

巻頭言

1 ドキュメンタリーによる意識改革

矢座孟之進

時論

2 社会科学と科学的特性マップ

西川雅史

4 無罪判決と原子力安全

佐治悦郎

解説

23 地層処分システムの性能を評価するための熱力学データベースの整備 — OECD/NEA の TDB プロジェクトと国内外の整備状況

高レベル放射性廃棄物などが地下水に接触したあとの放射性核種の溶解や錯生成挙動を評価するために使用する熱力学データベース (TDB) が国内外で整備されている。

北村 暁

特集 役に立つ放射線：医療への利用

12 高精度放射線がん治療技術と医学物理士の役割

— 理工系研究者の新たなキャリアパス

放射線がん治療では、強度変調放射線治療や陽子線治療などの高精度治療が可能となってきている。また、この技術の発展には、理工系研究者の医学物理学分野へのキャリアパスによる研究開発の発展が重要だ。

西尾禎治

16 放射線治療の高度化と医学物理士

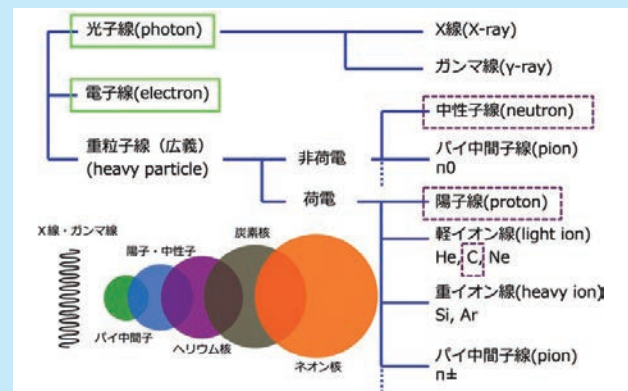
放射線治療は、副作用が少ないがん治療の方法の一つである。近年は正常臓器を守りつつ、標的となる腫瘍だけに集中的に放射線を照射する高度な治療が可能になった。これを行うために「医学物理士」が重要である。

中川恵一、野沢勇樹

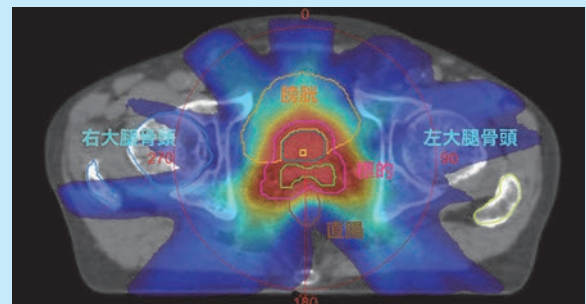
18 中性子捕捉療法のためのホウ素薬剤 研究開発の進展—ホウ素薬剤が今後の 適応疾患拡大の鍵を握る！

BNCT は、患者への負担が非常に少ないがんの低侵襲治療法の1つとして注目されている。早ければ2020年度中に一般的な治療法として承認される見込みだ。

中村浩之



放射線の種類：緑線枠及び紫線枠で囲まれている放射線が現在、放射線がん治療で利用されている



強度変調回転放射線治療を用いれば、標的に集中的に照射することができる。上は前立腺がんの場合

29 Column

- 「イギリスの高校生たちが見た福島」 井内千穂
「グレタ・トゥーンベリさんの国連スピーチに
対する各国の医学生の反応」 妹尾優希
「竹のようになっているだろうか？」 鳥居千智
「「嫌な空気」を晴らして進む」 服部美咲
「科学の心 - チェルノブイリの教訓」 坂東昌子
「デジタル世代の責任」 マイケル瑛美

解説シリーズ

わが国の電力市場の全体像と今後の原子力発電(2)

32 電力市場と原子力発電の収支

自由化で競争にさらされることになった原子力発電の収益は卸電力市場と容量市場、非化石価値取引市場に左右される。海外の事例を見ると、原子力発電の収支は非常に厳しくなる可能性がある。 服部 徹

連載講座 基礎から分かる未臨界(4)

42 臨界安全と未臨界

核燃料物質を取り扱う施設の「安全」を保つための考え方や技術が「臨界安全」である。そのために重要なことは未臨界である条件を明白にしてそれを守ることにある。 山根祐一

Short Report

47 FORATOMの主張にみる欧州の低炭素社会実現に向けた原子力の必要性

2050年に向けて原子力シェア1/4の維持と運転期間の長期化が鍵となる。 大野 薫

日々是好日ー福島浜通りだより(8)

49 当たり前の日常がそこにある 吉川彰浩

視点 社会を語る(7)

50 社会調査に協力することのメリット／デメリット 齋藤圭介

理事会だより

51 秋の大会理事会セッション報告 中山真一

6 NEWS

- 復興庁が年次報告書を公表
- 電気事業者、地球規模のCO₂削減長期ビジョン
- 海外ニュース

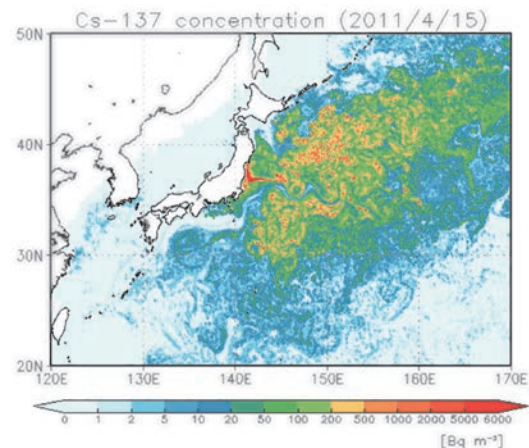
解説シリーズ

最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構(2)

37 1Fの廃炉と環境回復をめざして(2)

今回は1F事故への対処のための研究のうち、廃炉の取り組みを紹介した。今回はその続きと、1F事故対処のもう一つの大きな柱である福島環境回復について紹介する。

佐藤優樹, 川瀬啓一, 飯島和毅, 小林卓也



福島第一原発事故の再現計算例

2011年4月15日におけるセシウム137の海面濃度分布

22 From Editors

52 会報 原子力関係会議案内, 新入会一覧, 主催行事案内, 日本原子力学会 基金寄付者芳名一覧, 英文論文誌 (Vol.57, No.1) 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>

ドキュメンタリーによる意識改革

巻頭言



東京学芸大学附属国際中等教育学校 5年

矢座 孟之進 (やざ・たけのしん)

高校1年生の4月からドキュメンタリー映画「日本一大きいやかんの話」の制作を始める。これまで「中学生サミット」や国内外の高校で上映を行ってきた他、高校生として初めて福島映像祭での上映を行う。東京都出身、アメリカ在住経験あり。

僕は高校1年生の4月から「ドキュメンタリー作品による原子力発電に対する意識改革」というテーマで研究を行っている。研究目的は、若年層の原子力発電やエネルギー問題に対する関心や知識の向上を促し、これらの諸問題について話し合うベース作りをすることだ。研究を始めたきっかけは、中学3年生の時の社会科の授業で原発に関するディスカッションを行ったときに、議論が全く進まなかったことに違和感を感じたことだった。それ以来、賛成派と反対派の橋渡しを行うために原発に関するドキュメンタリー映画を制作する活動と、その上映を行って映像の効果の検証をする研究をしている。

これまで、東京電力などの企業、エネルギー政策研究所などのNPO、大学など公的機関の研究者、フランスの原子力参事官などの政府関係者などにインタビューしてきた他、福島県の被災地や幌延新地層研究センターなどに足を運び取材を行ってきた。上映は福島県、東京都、岡山県、米シカゴ州などの高校や、最終処分地問題をテーマとした中学生サミットなどで中高生を中心に上映を行ってきたが、最近では福島映像祭で上映を行うなど、より広い層の観客に対して上映を行っている。

これまで上映会では、上映の前後でアンケートを実施してきた。アンケートの分析をした結果、上映後に関心が向上したと答えた者の多くが、原発に対する意見に変化があったと回答していた。興味深いのは、これが東京の中学生であろうと、福島の高校生であろうと、中学生サミットであろうと、同様の結果が得られたということだ。関心が向上した理由の記述を見ると「知らないことを知ることができたから」「自分は今まで偏った視点で原子力発電を考えていたことに気づいたから」というように新しい知識や視点が身についたからといった内容がほとんどだった。また、意見に変化があった理由の記述を見ると、単純に賛成から反対に、あるいは反対から賛成に変わったというわけではないことがわかる。「フランスの原発の利用の仕方を知ったから」「自然エネルギーについて詳しくしれたから」とあり、一方から他方に意見が変わったのではなく、自分とは違う意見を取り入れることができるようになったことで変わったと回答している生徒が多かった。

ここから予想されることは、50分のドキュメンタリーを見ることでたくさんの生徒の意見に変化があったということは、やはり少量の情報で安易に意見を決めてしまっていたのではないかということだ。一方で、このドキュメンタリーによって多くの生徒が自分と違う立場の意見を取り入れ、この問題を多角的に捉えられるようになったのも事実である。このように様々な視点から原発を捉えられるようになることは賛成派と反対派の橋渡しへ繋がるものだと思う。

制作開始前の僕の原発に対する意見は賛成派に近いものだったが、調査を重ねて原発問題について知れば知るほど自分の中で迷いが生まれていった。今の僕の状況を表す言葉があるとすれば、葛藤に他ならないと思う。考えれば考えるほど、調べれば調べるほど、答えがわからなくなっていく。これだけ難しい問題なのだから、簡単に答えを出してはいけない。なるべく多くの同世代を巻き込んで、一緒に葛藤し、共に答えを見つきたい。アメリカ人がよく使う言葉で“Fight fire with fire”というものがある。若年層の原発に対する意識改革を行うためには、同じ若年層が行動を起こさないといけないと思う。だから僕はこのドキュメンタリーを作っている。

(2019年11月22日記)



社会科学と科学的特性マップ



西川 雅史 (にしかわ・まさし)

青山学院大学経済学部教授
法政大学経済学部を卒業し、1999年に法政大学大学院社会科学研究科経済学専攻博士課程単位取得。郵政省郵政研究所研究官などを経て現職。専門・関連分野は、公共選択論、地方財政、地域経済論。

I. 社会科学の研究者と原子力政策

高レベル放射性廃棄物(HLW)は既にして存在しており、その処分地の選定は避けることのできない重要な政策課題であるものの、その選定作業は遅々として進んでいない。社会科学の研究者は、高度に科学的な原子力政策へ言及することに躊躇いがちであるが、処分地選定へ向けて社会科学の研究者にも担うべき役割はあるし、一定の貢献ができるはずである。以下では、筆者が参加する研究グループの成果を踏まえて、時間軸に沿いつつ処分地選定への障害を整理し直し、社会学者が貢献し得る可能性について述べてみたい。

II. 反対派の専門家

政府は、HLWの最終処分地の選定を加速するため「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」を2000年に制定し、2002年12月には原子力発電環境整備機構を通じて調査対象地域の公募を開始した。2003年から2016年までの間に前向きな意思を表明した市町村は、私たちが調べた範囲で延べ20団体あったが、その中で公式に応募手続きにまで進んだのは高知県東洋町(2007年)だけである。その東洋町でも、現職町長(当時)が誘致の推進を表明すると即座に町内外の反対派(橋本大二郎高知県知事と飯泉嘉門徳島県知事を含む)から批判の声が上がり、出直し町長選挙で現職候補が敗れると東洋町からの応募は取り下げられた。誘致を表明した他の19団体においても、意思表示からごく短期間で発言が撤回された事例が多い(西川・高橋・斎藤(2019))。

誘致表明から撤回までの非常に機敏な反応は、一般市民がHLWを学習するだけの暇を与えていない。一般書籍(例えば、滝川1991、山秋2007)によれば、原子力関連施設にまつわる反対運動は、地域外の活動家・専門家と地域住民とが協力しあうことで迅速化・強化されていることから、地層処分施設への機敏な反応もこれらと同じ背景を有するものと考えてよいであろう。Ramana(2018)は、原子力発電所を廃止すれば、既存の使用済核燃料の処分問題は比較的容易に解決できるであろうと喝破したが、原子力発電に反対する人々の一部は、原子力

発電に反対するために、地層処分施設の建設にも反対しているのではなかろうか。

また、経済的に考えてみると、どのような施設であれ開発に反対する者には特有の優位性がある。ある開発行為(ここでは、地層処分施設を設置すること)を推進すべきであると考えた肯定派の専門家は、開発に関するリスクや費用を過小に説明したり、関連する便益を過大に説明することはできない。彼らの主張が通って施設が完成すると、その費用と便益とが実現し事前に行っていた主張の妥当性を検証されてしまうためである。これに対して、開発行為を推進すべきではないと考える反対派の専門家は、その主張が通れば施設は建設されないため、事前に予想される費用や便益をどのように説明しようとも、その妥当性は検証され得ないことから過剰な発言を控える必要性が乏しい。こうした構造によって反対派の主張は相対的に過剰なものとなりがちで、世論もこれに影響を受けるかもしれない。

III. ことを荒立てたくない政府

2014年に閣議決定された「エネルギー基本計画(第4次)」では、政府はこれまでの方針を大きく転換し、各市町村が自発的に処分施設の受け入れに手をあげてくれるのを待つだけでなく、国が前面に立って最終処分に向けた取組を進めることとされた。この動きが具体化した一例が「科学的特性マップ」の公表(2017年7月)である。このマップでは、意図的に社会科学的観点を考慮しないことを『科学的有望地の提示に係る社会科学的観点的扱いについて』において明言した上で、科学的特性などから見たときに、わが国の沿岸部の大半が地層処分を行う上で好ましい条件を満たす可能性が相対的に高いことが示されている。

科学的特性マップを作成した主目的が地層処分について広く国民の理解を得ることであるならば、各地の人口規模や産業集積などの社会的特性を考慮外としたのは残念であった。なぜならば、一般国民の感覚からすれば、都市的地域での施設立地は、用地取得費が高くなることや、万が一事故が発生したときに多大な再建コストが必

要になることなどを容易に想像できるため、これら社会的費用を考慮していない資料では、現実味のある議論ができないと感じられたであろうからである。また、科学的特性マップでは「おおよそ日本の沿岸部はどこでも科学的には安全性が高そうです」と描画されているが、これでは選択肢があまりに茫洋としすぎている。それゆえ、科学的特性マップは、第三者が社会的条件などを加味し、具体的に候補地を絞り込んでいくための基礎資料とでも位置づけられるべきものなのであるが、二次利用を妨げるかのように画像データのみが提供されている実情では、その役目すら果たし得ない。2015年5月に閣議決定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」では、「最終処分事業を円滑に推進するための社会的側面に関する調査研究も進めていくことが重要であり・・・」と記述されていたことからすれば、政治的な熱量が急激に下がってしまった顛末とでも言えようか。そこには、「原子力」という政治的リスクを孕む 이슈 に触れたくないという政治家の本音も垣間見える。

IV. 推進派の非形式的誤謬

原子力政策を推進すべき政府と、そのブレーンとなっている専門家は、客観的あるいは技術的な事実として、HLWを地層処分するための施設に関するリスクを極めて低く見積もっているかもしれない。しかしながら、一般国民はこれを危険だと認識している。国民の認識する危険性とは、科学的・客観的な事実だけに依存するのではなく、主観的な感情や態度にも強く依存していることを数多くの先行研究(主として社会心理学の係累)が指摘している。こうした一般国民の主観的な感情、端的に言えば高レベル放射性廃棄物への不安を軽視している点に推進派集団の非形式的誤謬があるのではないかと。

もし、人々の不安に配慮すれば、処分施設の受け入れ先には何らかの補償が必要となり、その費用を最小化しようとするれば、人口規模が小さい地域を選定するのが自然である。さらに思い切ったことを言えば、国民が処分施設を危険だと認知しているならば、低人口地帯を創出することこそが肝要なのであるから、立地予定先の住民の転出促進策(例えば、ふるさと喪失の支払い)を検討することが本筋なのであって、地域活性化策を提示する現在の政策指針は見当違いであるかもしれない。こうした選択肢は、安全性の高さを信じる立場からは見えにくいであろうが、社会的に望ましい処分施設の立地先を選定するためには、あらゆる選択肢を机上に並べて比較検討すべきである。

