ATOMO∑ 日本原子力学会誌 2019.8

巻頭言

SDGsとディジタル革命が迫る 科学技術行政の変革

有本建男

解説

17 不確実なリスクに備える組織文化 福島第一原子力発電所事故の教訓を 踏まえて

厳しい適合性審査を通って運転を再開した発電プラ ントの運営に求める組織文化が、福島第一事故の教訓 を活かして不確実なリスクに備えたものへと一層強化 されるための分析と方策を提言する。

久郷明秀

22 生徒の意欲を喚起する授業デザインとは 福島の震災復興期を考える

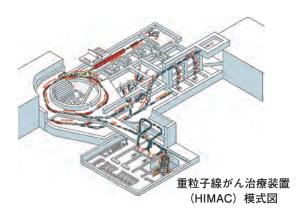
生徒たちが放射線の正しい知識を身に付けるために は、自らが課題を解決していこうとする力が必要だ。 放射線をベネフィットとリスクの両面から考えていく 主体的な学びの場を設計した。

野ヶ山康弘

27 重粒子線がん治療装置の開発 日本から世界へ

重粒子線がん治療装置は日本が主導権を握る数少な い優れた医療機器である。ここではその装置開発の歴 史,治療の現状,装置の最新技術動向と将来展望につ いて紹介する。

平田 寛,萩原 剛,長本義史



時論

- 原子力発祥の地から、今考えていること 2 山田 修
- 「社会の中の予測」という視点

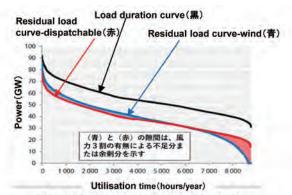
山口富子

解説

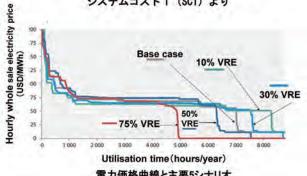
12 電力システムコスト: OECD/NEA の研究 プラントレベルのコスト評価を超えて

2019 年に公表された OECD/NEA の「脱炭素化の コスト: 高比率の原子力と再生可能エネルギーによる システムコスト」は、いろいろな発電システムコスト の課題について考える引き金となっている。ここでは そのポイントを紹介する。

松井一秋



フランスの電力システムに3割の風力を入れる; システムコスト1 (SC1) より



電力価格曲線と主要5シナリオ

32 Column

「「あつまれ!げんしりょくむら」 閉鎖に思う」 井内千穂 「刹那的なマシンへ」 佐田 務

「雲行きの怪しいモホフツェ原子力発電所

新規原子炉の運転開始|

「学問のサラダボウル」

「避難指示という「自由の制限」を考える」 服部美咲

「貴重なデータはその時しか残せない」

「令和時代のエネルギー問題」

「凍 天」

発電所構内を視察

報告

都内の高校生 18 人が今年 3 月,福島第一原子力発電所を訪問した。自分の目で実物に触れた高校生たちはどう感じただろうか。今の福島と廃炉の現場を見た若い世代の思いを報告する。

東京の高校生、福島第一原子力

井内千穂

FOCUS 国内外の原子力教育事情(6)

52 カナダ・マクマスター大学における 原子力工学教育

長﨑晋也

談話室

56 リスク認知は状況で変わる 対象への不安は知識不足のせいではない

佐田 務

58 リケジョの思い(6) がんばれ、科学の自分

口町和香

日々是好日~福島浜通りだより(3)

59 冬来たりなば春遠からじ

吉川彰浩

視点 <社会>を語る(4)

60 社会学者は、〈社会〉を記述するべきか、 考察するべきか

齋藤圭介

- 6 News
- 39 From Editors
- 62 会報 原子力関係会議案内,新入会一覧,寄贈本一覧,訃報,2019年度役員一覧,第52回(2019年度)学会賞受賞候補者推薦募集,2019年秋の大会見学会ご案内,英文論文誌 (Vol.56,No.8)目次,主要会務,編集後記,編集関係者一覧

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

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

解説シリーズ 電子顕微鏡の現状と将来展望(1)

36 走査透過電子顕微鏡および 電子エネルギー損失分光法による 材料評価

走査透過電子顕微鏡(STEM)は電子エネルギー損失分光法を組み合わせることにより、局所領域で結晶構造解析や元素分析が可能になる。

木本浩司

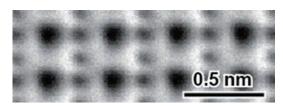
妹尾優希

鳥居千智

坂東昌子

渡辺真由

マイケル瑛美



STEM で観察された酸素原子列

サイエンス

40 原子核の「かたち」から核図表を見る

原子核は、どのような「かたち」をしているのだろうか。エネルギー密度汎関数法は、その系統的な予測に加えて、量子的に揺らぐ「かたち」も明らかにしつつある。

中務 孝, 江幡修一郎, 鷲山広平

講演

54 IAEA の理念と任務 「平和と開発のための原子力」を支える人材

> 「原子力には世界をより安全に, より危険なく, より繁栄させる力があると信じている」

> > マリー A ヘイワード

理事会だより

61 理事会活動をふりかえって

土田昭司

SDGs とディジタル革命が迫る科学技術行政の変革



科学技術振興機構上席フェロー、政策研究大学院大学客員教授

有本 建男 (ありもと・たてお)

京都大学大学院理学研究科修士課程修了。文 部科学省科学技術・学術政策局長,科学技術振 興機構社会技術研究開発センター長などを歴 任。科学技術基本計画の策定で実務者として 中心的な役割を果たしてきた。国際高等研究 所副所長を兼ねる。

21世紀に入って、科学技術政策の範囲は「科学技術振興のための政策(Policy for Science)」にくわえて、「社会課題解決のために科学技術を活用するための政策(Science for Policy)」に大きく広がっている。1999年、世界の科学技術コミュニティーは、21世紀の科学技術の責務として「知識のための科学」にくわえて、「平和、(持続的)開発、社会の中の社会のための科学」まで広げる「ブダペスト宣言」に合意した。わが国ではこの理念はいち早く政策に盛り込まれたが経済的効果だけが強調されてきたように思う。

2015 年に国連全加盟国が一致して決議した「持続可能な開発目標 Sustainable Development Goals (SDGs)」は、貧困、食料、健康、水、エネルギー、都市、生産と消費、気候変動など、21 世紀の人類と各国、地域が直面する難問に取り組む壮大なビジョンで科学技術への期待は大きい。国連、OECD、EU はそれぞれ、「ロードマップ」「ミッション志向政策」「スマート・スペシャリゼーション」と称して、経済と社会と環境を分離出来ない SDGs 時代を迎えて、国や地域、セクターを越える科学技術の新しい価値感と方法の開発、実践に取り組んでいる。筆者は、関連する国連や OECD の会議に参加しているが、SDGs はグローバル政策であるとともに国家政策と地域政策の主流になりつつある。この視点から、わが国の科学技術行政の変革について次の二点を提案したい。

第一は、省庁の縦割りの変革である。古い産業構造や技術分野に基づく組織と行政手法の時代に応じた再設計であり、画一・均一的な研究開発投資と優先順位の多様化・個性化である。これは、自然科学と人文社会科学の連携、ファンディング・評価・人材育成方法の革新から、多様なステークホルダーによる供給側と需要側の協働、意志決定のトップダウンとボトムアップの組合せに及ぶ。近年発達している AI とビッグデータのディジタル革命はこうしたイノベーション・システム全体の変革を可能にすると考える。

EU は、2021年から開始する次期科学技術政策 "Horizon Europe" の骨格として、基礎研究、社会課題解決型研究、スタートアップの3本柱とそれらへの資金割振りを既に決定しており、それを実行する行政体制の大幅再編を進めている。わが国も国家戦略と位置付ける "Society5.0" (SDGs と同義の国内目標)を実現するためには、省庁や分野、セクターを越えて政策手段を総合するミッション志向の行政体制の変革が必須である。政府が昨年設置した「統合イノベーション戦略」と「戦略推進会議」はその端緒になると見ている。

第二は、より実務的で政策を具体化する施策・プログラムレベルでのマネジメントの変革である。科学技術政策の推進構造は、政策・施策・プログラム・プロジェクトの4層からなる。具体的に資金が投入されるのは、プログラムとプロジェクトであるが、事前・事後評価は今までプロジェクトすなわち研究現場に集中し、行政とファンディング機関が責任をもつ施策とプログラムに対する評価は不十分であった。これが、資金の効果的な運用や成果の創出を阻害し研究者の疲弊を招いている。過去の施策やプログラムを十分評価しないままに新しいものを進めようとする傾向も強い。激しい変化の時代を迎えて、国内外の知見や教訓を蓄積自省し、継承し活用する意識と体制を強化すべきであり、行政側の素養と能力の向上も欠かせない。

21 世紀前半を画する SDGs とディジタル革命とハイテク覇権争いは、19 世紀初めから築き上げられて来た近代科学技術の価値観とイノベーション・エコシステムとインテリジェンス機能の変革と強化を迫っている。 (2019年6月10日 記)



原子力発祥の地から、今考えていること



山田 修 (やまだ・おさむ)

茨城県東海村長 高崎経済大学経済学部卒業後, 1986 年に茨城 県庁入庁。2010 年に東海村副村長, 2013 年 より現職。

どうして、原子力はこんなにも嫌われてしまったのでしょうか?人々にとって、福島第一原発事故は大変衝撃的であり、不安と怒りが増幅されたことは間違いないでしょう。そして、科学技術を信頼していた人々を裏切ることとなってしまった度重なる失態が、今の状況を作り出してしまったとも言えるのかもしれません。

東海村は、原子力発祥の地として、全国にその名が知られることとなり、これまで60年以上にわたり原子力と共存してきました。かつては、寒村と言われた時代もありましたが、原子力研究施設を誘致したことを契機として、目覚ましい発展を遂げ人口が急増し、今では、村とは思えないほどの成長を果たしてまいりました。

私は、平成25年から村長に就任し、現在2期目を迎えておりますが、東日本大震災後の本村の状況は、原子力問題において全国から注目されており、各種メディアに取り上げられることも多くなっています。当然、私の発言や行動は、関係者のみならず、多方面へ影響を与えているようでありますので、このような形で、私見を述べると言うことは極めて珍しいことと言えるでしょう。

しかしながら、日本原子力学会ということで、専門家の皆様に対しまして、私が今考えていることの一端を述べてみたいと思い、そして、現状の閉塞感を少しでも打開する契機となればと願い、寄稿することにしました。

今,原子力事業者が厳しい世論の指摘を受けておりますが、自治体も同様に、住民からの様々な意見・要望等を受け止めており、その対応の難しさを痛感しているところです。この問題は、決して、事業者と自治体の話ではないのです。そもそも、国策として始まった原子力政策を今後どうしていくのかという方向性が問われているわけです。そこには、当然ながら、国の姿勢が重要でありますが、原子力に関わる全ての人々が共に考え、答えを導き出していく必要があると感じています。

冒頭に、最近の原子力のイメージを呟きましたが、東日本大震災から8年が過ぎた現時点においても、原子力に対する国民の理解は得られていないと感じています。福島事故の収束がなかなか思うように進まない。福島の復興は少しずつ進められているものの帰還への道のりが

遠い。原子力発電所の安全対策が、新規制基準に基づき 進められているものの司法の判断が揺れている。そして 何よりも防災対策として、自治体が取り組んでいる広域 避難計画の策定が困難を極めている。こうして一つ一つ 書き上げてみても、国民に理解してもらうことが難しい と感じているのは、私だけではないと思います。

私は、日本のエネルギー事情を考えると、原子力発電は、一定程度必要であると認識しています。原子力発電所が動かなくても停電は起きないし困ることはないと言う人たちがいますが、自分の身の回りで不都合を感じていないだけであって、社会インフラとしての電気を考えると、決して安定しているとは言えないでしょう。そして、これからの日本では、Society5.0で実現する社会を目指すとされています。IoTで全ての人とモノが繋がり、AIにより情報の高度利用が可能になり、ロボットや自動運転技術がさらに進化していきます。こうしたイノベーションを支えていくためにも、社会インフラとしての電気は、より安定的に供給されなければなりません。将来を見据えて、社会全体が冷静に議論していくことが必要ではないかと考えています。

一方、原子力をエネルギーの側面からのみ捉えている 風潮には、違和感を持っているところでもあります。原 子力科学は、基礎・基盤研究や物質科学研究など、幅広 い分野で活用が期待されている科学技術であると考えて おります。この分野で活躍されている研究者も多いと思 われますが、原子力の有用性や可能性を国民の皆様に理 解していただくうえでは、皆様の発信力にも大いに期待 しているところです。特に、次の世代を担う学生等に対 しましては、その魅力が伝わらなければ、人材は集まっ てこないでしょう。現状を嘆いてばかりはいられません が、原子力が抱えている様々な課題を解決するためにも 研究開発は推進していかなければなりません。本村は. これまでもそうであったように、これからも研究開発の 拠点であると認識しており、この村から、社会に貢献す る成果が生み出されることを期待しているところであり ます。そして、自然科学としての成果だけでなく、社会 科学の分野においても、先導的な役割が果たせればとも

考えています。

昨年12月に、福島県で、「高校生が被災地で考える防 災サミット in Fukushima~原発と私たちの未来を描く ~」が開催されました。ここに参加した高校生は、地元 である福島県内の生徒18人と原発立地9道県の生徒20 人であり、彼らは4つのグループに分かれてディスカッ ションを重ねました。テーマは4つです。「災害後の地 域コミュニティ内対立をどう防ぐか」「数値化されにくい 災害被害に対する防災を考える「中間貯蔵施設の合意形 成をどのように行うべきか」「災害発生時に若者がどのよ うに活躍するか」どのテーマも難しいなと思っていまし たが、彼らは真剣に考え議論を続けていました。時間が 足りなくなって、寝る時間も削りながらまとめ上げ、素 晴らしいプレゼンが披露されました。これから、20年 30年の未来を担っていく若者が、大人でも尻込みしてし まいそうな難題に挑んでいる姿は頼もしくもあり、一つ の可能性を示してくれたと思います。

まちづくりに、若い世代の方々の声を反映させなければならないということは、以前から指摘されておりましたが、新たに何かを創り上げるというテーマであれば、意見も出やすいでしょうし、楽しい議論になることは間違いないでしょう。しかし、課題を解決するための議論や正解を導き出すことが困難なテーマとなると、どうしても私達は避けてしまいます。原子力問題もそうでしょう。いろいろな課題があることは認識しているにもかかわらず、結論を先送りしています。次の世代に対しての責任を果たしていません。何かを始めなければならないと強く感じています。出来れば、次の世代を担う10代や20代の若者達と共に考えてみたい。まだ、具体的な取組方針が決まっているわけではありませんが、誰もが冷静に議論できる場所を作っていきたいと考えており、引き続き検討を重ねているところです。

最近、私が注目しているのは、「自分ごと化会議 in 松江」です。原発問題については、これまで、推進派と言われる人達と反対派と言われる人達の対立構造であったわけですが、お互いに自分たちの主張を繰り返すばかりで何ら解決策も見出せず、感情的な対立が深まっていくばかりであると感じていました。どうしたら、みんなに原子力問題を一緒に考えてもらえる環境を作ることが出来るのだろうか?と考えていた時に、松江市で行われていた取り組みを新聞で見つけました。記事を読んで、私自身の中で、「これだ!こうした取り組みが可能なのか」と勇気をもらえた瞬間でした。

原発の賛否を決めるのではなく、原発を「自分ごと」と して考えられるように議論を重ねることが大事であると いうこと、そして何よりも、住民が自らの行動で、会議 を運営していることが素晴らしい。ファシリテーターと して、「構想日本」の伊藤氏の役割も大きかったとは思いますが、間違いなく、市民が主体的に進めてきた画期的な取り組みであると思います。正直、羨ましくもありますが、本村においても、このような取り組みが実現できないものかと頭を悩ましています。やはり、行政が仕掛けてしまうと、上手くいかないだろうなとは感じておりますし、「他人ごと」になってしまう可能性も否定できないでしょう。住民が自らの意志で、こうした動きを展開してもらえたらと願わずにはいられません。

私は、人の話を聴くこと、声に耳を傾けることを大切 にしています。村長に就任してから間もなく,「ふれあ いトーク」という住民との対話の場を設けています。毎 月1回, 村内の商業施設のフードコートの一角をお借り して, 3時間ほどの間, 住民の様々な意見・要望等を直接 お聞きしお答えしています。当初は、原発問題で意見を 述べてくれる人もいましたが、一方で、私の考えを教え てくれという人も多かったかなと記憶しています。私自 身は、まだまだ判断できる状態にはないと答えていまし たが、これは逃げているのではなく、判断するための情 報が足りないと思っていましたし、住民の意向が十分把 握されていない段階で、自分が勝手に結論を出すことは できないと考えていたからです。住民の負託を受けてこ の職に就いているという責任を感じていたからこそ、悩 みながら結論を出さなければならないと思いますし、住 民の方々にも、当事者意識を持って、一緒に考えてもら いたいと願っているからです。

「東海村長って大変でしょう?」これまで多くの方々から、そう言われてきましたが、私はその度に「そうですね。でも、好きでやっていますから」と明るく答えてきました。確かに原子力政策に関する村の舵取りは、容易なことではありません。でも、原子力を誇りとしてきた本村が、原子力に振り回されている状況を看過出来ませんでした。村長が、最終的に重大な判断を下さなければならない立場であることは十分理解していましたし、解決策も見出せない中で、日々奮闘しているわけですが、原子力のシンボリックな村として再び輝きを取り戻せるようチャレンジを続けていかなければならないと決意しているところです。

まちづくりにおいて、住民力は最も重要な要素の一つであると思います。誰もが自分たちの「まち」に愛着を持ち、歴史や文化を大切にしながら、お互いを尊重し支えあうことができれば、自ずと住民力は高まっていくのではないでしょうか?そして、その住民力が、困難な課題をも克服する力となることを信じています。

いつの日かまた,この誌面で、その後の状況を報告することが出来れば幸いです。 (2019年5月29日 記)



「社会の中の予測 という視点



山口 富子 (やまぐち・とみこ)

国際基督教大学教養学部 教授 ミシガン州立大学社会科学科社会学部卒業。 専門は、社会の仕組みから考える農と食の問題、先端バイオテクノロジーと社会について の社会学研究。著書は『先端科学技術への社 会学的アプローチ』、『予測がつくる社会』な ビ

I. 社会の中の予測

自然や時代の兆候を読み、それに応じて現在の環境を整えようとする行為は、どの時代、どの地域、どの分野においても見られる日常的な出来事である。地球温暖化問題、地震、台風、噴火などの自然災害による被害軽減の為の予測、市場規模や株価に関する市場予測、少子高齢化やそれに伴う限界集落の発生の動向を知る為の人口動態の評価、科学技術政策の立案や関連する知識基盤の整備に資する技術予測など、予測の適用範囲は実に広範であり、個人あるいは公的な判断に影響を及ぼす。併せて、未来学のような予測に関連する専門の学問が生まれ、SWOT分析、技術ロードマップ、デルファイ法、シミュレーション・モデリングといった、予測のための技法の洗練も試みられており、今後も予測に関連する事象を日常的に目にする機会がますます増える事であろう。

しかし、こうした状況について社会との関わりという 点から考えるといくつかの問題点が浮かび上がる。ま ず、「予測」という語の意味の多義性によって生じる誤解 や社会的混乱である。予測という言葉の類義語として予 知、予測、予想、予言、予報といった言葉が存在するが、 武藤ら(2013)は、それらを感覚的な言葉と科学的なエビ デンスを伴うものとに分類する。その上で, 予知, 予測, 予想は、それぞれを包含する意味を持つ時があり、科学 的なエビデンスが有っても感覚的な言葉が使われる場合 や、その逆もあると述べる。例えば、大規模地震対策基 本法では、「地震予知情報」という言葉が使われ、地震調 査研究推進本部では、「地震活動の予測的評価手法検討 小委員会を設置」という言葉が使われている事から、同 じ事を別の言葉で指し示すという事が日常的に起こって いる事がわかる。近著の『予測がつくる社会』(山口・福 島 2019)の中で、鈴木と纐纈は(2019:174)、予知とは、 いつ、どこで、どれぐらいの大きさの地震が発生するか を「確定的」に提示するもの、予測とは、数十年の範囲で

将来, どこで, どのような大きさの地震の揺れが起こるのかを「確率」で示すものであると述べる。しかし, 先に示した例のように, 日常においてそれらがどの程度厳密に区別され使われているのかは, 大いに疑問である。話し手が確率論的な意味で話をしていたつもりが, その情報が確定的な話となって理解され, 混乱が生じるという事は, 良く見聞きする話である。

さらに、専門家が予測的な発言をする場合その発言がきっかけとなり、社会に大きな影響を及ぼしてしまう事もある。そもそも予測は、社会的諸要因の影響を受けながら、本来意図したものとは異なる形で「消費される」という側面を持つのである。

異常気象や巨大地震に社会的注目が集まる中、予測科 学を社会との関連で考える事がこれからますます重要に なるだろう。しかし二つ目の問題として、地震、気象、 市場、人口など、どの領域を取り上げても、予測結果の 意味やその含意を理解する際には、高度な専門的知識が 必要となる。専門外の人間にとってはその内容を理解す る事、また予測ツールを社会でどう活用していくのかを 想像する事は、簡単な事ではない。その為、それらに関 し政策議論が必要な時には、専門家に委託するような形 式で物事が進められるが、専門家に対する信頼感が揺ら ぐとされる現代社会において、こうした形式を好ましく 思わない人も少なからず存在する事であろう。この状態 を「未来の植民地化」と呼ぶ社会学研究も存在する (Giddens, 1991)。ここでは詳しく述べないが、科学技 術的に長期予測には、困難が伴うが、政治的あるいは政 策的には長期予測が重要な意味を持ってくるという点 も、予測の社会的課題として注目に値するだろう。

さらに、予測には、予測が社会現象を招くという社会 ダイナミズムが存在する。それは見えざる過程であり、 見過ごす事が多いが、社会の中の予測という視点でこの 問題を検討する際には、考えるべき論点であろう。この 点については、次節においてさらに詳しく述べる。

Ⅱ. 予測がつくる社会

科学的根拠に立脚する予測は、一般的には中立的あるいは客観的なものであると理解される事が多い。これを、社会の中の予測という視点で捉えなおしてみると、何が見えてくるだろうか。予測は、社会現象を記述しているだけではなく、予測が人びとの行為を調整し、社会に変化が起こるという捉え方である。これが近著の根底に流れる問題意識である。

この社会現象は、言語行為論において「行為遂行性 (performativity)」という概念で説明されている。オースティン(1978)は、行為遂行性に関連する概念をいくつか述べているが、ここではその中から「発話行為」と「発話内行為」という二つの概念を紹介する。発話行為とは、何かを描写する発言、発話内行為とは、相手の行為を促すような発言を指す。これらを地震予測の問題に当てはめると、「一週間以内に、東京直下で、マグニチュード6~7の地震が発生する事が見込まれる。」という語りは、揺れの程度を予測する描写的な発言であり「発話行為」にあたる。その上で「ただちに逃げて下さい」と言えば、周りの人の行為を促す発話内行為にあたる。

政策議論において予測という問題を検討する際、科学的知見の蓄積や方法論の精緻化に目が行きがちであるが、例えば、予測結果の活用という防災戦略という点から考えると、住民の避難を促すような発言が重要になる。その点について近著の中で矢守は「予測研究が最終目標とすべきは、被害軽減に直結する遂行文[発話内行為]の実効性向上であり、それに資する予測の提供である…」(2019:102)と述べる。発話行為の改善に終始してしまったことにより、避難指示・勧告が発令されているにも関わらず避難する人が少ないという深刻な問題が生じているという事象がこの問題を端的に表している。

これまでの議論を先端科学技術の研究開発の今後の動向を予測する技術ロードマップに当てはめてみても、予測の行為遂行性という現象の一端が見えてくる。技術ロードマップには、「あと〇〇ぐらいで××が実用化できそうな見込みである」という文言がしばしば書かれている。これは一見すると研究開発の動向を描写する発話行為に見えるが、ロードマップは、発話内行為のような作用も持つ。「間もなく××という技術が実用化する見込みならば…」、規制の枠組みを議論するための専門家委員会を編成しなくては、という行政組織や、市場を獲

得するためにそこに参入しなくては、という企業など、 状況を先取りする動きが起こっても不思議はない。さら に、提案された新技術の実用化を支援する、あるいはそ れに反対する市民運動が起こるという事も考えられる。 患者団体は、新薬や新たな治療法をいち早く使えるよう にして欲しいと意思表明をし、遺伝子操作を好ましく思 わない消費者団体が意見書を提出するといった具合であ る。他方、ロードマップを作成した側から見ると、文書 に記された文言が社会へのコミットメントになり、×× の実用化が実現するように、これまで以上にリソースを 投入するという事も考えられる。

経済学のモデルが、市場をつくるという社会ダイナミズムについて、もうすでにさまざまな論者によって確認されており(Callon 2007)、そのモデルの真偽が分からなくても、他の国があるいは他社がそうしているからというロジックで関連する事業者がそのモデルを念頭に置きながら市場に投資をし、市場が動くという事例も報告されている(Froot et al. 1992)。

これまで述べてきたような、将来の姿を描く語りが何らかの社会的行為に結び付くという社会ダイナミズムは、どのような分野でも観られる現象であろう。未来の展望を示す語りが、新たな法システムやイノベーションの展開につながり、結果としてその後の社会が変わる。

これまで述べてきたような現象は、さまざまなセクターで観察されるものである。エネルギーや原子力の分野もその例外ではないだろう。将来の事がわからないが、あるいは将来の問題を解決できそうな見込みが存在するからこそ予測を立て、問題の解決を行おうとするのであるが、その時には、予測を社会と関連づけ検討するという視点が求められるのである。

- 参考文献 -

- 1) Austin, J. L. (1978). 『言語と行為』 坂本百大(訳)大修館書 店
 - Callon, M. (2007). "What Does it Mean to Say that Economics is Performative" Mackenzie, D., and Muniesa, F. (eds.) Do Economists Make Markets?
- Froot, K. A., Scharfstein, D. S., & Stein, J. C. (1992). Herd on the Street: Informational Inefficiencies in a Market with Short-Term Speculation. *Journal of Finance, XLVII* (4), 1461–1484.
- 3) 武藤大介, 舟崎淳, 横田崇. (2013). 「予知」と「予測」および 類似の語に関する調査. 『験震時報』76(3). 189-217.
- 4) 山口富子,福島真人. (2019). 『予測がつくる社会――科学の言葉の使われ方』東京大学出版会.

(2019年5月27日記)



学会の岡嶋新会長、所信で「原子力の再構築期めざす」と強調

日本原子力学会の新会長に就任した原子力機構の岡嶋 成晃氏は7月2日に記者会見を開き、今後の原子力学会 のあり方について「原子力の信頼回復と新たな未来を切 り拓く再構築期を目指す」と述べた。

同氏はさらに、専門家の立場からの提言と理解活動の 促進として、「原子力が社会に役立つことや人類の持続 的発展に大きな役割を担うことを、専門家の立場から社 会に提言する。情報発信にあたっては情報の受け手の立 場に立つことを重視する」と強調。1F 廃炉については技 術的・専門的な貢献を行い、周辺地域の復興に向けた支援を行うと述べた。また、放射線利用や、低線量放射線による生物への影響などの放射線防護に関する研究を促進すること、教育研究資産が減少しつつある中で教育・人材育成の継続と技術伝承を図っていく重要性を指摘した。

なお、原子力学会では昨年度に会員数が約 200 人減少。岡嶋会長は若手活動の強化や会員サービスの向上などにより、会員数維持のための活動を図っていくとの考えを示した。 (原子力学会誌編集委員会)

政府がエネルギー白書. 「脱炭素化への挑戦 | を

政府は6月7日,2018年度のエネルギー白書を閣議決定した。同年度にエネルギー需給に関して講じられた施策の概況を取りまとめたもの。今回は福島復興の進捗に加え、パリ協定を踏まえた主要国の温暖化・エネルギー政策、昨今の災害対応の取組――について紹介している。

福島復興に向けてはまず、福島第一原子力発電所の廃炉・汚染水対策の取組状況を説明。使用済み燃料プールからの燃料取り出しについては、3号機で燃料取扱設備に不具合が発生したため、燃料取り出しが当初予定の2018年度中頃から2019年4月に延期された経緯が盛り込まれた。

福島第一原子力発電所の現状に関する地元を中心とした情報発信については、自治体・関係団体参加の評議会や動画・パンフレットの作成に加え、住民との直接対話、地元イベントへのブース出展、コンテンツ制作に伴う意見聴取・反映など、「双方向コミュニケーションを意識し進めている」ことを強調。これらを踏まえ、復興に向けた原子力被災者支援、福島新工ネ社会構想、原子力損害賠償の取組状況について説明している。

パリ協定を踏まえ日本が掲げた「2050年までに80%の温室効果ガス排出削減」との目標について白書では、「従来の取組の延長では実現が困難」であることを改めて指摘。イノベーションによる解決の最大限追求とともに、国内投資の促進、国際競争力の強化、国民の英知を総動員し、長期的・戦略的取組の中で大幅な排出削減を目指すとしている。温室効果ガス排出量の約9割をエネルギー由来のCO2が占めている日本では、2030年エネルギーミックスの確実な実現に向けた取組の強化、2050年のエネルギー転換・脱炭素化への挑戦を図っていく。

さらに白書では、主要国の温室効果ガス排出削減目標と取組・進捗状況を比較し要因を分析。一人当たり CO2排出量で日本は OECD35 か国中 27 位に留まっており、エネルギー消費効率に強みを持つ一方、発電の約8割を火力に依存している供給側の弱みから、CO2排出削減を強化する重要性を強調した。電源の非化石化に向けて、原子力については「引き続き安全最優先の再稼働を進める」としている。

(資料提供:日本原子力産業協会,以下同じ)

学術会議が原子力発電所の津波対策で報告書

日本学術会議の「原子力安全に関する分科会」(委員長=矢川元基・原子力安全研究協会会長)は5月21日,原子力発電所の津波対策に関する報告書を取りまとめ発表した。科学者コミュニティの立場からこれまで行ってきた福島第一原子力発電所事故に関する調査・検討に加え、事故発生以前の津波対策の経緯についても分析した

上で、自然現象に伴う事故対応に反映すべき教訓を述べたもの。

同分科会は2014年に発表した「福島第一原子力発電所事故の教訓」の中で、「設計条件を超えた巨大津波による過酷事故の発生を防止できず、人と環境に甚大な被害を引き起こした」とし、「複雑巨大な人工物システムとして

の原子力の安全を向上するために必要な『全体を俯瞰す る不断の努力』を怠ったこと」が事故の根源的原因だと している。

今回の報告書では、東日本大震災で影響を受けた福島 第一,福島第二,女川,東海第二の各原子力発電所の設 置時およびそれ以降の津波評価・対策の経緯とともに, 福島第一については巨大津波発生に関わる知見がどの程 度得られていたかを整理した。例えば、東京電力が地震 調査研究推進本部による見解に基づき 2008 年に行った 津波評価で、福島第一敷地南部で「敷地の高さを超える 15.7m(4号機原子炉建屋周辺で2.6m浸水)」との試算結 果が得られたのを受け、土木学会に技術的検討を依頼し た経緯について述べている。2012年を目途に結論を出 すとしていた土木学会の対応状況などから、今回の報告 書では、同学会に対し「早期に着手すべきであった」と、

東京電力には「深層防護の考え方に従い、速やかに実施 可能な対応をすべきであった」と、新たな知見に迅速か つ的確に対応する必要性を強調した。

また、原子力発電所の洪水リスクについては、フラン ス・ルブレイ工発電所で発生した河川氾濫によるいっ水 (1999年), インド・マドラス発電所で発生したスマトラ 沖地震に伴う大津波による海水ポンプ室浸水(2004年) など、諸外国の事例にも触れており、海外の知見に学ぶ 重要性を示唆した。

報告書はこれまでの津波対策について考察した上で, 事業者や規制当局、学術団体、研究機関への教訓・課題 として,(1)新知見について評価し対応策を図る取組, (2)深層防護の考え方に基づく安全性向上. (3)行動規範 に基づく社会への説明責任と積極的な対話――をあげて いる。

