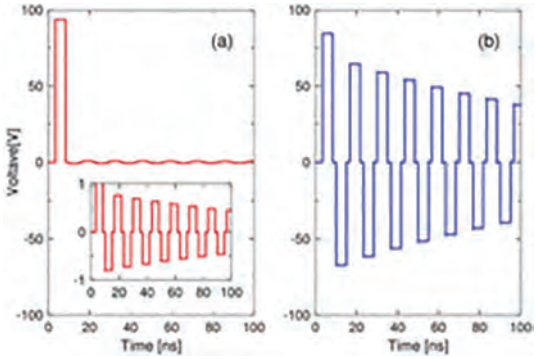


図3　図1(c)の回路でe=100 Vの矩形波を入れた時のインピーダンスマッチングを取っている時の右端での電圧の時間変化を示しています。(a)ノーマルモード電圧(b)コモンモード電圧です。計算の詳細は論文[5)]を参照してください。

でのノーマルモード電圧(α)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ギ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％のリンギ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

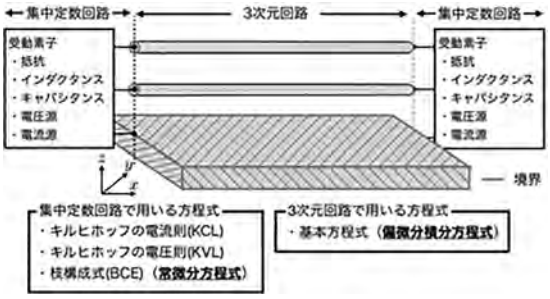


図 4　電気回路における集中定数回路と分布定数回路の境界の模式図。集中定数回路は任意の導体境界に接続されています。集中定数回路(常微分方程式)と伝送線路や導体(偏微分方程式等)をどのように接続して理論や計算手法を行うかがわれわれのグループの課題です。

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集中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

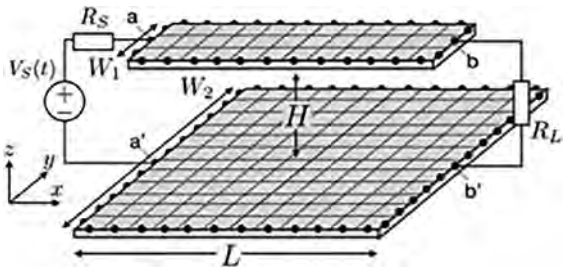


図 5　薄い 2 つの 2 次元導体の場合の回路系が示されています。数値計算で伝送現象を取り扱いますが，たくさんのセルに分解してそれぞれの電位や電流を計算します。

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ことで信号が乱れます。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ことが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を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常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，そんなにも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. Jonesand, J. T. Bolljahn, IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques 4 (1956)75-81.
3) Clayton R. Pauland, Donald R. Bush, In IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 4 (1987)197-203.
4) David E Bockelman, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques3 (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 Techniques22 (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