V. 社会科学の研究者の役割

原子力政策に対する国民的反感を恐れる政府は、地層

処分先の具体的な選定にまで踏み込むことに躊躇する。地層処分の技術的安全性を理解している工学系技術者の矜持からすれば、一般国民の感情的なリスク認知に振り回されることに抵抗があろう。社会科学の研究者は、政治的呪縛や技術者のプライドから離れ、リスクへの懸念を国民と共有しつつ、主観的な基準によって自らが妥当であると考えられる候補地(社会的費用と便益とを思料した結論)を提案することができる立場にあるのではないかと。個々の研究者による具体的な候補地の提案は、自らの研究成果に基づいて国民へ説明できるものでさえあればそれで良く、「正答」を求められているわけではなかろう。数多くの具体的な提案がなされていけば、それらが相互に比較考量され、淘汰され、陶冶され、国民にとって受入可能な「正答」へと自生的に近づいていくものと期待できるのではないかと。こうしたプラグマティックな意思決定プロセスを機能させるための土台を科学的特性マップは提供できるはずであるが、第三者による利用が困難な使い勝手の悪い画像データのままで如何ともし難い。西川・高橋・斎藤(2019)は、この課題を克服するために、科学的特性マップをデジタルデータ(シェープファイル)の形で再現・公開し、GISソフトウェアを用いて多様な手法で容易に分析ができる素地を提供している。例えば、複数の条件(科学的、社会的)に外生的なウエイトを与えることで、各地点の好ましき度合いを得点化し比較することなどもできよう。ここでいう考察対象としての「各地点」とは、行政区を細分化した小地域でも構わない。例えば、民間の宇宙ロケット発射場を誘致した串本町の「田原地区」のようなエリアである。より極端な例では、鹿児島県十島村が防衛省施設を誘致した臥蛇島や、東京都小笠原村の南鳥島のような離島についても、それぞれの好ましき度合いを考察することが技術的には可能となろう。

さまざまな立場にある研究者(特に、社会科学の研究者)が、それぞれの考え方に基いて、具体的に地層処分の候補地を提案していく状況になることを期待したい。

(2019年11月5日記)

— 参考文献 —

- 1) 滝川康治(1991)『幌延-核のゴミ捨て場を拒否する』、技術と人間。
- 2) 西川雅史・高橋朋一・斎藤英明(2019)。「科学的特性マップのデジタル化」、MIMEO。
- 3) 山秋真(2007)。「ためされた地方自治」、桂書房。
- 4) Ramana, M. V. (2018). "Technical and social problems of nuclear waste." *WIREs Energy Envision*, 7, c289.



無罪判決と原子力安全



佐治 悦郎 (さじ・えつろう)

日本原子力学会理事・フェロー、博士(工学)、元炉物理部会長
旧原子力安全委員会事務局にてリスク情報を活用した安全規制の基本方針とりまとめや原子力安全白書執筆等を担当、元原子力安全委員会専門委員、元総合資源エネルギー調査会臨時委員

I. はじめに

去る9月19日、東京地方裁判所は業務上過失致死傷罪に問われた東京電力旧経営陣3名に対し無罪判決を言い渡した。福島第一原子力発電所事故(1F事故)を引き起こした巨大津波を事前に予測できる可能性があったとは認められないというのがその理由である。

最初にお断りしておくが、筆者はこの判決の是非を論じるつもりはない。もとより法律の専門家ではなく、その能力もない。本稿では一般の判決を発端として、筆者が感じている我が国の原子力安全への取組みの課題について論じてみたい。

II. 刑事責任と原子力安全確保

「巨大津波を予測できる可能性があったとは認められない」とは何を意味するのであろうか？

改めて判決要旨を読んでみると、「可能性」という言葉で、高い信頼性、具体性のある根拠を伴って予見できたか否かを問うていると理解できる。つまり、一般的な感覚としての「可能性」よりは、より確定的な意味合いをもたせている。刑事責任を問うとはそういうことなのであろう。

巨大津波を事前に予見できたか否かの技術的争点となったのが、文部科学省地震調査研究推進本部による「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について」(長期評価)の信頼性である。結果的に判決は、この「長期評価」を予見可能性を生じさせるほどに信頼性があるものではないと断じたのであるが、この結論は刑事責任を問えるか否かの判断に直結することを念頭に置いたものであることを忘れてはならない。

1F事故後、この「長期評価」をはじめとして「巨大津波」は予見できたとする見方も様々なところで言われているが、その可否について論じるのが本稿の目的ではない。しかし、少なくとも刑事責任を否定した今回の無罪判決が、不確かな情報も含めあらゆる知見を総動員して原子力の安全確保を目指すという1F事故後の原子力関係者の決意に水を差すものであってはならない、ということは強調しておきたい。

III. 不確かさと向き合う原子力安全

今回の判決は、我々の言葉に置き換えると「決定論的評価」の観点から予見は困難としたものであると考える。仮に設計基準津波を「長期評価」並みに引き上げると考えると、ドライサイトを基本とする津波対策¹⁾としては、巨大防波堤を建設しなければならず、当時の知見に照らしてその判断が困難であったであろうことは想像に難くない。しかし、判決要旨をよく読むと、当時の東電では「確率論的評価」も試みられていて、その結果は「性能目標²⁾」に照らして無視できない値を示していたことが判る。その結果が、防波堤建設とまではいかなくとも設計基準高さを超えた津波に襲われたときのための安全対策(ex. 非常用発電機を電源盤とともに高台に設置)につながらなかったことは残念であるが、我々はこれを重い教訓としなければならない。つまり、それまでも実施されてきた内の事象に対する設計基準事象を超えた場合の安全対策(シビアアクシデント対策)を外的事象にまで拡張させて対策することの重要性である。不確かな情報、とりわけ不確かさが大きい低頻度高影響の外的事象についても得られた知見を総動員して合理的なリスク低減方策を探る必要があり、そのためには確率論的リスク評価(PRA)が不可欠となる。

この認識は1F事故後、多くの関係者間で共有されることとなり、あちこちで指摘された³⁾。事故直後にIAEA総会で報告された日本国政府報告書⁴⁾においても、「原子力発電施設のリスク低減の取組みを体系的に検討するうえで、これまでPSAが必ずしも効果的に活用されてこなかった」として、今後のPSA(=PRA)の積極的かつ迅速な活用を促している(教訓27:「リスク管理における確率論的安全評価(PSA)の効果的利用」)。いうまでもないことだが、1F事故を契機としたこの種の提言は外的事象のPRAを念頭においていることを今一度確認しておきたい。我が国における原子力事故のリスクは外的事象起因が支配的であるということは1F事故以前から関係者間では共有されていた。しかし、不確かさが大きく取り扱いが難しいこのリスクに正面から向き合うことをためらい、そして1F事故が起きてしまっ

た⁵⁾。事故直後、関係者はそのことを率直に認めて反省し、今こそ、不確かさが大きくとも真のリスクに正面から向き合って原子力の安全性向上を目指そうと誓った、と筆者は思っている。

IV. いつか来た道？

我が国で、事故を契機としてPRA(PSA)の重要性がクローズアップされた、というのは実は1F事故後が初めてではない。今から20年前のJCO事故直後から、国の規制関係組織を中心として安全目標やリスク情報の活用に関する検討が盛んになり、いくつもの報告書がまとめられた。しかしながら検討から実践につながることはなかった⁶⁾。

さて、1F事故から8年半経った現在の状況はどうであろうか？

経済産業省は2013年7月、総合資源エネルギー調査会の下に「原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループ」を立ち上げ、翌年(2014年)の5月に「提言」をとりまとめたが、そこには「PRAの実施に注力すべき」旨が盛り込まれた⁷⁾。そして、それを受けるかっこうで翌月(6月)に各事業者から一斉に公表された安全性向上の取組み⁸⁾には、例外なく、PRAを活用することが謳われている。

PRAの実施という観点では確かにかなりの進展があったように見える。原子力規制委員会は重大事故シナシケンス選定の妥当性確認にPRAを利用するとし、また、安全性向上評価届出においてPRA実施を事業者に義務付けた。しかし、安全対策の意思決定という意味では未だ本格的な利用に至っていないのではないだろうか。

昨年、各事業者が合同でまとめた「リスク情報活用の実現に向けた戦略プランおよびアクションプラン」(平成30年2月)を見て驚いた。「外的事象(地震、津波、火山等)に対しては、リスク評価は当面決定論的な評価を実施する。」と記されていたのである。1F事故の教訓としてPRAを実施するとは、外的事象への備えに重きを置いた取組みではなかったのか？

なお、外的事象のPRAの扱いについては、「NRRCⁱ等による研究開発の成果を順次導入していく」とあるのだが、こうした手法整備の必要性を理由にした実用の先送りこそが1F事故の反省だったのではなかったのか？⁹⁾

我々はまたもや同じ道を歩んでしまうのであろうか？

V. 終わりに

1F事故を経て、各原子力発電所には様々な安全対策が施され、その安全性は事故以前と比較して飛躍的に高

まったことは事実である。しかし、筆者は本稿で述べてきた通り、一抹の不安を覚えるのである。

エネルギー政策論の第一人者であった故・澤昭裕氏(元21世紀政策研究所研究主幹、元国際環境経済研究所所長)は、亡くなる直前、「原子力を殺すのは、原子力ムラ自身である」¹⁰⁾と喝破され、原子力界の自覚と変革を促されたが、その声は届いたのだろうか？

原子力発電所の再稼働が進み、業界が息を吹き返すとともに1F事故の教訓が薄れていくこと、今般の無罪判決で業界が誤ったメッセージを受け取ってしまうこと、そんな心配は杞憂だと信じたい。

確実な情報でなくては信じてはならない、というのは愚かな話だ

「クラウゼヴィッツ語録」(加藤秀治郎編訳、一藝社)

より

(2019年10月21日記)

－ 参考資料 －

- 1) 成合英樹, 「時論 学術会議報告『我が国の原子力発電所の津波対策』」, 日本原子力学会誌, 61,702(2019).
- 2) 「発電用軽水型原子炉施設の性能目標について—安全目標案に対応する性能目標について—」, 原子力安全委員会安全目標専門部会(平成18年3月28日).
- 3) 「福島第一原子力発電所事故 その全貌と明日に向けた提言—学会事故調 最終報告書—」, 日本原子力学会(2014年3月)など.
- 4) 「原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について」, 原子力災害対策本部(平成23年6月).
- 5) 竹内純子, 「原発は“安全”か—たった一人の福島事故報告書」, 小学館(2017年1月).
- 6) 斎藤飾, 「リスク情報の活用はなぜ進まなかったのか?—原子力産業界を束ねる新組織への期待—」, 国際環境経済研究所ホームページ <http://ieei.or.jp/author/saito-kazaru/> (2015年10月28日).
- 7) 「原子力の自主的・継続的な安全性向上に向けた提言」, 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループ(平成26年5月30日).
- 8) 「原子力発電の安全性向上に向けた自主的かつ継続的な取組みのさらなる充実について」, 関西電力ホームページプレスリリース2014 https://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2014/0620_1j.html (2014年6月20日)など.
- 9) 平野光将, 「地震等外的事象に対するリスク評価は十分か?」, 日本原子力学会誌, 56,176(2014).
- 10) 澤昭裕, 「戦略なき脱原発へ漂流する日本の未来を憂う」, Wedge2016年3月号 <https://wedge.ismedia.jp/articles/-/6464>

ⁱ 電中研原子力リスク研究センター



復興庁が年次報告、原子力災害による避難者は2万3千人

復興庁は2018年11月22日、「東日本大震災からの復興の状況に関する報告」を公表した。復興に関するこの1年間の動きをまとめたもので、原子力災害については双葉町を除いた10市町村において帰還困難区域を除いた避難指示が解除され、復興と再生に向けた動きが本格的に始まったと述べている。

報告では廃炉対策について、2号機では燃料デブリと思われる堆積物をつかんで動かせることを確認。汚染水対策では昨年まで2018年9月までに凍土壁が完成し、汚染水発生量は大幅に抑制されたと記述した。しかし、タンクに保管されている処理水は2019年9月時点で116万立方mに達しており、タンク増設適地は限界を迎えつつあることから、処理水の取り扱いについては風評

被害など社会的な観点を含めた総合的な検討を進めているとした。

中間貯蔵施設整備に必要な用地については全体の7割を取得し、2018年度には184万立方mの除去土壌を輸送。福島県内に仮置きされている除去土壌は2021年度までに搬入完了をめざす計画だ。除染については帰還困難区域を除くすべてで面的除染を完了。避難住民や事業者に対しては総額約9兆2千億円の賠償金が支払われた。

なお、大震災による避難者は4万2千人(2019年11月時点)、原子力災害による避難指示区域からの避難者は2万3千人(同4月時点)となっている。

(原子力学会誌編集委員会)

電気事業者が地球規模のCO₂削減で長期ビジョン

国内電気事業者47社で構成される「電気事業低炭素社会協議会」は2019年10月2日、2030年度以降を見据えた地球温暖化対策に係る長期ビジョンを発表した。

2016年に設立された同協議会では、政府が示す2030年度のエネルギーミックスに基づき、同年度にCO₂排出係数0.37kg/kWh程度とする数値目標を掲げ、電気事業全体で実効性ある地球温暖化対策の推進を図っている。2019年6月には、「2050年までに80%の温室効果ガス排出削減」に取り組むとするパリ協定長期成長戦略が閣議決定されており、協議会でも2050年に向けて、今後の電気事業における地球温暖化対策に関し会員事業者勉強会開催などを通じ検討を進めてきた。

こうした状況を踏まえ長期ビジョンでは、2030年度以降の大幅なCO₂排出削減に向けて「イノベーションが不可欠」との考えから、従来から取り組んでいる「電気の低炭素化」(供給サイド)と「電化の促進」(需要サイド)の各観点から、CO₂排出削減のために期待される革新的技術

をまとめた上で将来の絵姿を示した。

原子力による電力供給では、安全確保を大前提とした再稼働と核燃料サイクルの推進に加え、革新的技術として小型モジュール炉(SMR)、熔融塩炉、高温ガス炉、核融合炉を列挙。SMRについては過疎地域への導入や需要増に合わせたモジュール増設の可能性を、高温ガス炉については高い発電効率や熱電併給システムの構築などをメリットとしてあげている。

このほか地上に比べて自然条件に左右されない宇宙太陽光発電、エネルギー密度と安全性を両立する全固体リチウムイオン電池、火力発電で排出されるCO₂を再利用するCCU技術や、運輸・産業・民生の各部門での高効率な電化技術の推進、海外貢献として低炭素型インフラ技術の輸出などがあげられており、これらの取組を通じ「地球規模でのCO₂排出削減」を目指すとしている。

(資料提供：日本原子力産業協会)

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

IAEA の新事務局長にアルゼンチンのグロッシ大使

国際原子力機関(IAEA)の加盟国中 35 国で構成される理事会は 2019 年 10 月 29 日、天野之弥事務局長の後任指名のため同日に実施した選挙で、在ウィーン国際機関アルゼンチン政府代表部のラファエル・M・グロッシ大使(58)が過半数の 24 票を獲得し、新たな事務局長に決定したと発表した。

2019 年 7 月に天野事務局長が任期半ばで死去した後、アルゼンチン、ブルキナファソ、ルーマニア、スロバキアの各国政府は、9 月 5 日までに理事会に対し、それぞれの後任候補者を推薦。10 月 10 日以降、当選に必要な 3 分の 2 以上の票数を獲得する候補者が現れるまで、理事会で非公開の投票が重ねられていた。