海外ニュース (情報提供:日本原子力産業協会)

【国際】

IEA がエネルギー投資報告書: 再エネは微減, 原子力は拡大

国際エネルギー機関(IEA)は5月14日,世界中のエネ ルギー供給システムに対する 2018 年の投資額を分析した 年次報告書「世界エネルギー投資(WEI)2019」を刊行した。

近年の投資傾向は、エネルギー供給システムをさらに 持続可能なものとする上で、一層大胆な意思決定が必要 になることを示していると指摘。世界を持続可能な開発 方向に導いていくため、低炭素電源に対する投資シェア を現在の 35% から 2030 年までに 65% まで拡大すること が必要だとしたほか, 政府が投資家へのリスク軽減で リーダーシップを発揮することが重要だと訴えている。

「WEI2019」によると、2018年の世界のエネルギー関係 総投資額は、前年とほぼ同レベルの約1兆8,000億ドル。 石油と天然ガスおよび石炭の供給関連で資本投資が回復 したため、3年続いた低下傾向は終結、安定した状態と なった。全体的なエネルギー投資が最も増加したのは米 国で、特に頁岩(シェール)や送電網関係など、生産・供 給面での高額支出により総投資額が増大。これにより、 世界最大のエネルギー投資国である中国との差が縮まっ たとしている。

一方、投資が安定しても、従来型の石油・ガス開発プ ロジェクトに対する新規の承認件数は低下しており、世 界中で引き続き大幅に増加するエネルギー需要を満たす

には不足している。同時に、エネルギーの効率化やク リーンな再生可能エネルギーに対する投資は勢いを失っ ており、再生エネに対する総投資額は2年連続の微減と なった。これらに相当額の資本が再配分される兆候はご くわずかで、パリ協定の合意事項、およびその他の持続 可能な開発目標を満たす上では、これらへの投資が必要 だと WEI は強調している。

IEAの F. ビロル事務局長は、「エネルギー関係投資 は今や、市場や政策、技術面におけるシフトなど、かつ てない不確実性に直面している」とした。最終的な結論 としては、世界は今日の消費パターンを維持するため に、十分な投資を従来の供給要素に対して行っていない と指摘。また、現在の方向性を変えるための、クリー ン・エネルギー技術への投資も十分に実施しておらず、 我々がどの方向を向いたとしても、将来的にリスクを抱 え込む事になるとしている。

<原子力関係の投資は拡大>

発電部門の支出については、2018年に新たに送電開始 した原子炉が3倍に増えたことから、原子力関係の投資 額が上昇。これらの原子炉の80%は中国のものである。 既存の原子力発電所で運転期間を延長するための支出額 は、原子力関係投資全体の13%を占めている。

総合的に見て、原子力や再生可能エネルギーといった 低炭素電源に対する支出は発電関係全体の4分の3近い 額。これに送電網や電力の貯蔵、発電システムの柔軟性 向上等に支払われた額を含めると、発電部門における支 出額の約85%に達するとしている。

News

WEI はまた、発電部門で近年行われている投資が、将来的な必要性や課題とあまり一致していない点を指摘した。原子力に対する投資は、「新政策シナリオ」で必要とされている額から3%下回る程度だが、「持続可能な開発シナリオ」においては必要額から40%近く少ない額。特に、欧州や米国、中国では、この額が大きくなっているとした。

WEI はさらに、石炭や天然ガス、原子力および水力といった大規模かつ負荷制御可能な主要電源に対する最終投資決定(FID)が、2018年は約9,000万kW分に減少している点に言及。2010年との比較では55%の低下である。低炭素電源としては最大規模の原子力と水力についても、FIDが2017年実績から40%減少したと指摘している。

IEA, 原子力の縮小は温暖化防止へ 悪影響と警告

国際エネルギー機関(IEA)は5月28日,過去約20年間で初めて原子力を専門に取り扱った報告書「クリーン・エネルギー・システムにおける原子力発電」を公表し、先進諸国で原子力発電設備が急激に縮小していけば、CO2排出量が数十億トン増加するなどの悪影響が出ると警告した。

追加の原子力発電設備が手当てされない場合,クリーン・エネルギー社会への移行は非常に難しくなり,先進諸国では今後20年間に1兆6,000億ドルの追加投資が必要。このまま原子力オプションを維持するのであれば,既存の原子力発電所で運転期間を延長したり,原子力を他の低炭素エネルギー源と対等に扱い,原子力がもたらす恩恵に相応の報酬を与えるといったアクションを取るべきだと訴えている。

報告書によれば、原子力は過去50年以上の間、600億トンものCO₂の排出を抑制。原子力による発電シェアは世界の総発電量の約10%を占めるなど、低炭素エネルギーでは水力に次いで2番目の規模であるにもかかわらず、数多くの利用国で先行きの見えない状況に置かれている。米国やカナダ、欧州連合、日本などの先進諸国では、原子力は過去30年以上にわたって最大の低炭素電源であり続けており、いくつかの国では電力供給保証上の重要な役割も担っている。

しかし、これらの国の原子力発電設備は経年化が進み、閉鎖されるものが出始めている。理由の一部としては、いくつかの国で取られている脱原子力政策など政策上のファクターがあるほか、経済や規制面のファクターも指摘されている。政策的な変更が行われなかった場合、先進諸国では 2025 年までに原子力設備の 25%が、

2040年までには約3分の2が失われる。

このように、新規の原子力発電所建設プロジェクトや既存の原子力発電所における一層の運転期間延長が進展しなければ、2040年までに追加で排出される CO_2 の量は40億トンにのぼることになる。

安全性その他の懸念から脱原子力政策を進める国がある一方、多くの国ではエネルギーの移行に原子力が必要と見込んでいるが、その達成に必要なことは十分なされていない。IEAとしては原子力を扱った今回の最初の報告書で、この重要な問題を世界レベルのエネルギー議論の場に戻したいと考えている。

IEAの F. ビロル事務局長は、エネルギーの移行を世界中で進展させる上で原子力は不可欠だとしており、「再生可能エネルギーやエネルギーの効率化、その他の革新的発電技術と同様、原子力は持続的なエネルギー供給や供給保証の促進といった目標の達成に大きく貢献できる」と指摘。ただし、これに伴う障害を乗り越えない限り、原子力のそのような役割は世界中、特に米国と欧州および日本では急激に低下していくと述べた。

今回の報告書で IEA は、既存の原子力発電所で運転期間を延長するには多額の資本投資が必要となると指摘した。しかし、そのためのコストは、新たな太陽光や風力といった他の発電プロジェクトのコストと競合できるレベルであり、エネルギーの移行を一層確実かつ建設的にすることにつながるとしている。

同報告書によると、世界各国の電力市場は現在、原子力発電所の運転期間を延長する上であまり好ましくない状況にある。多くの経済大国で電力卸売り価格の低迷が長期化しているため、複数の発電技術で利益率が急激に低下、あるいは失われた状態にあり、原子力発電所に至っては運転期間延長どころか、早期閉鎖のリスクにさらされている。

閉鎖により不足する電力を、太陽光や風力などの低炭素エネルギー源で補うとした場合、これらの開発速度をかつてないレベルに加速しなければならない。過去20年間に先進諸国における太陽光と風力の設備容量は約5億8,000万kW分増加したが、今後の20年間では新たにその5倍近くの設備が必要。このような急激な拡大は、新たな電源を広範囲のエネルギー・システムにつなげる際、深刻な問題を生じさせるため、この期間に先進諸国では、クリーン・エネルギー社会への移行に約1兆6,000億ドルの追加投資を行わねばならず、最終的に高額の電気代という損害が消費者に及ぶことになるだろう。

これらの結論からビロル事務局長は、「原子力の将来 については、政策立案者がカギを握っている」と指摘。 原子力とその他のクリーン・エネルギーによる環境面や エネルギー供給保証面の利点が高く評価されるよう、電 力卸売市場の構造を変える必要性があるとしたほか、各 国政府は既存の原子力発電所で運転期間を延長すること は、コスト面で競争力があることを認識すべきだと強調 した。

また、原子力発電オプションを維持する方針の国に対しては、政府が政策面で以下のアクションを考慮する必要があると勧告している。

- ・原子力オプション維持のため、安全性が確保されて いる限り既存の原子力発電所に対しては、運転期間 の延長を認める。
- ・周波数の制御サービスなど、電力供給保証の維持に 必要なシステム・サービスが適正に評価されるやり 方で電力市場の構造を設計。原子力発電所などこれ らのサービスの提供者が、差別されることなく競争 力のある方式で補償を受けられることを保証する。
- ・原子力がもたらす環境面やエネルギー供給保証上の 恩恵について、その他の低炭素エネルギー源と対等 の条件を設定し、適切な報酬を与える。
- ・原子力発電所の安全運転を継続的に確保するため、 必要に応じて安全規制を改定する。技術的に可能で あれば、原子力発電所でアンシラリー(電圧・周波数 の調整等)サービスを提供するため、運転に柔軟性 を持たせる。
- ・リスク管理と資金調達に有効な枠組を創出し、新規 や既存の原子力発電所のプロジェクトに対して、リ スク特性や長期的な展望を考慮に入れた、許容可能 なコストによる資本の投資を促進する。
- ・新規プラントの建設支援として、許認可プロセスが プロジェクトに遅延を生じさせた、コストの増加に 繋がることがないよう保証する。
- ・新しい原子炉設計の開発で技術革新を支援。これにより、低コストでリードタイムが短く、運転の柔軟性も改善される技術を原子力発電所にもたらす。
- ・人的資源を開発・維持し、原子力エンジニアリング におけるプロジェクト管理能力を醸成する。

【米国】

原子カイノベーション連合, 先進的原子炉開発に NASA 方式を

米国で原子力分野の技術革新や革新的原子炉設計の商業化を提唱している「原子力イノベーション連合(NIA)」は5月20日、「原子力技術革新の実現:スペースX方式を原子力に」と題する報告書を公表した。

国際宇宙ステーションへの物資と人員の輸送で、米航空宇宙局(NASA)が実施した「民間企業による低軌道への輸送システム開発に対する支援(COTS)」プログラム

が成功を納めたことから、NIA は同様の官民連携アプローチを先進的原子炉技術の実証にも取り入れることを推奨している。米国が世界の原子力産業界で再びリーダーシップを取ることになれば、経済や環境、および安全保障などの面で米国の利益にかなうと指摘。このため、先進的原子炉技術の実証プログラムの設計と実行で、ベンチャー投資家に助言を請うことなどをエネルギー省(DOE)に勧告しているほか、議会に対しては、DOE が COTS プログラムと類似のアプローチを実行する際、妨害要因となる法制上の制限撤廃に取り組むべきだと主張している。

NIA は、原子力技術革新を推進する技術専門家や企業、投資家、環境保護団体、学者等による連合組織。今回の報告書では、わずか数年前の2012年に、米国では商業ロケットの打ち上げサービス市場で米国企業のシェアがゼロだったのに対し、官民の連携方策が成功したことにより今や、米国のスペース X 社が世界の商業打ち上げ市場を牽引しているとした。同社の台頭には連邦政府が重要な役割を果たしており、打ち上げサービスの研究開発と実証に官民のコスト分担方式を採用した点などを強調している。

米国の原子力産業界は現在、ロシアのロスアトム社のように政府が後押しする企業との国際競争で、悪戦苦闘を強いられている。NIAによると、これは2012年当時の航空宇宙産業界と似た状況だが、もしも米国の原子力企業が独自の先進的原子炉技術を開発・実証できれば、こうした状況は変えることができる。

世界では数多くの国が、地球温暖化や大気汚染、エネルギー供給保証、電源多様化等への取り組みにおいて、独自の対応能力開発や原子力発電所の購入に関心を抱いている。一方、発電所の供給国は輸出により経済的恩恵を被るだけでなく、世界の原子力安全・セキュリティと核不拡散の基準に一層の影響力を持つことになる。

過去半世紀以上の間、米国が世界の原子炉供給基準に影響力を発揮してきたことや、米国が締結する原子力協力協定に核不拡散関連の条件を付していることは、一つには米国の設計原子炉をそのような取り決めの下で販売するという大前提に基づいている。このような理由からNIAは、米国における先進的原子炉設計への投資には、国家安全保障上の論拠が含まれるとした。

近年、新設原子炉の輸出市場はロシアが独占しているが、米国が同市場でリーダー的役割を取り戻す上で、DOE は COTS プログラムの示した物から学ぶべきだとNIA は指摘している。

同プログラムにおける契約上の特徴は、(1)官民によるコスト分担のほかに、(2)開発マイルストーンを複数設定し、達成する毎に定額の資金を政府が供給、(3)機密

News

情報を保守的に扱い、関係する権利はすべて民間企業に残す、(4)プログラムの設計・実行支援において、政府に先んじて経験を有するベンチャー投資家にコンサルティングを依頼――など。NASAと米空軍がスペース X 社の最初の顧客となって同社の初期収益を保証し、顧客を世界中の民間部門に迅速に広げたことも重要であると説明した。

これらの点と、先進的原子炉を開発中の企業を調査した結果に基づき、NIA は以下の点を原子力技術改革の支援で勧告する主要事項として提示している。すなわち、

- ・DOE はベンチャー投資家に相談した上で、4 つの先進的原子炉概念について段階的な開発・実証プログラムを設定、開発企業との官民連携に際してはマイルストーン達成毎の支払いアプローチを採用する。
- ・大統領府は、複数の連邦政府機関に行政命令を出し、連邦政府には先進的原子炉等からの無炭素電力を調達させる。
- ・議会は合衆国法律集の一部とエネルギー政策法を修正し、連邦政府施設用にクリーン・エネルギー源から電力購入する長期契約を結ぶとともに、連邦政府機関による無炭素電力の調達目標値を設定する。
- ・DOE と国防総省は、保有する施設用に先進的原子 炉プロジェクトから電力とプロセス熱の購入機会 を模索する。

などである。

エネ省, 先進的原子力技術の開発に 1,100 万ドル

米エネルギー省(DOE)は5月23日,国内の3州で実施されている3件の先進的原子力技術開発プロジェクトに対して、合計約1,100万ドルの支援金を提供すると発表した。

先進的原子力技術の研究開発を官民のコスト分担方式で進めるというイニシアチブにおいて、DOE は 2018 年4月に初めて、「財政支援条件の告示(FOA)」で対象プロジェクトを選定。その後、同年7月と11月および今年3月に第2弾〜第4弾の選定結果を公表したのに続くものとなる。今回までの5回分でDOEが拠出を約束した支援金は、合計1億2,800万ドルにのぼったが、DOE は今後さらに4年以上にわたり、四半期毎に後続の申請書審査を継続していく方針である。

DOE の R. ペリー長官は、「米国内では数多くの企業が次世代原子炉を一層安全かつ競争力の高いものとするため、技術を開発中である」と指摘した。トランプ政権は米国の原子力産業を復活・活性化させることを公約の1つとしており、革新的な原子力技術開発で成功を収め

るには、このような官民連携がカギになるとの認識を強調している。

FOA を通じた財政支援条件は下記の3種類。

- (1)「新型原子炉設計の初号機(FOAK)開発を目指す大規模な実証準備プロジェクト」
- (2)「新型原子炉の設計・技術を商業化する、最良のものに改良する可能性を持った広範な概念・アイデアの提案!
- (3)「新型原子炉の設計認証や認可取得など、設計に関する規制上の課題解決を必要とするもの」

今回は(2)で2件,(3)で1件のプロジェクトが対象に 選定されており、1件目はユーティリティーズ・サービス・アライアンス社の「先進的遠隔モニタリング技術」プロジェクト。米国内の既存の原子力発電所で安全性と信頼性を維持あるいは改善しつつ、経済的な持続可能性を達成することが目的である。そのための自動化技術、先進的遠隔モニタリング技術の研究開発・実証で、DOEが約918万ドル、企業側が約408万ドルを負担する。

2件目は、サウス・テキサス・プロジェクト原子力運転会社(STPNOC)による「火災の確率論的リスク評価(PRA)モデリング技術」の開発と実行に関するもの。DOEと企業側の拠出額はそれぞれ、約94万ドルと約24万ドルとなっている。

3件目は規制上の課題解決を必要とするプロジェクトで、SC ソリューションズ社が先進的原子炉設計のコスト面の効率化を目指す内容。具体的には、非線型の土壌構造における相互作用分析で、ソフトウェアの検証ガイドラインを開発する。官民がそれぞれ、約47万ドルと約12万ドルを負担する計画で、このようなガイダンス文書は、原子力発電所の許認可と建設においてコストの削減を容易にする重要ツールになるとしている。

【フランス】

フラマトム社,次世代燃料用に 米エネ省の支援バウチャー入手

仏国のフラマトム社は5月29日、米ライトブリッジ社との合弁事業体、エンフィッション社による次世代型の「ライトブリッジ燃料」開発を促進するため、米エネルギー省(DOE)から技術開発支援パウチャー(国立研究所等の施設・サービス利用権)を入手したと発表した。

特殊な組成の金属燃料である同燃料は、既存炉や将来型原子炉のいずれにおいても、出力増強や安全性と経済性の向上が期待できると言われており、米ニュースケール・パワー社が開発した小型モジュール炉(SMR)「ニュースケール・パワー・モジュール(NPM)」に装荷される可能性がある。エンフィッション社とニュースケー

ル社は5月中旬、この燃料技術をNPMに一層適合させることを目的とした了解覚書を締結。NPMは現在、米国初のSMR設計として米原子力規制委員会(NRC)の設計認証(DC)審査にかけられており、2020年9月に完了する見通しである。

今回のパウチャーで、フラマトム社は DOE 傘下のアイダホ国立研究所(INL)と協力を実施する方針。それらの協力項目は、米国内で先進的燃料製品の商業化を早急に進める許認可上の重要ステップであり、NRCへの提出文書においても要求されるとしている。

DOE のバウチャーは、先進的原子力技術の商業化支援イニシアチブ「原子力の技術革新を加速するゲートウェイ(GAIN)」を通じて発給されている。フラマトム社が GAIN のバウチャーを利用するのは今回で3件目だが、ライトブリッジ燃料の設計支援用としては最初のもの。

同社はこのバウチャーを活用して、ウラニウムージルコニウム金属燃料独特の現象に対応するとともに、燃料物質開発における INL の経験や知見・業績を活用していく。具体的には、今後1年以上にわたって INL との協力により、同燃料概念について「故障モードの影響解析(FMEA)」を実施し、「同定した物理現象の重要度ランキング表(PIRT)」を作成。これらの作業に対して DOEは、47万7,000ドル相当の資金提供を INL に行うとしている。

【ポーランド】

科学者らがドイツに脱原子力政策の 再考を要請

地球温暖化防止と生物圏の劣化防止を目的とするポーランドのソーシャル・イニシアチブ「Fota4Climate」によると、同国の生物科学系の学者や環境保護活動家など約100名が5月13日、隣国のドイツで2011年以降、進められている脱原子力政策について、再考を促す公開書簡を発表した。

これは、ドイツの A. メルケル首相や F. - W. シュタインマイヤー連邦大統領、連邦議会議員、環境保護団体の代表者、および様々な職種の一般ドイツ国民に宛てたもの。地球温暖化にともなう生物圏への未曾有の脅威という観点から、同国内で十分機能している原子力発電

所の早期閉鎖・廃止という判断の見直しを、隣国の市民として、あるいは欧州連合(EU)に所属する市民として求めている。

ポーランドでは石炭や褐炭といった化石燃料資源が豊富にある一方, EU は 2020 年に向けたエネルギー政策目標のなかで, 2005 年比で温室効果ガス排出量の 14%削減, などを設定している。このため同国は、環境に配慮しつつ長期的に安定した電力供給を確保する目的で,ロシアからの石油と天然ガスの輸入量削減とエネルギー源の多様化を推進中。チェルノブイリ事故により,一度は頓挫した原子力発電の導入計画も進めている。

同書簡の中で学者らはまず、「国連気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」による特別報告書の判明事項として、産業革命以前の世界の平均気温から1.5℃上昇した場合の影響と、これにともなう地球温暖化シナリオに言及。温暖化が現在のペースで進めば、平均気温の上昇分は2030年から2052年の間に確実に1.5℃に達してしまうとした。

これと同時に、IPCC 報告書と世界中の科学者による多数の調査結果や報告書はともに、地球温暖化が環境に及ぼす壊滅的な影響を予測。地上と水中の生態系や数十億の人類、および数千もの生物種に加えられるプレッシャーを抑えるため、これらの報告書は地球の平均気温上昇を約1.5℃で維持する必要があると強く訴えている。

IPCC による温暖化の影響緩和シナリオによると、気温上昇分が 1.5℃を越えない、あるいは少し越える程度であれば、2030 年までに人類を原因とする正味の CO₂排出量は、2010 年レベルと比べて約 45%に抑えられる。このようなシナリオにおいては、エネルギー部門の改革など、人類による努力の範疇のほぼすべてにおいて、早急かつ広範囲な変革が必要。気温上昇分を 1.5℃か、少し越える程度とするシナリオの多くが、原子力による発電シェアの増加を前提にしていると指摘した。

こうしたことから学者らは、長期的に持続可能な発電 モデルにおける原子力発電が、目下の議論になっている ことを十分に認識。無煙炭や褐炭による発電を完全に終 わらせる前に低炭素な原子力発電所を廃止すれば、短期 的な解決が非常に難しい技術的課題が突きつけられると した。また、天然ガスなど、その他の化石燃料を継続し て使用しなければならず、早急かつ効果的な脱炭素化は ー層遠のいていくと述べた。

電力システムコスト: OECD/NEA の研究

―プラントレベルのコスト評価を超えて―

エネルギー総合工学研究所 松井 一秋

低炭素化さらにはゼロエミッションに向けて、原子力および再生可能エネルギーの比率の高い電力供給システムのコストの研究は 2011 年から研究の深化と拡大が進んでいる。不確定で変動的な発電が導入される場合の総コストは、従来の電力コスト評価法(平均化されたプラントコストにもとづく方法)とは異なる新たな視点・要因が重要なことがわかっている。OECD/NEA によるシステムコスト研究成果が 2012~2019 年に公表されている。OECD 諸国はそれぞれの電力ミックスの構造の選択にかかわらず必要となる、低炭素電力システム構築に向けて実施すべき 5 本柱の留意点を紹介する。

KEYWORDS: LCOE, VRE, Dispatchable, Flexibility, Storage, DSM, Profile costs, Balancing costs, Grid costs, Connection costs, Carbon price, Internalization

I. はじめに

2012年に公表された OECD/NEA の報告書,「原子力と再生可能エネルギー:電力システムの脱炭素化におけるシステムの影響」(Nuclear Energy and Renewables: System Effects in Low-carbon Electricity Systems)²⁾,は大変評判がよく、その後の様々な発電システムコストの課題への取り組みの引き金となっている。筆者はこの報告書を作成した原子力開発委員会 (NDC; Nuclear Development Committee)の議長でもあることから、間欠性の電源の限界について宣伝してきたつもりであったが、当時は我が国では驚くほどの無関心にびっくりした。

システムコストの根幹は「発電」から「電力供給」へという視点の転換である。やれ5円だの10円だのというkWh当たりの発電端コストは、プラントレベルコストと言って、まず第一にあるが、その上にグリッドレベルのコスト、送配電(連結、延長、拡張、強化も含む)、短期的な均衡化コスト、常時適正な発電能力を維持するためのコスト(バックアップ、Profile costs)が存在する。真の全コストとしては、以上の発電端とグリッドコストのほかに、環境影響、供給保証、事故コストなどの外部コストを加える必要があるが、その定義など異論百出でここでは対象にしていない。

System Cost of Electricity: Reports from OECD/NEA; Beyond Plant-level Production Cost (LCOE): Kazuaki Matsui. (2019年3月28日 受理)

Ⅱ. システムコストの着眼点

1. システムコスト-1

2011 年のフランスの電力の実際の需給を対象とし、個別電源のコストは直近の NEA/IEA によるスタディ (Projected Costs of Generating Electricity, 2010 Edition)⁴⁾に基づいて間欠性の電源の影響を見た分析の一例を 2012 年レポートの代表として以下に示す。ほかの分析など詳しいところは本報告書を NEA のホームページよりダウンロードして見ていただきたい。

全体としては VRE (Variable Renewable Energy, 間 欠性再生可能エネルギー;風力,太陽それも主として PV;太陽光)が入っていない状態で90GWeのシステム で、棒グラフ左2本、原子力が50GWe弱ある。年間の 電力需要曲線は図1(カラー版は本号カラー目次参照)の 右の一番上の黒色の線である。2011年のフランス全体 での風力の実績データを用いて、需要の3割を風力で 賄った場合の残された需要が青色の曲線で、すなわち黒 と青の間が風力で、3割を通常の調整能力ありの電源で 充当した場合の需要が赤色の曲線で示されている。図1 の左の棒グラフ右2本は風力3割の時の設備容量で、な んと 80GWe 近くの風力発電設備が必要で、その分原子 力が割を食うのと、調整用として、ガスタービンといく らかの石炭火力が増えている。青色で塗りつぶしの部分 は、需要も多くて価格も高いところでの風力の不足を、 赤色は、逆に需要はなく価格が安いところでの風力の過

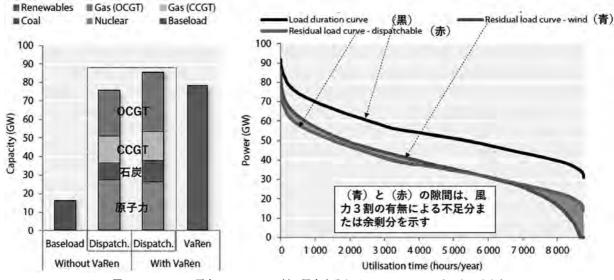


図1 フランスの電力システムに3割の風力を入れる;システムコスト1(SC1)より

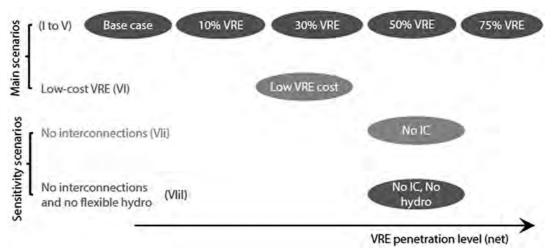


図2 SC2での8シナリオ

剰を示している。風力の代わりに太陽 PV を 3 割も入れるともっと悲惨なことになる。²⁾

2. システムコスト-2

この 2012 年のシステムコスト報告書に続くその第 2 弾たるレポートは 2019 年に刊行されている "The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables" 10。

まず炭酸ガス排出制約下での VRE 強制導入の効果ならびにモデルの前提条件を 2015 年ベースのできるだけ 現実に近いデータを用意していること,分析に使うモデルは MIT の最適化コード (GenX)を使用している。 ほぼ同時期に公表されている MIT レポート; The Future of Nuclear Energy in a Carbon–Constrained World $^{3)}$ で 使用されているものと同じものである。

パリ協定に基づく気候目標を達成するためエネルギーシステムの脱炭素化はことに OECD 諸国にとって大きな挑戦となり、その中でも電力は、炭素強度 $50gCO_2$

/kWh (IEA の 2100 年温度上昇 2C あるいは炭酸ガス 450ppm 目標の 2040~2050 年放出要求に相当),およそ 現状の 8分の 1 に減らすためには早急の低炭素電源の導入が求められる。この SC2 ではすべてのシナリオは炭素強度 $50gCO_2$ /kWh の条件でコストミニマムで求めたものである。図 2 に示す次の 8 つのシナリオを対象としている,すなわち VRE の導入ゼロ,10%,30%,50%,75%の基本 5 ケースに VRE の発電コストがさらに低下した場合,外部との電力融通がない場合,さらにその上水力による調整力が使えない場合の 8 シナリオである。また,発電コストは最新の 2015 年版を使用している (Projected Costs of Generating Electricity-2015 Edition 8)。

メインの5シナリオによる各種電源容量を図3に示す。この前提条件でのベースケース、VRE強制導入がない場合、では風力も太陽も入らず、原子力が半分を占めることになる。VREを政策的に誘導して入れていくと、最適解としては原子力を減らし、75% VRE だと原

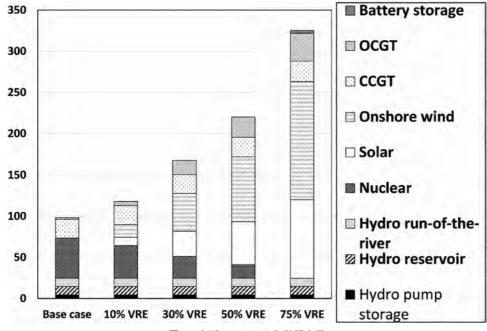


図3 主要5シナリオと発電容量

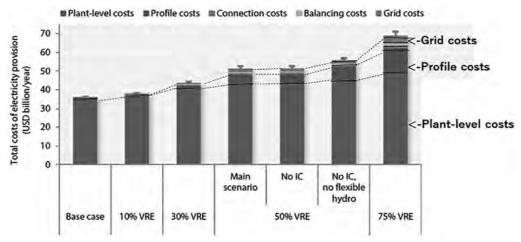


図4 発電とシステムコストの合計年間総コストの比較

子力はなくなる。大半が風力と太陽でその全体容量は合理的なベースの3倍を超える。これに相当する費用負担増を覚悟する必要がある。

予備電源を主とするプロフィールコストが過半のシステムコストと、LCOE に基づく発電コストの合計の年間総計費用を図4に示す。75%もVREを入れるとすると、大体倍の費用負担、電気料金が倍ということになる。システムコストはいろいろ条件により変わりうるのでそれを変動幅としても示してある。またVRE導入比率以上に全体費用は増加していくことに着目すべきである。

では費用を倍払えば原子力をなくすことが可能であることを意味するのか?そうではなく、VREを入れていくと電力市場にゼロ価格が出現するという驚くべき事態がこのモデルによる試算でも顕著に示されている(図5(カラー版は本号カラー目次参照))。VREが入らないケース(グレー)や10%(緑)の時はゼロ価格の事態は出

現しないが、VRE30%では年間で60時間も現れてくる。50%で1,200時間以上、年間14%以上の時間である。75%(赤)では3,750時間、時間で43%、これでは市場もへったくれもなくなる。



Ⅲ. 電力脱炭素化に向けての政策 オプション

1. キーとなる5本柱

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

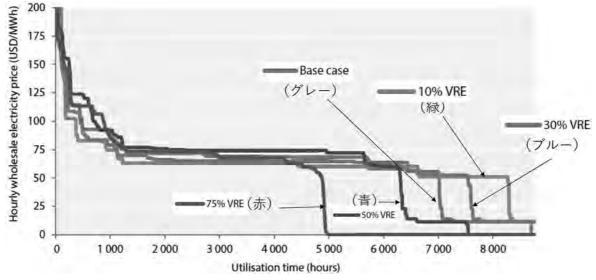


図5 電力価格曲線と主要5シナリオ

- 1)効率的な供給のために現在の短期的な電力市場の維持;その中で,低炭素技術への投資を促す明確なメカニズムの組み込み。
- 2) 炭素価格の導入;制度の問題,政治的な抵抗が大きいが,即効性のある手立てで,当面 CO_2 1 トン当たり 50 ドル程度が妥当か。
- 3) 適正な発電設備,柔軟性(機動性),送配電設備,を 確保するための長期的な枠組みの整備;ネットワー クのディジタル化,電池,DSMの開発導入なども 含む。
- 4) 低炭素技術への長期的な投資を促進する適正なメカニズムの創生; CRMs, FITs, PPAs, CFDs, FIPs, 債務保証など。
- 5)システムコストの内部化

2. 低炭素化目標に向けての選択肢

本分析のコストの前提によると、低炭素化の目標に向かって経済的に最も効率的なオプションは主として原子力によるシステムである。間欠性再生可能エネルギーの導入が強制されるとシェアの比例以上にコストは上昇する。しかしこれは現段階でのベスト・エスティメートであり、VREのコストがさらに下がる場合(基本ケースの建設費の3分の1から2)のシナリオ VI も検討している。これは現在のOECD 諸国の大半が指向する方向とおおむね一致しており、VRE と需給調整能力の電力ミックスの姿はおおむね次のようになるかもしれない。

- (ア)風力と太陽 PV のシェア;30~40%
 - (この値は SC-2 から言っても九州での例からも きつい, 政策誘導並びに相当規模の電力貯蔵が必 須となるはずである。筆者)
- (イ)より大きなシェアの需給調整能力のある低炭素電源(原子力,並びにひょっとしていつの日か CCS,

CCUI と化石燃料発電);40~60%

- (ウ)柔軟性のある低炭素電源の最大活用;水力(揚水), 需要調整,電力融通
- (エ)柔軟性が高いため重宝な化石エネルギー技術の 漸減

2050年に向けて、多くの技術進歩、革新がありえて、 それらを排除するべきではないし、電力自身もコジェネ レーション、ガス変換(PtG)や情報技術との融合などに より、より高度に変質していくはずである。

本スタディは、未来はこうなるとか、なるべきだと 言っているわけではない。そうではなく、自然変動のあ る電源のみで意欲的な低炭素目標を達成するには本質的 な問題が存在することを指摘している。

事実、電力市場設計の、特に電力ミックスの選択は国家レベルでの政治的選択問題であるからである。この中で原子力発電は特異の役割があり、大量の調整可能な低炭素電源であるにもかかわらず、多くのOECD諸国では社会的な受容性の問題を抱えている。それでも本スタディにおいては、原子力は経済性の課題・挑戦があるにしても、厳しい炭素制約の中で経済的に最適な選択であることを示している。

単に発電端のコストではなくシステム全体として優位性が問題なのである。風力や太陽 PV の発電端コストは近年驚くほど下がってきているが、電力システム全体に対する負荷は考慮されておらずまた、需要にかかわらず限られた時間帯に集中して発電しているのである。

OECD 諸国はそれぞれの電力ミックスの構造の選択にかかわらず、低炭素電力システム構築に向けて前出の5本柱の留意点を実施すべきである。

技術や消費者の好みは急速に変化していくであろう

が、短期的な調整力、炭素価格、インフラ整備のための 集中的メカニズム、低炭素発電への投資にとっての長期 的な安定性とシステムコストの内部化による競争的市場 という方向性は当面、数十年は適正な参照であり続ける であろう。

Ⅳ. 終わりに

前節は、主として紹介しているシステムコスト-2の概 要のさわりである。この手の調査分析報告書にしては. かなり踏み込んだメッセージになっていると思い、かつ 理解できる範囲内で全く同じ考えであるからである。分 析者のケプラーとコメットは二人ともにエコノミスト で、時々その表現に戸惑うこともあったが、昨年2018年 にはもう一つの報告書, The Full Costs of Electricity Provision⁶⁾も発刊した。これらは無料で入手可能で、読 み込むのは大変ではあるが概要ぐらいには目を通してい ただけるとありがたい。NEA にはほかに専門性のある 委員会がいくつかあり、その中でより横断的かつ政策的 な分析、提言が NDC には期待されており、したがって もっと普通の方々が容易に理解できるようなアウトプッ トが求められる。なおコメットは昨年暮れに兄弟機関と はいえ、IAEA にスカウトされてしまった。こういうと ころで武者修行するような日本人が現れても良いころで ある。

※本記事のカラー版は、本号発行から1か月後に学会誌 立ち読みのページにて掲載予定。

— 略号(Acronym) —

CFD: Contract for differences

CRM: Capacity remuneration mechanism

CCGT: Combined cycle gas turbine

EES: Electric energy storage

FIP: Feed-in premiums FIT: Feed-in tariffs

GenX: Optimal Electricity Generation Expansion

GDP: Gross domestic product

GW: Gigawatt

IEA: International Energy Agency LCOE: Levelised cost of electricity

LDC: Load duration curve

MIT: Massachusetts Institute of Technology (USA)

MW: Megawatt MWh: Megawatt-hour

OCGT: Open cycle gas turbine

PV: Photovoltaic

VRE: Variable renewable energy

VaRen: Variable Renewable Energy (変動性あるいは間欠性再

生可能エネルギー)

Dispatchable: 需給調整能力

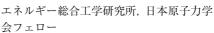
No IC: No International Connection, 国際電力融通無し

- 参考文献 -

- 1) The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables,
 - https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2019/7299-system-costs.pdf
- 2) Nuclear Energy and Renewables: System Effects in Lowcarbon Electricity Systems,
 - $http://\,www.oecd-nea.org/\,ndd/\,pubs/\,2012/\,7056-\,system-effects.pdf$
- The Future of Nuclear Energy in a Carbon- Constrained World.
 - http://energy.mit.edu/research-type/future-of/
- Projected Costs of Generating Electricity, 2010 Edition, http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2010/6819-projectedcosts.pdf
- 5) Projected Costs of Generating Electricity-2015 Edition, http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2015/7057-projcosts-electricity-2015.pdf
- 6) The Full Costs of Electricity Provision, http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2018/7298-full-costs-2018.pdf

著者紹介





(専門分野/関心分野)原子力・エネルギー システム評価



不確実なリスクに備える組織文化

ー福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえてー

原子力安全推進協会 久郷 明秀

原子力発電所の安全を高めるべく規制基準が強化され、重大事故に対する整備も要件化されている。この要件を満たしリスクを可能な限り低減する技術的対応が求められる一方で、日本では深刻な事故は起きないと思い込んでいた認知バイアスに対する心理的対応も求められる。自己正当化意識を戒め、不確実なリスクに備える組織文化を作るための方策について考察する。

KEYWORDS: Organizational Culture, Human Factor, Oversight, Country Specific Culture, Non-linier

I. はじめに

福島第一原子力発電所事故(以下福島第一事故)の教訓を踏まえて2013年7月に実用発電用原子炉に係る新規制基準が施行され、2019年2月現在で9基の原子炉が新基準の適合性審査を経て運転を再開している。今後はこれらのプラントが福島第一事故の教訓を活かして組織運営されることが求められる。福島第一事故の教訓を活かして運営するということはどういうことなのか、本稿では組織文化に焦点を当てて考察する。

1. 組織文化の反省

福島第一事故の原因の総括は、東京電力ホールディングスの"福島への責任"と題されたホームページで二つにまとめられている。すなわち1)設計段階において外的事象(地震と津波)を起因とする共通原因故障への配慮が足りなかったこと 2)運転段階において"海外の安全強化策に対して収集・分析して活用する仕組みが不足し、継続的な安全性の向上が十分でなかったことである。またこれについて「事故の根本原因分析」が行われ、五つの要因が抽出されている。その要因の一つ「従来の改革活動の限界」には、「原子力の安全は既に十分達成されていると認識し、自社の不祥事を安全文化劣化兆候と捉えず、スキルや手法の不足と捉えたため、組織的に安全意識を向上させることが不十分だった」と組織文化の

Organizational Culture for Uncertain Risk; Learning from Fukushima Daiichi Accident: Akihide Kugo.

(2019年3月5日 受理)

領域に目を向けている。

政府事故報告書¹⁾でも IV. 総括と提言の中で、「我が国に安全文化が十分に定着しているとは言い難い状況にあったことに鑑みると、今回の大災害の発生を踏まえ、事業者や規制当局、関係団体、審議会関係者などおよそあらゆる原発関係者には、安全文化の再構築を図ることを強く求めたい」と安全を重視する組織文化の強化を強く求めている。

このように福島第一事故を契機として,事故を防ぎ, また重大事故発生時の事象の進展や影響を緩和し,放射 性物質の環境影響を低減するために,技術的な深層防護 の強化だけでなく,組織文化の強化も強く求められてい る。そしてこの提言が当該事業者だけに留まらず業界関 係者全体に向けたものであることに留意したい。

2. 組織文化強化の方向

資源エネルギー庁は、新規制基準の核となる考え方をホームページに掲載している。ここには、"原発の安全性に「絶対はない」として不確実なリスクにも対応できるよう安全性の向上を常に目指す姿勢を持つこと"と"新規制基準に適合していると認められても「より安全」であることを目指し事業者は自主的な取り組みを継続的に行うこと"の二つが挙げられている。いずれも原子力発電事業を営む組織のあるべき姿勢を伝えている。この中で「不確実なリスクにも対応できる」姿勢とは、認知されたリスクを可能な限り小さくする努力に加え、リスクの予測精度を上げる取組の促進、そして未知のリスクに備える心理的備えを強化することと考えている。

そこで本稿では心理的備えの強化について検討するため、まず福島第一事故の背景である原子力安全は確立されていると自己満足に陥った要因について次章で考察し、第3章では安全をマネジメントする視点の変遷をふり返って今後の方向性を見据え、第4章で組織文化の特徴を踏まえて自己満足に陥らない方策について考察し、最後に第5章でまとめを記述する。

Ⅱ. 自己満足に陥る要因

1. IAEA 事務局長報告書

IAEA は福島第一事故を包括的に分析した事務局長事故報告書²⁾をまとめている。そこには、事故要因として日本にはシビアアクシデントが起きないとの思い込みがあり、事業者の安全上の改善が迅速に導入されない状況をもたらしたとの記載がある。何がきっかけでこのような過信がもたらされたのか、その理由は同報告書に記述がないので、以下に考察を試みる。

(1)確証バイアス

過信に陥った背景には、まず原子力発電を取り巻く厳 しい国内情勢があったのではないかと思う。原子力発電 技術に対する社会的信頼獲得が求められる中で、日本の 技術の優秀さを他国と比較して訴求する過程で、選択さ れた指標が事業者の意識の中で今後の安全性を保証する 代表指標となって信念(スキーマ)を形成し、自己満足に 陥ったことが考えられる。例えば原子力発電のパフォー マンス指標としてしばしば引用される「原子炉計画外停 止率」は、世界の平均値から一桁少ない優秀な実績を 持っていた。スキーマを形成していた一例だが、福島第 事故の起きる一年前に日本原子力学会発電部会が日本 の原子力産業の海外展開に向けた見解を発表している。 そこには「世界で最も低い原子炉の計画外運転停止率を 誇るなど我が国の信頼性の高い原子力産業技術を海外展 開することは世界全体のメリットになる」と記載されて いた。

この指標が日本の技術力の優秀さを示したことは事実として、これが都合の良い情報だけを集める確証バイアスとして関係者の意識の中で、「計画外停止率が少ない(優秀な技術力がある)」→「日本では炉心を溶融させるような重大事故は起きていない(実績がある)」→「これからも起きないだろう(将来予測)」と短絡的に推論を働かせたことが考えられる。

また発電指標だけでなく、保守技術力を示した指標にも同じことが言える。予防的な保守管理を基本方針として早めの点検・補修を行うことで達成された低い機器故障率は、故障した時に交換するブレークダウンメンテナンスが許容される海外原子力事業者の機器故障率と比べると当然低い数値³⁾を示す。保守方針の違いを無視して日本の技術力の優秀さを代表する指標として確証バイアスが働き、スキーマが形成されたと考えられる。

日本の高い技術力を訴求するための計画外原子炉停止率や機器故障率の引用は、自分の主張に合う都合の良い情報だけを集めてしまう確証バイアスのきっかけとなり、これが重なると同調性の強い日本の組織の中で組織のスキーマを形成したのではなかろうか?結果として原子力技術の優秀さを確信するバイアスの下に「稼働率向上」や「投資効率重視」などの経営戦略において、原子力特有のリスクの優先順位を後に回した意思決定がなされていったと考えられる。

(2)正常性バイアス

海外で起きた重大事故に対して彼我の差を見つけ、自 分は大丈夫と思いたい正常性バイアスが働いた可能性も 高い。例えば米国で起きた TMI 事故 (1979) を契機に, 当直運転責任者の資格認定の必要性が検討された際に. 日本の事業者は運転直員の勤勉さと技術力の高さを主張 し、制度導入に難色を示したことがあった。しかし実際 のところ一旦トラブルに遭遇してからの運転直員の人的 過誤によるプラント出力への影響は米国のそれと比較し て大差ないとの分析結果⁴⁾が出ている。またソ連で起き たチェルノブイリ事故(1986)時に、技術的側面だけに注 目し、自国の組織文化についての考察が深まらないまま に、日本は原子炉の型式が違い、堅牢な格納容器がある ので放射性物質が無制限に環境に拡散するリスクは小さ いと主張して社会の不安を鎮めようとする動きがあっ た。これは、災害を近くで目撃した時、彼我の差を見つ けて自分は大丈夫と考えてしまう正常性バイアスと呼ば れる意識が働いたと考えられ、この意識が最近まで継続 していた可能性がある。

日本社会の特徴として,海外の情報に接しても当事者 意識を持って教訓を学ぶことに苦手な気質が,自分に影響は及ばないと正常性バイアスが働いた可能性は高い。

(3) ヒューリスティック

地震や津波などの自然の脅威は、観測作業や記録装置 自体が影響を受けて記録が欠損することも多い。そうな ると過去の実績を基に今後を予測し被害を想定すること は容易ではない。これに加えて、日本では原子炉運転開 始から50年の運転経験の中で外部電源を失い、炉心冷 却機能喪失によって溶融事故を起こした経験がなかっ た。事業者の経験不足はリスクを現実のものとして実感 することを難しくさせる。一般に少ない情報で意思決定 を迫られる時, 人は判断を先延ばしにするか, 僅かな手 がかりと自分の経験を頼りに直感的に結論を出そうとす る。この手がかりや経験則を用いる思考をヒューリス ティックと呼ぶ。福島第一事故の前には、不確かな情報 で自然災害の影響評価に対する意思決定を迫られ、少な い情報で直ちに判断する際に現れる代表性ヒューリス ティックという人間の特性と、良く見聞きする汎用情報 で判断しようとする利用可能性ヒューリスティックとい う心理作用が働きやすい環境にあったと考えられる。

(4) 過去事例

このような組織全体で認知バイアスが働き安全思考の 落とし穴に嵌ってしまう事例は度々報告されている。

例えば、米国デービスベッセ発電所では格納容器の中で原子炉冷却材の少量漏えいが長年にわたり認識されていた。だがこれが原子炉容器上蓋部で金属腐食を進行させ、いつのまにか圧力バウンダリーの減肉、損壊を引き起こしかねない状況になっていたことは長らく認知されなかった。当該発電所は高い稼働率を誇る優秀なプラントと見なされ、発電所幹部は原子炉冷却材の漏えいが規制の枠内であることや漏えい原因が既知の応力腐食割れに間違いがないとして大きなリスクの存在を疑わなかった。このため幹部は、米国原子力規制委員会の即時停止・点検要請に対して予定された定期検査まで運転継続したいと交渉を重ねていた。都合の良いデータの解釈を行う確証バイアス、自分達は大丈夫という正常性バイアスが働いた事例である。

また、メキシコ湾沖合の原油掘削施設で起きた原油流 出事故でも認知バイアスが働いていた。事故は会社幹部 が7年間無事故で操業を続けたことを祝う表彰パーティ を催したその夜に発生し、甚大な海洋環境汚染被害と多 大な経済損失をもたらした。事象の経緯と原因、対策を 検討するため設けられた特別事故調査委員会の大統領報 告書によると、現場では予定よりも6週間遅れで掘削に 成功し、少しでも工程を挽回したい気持ちと、これまで の掘削実績に基づく成功体験から安全確認プロセスを 少々短縮しても大丈夫と思う気持ちが重なり、高圧の炭 化水素ガスの暴噴リスクを軽視していた。また管理責任 が複雑に分かれた作業工程にもかかわらず、安全に関わ る価値観がプロジェクトの関係組織の中で共有されてい なかった。この事故もまた、これまでの成功体験や都合 の良い実績だけを見てしまう確証バイアスと、この施設 は大丈夫と考える正常性バイアスが働き、重大事故につ ながるリスクを軽視する組織文化が形成されていた。

2. 現場の挙動を観察することの重要性

認知バイアスは人間に備わった特性である。前述の事例のように、過去の実績に捉われると、認知バイアスが働きリスクを軽視してしまうこともある。社会的責任の大きな組織の中で安全に対するリスク軽視は、過去の実績ではなく、日常の活動の中で兆候を見つけないと手遅れになりかねない。しかし、この日常活動の観察情報は組織で働く人々の外面的な情報でしかないことに留意する必要がある。

Ⅲ.安全マネジメントの変遷

1. リニアからノンリニアへの思考転換

20世紀前半の技術は比較的シンプルなシステムで構成され、人的トラブルは原因を潰せば起こらないという

因果関係のはっきりした線形法則が成立すると考えられていた。ハインリッヒが提唱した一つの事故の背後に29件の比較的軽微な事故が隠れており、更にその背後には300件のヒヤリハット事例があるとする経験則は、事故に至る過程が原因と結果の連鎖だとするドミノモデルで代表される。ドミノカードの一つが倒れないように、人が不安全な状態を主体的に管理すれば事故は防止できると考えることが当時の安全確保の主流であった。

20世紀後半になるとシステムの複雑化が進み,事故には複数の原因が絡む場合があることが認識された。このため因果関係の成立条件を書き出したフォールトトリーを作って寄与要因を探り,それらのパス(径路)に事象の進展を遮断する障壁を設けることでトラブルを防ぐ手法が考えられた。この考え方の代表モデルとしてヒューマンエラーを研究するリーズンの提唱したスイスチーズモデル⁵⁾がある。このモデルもハインリッヒの法則と同様の因果関係の連鎖が前提条件となっている。

しかし、現代はシステムの複雑さが更に増すことで、個々の特性は単純なのにそれを集めた全体が個々の特性からは予測できない複雑系の存在、すなわち非線形性、創発性が注目されるようになった。

例えば宮城県沖地震(2005)震源近傍の原子力発電所で観測された岩盤表面の応答スペクトルは、これまでの個々の観測データを包絡した設計基準地震動の応答スペクトルの曲線を一部はみ出していた。また鳥取西部地震(2000)では、これまで学術的にも活断層が無いとされていた地域で活断層が動いたことが判明した。このようにこれまでの個々の特性を包絡する設計条件では安全をシンプルに担保できない事象が報告されている。また、福島第一事故の直接原因となった大規模な津波は、信頼に足る地震観測データや地質調査結果では予測が難しく、大胆な仮定を置かなければならなかった。このようにそれまでの運転経験を基に深層防護の各層のバリアを完全なものと信じていたことが覆され、非線形的な事象も想定しなければならなくなっている。

レジリエンス・エンジニアリングの提唱者であるホルナゲルは、このようなリニアな予測を超えたノンリニアの事象から安全を確保するためには、異常の根本原因を個々に潰すのではなく、むしろ安全状態に注目し、その揺らぎを計測しながら全体を眺めて安全を検討すべきとする新たな安全マネジメントの概念⁶⁾を提案している。

2. システミックアプローチ

リニア思考からノンリニア思考に転換するに当たって、IAEAの福島事故の要因分析では、人間や組織行動の文化的、社会的側面に注意が払われた。福島事故や前段で取り上げたいくつかの事故では、個人や組織が自らの認識を自己正当化するリスク判断が行われている。判断は、「効率」と「完全性」のトレードオフの中で行われ、

良好な実績を根拠に少々の近道選択や問題の先送りは許されるとの意識が働いていた。安全を考慮しつつも効率を追求してしまう心理的な近道選択の結果で生ずるリスクを探るためには、人、組織、技術の相互作用を全体的に眺める"システミックアプローチ"が有効とされる。

国会の責任で事故調査結果をまとめた「国会事故報告書」(英文)巻頭メッセージ⁷⁾で調査委員会の委員長は、「福島事故は日本製の事故(made in Japan)であり、その根本原因は、日本文化に内在する反射的な従順性、権威勾配の受容、予定調和重視、集団主義そして島国根性にある」と述べている。確かにこのような日本社会の特性は認知バイアスを強めたかもしれない。しかしながら認知バイアスは人間の本能である。福島第一事故を日本特有の事故だと割り切るのではなく、どこでも誰でも認知のショートカットによるリスク軽視が意識の中に潜んでいるとして社会的特性を考えながら真摯に自己省察する取組みが海外で始まっている。

例えば、2018年1月にスウェーデンでは、安全文化と 国民性について考えるフォーラム⁸⁾が OECD/NEA の主 導で開催された。これは安全文化を国民性という大きな 視点から眺め、国民性が安全文化の劣化に影響しないよ う注意を払っていこうとする取組みである。

Ⅳ. 国民性と組織文化

1. メイヤーの研究

国際事業の展開に携わる人材の育成に関わるメイヤーは、業務を通じて観察研究をまとめ、国民性を八つの評価軸⁹⁾に整理した。その一つに「ネガティブなフィードバックのやり方」という評価軸がある。

この評価軸に基づく分析では日本人が世界の中でも著しく間接的な表現でネガティブな内容を伝える気質を持つことが報告されている。「和をもって尊し」という言葉があるように、日本社会では人間関係において相手のプライドを損ねて振る舞うことを嫌う気質が強い。

ネガティブな情報を直接的表現で伝えるのか、あるいは間接的表現で伝えるのか、どちらが良いかではなく、このような特徴的な気質を日本の社会が持つことを意識して、安全に対する批判的姿勢を鈍らせないコミュニケーションを行うことが大事である。

2. ホフステードの研究

世界各地 76 か国 11 万人の IBM 社員のデータを集めて地域特性を分析したホフステードは、国民性を六つの評価軸¹⁰⁾で分類している。そこには日本が、"不確実なことを回避する気質"や"結果の達成要求が強い気質"において世界の中でも際立った特徴を持つことが報告されている。

不確実なことを回避する気質は長所短所の両方に影響が出るが、リスクマネジメントにおけるリスク同定の際

に、不確かなことは無視して確かな情報だけでリスクの 程度を判断してしまうことになり易い。また曖昧さを排除するために規則を定め、それを遵守することが目的化 すると形式主義に陥り易い。また、結果の達成を求める 気質が強すぎると、とりあえず見かけでもよいから出来 る範囲で成果を形にするようになり、これが常態化する と本質を忘れてしまいかねない危うさがある。

確かに日本社会には、「不確かな情報で動くことを避けたいという意識」、「目に見える結果を重視する意識」が強く、"ルールメイキング重視" "体制構築" "形式主義" に陥り易い特性がある。福島第一事故前の津波評価試算結果を巡る事業者の振る舞いを見ると、この不確実性を回避する気質が現れたのではないかと思う。

3. オーバーサイトの意義

組織事故を研究するリーズンは、経営においては「"安全目標"と"生産目標"の間に存在する避けがたい矛盾の中で、絶妙な居場所を見つけなければならない」と述べている。ホルナゲルもまた、「人間は"効率性"と"完全性"を天秤にかけて意思決定し行動する」と述べている。

最新知見に基づく設備強化の提案や安全に関わる懸念が現場から提起される時、これが権威勾配の強い集団主義が浸透する組織では、「生産目標(効率性)」と「安全目標(完全性)」を単純に天秤にかけるだけでなく、そこに組織の論理とスキーマが強くバイアスとして作用することは当然であろう。前述の日本社会の特徴的な気質に留意して組織内の確証バイアスや正常性バイアスの有無を探り、リスク判断の甘さを見つけることがオーバーサイトの神髄である。

通例化しているかもしれない "原子力リスクの軽視" を特定するオーバーサイトは、海外、特に米国原子力産業界で積極的に運用されている。米国原子力事業者間には、自分では気づかないところを指摘してもらい更なる向上を目指す仕組みとして、客観的、大局的、長期的視点を持つオーバーサイトが有効という認識共有がある。

具体的なオーバーサイトのシステムは、組織の執行ラインの業務を組織の中で第三者がチェックする仕組み(セルフチェック)、執行ラインと同じ同業他者の仲間内の視点からチェックする仕組み(ピアチェック)、そして組織の外から外部有識者の経験と思慮深い目でチェックする仕組み(外部チェック)の三つの仕組みで構成されている。この仕組みはさらに運用においても配慮がなされている。例えばセルフチェックの部署に配属されたスタッフは、積極的にベンチマークやセミナーに参加する機会を与えられ、幅広く深い知見を持つことが出来るよう配慮される。また外部から経営層に所見を伝える外部チェックの有識者達は、経営層に批判的で有意義な所見を伝えているかどうかを厳しくチェックされ、緊張感を

持つシステム運営が行われていることに留意が必要である。

日本ではルール遵守や業務の品質を確認する監査と混同されている部分もあるが、オーバーサイトは原子力リスクを見つけ出し、エクセレンスを求めて示唆を与えるためのポジティブな仕組みである。組織内にある自己満足の落とし穴を見つけ、組織文化を客観的に見つめるための一つの有効な手段と考えられるが、ただしこれは欧米文化の中から生まれた活動であり、前述で紹介したネガティブなことをフィードバックする時に相手を気遣って曖昧な表現で伝えようとする社会、他者から面と向かって課題を指摘されることを良しとしない社会では、このメカニズムを良しとして簡単には受け入れられない。無理に導入すると、結果としてせっかくの仕組みが機能せず、またぞろ形式に陥る心配がある。

4. 組織文化を測る指標

福島事故以降、安全性がどれだけ高まったかを測り、自らをふり返るための指標は、設備を改善して得られる「炉心損傷確率」の低下などの技術的な指標だけでは不十分で、リスクを軽視せず、不確実なリスクにも備える"組織文化の成熟度"を測る指標を、例えそれが数値化できなくとも、考案することが求められる。

日本では2020年から事業者の自主的な安全活動を前提にした「新検査制度」が始まる。これは米国のROP (Reactor Oversight Process)と呼ばれる検査制度に近い制度だが、ここには組織文化やその一部である安全文化を評価する検査も含むことが予定される。前述の事例のとおり、事故を起こした組織も当初は高いパフォーマンスを誇っていたが、いつのまにか組織文化の劣化は忍び寄ってくる。インタビューや行動観察などを通してデータを集め、これを多様な視点で分析し、組織文化の中に原子力安全に対するリスク軽視の兆候を見つける指標策定の検討が望まれる。

V. まとめ

福島第一事故のように複雑な現代社会の事故・災害は、根本原因を個々に対策するだけでは防止できない"非線形(ノンリニア)"の次元にある。福島第一事故の背景には日本の事業者が自己満足に陥って不確実なリスクに備えることに積極的ではなかったことがあると言われている。これを原点に、不確実なリスクに備える組織文化の構築、心理的な側面、すなわち組織とそこに働く人の相互関係に注目した対策強化の必要性が指摘されている。

不確実なリスクに備えるためには、これまでの思考の 延長でリスクを想定する線形的(リニア)な思考では不足 であることに留意し、自己満足に陥っていないか、自ら の思考を客観的に、多様に、大局的に、長期的視点から、その揺らぎを見つめる必要がある。これには技術的な対策によって数値指標化された効果測定とは違い、人間社会を成熟した目で診る技量が求められる。「大切なものすべてを、数量化することはできないし、数量化できるものすべてが、大切だとも限らない。」という格言があるが、計画外原子炉停止率や炉心損傷確率のような数量化された指標に捉われず、技術と人・組織の相互作用に注目しつつ、組織の活動を細分化するのではなく俯瞰的に観て、さらに長期的な変化を捉えることで、「思い込みによるリスク軽視の有無」、「不確実なリスクへの準備」を経験的に探ることの大事さに気づく、これが福島第一事故の教訓であろう。

技術面に偏ることなく人と組織の社会的側面から組織 文化を分析し、予測が難しい非線形のリスク事象に備え る"攻めの安全"を考えることが、日本のこれからの原 子力安全の視点に期待されるところである。これなくし て、原子力エネルギーが社会の理解を得て一定のシェア を保つことは難しいのではないかと思う。

- 参考資料 -

- 1) 東京電力,福島原子力発電所における事故調査・検証委員会,最終報告(本文編) p441,2012.
- IAEA, The Fukushima Daiichi Accident report by the Director General, p67, 2015.
- 3) 嶋田善夫,原子力発電所の装置,機器毎の不具合発生頻度の 日米比較, INSS ジャーナル 14,pp.316-325. 2007.
- 4) 高川健一,海外および国内の原子力発電所運転員の人的過誤 の発生傾向分析と両者の比較, INSS ジャーナル 13 pp267-275. 2006.
- 5) Reson, J. 組織事故とレジリエンス, 佐相邦英監訳, 日科技連, 2010.
- 6) Hollnagel, E. Safety-I & Safety-II-安全マネジメントの過去と未来, 北村正晴他監訳, 海文堂, 2015.
- Kurokawa K, et. al., The National Diet of Japan, The official report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, p9. 2012.
- 8) OECD/ NEA, Country-Specific Safety Culture Forum Sweden, 2018.
 - https://www.oecd-nea.org/hans/pubs/2018/7420-cssc-sweden.pdf
- 9) Meyer. E. 異文化理解力,樋口武志訳 英治出版,2015.
- 10) Hofstede, G. et. al., 多文化社会, 岩井八郎, 岩井紀子訳, 有 斐閣, 2013.

著者紹介



久郷明秀 (くごう・あきひで) 原子力安全推進協会 (専門分野/関心分野)リスクコミュニケー ション,リーダーシップ,組織文化,安全 文化,教育・人材育成

生徒の意欲を喚起する授業デザインとは

~福島の震災復興期を考える~

京都教育大学附属京都小中学校 野ヶ山 康弘

本稿は京都教育大学教育実践研究紀要に投稿した内容を引用したものである。2011年3月11日,東北地方太平洋沖地震による大津波が発生し,福島第一原子力発電所では電源喪失による爆発事故が起こった。福島県内では広範囲に放射性物質が降り注ぎ,8年経った今でもその影響は計り知れないものがある。教育現場では放射線の正しい知識を身に付けるための方策がさまざまとられているが,表面的な知識の習得だけでは放射線に関わる課題は解決していくことは難しいと考える。そこで,生徒たちがこの難しい今日的な課題を解決していくためには,自ら課題を解決していこうとする力が必要であり,放射線のベネフィットとリスクの両面から考えていく主体的な学びの場が必要であると考える。

KEYWORDS: Fukushima, Science Class, Radiation, Motivation, Education, Risk, Benefit

I. 問題の所在

東日本大震災による福島第一原子力発電所の爆発事故 以来、小中学生に対する「放射線の正しい理解」を推進す る機運が高まり、副読本が各校に配られて放射線を学ぶ 授業が行われるようになった。しかし、最近では津波の 被災地域の復興が進んだり、帰還困難区域が解除された り、復興が進んでいる印象のニュースが多く聞かれるよ うになってきている。また、理科の授業では小学高学年 と中学3年生で補助教材を使用して表面的に触れるだけ であり、放射線を知識として学習したり、霧箱のような 不思議実験をしたりするだけになっているように感じ る。このように世の中では放射線について語られる場面 が減り、風化が進んでいるように感じられる中、新学習 指導要領では中学3年生の物理分野で学ぶようになった が、前後の学習との関連性が薄く、これでは理科学習で 育成すべき科学的なものの見方や考え方。つまり科学的 リテラシーは育ちにくいのではないかと考える。

そこで、生徒の主体的な学びの中で、科学的に思考し、 判断し、行動していくことで「科学的リテラシー」が育 ち、放射線の性質を正しく理解できるようになるのでは

Class Design That Motivates Students; To Consider The Postdisaster Reconstruction Period Of Fukushima: Yasuhiro Nogayama.