今後は全加盟国の参加も可能な理事会を開催して、グロッシ大使を任期 4 年の新事務局長に指名。さらに、この決定を臨時総会に提出し、これら 171 加盟国の代表から承認を得るとしており、同大使は 2019 年中に 6 人目の IAEA 事務局長に就任する。1957 年に IAEA が設立されて以来、米国、スウェーデン、エジプト、日本が歴代事務局長を輩出しており、グロッシ大使は初の南米からの選出となる。

グロッシ大使は学生時代、政治学で学士号、国際関係学で修士号を取得したほか、国際史と政治学および国際関係学で博士号を取得。IAEA では 2010 年～2011 年まで事務局長室のトップ、その後 2013 年までは政策関係の幹部職(Assistant Director General for Policy)も勤めた。

アルゼンチン国内では、連邦計画・公的投資省の戦略計画委員会でも原子力問題の特別顧問、外務省の政策調整官、アルゼンチン宇宙活動委員会(CONAE)の特別顧問などを歴任。国際機関関連では、化学兵器禁止機関(OPCW)の事務局長室や北大西洋条約機構(NATO)のアルゼンチン政府代表部で外交活動を担った。また、IAEA に加えて包括的核実験禁止条約機関(CTBTO)、国連薬物犯罪事務局(UNODC)、国連工業開発機関(UNIDO)でも、アルゼンチン大使を務めている。

2015 年に国連安全保障理事会国+ドイツが結んだイランとの核合意(「包括的共同行動計画(JCPOA)」)は、米国の離脱により、ますます危機的状態に陥っているが、現地報道によると同大使は、この問題も含めて IAEA の役割を確実に、しかし「公平に」扱っていきたいとしている。

【ロシア】

事故耐性燃料の原子炉試験で第 1 段階が完了

ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社の傘下で、核燃料の濃縮・転換・成型加工を担当する TVEL 社は 2019 年 10 月 31 日、同国で初めて軽水炉用に開発した事故耐性燃料(ATF)の原子炉試験で第 1 段階が完了したと発表した。

同社は 2019 年 1 月、ウリヤノフスク州ディミトロフグレードにある国立原子炉科学研究所(RIAR)で、ロシア型 PWR(VVER)用と外国製 PWR 用の実験集合体 2 体を、所内の MIR 材料試験炉に装荷。同炉の水流ループで設計外事象発生時の ATF の耐性を試験するため、それぞれ 2 種類の燃料ペレットと被覆管を使って、合計 4 通りの異なる材料を組み合わせた ATF 燃料棒を 1 体につき 24 本ずつ組み込んでいた。

同社は今後、原子炉試験をさらに拡大していく方針で、2020 年は ATF 燃料棒を含めた(取替用燃料 1 回分の)実験集合体を商業用の 100 万 kW 級 VVER に装荷する計画。また、新たな有望材料を燃料ペレットと被覆管に組み合わせ、最適な ATF を模索していくとしている。

今回の原子炉試験で TVEL 社は、被覆管としてジルコニウム合金にクロムをコーティングしたものと、クロムとニッケルによる合金製を使用。燃料ペレットについては、従来型の二酸化ウラン製のものに加え、高い密度と熱伝導率を持つウランとモリブデンの合金を使った。

初回の照射サイクルを終えたこれらの実験集合体は、すでに MIR 材料試験炉から取り出されており、モスクワにあるロシア無機材料研究所(VNIINM)の専門家が予備的な試験を実施。その結果、燃料棒の形状や被覆管表面に変化や損傷は認められなかった。また、それぞれの燃料集合体から燃料棒を何本か抽出して照射後材料科学研究を行っているほか、未照射の燃料棒をさらに MIR 材料試験炉に装荷する試験も実施中だとしている。

ロシアの ATF コンセプトは、冷却材の喪失など、原子力発電所で過酷な設計基準外事象が発生した際の耐性を高めることが主な目的。炉心からの崩壊熱除去に失敗した場合でも、ATF は蒸気とジルコニウムの反応によって水素が発生するのを抑えつつ、長時間にわたって健全性を維持するよう設計されており、ATF は原子力発電所に全く新しいレベルの安全性と信頼性をもたらすと TVEL 社は指摘している。

第3世代+の120万kW級PWR, ノボボロネジⅡ-2が営業運転開始

ロシアの民生用原子力発電公社であるロスエネルゴアトム社は2019年11月1日、モスクワの南約500kmに位置するノボボロネジ原子力発電所で、Ⅱ期工事2号機(PWR, 115万kW)が予定より30日前倒しで営業運転を開始したと発表した。

出力3万kW以上の商業炉としては同国33基目のもので、これにより原子力発電設備容量は3,000万kWを越えた。また、ロシアで開発された第3世代+(プラス)の120万kW級ロシア型PWR(VVER)「AES-2006」としては、2017年2月と2018年10月にそれぞれ営業運転を開始した同発電所Ⅱ期工事1号機(118万kW)、レニングラード原子力発電所Ⅱ期工事1号機(118.8万kW)に次いで国内3基目となる。

ベラルーシやバングラデシュ、トルコなどでは、すでに同設計を採用した原子炉を建設中であるほか、ハンガリーやフィンランドでも計画中。中国で建設する話も提案されている。ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社は、ノボボロネジ発電所で完成した2基を参考炉として、海外で同設計をさらに建設していく考えである。

ロスアトム社によると、同設計は第2世代の100万kW級VVER「VVER-1000」と比較して、経済面と安全面で数多くの利点がある。出力が20%向上した一方、必要とする運転員は30%~40%削減され、公式の運転期間も「VVER-1000」の30年から60年に倍増。さらに20年間、延長することも可能である。

2009年7月に本格着工したノボボロネジⅡ-2号機は、同発電所Ⅰ期工事のVVER×5基(1号機:21万kW, 2号機:36.5万kW, 3,4号機:各41.7万kW, 5号機:100万kW)から数えて7基目にあたるが、1号機から3号機は1984年から2016年までの間に永久閉鎖されている。

Ⅱ-2号機では2019年2月に燃料が装荷され、3月に初めて臨界条件を達成。5月には送電を開始しており、営業運転を開始するまでに25億kWhを発電した。また同炉により、ロシア中央連邦管区の原子力発電シェアは27%に増加。同管区における経済成長を一層促進しつつ、CO₂も年平均で400万トン分、排出を抑えられるとしている。

【イラン】

プシェール発電所でロシア企業が 2号機を本格着工

国連安保理の5か国とドイツ、および欧州連合が2015

年にイランと結んだ「核合意」から米国が離脱し、イランもウラン濃縮量を拡大するなど、同合意が崩壊の危機に瀕するなか、ロシアの国営通信社を母体とするRIAノーボスチ通信社は2019年11月10日、商業規模の原子力発電所としては中東唯一というイランのプシェール発電所で、2号機(PWR, 105.7万kW)の原子炉系統部分に最初のコンクリート打設が行われたと報道した。

イラン駐在のロシア大使館から得られた情報だとしており、イラン原子力庁(AEOI)のA.サレヒ長官と、建設工事を受注したロシア国営原子力総合企業ロスアトム社のA.ロクシン第1副総裁は、双方が署名した記念のコンクリート・キューブ(立方体)を交換。プシェール発電所がイランの長期計画通り、現在稼働中の1号機に続き、2,3号機が2026年までに運転開始すれば、AEOIは同国の原子力発電設備容量が300万kWを越えると指摘している。

イラン南西部に位置するプシェール発電所では、2011年5月にイラン初の商業炉となる1号機(PWR, 100万kW)が初めて臨界条件を達成し、同年9月から国内への送電を開始。建設工事を請け負ったロスアトム社傘下のNIAEP-ASE社は、2016年4月に同炉をイラン側に正式に引き渡した。

2014年11月にロスアトム社は、同発電所Ⅱ期工事となる2,3号機の増設契約をイランの「原子力発電開発会社(NPPD)」と締結した。これと同時に、両国間の既存の協力協定を補完するための議定書にロスアトム社とAEOIは調印。ここでは、同発電所でロシア型PWR(VVER)をさらに2基、その他のサイトでも4基をターンキー契約で建設することが明記された。

これら8基の原子燃料はロシアが供給するとともに、使用済燃料も再処理・貯蔵のためにロシアが引き取る約束。両国の協力は平和利用分野に限定され、国際社会が危惧する核兵器開発への転用疑惑は払拭されるとしている。

ロスアトム社は、プシェール発電所Ⅱ期工事の起工式を2016年9月に執り行っており、2,3号機は1号機と同様100万kW級のVVERになると説明。最新の安全性能を有する第3世代+(プラス)の「AES-92」設計を採用するため、動的と静的両方の安全システムや二重の格納容器が装備されるほか、欧州電力会社要求事項(EUR)の技術要件にも適合するとした。

2号機用の地盤掘削作業などはすでに2017年に始まっており、これまでに300万立方m以上の土砂が掘削され、ベースマットには3,000トンの鉄筋コンクリート、35万トンものセメントを使用。最初のコンクリート打設を実施したことにより、AEOIは建設プロジェクトの約30%が完了したことになると強調している

【チェコ】

産業貿易省、2040年までに新規原子炉の必要性を強調

チェコの産業貿易省は2019年10月21日、国営送電会社(CEPS)が取りまとめた「(国内の発電システムに関する2040年までの)中期的適性評価予測報告(MAF CZ 2019)」で、国内の電源が今後大幅に減少していくと予測されたことを踏まえ、国内2つの原子力発電所で新規原子炉の建設準備を進めるなど、電力消費量をカバーするための努力が必要だと訴えた。

CEPSの最新報告書によると、チェコにおけるエネルギーの自給と電力供給に大きな影響を及ぼす重要なファクターとして、経年化した石炭火力発電所が徐々に閉鎖されていくことや、総発電量の約3分の1を賄う既存の原子力発電所で2030年代に一部の運転期間が満了すること、再生可能エネルギー源の開発も限定的と分析。このまま状況が改善されなければ、チェコは早ければ2030年初頭から次第に電力を輸入するようになると指摘している。

チェコ政府は2015年5月に公表した「国家エネルギー戦略」のなかで、原子力発電シェアを当時の約35%から2040年までに60%近くまで増加させる必要があると明記。同戦略のフォロー計画として、この翌月に閣議決定した「原子力発電に関する国家アクション計画(NAP)」では、化石燃料の発電シェアを徐々に削減するため、原子力と再生可能エネルギーが重要な役割を果たすとしている。

NAPはまた、既存のドコバニとテメリンの両原子力発電所で1基ずつ、可能ならば2基ずつ増設する準備の必要性を指摘。特にドコバニ発電所では、既存の全4基が2035年から2037年の間に運転を終了するため、原子炉の増設を優先的に行うとしている。

「MAF CZ 2019」は、欧州送電系統運用者ネットワーク(ENTSO-E)が欧州全体の電源状況について取りまとめた「中期適性予測(MAF)」を補完するための国別報告書となる。同報告書はシナリオA(基本版)とシナリオB(低炭素版)の2つを提示しているが、どちらも2040年までにドコバニ原子力発電所で全4基の運転がすでに終了していると想定。バッテリーや燃料電池等から車両の動力を得る「エレクトロモビリティ」の開発が盛り込まれている。

CEPSのM.ドゥルチャク会長によると、これらのシナリオでは既存電源の閉鎖にともない、チェコは2030年以降、少しずつ電力の輸入に頼ることとなり、電力輸出を行っている現状から需給バランスは根本的に変化。

2040年までに必要な輸入量はシナリオAで230億kWh、Bでは最大300億kWhに達するとした。

これに加えてシナリオAでは、新規電源を増設しなかった場合、「1年間に供給力不足が生じる時間の予測値(LOLE)」が2040年までに合計678時間に達するリスクがある。シナリオBに至っては3,622時間になる危険性さえあり、現状を維持するための十分な電力の確保は決定的に重要な課題となる。

これらを踏まえてK.ハプリーチェク副首相兼産業貿易大臣は「これ以上時間を無駄にしている余裕はなく、チェコがエネルギーを自給し十分な電力供給を確保できるよう、失われる電源を埋め合わせていかなければならない」と述べた。欧州の法制に従い、チェコは2025年から2035年までの期間の「戦略的備蓄」に向けて具体的な準備を進めており、原子力発電設備の建設については明確なスケジュールを設定。これに沿って、ドコバニ発電所における新規原子炉の建設準備作業を集中的に続けるほか、テメリン原子力発電所についても、原子炉の増設に関する協議を5年以内に開始しなければならない。チェコにとって、新たな原子炉の戦略的建設計画は無くしては不可欠だと強調している。

【フランス】

経済相、フラマンビル3号機建設計画の遅れとコスト超過で解決要請

仏国のB.ル・メール経済・財務相は2019年10月28日、北西部にあるフラマンビル原子力発電所3号機(FL3)の建設プロジェクトが大幅に遅延し、建設コストも超過していることについて、事業者であるフランス電力(EDF)のJ.-B.レヴィ会長に対し「(問題解決に向けた)アクション計画を1か月以内に提示すること」を要請した。

これは、この件に関してPSA(ブジョーシトロエン)グループのJ.-M.フォルツ元会長が独自に取りまとめた監査報告書が10月25日に公表され、「度重なる計画の遅れとコストの超過はEDFの失策」と指摘したことを受けたもの。ル・メール経済・財務相は記者会見で「これは仏国の原子力産業界全体で挽回しなければならない問題だ」と述べ、仏国におけるエネルギー産業の存立に関わる重要問題と訴えている。

フラマトム社製・欧州加圧水型炉(EPR)設計を採用したFL3の建設は2007年12月に開始されたが、原子炉容器鋼材の品質問題など様々なトラブルにより、2012年に予定されていた完成は2023年にずれ込む見通しである。

EDFは2018年3月に2次系配管で事前点検を行った

際、溶接部で複数の欠陥を検知。同年7月に修理を行ったものの、格納容器の2重壁を貫通する溶接部8か所については同年12月、仏原子力安全規制当局(ASN)に「十分な品質があり破断の心配はない」と保証した上で、修理対象から外していた。しかしASNは、諮問機関らの協力によりEDFの提案内容を引き続き検証。2019年6月にはEDFに対して、「FL3の運転を開始する前に8か所の修理を終えること」を命じていた。

今回の監査報告書は2019年7月、EDFのレピィ会長がフォルツ氏に宛てた書簡の中で、10月末までに取りまとめることを依頼していた。この中でレピィ会長は、ASNが6月にEDF提案を却下した点に触れ、「プロジェクトにEPR設計を採用した理由や、スケジュールがたびたび遅延した原因、コストの初期見通しと完成までの差額、建設に関わる様々な企業の責任等について、株主である国に対し正確かつ完全な分析結果を示したい」と説明。同型設計ですでに営業運転を開始した中国の台山原子力発電所、およびフィンランドで完成に近づいているオルキロト3号機と比較することも求めている。

フォルツ氏はEDFの内部資料や幹部職員へのインタビュー等を通じて検証を行い、2006年5月当時に33億ユーロ(約4,000億円)と見積もられていた建設コストが、2019年10月までに7回改定され、現時点で124億ユーロ(約1兆5,000億円)に増加した事実に言及。完成の遅れと合わせて、これらはEDFの失策と考えられるが、台山発電所の2基が世界初のEPRとして営業運転を開始したことにより、EPRのコンセプトと設計が妥当であることが実証されたとフォルツ氏は見ている。

当然のことながらEPRのシリーズ建設再開に向けて、これまでに得られた経験を保持しつつ、EPRのコスト削減と「建設可能性」について一層の改善を図るべきだとフォルツ氏は勧告。FL3計画の遅れは、必ずしも現行のプロジェクト管理チームが原因というわけではないが、最新のプロジェクト管理技術を持った常勤スタッフ、および潤沢な自己資金を備えた、強力なプロジェクト・チームに立て直すべきだとした。

2025年のITER運転開始に向け トカマク建屋の土木工事が完了

南仏のサン・ポール・レ・デュランス(呼称を「カダラッシュ」から行政住所に変更)にある国際熱核融合実験炉(ITER)建設サイトで、主要建屋の建設を担当する仏国VINCI社の企業連合は2019年11月8日、トカマク実験炉を格納するトカマク建屋の土木工事が完了したと発表した。

このプロジェクトを主導するITER機構、および欧州連合(EU)の担当組織である「フュージョン・フォー・エナジー(F4E)」と共同で発表したもので、前日の段階で、同建屋の上部に最後のコンクリートを注入する作業がスケジュール通りに終了。建屋内では間もなく、トカマク実験炉の組立てが行われるが、この作業により建屋は屋根部分に金属フレームを設置することが可能になり、「2025年にファースト・プラズマを達成する(運転開始)」という意欲的な目標に、これまでどおり変更はないと強調している。

ITER計画は、平和目的の核融合エネルギーが科学技術的に成立することを実証するため、人類初の核融合実験炉を実現しようとする超大型国際プロジェクト。日本、EU、ロシア、米国、韓国、中国、インドの7極が技術開発や機器製造を分担して進めており、2005年6月に建設サイトを決定した後、2006年11月に参加7極がITER協定に署名。翌2007年10月に同協定が発効したのを受けてITER機構が正式に設立され、建設工事が始まった。

トカマク建屋は、トリチウム建屋および計測建屋とともに「トカマク複合建屋」を構成しており、複合建屋の高さは73m、幅は120mとなる。土木工事は2010年に開始されたが、用途の特殊性から、並外れて複雑なプロジェクト管理能力と最先端の専門知識を要したという。

建設作業が進むにつれITER科学チームが要請してくる設計変更すべてを統合するため、VINCI社の企業連合(仏国のRazel-Bec社、スペインのFerrovia社など)の作業チームは、効率的かつ迅速に動けるようプロジェクト組織を編成した。トカマク建屋に使用する非常に特殊なコンクリートの生産にあたっては、約10通りの製造方式を開発。これらのいくつかは、核融合エネルギーが発する放射線から作業員や環境を防護する特殊機能を備えたものとなった。

同建屋ではまた、通常のアパート壁で使用する補強鋼材の10倍の密度を持つ鋼材を必要とした。最終的に、同建屋中心部へのアクセスに使われる46の特注遮へい扉については、各70トンのドイツ製の扉をサイトに搬入。コンクリートを充填した上で、同建屋の中心部で組み立てたとしている。

【英国】

産業連盟、SMRの原子炉新設に向け 財政支援を政府に提案

英国最大の産業組織で日本の経団連に相当する英国産業連盟(CBI)は2019年11月4日、国内の温室効果ガス(GHG)排出量を2050年までに実質ゼロとする目標を掲

げた英国にとって、「クリーン・エネルギー産業中心の経済成長に向けた投資の促進」といった国家的なアクションが緊急に必要とする報告書を公表した。発電部門においては、再生可能エネルギーに加えて原子力に対する支援を(12月の総選挙後の)次期政権に要請する考えで、2030年までに小型モジュール炉(SMR)の初号機を完成させるため、新設計画への資金調達用に「規制資産ベース(Regulated Asset Base = RAB)モデル」を構築すべきだと強調している。

英国は2020年11月の国連気候変動枠組条約・締約国会議(COP26)を国内で開催予定であり、CBIによれば、GHGの削減で英国が世界的リーダーとなるための国際的協調活動と並行して、長期の国家的アクションの重要性を実証することになる。このため、直面している事態の複雑さと早急に動く必要性等に鑑み、ビジネス界が今後10年間で加速していくアクションに対し、政府による支援策の中でも優先すべき決定項目のいくつかを今回の報告書の中で指摘した。

分野としては具体的に、(1)CO₂の削減に向け輸送部門全体で必要となる(電気自動車の導入など)重要な変更事項の促進、(2)熱源の低炭素化とエネルギー効率の改善、に加えて(3)発電部門におけるCO₂排出量の削減——など。(3)の中でCBIは、SMRの初号機建設を支援する資金調達の枠組整備を挙げた。

政府は新規の原子炉建設に対する支援方針を明確に表明しているが、それは適正なコストでの建設であり、その他の低炭素電源に対してもコスト面の競争力を実証しなくてはならない。また、資金調達の新たなアプローチにより、将来的な原子炉建設プロジェクトでコストを削減できることも判明した。

この点に関してCBIは、「RABモデル」を詳細に検討する方向性を支持しており、これにより建設期間中のリスク共有と収益確保の可能性が高まるとした。RABモデルはまた、資本コストの大幅な削減により、電気料金の削減という形でエンド・ユーザーに利益をもたらすことも可能。CBIは、政府が「環境と社会およびガバナンス(ESG)を考慮した責任投資」の中に原子力を含める努力を続けるべきだと指摘している。

CBIはまた、従来の大型炉に加えてSMRも、コスト面や革新的技術の側面から英国のエネルギー・ミックスに貢献できる可能性があるとした。もちろん、2030年までに初号機の運転開始を可能とするためには、政府が時宜を得たタイミングで行動する必要がある。

CBIによると、この目標の達成に向け政府は可能な限り早急にSMRの建設サイトを特定しなければならず、SMRへの将来的な投資を支えていく政策面での支援も

必要。政府はまた、今後のSMR建設プロジェクトでコストを削減するためには、サイト許可が継続的に発給されるよう規制手続の整備を確実に進める必要があるとしている。

今回の報告書に関してCBIのC.フェアバーン事務局長は「温暖化防止への取組みで残されている時間を考えると、我々はこれまで以上に迅速、かつ一層踏み込んだ取り組みが必要で、これからの10年間は非常に重要な時期だ」と指摘。「技術開発が急速に進展しコストも低下しているため、CO₂排出量の実質ゼロという目標達成は可能だが、ビジネス界だけで成し遂げることはできない。目標達成までのあらゆる段階で、政府と連携することが必要だ」と訴えている。

【カナダ】

深地層処分場、サイト選定プロセスで2本目の試験坑を掘削

カナダで使用済燃料の処分事業を担当する核燃料廃棄物管理機関(NWMO)は2019年10月15日、深地層処分場の建設サイト選定のため、オンタリオ州イグナス地域で進めていた2本目の試験坑のボーリング作業が9月中旬に完了したと発表した。

同処分場の受け入れ自治体については、NWMOが2010年から選定手続を開始。イグナス地域は、オンタリオ州とサスカチュワン州で関心表明していた22地点のうちの1つである。選定プロセスの第1フェーズである予備評価の結果から、同地域を含む9地点が2015年に第2フェーズに選ばれ、地質調査や制限付きボーリング調査が実施されることになったが、その後の調査で候補地点はオンタリオ州内の5地点に絞られた。NWMOは同地域でボーリング作業を継続し、最終的に施設の受け入れに協力的な1地点を2023年までに選定することになる。

残っている5地点は、イグナス地域のほかにヒューロン=キンロス、サウスブルース、ホーンペイン、およびマニトウェッツの各地域。イグナス地域での試験坑掘削は2017年11月から始まっており、NWMOは掘削済みの2本で現場試験を行うほか、掘削時に掘り出した円柱形の地質サンプルや採取水等の分析・調査を国内外の研究所で進めていく。

現場試験には約8週間を要するのに加えて、その後に研究所で実施する分析作業については数か月かかる見通し。しかし、このような作業を通じて地球科学や地力学、石油物理学に関する様々なパラメーターが得られ、地層に対する統合的理解が深まるとした。

高精度放射線がん治療技術と医学物理士の役割 理工系研究者の新たなキャリアパス

東京女子医科大学大学院医学研究科医学物理学分野 西尾 禎治

がんの三大療法の一つに放射線治療がある。放射線がん治療では、腫瘍に対して高線量を集中させる様々な技術の研究開発が行われており、強度変調放射線治療(IMRT)や陽子線治療といった高精度の放射線がん治療が可能となってきた。この高精度放射線がん治療技術では、理学および工学の知識を基盤とする医学物理学の研究開発が必要不可欠である。高精度放射線がん治療の更なる発展においては、理工系研究者の医学物理学分野へのキャリアパスによる研究開発の発展が非常に重要である。

KEYWORDS: Medical Physics, Medical Physicist, High Precision Radiotherapy, Career path

I. 放射線がん治療技術

世界保健機関(WHO: World Health Organization)のWorld Cancer Reportによれば、2020年の世界での新規がん患者数は1,500万人に達すると報告されている。2018年の日本のがん統計予測によれば、がん罹患数は100万例を超え、死亡数は約38万人になるといわれている¹⁾。

がんの三大療法は外科的手術、放射線治療、化学療法である。がん治療で重要なことは、単に治療するだけでなく、がんが治った後に、元どりの生活にもどれる「生活の質(QOL: Quality Of Life)」を維持することである。このため、人体の機能温存性の高いがん治療の一つである放射線治療が重要となる。なお、放射線の医学利用については、1895年にX線が発見された翌年より研究が始まっており、古く長い歴史がある。

がん治療で利用される主な放射線は、光子線(X線、ガンマ線)、電子線、重粒子線(陽子線、炭素線、中性子線など)である(図1参照)。重い粒子である重粒子線はがん細胞に対して高い殺傷能力を持つ。また、放射線がん治療の標準的投与線量は、1回の照射で2 Gy (1 Gy=1 J/kg)ほど、総線量で60~70 Gyほどである。X線および電子線治療装置には、Varian社のTrueBeam、Accuray社のCyberKnife、三菱重工のVeroなどがある。重粒子線治療装置には、IBA社の陽子線、東芝の炭素線、住友重機のBNCT(ホウ素中性子捕捉療法)などがある。なお、BNCTは、がん細胞に集積するホウ素薬剤を患者へ投与し、外部

Technology of high precision radiotherapy and the role of medical physicist ; a new career path for science researchers :
Teiji Nishio.

(2019年8月9日 受理)

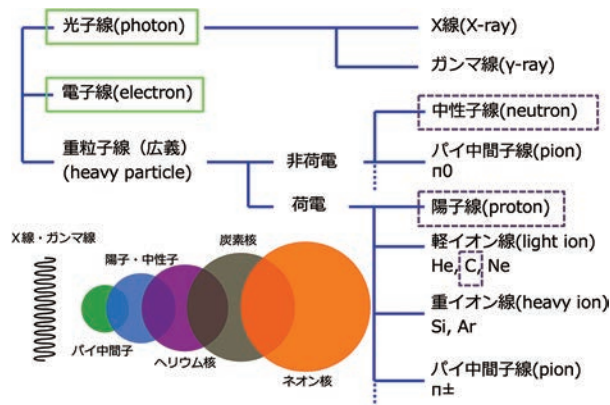


図1 放射線の種類

実線枠および点線枠で囲まれている放射線が、現在、放射線がん治療で利用されている。

から熱外中性子を照射することで、がん細胞に集積したホウ素核と中性子の原子核反応により放出されるアルファ核とリチウム核によってがん細胞を殺傷する治療法である。

近年の様々な技術進歩に伴い、放射線がん治療技術は日進月歩で進化を続けている。ここでは、その技術を活用した高精度放射線がん治療の例として、強度変調放射線治療(IMRT: Intensity Modulated Radiation Therapy)と陽子線治療について述べる。

1. 強度変調放射線治療(IMRT)

一般的な放射線がん治療では、照射口から腫瘍形状に沿った照射野で放射線をあてる。IMRTでは、コンピュータ技術を駆使することで照射場所ごとに放射線(X線)の強度を変調させて、がん腫瘍だけに線量を集中させる(図2参照)。腫瘍に対しては計画通りの高線量を、重要臓器に対しては可能な限りの低線量となるよう

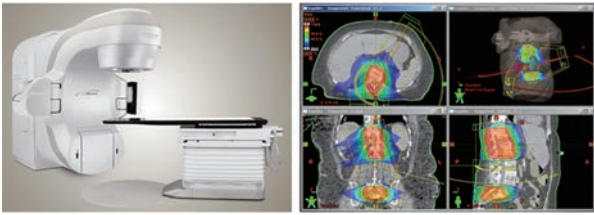


図2 X線・電子線治療装置および治療計画画面
強度変調放射線治療を可能とする放射線治療装置(左図)および治療計画装置の計画画面(右図)。
Varian ホームページより引用。
(<https://www.varian.com/ja/oncology/products/treatment-delivery/truebeam-radiotherapy-system>)



図3 MRI画像誘導X線治療装置
MRI画像誘導X線治療装置(左図)およびMRI画像誘導X線治療の概念図(右図)
View Ray ホームページより引用。
(<http://www.viewray-japan.com>)

に、照射線量強度の最適化計算(Inverse Planning)により照射線量強度マップ(Intensity Map)を作成して照射する。放射線がん治療のメリットは、痛みがなく、15分程度の短時間ででき、患者に優しいことである。デメリットとしては、腫瘍がどこにあるか簡単に見ることができないことである。そのため、放射線がん治療の際に、患者体内中の何処に腫瘍があるのかを正確に見る目の技術開発が重要である。そこで、腫瘍位置を治療中も正確に把握しながら放射線がん治療を行う装置も開発されつつある。図3はMRI装置とX線治療装置を融合させたMRI画像誘導X線治療装置である。本装置を利用することで、呼吸や心拍によって腫瘍位置が変動してしまう場合においても、リアルタイムで腫瘍位置を把握し、的確に腫瘍へX線を照射することが可能である。

2. 陽子線治療

陽子線は体内中で停止する特性を持ち、停止する寸前に大きな線量をその場に付与する。それにより深部方向の線量分布に形成される(拡大)ブラッグピークを活用することで、腫瘍に対して高線量を集中させたがん治療が可能となる(図4参照)。国内でX線治療施設数は1,000施設近くあるのに対し、陽子線治療施設数は20施設にも満たない。陽子線治療装置の大きさは、テニスコート2面分ほどの大きさがあり、医療機器としては非常に大

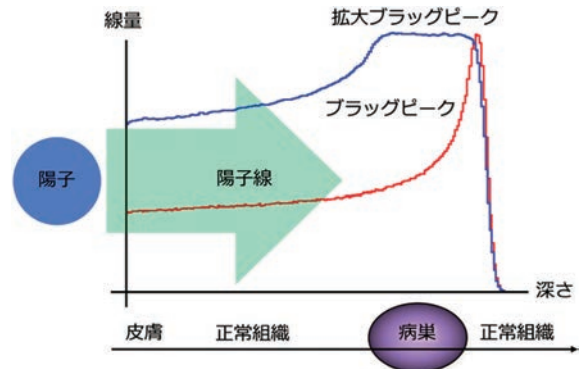


図4 陽子線の深部線量分布

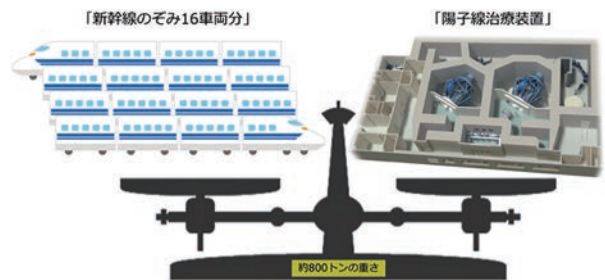


図5 陽子線治療装置および重量の概念図
陽子線治療装置の図は住友重機械工業ホームページより引用。
(<http://www.shi.co.jp/products/industry/proton/>)