(2019年3月15日 受理)

ないかと考えた。特に、目に見えず科学的に不確実な事柄が多い放射線に関する学習こそ、科学的リテラシーを 育成する上で重要な題材であり、生徒の発達の段階に応 じた系統的なカリキュラムが必要であると考えた。

1. 研究の目的と方法

生徒の意欲を喚起する授業に必要な要素として,新学習指導要領の学びの3本の柱の「知識および技能等」と「主体的な学びに向かう力,人間性等」が重要であると考える。「知識および技能等」は生徒が学ぶ内容であり,この習得状況を調査することで生徒の学びが確かなものになっているかどうかを示すことができると考える。また「主体的な学びに向かう力,人間性等」は生徒の学ぶ意欲そのものであり,この変容を調査することで意欲の高まりについての指標とすることができると考えた。

そこで、生徒の意欲を喚起する授業デザインの一例として、福島の震災復興が相応しいかどうかについて検証することとした。

(1)研究の目的

生徒の意欲を喚起する授業デザインとして、福島の震 災復興を取り上げることで科学的リテラシー(ここでは 放射線のベネフィットとリスク)を育成する授業デザイ ンが提案できるのではないかと考えた。本校生徒の実態 を調査すると、現在の福島県内の状況やこれまでに福島 で起きてきたことを知らない生徒がほとんどであり、帰 還困難区域の存在すら知らない生徒も多かった。そして 放射線の性質に対する関心も低く,放射線の利用やその リスクについても無関心である事実が明らかとなった。

そこで、まずは無関心を他人事にするために、震災の 津波の被害や原発事故の被害や放射線の性質について正 しく事実を知る機会を設けることにした。

(2)研究の方法

本研究を進める上で必要なことは、生徒の興味・関心を引き出す教材(授業モデル)と生徒の理解を深めるための教材の提示(カリキュラム)である。そこで、教材については現地で情報収集した動画や画像をそのまま用いたり、現地の人々に取材したりしたことなど、報道機関から提供されている内容だけでなく、多角的な視点で福島県を見つめられるようにした。

(ア)生徒の意欲を喚起する授業モデル「科学的リテラシーを育成する授業モデルとカリキュラム

本研究で目指す科学的リテラシーとは、「疑問を認識し、新しい知識を獲得し、科学的な事象を説明し、科学に関する諸問題について証拠に基づいた結論を導き出すための科学的知識とその活用する能力」とし、これを基に、次に示す4つの力が必要であると考えた。

- ①疑問を認識する力=「感じる」
- ②新しい知識を獲得する力=「知る」
- ③科学的な事象を説明する力=「考える」
- ④科学的知識を活用する力=「行動する」

この4つが作用し合う授業モデルによる科学的リテラシーの育成を行い、理解の状態に合わせてスパイラルに継続するカリキュラムを表1のように考えた。

内容 ステージ サイクル 知識と現実 新たな知識 知識の活用 の差異 福島の震災直後と Ι 感じる 震災1年半後の比較 放射線の性質 知る 知 「観察・実験 無 考える 福島と京都の比較 関 心 被災者の声 行動する 「大切な人を失った高校生」 Π 感じる 福島の現在 無 関 知る 放射線のリスクとベネフィット 心 考える 食の安全 他 人 事 被災者の声 行動する 「故郷を失った高校生」 Ш 被災者との交流 感じる 「故郷への思い 他 被災者との交流 人事 知る 「望んでいること」 被災者との交流 考える 自 「京都でできること」 分 被災者との交流 事 行動する 「被災地訪問」

表1 生徒の意欲を喚起する授業デザイン

まず、ステージIの段階では「感じる」場面と「知る」場面を中心にカリキュラムを構成し、「福島県の現状を知ること」や「放射線の性質を知ること」に重点を置いた。この中で事実を生徒たちが正しく知るために、現地で取材した内容を使用したり、現地で研究を進めている研究者の特別授業を行ったりして、多角的な授業構成を用いた。また「考える」場面では、学習した放射線の性質を活用して福島の現状と自分の生活を関連付けて考える場面を設定し、下記の3つの課題を提示して段階的に考えるようにした。活動1では放射線の性質を活用し、何が問題点なのか考え、次に活動1で明らかとなった問題点を土台に、活動2において福島の人々が現実的に直面している課題を考えるように設定した。そして、活動3において福島に暮らす同世代の声を聞き、活動2で考えたことを生徒自身がメタ認知する機会として設定した。

- ・活動 1 「もし、京都が飯舘村と同じ状況だったら住 みたいか、話し合おう」
- ・活動2 「飯舘村は2年後の帰還を目指しているが可能だろうか?」
- ・活動3「福島の同世代のメッセージを聞こう」

次に、ステージⅡでは「考える」ことを中心にカリキュラムを構成し、放射線について深く考えるきっかけになるようにした。まず「感じる」と「知る」場面では、「放射線と生徒自身の生活のつながり」を意識できるような授業構成とした。そして「考える」場面では、放射線のリスクとベネフィットを考える場面を多く設定し、日常生活と放射線の関わりを身近なものとして取られるようにした。具体的には、まず理科学習の「消化と吸収」と関連付けて、放射性物質による内部被ばくと外部被ばくの違いやこれらの被ばくを防ぐ方法を学ぶ機会を設けた。その上で「野菜の産地」や「芽止めじゃがいも」を題材に放射線のリスクとベネフィットを考えるように課題を設定した。

さらに、ステージⅢでは「被災地との交流」を中心に現 実と向き合う中で、生徒自身の力で今後の未来を考え、 生徒自ら行動していけるような授業構成とした。具体的 には被災の現状と被災地の人々の思いという対照的な事 象について、科学的な知識や事実に基づいて冷静に判断 できるような課題を設定した。

(イ)放射線に対する意識の変容調査

放射線に対する意識の変化について,以下の2つの調査を行った。

①放射線に対する正しい認識が授業によってどのように 変化するか。

この調査については、福島県教育委員会が福島県内の小中学生に実施したアンケート内容と同様のものを授業前後に行った。このアンケートの内容は、福島県では中学3年生に対して実施しているものである。アンケートの回答はそれぞれ「大変そう思う」「そう思う」「そう思わない」「全くそう思わない」というような4択式となって

いる。

②日常生活と学習してきた福島や放射線の性質と関連づけて考えることができているか。

日常生活における放射線の利用について、生徒に課題 提示をして、放射線のリスクとベネフィットの両面から 判断できるかどうかを調査した。

この調査では授業内における生徒のノートなどの記述を基に、記述内容が福島と自分をつなげて捉えているかということについて分析を行った。

以上の①と②の2つの調査は、第7学年時から同一学 年について下記のように継続調査を行った。

- · 実施対象: 本校7年生88名
- ・実施日:事前…本研究実施前(第7学年) 2月…本研究ステージ I 終了時(第7学年) 7月…本研究ステージ II 終了時(第8学年)
- ③生徒の主体的な学びが促されているか。

生徒の主体的な学びが促されているかどうかを評価するために、自己調整学習の理論を基に、動機づけ調査のアンケートを行った。アンケート対象は第7学年より福島復興に関する学習に2年間取り組んできた第9学年の生徒とこれから福島復興に関する学習にこれから取り組む第8学年の生徒を対象に6月に調査を行った。

Ⅱ. 研究の結果と考察

1. アンケート調査について

(1)項目ア「放射線は、世界中どこにでもある。」

項目イ「放射線は、原子力発電所の事故の前には、私 たちの身の回りには存在していなかった。」

項目アにおいて、正しい認識が7年生の段階において、事前66%から事後(2月)94%に上昇している。これは、放射線の基礎的な知識を学び、知らなかった知識を得ることができたからであると考えられる。しかし、「わからない」と答えている生徒が5%おり、「目に見えない、感じることができない」という放射線の性質が放射線の性質を理解しにくいものにしている可能性がある。

ところが、8年生の授業が終了した段階(7月)では、正しい認識が94%から83%に低下している。これは、学びが深まるにしたがって生徒の放射線に対する意識が、自然放射線と事故で放出された放射線とが別のものとして認識され、ここでいう放射線を事故で放出された放射線と捉えている生徒がいたことが原因として考えられる。

また項目イにおいて、7年生の段階では、正しい認識が事前74%から事後(2月)89%に上がった。これは、本授業によって、放射線に対する知識がなくあいまいだった理解が、放射線の性質を知ることで放射線に対する正しい認識が身についたことが考えられる。しかしながら、わからないと答えた生徒や誤った認識の生徒の割合を分析すると、「わからない」と答えている割合が項目アとほぼ同じであることから、項目アと同じ理由で、「目に

見えない、感じることができない」という放射線の性質が放射線の性質を理解しにくいものにしている可能性がある。さらに、誤った認識の生徒が5%おり、自然界に存在する自然放射線と事故によって放出された人工的な放射線を混同しているのではないかと考えられる。しかし、8年生の段階で月)ではさらに正しい認識が97%に上昇し、7年生の段階で混同していた自然界に存在する自然放射線と事故によって放出された人工的な放射線について、学びが進む中で整理されたものと考えられる。(2)項目ウ「人が放射線をあびると、放射線を出す能力を持ってしまう。」

項目オ「放射線は、病気を治すことになどに利用されている。」

7年生の段階で正しい認識が事前77%から事後(2月)74%と減少していた。これは、内部被ばくと外部被ばくについて学習をしたため、からだの中に取り込まれた放射性物質が放射線を出すことと混同したことが原因であると考えられる。しかし、8年生の段階(7月)で理科単元の消化吸収と関連づけて内部被ばくについて詳しく学習したが、正しい認識がさらに減少した。これは「放射線をあびると、放射線を出す能力を持ってしまう」と生徒が実際に感じていることから、この点が放射線教育の難しいところでもあるといえる。正しい知識を学べば、正しい知識が身につくとは限らないことが示唆された。

項目オにおいて7年生の段階では正しい認識が事前64%から事後(2月)67%とほぼ変化がなく、授業の効果が見られなかった。これは、項目オについては、授業内容に放射線の利用が含まれていなかったため、新たな知識を得ることができなかったためと考えられる。そこで、8年生の段階(7月)で放射線の利用をについて学習したところ、正しい認識が80%に上昇した。このように、放射線の有効利用の知識・理解については、科学的リテラシーに必要な視点「リスクとベネフィット」につながる内容であり、今後の授業の中で学んでいく必要があると考えられる。

以上の結果から、「知ること」で正しい認識を持つことができていることが伺える。逆に、「知らない」ことが誤った認識を生んでしまう可能性を示唆している。これは項目オについて、今回の学習の中では取り入れていなかった内容であり、項目アとイは学習した内容であり、この比較から放射線についてしっかりと学べば、放射線に対する不安や誤解がなくなり、正しい認識が身につくと考えられるからである。

しかし、項目ウについては、内部被ばくの学習をしたことで、放射線を浴びるとその人から放射線が出るという誤解を生んでおり、この点において、学び方や学ぶ内容について慎重に取り組まなければならない点であることが示唆された。

(3)項目カ「放射線, 放射性物質, 放射能の違いを説明で

きますか。」

項目カにおいて、7年生の段階では放射線について説明ができると答えている生徒が事前 18% しかいなかったが、事後(2月)では 46%、事後(7月)では 49%、と上昇している。これは放射線の性質について学び、知らなかったことを知ることができたためと考えられる。しかし、事後(2月)から事後(7月)では変化があまりなく、授業の効果が見られなかった。これは、授業にこれらの違いの内容が含まれていなかったことにより、新たな知識を得ることができなかったためと考えられる。

今後の課題としては、内部被ばくに対する学習や放射線の利用に対する学習を進め、今日的な課題や将来課題となる事柄に対して、放射線のリスクとベネフィットを考え、正しく理解することが、生徒がどのようにこれらと向き合っていくのかという姿勢を育てていくことであると考えられる。

2. 放射線のリスクとベネフィット

(1)「どちらのジャガイモを選ぶか」

放射線のリスクとベネフィットを考えるきっかけとして、日常生活でごく普通に「芽止めジャガイモ」について考えることにした。一般に市販されているジャガイモは一年中購入することができるが、芽が出ないように収穫後に放射線を当てているものがある。放射線を当てても害はないが、この事実を多くの生徒は知らない。また、理科学習の中でジャガイモを育てることがあるが、この収穫したジャガイモはすぐに芽が出てしまい食べると食中毒を起こすことがある。そこで、放射線を当てた芽止めジャガイモと芽が出てしまうジャガイモのどちらを選ぶかという問いを生徒に投げかけた。

この結果、69%の生徒が放射線を当てていないジャガイモを選んだ。その理由を生徒に問うと「芽が出る前にジャガイモを食べればいいから、あえて放射線を当てたジャガイモを選ばなくてもよい」とか「安全なのはわかっているが、気分的に」という意見が多く見られた。これに対して、芽止めジャガイモを選んだ31%の生徒は、「安全なのだから気にすることはない」とか「放射線を当てても放射線を出すようになるわけではない」というように、放射線の性質を理解した上で答えていた。

このように放射線の理解に対して、知識だけでは克服できない壁というものが存在するのではないかと考えられる。放射線を見たり感じたりすることができないという放射線の未知の部分が、生徒に不安を生じさせていると考えられる。そして、この不安が放射線のリスクとベネフィットを科学的に考えられなくしているのではないかと思われる。

(2)「どちらの野菜を選ぶか」

放射線のリスクとベネフィットを考えるきっかけとして、福島について学んできたことを活かすために、「野菜

の生産地」について考えることにした。一般に市販されている福島県のすべての野菜は放射能残留検査が実施され、安全が確認されたものだけが出荷されている。しかし、周辺の地域では必ずしも十分な検査が行われているわけではないため、放射能が残留している可能性がある。

そこで、福島県産の野菜と東北の他県産のどちらを選ぶかという問いを生徒に投げかけた。この結果、61%の生徒が東北の他県産を選んだ。その理由を生徒に問うと「福島県産は安全だと言っているが本当に安全かどうかわからない」とか「安全なのはわかっているが、気分的に」とか「福島県以外には放射性物質が放出されなかったから」という意見が多く見られた。

このことから放射線に関する生徒の知識は、正しい知識を学んだからといって必ずしも正しく理解されているわけではないということが示された。また、放射線特有の「目に見えない不安」が生徒の正しい理解と行動に影響を与えているのではないかと考えられる。

3. 学習課題に対する動機づけ

「動機づけのアンケート結果」

福島の震災復興を教材としたカリキュラムに2年間取り組んできた9年生とこのカリキュラムを取り組む前の8年生に対して、動機づけのアンケートを行った。4種類の動機づけごとに主因子法による因子分析によって1因子性の確認を行ったところ、いずれも.40以上の高い因子負荷量を示した。次いで、クロンバックのα係数を算出した。その結果、内発的動機づけは.85、同一化的動機づけは.83、取り入れ的動機づけは.84、外的動機づけは.85の値を示し、高い信頼性が確認できた。

これらをふまえ、それぞれの動機づけの質問項目群の平均値を算出し、尺度得点とした。これをもとにして、尺度の妥当性に関する検討を行うために、4種類の動機づけの間の相関係数も求め、シンプレックス構造をなしていることを確認した $(r=-.06\ ho\ r=.71\ tocnを囲の値を示した)$ 。

9年生と8年生、全体の尺度ごとの平均値を算出し表にしたものが表2である。また、「内発的動機づけ」 $\times 2+$ 「同一化的動機づけ」 $\times 1-$ 「取り入れ的動機づけ」 $\times 1-$ 「外的動機づけ」 $\times 2$ の数式によって、自律的動機づけ指標についてもあわせて算出することとした。表2は、その結果も示している。この指標は、正の大きな値

表2 各学年と全体の動機づけ尺度得点の平均値と人数

動機づけ	9 年生	8年生	全 体
内発的動機づけ	3.20 (86)	3.40 (79)	3.30 (165)
同一化的動機づけ	3.33 (86)	3.57 (83)	3.45 (169)
取り入れ的動機づけ	2.03 (87)	2.13 (83)	2.08 (170)
外的動機づけ	1.67 (86)	1.83 (83)	1.75 (169)
自律的動機づけ指標	4.35 (84)	4.55 (78)	4.45 (162)

(注)括弧内は人数を示す。

を示すと、内発的動機づけや同一化的動機づけが高く、 外的動機づけや取り入れ的動機づけは低い、という傾向 性を表すことになる。

9年生と8年生の平均値の間に差異がみられるかどうか、統計的検定を試みたが、有意差がみられなかった。しかしながら、「あてはまる」から「あてはまらない」までの5件法で尋ねていることから、意味上の中央値は3点になる。どちらの学年も、全体の平均について、値をみれば、内発的動機づけや同一化的動機づけが高く、外的動機づけや取り入れ的動機づけは低い、という方向へ傾いていることがうかがえそうである。自律的動機づけ指標は、大きくはないが、正の値を示していた。

Ⅲ、研究の成果と課題

本研究では生徒の意欲を喚起する授業モデルの一例として「福島の震災復興」を教材として扱い、科学的リテラシーを育成することを目指したところ、以下の3点が明らかとなった。

一つめは、科学的リテラシーを育成するためには、① 疑問を認識する力 = 「感じる」、②新しい知識を獲得する カ = 「知る」、③科学的な事象を説明する力 = 「考える」、④科学的知識を活用する力 = 「行動する」の 4 つの要素を含む授業モデルを使用して、生徒の理解の状態に合わせたスパイラルに継続するカリキュラムが効果的であることが示唆された。特に、7年生の段階で「知る」ことを中心にしたカリキュラムを構成し、「福島県の現状を知ること」や「放射線の性質を知ること」に重点を置き、事実を生徒たちが正しく知るために多角的な授業構成を用いたことが効果を高めたのではないかと考える。これはアンケート調査において、学習が深まるにしたがって放射線の正しい理解が高まったことから考えられる。

しかし、放射線の性質の正しい理解が高まったからといって、それを活用して正しく行動できるとは限らないことも課題として浮き彫りとなった。ここには放射線の性質特有の「目に見えない」「感じることができない」という未知の部分が大きな不安を引き起こしているところに原因があるのではないかと考えられる。この点について、今後も継続して分析していく必要があると考える。

二つめは、学習した放射線の性質を活用して福島の現状と自分の生活を関連付けて考えるために、活動1では「放射線の性質を活用し、何が問題点なのか考え」、活動2では「活動1で明らかとなった問題点を土台に、福島の人々が現実的に直面している課題を考え」、活動3では「福島に暮らす同世代の声を聞き、生徒自身が自分の考えをメタ認知する機会」として段階的に課題を提示したことが、生徒たちの放射線のリスクに対する課題意識を高めることができたと考えられる。それは、アンケートの項目ウ「人が放射線をあびると、放射線を出す能力を持ってしまう。」のように、学べば学ぶほど正しく説明が

できなくなっている項目があることから、放射線の性質 を単なる知識として暗記しているのではなく、放射線の リスクについても考えるようになっているからこそ、放 射線の未知な部分を意識するようになり説明できなく なっているのではないかと考えられる。しかし、この点 については、まだ調査と分析が不十分なため、今後、詳 細に研究を進めていく必要がある。

三つめは、福島の震災復興を教材としたことによって、生徒の動機づけが内発的動機づけや同一化動機づけ、すなわち、自律的動機づけに向かっていき、やや意欲が高くなっているという可能性である。つまり、生徒にとって福島復興という課題が「無関心から自分事になった」という可能性である。

これらのことから、これまで福島の問題は遠くの出来事であり、自分には関係がないと感じている生徒が多くいた。しかし、8年生の段階で「放射線と生徒自身の生活のつながり」を意識できるような授業構成として、放射線のリスクとベネフィットを考える場面を多く設定した。このことにより、生徒は学んだ福島の現状と生徒自身の日常生活について、放射線を媒介に身近なものとして感じられるようになった。それは、「野菜の産地」や「芽止めじゃがいも」を題材に放射線のリスクとベネフィットを考えるように課題を設定したとき、買うか買わないかの理由に必ず放射線の良い点と良くない点を示して、福島の現状を基に自分の考えを述べていたからである。

今後の課題として、この教材によって生徒の動機づけが内発的動機づけや同一化的動機づけ、すなわち、自律的動機づけが高くなっている可能性が推察できるが、さらに現在の8年生の変容を追っていくことで明らかにする必要がある。また福島の現状について、生徒の意識が「無関心から他人事」へと意識を高めてきていることから、この意識の変化が何によるものなのか要因を分析し、その要因を参考に「他人事から自分事へ」意識が高まっていくような授業モデルと授業カリキュラムを他の文脈でも開発していきたいと考える。

- 参考資料 -

1) 野ヶ山康弘,谷口和成,伊藤崇達,生徒の意欲を喚起する授業デザインの構築 I ~震災復興期の福島から学ぶ~,京都教育大学教職キャリア高度化センター教育実践研究紀要第1号 pp101-109(2019).

著者紹介



野ヶ山康弘 (のがやま・やすひろ) 京都教育大学附属京都小中学校 教諭 (専門分野/関心分野)科学教育, 理科教育, 義務教育カリキュラム, 認知心理学

重粒子線がん治療装置の開発 日本から世界へ

東芝エネルギーシステムズ 平田 寛. 萩原 剛. 長本 義史

本解説では、重粒子線がん治療について、装置開発の歴史、治療の現状、装置の最新技術動向と将来展望について紹介する。世界初の治療用重粒子線がん治療施設 HIMAC は 1993 年に日本で開発された。近年の技術開発により、回転ガントリー、呼吸同期照射、スキャニング照射の三つの必須技術を普及型の装置にも導入できるようになった。重粒子線がん治療装置は日本が主導権を握る数少ない優れた医療機器であり、日本から世界へ一気に普及が期待される。

KEYWORDS: Heavy Ion, Radiotherapy, J-CROS, Respiratory-gated Irradiation, Scanning Irradiation, Superconducting Rotating Gantry

I. 背景

日本人の二人に一人ががんにかかる現在¹⁾, がんは死 因第一位の病気である。現在では、早期発見と適切な治療により治癒率は向上しつつあるが、がんの効果的な治療は喫緊の課題である。

重粒子線によるがん治療は、放射線治療の一種であり、炭素イオンを光の速さの70%まで加速して炭素イオン線(=重粒子線)とし、「がん病巣」に対して体の外から照射する治療法である。がん病巣の位置、大きさ、形状に合わせて重粒子線をピンポイントで集中させることができるため、周囲の正常な細胞を傷つけにくく、他の放射線治療と比べて「がん病巣」を殺傷する能力が高いという特長がある。また、患者の身体的負担が少なく早期の社会復帰を可能とする治療方法である。

特定の深さで放射線量が大きくなる特徴(ブラッグピーク)を持ち同様の効果を狙える放射線治療として、陽子線がん治療がある。陽子線と重粒子線をまとめて、粒子線治療と呼ぶこともある。陽子線、重粒子線ともに、前述の特長を備える有効な治療法であるが、同一物理線量において、重粒子線の生物学的効果比(RBE)は陽子線の2~3倍になると言われ、より高い治療効果が期待されるだけでなく、治療にかかる回数を少なくすることができる²⁾。

Development of heavy ion radiotherapy system; From Japan to all over the world: Yutaka Hirata, Tsuyoshi Hagiwara, Yoshifumi Nagamoto.

(2019年3月22日 受理)

2019年2月現在、世界で稼働している陽子線施設は80か所、一方の重粒子線施設は12か所である。有効な治療法として期待されているにもかかわらず、重粒子線装置の普及がこのように遅れている背景には、これまでの臨床研究の経緯や、質量の大きな重粒子線を扱うという装置としての技術的難しさがある。陽子線装置のうち、すでに半数以上のシェアは海外のメーカによって押さえられている一方、重粒子線装置においては国内メーカがシェアの大半を占め、開発をリードしている。

本解説では,重粒子線がん治療について,装置開発の 歴史,治療の現状,装置の最新技術動向と将来展望について紹介する。

Ⅱ. 重粒子線がん治療装置開発の歴史

1. 米国発の陽子線がん治療装置

粒子線をがん治療へ応用する取り組みは、1940年代に 米国で始まった。まず、陽子線を用いた臨床研究が1950 年代にカルフォルニア大学にあるローレンス・バーク レー国立研究所(LBL)で開始され、1961年にはハーバー ド・サイクロトロン研究所とマサチューセッツ総合病院 にて陽子線の治療応用が開始された。日本でも1979年 に放射線医学総合研究所(放医研)、1983年に高エネル ギー物理学研究所で、それぞれ研究用加速器を使った臨 床応用が始まった。

1990年に、ロマリンダ大学で回転ガントリーを備えた世界初の医療専用陽子線がん治療装置が設置されたことがきっかけとなり、陽子線がん治療装置は本格的に普及を始めるフェーズへと移行した。世界中で陽子線がん治

療装置の建設が始まり、日本でも 1998 年に国立がん研究センター東病院、2001 年に筑波大学に陽子線がん治療施設が開設されるなど広がりを見せ始めた。

陽子線は X 線と RBE が同程度とされ、それまでの X 線がん治療で得られた知見を活かしつつ、ブラッグピークを持つ粒子線の利点を生かす治療法として普及していった。導入価格が下がるにつれて普及のペースも加速しており、2019年2月時点で日本国内だけで14か所稼働している。

2. 日本発の重粒子線がん治療装置

対して、重粒子線がん治療については、1970年代になって、LBLにて世界初の臨床研究が開始されたが、がん治療として確立するには至らなかった。当時は研究施設の一部を使って臨床研究が実施されていたため、その有効性を示すデータは残ったものの、治療装置として世に出ることはなかった。

日本では、国の「第1次対がん10カ年総合戦略」の一環として、1984年に放医研が重粒子線がん治療装置 (HIMAC)建設を開始した。世界初の治療用重粒子線装置を開発するに当たり、それまで東京大学原子核研究所の TARN-II などの開発で培った加速器技術を投入した。また、HIMAC の建設には TARN-II 製作で実績のあった日本の複数のメーカが参画し、共同で装置の技術的なハードルを次々とクリアしていった。入射器を住友重機械工業、主加速器を日立製作所、高周波加速システム、真空排気系および入出射ビーム輸送系を東芝、A/B/C室を三菱電機、がそれぞれ担当し、約10年をかけて1993年に世界初の重粒子線がん治療研究施設として HIMAC が完成した(図1)。

放医研で HIMAC が建設されたのとほぼ同時期に、ドイツでも、重イオン科学研究所(以下、GSI)において研

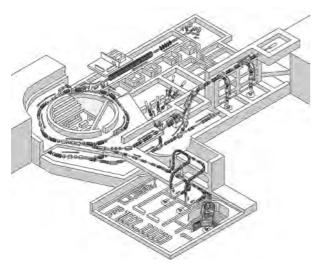


図 1 重粒子線がん治療装置(HIMAC)模式図 出典:量研/放医研 HPより引用

(https://www.nirs.qst.go.jp/rd/ace/index.html)

究施設の一部を使った臨床試験が進められた。1997年より炭素イオンによる重粒子線がん治療を開始,さらに重粒子線のスキャニング照射を世界で初めて実現した。その後,2009年からはハイデルベルグ大学に建設した治療施設が稼働を開始し、2012年には巨大な重粒子線用の常伝導回転ガントリーを建設するなど、放医研と研究開発でしのぎを削ってきたが、近年はメーカが事業から撤退するなど積極的な展開は見せていない。

3. HIMAC から広がる重粒子線がん治療

HIMACでは、1994年6月から最も適切なイオン種として炭素を選定し、重粒子線による臨床試験を開始した。これが、今日の重粒子線がん治療普及を支える大きな一歩となった。2001年には兵庫県立粒子線センター、2010年には群馬大学重粒子線医学センターで治療が開始。HIMACに参画した国内メーカによって、HIMACをベースに小型化した普及型重粒子線がん治療装置の医療装置としての製造・販売が開始された。その後、2013年には九州国際重粒子線がん治療センター、2015年には神奈川県立がんセンター、2018年には大阪重粒子線センターでも相次いで治療が開始されている。

放医研では、HIMAC 稼働後も様々な部位に対応できるより精度の高い治療を模索して研究が進められてきた。新たに建設した新治療研究棟で、2011 年にスキャニング照射専用の E/F 室、2016 年に重粒子としては世界初の超伝導電磁石を用いた回転ガントリーを備える G室を相次いで整備し、重粒子線がん治療の高精度化を実現した。これらの装置はいずれも東芝が担当した^{3,4)}。

Ⅲ.重粒子線がん治療の現状

1. 放医研を中心とした治療実績

日本国内での重粒子線がん治療に関する研究は、放医研の主導により行われてきた。放医研では、1994年の研究開始から現在までに1万人を超える治療を行い、優れた実績を上げている。2003年に高度先進医療に承認され、しばらくは先進医療としての位置づけが続いたが、2016年4月から骨軟部がん、2018年4月から前立腺がんと頭頸部がんについて、公的医療保険が適用されている(図2)。

それ以外の部位についても、先進医療としての治療は継続されており、今後の保険適用に向けた臨床データの蓄積、評価が続けられている。さらなる重粒子線がん治療の普及に向けた取り組みとして、2016年には標準化を進めるための多施設共同臨床研究組織(J-CROS)が設立された。肝細胞癌、局所進行膵癌など五つの部位を対象に、将来的な保険収載が認められるよう、それぞれの治療の有効性と安全性を評価するため先進医療Bとして実施している。

放医研における重粒子線治療の登録患者数 1994年6月~2018年3月6日 ※S:スキャニング

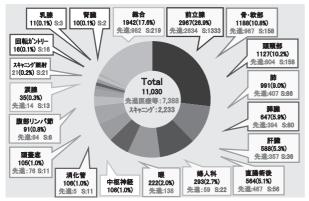


図2 放医研における重粒子線がん治療実績

出典:量研/放医研 HP より引用

(https://www.nirs.qst.go.jp/rd/cpt/index.html)

2. 適用部位と必要とされる技術

これまでの放医研における治療実績をみると、適用が多いのは、前立腺、骨・軟部、頭頸部、肺、膵臓、肝臓、の順となっている。重粒子線は、腫瘍への線量集中性が高いだけでなく、X線や陽子線より放射線抵抗性の腫瘍に対しても高い効果を持つことから、骨肉腫や悪性黒色腫といった腫瘍に対しても、優れた治療実績が得られている。これらの適用部位に必要な技術をいくつか挙げる。

まず、重粒子線がん治療では、治療開始前にCT画像などにより腫瘍の位置を特定し、所定の線量を投与できるよう照射方向などを決定する治療計画を行う。その際、重要臓器を避けて治療するために複数方向から照射を計画する。ところが、照射装置を固定して患者の姿勢を変化させて治療する場合は、体内の臓器の位置が患者の姿勢によって変化するため、CT画像および治療計画を照射する姿勢毎にそれぞれ準備する必要がある。回転ガントリーを導入すれば、患者の姿勢を変化させることなく多方向から照射できるが、重粒子線ではビーム軌道を制御するための電磁石が大きく、ほとんどの施設では固定式の照射装置しか導入できていない。

肺や肝臓などの呼吸により移動する腫瘍に対して、精度よく治療できる方法も求められている。呼吸性移動を 考慮せずに治療を行うと、照射した範囲に腫瘍が存在せず、正常な臓器にダメージを与えるリスクが高まるためである。移動する腫瘍の動きを治療中に把握する方法については、体表面などの動きを見ながら予測し、治療計画で想定した範囲に限って照射する方法(外部呼吸同期)が現在一般的である。

重粒子線がん治療が普及した当初は、ビームを一度拡散した後、ボーラスやコリメータで腫瘍の形状に合わせて均一な線量を一度に照射するパッシブ照射法であった。しかし、より線量集中性を高めて精度良く治療するために、ビームを細いまま照射し腫瘍形状を塗りつぶす

ように走査するスキャニング照射法に移行しつつある。 呼吸性移動に対応してムラなく照射するためには非常に 高速なビーム走査が求められ、短時間で正確に治療する ための装置への要求ハードルは高い。

Ⅲ. 装置の最新技術動向

装置の技術開発の方向性は、陽子線も重粒子線も一致しており、普及が進む陽子線の装置では、回転ガントリーによる多方向からの照射、呼吸移動性の患部に対応する呼吸同期照射、スキャニングによる高精度照射の三つは必須技術として業界内で認識されつつある。しかし、陽子線装置を手掛けるメーカであっても、技術的難易度の高さから、重粒子線装置に対してこれらの技術を導入することは困難であった。

近年,放医研新治療研究棟での技術開発によって,重 粒子線装置にも導入できるようになり,今後標準機能と しての普及が期待される。ここでは,今後建設される重 粒子線施設に導入を図っていく最新技術をいくつか紹介 する。

1. 超伝導回転ガントリー

通常は、ビームの軌道を変更するために用いられる電磁石は、磁性体である鉄心を利用した常伝導電磁石だが、磁性体の飽和により得られる最大磁場が制限され、鉄の場合は約2Tが上限となる。そのため、巨大なビーム輸送ラインを搭載する重粒子線の回転ガントリーは、普及が容易なサイズではなかった。例えば、陽子線の回転ガントリーサイズは、全長10m程度、回転重量200t程度に対し、ハイデルベルグ大学に設置された初の重粒子線の回転ガントリーサイズは全長25m程度、回転重量600t程度である。