きく、コストも高額となるため導入が容易でない問題を抱えている。陽子線加速器は、陽子を250 MeV程に加速して、腫瘍へミリ精度で照射する。陽子線回転ガントリー装置は、直径10mの回転構造物であり、ミリ精度で360度回転し、最適な方向から患者へ陽子線を照射する。陽子線治療装置の総重量は、陽子線加速器と陽子線回転ガントリー装置を持つ治療2室のレイアウトで、新幹線のぞみの車両16台分に相当する重さとなる(図5参照)。陽子線の照射領域を形成するために精密機器が多数配置されている。これらの精密機器が最適に設定されることで、側方均一線量分布形成、深部均一線量分布形成、腫瘍形状線量分布形成などが行われ、患者の腫瘍の形状や位置に合わせて最適な陽子線照射が可能となる。また、陽子が加速器から患者に照射されるまでの距離は約30mで、その飛行時間は僅か150 ns=0.00000015秒であるが、その時間内に様々な方向から腫瘍へミリ精度で陽子線を照射するための高度な技術が必要である。なお、線量集中性の高い陽子線治療においては、患者体内中の腫瘍位置を正確に見る腫瘍位置決め装置、患者体内中の陽子線線量分布を精密に計算する線量シミュレーション装置が活用される。陽子線治療の照射法としては、通常のパッシブ照射法や肺や肝臓などの呼吸性移動に伴って動く腫瘍へ対応した呼吸同期照射法、更にスキミング照射法やそれを駆使した強度変調陽子線治療(IMPT: Intensity Modulated Proton Therapy)がある(図6参照)。陽子線治療は照射技術の進歩と、それと同時に装置の小型化への開発も進みつつある(図7参照)。

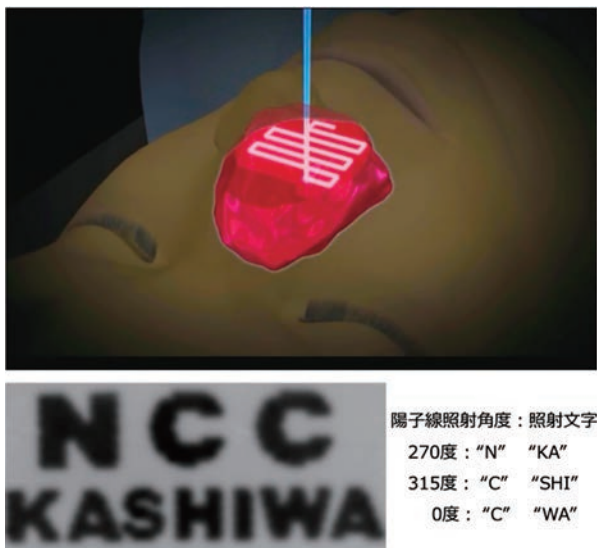


図6 陽子線スキャンニング照射法

陽子線スキャンニング照射法の概念図(上図)および“NCC KASHIWA”の文字を陽子線スキャンニング照射法で線量フィルムに照射した実測例(下図)。陽子線スキャンニング照射法の概念図は住友重機械工業ホームページより引用。
(<http://www.shi.co.jp/products/industry/proton/>)

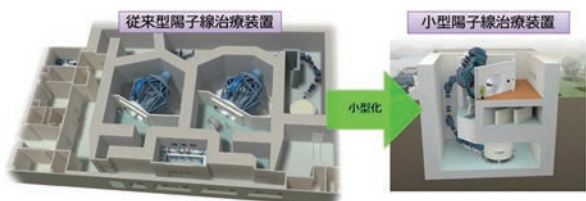


図7 陽子線治療装置の小型化

陽子線治療装置の図は住友重機械工業ホームページより引用。
(<http://www.shi.co.jp/products/industry/proton/>)

II. 医学物理学分野と医学物理士³⁾

高精度放射線がん治療は、放射線物理学、放射線計測学、電磁気学、加速器物理学、統計物理学、原子核物理学などの幅広い物理学および工学の結集である。また、照射システム、画像システム、シミュレーションシステムなどの先端研究開発技術の集合体である。それらの知識および成果を医学へ展開する学術分野が医学物理学分野である。

先に述べたように、IMRTや粒子線治療などの高精度放射線がん治療では、腫瘍への線量集中度が高い反面、精度の高い治療計画や照射を行わなければ、腫瘍への線量投与が部分的に不足することでがんの治癒率低下、また、腫瘍周辺の重要臓器に高い線量が入ると重篤な障害が起こる。そのため、高精度放射線照射では、正確にシミュレートして、正確に狙い、正確に照射することが重要であり、それらの研究開発の実施が求められる。放射線がん治療の高精度化には、基礎物理学を基盤とする幅広く融合された学術分野の知識と成果を活用した照射技術、シミュレーション技術、画像技術および検証技術に

「高精度放射線がん治療に要求される4つの先端技術研究開発」

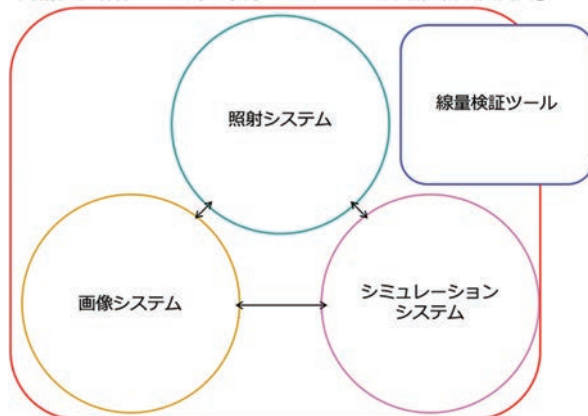


図8 高精度放射線がん治療に要求される4つの先端技術研究開発の概念図

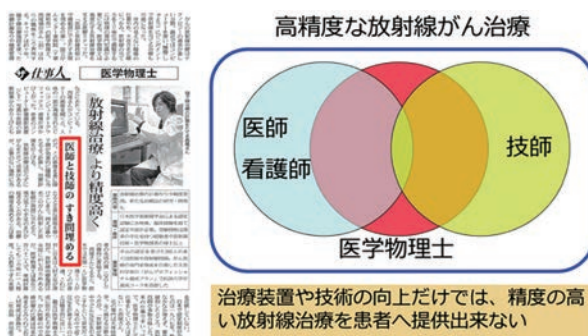


図9 高精度放射線がん治療における医学物理士の関わりの概念図

関する高度な研究開発が必要不可欠である(図8参照)。そのため、大学や研究所においては革新的な医学物理学研究および開発、研究者の育成を主体的に実施する人材が重要となる。また、医療現場においては、放射線がん治療が高度化する一方、その治療装置や技術の品質保証および管理の項目は、より一層の複雑化を招いている。その結果、治療装置や技術の品質保証および管理の業務は非常に幅広い領域で多岐にわたり、現場の医療従事者の負担増になり、それらの業務の中心的役割を担う人材が求められる。そのような医学物理学の研究開発から医療現場での治療の品質を担保する職種が医学物理士である。医療現場における医学物理士は、患者ごとの治療計画や投与線量精度の管理、治療装置の精度や性能の維持管理および向上に貢献することで、放射線治療医師と診療放射線技師の間を繋ぐ役割を担っている(図9参照)。また、医学物理学分野の発展・進歩において、医学物理学研究開発や人材育成で貢献することも医学物理士の重要な業務である。

医学物理士という職は欧米などの先進国では非常に人気のある職である。そして、その医学物理士の多くは放射線物理系研究をバックグラウンドとする研究者である。その一方、日本国内では、まだそれ程、医学物理士の認知度は高くない状況にある。日本国内の医学物理士

は機構が認定する資格であり、現在、約 1,200 名の資格保有者がいる²⁾。欧米と比較してその人数はまだ少なく、また、日本特有の様々な事情のため、医学物理士の資格を有していても医学物理士の職に就いていない人が数多い。日本国内の多くの病院で医学物理士を採用したいといった需要があるにも関わらず、現状として、実際に医学物理士の職に就いている人は資格保有者数の 1/4 以下でしかない⁴⁾。日本国内におけるがんの放射線治療関連施設で働く医学物理士の数の不足は、高品質の放射線がん治療を患者へ提供する上で深刻な問題である。この問題解決のためには、医療のニーズを知ることでシーズを生み出すことが出来る、研究実施能力を持った人材が必要である。

Ⅲ. 理工系研究者の医学物理士へのキャリアパス³⁾

医学物理士は放射線がん治療の高精度化に関する研究開発業務や高品質化のための医療業務を通して、それらの成果を最終的に患者や社会へ届けることができる、非常に需要の高い医療専門職である。放射線医療において、基礎を十分に学んできた理工系出身の若手研究者は医学物理士の卵として大いに期待されており、医学分野は放射線物理学を学んだ研究者の新たなキャリアパスになると思われる。特に放射線医療における医学物理学分野の研究開発や放射線管理は原子力分野と多くの共通点がある。放射線物理学に関する研究開発は勿論のこと、放射線がどんな基礎特性を持つかを計測、シミュレーション等を駆使することで把握し、また、その上で放射線をどのような手法や技術で管理するかなど、日々の放射線がん治療現場で医学物理士が取り組んでいる業務などは原子力事業に係わる専門家と同じような業務内容であると推測する。そこで、その一歩として、放射線に関する専門家である原子力分野との連携を行うことで、放射線物理学の専門知識を必要とする医学物理士という医療分野で活躍できる専門職があることを若手研究者などに広く知って貰い、人材育成や研究開発において協力連携体制を構築できることを切に願っている。

理工系研究者が医学物理学分野へキャリアパスをした場合、その魅力は様々である。その魅力の例(個人的意見)は以下の通りである。

- ・“がん患者の治療のため”といった明確な目的を持つことが出来る。
- ・“医療人としての自覚と責任感”を持つことが出来る。
- ・様々な職種の方との協力体制の下で、研究面だけでなく人格形成面でも“幅広い視野”を養うことが出来る。
- ・短期間で結果が出せるものから結果が出るまで長期間必要となるものまで“研究テーマが数多く存在”する。

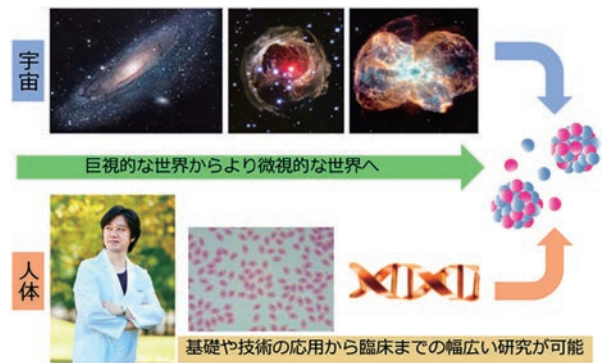


図 10 理工系研究者と医学物理学研究の係わり概念図

- ・国内ではまだ確立されていない分野であるので、努力次第では“医学物理分野のパイオニア”になることが出来る。

また、医学物理学の研究は宇宙物理学などの基礎的な研究に似ている側面を持ち、基礎研究から技術応用、更には臨床に至るまでの幅広い研究および開発が可能であることも魅力の一つである(図 10 参照)。

最後に、インターネット上で医学物理士を検索すると様々な情報が流れている。その情報の中には医学物理士は理工系出身者の学生や研究者のキャリアパスにならないような記述内容のものまでであるが、実際のところ、決してそうではない。もし、医学物理学の分野に興味がある方は、既に医学物理学分野にいる我々のような理工系研究出身者とコンタクトを取って正しい情報を収集して欲しい。理工系研究者は未来を担う医学物理士として期待されている。今後、是非とも医学物理学分野を将来の進路候補の一つとして考えて頂きたい。

－ 参考文献 －

- 1) 国立がん研究センターがん情報サービスホームページ：
https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/stat/short_pred.html
- 2) 一般財団法人医学物理士認定機構ホームページ：
<http://www.jbmp.org>
- 3) 西尾禎治, 解説“がんの放射線治療における医学物理士の現状と課題.” 原子力システム研究懇話会発行_原子力システムニュース Vol.30.No.1,33-35.
- 4) N. Tohyama, H. Okamoto, T. Nishio, “Questionnaire Survey of Japanese Medical Physicists for Working Conditions in 2014,” Jpn. J. Med. Phys. Vol.36(1), 2-17(2016).

著者紹介



西尾禎治 (にしお・ていじ)
東京女子医科大学大学院医学研究科
医学物理学分野
(専門分野/関心分野)医学物理学分野

放射線治療の高度化と医学物理士

東京大学医学部附属病院 中川 恵一, 野沢 勇樹

高齢化に伴い近年では「がん」が日本人の死因の1位になっている。放射線治療はがん治療の3本柱の1つであり、欧米では8割方の患者が放射線治療を受けており、今後日本でもがんに対する放射線治療の割合は増加していくと考えられる。放射線治療は臓器の機能や美容を保ちながらがんを治療できる方法であり、大きな副作用が少ないのが特徴である。近年では放射線治療技術の進歩に伴い「強度放射線治療」や「定位放射線治療」が行われるようになっており、正常臓器を守りつつ標的（腫瘍）に集中的に線量を付与することで副作用を軽減してがん治療を行うことが可能となった。これらの高度放射線治療を行うためには治療技術を正しく理解している「医学物理士」の存在が非常に重要である。

KEYWORDS: Radiation Therapy, Medical Physicist, IMRT, VMAT, SRS, SRT, Cancer

I. 放射線治療の現状

これまで1930年以前では、結核、脳卒中、肺炎などが主な日本人の死因でした。しかし、医療の進歩や高齢化に伴い、1980年以降はそれらに代わって「がん」が日本人の死因の1位となっており、その割合は年を追うごとに大きくなってきています。

現在、「手術」、「化学療法」、「放射線治療」ががん治療の3本柱として位置付けられています。

がんの罹患部位を見てみると、胃がんが代表される「感染型」のがんが減り、乳がんや前立腺がんといった「欧米型」のがんが増えています。これらのがんでは、手術向きの胃がんと違って、放射線治療も大きな役割を果たします。

かつて、乳がんの治療では、乳房とその下の胸筋、さらに腋の下のリンパ節をゴッソリ切除する乳房全摘手術が主流でした。しかし、今は、がん病巣だけを取り除いて、乳房全体に放射線を照射して再発を防ぐ「乳房温存療法」が主流となっています。

前立腺がんでも、前立腺全摘手術と放射線治療で同程度の効果があることが分かっており、欧米では放射線治療が手術以上に行われています。子宮頸がんでも、欧米では8割方の患者が放射線治療を受けるのに対して、日本では8割以上が手術を受けています。

がん全体でも、欧米では、6割近くの患者が放射線治療を受けていますが、日本では3割程度に留まります。しかし、日本でも放射線治療が行われる割合は増えてお

り、10年後にはがん患者の半数近くが受けると予想されています。日本人の半数以上が生涯にがん罹患しますので、国民の4人に1人が放射線治療を受ける時代が来ると言えます。

放射線治療の大きな特徴は副作用が少ない点です。かつて、末期がんに使われるものといった誤解がありましたが、これは、末期がんにも使えるほど副作用がないことを意味します。がん治療の3本柱である、手術、放射線治療、化学療法のなかで、体力の落ちた末期がん患者に使えるのは放射線治療ぐらいと言ってよいのです。

もっとも、放射線治療の最大のメリットは早期のがんを切らずに治し、臓器の機能や美容を保つ点にあります。喉頭がんは、手術でも放射線治療でも、ほとんど結果はわかりませんが、多くの場合、放射線治療が選択されています。手術をすれば、声を失うことになるからです。乳房温存療法でしたら、外見的にも変化が少なく、温泉にも安心して行けるでしょう。肛門の近くの直腸がんでも、手術の前に放射線をかけることで、人工肛門になるリスクを減らすことが可能です。また、放射線治療は通院で受けられることが多く、費用負担も少ないなど、さまざまな利点があります。

II. 放射線治療の高度化と医学物理士の役割

近年では、X線・陽子線・重粒子線を用いた放射線治療が世界的に行われていますが、その治療技術は年々進歩しており、従来の放射線治療に比べて複雑かつ高度な照射を行うことが可能になってきました。X線治療では線形加速器で電子を加速し、ターゲットからの制動放射によるX線を利用して治療を行います。現在X線治

The advancement of the radiation therapy and the need for the medical physicist : Keiichi Nakagawa, Yuki Nozawa.