そこで、重粒子線の回転ガントリーを小型、軽量化するために、導入されたのが超伝導電磁石である。超伝導電磁石であれば、鉄心の飽和による制約はなく、コイルに流す電流値次第でより強力な磁場を発生することができる。世界で初めて超伝導電磁石を採用した放医研新治

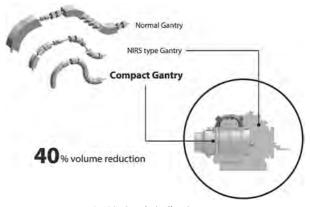


図3 小型化する超伝導回転ガントリー

療研究棟の重粒子線回転ガントリーは全長 13m 程度, 回転重量 300t 程度と, 常伝導を用いた従来サイズのほ ほ半分を達成した。

今後建設される施設に設置される超伝導回転ガントリーは、搭載する超伝導電磁石を改良し、発生させる最大中心磁場を約3.5Tまで引き上げるなどして、さらなる小型化を実現する⁵⁾。その結果、全長9m程度、回転重量200t程度となり、ほぼ陽子線と同等のサイズとなる(図3)。

搭載する超伝導電磁石は、ビーム偏向機能とビーム収束機能を併せ持つ機能結合型電磁石である。偏向用の二極電磁石と収束用の四極電磁石をそれぞれ独立して配置する場合と比べて、ビーム輸送ラインの長さを大幅に短縮できる効果がある。また、回転ガントリーの角度によらず安定した励磁が可能で、緊急停止時も超伝導状態が破壊されるクエンチが起こりにくいように設計されている。

コイルを超伝導状態に保つための冷却は、極低温冷凍機を用いた伝導冷却による液体へリウムフリーシステムである。万が一クエンチが起きた場合でも、冷凍機によって3時間以内に自動的に超伝導状態に復帰する。冷凍機の台数は放医研新治療研究棟のものと比べ半減しており、ランニングコストも大幅に改善している。

2. 内部呼吸同期システム

呼吸性移動を伴う腫瘍を治療する場合,一般的には外部呼吸同期システムが用いられる。外部呼吸同期システムは,患者体表面の動きを外部センサーで観察し,患者の呼吸運動を呼吸波形として一定の閾値を設け,その範囲内に限って照射するよう自動制御する。しかし,この方法では腫瘍位置を直接取得できないため,患者によっては体表面と腫瘍位置の相関性が低い場合もあり,想定している腫瘍位置と実際の腫瘍位置に誤差が生じかねない。

そこで、今後建設される施設では、腫瘍位置をより正確に取得するために、外部呼吸同期システムに加え、二つのモードを備えた内部呼吸同期システムが導入される。これは、X線透視装置により二方向から直接体内を観察し、リアルタイムに算出した腫瘍位置に基づいて照

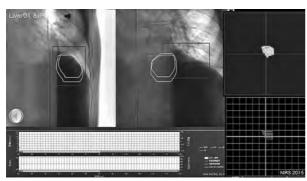


図4 内部呼吸同期システム(マーカレス)

出典:量研/放医研より提供

射を自動制御するもので、体表面と腫瘍位置の相関性が 低い患者に対しても、高精度な照射を実現できる。ま た、呼吸が不規則な患者や、治療中に呼吸パターンが変 化する患者に対しても安定した照射が可能となる。

腫瘍位置を算出するための方法のひとつは、金属マーカを体内の腫瘍近傍に複数埋め込み、それらをトラッキングするものである。金属マーカは、球形状、コイル形状などがあるが、いずれの場合も、治療開始前に患者にマーカを刺入する必要があり、患者によっては負担を伴う。

腫瘍位置を算出するもうひとつの方法は、マーカレストラッキングと呼ばれ、放医研により世界で初めて重粒子線がん治療に適用⁶⁾された(図 4)。この方法では、治療前に撮影した CT 画像から再構成した X 線シミュレーション画像(DRR)で腫瘍領域の形態的特徴をあらかじめ学習しておき、治療時に撮影する X 線透視画像内で腫瘍位置を判断する。これにより、体内に金属マーカを埋め込まなくても同等の誤差で腫瘍の位置を特定する。また、リアルタイム画像処理によって被ばく線量を抑制する工夫もされている。

3. 高速3次元スキャニング照射装置

スキャニング照射法は、細いビームを用いるためペンシルビームスキャニングとも呼ばれ、ビームのオンオフを繰り返しながら点群で走査するスポットスキャニング、ビームをオンしたまま連続的に走査するラスタースキャニングなど操作方法に応じた分類がある。ビームを断続的に照射するスポットスキャニングと比べて、ラスタースキャニングは高速化に適しており、照射の均一性を高めるだけでなく、照射時間の短縮にもつながる。

今後建設される施設に設置されるスキャニング照射装置はラスタースキャニング方式を採用し、最大 80mm/msec という高速走査を実現する。腫瘍を深さ方向に分割し、ある深さで一定量の照射を行った後、深さを変えてまた一定量の照射を行うことを繰り返して治療を行う。本照射装置は高速な走査速度を生かし、同一呼吸位相内である深さで照射が必要なすべての領域を何度も繰り返し走査する放医研で開発された照射法⁷⁾を行うことができる。これにより、呼吸性移動を伴う腫瘍を治療す

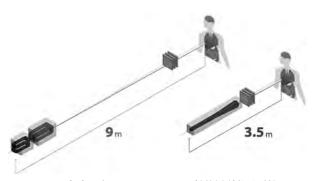


図5 高速3次元スキャニング照射装置(新旧比較)

る場合でも良好な線量分布を得られる。

照射するビームの位置はモニタで監視されており、フィードバック処理によって常に照射誤差を抑制するよう制御される。スタッフが待機する照射制御室のモニタには、ビーム照射位置がリアルタイムで表示され、安心して治療できる仕組みも備わっている。

なお、本照射装置は、従来9mだった照射位置までの距離を、陽子線装置並みの3.5mまで短縮できる新型の照射装置である。従来は2台の電磁石を使って直交する2方向に走査していたが、これを1台の電磁石で実現することで、発生磁場を効率化し大幅な距離短縮につなげる。本照射装置は、回転ガントリーの小型化にも大きく寄与している(図5)。

Ⅳ. 今後の展望

日本のみならず、世界中で重粒子線装置を導入する動きが広がっている。すでに韓国および台湾で2施設が建設中であり、米国や中国でも複数の施設建設計画が本格化している。これらの多くは HIMAC の経験を生かして国内メーカが対応することになると考える。施設数の増加は治療症例数の増加に直結するため、有効性の評価や治療ガイドラインの整備が加速し普及への好循環が期待される。今後重粒子線装置は一気に世界へ広がっていくであろう。

また、さらなる治療の高度化に向けた開発も進められていく。ビーム照射野の拡大により、より広い患部にも精度よく照射できるようにする試みや、線量率増大により、より少ない照射回数で治療する試み、CTやMRIを活用して患部位置を詳細に把握する試み、などが考えられる。これまで以上に適用できる部位が増え、重粒子線がん治療を受ける患者の割合自体が増えることが予想される。

さらに、放医研では、HIMACを建設した国内メーカが連携して、「量子メス」と呼ぶ高度化・超小型化した次世代の重粒子線がん治療装置の開発計画を進めている⁸⁾。すでに 2016 年 12 月 13 日に包括的協定が締結され、共同研究が開始されている。10 年後をめどに実用化する考えで、実現すれば既存の病院施設内(X 線治療室2室分相当など)に導入できるようになり、一層の普及が期待できる。

CT, MRI などの画像診断装置, リニアック, 陽子線が ん治療装置などの放射線治療装置をはじめ, 医療機器の 分野では海外メーカにシェアを譲る例が多い。重粒子線 がん治療装置は、日本が開発の主導権を握り、普及させ ていくことのできる数少ない有力な医療機器である。日 本から世界へ、重粒子線がん治療装置の普及に今後も積 極的に貢献していきたい。

- 参考資料 -

- 1) がんの統計<2017年版>. 公益財団法人がん研究振興財団, 2018, 135p., ISSN2433-3212.
- 2) Leith, J. T. et al. Heavy-Ion Radiobiology: Normal Tissue Studies. Advances in Radiation Biology. 10, 1983, P191-236.
- 3) 小野通隆 他. 重粒子線がん治療装置の実現に向けた最新技術. 東芝レビュー. 69, 11, 2014, P17-21.
- 4) 井関康 他. 重粒子線治療用照射システムの高効率・高精度 化と患者負担の軽減への取組み. 東芝レビュー. 68, 1, 2013, P16-19
- 5) 高山茂貴 他. 次世代回転ガントリー用超電導電磁石の磁場 設計. 第 14 回日本加速器学会年会プロシーディングス. 2017, P1235-1237.
- Mori, S. et al. Carbon-ion pencil beam scanning treatment with gated markerless tumor tracking: an analysis of positional accuracy. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 95, 2016, P258-266.
- 7) Furukawa, T. et al. Moving target irradiation with fast rescanning and gating in particle therapy. Medical Physics. 37, 9, 2010, P4874-4879.
- 8) 白井俊之. 量子メスの研究開発. 日本原子力学会誌. 60, 12, 2018, P15-19.

著者紹介

平田 寛(ひらた・ゆたか)

東芝エネルギーシステムズ 原子力事業部 (専門分野/関心分野)加速器・超伝導応用 システム技術, 放射線医療分野



萩原 剛 (はぎわら・つよし) 東芝エネルギーシステムズ 原子力事業部 (専門分野/関心分野)原子力プラント技術 /原子力技術の産業応用



長本義史 (ながもと・よしふみ) 東芝エネルギーシステムズ 原子力事業部 (専門分野/関心分野)超伝導応用

「あつまれ!げんしりょくむら 閉鎖に思う

フリージャーナリスト 井内 千穂

今年の原産年次大会の直前、4月8日に開設された日本原子力産業協会の次世代向けサイト「あつまれ! げんしりょくむら」に批判が集中し、ネット上で大炎上。4月12日にサイトが閉鎖され、同月25日には陳謝の記者会見が開かれた。事態に軽いショックを覚えつつ、考えさせられたことが二つある。

一つは、「原子力村」内の話に偏って聴いていると感覚が麻痺するということ。今回のサイト開設から 閉鎖までわずか5日間だが、その間に盛大に開催されていた原産年次大会では、海外からの有識者も含 めて闊達なプレゼンやパネルディスカッションが繰り広げられ、目からウロコの見識に刺激を受ける部 分もあった。たまたま会場内でお会いした当該サイトの担当者とも挨拶を交わし、早速、サイトを閲覧 した私は、若者向けの軽妙なタッチが面白いとさえ感じた。しかし、それは世間の人々が「ふざけすぎ」 「被災者への配慮が足りない」と不快に思う感覚から、いつの間にかズレてしまっていたのだ。

もう一つは、顔が見えない怖さである。誰が批判しているのか、ネット上ではわからない。匿名の連鎖で炎上し、早々にネットメディアに書きたてられ、やがて、新聞・TVでも取り上げられる。若い世代に少しでも関心を持ってもらおうとしたサイト担当者の人柄や真面目な意図など関係ない。批判者たちは匿名のまま、とにかく悪目立ちした発信内容が消滅する。

内輪の発信にとどまっていれば攻撃はされない。また、地味な情報発信なら攻撃されにくいが、相手にもされないだろう。もしくは「情報発信が足りない」という批判があるかもしれない。真面目な発信を 地道に継続しながら、異論とも直接対話できる場を作るにはどうすればよいのだろうか。

Column

刹那的なマシンへ

本誌 佐田 務

科学技術は私たちに、多くの福音をもたらしてくれた。室内ではスイッチをひねればお湯が出るし、温度調節も思いのままだ。餓死や伝染病で死ぬ可能性も、この日本では激減した。けれども、この科学技術は私たちに、とても洗練された形で、価値観の変容をそれとなく迫っている。その代表が、高速や効率、正確だ。

例えば JR は「のぞみ」から「リニア」へと高速化を続け、携帯は高速化と大容量化を驚異的なスピードで進めている。けれどもそうした技術は、私たちの暮らしにどのような影響をもたらすかについて検証が十分なされたうえで、進められているわけでもない。それは単に、技術と経済とが結びついた所産であり、その連結による進歩はきわめてアナーキーに、そして永続的に進められている。

こうした技術の進歩は、私たちにも同様のことを強要しはじめている。高速や効率といった要素は今や、人生の中でも重要な指針や価値となり始めた。企業の中で個人のふるまいは、それらが重要な要素として査定され、学校ではそのための訓練が途方もない時間をかけて行われる。そこでの私たちは、めまぐるしく変わる環境の中での情報をいかに速く、正確に、効率よくとらえて対応するかを余儀なくされる。回路やマシンに成り果てている部分が増えている。

効率や高速はもともとは、労働にともなう苦痛の時間を短縮して、その残った時間をより有意義に、 豊かに暮らすためのもののはずだった。けれども今の世の中ではそうした効率、高速の文化は、その 残った時間にも浸透し、豊かさの意味がいつのまにか、換骨奪胎されはじめようとしている。

そして原子力もまた、そんな科学技術の有力なものの一つとして成立している。

雲行きの怪しいモホフツェ原子力発電所新規原子炉の運転開始 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。現在、スロバキアでは、2019年6月より運転が開始されるはずであった、モホフツェ原子力発電所の3号機・4号機の原子炉の運転開始について、11度目の延期が決まり話題となっています。

遡ること 1986 年, チェコスロバキアが分裂する以前から 3 号機・4 号機の着工は開始されています。ビロード離婚前年の 1992 年~2009 年に至るまで建設は一時中止され, 建設の再開が発表された 2008 年の時点では, 2012 年~2013 年に営業運転が開始される予定でした。しかし, 2011 年 3 月 11 日の福島第一原子力発電所事故を受けて, EU の指示によりストレステストの内容が大幅改定され, 施設の再整備や建設期間の延長が必要になり, 2014 年~2015 年へ延期されています。その後も, モホフツェ 3 号機・4 号機の運転は, 当初 66%の株式を所有していたイタリアのエネル社による株式の売却騒動や, 建設費用の追加により延期を重ねています。地元紙である Specter 紙や Pravda 紙では, 2018 年 5 月の時点で3 号機は 97%, 4 号機は 85.1%の建設が完成し, 2019 年の運転開始に向けて準備が進んでいると報道されていました。

ところが 2019 年 4 月に、水圧試験が見積もりよりも長くなった事を理由に、またしても、運転の延期が発表されました。地元ではスロバキアの観光名所であるブラチスラバ城が 1800 年に焼失した後、修復に 200 年もの年月を要した事になぞらえて、あと 100 年はできないのではないかと皮肉られています。また、かねてより反原発国として、スロバキアを含む隣国の原子炉の増設に対し提訴をしている、オーストリア首相のセバスティアン・クルツ氏が、今年 5 月 6 日にスロバキア首都のピーターペルグリーニと電話会談をしており、新規原子炉が近々日の目を見れるかは、かなり怪しげです。



学問のサラダボウル

京都女子高等学校3年生 鳥居 千智

なぜ大学受験において理系文系という分け方をするのか疑問に思う。私は高校一年生の頃、心理学や 人間科学系と物理の基礎研究両方に進みたかったので進路を決めるにあたりとても悩んだからだ。選択 科目だけにせず、どうして文理という枠組みまで作るのか。心理学と物理学も「仕組みの追求」では似た ようなものではないのか。

教育、法律、工学というように、ある一つの学問分野だけを学べばいいのではないという考えが広がり始めていて、大学などもその考えに基づいて動き始めている。大学は本来学びたい人が好きなことを追究するためにあるのでとても良いことだと思う。また、様々な領域のことを少しずつ知っていけば、自分がもともと専門にしていたもの以外のものでも興味が出てくるものができるだろう。そうすることで物事を多角的な視点から見ることができ、なにより違う立場の人を理解しやすくなる。この学問の視点から見ると一見素晴らしいが、ある別の学問から見ると問題あり、という発明や政策などはきっとたくさんあるはずだ。

このように、大学に限らず一見関係ないように見られている分野同士をいっぺんに追究できるシステムをもっと作るべきであると思う。そうすれば互いが互いを理解しやすい社会になっていくだろう。

避難指示という「自由の制限」を考える

フリーライター 服部 美咲

「憲法とは国家権力を制限し、国民を守るために生まれたものである」

「日本国憲法の問題点」小室直樹

国家は権力を持つ。権力とは、他者を強制的に服従させる力のことである。国家権力は巨大な暴力である。国民は憲法でこれを縛っている。国家が憲法を遵守しない状態は、猛獣の鎖が弛んだ事態に似る。社会学者の小室直樹は「日本国憲法の問題点といえば、憲法違反が公然となされていて、これに誰も気付かず、論じられてもいないことである」と憂慮した。

福島県において、日本国憲法が違反されており、それが十分に認識されていないことを懸念する。日本国憲法第22条で、国民の居住の自由は保障されている。東京電力福島第一原発事故の際、住民の生命や健康を守るため、緊急時に出された避難指示は、国家権力による居住の自由の制限を意味する。よって最小限に留められなければならない。しかし、4月に一部避難指示が解除された大熊町では、ICRPの勧告に基づく避難指示解除の目安20mSv/年どころか、長期目標とされる1mSv/年を下回る場所すらあった。これまで避難指示が解除された自治体でも同様だ。国民の自由は、本当に必要以上に制限されてはいなかったか。

長期間の避難指示のために、家族や仕事などの事情から、制限が解除されても故郷に帰る選択ができなくなった住民がいる。長期にわたる避難生活は人々の心身を蝕んだ。既に経過した時間は還らない。そして今も、一部地域で避難指示が続く。「避難指示は国家権力による自由の制限である」ということを、改めて考えたい。

Column

貴重なデータはその時しか残せない

NPO あいんしゅたいん 坂東 昌子

TEPCO 事故後、いまだに低線量放射線の評価は極端に分かれている。科学者自身が異なった意見を 持ち続けているのは、異分野科学者間の交流が希薄だからだ、価値観や立場は違っても、せめて「わかっ たこと」と「未解決なこと」を明確にする合意形成が必要だし科学者の責任でもあるという思いから、科 学者グループを目指して取り組んだ。「市民と科学者の共通の場」CAS ネットは、そんな思いを背景に、 市民と科学者が共に勉強し議論する場を目指して作られた。市民や女性研究者の存在が大切だというこ とも分かってきたからだ。CAS ネットの特徴は、科学者が共通の場で議論できることである。とはい え、いかにして意見や立場の異なる人々が感情的にならず議論を展開すべきか試行錯誤の段階だった。 この時、K さんが「福島の野生ニホンザルに放射性物質の影響か」という記事(2018 年 11 月)が出ていま す。この検討から始めては」と提案された。福本学・東北大名誉教授(放射線病理学)らの調査報告だ。 線量評価、野生生物の食餌採取など様々な要因を考慮して検討し、ヒトへの影響について推察するとい う道筋は、今後も続けて検討すべき課題である。そういう思いで勉強を始めた。その中で、いろいろ疑 問も出てきて、直接先生にお話を伺いたいという話になった。「専門の異なる研究者も、市民も加わって の勉強会、とても大切ですね。」と快諾いただいた。結論には賛否両論あるが、このプロジェクトを続け ていくことは、今やるべき貴重な研究である。先生はトロトラストによる放射線の晩発障害の研究経験 から、資料を保存しておくことの重要性を痛感されており、動物の冷凍保存が必要不可欠なことを誰よ りもご存じだった。ところが、定年となり、研究が引き継がれる保証もなく、せっかく冷凍保存してき た資料を維持できないという。後々,疑問が出ても,保存されていなければ調べようがない。将来に禍 根を残すとずっと気になっている。

令和時代のエネルギー問題

東京学芸大学附属 国際中等教育学校6年

マイケル 瑛美

新しい令和という時代になり、改めて平成の30年間を振り返ると日本は多くの災害を経験した。私の記憶に最も残っているのは、東日本大震災だ。連日テレビに津波や被災地の状況が映し出された。福島第一原子力発電所事故発生後は、津波から、放射線に関する報道へと切り替わっていった。当時、メディアの報道では原発は危険だという印象がとても強かった。実際、オーストラリアに住む曾祖父から、オーストラリアに引越さないかという誘いを受けたほど、世界中から、日本は汚染されているというレッテルが張られていたように思う。けれども、情報を得るために見ていたテレビ、曾祖父と連絡を取るために用いていた電話も、福島の原子力発電所からの電力によってまかなわれていたものだった。メディアによって放射性物質を生み出す原子力発電は怖いというイメージが植え付けられたわけだが、そのイメージに異なる視点を与えてくれたのが、昨年受講した物理の授業と、福島スタディーツアーへの参加だ。物理の授業では、放射性線は日常生活の中で浴びていることを学んだ。福島スタディーツアーにおいては、県外の私たちがもつ福島に対する負のイメージが復興を遅らせている一つの要因となっていることを学んだ。確かに、一歩間違えれば、原子力発電が人間や自然環境の脅威になる可能性はあるが、原子力の恩恵を受けていることも事実だ。専門家でなくとも、多角的に意見を取り入れることが令和のエネルギー問題を考えるうえで大切だと思う。



凍天

東洋大学社会学部 渡辺 真由

とある授業で、岩手県釜石市にある旅館と工場のドキュメンタリー番組を鑑賞した。震災直後から数年は関心が高く、ボランティアや観光客も多く訪れた。しかし8年経った現在、被災地に対する関心は薄れ客足は遠のいている。いわゆる「復興特需」だったのだ。それに加えて、補助金の返済猶予が切れようとしている。震災から時間が経つほど「震災」「復興特需」に依存していられない。このように長年地元に根ざしてきた中小企業が、震災後復活しても資金が続かず解散する現実が数多くある。

「凍天」という福島名物はご存じだろうか?福島名産の「凍み餅」をドーナツ生地で包み、油で揚げた菓子だ。私の地元にも店舗があり、学校帰りに寄り道してよく食べていた。凍天は2011年2月にメディアで紹介され話題となった。その影響を受け、事業を拡大したが直後に震災が発生。そして工場があった南相馬市は避難地域に指定され、材料も全て産業廃棄物となってしまった。風評被害を受け満足のいく保証もない中、それでも復活させようと新工場を再建し、負債を背負いながらも経営してきたが、今年4月、断腸の思いで倒産手続きを開始した。実損額8億円に対し、東京電力からの和解案はわずか「1,600万円」だったという。私も友人も皆、驚きを隠せなかった。震災から復活した名物として存在していた凍天がこんな形で食べられなくなってしまったなんて、一体誰が想像できただろうか?悲しい結果になる前に、こんな現実があることすら知らなかった。

この8年間、会社が福島にかけた思いと覚悟、未来への希望が、クラウドファンディングのページに 掲載されている社長と常務の談話に詰まっている。明るい「復興」の話題の裏に、まだ戦っている人達が いることを忘れてはいけない。

電子顕微鏡の現状と将来展望

第 1 回 走査透過電子顕微鏡および電子エネルギー損失分光 法による材料評価

物質・材料研究機構 木本 浩司

走査透過電子顕微鏡 (Scanning Transmission Electron Microscopy; STEM) と電子エネルギー損失分光法 (Electron Energy-Loss Spectroscopy; EELS) を組み合わせることにより、局所領域で結晶構造解析や元素分析が可能になる。STEM では環状暗視野像や環状明視野像を用いて、結晶構造を直接観察できる。単原子を可視化する感度を持ち、収差補正装置などを用いれば空間分解能は 50 pm 以下に達する。EELS では内殻励起スペクトルを利用して、元素毎に原子列を可視化することができる。本稿では計測法の概要と最近の装置の進歩、およびいくつかの観察例を示す。

KEYWORDS: Material Characterization, Scanning Transmission Electron Microscopy, Electron Energy-Loss Spectroscopy, Crystal Structure, Elemental Analysis.

I. 緒言

構造材料をはじめとした先端材料開発では、マクロな物性を左右するミクロな構造を評価することが重要である。透過電子顕微鏡法は微細構造の評価手法として、材料研究に広く用いられている。その一つの手法である走査透過電子顕微鏡法(Scanning Transmission Electron Microscopy; STEM)¹⁾では、収束した電子プローブを試料上で走査し、透過した電子を用いて微細構造を観察する。図1に装置の模式図と計測例を示す。透過電子を様々な検出器で計測することにより、多彩な STEM 像が得られることに加え、電子エネルギー損失分光法(Electron Energy-Loss Spectroscopy; EELS)²⁾と組み合わせた計測も可能である。

STEM 像としては環状暗視野 (Annular Dark-Field; ADF)像や環状明視野 (Annular Bright-Field; ABF)像が観察される 1,3 。 ADF 像では原子番号の 1,5 ~2乗に相当する強度で原子列を輝点として観察でき,投影した結晶構造を直接観察できる。ADF 像では軽元素の原子配列を観察しにくい場合があるが,その場合 ABF 像で原子列を暗点として観察できる。例えば図 1 bの 1 BaTiO 3 の ADF 像では Ba と Ti のみが輝点として観察されてい

Material characterization using scanning transmission electron microscopy and electron energy-loss spectroscopy: Koji Kimoto. (2019年5月14日 受理)

るが、ABF 像では酸素原子列も観察できている。 EELS では、物質との相互作用でエネルギーを失

EELSでは、物質との相互作用でエネルギーを失った 透過電子によるエネルギー損失スペクトルを計測する。

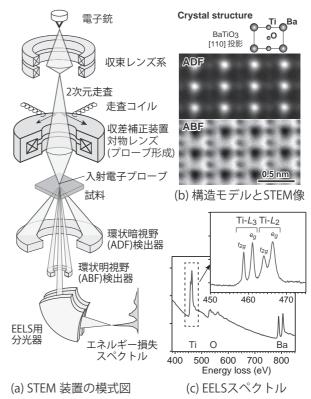


図1 STEM および EELS による計測の模式図と計測

例えば試料中の原子の内殻電子を励起すると、元素固有のピークが観察され、そのピーク強度から元素分析が可能である。スペクトルにおけるエネルギー損失値は、内殻準位から遷移先の空準位までのエネルギー差であり、化学結合状態の違いによる違いがスペクトルの変化として現れる。例えば、図1cのスペクトルではTi,O,Baの元素分析に加え、TiのL殻励起スペクトルの微細構造(4つに分裂)から、Tiが4価で8面体配位していることがわかる。

以下本稿では STEM や EELS の最近の装置開発を簡単に紹介し、具体的な計測例をいくつか紹介したい。



II. 最近の STEM および EELS 装置の 進歩

1. 収差補正装置や新しい STEM 検出器

STEM の空間分解能は、試料上に収束したプローブの大きさで制限される。最小プローブ径は加速電圧や電子銃の輝度、プローブ形成に用いる対物レンズの収差によって決まる。加速電圧を高くすることで波長が短くなり(例えば加速電圧 $300\,\mathrm{kV}$ で $2\,\mathrm{lf}$ ピコメートル、lf $10\,\mathrm{lf}$ m で単位は pm)、電子銃の輝度が高くなったこととで計測に必要なプローブ電流(例えば $10\,\mathrm{pA}$)でも原子オーダーに収束できる。従来は対物レンズの球面収差により最小プローブ径は $100\,\mathrm{pm}$ 程度に制限されていた。収差補正装置により大きな収束角が使えるようになり、現在空間分解能は $50\,\mathrm{pm}$ 以下に達している。

STEMでは、電子回折図形の一部の強度を環状あるいは円状に検出することが多い。近年、検出器を4つ以上の領域に分割したものや⁴、画像検出器で回折図形をそのまま取得する手法が用いられるようになってきた⁵⁾。後者の手法は、入射プローブの2次元位置毎に回折図形の2次元情報を取得し、最終的に4次元データが取得されることから、4D-STEMとも呼ばれる。近年読み出し速度が高速化された画像検出装置が開発されており、4D-STEMは今後普及していくと考えられる。

2. モノクロメーター

EELS で化学結合状態を議論するためには、スペクトルの微細構造を高いエネルギー分解能で観察する必要がある。エネルギー分解能は、主に電子銃のエネルギー広がりによって決まっており、熱電子放出型電子銃では1 eV程度、電界放出型電子銃では0.4eV程度である。近年、電子顕微鏡用のモノクロメーターが実用化され、0.1 eV以下のエネルギー分解能が実用的になってきた⁶⁾。

EELS においてスペクトルの微細構造(Energy Loss Near Edge Structure: ELNES)は、X 線吸収分光法における XANES(X-ray Absorption Near Edge Structure)

と同一である。モノクロメーターにより改善された EELS のエネルギー分解能は、放射光施設などで計測された XANES のエネルギー分解能と同レベルになって きており、STEM-EELS の組み合わせは、実験室系での 局所領域の化学結合状態計測の手法の一つとして有効である。

Ⅲ. STEM による結晶構造観察

結晶構造解析として最も一般的に用いられている粉末 X 線回折では平均構造を高い精度で決定できる。他方, STEM の ADF 像や ABF 像を使った結晶構造解析も広く行われており,局所領域の原子配列や異種材料界面の評価のほか¹⁾,微量添加元素の検出などにも用いられている⁷⁾。特に ADF 像は,上述のように原子番号の違いが輝度の違いとして現れやすく,元素識別能が高い。さらに,観察条件(対物レンズの焦点や観察試料の厚さ)にあまり影響されずに結晶構造を投影した原子配列が観察できるという点で,構造直視性に優れているとも言える。試料中での電子の散乱・回折は,原子が作る静電ポテンシャル中の波動関数の伝搬としてシミュレーションすることが可能で,実験結果と定量的に比較できる。

図2に観察例として、単層グラフェンの ADF 像を示す (加速電圧 80 kV)。 ADF 像の強度は、入射電子に対する検出割合として輝度表示している。 ADF 像の強度は検出角範囲 (本実験では 50~200 mrad) に依存するが、入射した電子のうち平均 0.05%程度が検出されている。実験結果に見られるノイズは、有限の電子を計測しているための量子ノイズである。シミュレーションでは試料上の光源径(電子銃輝度に依存)と対物レンズの収差を考慮した。実験とシミュレーションとは量子ノイズレベルで定量的に一致している。 ADF 像の強度から、単層 BNシートにドープされた C の検出なども報告がある8)。

ADF 像の輝点の位置は原子列の位置にほぼ一致し、輝点の位置は現在ではピコメートルオーダーで計測できる。原子半径は元素によって50~120pm と変化するので、置換原子による結晶構造の変化を捉えられる。原子変位の計測の詳細に関しては既報を参照されたい⁹⁾。

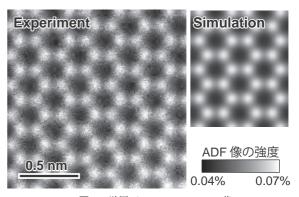
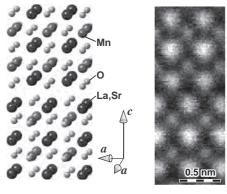


図 2 単層グラフェンの ADF 像 (装置 Thermo Fischer Scientific, Titan³)

Ⅳ. EELS による元素分析

入射プローブを走査しながら、各位置のスペクトルを取得する手法を spectrum imaging と呼ぶ。原子オーダーまで収束したプローブを用い、内殻励起スペクトルを捉えることにより、元素毎に原子列を可視化できる¹⁰⁾。入射電子は結晶中では原子列に沿って伝搬(チャンネリング)するため、試料中で入射プローブがぼけてしまうことは比較的押さえられる。しかし原子列を可視化するためには、それだけでは不十分である。原子と入射電子との相互作用は原子位置に局在しない場合が有り、特にエネルギー損失量が小さな非弾性散乱過程はオングストロームオーダーで非局在化する。したがってどの内殻励起過程で元素マッピングするかが重要である³⁾。

図 3 に (La,Sr) MnO_3 を観察した例を示す。ADF 像では La,Sr,Mn の原子列が輝点として観察できるが、元素の識別は難しい。次に STEM-EELS によって、La-N 殻および M 殻、Mn-L 殻、O-K 殻を励起した信号で元素マッピングを行った。元素毎に輝点として原子配列を確認できる。ADF 像では酸素の配列は見えないが、EELSでは酸素の配列を確認できる。ここで注意すべき点は La O N 殻励起と M 殻励起の違いで、前者は原子列が可



結晶構造モデル

ADF 像



La-N45

O-K

Mn-L3,2

La-M5,4

図3 STEM-EELS により(La,Sr)MnO₃試料を元素マッピング した例(装置 Hitachi High-Technologies, HD-2300C)

元素マッピング例

視化できていない。入射プローブ径(0.11nm)やその伝搬は同じであるにもかかわらず前者で可視化できないのは、N殻励起(エネルギー損失値は160eV)の散乱過程が非局在化しているためである。

V. 結言

STEM や EELS を用いた材料評価手法の概要を述べた。最後に今後の展望について簡単に触れよう。

上述の 4D-STEM や STEM-EELS では多くの計測点から回折図形やスペクトルなどの多チャンネルの情報を取得している。これらのデータに多変量解析をはじめとした様々なデータ解析技術を適用する研究が最近盛んに行われている。例えばノイズに埋もれた微弱な信号を抽出するなど、これまでできなかった計測が可能になってきた。データ科学の最近の進歩は、電子顕微鏡が生み出す一種のビッグデーターから有効な知見を抽出することを可能とし、新しい手法を生み出すことが期待される。物質・材料研究機構では、電子顕微鏡をはじめとした先端計測技術と情報処理技術の融合を「計測インフォマティクス」と命名し、今後の計測技術の目指すべき方向と位置づけ研究している。計測インフォマティクスがさらなる材料イノベーションに寄与しうるよう、材料研究者等との連係を今後も進めていきたい。

本研究の一部は、新学術領域複合アニオン、拠点形成型元素戦略(東京工業大学)、GaN 評価基盤領域および文部科学省微細構造解析プラットフォーム事業の一環として行われた。

- 参考文献 -

- 1) S. J. Pennycook, P. D. Nellist, "Scanning transmission electron microscopy," Springer, ISBN 978-1-4419-7199-9 (2011).
- 2) R. F. Egerton, "Electron Energy-Loss Spectroscopy in the Electron Microscope, 3rd ed.," Plenum Press, ISBN 978-1-4419-9582-7 (2011).
- N. Tanaka, "Scanning Transmission Electron Microscopy of Nanomaterials," Imperial College Press, ISBN 978-1-84816-789-6 (2015).
- 4) N. Shibata *et al.*, "Differential phase-contrast microscopy at atomic resolution," *Nature Physics*, 8 (2012) pp. 611-615, http://dx.doi.org/10.1038/nphys2337.
- 5) K. Kimoto, K. Ishizuka, "Spatially resolved diffractometry with atomic-column resolution," *Ultramicrosc.*, 111 (2011) pp. 1111-1116, http://dx.doi.org/10.1016/j.ultramic.2011.01. 029
- 6) K. Kimoto, "Practical aspects of monochromators developed for transmission electron microscopy," *Microscopy*, 63 (2014) pp. 337–344, http://dx.doi.org/10.1093/jmicro/ dfu027
- 7) 木本浩司, "走査透過電子顕微鏡像観察による結晶構造解析," 日本結晶学会誌, 61 (2019) pp. 15, [in Japanese], http://doi.org/10.5940/jcrsj.61.15.