(2019年9月14日 受理)

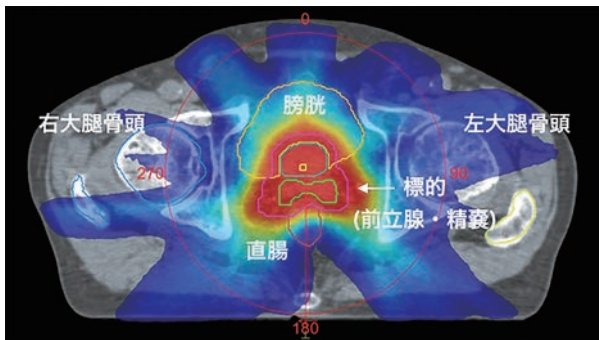


図1 前立腺がんの治療計画

強度変調回転放射線治療(IMRT)を用いることで、標的に集中的に線量を付与しながら、膀胱、直腸、大腿骨頭といったリスク臓器への線量付与を軽減している

療では「強度変調放射線治療」(IMRT)と呼ばれる高精度治療が盛んに行われています。IMRTとは、照射野内の放射線強度を変調させ、腫瘍に隣接した正常組織への線量を抑制しながら腫瘍の形状に合わせた照射を行う照射方法です。また、最近では回転しながら強度変調を行う技術「強度変調回転放射線治療」(VMAT)が確立しています。図1に治療計画の例を示しています。前立腺がんでは前立腺および精嚢を標的として放射線を照射しますが、前立腺は膀胱、直腸、大腿骨頭等の正常組織(リスク臓器)に囲まれています。従来照射方法ではリスク臓器にも多くの線量が照射されてしまいましたが、強度変調放射線治療を用いることで、リスク臓器の線量を可能な限り抑制し、標的である前立腺に効率よく照射することが可能となっています。

また近年では、放射線治療を行う際にCT画像やX線透視画像を撮影し、治療計画時との位置のずれを補正するといったような「画像誘導放射線治療」や、呼吸による腫瘍の位置変動を考慮して照射を行う「動体追尾照射」などが可能になり、従来よりも精度の良い照射ができるようになってきました。そのため、従来のような1回2Gyを複数回照射する手法ではなく、標的である腫瘍に高線量を1回もしくは少数回照射する「定位放射線治療」(SRS, SRT)も現在盛んに行われています。Gamma KnifeやCyber Knifeなどは定位放射線治療に特化した放射線治療装置として広く使用されています。

最近の放射線治療技術は物理的・工学的側面からも複雑でかつ高度な技術が利用されています。それらにより高い位置精度を達成することが可能となり、より良質な放射線治療を患者に施行することが可能となっています。しかし、治療装置や治療計画ソフト等の治療技術が高度化する反面、治療に携わる者がこれらの物理や技術を正しく理解できていないと、適切でない治療が行われてしまい患者に有害事象を発生させてしまう可能性があります。従って、これらの物理や技術を正しく理解している者が放射線治療の現場に関与することは、患者にとってより良質な放射線治療を適切・安全に施行するた

めにとっても重要です。そこで、放射線物理の専門家として放射線治療の現場に関与する役割として位置付けられている職種が「医学物理士」です。国内における医学物理士の業務としては、高精度放射線治療計画の立案、またその品質管理のための照射検証作業、医師等の作成した放射線治療計画の確認(承認)、放射線治療装置や放射線治療計画システムの精度管理、放射線治療で用いられる装置や検出器の開発など、多岐にわたっています。

欧米では医学物理士という職種は社会的地位や認知度は高く、国際労働機関国際標準職業分類においてはMedical Physicistとして規定されています。現在欧米では、約6,000人の理工系大学院を修了した医学物理士が、医療機関、大学・研究所等で活躍しており、企業と共同で研究を行う等、放射線治療の進歩を牽引している存在となっています。一方、日本ではその社会的地位や認知度は未だ十分とは言えない状況であり、実際に医療機関においても医学物理士は全国的に不足しています。

日本では医学物理士のうちおよそ7~8割が診療放射線技師で大多数を占め、およそ2~3割が理工系出身者です。そのため、多くの施設では診療放射線技師が技師業務の傍ら医学物理士の仕事も兼任しているのが実情です。医学物理業務は患者に安全で高精度な放射線治療を施行する上でとても大事な業務であるにもかかわらず、多くの施設で医学物理士がその業務に専任できず、本来の力を十分に発揮できない状況にあります。こういった状況では患者に良質な放射線治療を提供することは困難であるとも言えます。

先にも述べたとおり、放射線治療技術が進歩し複雑高度化している現在、患者に安全で適切な放射線治療を行うためには、放射線治療装置および治療計画装置等の物理、技術、特性等を理解することが非常に重要になってきます。そのため、放射線物理、加速器、放射線検出器について詳しい理工系出身の医学物理士も非常に期待されています。

著者紹介



中川恵一 (なかがわ・けいいち)

東京大学医学部附属病院 放射線科
(専門分野/関心分野)放射線治療、
がん対策、放射線健康管理・健康不安対策



野沢勇樹 (のざわ・ゆうき)

東京大学医学部附属病院 放射線科
(専門分野/関心分野)放射線治療、
医学物理、原子核物理学

中性子捕捉療法のためのホウ素薬剤研究開発の進展 ホウ素薬剤が今後の適応疾患拡大の鍵を握る！

東京工業大学 中村 浩之

ホウ素中性子捕捉療法(Boron Neutron Capture Therapy : BNCT)は、患者への負担が非常に少ないがんの低侵襲治療法の1つとして注目されている。アミノ酸誘導体であるL体光学異性体(L-BPA)をホウ素薬剤として用いた悪性脳腫瘍ならびに頭頸部がんへの加速器BNCTが承認申請に向けた準備が進められており、早ければ2020年度中に一般的治療法として承認されることが期待される。その一方で、BNCTに有効な薬剤はL-BPA1剤のみであり、L-BPAが有効でないがん患者に対し新しいホウ素薬剤の開発が急務である。ドラッグデリバリーシステム(DDS)と融合した次世代ホウ素薬剤の開発が今後のBNCTの適応疾患拡大を握る。

KEYWORDS: BNCT, boron-10, neutron capture cross section, thermal neutron, alpha particle, boron clusters, tumor-selective uptake

I. ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)とは

超高齢化社会を迎えるわが国では、患者さんにやさしい低侵襲治療法が浸透しつつあり、患者の日常生活への速やかな復帰や、健康で充実した質の高い生活を送ることで、医療費の抑制にも繋がっている。ホウ素中性子捕捉療法(Boron Neutron Capture Therapy : BNCT)は、患者にホウ素薬剤を投与し、患部を熱中性子ビーム孔に数十分間かざすだけで治療が終わることから、患者への負担が非常に少ないがんの低侵襲治療法の1つとして注目されている。BNCTで用いる熱・熱外中性子は0.025eVと非常に低エネルギーであるが、ホウ素(^{10}B)との中性子捕獲反応により生じるLi核やHe核(α 粒子)などの粒子線のエネルギーは、約2.4MeVと非常に高く、その飛程は4~9 μm とおよそ1つの細胞内におさまることから、 ^{10}B をがん細胞に選択的に送り込むことにより、がん細胞選択的な放射線療法が可能となる(図1)。

BNCTは、通常の放射線療法では困難とされる浸潤したがん細胞への治療にも有効であるが、その治療効果は ^{10}B のがん細胞への選択的かつ高い集積性に起因することになる。

1. ^{10}B 核種が用いられる理由

熱中性子は様々な原子核によって捕獲されるが、その捕獲確率は“熱中性子捕獲断面積”バーン(1 barn= 10^{-24}

Recent Advances in the Development of Boron Agents for Neutron Capture Therapy : Hiroyuki Nakamura.

(2019年9月1日 受理)

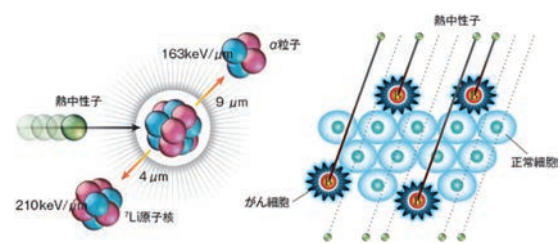


図1 ^{10}B の中性子捕獲反応(左)とBNCTの概念図
(日本中性子捕捉療法学会HPより許諾転写)

表1 様々な核種における熱中性子捕獲断面積

核	熱中性子捕獲断面積 ^a	核	熱中性子捕獲断面積 ^a
^6Li	942	H	0.332
^{10}B	3,838	C	0.0037
^{113}Cd	20,000	N	1.75
^{135}Xe	2,720,000	O	<0.0002
^{149}Sm	41,500	P	0.19
^{151}Eu	59,002	S	0.52
^{157}Gd	240,000	Na	0.536
^{174}Hf	400	K	2.07

^a単位：バーン(1 barn= 10^{-24} cm²)

cm²)という単位で表される。表1に示すように、熱中性子捕獲断面積は ^{135}Xe , ^{149}Sm , ^{151}Eu , ^{157}Gd などがきわめて大きい値をもつ一方で、 ^{10}B の熱中性子捕獲断面積は3,838バーンとそれほど大きな値ではないに関わらず、 ^{10}B が中性子捕捉療法に用いられる理由は、(1) ^{10}B は非放射性で天然のホウ素に約20%含まれるため入手容易である上、濃縮技術が確立されている、(2)核反応の際に生じる粒子線の飛程がおよそ1つの細胞内におさま

る、(3)ホウ素のもつ広範な化学反応性と安定性により種々化合物が合成可能、(4)重金属のような毒性を示さない、ことが挙げられる。

一方で、生体中の元素も中性子捕獲反応を起こすが、特に水素や窒素などは生体中に高濃度に存在するため、中性子の照射線量に大きく影響する。したがって、これらの影響を最小限に抑えた上で細胞致死効果を得るためには、 ^{10}B 原子が腫瘍細胞1個あたり 10^9 個必要であると計算される。実際に臨床では腫瘍組織内 ^{10}B 濃度が25 ppm以上、腫瘍組織/血液および腫瘍組織/正常組織の ^{10}B 濃度比が、いずれも3以上が望ましいとされている¹⁾。

II. ホウ素薬剤開発の歴史

1. 黎明期に用いられたホウ素薬剤

BNCTの概念は、中性子が発見されたわずか4年後の1936年にアメリカの物理学者Locherによって提唱され、1940年にはマウスの腫瘍を用いたBNCTの効果が検討された。1951年からは、米国ブルックヘブン国立研究所ならびにマサチューセッツ工科大学において、初めて臨床研究が検討された。図2に示したホウ素薬剤を用いて悪性神経膠腫を対象に合わせて63例行われたが、ホウ素薬剤の腫瘍選択性と中性子遮蔽の不十分さ故に十分な成果は得られず、1961年に中断された。

2. 我が国のBNCTを成功に導いたホウ素薬剤

ハーバード大学のSweetの下で留学していた畠中は、帰国後医療チームを結成し、Solowayらと共同開発したBSH (mercaptoundecahydrododecaborate; 図3)を用いて、1968年日本で初めて脳腫瘍に対するBNCTを行い、高い治療効果を見出した。この成功以来、我が国はBNCT研究で世界をリードしてきており、現在まで脳腫瘍の治療実績は400症例を超える。BSHは分子内に12個のホウ素原子を含む20面体の特異な化学構造を有しており、高水溶性・低毒性である。健全な脳には血液脳

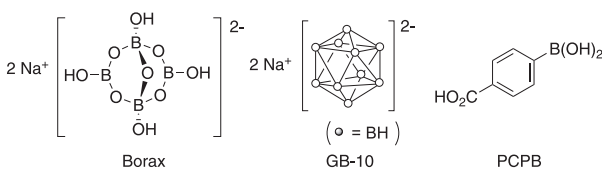


図2 黎明期に用いられたホウ素薬剤の化学構造

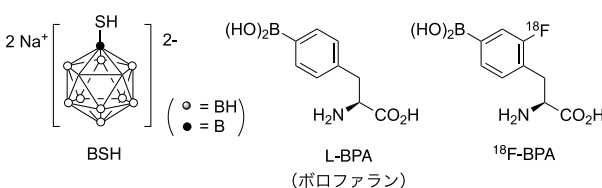


図3 BNCTを成功に導いたホウ素薬剤の化学構造

関門現象があり、血液中の水溶性物質は正常な脳組織には取り込まれにくい、脳腫瘍はこの血液脳関門が壊れているためBSHのような水溶性の化合物が脳組織内に取り込まれると考えられている²⁾。

一方、三島らはBPA (*p*-boronophenylalanine)を用いて、1987年に悪性黒色腫(メラノーマ)のBNCT臨床研究を開始した(L体の方がメラノーマ細胞によく集積することが明らかとなり、現在ではL-BPAが臨床に用いられている; 図3)。現在までメラノーマの治療実績は30症例以上あり、5年生存率も60%を超えていることから、BNCT治療効果は非常に高い³⁾。

3. PET診断用ホウ素薬剤の開発と適応疾患拡大

さらに、三島は石渡らと共同で、PET(陽電子放射断層撮影)診断用の ^{18}F -BPAの開発に成功した(図3)。これにより、BNCTを実施する前にPET検査により、ホウ素のがんへの集積状態を画像化し、BNCTの適応・不適応を診断できるようになった。その結果、L-BPAの腫瘍集積性を見積もって治療計画を立てることができるようになっただけでなく、メラノーマ以外のがん細胞にもL-BPAが集積することが分かった。当初、メラノーマはメラニン色素の生合成が活性化されていることから、その原料であるチロシンの類縁体であるL-BPAも取り込むであろうと考えられていたが、L-BPAはこの取り込み機構以外にもアミノ酸トランスポーター(LAT-1)を介してがん細胞に取り込まれることがわかってきた。その結果、LAT-1が活性化されている脳腫瘍や頭頸部がんなど、ほかのがんへの適応拡大が検討されるようになり、2001年には小野、加藤らが世界で初めて頭頸部がんのBNCTに成功し、これを機にBNCTの適応がん拡大が進められ、口腔多発がんや咽頭後リンパ節転移がんに対してもBNCTが施され、脳腫瘍や悪性黒色腫以外のがんの治療実績も200症例を超えている。

III. 加速器BNCTの実現と治験

我が国では、2009年に世界ではじめてBNCT用小型加速器の開発に成功し、これまで原子炉でしか得られなかった熱中性子が加速器から得られることで院内でもBNCTが可能となり、一気に一般の治療への道が拓けた。その結果、2012年からL-BPA(医薬品一般的名称: ボロファン(^{10}B))を用いた悪性脳腫瘍、2013年には頭頸部がんへの治験が開始され、2017年には厚生労働省の医療機器先駆けパッケージ戦略に指定され、国家をあげてその実用化が推進されている。本年度中には、承認申請すべく準備が進められている⁴⁾。

一方、PET診断薬 ^{18}F -BPAに関しては、2018年に日本核医学会より、「がんのホウ素中性子捕捉療法(BNCT)

のための院内製造されたFBPAを用いたPET検査を行うためのガイドライン」が策定され出版されている。将来的には、加速器BPA-BNCT治療に係るガイドラインに ^{18}F -BPAによるPET診断が推奨されることになると考えられる。

IV. BNCTの適応疾患拡大の鍵を握るホウ素薬剤

BPAやBSHが合成開発された60数年前に比べ、創薬研究の分野は目覚ましく発展しているにもかかわらず、新規ホウ素薬剤の開発は遅れている。その理由の1つには、BNCTがこれまで治療研究として行われてきたことから、その市場性が不透明であったことが考えられる。今後、BNCTが一般的放射線治療として承認されることにより、新規ホウ素薬剤の開発にも製薬企業が参入し、活発化されることが期待される。

BNCTにおいて、ホウ素薬剤に求められる理想的な要件は、以下の3点と考えられている。

- (1) 中性子照射中に抗腫瘍効果を期待できる腫瘍組織内 ^{10}B 濃度が維持できること。
- (2) 安全性を確保するために、全身的な毒性が低く、正常組織に比較して高い腫瘍組織への取り込みを実現しつつ、「腫瘍組織内濃度/正常組織内濃度」および「腫瘍組織内濃度/血中濃度」の比が高いこと。
- (3) 中性子照射後は正常組織および血中から速やかに消失すること。