- 8) O. L. Krivanek et al., "Atom-by-atom structural and chemical analysis by annular dark- field electron microscopy," Nature, 464 (2010) pp. 571, http://dx.doi.org/ 10.1038/nature08879.
- 9) 木本浩司, "高精度化した STEM 像による結晶構造の解析," 顕微鏡, 54 (2019) pp. 3-7, [in Japanese].
- 10) K. Kimoto et al., "Element-selective imaging of atomic columns in a crystal using STEM and EELS," Nature, 450 (2007) pp. 702-704, http://dx.doi.org/10.1038/nature06352.





木本浩司 (きもと・こうじ) 物質・材料研究機構

(専門分野/関心分野)透過電子顕微鏡を用 いた材料評価手法の開発と、各種材料への 応用

From Editors 編集委員会からのお知らせ

- 最近の編集委員会の話題より -(7月2日第1回学会誌編集幹事会)

- ・新年度にあたり、小山委員長、特別委員、編集委員、諮問委員から自己紹 介があった。
- ・2021年3月号で「福島原発事故から10年」をテーマに特集号を企画して おり、五つの事故調報告のフォローと総括や、1F 廃炉、福島の復興など をテーマとする企画の説明が編集長からあった。また、委員長、特別委 員の理事には、学会誌の特集号企画と理事会との連携・橋渡し役をお願 いしたいという要望が出た。
- ・インタビュー、座談会企画の進捗状況の報告があった。

- ・アンケート回答結果を検討した。学会誌 PDF 化については再検討する こととした。
- ・2編の記事については掲載の適格性について検討した。
- ・「最先端の研究開発シリーズ」について、JAEA 担当委員から進捗状況の 報告があった。
- ・「連載講座」の執筆が前回、見合わせとなっている各部会・連絡会へ再度、 執筆を打診することとした
- ・巻頭言, 時論, その他の記事企画の進捗状況を確認し, 掲載予定について 検討した。

編集委員会連絡先≪hensyu@aesj.or.jp≫

サイエンスよみもの

原子核の「かたち」から核図表を見る

筑波大学 中務 孝, 東京工業大学 江幡 修一郎, 九州大学 鷲山 広平

原子核はさまざまな「かたち」を取ることは良く知られているが、実験データが取得できないような安定線から遠く離れた原子核は、どのような「かたち」をしているのだろうか。また、「かたち」が定まらないような原子核もあるのだろうか。近年のエネルギー密度汎関数法の発展により、質量数の小さな軽い原子核から超重元素の原子核、さらには中性子星のようなマクロな核物質までを、一つのエネルギー密度汎関数から出発する数値計算で記述することが可能になった。非制限計算から予言される、さまざまな原子核の「かたち」について報告する。長寿命核分裂生成物について、その長い半減期の一因は「かたちの柔らかさ」にあること、同じく長寿命をもつマイナー・アクチノイド核種とは性質が大きく異なっていることを示す。

KEYWORDS: nuclear deformation, spontaneous symmetry breaking, nuclear chart, energy density functional approach, computational nuclear data

I. はじめに

原子核は、核子(陽子と中性子)が集まって結合したフェルミ粒子多体系であるが、図1左のように、陽子と中性子が結合して静止しているという描像は正しくない。このような誤ったイメージは、原子核を、核子が周期的に並んだ結晶のように記述する間違ったモデルを生み出してしまうことがある。原子核や核物質は絶対零度でも結晶化せず、液体ヘリウムのような量子流体として存在していると考えるべきである。

量子力学の不確定性原理によれば、原子核の半径を R とすれば、原子核中の核子は、プランク定数を h として、 $\frac{h}{R}$ 程度の運動量を持って運動しているはずであり、この量子的な零点運動エネルギーは少なくとも MeV (百万電子ボルト) 程度の大きさになる。さらに、同種粒子間にはパウリの排他原理が働くことから、通常の原子核の飽和密度では、フェルミ面での運動エネルギーは、およそ 40~MeV 程度、速度は光速の 30~% 程度であると予想することができる。すなわち、核子は核内で高速で運動しているはずで、核内で静止して結合しているイメージ(図 1~E) は成立しない。

Nuclear chart of deformation: Takashi Nakatsukasa, Shuichiro Ebata, Kouhei Washiyama.

(2019年4月23日 受理)





図1 原子核の代表的な古典的イメージ

動き回る核子のイメージは、密度分布として図1右のような球形分布を我々に予想させる。運動エネルギーを最小にするには、等方的な運動量分布(フェルミ球)が好まれるからである。一方、原子核の質量(束縛エネルギー)が、ベーテ・ワイゼッカー質量公式に代表される古典的な液滴として非常に良く記述できることからも、図1右のような丸い密度分布が想像できるだろう。液滴には表面張力があるため、表面積を最小にしようと働き、球形がエネルギー的に最も好まれるはずである。では、丸くない、変形した原子核はどのようにして出現するのであろうか。

Ⅱ. 原子核の変形の起源

原子核の変形は古くから議論されているが、その起源として、「殻効果(shell effect)」と「対称性の自発的破れ (spontaneous breaking of symmetry)」を紹介する。こ

れら二つは別のものというよりも、同じものを異なる見 方で見たものと考えた方が良い。

1. 殼効果

液滴模型と変形殻模型(ニルソン模型)は、原子核を記述する代表的な現象論的模型である。前者は核質量などのバルクな性質を記述する古典的模型であり、後者は低励起スペクトルの記述に威力を発揮する一粒子運動に基づく量子力学的模型である。これらを組み合わせることで、Strutinsky は、原子核の質量に加えて、「かたち」を計算する簡便な手法、いわゆる Strutinsky 法 $^{1)}$ を提唱した。この手法では、図 2 左に示したような、ニルソン模型などの殻模型における一粒子準位 2 を下から詰めていき、目的の陽子・中性子数 2 (2 2

$$E_{\text{corr}} = \sum_{p=1}^{Z} \epsilon_p + \sum_{n=1}^{N} \epsilon_n - \tilde{E}. \# (1)$$

この殻補正エネルギーを液滴模型のエネルギーに加えることで、原子核の全エネルギー $E_{\text{tot}} = E_{\text{LDM}} + E_{\text{corr}}$ を計算する。液滴模型のエネルギー E_{LDM} や一粒子準位は、原子核の「かたち」に依存して変化するため、全エネルギー E_{tot} が最小になる「かたち」を探すことで、原子核の形状を決定することができる。

例えば、フェルミ準位のすぐ上にギャップがある場合(図2の破線矢印)、(1)式右辺第一項と第二項の和が、 \tilde{E} に比べて小さくなり、 E_{corr} は負である(「かたち」の安定化)。一方、フェルミ準位近辺にギャップがなく準位密度が高い場合(図2の点線矢印)には、 E_{corr} は正(「かたち」の不安定化)。これから、原子核はフェルミ準位近辺の準位密度をなるべく下げるような「かたち」を選ぶことが予想できる。

この Strutinsky 法は、ニルソン模型のような現象論的 ポテンシャルを用いるため、中性子ドリップライン¹近

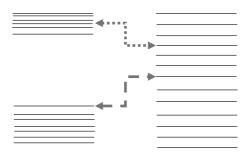


図2 左が殻模型で計算される一粒子準位。右が一様な準位密度をもつ仮想的な原子核の一粒子準位。フェルミ準位が破線(点線)の場合,右の仮想的な系よりも束縛エネルギーが小さい(大きい)

傍の原子核のように、弱く束縛した中性子の広がりによってポテンシャル形状が大きく変化したりすると、その信頼性が落ちると考えられる。しかし、安定核近傍の原子核では、実験で得られた一粒子準位を再現するようにポテンシャルが作られているため、信頼性は高く、実験値を良く再現する。その計算の簡便性もあり、現代でも、FRDM²⁾、KTUY³⁾といった質量公式にこのアイデアは生かされている。

Strutinsky 法の観点で、原子核の変形の起源を考えてみよう。液滴模型のエネルギー E_{LDM} は、前述したように、表面張力を最小にするように、常に球形を好む。したがって、全エネルギー $E_{tot} = E_{LDM} + E_{corr}$ が球形からずれたところに最小値をもつということは、殻補正エネルギー E_{corr} が原子核を変形させていることを意味する。一粒子準位密度に濃淡が現れる事、あるいはそれによってエネルギーが変化することを殻効果と呼ぶが、(1)式の E_{corr} はまさに殻効果の現れである。殻効果は量子力学で初めて現れることから、原子核の変形は量子力学的効果であると言われる。

2. 対称性の自発的破れ

前述のStrutinskyのアイデアは、一言でいってしまえば、液滴模型と殻模型の融合である。別の観点からこのような融合を考えた原子核の有名な模型として、Bohrと Mottelson の統一模型(あるいは集団模型)⁴⁾がある。

統一模型では、原子核に集団自由度の「かたち」の自由度(β)を導入し、その「かたち」で決まるポテンシャル中を運動する核子の自由度(x)を用いて、ハミルトニアンを以下のように書く。

$$H = H_{\text{coll}}(\beta) + H_{\text{sp}}(x;\beta)$$
. # (2)

ここで、 $H_{\text{coll}}(\beta) = T_{\text{coll}}(\beta) + V_{\text{coll}}(\beta)$ は、原子核のかたちの振動運動を記述する集団ハミルトニアンであり、運動エネルギー項は、ここでは簡単に $T_{\text{coll}}(\beta) = -(B/2)\partial^2/\partial\beta^2$ と仮定する。 $H_{\text{sp}}(x;\beta)$ は前述の変形殻模型のハミルトニアンだと考えてよい。

 $V_{\text{coll}}(\beta)$ や $H_{\text{sp}}(x;\beta)$ のそれぞれが球形 $(\beta=0)$ を好む場合であっても、(2)式において核子自由度 x との結合効果を β に繰り込むと、 $\beta\neq0$ に最小値を産み出すことがある。これが統一模型での変形のメカニズムである。集団 運動が核子の一粒子運動よりも十分に遅く、断熱近似を 用いて考えることにすると、まず、 β を固定して自由度 x に関するシュレディンガー方程式

$$H_{\rm sp}(\beta, x) |\phi_n(\beta)\rangle = E_n(\beta) |\phi_n(\beta)\rangle, \# (3)$$

を解く。得られた断熱シート $\{|\phi_n(\beta)\rangle\}$ のなかで一番エネルギーの低い状態に系があるとして,集団自由度 β に対する有効ポテンシャル $V_{\text{eff}}(\beta)$ を書くことができる。詳細は文献 5)を参照してもらうことにして,結果だけ書

i 「中性子ドリップライン」中性子がそれ以上結合しない核種が作る、核図表上の右端の限界線。

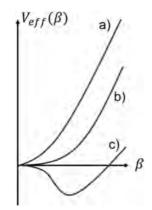


図3 有効ポテンシャルエネルギーの模式図

くと,

$$V_{\text{eff}}(\beta) = V_{\text{coll}}(\beta) + E_0(\beta) + \Phi_0(\beta)$$
, # (4)

$$\Phi_{0}(\beta) = \frac{1}{2} B \sum_{n \neq 0} \left| \frac{\langle \phi_{n}(\beta) \mid \hat{0}_{\beta} H_{\mathrm{sp}}(\beta) \mid \phi_{0}(\beta) \rangle}{E_{n}(\beta) - E_{0}(\beta)} \right|^{2}, \# (5)$$

となり、断熱シートの基底・励起状態間のエネルギー差が小さくなると、 $\Phi_0(\beta)$ は、正の値で大きくなる。つまり、例え、(4)式右辺のはじめの二項が図 3a)のような状況であっても、 $\beta=0$ において断熱基底状態に近似的な縮退が生じると、そこではエネルギー的に損をするので、 $\beta \neq 0$ の方へポテンシャルの最小値が移動し、図 3c)のようになる。一般に、対称性の高い状態は準位縮退が起きやすいので、(5)式は対称性を破るヤン・テラー効果の起源になっていると言えるだろう。

この見方では、基底状態と励起状態の近似的な縮退が原子核の変形の起源となる。この時、集団自由度と核子自由度の間に結合があること、すなわち $H_{\rm sp}(x;\beta)$ に β 依存性があることがミソである。これがないと、(5)式から $\Phi_{\rm o}(\beta)$ =0 が帰結され、対称性の破れは起こらない。殻効果としての Strutinsky 法の立場を振り返ってみると、魔法数から離れた陽子・中性子数をもつ原子核は、近似的なエネルギー縮退が起きるため、「殻効果」と「対称性の自発的破れ」の見方は矛盾していないことが分かる。

Ⅲ.エネルギー密度汎関数法

前述の変形のメカニズムを内包した、より微視的な理論アプローチとして、エネルギー密度汎関数法(energy density functional method)がある。軽い原子核から重い原子核まで、原子核の質量を前述の質量公式並みに再現することができ、その意味で、液滴模型と殼効果が内包されている。原子核の「かたち」についても予言能力があり、Strutinsky 法で用いた変形殻模型のポテンシャルが核子密度分布に応じて自動的に求められるため、ドリップラインに近い原子核に対しても予言能力が高いと考えられる。

次に述べるコーン・シャムの方法に従うと、平均場理

論の式とほぼ同じ方程式に帰着するため、平均場模型という呼び方の方が馴染み深いかもしれない。有効相互作用として、Skyrme 相互作用、Gogny 相互作用ⁱⁱ などが知られているが、この相互作用に密度依存性があることが重要である。状態依存性のない相互作用を用いた平均場計算では、核内核子の有効質量を非現実的に小さくしない限り、原子核の飽和性を再現することができない⁶⁾。密度依存ハートレー・フォック(DDHF)とも呼ばれる。エネルギー密度汎関数法では、一般に、相互作用の形に書けない密度汎関数も可能である。

理論を以下に簡単に紹介するが、詳細は文献 6)を参考にして欲しい。

1. コーン・シャム(Kohn-Sham)方程式

ホッヘンバーグ・コーン (Hohenberg-Kohn) の定理が密度汎関数理論の原理を保証するものであるが、この定理によれば、系の全エネルギー $E[\rho]$ は、一体密度 $\rho(\mathbf{r})$ の汎関数として厳密に与えられる。したがって、 $E[\rho]$ を最小にする密度分布を求めれば、系の基底状態の密度とエネルギーが分かる。この厳密な $E[\rho]$ の存在は定理で保証されているが、それをどうやって構成すれば良いかは分からない。原子核では、前述の殻効果を内包していることが重要であり、コーン・シャムの方法が、現在のところ実用に耐え得るだけの精度を有する唯一の方法である。

コーン・シャムの方法は、密度 $\rho_q(\mathbf{r})$ を規格化された 軌道 $\phi_s^{(q)}(\mathbf{r})$ で以下のように表現する。

$$\rho_{q}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{N_{q}} \phi_{i}^{(q)}(\mathbf{r}) \phi_{i}^{(q)*}(\mathbf{r}), \qquad q = n, p \# (6)$$

この表現を使うと、核子数を固定した E[
ho] の最小化

$$\delta \left(E[\rho] - \mu_n \int \rho_n(\mathbf{r}) d\mathbf{r} - \mu_p \int \rho_p(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \right) = 0, \ \# (7)$$

は、次のコーン・シャム方程式を自己無撞着に解くこと と同値であることが証明できる。

$$h_q[\rho](\mathbf{r}) \phi_i^{(q)}(\mathbf{r}) = \epsilon_i \phi_i^{(q)}(\mathbf{r}), \#(8)$$

ここで、コーン・シャム・ハミルトニアン

$$h_q[\rho](\mathbf{r}) = \frac{\delta E[\rho]}{\delta \rho_q(\mathbf{r})}, \#(9)$$

は一体演算子である。(8)式から軌道 $\phi_i^{(q)}(\mathbf{r})$ が決まり、 ϵ_i が小さい方から N_q 本採用し、(6)式から密度 $\rho_q(\mathbf{r})$ が、続いて(9)式からハミルトニアン $h_q[\rho]$ が決まる。(6, 8, 9)式 を同時に満足する解を求めれば良い。(8)式の $h_q[\rho]$ がその解 $\phi_i^{(q)}(\mathbf{r})$ に依存するので、反復させて解く必要があり、このような解を自己無撞着解と呼ぶ。議論を簡単に

(42)

ii 「Skyrme 相互作用」、「Gogny 相互作用」広範な領域の核種を 記述することが可能な代表的な有効相互作用。前者は2核子 間の距離についてデルタ関数、後者はガウス関数で与えられ ている。

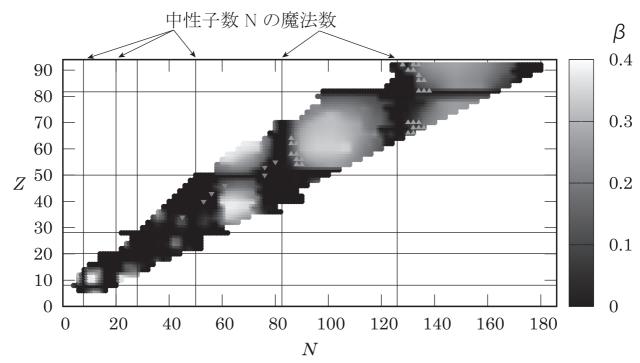


図 4 四重極変形の大きさを右縦軸(β)のグレイスケールで表示した核図表。黒は球形で、白色が強いほど変形が大きい。縦軸 Z・横軸 N と平行な直線は魔法数(8,20,28,50,82,126)を表している。八重極変形をもつ核種を上向き三角で、代表的な LLFP を下向き三角で示している

するため、ここまでスピンを無視して表記してきたが、 実際の原子核においてスピン・軌道相関は非常に重要で あり、スピンに依存したエネルギー密度汎関数を用いる 必要がある。

2. 対相関の導入

原子核には対相関があり、角運動量をゼロにするような核子対が好まれる。この相関を取り入れるために、エネルギー密度汎関数を拡張し、 $E[\rho,\kappa]$ とする。ここで、 $\kappa_q(\mathbf{r})$ は対密度 (pair density) であり、空間点 \vec{r} においてスピン逆向きの核子対を消滅させる演算子の期待値 $\kappa_q(\mathbf{r}) \equiv \langle \phi_{\perp}^{(q)}(\mathbf{r}) \phi_{\perp}^{(q)}(\mathbf{r}) \rangle$ として定義される。 $\kappa_q(\mathbf{r})$ がゼロでないということは、異なる粒子数状態の重ね合わせとして状態が記述されていることを意味する。エネルギーの最小化(7)式は、次の方程式の自己無撞着解と同値である。

$$\begin{pmatrix} h_{\text{KS}} - \mu_q & \Delta_q \\ -\Delta_q^* & -(h_{\text{KS}} - \mu_q)^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_k \\ V_k \end{pmatrix} = E_k \begin{pmatrix} U_k \\ V_k \end{pmatrix} . \# (10)$$
 ここで、対ポテンシャルは

$$\Delta_q(\mathbf{r}) = \frac{\delta E[\rho, \kappa]}{\delta \kappa_q^*(\mathbf{r})}, \# (11)$$

で定義される。

現実的なエネルギー密度汎関数を用いて、(10)式を非制限で解くことは、現在のスパコンを用いても大規模な計算となるため、BCS 近似と呼ばれる近似が良く用いられる。これは、 $\Delta_q(\mathbf{r})$ がコーン・シャム軌道 $\phi_q^{(\mathbf{r})}$ とその時間反転状態 $\phi_q^{(\mathbf{r})}$ の間にのみ有限の値 Δ_q を持ち、

他はゼロと考えれば良い。この場合,(8)式を自己無撞着に解くことを除けば,固体の超伝導理論でよく知られたBCS方程式と一致する。

Ⅳ. 理論計算核データ

我々は、対相関には BCS 近似を用いるものの、コーン・シャム軌道 $\phi_t(\mathbf{r})$ の計算には何ら制限をつけずにフル 3 次元の座標空間表示で自己無撞着解を求める。核図表上の炭素 (Z=6) からウラン (Z=92) までの原子核を系統的に計算した。エネルギー密度汎関数としては、 SkM^* iii を用いる。

1. 変形核図表

図 4 c, エネルギー密度汎関数計算で得られた変形の大きさを図示した。四重極変形度 β の絶対値の大きさを示しており,プロレート型(レモン型),オブレート型 (パンケーキ型),三軸非対称型(キウイ型)の三種類を区別する γ 変形が,この図では区別されずに表示されている(図 6 参照)。図 4 の右端はほぼ $N \approx 2 \times Z$ に対応しており,中性子ドリップラインではない。ドリップラインはさらに右遠方にある。

図4から,まず,魔法数(50,82,126)の近傍で,原子核が丸く(黒色に)なることがわかる。これはII節の予想通りである。また、中性子の殼効果の方が陽子よりも強

iii 「SkM*」代表的な Skyrme 型エネルギー密度汎関数の一つ。 核変形について良い記述を与える密度汎関数として良く用い られる。

く見える。例えば、N=82 周りの球形核は縦の黒い帯になっているが、Z=82 周りの球形核の横の帯よりも幅が広い。これは、単に中性子数が陽子数よりも大きいために、中性子魔法数による影響がより顕著になっていると考えられる。

軽い質量領域と重い質量領域では、核変形に異なる振る舞いが見られる。陽子・中性子数が 50 以下の領域では、球形原子核が主流であり、その中にポツポツと小さな変形の島が現れる。一方、重い領域では、基本的に原子核は変形しており、魔法数近傍の核種だけが球形になっている。重い原子核では、 Π .2節で述べたように、 $\Phi_0(\beta)$ が変形の起源となっていると考えて良いだろう。一方、軽い原子核では $\Phi_0(\beta)$ の効果はさほど大きくなく、むしろ $E_0(\beta)$ が変形を好む核種だけが変形しているのかもしれない。

2. 球形・変形遷移領域核種

球形と変形の領域の境目付近は、遷移領域(transitional region)と呼ばれ、さまざまなことが起きている。例えば、重い領域では、陽子・中性子数が魔法数よりもわずかに小さい領域に、オブレート型の原子核が出現する。 β の絶対値のみを表している図 4 では、これは分からないが、Z<82 や N<126 の領域に、オブレート核が帯状に出現することを計算は予言している。また、その近傍に三軸非対称変形をもつ原子核も予言される。この傾向は、重い原子核で顕著で、Z<50 や N<82 ではオブレート核の帯は明白でない。軽い核では、オブレート型を好む特定の陽子数・中性子数にのみ出現するように見える。

図4にはパリティ対称性を破る八重極変形(洋梨型, 瓢箪型)が予言される核種を三角印(上向)で示した。これも球形・変形の転移領域に出現する。千切れた縦帯のように現れるので、やはり中性子の殻効果が支配的であるが、中性子だけではパリティ対称性を破るほどの効果はないようだ。陽子も八重極相関を好む領域にのみ八重極変形が出現する⁷⁾。八重極相関が重い原子核で強くなることは、ボーア・モッテルソンの教科書⁸⁾にも書かれており、スピン・軌道結合効果の重要な帰結の一つである。

遷移領域においては、このようにさまざまな「かたち」が出現する。これは、「かたち」を変えてもエネルギーがほとんど変化しない(つまり軟らかい)ために、わずかな相関の差がさまざまな「かたち」を作り出すためである。

3. 長寿命核分裂生成物(LLFP)

原子炉で産み出される長寿命放射性核種には、主に、 長寿命核分裂生成物(LLFP)とマイナー・アクチノイド (MA)が含まれている。どちらも寿命が長く厄介な核種 であるが、LLFP はベータ線、MA は主にアルファ線を 出してより安定な核種に変換するという違いがある。こ れに加えて、核構造における大きな違いがある。もう一度、図 4 を見て頂きたい。MA の領域は中性子数 $N \approx 150$ の領域であり、これは鉛を超えた Z > 82 に現れる大きな変形の島の中央付近に存在し、変形が安定している。寿命の長さは、アルファ崩壊の Q 値でほぼ決まっていると考えられる。

一方で、LLFP は前述の遷移領域にあり、「かたち」が非常に軟らかい核種と言える。図 4 の下向き三角は、中性子数 $60\sim76$ のあたりに現れている 2 つの変形の島のへりに沿うように存在している。 79 Se も中性子数 45 周りの小さな変形の島のへりにあり、唯一 93 Zr は遷移領域からやや離れて、安定な球形核種のように見えるかもしれないが、この領域の 2r 核は変形共存現象を示すことが実験的に明確に示されており 9 、球形と変形を重ね合わせた量子状態として存在していると考えられる。

このように、LLFP は「かたちが特別に軟らかい」という構造をもつが、このことは、LLFP が長寿命であることの一因となっている。ベータ崩壊の前後で「かたち」が変化すると、崩壊確率が小さくなるからである。先ほどの 93 Zr は主に第一禁止遷移のベータ崩壊で、log ft=10.2 という値を持ち、これは第一禁止遷移の典型的な log $ft=6\sim9$ という値よりも大きい。同じ第一禁止遷移の LLFP では、 79 Se が log ft=10.8、 107 Pd がlog ft=9.9 と、やはり標準的な値からずれて特別に寿命が長い。第二禁止遷移になる 129 I、 135 Cs も log ft=13.5 という値を持ち、これらも標準的な値である log $ft=10\sim13$ よりも大きいことが分かる。

これまで簡単に「ベータ崩壊の前後で原子核のかたちが変化するため」と述べたが、遷移領域核を正確に記述するには、さまざまな形状をもつ原子核の重ね合わせ状態として記述することが必要となる。これを可能にする理論手法を開発し $^{10.11}$, 107 Pd の隣の核種 108 Pd について、この計算を行った例を図 5 に示す。それぞれの形がどの程度の振幅をもっているかを表している。横軸は図 4 に示した四重極変形度 6 , 5 三軸非対称性を表す 7 変形度を角度として採用することで、 2 次元平面に表したものである。図 5 6に示すように、 7 7が 7 90 5 60 7 8を変化すると、プロレートから三軸非対称変形を経てオブレート変形へと変化する。図 5 6は、 108 Pd の基底状態(17 =0 $^{+}$)

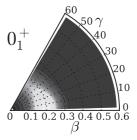


図 5 ¹⁰⁸Pd の基底状態に対して計算で得られた「かたち」の揺らぎの様子。明るい領域の振幅が大きい

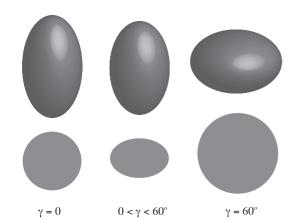


図6 四重極変形のかたち。左からプロレート型、三軸非対称型、オブレート型。中心を通る水平面での断面図を下段に示している

が、さまざまな γ 変形度を持つ状態の重ね合わせとして記述されることを示しており、「かたち」が大きく揺らいでいると解釈できる。「軟らかさ」はこの大きな量子的「揺らぎ」をもたらし、その性質が陽子数・中性子数のわずかな変化で大きく変わるため、特別に長い寿命をもつのである。

V. まとめ

原子核の「かたち」をテーマに、原子核物理学の観点からの見方、最近の発展を報告した。原子核のような量子系に「かたち」が出現することを量子力学に則して理解するのは、それほど簡単な話ではなく、もう少し真面目に議論した内容は、文献 5、6)を参考にして頂きたい。一方で、実験的にも球形からずれた「かたち」(変形)の存在は疑いようがなく、原子核の構造・反応の性質は、基底状態の「かたち」やその軟らかさに非常に敏感である。LLFPの存在・寿命の長さにも、このかたちの軟らかさが関与している。

今回、エネルギー密度汎関数計算によって計算された「かたち」、「密度分布」、その他の基底状態の性質を理論計算核データ InPACS (Interactive Plot of Atomic nuclei and Computed Shapes) $^{12)}$ として公開した。今後も機会があれば、InPACS 上のデータを拡充していきたいと考えている。

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する 革新的研究開発推進 プログラム (ImPACT)の一環として実施したものである。また、スパコン等の計算資源は、筑波大学・計算科学研究センター・学際共同利用

プログラムから提供を受け、日本学術振興会・科研費 (18H01209) および二国間協力事業「r プロセスの謎解明 に向けた核質量と寿命の研究」による支援も一部受けている。

- 参考資料 -

- V.M. Strutinsky, Nucl. Phys. A95, 420 (1967); Nucl. Phys. A112, 1 (1968).
- 2) P. Möller, A.J. Sierk, T. Ichikawa, and H. Sagawa, At. Data Nucl. Data Tables, 109–110, 1 (2016).
- H. Koura, T. Tachibana, M. Uno, and M. Yamada, Prog. Theor. Phys. 113, 305 (2005).
- 4) A. Bohr and B.R. Mottelson, Mat. Phys. Medd. Dan. Vid. Selsk., 27, 1 (1953).
- T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, M. Matsuzaki, Y. R. Shimizu, Phys. Scr. 91, 073008 (2016).
- 6) T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, M. Matsuo, and K. Yabana, Rev. Mod. Phys. 88, 045004 (2016).
- 7) S. Ebata and T. Nakatsukasa, Phys. Scr. 92, 064005 (2017).
- 8) A. Bohr and B. R. Mottelson, Nuclear Structure Vol. II, Benjamin (New York, 1975).
- 9) A. Chakraborty et al., Phys. Rev. Lett. 110, 022504 (2013).
- K. Washiyama and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C 96, 041304
 (R) (2017).
- 11) F. Ni, N. Hinoahara, and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C 98, 064327 (2018).
- 12) URL: http://wwwnucl.ph.tsukuba.ac.jp/InPACS/

著者紹介



中務 孝 (なかつかさ・たかし) 筑波大学 計算科学研究センター (専門分野/関心分野)原子核理論, 計算核 物理学, 核構造・核反応, 核変換, 中性子 星



江幡修一郎 (えばた・しゅういちろう) 東京工業大学 環境・社会理工学院 (専門分野/関心分野)原子核理論, 計算核 物理学, 核構造, 核融合・核分裂



鷲山広平(わしやま・こうへい) 九州大学理学研究院 超重元素研究セン ター

(専門分野/関心分野)原子核理論, 計算核 物理学, 核構造, 核反応, 超重元素合成

報告

東京の高校生、福島第一原子力発電所構内を視察

フリージャーナリスト 井内 千穂

東日本大震災から8年。事故を起こした福島第一原子力発電所(以下福島第一原発)では廃炉作業が粛々と進められている。その現場に、この3月、都内の高校生18人が視察に訪れた。県外の高校生が福島第一原発の構内に入るのはきわめて珍しいこと。TVや新聞の報道ではなく、ネット情報でもなく、自分の目で実物に触れた高校生たちはどう感じただろうか。今の福島と廃炉の現場を見た若い世代の思いを報告する。

KEYWORDS: Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, remote handling, disaster area reconstruction, decommissioning, tritiated water, nuclear power plant, dialogue

I. はじめに

まず、このような視察が実現した経緯を振り返ってお きたい。

東京都練馬区に所在する東京学芸大学附属国際中等教育学校(TGUISS)は、2007年に東京学芸大学附属大泉中学校と東京学芸大学附属高等学校大泉校舎を統合・再編して開校した国立の中等教育学校である。国際バカロレア認定校であり、生徒には帰国子女も多い。また、同校は文部科学省のスーパーグローバルハイスクール(SGH)やスーパーサイエンスハイスクール(SSH)にも指定されている。

探究型学習を重視する TGUISS では生徒たちによる グループ研究が活発に展開されており、その中で、「東日本大震災に学ぶ」授業に触発されて原発の是非について 研究していたグループが、東京工業大学助教の澤田哲生氏を訪ねてきた。研究過程で取材した映画監督の鎌仲ひとみ氏から"原発推進派"としてはまだ話のできる数少ない人として紹介されてきたという。2017年の夏休み中のことだった。この女子生徒3人が手がけたグループ発表が終わった後も研究活動が継続していた中、この出会いが縁で、2018年2月には同校で中学3年生120人を対象に澤田氏による出前授業が実施されたほか、以前から澤田氏が手がけていた地層処分を考える研修ツアー「中学生サミット」に、同校の生徒たちも参加するようになった。

このほか, 生徒たちの自発的な探究を促すべく, エネ

High school students from Tokyo visit and inspect the facilities of the damaged Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: Chiho Iuchi.