すなわち、BNCTに用いられるホウ素薬剤には、正常組織への影響を最小限に抑え、腫瘍への治療線量が得られる腫瘍組織内 ^{10}B 濃度の確保を実現する腫瘍選択性が求められる。

1. 通常のがん治療薬開発との違い

抗がん剤は、通常がん細胞内で高活性化している細胞増殖シグナルや遺伝子などを標的とするため、薬剤自体にがん細胞選択性は付与されない。また、抗がん剤は、がん細胞内において $10^{-6}\sim 10^{-9}$ Mオーダーといった低濃度で薬効を発揮する。一方、I章でも述べたように、BNCTでは ^{10}B を含む細胞が熱中性子照射により殺傷されることから、如何にして ^{10}B を含む化合物(^{10}B キャリア)を、がん細胞に集積させるかが鍵となる。また、十分なBNCT治療効果を得るためには、がん細胞内のホウ素原子が 10^9 個必要であることから、ホウ素濃度は 10^{-3} M程度必要となる。実際に臨床では、L-BPAを500 mg/kg投与されているように、BNCTで用いられるホウ素薬剤は、“食塩より毒性が低い薬剤”であることが要求されることから、通常抗がん剤の開発とは、全く異なるアプローチが必要となる。さらに、L-BPAの血中半減期は短いことから、臨床では熱中性子照射中においても血中内 ^{10}B 濃度を治療有効濃度に保つために点滴

投与を行なっている⁵⁾。加えて、L-BPAを取り込まないがんもあり、すべてのがん患者に適応できるわけではない。

2. 次世代ホウ素薬剤の開発

前述した問題を克服し、ホウ素薬剤をがん組織に有効的に薬剤を送達させるために、「ドラッグデリバリーシステム(DDS)」技術との融合が着目されている。DDSとは、体内の薬物分布を量的・空間的・時間的に制御し、コントロールする薬物伝達システムのことである。DDS技術を利用することで、そのままでは短時間で吸収・分解されてしまうL-BPAの血中滞留性を長時間にわたって保つことが可能となる。また、腫瘍組織では、正常組織に比べ血管透過性が著しく亢進しているため、高分子や微粒子が血管より流出しやすく、またリンパ系が発達していないため、腫瘍組織に到達した物質は蓄積するEnhanced Permeability and Retention (EPR)効果により、腫瘍組織へ選択的に薬剤送達させることができる。ここでは、DDSを利用した最近のBNCT用新規ホウ素薬剤の開発状況について簡単に紹介する。

(1) 抗体結合型ホウ素製剤

非常に高い抗原特異性を持つ抗体は、血中滞留性も長いことから、最近では抗体を薬剤送達キャリアに用いたAntibody-Drug-Conjugate (ADC)医薬の開発が盛んに行われている。BNCTにおいても、抗体がホウ素キャリアとして注目されてきたが、抗体が認識する抗原の数は通常、細胞表面に $10^4\sim 10^5$ であり、BNCTに必要なホウ素濃度を達成するためには、抗体1つあたり ^{10}B を 10^4 個以上結合させる必要がある。Barthらは、上皮細胞増殖因子受容体(EGFR)抗体医薬であるセツキシマブに対し、 ^{10}B を1,100個導入したホウ素結合抗体を開発した。担がんマウスを用いたBNCT抗腫瘍効果実験では、平均生存期間が45日であり、非治療群25日と比較して優位に延長することを報告している(2002年)。

(2) ナノ粒子型ホウ素製剤

ミセルやリポソームなどのナノ粒子もEPR効果により腫瘍組織に集積することから、DDSキャリアとして精力的に研究されてきた。実際に「Doxil®」をはじめ様々なリポソーム製剤がすでに上市されている。ホウ素キャリアへの応用は、柳衛らやHawthorneらによって開始された。柳衛らは、BSHを内包したリポソーム表面に癌胎児性抗原(CEA)抗体を結合させ、脾臓がんを皮下移植したマウスへの局所注射によるBNCT抗腫瘍効果を初めて報告した(1991年)。Hawthorneらは独自に開発した細胞内タンパク質結合性ホウ素クラスター、 $\text{Na}_3[\text{ae-B}_{20}\text{H}_{17}\text{NH}_3]$ (TAC)と、両親媒性のホウ素クラスター、 $[\text{nido-7-CH}_3(\text{CH}_2)_{15-7,8}\text{-C}_2\text{B}_9\text{H}_{11}]$ (MAC)からMAC-TACリポソームを開発した(1995年)。MAC-TACリポソームはマウス乳腺がんモデルにおいて2回

投与することで腫瘍集積性を向上させ、さらに、2回の熱中性子照射によって高いBNCT効果を得ている(2013年)。丸山らは、トランスフェリン受容体が多くのがん細胞表面で高発現していることに着目し、トランスフェリン修飾リポソームを開発しており、このリポソームにBSHを内包させることで、能動的に腫瘍へホウ素を集積させることに成功している(2004年)。いずれも担がんマウスに対して、高いBNCT効果を示したが、実際に臨床応用するためには、これらのリポソーム製剤の投与量の削減が課題であり、さらにリポソームへのホウ素高集積化が必要とされた。筆者らは、これらの課題を克服するために、リポソームを形成する脂質の構造に着目し、クロソドデカボレートを導入したホウ素脂質(distearoyl boron lipid: DSBL)ならびにホウ素コレステロールを開発した(2007年)。このDSBLリポソームは、マウス大腸がん(colon 26細胞)を移植した担がんマウスにおいて、リポソーム総投与量を5分の1以下に抑えることができ、投与量15 mgB/kgでも腫瘍内ホウ素濃度は32 ppmBとBNCT抗腫瘍効果を得るために必要とされる25 ppmBを達成した(2013年)。さらに、熱中性子照射後2週間で5匹中3匹のマウスにおいて腫瘍が消失した(2014年)。

最近では、高分子ミセルをホウ素キャリアに利用した研究も進められている。長崎らは、生分解性ポリエチレングリコール-ポリ乳酸ブロック共重合体ミセル内でビニルカルボランを重合させたナノミセル(PMミセル)を開発している(2012年)。西山らはBSHを生分解性ポリエチレングリコール-ポリグルタミン酸ブロック共重合体に導入したPEG-b-P(Glu-SS-BSH)を合成し、その自己組織化によるナノミセルを開発した(2017年)。実際に、担がんマウスに対し50 mgB/kg投与で腫瘍内ホウ素濃度が24時間後に69 ppm、腫瘍/血液濃度比は20以上を達し、熱中性子照射により高いBNCT効果を得ている。

一方、柳衛らはBSH混合したW/O/Wエマルジョンを肝臓がん患者に動脈内注入により直接投与した後に熱中性子照射を行った結果、肝臓がんの増殖を3か月間抑制させることに成功した(2014年)。今後のBNCTの適応がん拡大に大きな波及効果をもたらす結果であると期待される。

(3) アルブミン結合型ホウ素薬剤

血清タンパク質の1つであるアルブミンは、血中の脂質や薬剤を運ぶタンパク質であり、上述したEPR効果は、染色した血清アルブミンが腫瘍組織に集積する現象から見出されたことから、ドラッグデリバリーシステム(DDS)のキャリアとして注目され研究されてきた。例えば、血清アルブミンにパクリタキセルを結合させた「Abraxane®」は、転移性乳がんや、難治性がんである再発胃がんや進行性非小細胞肺癌の治療薬として認可さ

れている。筆者らは、ホウ素クラスターをアルブミンに結合させたアルブミン-ホウ素複合体(Albumin-Boron-Conjugate: ABC)を開発した(2016年)。マウス大腸がん(colon 26細胞)を移植した担がんマウスにおいて、ABCは高い腫瘍集積性ならびに選択性を示し、実際に7.5 mgB/kg投与において熱中性子照射による高いBNCT抗腫瘍効果が得られている。

(4) ペプチド結合型ホウ素薬剤

ペプチドは、低分子医薬品と抗体などのタンパク質製剤の中間の特徴を有している、「中分子医薬品」として注目されている。低分子医薬品では標的とすることができないような分子についても薬理作用を発揮することができることから、近年精力的に研究されている。加えて、タンパク質製剤と異なり、完全に化学合成で製造可能であることから製造コストが抑えられる利点を持つ。松井らは、ポリアルギニンにBSHを導入したホウ素薬剤(BSH-3R)を開発した(2015年)。BSH-3Rは、尾静脈注射した脳腫瘍モデルマウスの脳切片の抗BSH抗体の免疫染色により、脳腫瘍細胞に集積することが確かめられている。Hey-Hawkinsらは、神経内分泌腫瘍に高発現しているソマトスタチン受容体を標的としたホウ素化ソマトスタチンペプチド類や、乳がんを高発現している神経ペプチド受容体を標的としたカルボラン含有神経ペプチドYを開発し、細胞レベルで良い選択的取り込みを報告している(2015年)。永澤らは、細胞膜透過性リポペプチド、ペプティシンにBSHを導入することに成功している。このペプティシン-BSH複合体は、細胞内でグルタチオンによりBSHがペプチドから解離するように設計されており、細胞レベルでは高いBNCT効果を示している(2019年)。

V. 終わりに

L-BPAを用いた悪性脳腫瘍ならびに頭頸部がんへの加速器BNCTの治験も2019年に終了し、承認申請に向けた準備が進められており、早ければ2020年度中に一般的な治療法として承認されることが期待される。一方で、BNCTに有効な薬剤はL-BPA1剤のみであり、L-BPAが有効でないがん患者に対する新しいホウ素薬剤の開発が急務である。BNCT用ホウ素薬剤は通常の抗がん剤の開発とは、全く異なるアプローチが必要となるが、本稿で紹介したようにDDSとの融合により次世代ホウ素薬剤の開発が進められている。現在、日本中性子捕捉療法学会でもBNCT用ホウ素薬剤の開発と評価に関する指針の作成を検討中であるが、悪性脳腫瘍ならびに頭頸部がんを対象としたBNCTの承認申請を機に、今後BNCTの適用疾患拡大に向けたホウ素薬剤の開発研究がますます活発になることが期待される。

－ 参考文献 －

- 1) W. A. G. Sauerwein, A. Wittig, L. Moss, Y. Nakagawa, Ed. Neutron Capture Therapy: Principles and Applications Springer(2012).
- 2) T. Yamamoto, K. Nakai, A. Matsumura, Boron neutron capture therapy for glioblastoma, *Cancer Lett.*, 262 143-152 (2008).
- 3) Y. Mishima, M. Ichihashi, S. Hatta, C. Honda, K. Yamamura, T. Nakagawa, New thermal neutron capture therapy for malignant melanoma: melanogenesis-seeking ^{10}B molecule-melanoma cell interaction from in vitro to first clinical trial, *Pigment Cell Res.*, 2, 226-234(1989).
- 4) <https://www.pmda.go.jp/review-services/drug-reviews/0003.html>

「医療機器の先駆け審査指定制度の対象品目一覧表」.

- 5) BNCT 基礎から臨床応用まで” —BNCT を用いて治療にかかわる人のためのテキスト—日本中性子捕捉療法学会編 (2018) ISBN978-4-907209-90-2

著者紹介



中村浩之 (なかむら・ひろゆき)

東京工業大学 科学技術創成研究院
(専門分野/関心分野)新規有機合成反応の
開発, ホウ素の特性を利用した創薬化学,
ケミカルバイオロジー, 光線力学療法, 中
性子捕捉療法, AI 技術を利用したがん分
子標的治療薬の開発。



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 －

(12月3日 第5回 論文誌編集幹事会)

- ・ 10月16日から11月15日までに英文論文誌に20報, 和文論文誌に3報の新規投稿があった。
- ・ 英訳出版に関する監査からの指摘事項が報告され, 対応を検討した。
- ・ 論文誌編集委員会の今年度収支予測と, 来年度予算案が説明された。
- ・ 英訳出版事業の進捗状況が報告された。Vol.2の翻訳が進行中である。出版会社に関しては相見積を取り検討を進めている。
- ・ Most Cited Article Award 2019の表彰論文を選考した。
- ・ 論文誌 Special Issue 刊行に関する手順書の改訂案を検討した。
- ・ STSS/ISOFIC/ISSNP 合同国際会議論文の英文誌への投稿推薦を受け付けることとした。
- ・ 福島廃止措置研究特集号を2021年に設定することを仮決定した。

(12月3日 2019年度 論文誌・学会誌合同編集幹事会)

- ・ 論文誌側から, 学会誌・和文論文誌英文出版の状況について説明・報告があった。
- ・ 学会誌側から, 2021年3月号とその前後の特集号企画について, 説明・報告があった。

(12月3日 第6回 学会誌編集幹事会)

- ・ 学会誌編集委員会の今年度収支予測と, 来年度予算案が説明され, 承認された。
- ・ 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。
- ・ 連載講座企画の状況について報告があった。企画打診中の未回答の部会には, 督促は行わないこととした。
- ・ 次年度の表紙案について報告があり, 了承された。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

地層処分システムの性能を評価するための 熱力学データベースの整備

OECD/NEA の TDB プロジェクトと国内外の整備状況

日本原子力研究開発機構 北村 暁

高レベル放射性廃棄物や地層処分相当 TRU 廃棄物などの地層処分システムの性能を評価することを目的として、廃棄物が地下水に接触したあとの放射性核種の溶解および錯生成挙動を評価するために使用する熱力学データベース (TDB) が国内外で整備されている。本報告では、経済協力開発機構原子力機関 (OECD/NEA) が実施している国際プロジェクトを中心に、わが国および欧米各国で整備されている TDB を概説する。

KEYWORDS: *geological disposal, high-level radioactive waste, TRU waste, performance assessment, thermodynamic database (TDB), solubility, speciation*

I. はじめに

わが国において、高レベル放射性廃棄物や地層処分相当 TRU 廃棄物は、地下 300 m より深い地中に処分 (以下、地層処分) することが定められている。処分システムの安全性を評価するためには、図 1 に示すように、システムの長期挙動を理解したうえでシナリオ構築・モデル化・データ整備を実施し、解析・評価を通して安全基準への適合性を検証する。このうち、地層処分の基本的なシナリオとしては、図 2¹⁾ に示すように、地下水が廃棄体に接触することにより廃棄体中の放射性核種が地下水に溶出し、生活圏まで移行することにより人類が被ばくすることが想定されている。また、データ整備にあたっては、種々の環境条件における値 (パラメータ) を整備できるようにするため、データベースを構築する。本稿で取り上げる熱力学データベース (以下、TDB) の整備もこれに該当する。放射性核種が地下水に溶出したあとの移行挙動として考えられるのは、図 3 に示すように、地下水における放射性核種の沈殿、地下水成分や有機物などの錯生成、バリア材 (緩衝材、岩石、セメント系材料など) に対する取着 (吸着または吸収)、バリア材中の拡散といった現象である。放射性核種の溶解・錯生成・

取着・沈殿の指標となる値 (パラメータ) は、地下水組成 (pH や酸化還元電位を含む) やバリア材の種類といった環境条件に影響される。地層処分システムの性能を評価 (以下、地層処分性能評価) するためには、岩盤の種類や断層の有無といった地質環境を想定するとともに、処分場の規模や廃棄体の定置方式、環境地下水が廃棄体に接触するまでの時間を確保するための人工的なバリア材などを設計したうえで、廃棄体から溶出した放射性核種の移行挙動を評価し、生活圏における被ばく線量が基準値を下回るかどうかを確認することが必要である。

TDB は、種々の元素における化学平衡反応の平衡定数やギブズ標準自由エネルギーなどの熱力学データを、化学熱力学の公式に矛盾しないよう集積したものである。地層処分性能評価のための TDB は、廃棄体から溶出した放射性核種の溶解度 (上限濃度) や、地下水成分や有機物などの錯生成挙動を評価するために用いられることから、水溶液系での反応を中心としたものであるという特徴をもつ。TDB については、固体化学などの分野で整備されており、市販のソフトウェアも存在するものの、著者が把握している限りでは、地層処分性能評価に適用可能な、アクチニド元素を含む放射性核種の水溶液系の反応に関する熱力学データが充実している市販品は見当たらない。

地層処分性能評価のための TDB は、地層処分の実施を検討したり進めたりしている欧米諸国で整備が進められているが、その中でも中心的な役割を果たしているの

Development of Thermodynamic Database for Performance Assessment of Geological Disposal of High-level Radioactive Waste and TRU Waste : Akira Kitamura.