(2019年5月15日 受理)

ルギー問題や公害などのテーマを設けて、社会科担当の 古家正暢教諭と化学担当の鮫島朋美教諭が交互に授業を 行い、それぞれの専門分野からの視点を生徒たちに提供 するというユニークな試みも以前から行われていた。た とえば、原発に関しては、古家先生が福島の復興の難し さを伝える一方、鮫島先生は放射線量のデータを示して 冷静に考えさせるといった具合である。熱意溢れる両教 諭は、2018年8月、澤田氏が開催した福島第一原発の視 察会に参加し、これまでの授業では、「原発の現場を見ず して生徒たちに語っていたことを痛感した」という。そ して、生徒たちにもぜひ原発の現場を実際に見てもらい たいと考えるに至った。

両教諭の思いと、研究活動を展開する生徒たちからの要望を実現したのが、2019年3月14日と15日の一泊二日で実施されたSSH理数探究フィールド調査「福島スタディツアー」である。引率は、TGUISSの荻野勉校長と鮫島先生。これまでの授業の流れから、澤田氏と、既にTGUISSを退職しておられた古家先生も参加し、私は、同行取材を重ねていた「中学生サミット」のご縁から、このスタディツアーにもオブザーバーとして同行することとなった。

Ⅱ. 「福島スタディツアー」に同行して

1. 福島に来て、学び、考える

今回のスタディツアーを主導した鮫島先生によると、「福島第一原発に行く」ことから企画が始まったが、せっかく福島を訪ねるなら、原発だけでなく浜通りの被災地をじっくり見てみようという話になり、福島県の協力も得て、震災・原発事故の被災地をフィールドとしたアクティブラーニング対応型の教育旅行の内容も盛り込んだ独自のプログラムが組まれた。2日間で、福島第一原発

のほか、JAEA 楢葉遠隔技術開発センター、富岡復興メガソーラー・SAKURA も見学し、国道 6 号線沿いに浜通りを往復する道中、浪江町の駅前および請戸地区、富岡町の夜の森地区など、被災地の状況を自分たちの目で見るという、なかなか盛り沢山な行程である。

2. テクノロジーに対する興味

都内から JR 常磐線で 3 時間ほどかかる広野駅で下車。ここからバスで最初に向かったのは、JAEA 楢葉遠隔技術開発センターであった。福島第一原発の廃炉作業を推進するために遠隔操作機器の開発や実証実験を行っている施設である。ロボットの遠隔操作のシミュレーションに挑戦した何人かの生徒たちは、イマドキのゲーム世代らしく、コントローラの扱いも慣れたもの。画面上で易々とロボットを建屋内の階段を昇らせ階段の踊り場でのターンもこなす姿に感心した。また、実際には絶対に入れない原子炉内高線量エリアの水中に潜る VR 体験も生徒たちを惹きつけたようだ。高線量下での作業のために不可欠であることから開発が進められている遠隔技術の最先端のテクノロジーに、復興の一側面を感じ取る生徒たちもいた。

3. 被災地で活動する人々の生の声を聴く

「百聞は一見に如かず」とは言うが、視覚から直接すべてを読み解くことはなかなか難しい。とくに初めて訪ねる土地では、その時のガイドの言葉によって見え方が違ってくるのではないだろうか。以前に同行した別のツアーでも「語り部」の話に生徒たちが圧倒されている場面に立ち会ったことがある。今回のツアーでは、バス内でガイド役を務めた福島県観光交流課の佐藤良作氏のほか、被災地の復興のために活動しておられる2人の方々の話を聴く機会があった。

浪江町内でのフィールド学習の案内役を務めた一般社 団法人まちづくりなみえの菅野孝明氏から、津波襲来時 刻で時計の針が止まったままの校舎が沿岸部にポツンと 残る請戸小学校の全校児童が大平山の高台に逃げて全員



写真 1 AFW の吉川彰浩氏の話に聴き入り、福島第一原発の ジオラマに見入る(写真:井内千穂)

助かった一方、震災直後の原発事故による避難指示によ り、救助活動を断念せざるを得なかった無念の話を聴 く。地震・津波と原発事故の複合被害を受けた地域であ る。震災後に墓地を移転して作られた大平山霊園に建て られた新しい慰霊碑には、犠牲者182人の名が刻まれて いる。住民たちの決断で、請戸港付近にあった元の住宅 地には二度と人が住まないことになった一方で、27艘の 漁船が戻ってきて試験操業を始めている。2017年3月 の避難解除から2年経過した浪江町の人口は900人程度 で、震災前の4~5パーセント。住宅などの建物の解体 が進行し、市街地を中心に空き地が目立ってきている一 方で,交流・情報発信拠点施設(道の駅),産業団地,漁 業施設等の整備が進んでおり、復興に向けた動きが活発 化している。「何よりも人材が必要です。大学生になっ たらぜひインターンに来て下さい」と菅野氏は力強く 語った。

初日夕方の宿舎到着後、元東電社員で、現在は「廃炉現場と社会を繋ぐ」様々な取り組みを展開している一般社団法人AFW代表の吉川彰浩氏の話を聴くセッションが行われた。自身の人生の紆余曲折や震災後の価値観の変化を赤裸々に語る吉川氏の言葉も、生徒たちに強いインパクトを与えたようだ。斜に構える難しい年頃の生徒たちが真剣な面持ちで聴き入っていたのが印象的であった。また、吉川氏が持参した福島第一原発のジオラマは、最新の状態にアップデートされた秀作で、生徒たちは翌日の見学に向けてイメージを膨らませていた。

4. 高校生たちの「対話」

諸所を見学し、地元関係者の話を聴いた初日の最後に、生徒たちによるディスカッションが行われた。話し合いに先立ち、澤田氏より「対話」についての指南があった。対話とは、相手の話をじっくり聴き、質問し、相手の意見から学び、自分を省みることによって自分の考え方をバージョンアップすることである。「これこそが"哲学する"ことのエッセンスなんですよ」と澤田氏は語った。生徒たちは互いの意見に耳を傾けていたが、18名という多人数で対話するのはなかなか難しい。

「原発を使うべきか否か」という司会の K 君(高 2)からの問いかけで、一人ひとりの生徒が自分の意見を述べた。

「原発を使うべき。原発を止めようというのは感情論である」(高1; A さん)という意見と「使うべきでない。たとえ感情論でも、原発に反対する人たちを納得させる必要がある」(高1; H さん)という意見の両方がさらっと出てくるところに、これまでの学習の積み重ねとオープンに話し合える土壌が感じられる。これだけでも大人の会合にはなかなか見られないことだ。意外なことに、原発の使用に前向きな意見が多かった。その趣旨をまとめると、だいたい次の2つに集約される。



写真 2 初日の夜, 原発にどう向き合うべきか, 対話を試みる (写真:井内千穂)

- ●原発には事故のリスクと放射性廃棄物の問題があるが、東日本大震災による事故があったからこそ、その教訓に学んでリスクへの対応を改善することができるし、廃棄物についても今後の研究によって良い処理の方法が見つかるのではないか。
- ●将来的に原発を使わなくてもよいような社会を作ることができたら原発をなくしたほうがよいが、現時点では再生可能エネルギーだけで電力を賄うのは無理であり、また、火力に頼ると二酸化炭素の排出という点で問題があるし化石燃料が輸入できなくなった場合のリスクが大きいので、原子力を使うべきである。

これに対して、「今は原発を使うべきではない。原発を安全に使えるシステムが整ってから再稼働すべき」「放射性廃棄物の問題も解決していない今の原子力のことを考えるとハードルが高く、5年から15年はかかるのではないか。その間は火力を使うしかない」という慎重な意見が出された。

このほか、「原発使用に反対。自分たちは東京にいる からあまり実感がないが、原発の近くに住んでください と言われたらイヤだと思う」「日本は自然災害多発国。い くらリスクを考えたとしても、いつかまた同じことが起 きる」という原発使用に否定的な意見も出た。

放射性廃棄物の最終処分場や原発の再稼働をめぐって 対立が続く大人社会への苛立ち。世代交代しなければ問題は解決しないのか? ジェネレーションギャップと若い世代の本音が垣間見える。原発の問題について、知識不足や無関心に対する批判、全会一致があり得ない場合に多数決で決めることの是非など、率直な意見が次々出てきたことには感心したものの、気になったのは、その日、共に見てきたはずの浜通りの被災地の状況が、彼らの話し合いに今一つ反映されていないように感じられたことだった。古家先生も同じように感じておられたのか、「そういう議論もいいけれど、今日見に行った所で何 か思ったことはありませんか?せっかくだからその感想も言ってください」と口を挟む。ここで初めて、今日通って来た国道6号線沿いの光景に触れる意見が出た。

「私は原発推進派ですが、今まで通ったことがなかった(6号線沿いの)被災地を見て考えが揺らぎました。民家の前にバリケードがあって、普通に住んでいた人の家がめちゃくちゃに荒れているのは衝撃的でした」(Oさん:高1)。

残念ながら、その夜は時間切れになったが、この日に 見聞きしたことで、彼らがこれまでに形成した考えがど のような影響を受けたのか、もう少し聞いてみたいとこ ろだった。

5. 福島第一原発の構内で

2日目。富岡町内で、福島県屈指の桜の名所である夜の森地区を訪ねる。道一本挟んで、帰還困難区域と避難指示解除区域が接する境界があり、近所同士だった家々の分断に何とも言えない不条理を感じるエリアだ。また、富岡復興メガソーラー・SAKURAで再生可能エネルギーの現場も見学した。

2018年11月にオープンした廃炉資料館で東京電力のバスに乗り換え、いよいよ福島第一原発構内へ向かう。

「津波の被害や水素爆発の跡が残るが、現場のほうも落ち着いてきた。ぜひ今の"いちえふ"がどうなっているかということをみなさんの目で見ていただきたい」という福島第一廃炉推進カンパニー最高責任者小野明氏の挨拶に続いて、広報担当からの概要説明があり、構内の食堂で作業員の方々と同様に昼食をいただいた後、バスで構内を見学した。

私が福島第一原発を訪れるのは今回が二度目だ。初めて見学したのは2017年4月だった。その時点で既に震災から6年が経過し、想像していたよりも片付いていた。バス内からの見学には防護服の必要もないことに拍子抜けしたのを思い出す。前回見学時には計画段階だったカマボコ型のドームが完成して3号機では核燃料の取り出しの準備が整った(翌4月には核燃料取り出し開始のニュースが流れた)。一方、敷地内の"処理水"のタンクはさらに増えた模様だ。現場では懸命な廃炉作業が粛々と続いているに違いないが、遠隔操作で取り出しを試みているデブリについても、100万トン以上溜まっている処理水についても、この先どうするかがまだ決まっていないという説明に、何とも重い気持ちでバスに揺られていた。

見学前の質疑応答の中で生徒の一人から「廃炉が完成するとはどういう状態のことですか?」という質問があった。「きれいな状態にするのが東京電力の責任であるが、最後の姿というのは人によってイメージが違うのではないか。それは我々の世代で決めることなのか、場合によっては、みなさんの世代で決めてもらうことなの



写真3 浪江町請戸地区にて。一般社団法人まちづくりなみえの菅野孝明氏の話を聴く(写真:井内千穂)

か、時間的なことも考えながら決めていくべきであると 思う。我々としては、まずは、デブリや使用済み燃料を 取り出して安全な状態で保管することを目指して作業を 進めていく」と回答した小野氏の言葉は、高校生たちに どのように聞こえただろうか。

Ⅲ. 高校生との対話

福島第一原発の見学を終え、いわき駅に向かうバス内で、生徒たち一人ひとりが今回のスタディツアーの感想を述べた。十人十色。2日間の盛り沢山過ぎるほどのプログラムを共有したわけだが、参加者の受け止め方はそれぞれ異なる。「8年前は、親の仕事の関係で外国暮らしだったため、震災をリアルには体験していない」ことがスタディツアーに参加する動機だったという生徒も数人いた。いずれにしても、震災当時は小学校2年生だった生徒たちである。福島の現地に来てみたことが彼らにどのような影響を与えたのか、もう少し聞いてみたいと思い、春休み明けの学校に生徒たちを訪ねた。参加者18人の内13人が集まり、1カ月前のスタディツアーを振り返る座談会の形になった。(それぞれ進級したが、以下ではツアー時点の学年を記す。)

井内:初日の夜に対話のセッションがありましたが、 その日の見学やレクチャーで自分の意見がそれまでと変 わった人はいますか?

Y君(高1):それまで原発をもっと使い続けていいと考えていたが、福島の現状を見て、話を聴いた後では、最終的には原発をなくすべきなのかなと考えるようになった。

S君(高2):行ってみると、福島は思った以上に廃れていて避難解除された所も元気がなく、今は一つの失敗として教訓から学んで再稼働しようとしているが、こんな大きな被害を見ると、国や東京の人たちの軽いノリで



写真 4 富岡町夜の森地区にて。バリケードの向こうは帰還困難区域(写真:井内千穂)

再稼働していいのかなと思った。

K君(高2):資源のない日本だから原発を使わざるを得ない、そのリスクもある程度はしょうがないと思っていたが、しょうがないではすまされない所を見た。もう一回やってはいけない失敗があると思うが、それに当たると思った。

これに対し、現地に行っても自分の考えは変わらなかったという声も多い。そのニュアンスは様々だ。現地に行って、ゼロリスクはないことを改めて実感したという意見、津波の被害の凄まじさも見たため、原発の事故は天災の面が大きいと感じ、安全面を改善することで対応できるのではないかという意見も出た。復興面では、現地を実際に見て、人々が戻ってこないのは原発だけのせいではないと感じ取った生徒もいる。

同じ地元の人々の生の声を聴いたわけだが、「できれば原発を使いたくないという考えが、福島の人たちの話と合致しているように思え、考えは変わらなかった」(N君:高2)という受け止め方と、「もともと原発推進派で、今回、福島の人の話を聴いたが、県外に避難している人ではなく、現地で復興のために頑張っていてこれから先を見ている人たちの話からは、原発を使うという自分の考えは変わらなかった」(Z君:高1)という両様の受け止め方があり興味深い。

井内:初めて福島第一原発の構内に入ってどう思いましたか?

S君: 意外と普通の工場と同じような感じで、思ったより収束しているんだな、しかし、汚染水は多いなという印象。

Z君:原発の建物自体は、壊れているビルがあるというぐらいの印象で、わりと復興が進んでいるように見えたが、今は全体がコンクリートで覆われているため、冷



写真 5 福島第一原発構内をバスで周り, 廃炉の現場を見学する(写真提供:東京電力)

たい人工的な空間という印象を受けた。

T君(高2):8年経っても建屋のあたりに瓦礫をまだ 撤去できていないところがあり、そういう建屋の近くを 通った時は放射線量が格段に上がって驚いた。

K君:建屋は思っていたより小さかった。あれが壊れただけで、10キロ~40キロ圏に影響を与えることに驚いた。敷地が広いが、目についたのはタンクの多さで、いかにもどうしようもない感があって良くない印象。汚染水をどうするのかが気になった。

Y君:テレビで見ると、違う世界の事物のように思えた原発が、自分がいる世界に実際に存在しているということを確認して、自分の知識として入ってきた。

S さん (高 2): 建屋の近くで線量が $242\mu Sv/h$ に跳ね上がった時は、親はこれを怖がっていたのかなと思った。

Eさん(高2):原発の放射線が怖いと思うことを予想していたが、実際に行くとあの場では自分の身体に対する影響を感じるわけではない。作業員の方々の姿が印象に残っており、人が嫌がる環境で働くのはどんな感じなのだろうと思った。

初めて実物を見る原発ではあるが、以前にニュースで見た水素爆発の映像が強い印象を残しているため、実際に見に行った時には、「ああ、原発だ」「これがそれなんだ」という受け止めで、「正直言って建物そのものから何かを感じることはなかった」という生徒も半分近くいる。

井内:スタディツアーを終えて家に帰ってからどんな話をしましたか?

T君:家の前にバリケードがある6号線の写真を母に 見せたら「イヤね」という反応だった。

Y君:家族に夜の森地区の写真を見せたら、ゲームの中の世界みたいだねと言っていた。バスを降りる時に福



写真 6 福島第一原発構内にて。2 号機と3 号機の間を通過する際,放射線量が跳ね上がる(写真提供:東京電力)

島県庁の佐藤さんが言っていた「福島第一原発では、歯のレントゲン1回程度しか被ばくしていない」という説明を伝え、みんなが心配するほどには被ばくしていないから大丈夫という話をした。

Sさん: 吉川さんのジオラマの写真を見せて、ここまで行ってきたんだよと話し、母は放射線量を心配していたけれど、私は大丈夫と伝えた。

S君:親はそれほど心配していなかったが、翌日、祖母に会って福島のことを話したらすごく心配して、そんなに放射線を浴びてないといくら説明しても信じてもらえず、祖母は原爆の話をして、放射能は僕たちが思っているより危ないんだと言っていた。

Hさん(高1):母は放射線のことを心配していたが、 行きたいなら行ってきなさいという感じで承諾してくれた。帰ってきた時、放射線のことは何も言わず、「すごく 良い経験になったね」と言って私の話を聴いてくれた。

井内:福島に行ってきたことによって、考えるように なったことはありますか?

S君:再稼働するかしないか、どっちに決めても叩かれるので、今の大人の考えもすごくわかる。100パーセントの賛成でものごとが進むことはないから、こういうふうに意見交換ができればいいと思う。

Y君:うちの学校では年に一度は原発をテーマにした 学習の機会があるので、実際に現地に行ってきた経験を 踏まえた意見を共有していきたい。

T君:学校で意見を共有するのもいいと思うし,新聞 投稿などの発信もいいと思う。

A さん(高1):安全性をどこまで確保したら人は納得するのか、納得させられる説明を知りたい。学ぶということは書物やネットで調べるだけでなく、現地に行って見るべきだということを感じたので、ほかの分野でもそれを生かしていきたいと思う。

Mさん(高2):エネルギー問題よりも風評被害のことを考えるようになった。震災後、東北の食材を避けていた母に影響されて、買い物の時に食材の産地を見る癖が自分でも抜けない。安全だということを頭では理解していても、一度自分が持った意見を変えるのは難しいと感じている。事故の教訓に学んで安全面を改善すれば原発を今は使っていいのではないかという考えと、食べ物の風評被害に関する感覚が自分の中でも矛盾している。

K君:福島に実際に行ってから悲観的になっている。この問題がどう解決するのかゴールが見えないから、ゴールに向かってどうするかという手段もわからない。今、僕たちは原発の話をしているけれど、他の人たちは知らない。無関心は良くないが、日本には原発だけでなくいろいろ問題があって、自分もほかの問題に関して何かやっているかと言われたらやっていない。悲しいなという無力感がある。

Eさん:自分も無力感を感じる。どこまで行っても偽善者のようで、考えている風にしていても福島の方々の生活が変わるわけじゃない。しかし、学校生活の場で自分の意見を言っていきたいし、人の話を聞いて考え続けるのは大事だと思う。今回の研修を通じて、福島にまた行きたいと思った。

無力感。それは私も常々感じている。

東日本大震災から8年目に入った今も、テレビや新聞では、原発vs 再エネといった対立構造が相変わらず横行している。しかし、どちらが正しいかで対立し続けるだけでは、自分たちの将来にとってどんな選択が最適なのか、なかなか見えてこない。

たった 18 人の生徒たちの中にも様々な意見があるように、世の中の人々の意見が一致することはあり得ない。その中で、何かを選択し、物事を前に進めていくにはどうしたらいいのか。今回のツアーに参加した生徒た

ちも、多かれ少なかれ、その難しさを感じたことだろう。 それでも、現実を見て、たとえ不完全な意見であっても、 互いの考えをオープンに共有し、対立軸に振り回されない対話を積み重ねることで、少しでも解決策に近づいて いけるのではないか。ツアーに同行し、高校生たちの声 に耳を傾ける中で、そんな希望を感じた。

「そのように議論できる場が教育現場にないのが問題」と語った鮫島先生の信念から、今回のスタディツアーは実現した。企画段階では、教員や保護者から懸念の声もあったそうだが、参加希望生徒の保護者を対象に事前説明会を開催し、東京電力の担当者による安全面の説明を行った結果、当初申し込みのうち最終的に18人の生徒たちが参加した。当然、各家庭の判断がある。ツアーは获野校長が自ら引率する形で実施された。希望者だけの行事としては異例のことだ。意見の相違を調整し、責任を持ってプロジェクトを実行した先生方の信念とリーダーシップに敬意を表する。

そして、はじめに述べたように、今回のツアーの発端となる縁を結んだのは、生徒たちの探究心と行動力だったのだ。無力ではない。各人の立場でできることがある。事後の座談会まで設けていただいた学校側のご厚意に深く感謝し、自分なりのささやかな実践を続けていきたいと思う。

(2019年4月17日記)

著者紹介



井内千穂(いうち・ちほ) フリージャーナリスト 元・英字新聞ジャパンタイムズ編集者。関 心事は個の力と集団の関係。音楽および 人物取材記事執筆の傍ら,討論の場を提供 する企画を手がける。

FOCUS 国内外の原子力教育事情 (6)

カナダ・マクマスター大学における原子力工学教育

マクマスター大学 長﨑 晋也

KEYWORDS: Canada, McMaster, UNENE, IRC, research and project-based education

I. カナダの原子力エネルギー利用の現状

現在オンタリオ州で18基,ニューブランズウィック州で1基の商業発電用 CANDU 炉が稼動し、オンタリオ州では電力の6割を供給している。オンタリオ州のCANDU 炉から発生した低・中レベル放射性廃棄物処分場は、同州キンカーディン町で計画が進み、連邦政府による建設許可待ち段階にある。国内の CANDU 炉から発生する使用済み燃料については、核燃料管理機構によってオンタリオ州の5自治体でサイト選定が進められている。現時点では原子力発電所の新規建設計画はなく、ピッカリング発電所の全6基は2020年代に停止することが決まっている。その他の発電所についてはリファービッシュメントを実施して運転時間が延長されることになっている。また、アルゼンチンやインドへのCANDU 炉輸出の可能性と、オンタリオ州北部遠隔地への小型モジュール炉導入の可能性の検討が行われている。

カナダで原子力工学に関する体系的な教育を実施している大学は、オンタリオ州のマクマスター大学工学物理学科とオンタリオ工科大学エネルギーシステム&原子力科学科だけであるが、研究・教育の観点から中核を担っているのはマクマスター大学である。そのほか、トロント大学など多くの大学に、研究分野の一部として原子力に関係する研究を実施している教員が所属している。

Ⅱ.マクマスター大学工学物理学科

マクマスター大学は 1887 年に設立され、設立時から 工学分野がそして最近は生命科学分野が強い大学として 知られ、most research intensive university in Canada と される。

工学物理学科は、原子力工学、生命工学、ナノテク&マイクロシステム工学、フォトニクス工学の4分野をカバーし、19名の教員、1学年50名程度の学部生と30名ほどの大学院生のほか、非常勤教員や学生実験担当技術者などで構成されている。

原子力工学を専門とする教員は、著者を含めて4名で、

Education of Nuclear Engineering at McMaster University, Canada: Shinya Nagasaki.

(2018年11月19日 受理)

その専門分野は原子炉物理,原子力システム安全,熱水流動工学,核燃料サイクル・放射性廃棄物管理工学などである。4人とも原子力産業界での経験を有している。そのほか,原子力産業界に勤務し,その専門分野で高い業績や実績を上げている5人が非常勤教授や准教授として任命され,教育や大学院生の研究指導に参加している。工学物理学科に進学する学生の関心は上述した4分野でほぼ均等であり,毎年20名程度の学生が原子力工学の教育プログラムを履修している。

■ Ⅲ.原子力工学教育の概要

マクマスター大学工学部の1年生は,工学一般,物理,数学,一般教養科目などを履修し,その成績と希望に応じて2年生から各学科に配属される。工学物理学科では,学生に対して4分野ごとにどのような講義・演習を履修することが望ましいかのモデルを提示している。

モデルでは、2年生は、統計熱力学、電磁気学、応用数学、量子力学など4分野共通科目を履修することが推奨されており、3年生以降でエネルギーシステム論、信号処理論などの共通科目とともに、原子力工学基礎、先進原子力工学、プラズマ工学、原子炉制御、原子力安全、原子力プラント工学など原子力工学関連講義とともに、原子炉を用いた実験などが提供されている。

放射線医療や放射線管理などは理学部で実施されており、理学部において放射線計測を含めた講義が提供されている。原子力工学を勉強したい学生は、これら他学部の講義の履修も薦められている。さらに、成績が優秀な学部生は、1年生の段階から夏休み期間中に、教員が行っている研究に夏期研究学生として参加(給与は教員負担)することもできる。

マクマスター大学には、イギリス連邦内で初めて大学に設置された原子炉(MNR)が1959年から研究・教育に供されてきている。また2015年にはホットセルが導入され、学生教育にも利用されている。

著者の東京大学での学生ならびに教員としての経験とカリフォルニア大学バークレー校での Visiting Professorとしての経験から、マクマスター大学における原子力工学教育は、原子力工学分野における世界的トップクラスの大学のそれと遜色のないものだと言える。これは、

Big in McMaster や Big in Canada は意味がなく, グローバルに戦い, 生き残れる人材の育成が不可欠であるとの認識によるものである。

Ⅳ. カナダのユニークな点

マクマスター大学の原子力工学教育プログラムは,世界の他大学のものと大きく変わらないが,カナダ全体として見た時,二つのユニークな事項がある。

1. UNENE

カナダの大学における原子力教育、研究開発能力の支援と開発のための、大学(マクマスター大学、オンタリオ工科大学、クイーンズ大学、ウォータールー大学など)、原子力産業界、研究機関、および規制当局からなる連合組織として、UNENE (University of Excellence of Nuclear Engineering)が 2002 年に設立された。

UNENE は、理学・工学系への国の研究費支援組織 NSERC (The Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada)の Industry Research Chair (IRC)プロ グラムにコミットしている。このプログラムは、産業界 と州政府からの人的・財政的支援を必須とし、その上で産 業界と州政府の政策を指導できるだけの研究・教育実績 のある研究者に当該称号を付与し、彼らを通して大学の インフラ整備を含む研究・教育の向上・発展を促すことを 目的としている。5年間程度,数百万ドルから数千万ドル の規模で、その50%以上は産業界が負担する。一般にカ ナダの原子力産業界は、個別に研究費支援を要請しても 「石から水を搾り出すより困難」とされるが、UNENE の 枠組みを通して原子力産業界や政府機関からの柔軟かつ 積極的な人的・財政的支援を可能としている。IRC は研 究からスタートしているが、研究を通しての教育への効 果的なフィードバックが期待されており、実際人材育成 はその主目的の一つでもある。原子力関連の IRC はマク マスター大学から継続して出しているが、UNENE を通 して原子力界全体の支援を受けるため、少ない教員資源 でも研究と教育の両面で成果を挙げることができている。 言い換えると、産業界と政府機関の参画を得ているため、 産業界の現実的要求と納税者への説明責任を果たせるだ けの研究成果と人材育成成果が求められることになる。

UNENE は、そのほかにもマクマスター大学やオンタリオ工科大学と連携して、原子力での修士学位を有しない原子力産業界の技術者向けに学位(UNENE M. Eng. やUNENE Diploma)取得のためのコースを設置している。

2. 国家的関心を反映した研究・教育

たとえば、GEN-IV の一つのオプションでありカナダが関心を表明している「超臨界圧軽水冷却炉」について、2009年12月から5年間、5千万ドル以上の規模で実施された研究プロジェクトベースの教育がある。そこでは、カナダ資源省(連邦政府)、オンタリオ州政府、NSERCが出資者となり、国内20大学とAECLが参加した。超臨

界圧軽水環境における化学と材料, 超臨界圧での熱流体力学, 炉安全などが主要課題として取り上げられ, これらの研究を通して原子力工学に関する教育が行われた。

超臨界圧軽水冷却炉に続くプロジェクトとして, 昨年秋に, マクマスター大学を中心に 10 以上の大学, 原子力産業界, カナダ資源省, NSERC が一体となって「小型モジュール炉」に関するプロジェクトが始まった。

カナダ資源省、原子力産業界、NSERC が支援する具体的なプロジェクトの存在は、寿命延長・廃炉以外に仕事がないような斜陽産業とは違い、カナダの原子力界には進むべき方向(夢)があるという強力なメッセージを学生に与えており、日本の原子力界も参考にすべきであろう。また、UNENE やカナダ政府は、福島第一の廃止措置への参画を通して、日加での人材育成を行いたいという希望も有していることにも触れておく。

V. 最後に

著者がまだ東京大学に在籍していた頃の日本の大学と の違いを最後に紹介する。カナダの大学の工学部はカナ ダ国籍の州民といえども,年間授業料は1万数千ドル。 学生は投資への見返りを強く要求するし、大学入学後の 学生の多くは真剣に勉強する。工学部の全授業内容は. 学生による授業評価とカナダ工学認定機構(CEAB)によ る評価などを通して見直される。学生評価は昇任・年俸 に直結し、CEAB 評価は技術者必須国家資格の卒業生へ の受験資格付与に直結している。教員は講義開始前に, 講義目的と評価項目・基準を明確にする必要があり、また 宿題や実験レポートはコメントを付して必ず次の宿題や レポート作成時までに返却しなければならない。同じ箇 所・項目での2回目の間違いは、学生の落ち度ではなく、 間違いを事前に正さなかった教員の落ち度になる。そし て、単に教えるだけではなく、メンター制度、チュートリ アル時間も講義とは別に設定もされている。また留学生 をカナダにとっての戦略的パートナーの卵と考える。

大学教育のあり方は、小学校からの教育のあり方とも 関係し、また国の財政状況、国・産業界の教育への期待 の本気度などにも強く依存するため、単純な日加の比較 は意味はないし、日本版 UNENE を作るべしという気も ない。ただ、昨年半年日本に滞在して、カナダとの比較 において日本の原子力工学を履修している学生の基礎能 力は弱いと感じており、日本はなんらかの本気の対応が 至急必要ではないかと感じてはいる。

著者紹介

長崎晋也(ながさき・しんや) マクマスター大学 (専門分野)核燃料サイクル・放射性廃棄物 管理工学



講演

IAEA の理念と任務

~「平和と開発のための原子力」を支える人材~

国際原子力機関 マリー アリス ヘイワード

「原子力には、世界をより安全に、より危険なく、より繁栄させる力があると信じている。私たちの仕事は、『平和と開発のための原子力』という包括的な哲学にもとづくものだ」――今年1月、都内で開かれた講演会で、国際原子力機関(IAEA)事務次長(DDG、管理局担当)のマリーアリスへイワード氏はこう述べた。

この講演会は、原子力分野の人材育成関係者等が、IAEAの活動に対する理解を深め、日本人職員派遣等のIAEAとの関係を強化するために、原子力人材育成ネットワークが開催したもの。外務省と日本原子力産業協会が共催した。



ここでは同氏の講演から、IAEAの理念、任務、および職員採用について述べたあらましを紹介する。

KEYWORDS: IAEA, nuclear energy, nuclear sciences and applications, nuclear safety, security, safeguards, verification, DG, DDG, SDGs, JPO, vacancy notice

I. IAEA の理念

IAEAは、原子力技術の平和利用のための科学技術協力フォーラムである。私たちは、原子力科学技術の安全で、危険のない、平和利用のために働き、国際平和と安全保障および国際連合(UN)の持続可能な開発目標(SDGs)の達成に貢献している。天野之弥 IAEA 事務局長(DG)は、「原子力技術の途上国への移転、核兵器の拡散防止、原子力安全と核セキュリティのための地球規模のプラットフォームの提供、これらが IAEA の主要任務であり最も重要な分野である」としている。私たちの仕事は「平和と開発のための原子力」という包括的な哲学に基づいており、私たちは「原子力には世界をより安全に、より危険なく、より繁栄させる力がある」と信じている。

│Ⅱ. 加盟国は 170,職員数は 2,500

IAEA の加盟国は約170で、職員数は100以上の国から2,500人を超える。本部はウィーン(オーストリア)と研究所はサイベルスドルフ(同前)とモナコに、地域事務所はトロント(カナダ)と東京(日本)にある。海外から

The IAEA; its Mission and Work: Mary Alice Hayward. (2019年5月17日 受理)

15人の査察官が赴任している東京事務所は、アジアの原子力施設の査察、モニタリング活動の拠点である。

IAEA の組織は、DG 直下のDG 調整室、政策立案機関事務局、広報室、内部監査室、法務室の5室のほか、原子力エネルギー(NE局)、原子力科学・応用(NA局)、原子力安全・核セキュリティ(NS局)、保障措置(SG局)、技術協力(TC局)、管理(MT局)の6局からなる。このうち、私の所掌するMT局は、人材、調達、財務・情報管理、会議・文書、総務等の組織横断的サービスを提供している。

Ⅲ.3つの主要活動分野

IAEA の主要活動分野は次の3つである。1. 原子力科学技術の恩恵の活用(原子力発電を含む)について加盟国を支援,2. 原子力安全・核セキュリティについて地球規模のプラットフォームの提供,3. 保障措置・検証を通じた核兵器拡散防止である。

1. 原子力科学技術の恩恵の活用

IAEA では、37 の後発開発途上国を含む 146 の国・地域に対する原子力科学技術の協力支援を行っている。日本は、技術協力について、地域内でも世界でも重要な役割を果たしている。最近では、2018 年 11 月、日本の 11 大学・研究機関は IAEA との間で核医学分野に関する協

定を締結し、アルツハイマー病、パーキンソン病といった脳障害等の非伝染性疾患の診断・管理のためのイメージング技術利用研修を提供いただけることとなった。

IAEAでは、加盟国のがんへの取組みをサポートするため、核医学、放射線腫瘍学、放射線学関係施設の設立を支援している。

多くの国が、原子力・アイソトープ技術により収穫量、 耐病性、干ばつ耐性を改善し、害虫保護や新品種栽培によ り食糧安全保障を実現し農業生産性を向上させている。

2. 原子力安全・核セキュリティ

原子力安全・核セキュリティの責任はそれぞれの国にあり、IAEA の役割は、地球規模の原子力安全・核セキュリティの持続的な枠組みを発展させることである。安全基準、指針、能力構築、ピアレビュー(専門家による評価)、助言によって、国民、社会、環境を電離放射線から保護するため加盟国を支援する。

3. 保障措置・検証

保障措置・検証は IAEA の中核任務であり、1957年に発効した IAEA 憲章に規定されている。IAEA は、加盟国が国際的な法的義務を尊重し、核物質・技術を平和目的に限定して利用していることを検証する。検証の独立性の担保として、IAEA には核兵器拡散を回避するための特別な役割が認められている。

保障措置活動の大きさを数字でみると、原子力施設の 査察は、2017 年だけでも 2,102 回、現場日数は 13,744 日。同年の保障措置下にある核物質は、核爆発装置 200,000 個以上を製造できる量に相当する。これらの数 字からも、IAEA の保障措置活動の重要性が理解でき る。5 人の日本人査察官もウィーンで活躍している。

┃Ⅳ.ジェンダーバランスと若手重視

「平和と開発のための原子力」というユニークな任務を担うIAEA職員の仕事は、原子力技術の平和利用分野の広さ同様、多様である。保障措置の査察官や分析官は、機微な核物質の所在を確認する。技術職員は、町に淡水を引いたり、農場に高収穫をもたらしたりするプロジェクトについて当該国を支援する。原子力や放射線の専門家、技術者は、原子力プラントが安全基準に合致したり、放射性物質をより安全に管理・移送したりするために当該国を支援する。MT局はじめ多くの職員が、IT専門家、書籍編集者・出版者、翻訳者、通訳者、会計士、財務専門家、会議主催者として舞台裏を支えている。

IAEA はジェンダーバランスを重視している。現在、プロフェッショナルおよび高位職の女性職員は30%超である。高位職におけるジェンダーバランスが重視されており、DG と私は2017年国際ジェンダーチャンピオンに選出された。職員募集に際しては、女性職員の増加について継続的に取り組んでいく。IAEA は女性が働きたい場所だと伝えることで、優れた資質を持つ女性を引き

つけることが重要と考えている。プロフェッショナルおよび高位職の女性職員数は徐々に改善しているが、上級職の女性職員数はまだ少ない。2019年1月、NA局にナジャトモクタール DDG を迎え、6人の DDG中、女性は2人になった。

職員採用のもうひとつの重点対象は若手である。インターンシップやジュニアプロフェッショナルオフィサー(JPO)制度により若手採用を図っている。若手職員は、若々しく明るいマインドによって、私たちに新鮮な視点を気づかせてくれる。代わりに私たちは若手職員に、キャリア形成につながる有意義な業務経験を付与するよう努めている。日本とはJPO 覚書を締結しており、現在2人の日本人JPOが、それぞれSG局、モナコのラジオメトリック研究所で働いている。また、日本から4人のインターンシップ学生をNE局、NS局、NA局が受け入れている。

V. 求める人材の資質

拠出金額第2位の日本からは、もっと多くの職員を IAEA に派遣してほしいと天野 DG も願っている。日本 人職員には、日本の原子力の豊かな経験を IAEA で活か してほしい。

JPO やインターンシップ,空席募集等により IAEA で働きたい人に求められる資質や手続きについては,次のように説明したい。

IAEAのウェブサイトに Vacancy Notice (空席情報) が掲示される。応募の際には、このサイトや IAEA の全体サイトから、IAEA のカルチャーや Notice をよく読みこみ、IAEA が職員採用に当たって求めているスキル、資質を十分理解する必要がある。応募要件を満たし、まずは第一スクリーニングを通過してほしい。志望動機をどのように記述したらよいかは、IAEA で働いているまたは働いたことのある日本人にチェックしてもらうとよい。選考には時間がかかり、応募してから返事まで8か月を要することもある。選考過程では、対面またはオンライン面接、作文、心理テストを課されることがある。候補者が上位2人まで絞られ DDG の自分にリストが届いた後、DG に推奨して採否を決定する。

国際機関で働くことについて、夜遅くまで仕事をしない 等の UN カルチャーや休暇等の考え方があること、研究者 が IAEA に 3 年、5 年、7 年勤務して帰国した後のキャリ アストップ状況の改善や英語力の必要性も伝えたい。

・国際機関勤務については、原子力人材育成ネットワークのサイトを参照ください。

https://jn-hrd-n.jaea.go.jp/iaea_top.php

〔文責〕木藤啓子(原子力産業協会)



リスク認知は状況で変わる 対象への不安は知識不足のせいではない

本誌 佐田 務

I. 客観的なリスクと主観的なリスクはずれる

世の中には、原子力を含めてさまざまなリスクがある。それらのリスクの大きさは、その確率と、その被害の大きさの積で表されることが多い。ここではとりあえずこれを、「客観的なリスク」と呼ぶ。

これに対し、私たちが対象に対して感じるリスクはきわめて主観的だ。ここではそれを、「リスク認知」あるいは「主観的なリスク」と呼ぶ。この主観的なリスクと客観的なリスクはしばしば、ずれを見せる。この「ずれ」のことを、「パーセプション・ギャップ」と呼ぶ。

そのギャップをもたらすものは大きく-

- ・リスク自体に内在するもの
- ・そのリスクを伝える主体に起因するもの
- ・そのリスクを受け取る側に起因するもの

に分けることができる。

これらについて、順にみていこう。

Ⅱ. 受動リスクは能動リスクの千倍

最初にリスク自体に内在する要因を考えてみよう。

この世の中のリスクのうち、「喫煙」「自動車の運転」 「医療被ばく」などのように、本人の納得の上での行動に 伴うものは「能動的なリスク」と呼ぶことができる。一方 で「公害」などは本人の納得が得られていないために、 「受動的なリスク」と呼ぶことができる。

なお Starr は、「受動リスク」と「能動リスク」には受容面で 1,000 倍ほどの差があると指摘し、Slovic は「未知性」と「恐ろしさ」が、リスク認知に大きな影響を与えるとした。また、Covello はリスク認知に影響を与えるものを下記のようにまとめた。

- ①大災害の可能性…死傷が同時に同じ場所で起きる。 散発的ではない。
- ②周知度…なじみがない。
- ③理解度…メカニズムやプロセスが理解できにくい。
- ④個人による制御の可能性…個人では制御できない。
- ⑤曝露への任意性…災害への関わりが自発的では なく、不本意。
- ⑥子どもへの影響…特に子どもにリスクがある。
- ⑦影響のあらわれ方…即時的ではなく遅れてでる。
- ⑧次世代以降への影響…次世代へのリスクがある。
- ⑨被害者の身元…統計上の被害者としてではなく,

被害者の身元が特定される。

- ⑩恐怖…恐怖が大きいもの。
- ①公共機関の影響…責任ある公共機関への信頼性が 欠如している。
- 迎マスコミの注目度…マスコミの注目度が高い。
- ⑬事故頻度…重大な事故と, 時に小さな事故が おこる。
- ⑭公平性…リスクと便益が、不公平に分布している。
- ⑤便益(ベネフィット)…便益が、明らかではない。
- 16可逆性…影響が不可逆的。
- ⑰原因…自然現象や不可抗力ではなく,人間の行為や 過失によるもの。

要するに、「能動」より「受動」、「頻繁に起きるもの」より「めったに起きないが、起きるとひどいことになる」ようなリスクはより大きく認知される。そして原発は、これらの要因の多くが当てはまる。これは原発がもつ宿命的な要因といってもよいかもしれない。

だから、「自動車の運転」に伴うリスクとまるで性質が違う「原発」リスクを比べて、原発のリスクが小さいと述べることは意味がない。というよりそのような性質が異なるリスクの比較は、原発のもつリスクを許容させようとする意図を感じさせ、ひいては伝える側の信頼性を損なう可能性さえある。

リスク比較を行う場合には,このような前提に対する 深い配慮を必要とする。

Ⅲ. 伝える側への信頼で認知は変わる

二つ目の要因は、そのリスクを伝える主体に起因するものだ。簡単に言うならば、そのリスクを伝える情報の送り手が信頼されていれば、そのリスクは等身大に受け取られる。信頼されていなければ、もちろんその逆となる。

その「信頼性」とは一般的に、リスクを伝える主体の「能力」と「公正や正直さ」から構成される。不動産業者を例にとるならば、不動産に関する専門知識という「能力」があり、かつその業者が「正直」な人間であれば、買い手は不動産業者が売ろうとしている物件のリスクを等身大に受け取る。そのどちらかが欠ければ、逆にリスクが過大に認知される。

さらに中谷内はこれらに、情報の送り手と受け手の間

で主要な価値が共有されているかどうかを追加している。

原発の場合、情報の送り手である国や電力会社が信頼 されているかどうか。国や電力会社が能力と正直さを十 分に備えているかどうかが、まさにリスク認知に大きな 影響を与えることとなる。

Ⅳ. 受け取る側の属性も影響を与える

三番目の要因が、リスクを認知する側である人間に付 随することがらである。

例えばその人はその対象に対し、どの程度までその内容を理解しているか。あるいは科学技術や公共政策に対する見方、政治的信条、生まれた時代や国、その人が準拠する集団の規範や文化などが、対象がもつリスク認知に影響を与える。

さらに、これらの属性は個人に作用して、現実を認識するための物差しであるフレームを形成する。人々はこの色眼鏡とも言えるフレームを通して、さまざまな現実を認識している。

個人の価値観や規範は、その人が心理的に結びついて いる集団のそれと同調する傾向がある。このため、人々 がもつリスク認知は、その人を取りまく集団がもつ社会 的態度と無縁ではありえないのである。

V. 専門家がもつバイアス

一方,一般的には「客観的」と言われることが多い専門家のリスク認知にも,ある種のバイアスあるいはフレームがひそんでいる。

専門家にしても、それは当該部分の専門家でしかなく、異なる領域では、素人でしかない。けれども専門家は、自らの専門分野で培った専門性を、他の領域にも適応しようとしがちだ。それは場合によっては、狭い範囲内での予測に固執することを意味する。

加えて専門家はその対象に対して、自分の専門的な分野からの視点だけを重視しがちである。例えば原子力の場合、専門家は技術的側面を重視するあまり、その対象や技術を取り巻く社会との関わりの部分を過小視する傾向がある。具体的には原子力の安全性やエネルギー供給面での安定性、コストなどの側面を重視する。しかしながら社会的な側面、例えば施設周辺で暮らす人々が持つ複雑な感情に寄り添った解釈をすることには、相対的に冷淡である。

また、専門家や原子力政策を担う国の担当者は「全体性」を重視し、原発の場合だとこれに反対する市民や住民の利害や要求を「部分的」とみなした上で、「全体」が「部分」の優位に立つとの視点に立ちがちだ。しかし、こうした姿勢は、原発立地点に住む人々にとっては「支配」あるいは「不誠実」の念として受けとられることがある。そして反原発運動は、地域の人たちがもつそうした満た

されない思いの空白を埋めるイデオロギーを提供するものとして成立している部分がある。

VI. 「事実を説明すれば納得してもらえる」とは限らない

一般の人々が科学技術を受け入れないのは、科学的な知識が欠如しているからであり、正確な知識を与えれば納得が得られる——20世紀後半までは、こうした考え方が優勢だった。この説に沿って日本の原発 PA は、いかにわかりやすく伝えるかという技巧的な側面が重視されがちだった。

しかし 1980 年以降になると、こうした考え方は欠如 モデルとして批判される。知識が増加することによっ て、対象に対する人々の態度は肯定的になることも否定 的になることもあることが、明らかになっていく。

これは経済学でも成り立つ。かつての古典的な経済学の多くの理論では、人間あるいは企業は合理的な意思決定をすることを前提とする、合理的選択理論にもとづいていた。しかし行動経済学では、このような想定をとらない。むしろ、「人間は常に合理的な意思決定をとるとは限らない」ことに焦点をあてる。もう少し正確に言うならば、一見非合理的に見える行動の中にも、ある種の合理性が存在することに注目する。

Ⅷ. 非合理と決めつけてはいけない

原発の長短所であれ放射線の利便性やその影響であれ、対象に関する人々の客観的な知識が増加することはよいことだ。ただし、「科学的な根拠にもとづいて事実をきちんと説明すれば、納得してもらえる」とは限らない。情報を受け取る側に見られる非合理性の中には、その人を取り巻く集団が過去との対話の中で形成してきた社会的態度からくるものもある。場合によってはその中に、専門家が見落としがちな大切な視点を含む場合もある。

こうした態度を非合理と決めつけることは、対立と分断をもたらすものでしかない。そして、こうした対立を超えるものとして提起されてきたのが、「参加」や「対話」である。

紙幅は尽きた。そのことについての話はまた、後の機 会に譲ることとしよう。

(2019年3月28日)

- 参考文献 -

- 1) C. Starr, Social Benefit versus Technological Risk, 1969.
- 2) P. Slovic, Perception of Risk, 1987.
- 3) Covello and Slovic, Risk Communication, 1988.
- 4) 中谷内一也, リスク管理機関への信頼: SVS モデルと伝統的 信頼モデルの統合, 2008.



リケジョの思い(6) がんばれ、科学の自分

こんにちは。口町です。前回ふれた通り、学部2年生 の演習授業を担当することになりました。科目は力学。 演習問題を作成して2年生に解いてきてもらい、発表し てもらうという授業です。私は先輩と2人で、演習問題 を作成したり、演習中のファシリテーションをしたりし ています。

前回書いたように、私の中には「科学の自分」がいま す。知識に対して特に疑問を抱かず、知識を好意的に使 おうとする自分です。この自分が、力学を教える間も やっぱり出てきます。「運動方程式を立てて、物体の運 動を予測する。あとは方程式を積分してやればいい。当 たり前のことだ。」というのです。

担演 通 年 看 解 授 生 0 17 知あ 13 気をなう 7 C どうしたら 次解くとキノ けな ti 3 7

「それよりも、この問題をまずは解かなくては。」おや、 一緒に演習問題を解くようです。「ほら、これは座標軸 をこう定義して。物体にはたらく力がこれなんだから、 式はこう書ける。積分するときはこう変形してやればい い。」と、そんな解き方、2年生は思いつくだろうか。か なり天下りになっているけれど…。本当にそれ、2年生 に伴走できてる?え?まずは解けることが優先?毎週締 め切りがあるからって?研究もあるからって?まあ、そ うなんだよな。それもわかる。

あら、もう一人やってきました。科学に違和感を感じ ている自分です。「どうしてそうなるの。次に解くとき にはどうやって解いたらいいの。」確かに、その通りで

> す。科学当たり前の自分、困っています。知識を 使うことはできても、その根拠や動機がわからな ければ、説明するのは難しいんだね。

> しかし、難しいね。力学一つとっても、こんな に途方もない。どのように物体の位置を定義する か、座標系を定義するか。力とは何か。運動の法 則はなんのためにあるのか。微分や積分をしても 良い、数学的な根拠は何か。通り過ぎてきたこと がたくさんある。

> うむ、締め切りは確かに大変だ。しかも毎週、 研究と両立させるのだから。演習問題はできるだ け早めに解こう。 なんなら、解くための時間を決 めてしまおう。そして、先輩や研究室の人たちと たくさん議論しよう。質問しよう。周りの人は きっと多くのことを知っている。修士なのに今さ ら、と思うかもしれない。でも、知らないという のを恥ずかしがって言わないよりも、ずっと良い ことなんだ。結局理解に近づけるんだから。本当 に目指しているのは、そこなんだから。

> 科学当たり前の自分、ここが正念場になりそう です。



(58)

著者紹介

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



~福島浜通りだより~(3)

冬来たりなば春遠からじ

一般社団法人 AFW 吉川 彰浩

福島県の沿岸部浜通り地方は東北のイメージと打って変わって、冬でも雪が降ることはほとんどなく、大変に過ごしやすい気候にある。だが、寒いものは寒いと春の訪れを待つ。待ち望むものは暖かさだけでもない。東京電力福島第一原子力発電所の事故を経験し、避難区域が残る地域では、桜が紡いでくれる人との縁や暮らしの思い出を、今か今かと待ち望んでいた。

4月6日, 双葉郡内で二つの桜祭りが行われた。一つは富岡町夜ノ森地区での桜祭り, もう一つは浪江町請戸川沿いでの桜祭りだ。両町ともに一部に帰還困難区域を残し, 一部避難解除後3年目の春を迎える。

桜の見ごろに合わせて祭りを企画する故に毎年同日に開かれるものであるが、私は双葉郡における二大桜の名所が我が町の桜こそが一番だ!と競い合うような関係性がそこにあるような気がしてならない。桜を愛でる立場からすれば、双方が盛り上がりを見せ、それぞれの良さを満喫させてもらい贅沢な時間を過ごしている。

夜ノ森の桜は見事な桜のトンネルを築いていた。見上げれば、桜の花びらが空の青さを覆い隠している。桜をバックに記念写真を撮り合う姿があちこちで見られた。観光客として訪れるもの、町を離れて久しく再会を喜び合うもの、それぞれがそれぞれの時間を過ごしてきた。私も一人の双葉郡で暮らしてきた人間として歩いていれば、懐かしい面々に巡り合う。あの日からどの様な暮らしの中にいたのか。想像に難くはないが話すことはお互いを懐かしむ話であるし、元気な顔が見られたことが嬉しく、お互いにはにかんでしまう。旧知の仲だけではない、震災があったことで出会った人達がいる。県外の人達が桜というもので繋がり続けることは、地域は人と人とを繋ぎとめてくれる存在だと気付かせてくれる。

長年双葉郡で暮らし、桜咲く季節を迎えていくと、郡 内での桜の楽しみ方がある。浪江町での桜祭りでは花火



を上げるのが恒例になっており、日中は富岡町、夜は浪江町といった楽しみかたがある。富岡町を堪能し、国道6号線に乗り北へと車を走らせ浪江町へ向かっていく。途中、大熊町・双葉町を通り抜けていく、東京電力福島第一原子力発電所が横目で見える。発電所でも桜に合わせて祭りを行っていたことを思い出した。出店を開き、子供たちと交わしたあの日のことが思い出される。帰還困難区域として立ち入りの制限がある両町でも野桜や個人宅に植えられた桜が咲いていた。少しずつ復興を進めていく町と在りし日の町の姿が重なり、この町にも本当の春が訪れることを願った。

浪江町に到着すると、富岡町より 20km ほど北にあるためか、4分咲き程度の開き具合であった。この日、風が強く吹いていたこともあり、コンディションとしてよるしくない状況。これでは…などと思っていたが、日が沈み、祭りの本番である花火の時間が迫ってくると、なんとも粋な出来事が起こり始めた。

風がどんどん弱まっていく。先ほどまで4分咲き程度だったものが、目に見え分る形でもりもりと開いていく。空きが目立っていた会場がどんどんと人が増え、用意されたテーブルが埋め尽くされていった。町民を迎えいれようと、それを演出するような形で風が止み、桜が花開き待ち望んでいたに違いない。

ここでも再会を喜び、懐かしむ姿はあちこちで生まれていた。子供たちも走り回っている。桜を一緒に愛でられることが嬉しくてならない。日が沈み、冷えてきた身体を出店のモツ汁で温める。友人たちと焼き鳥をシェアしながら、花火が上がるのを今か今かと待つ。桜と花火とのコラボレーションを納めようと、カメラを持ち待ち構える人達がいる。

花火が上がった。音楽に合わせて、夜桜を色とりどり に照らしだす。会場が歓声に包まれ、祭りの音が町に響 きわたった。家族と友人と何度も見てきた風景が、思い 出が、ぶわっと思い起こされていく。周りからも感動の 声が聞こえてきた。

帰り道、人気を感じない国道6号線を走りながらも心は晴れやかな自分がいた。春は毎年訪れる、早々に気が急いてしまう。来年もまたこの場所であの人達と会えるだろうと思うと待ち遠しく感じる。その時には何を話そうか。今よりも良い姿に町も変わっていくだろう。「冬来たりなば春遠からじ」という言葉が頭に浮かんだ。

(2019年4月15日記)

視点

〈社会〉を語る

第4回 社会学者は、〈社会〉を記述するべきか、考察するべきか

岡山大学 齋藤 圭介

社会学という学問は、社会の姿が大きく変化した 19世紀はじめに生まれたといわれています。フランスをはじめとする数多の市民革命を経て、社会の構造が王や一部の貴族を頂点としたヒエラルヒー型から、身分制を廃したフラット型になりました。また、イギリスを中心とした産業革命を経て、労働のあり方も様変わりしました。こうした大きな変化をうけて、社会の姿がガラッとかわります。新しい社会が出現することではじめて、いままで当たり前だと考えていた社会を相対化(≒対象化)することができ、社会そのものを扱う社会学という学問が生まれました。

19世紀はじめころは、市民革命や産業革命を経て出現した新たな社会が混乱を極めていた時代です。この時期の社会学に課された学問的使命は、社会の秩序をいかに立て直すかを考察することでした。また、その考察のために、当時の社会で生じていることをつぶさに記述することでした。現代風の言い方をすれば、社会秩序を考察する学としての社会学(=社会哲学・社会理論)と、社会の実態を記述する学としての社会学(=社会調査)の大きく二つの系譜に分かれておりました。

日本の社会学の歴史をみても、戦後しばらくは、主要な問題関心として理論や哲学に関心をもつ社会学者と、 農村地域などで社会調査を行う社会学者に分かれて二大派閥を形成しているような時期が続いておりました。

日本の最近の傾向としては、社会学のなかで社会調査 を重視する傾向が、とくに 2000 年代以降に強くなって きています。その主な要因の一つは、社会学部や社会学 科を有する多くの大学で、学生が〈社会調査士〉資格を 取得できるようになったことです。社会調査士とは、社 会調査の専門家であることを証明する資格です。日本社 会学会を中心に、日本行動計量学会、日本教育社会学会 の3団体が2003年に社会調査士資格認定機構を設立し、 2004年から認定しています(2008年からは一般社団法人 社会調査士協会となりました)。学部教育において、学 生は規定の科目の履修をとおして社会調査の方法論を体 系的に学び、社会調査を行う能力――「情報収集力」、「分 析力 |. 「行動力 | ――を身に付けることができるように カリキュラムが組まれています。現在では約300の大 学・学部がこの資格取得を推し進めており、2018年度時 点で社会調査士を取得した学生は30,900名います。早

ければ学部3年生の時点で社会調査士キャンディデイト(社会調査士見込み)という資格がとれ、就職活動でアピールしている学生も多くいます。大学院でさらに3科目の履修と研究論文の提出で取得できる専門社会調査士は、高度な専門職の資格であり、社会調査の高度な実践能力を有している証明になります。

広くニュースになったとおり、厚生労働省の公式統計 (毎月勤労統計調査)の不正問題が明らかになりました。公的な統計調査については、国の政策を決定するさいの根拠になり政局にダイレクトに影響を与えますので、統計法という法律によって厳しく手続き等が定められております。にもかかわらず、国の重要な基幹統計調査で多くの問題があったのです。私たち社会学者は、この問題を非常に由々しき事態だと強く認識しています。日本社会学会理事会と社会学系コンソーシアム理事会は共同で、この件について公式声明をだしました(声明「基幹統計における不正問題への対応と社会学の協力について」)。こうした不正な統計や調査が蔓延しないよう、社会調査のプロとして、社会調査士や専門社会調査士が専門的能力を活用して社会における社会調査のリテラシーを高める役割を担うことが期待されています。

社会調査士は広く普及し、学部教育を中心とした社会学教育のなかに確たる地位を占めることに成功しました。しかし同時に、現在の学部での社会学教育が、社会調査一辺倒に傾きがちである点を私は危惧しております。社会調査を行うことで社会にある課題を析出し、その解決を目指すという広く行われている現在の社会調査は、社会学のポテンシャルを活かしきれていないと考えるからです。社会学の学問的使命は、目の前の社会的課題を解決するために、社会調査を通して社会現象をつぶさに記述することだけにあるのではありません。社会学の本分は、その調査結果を踏まえて、社会の成り立ちや秩序にまで考察が及ぶところにあります。ここにこそ、行政や民間団体が行う一般的な社会調査と、社会学者が行う社会調査との違いがあるからです。

具体的な社会現象の記述をとおして、目にみえず手で触れることができない抽象的な社会をいかに捉えて考察することができるのか。社会調査における記述を通した考察こそが、社会学者の腕の見せ所といえます。

(2019年5月22日記)

理事会だより



理事会活動をふりかえって

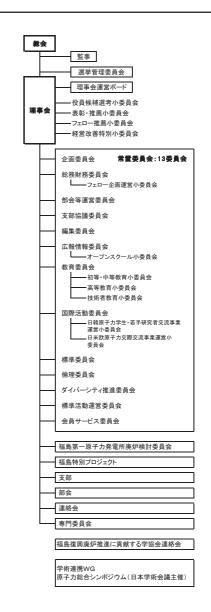
私は、昨年度はじめて理事に就任した新米の理事です。 学会組織を運営する末席に座って1年が過ぎようとして おり、学会のルーティンの活動を一通り見ることとなり ました。新米理事の立場から日本原子力学会理事の活動 を整理・理解してみようと思います。私は原子力学会で は、社会・環境部会に関係する活動に長くかかわってきま した。現在は、社会・環境部会長も兼務しています。しか しながら、元来が文科系の教育を受けた大学教員であり、 社会・環境部会関連以外の活動には学会内ではほとんど 関わったことがありませんでした。もちろん、社会・環境 部会という領域の性質上、理念的には原子力に関する全 ての事柄について知り、また、学会の外からの認識につい ても習熟するべきでありますが、組織体としての日本原 子力学会の細かなところ、特に、理事会を中心とした執行 部の活動の実際については、正直に申し上げて、省みれば それほどには関心を払ってこなかったと思います。会員 のなかには、私がそうであったように、学会組織について 関心があまりない方々も少なくないのではないかと思い ます。この理事会だよりが学会の体制と運営の実態につ いて関心を持たれる一助になれば幸いです。

日本原子力学会は、6月に支部、部会などから選出された代議員による総会において新年度の理事が正式に承認されます。また、総会を中断して開催される新年度第1回の理事会において理事の互選により会長と副会長が選出されます。新年度の活動は、総会の後に新会長、新副会長のもとで開始されます。

学会には、理事会の下に数多くの委員会等が設置されています。理事会の下にあるなかで、地域別の8つ支部と研究領域別の19の部会、5つの連絡会はかなり独自性の高い活動をそれぞれ行っており、これらの支部、部会の意思決定に理事会は直接には関わってはいません。

これに対して、理事会の下に設置されている、13の常置委員会、4つの理事会直轄の小委員会等、7つの小委員会、3つの連絡会・WG等には、理事会が直接に関わっており、各理事が手分けをしてこれらの委員を兼務しています。

これらの計 27 の委員会等では、それぞれ理事数名が 委員を務めています。その委員には、議決権を持つ通常 の委員と、議決権を持たない特別委員がありますが、多 くの委員会では、理事の委員が委員長・主査・代表ある いは副委員長、副主査、副代表、幹事を務めていて、理 事会が深くその活動に関わっています。



一人ひとりの理事にとっては、理事会と共に8~9の委員会(特に、会長と副会長はオブザーバーを含めて11~15ほどの委員会)の委員となり、おおよそ月に4~5回程度一回3時間程の会議に出席が求められます。会議体としての理事会の機能のほとんどは、理事が手分けをして参画している委員会等の活動について、全ての理事が共に検討し承認することにあると言ってよいでしょう。理事会活動の本質は、部会と支部を含めて、どのような委員会等を設置するかによって具体的な活動の方向を定め、それぞれの理事みずから直接に委員会等の活動に関わり実行してゆくことにあると考えます。

(関西大学 土田昭司)