(2019 年 9 月 30 日 受理)

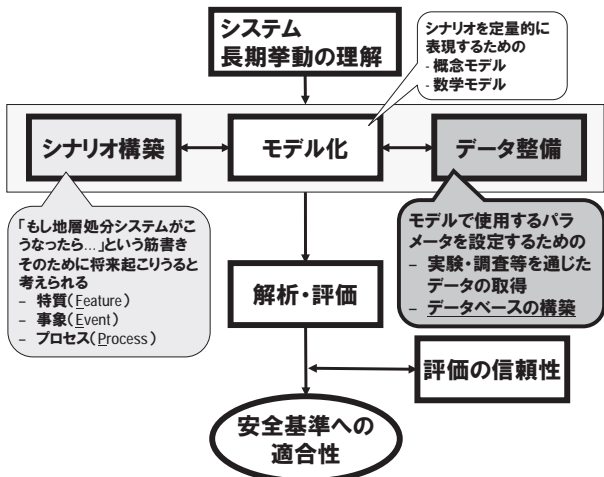


図1 地層処分システムの安全性を評価するためのプロセスの例

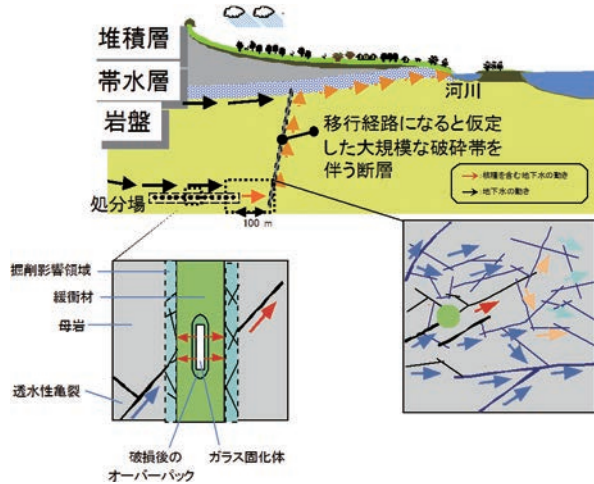


図2 地層処分で考慮する核種移行経路の例¹⁾

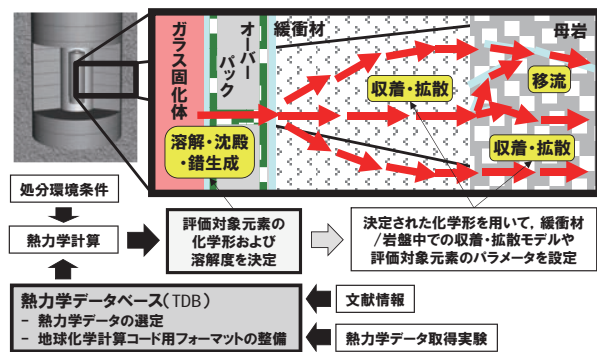


図3 地層処分の人工バリアシステムにおける核種の移行挙動とパラメータ設定プロセスにおける熱力学データベースの役割

バリア材中の実線矢印はガラス固体表面における放射性核種の溶解・沈殿および母岩中での移流を、破線矢印はバリア材に対する放射性核種の取着やバリア材の間隙・亀裂中の拡散挙動を示す。

は経済協力開発機構原子力機関(以下、OECD/NEA)が実施している TDB プロジェクト(以下、NEA-TDB)である。

本報告では、NEA-TDB の成果や、わが国を含め欧米

各国で整備が進められている TDB 整備状況について概説する。

II. 経済協力開発機構原子力機関

(OECD/ NEA)の TDB プロジェクト

1. 歴史

NEA-TDB は、既往の熱力学データの差違を埋めるとともに、放射性廃棄物管理における国際標準となる TDB の開発を目的として、1984 年に開始された。当初は OECD/NEA 内の廃棄物管理委員会(RWMC)およびデータバンクの協働により実施され、ウラン、ネプツニウム、プルトニウム、アメリシウムおよびテクネチウムの5元素について TDB を整備することを目的とした第1フェーズが1998年まで継続された。TDB 整備にあたっては、熱力学データの収集・レビューおよび選定、イオン強度(塩濃度)や温度に関する影響の補正方法などをガイドラインとして明文化したうえで作業が進められた。

第2フェーズ以降は、日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)(前身機関である動力炉・核燃料開発事業団(以下、PNC)および核燃料サイクル開発機構(以下、JNC)を含む)をはじめとする、地層処分の事業や研究開発を実施する国内外の機関が参加し、より強固な組織を編成したうえで、ひとつのフェーズを4~5年かけて実施してきている。原子力機構以外のアジアからの参加実績は、第4フェーズ(2008~2013年)における韓国原子力研究所(KAERI)のみであり、欧米中心でプロジェクトが進められてきている。これまでに13冊もの“Chemical Thermodynamics Series”(表紙が紺色のため、「青本」と呼ばれる)のほか、前述のガイドラインや会議報文集などを刊行してきている。これまでの経過については、Ragoussi and Brassinnes²⁾が詳しい。本稿執筆時点では、12カ国15機関が参加して2019年2月に開始した第6フェーズ(TDB-6)を、2023年1月までの4年間の予定で実施中である。

2. 熱力学データの選定およびデータベースの整備

NEA-TDB の整備方針については、ガイドラインが制定・公開されている。このうち、技術的な内容は下記4項目である。

- ・ TDB-1: 熱力学データのレビューと選定
- ・ TDB-2: イオン強度補正(0への外挿)
- ・ TDB-3: 不確実性評価
- ・ TDB-4: 温度補正・エンタルピー計算

熱力学データの選定は、主に以下の手順で行われる。

- ・ 熱力学データが実測値を基に算出されている文献を収集する。したがって、実測値に基づかない推定値は対象としない。また、明示はされていないものの、西欧で通用する言語(英語(ロシア語などからの翻訳を含

- む), ドイツ語, フランス語など)以外で書かれている論文は, 内容を確認できないため対象外としているようである。
- ・収集した文献を1件ずつ査読する。査読者数は, ひとつの元素に対して5名程度で, 各自の専門分野などに応じて対象とする錯体種や化合物(群)を分担する。査読結果は, 「青本」に付録として掲載する。
 - ・前述の査読において, 信頼できると判断された熱力学データを抽出する。熱力学データの掲載値が信用できない場合でも, 算出根拠となった実測値が信用できる場合は, 査読者が熱力学データを算出し直して, 信頼できる熱力学データとして取り扱う。
 - ・抽出された(複数の)熱力学データを統計的に処理し, 標準状態における熱力学データを算出する。ここでいう標準状態とは, 298.15 K, 0.1 MPa, イオン強度0である。溶存化学種のイオン強度0への外挿には, Brønsted-Guggenheim-Scatchard モデル³⁾(イオン強度の適用範囲が 0.02 mol/dm³以下とされている Debye-Hückel 式よりも高い, 3.5 mol/kg 程度まで適用可能なモデル。イオン相互作用理論(SIT)に基づくモデルであることから, 「SIT モデル」と通称される)を用いる。
 - ・算出された標準状態における熱力学データの整合性(熱力学の公式に矛盾しないこと)を確認し, 熱力学データを選定する。選定する熱力学データの種類は, 以下の8種類である。ただし, 熱力学データの充足度や信頼度によって, ひとつの錯体種, 化合物および反応式に対してすべての熱力学データが選定されるとは限らない。
 - ギブズ標準自由エネルギー変化($\Delta_f G_m^\circ$; kJ/mol)
 - 標準モルエンタルピー変化($\Delta_f H_m^\circ$; kJ/mol)
 - 標準モルエントロピー(S_m° ; J/K/mol)
 - 比熱容量($C_{p,m}^\circ$; J/K/mol)
 - 反応の平衡定数の対数($\log_{10} K^\circ$)
 - 反応の自由エネルギー変化($\Delta_r G_m^\circ$; kJ/mol)
 - 反応のエンタルピー変化($\Delta_r H_m^\circ$; kJ/mol)
 - 反応のエントロピー変化($\Delta_r S_m^\circ$; J/K/mol)
 - ・選定された熱力学データを「青本」として出版するとともに, 数値情報を電子データで提供する。現在有効な TDB とその公開年は以下のとおりである。
 - Vol. 5: ウラン, ネプツニウム, プルトニウム, アメリシウムおよびテクネチウム(2003年更新)
 - Vol. 6: ニッケル(2005年)
 - Vol. 7: セレン(2005年)
 - Vol. 8: ジルコニウム(2005年)
 - Vol. 9: 上記各元素の有機化合物および有機物錯体(2005年)
 - Vol. 10: 放射性廃棄物管理に重要な固溶体(最新情報報告書)(2007年)

- Vol. 11: トリウム(2008年)
 - Vol. 12: スズ(2012年)
 - Vol. 13a: 鉄(第1分冊)(2013年)
 - Vol. 13b: 鉄(第2分冊)(2019年)
- (本稿執筆時点では電子システム上でのみ公開)

なお, 溶解や錯生成反応の基本となる熱力学データ(NEA-TDBでは“auxiliary data”と呼んでいたが, 最近では“ancillary data”と呼ぶ)については, 科学技術データ委員会(CODATA)が選定した“Key Values”を採用している。

現在, すべての「青本」のPDFファイルはWebサイトで無償公開されている。また, 最近になって整合性確認などの機能を含めたデータベースシステムが更新され, Webサイトで熱力学データの選定値や文献情報が検索できるようになった⁴⁾。さらに, 適切なデータベースを用いることで元素の溶解・錯生成・固相に対する収着挙動を計算することができる汎用地球化学計算コードのうち, 米国地質調査所が提供している“PHREEQC”⁵⁾用のフォーマットが提供されるようになった⁴⁾。

現在作業中のプロジェクトは, 以下のとおりである。

- ・モリブデンの熱力学データ選定
- ・アクチニド元素およびテクネチウムの熱力学データ選定(Vol. 5の更新)
- ・補助的な熱力学データ(ancillary data)の更新
- ・セメント系鉱物の熱力学に関する最新情報のとりまとめ
- ・高イオン強度水溶液系の熱力学に関する最新情報のとりまとめ

3. 人材育成講座

人材難に直面しているのはわが国だけではなく欧米諸国も同様であることから, 学生や若手研究者向けにTDBの実務を紹介する講座が2017年より開始されている。本講座は, 主に核種移行挙動に関する国際学会に併設される形で開催されており, 1日コースを基本としている(半日コースの開催実績もある)。2019年9月には, アジア地域では初めての講座が京都府宇治市にて開催された。

本講座では5名の専門家が登壇し, 世界における放射性廃棄物管理の現状やNEA-TDBの概要, 種々の実験研究を紹介するとともに, 熱力学データの選定過程を理解するための講義と演習を行った。さらに, NEA-TDBの成果物を地層処分性能評価に適用するにあたっての課題やその取り組みについても紹介があるなど, 充実した内容であるとともに, 基礎から実践までひとつとおり学習できるよう設計されていたことが印象的であった。当日の受講生は30名弱で, わが国と中国(台湾を含む), 韓国からの参加者が大半を占めた。1回あたりの受講生の数はそれほど多くないものの, 今後もこのような人材育成

講座を継続的に開催することが重要であると思われる。

4. わが国の貢献

NEA-TDB の第 1 フェーズ実施中には、当時の PNC より専門家 2 名を 1 年間ずつ派遣している。また、前述のとおり、第 2 フェーズ以降は原子力機構が参加してプロジェクトを支えるとともに、断続的に専門家を派遣している。さらに、朽山修東北大学教授(当時)が Vol. 9 および 13a の著者を務めるとともに、現在実施中の作業において森下政夫兵庫県立大学教授がモリブデンの熱力学データ選定に、小林大志京都大学准教授が高イオン強度水溶液の最新情報のとりまとめに携わっている。また、OECD/NEA 非公認ではあるものの、JNC および原子力機構が 2003 年より汎用地球化学計算コード PHREEQC⁵⁾、EQ3/6⁶⁾ および Geochemist's Workbench (GWB)⁷⁾ で利用可能な様式を公開しており、「青本」が公開されるたびに情報を更新してきている(鉄第 2 分冊のみ未対応)⁵⁾。

5. 課題

前述のとおり、NEA-TDB では原著論文などの実験データを慎重にレビューしたうえで熱力学データを選定している。この際、化学種などの存在は認めても熱力学データの信頼性に疑問がある場合は熱力学データを選定しない、という方針をとっている。このため、ひとつの元素の TDB を整備するのに膨大な時間がかかるうえ、選定値だけを地層処分性能評価に用いると、利用できる核種が限定されるだけでなく、選定されなかった溶存化学種の寄与が反映されないため、溶解度が過小に評価されるおそれがある。さらに、地下水組成を決定するなど用いられる鉱物/水反応が選定されていないことといった問題点もある。

そのため、後述のとおり、原子力機構や欧米の機関が地層処分性能評価用の TDB を整備する際には、NEA-TDB では選定されなかった熱力学データを追加選定する形で TDB を整備している。その熱力学データの追加内容が各機関によって異なっており、それぞれの TDB の特徴が現れている。NEA-TDB と地層処分性能評価用 TDB の差違については、2010 年に開催したワークショップ⁹⁾でとりあげ議論したものの、NEA-TDB の熱力学データ選定方針は変更しないとの結論に至っている。ただ、私見では、ガイドラインを逸脱しない範囲で、化学形の評価や熱力学データのレビューが年を追うごとに緩くなってきている(すなわち地層処分性能評価用 TDB に近づいている)という印象を持っている。

III. わが国における TDB 整備

原子力機構とその前身機関(PNC および JNC)は、地層処分研究開発のとりまとめに合わせて TDB を整備しており、現在は JAEA-TDB¹⁰⁾として公開している。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	H																	He	
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra			Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
					La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
					Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

図 4 JAEA-TDB のうち放射性核種の溶解および錯生成挙動に関する熱力学データの整備対象としている元素と欧州で整備が進められている各 TDB の整備対象元素との比較。太字が JAEA-TDB 整備元素(放射性核種)、斜体が JAEA-TDB 整備元素(鉱物/水反応)、網掛けした元素のうち、■が NEA-TDB 整備対象元素、□が PSI/Nagra-TDB および ThermoChimie にて特徴的な整備対象元素(NEA-TDB 整備対象外)

JAEA-TDB を含め、地層処分性能評価用 TDB の特徴のひとつとして、放射性核種の溶解・錯生成挙動を評価するだけではなく、鉱物/水反応など地球化学計算に用いる熱力学データも収録されていることが挙げられる。地球化学計算に用いる熱力学データは NEA-TDB では選定されていないことから、最新の JAEA-TDB¹⁰⁾では、広範囲の圧力や温度条件に対応可能とした TDB をベースに、セメント系鉱物の熱力学データの追加やシリカ(SiO₂)系鉱物の熱力学データの更新を行ったもの¹¹⁾を採用している。これにより、地質環境を考慮したモデル地下水の組成、緩衝材中を通過した地下水(緩衝材間隙水)の組成、そしてこれら地下水および緩衝材間隙水中の放射性核種の溶解度や支配溶存化学種の評価がひとつの TDB で実施可能となっている。

一方、放射性核種の溶解や錯生成挙動を評価する熱力学データについては、前述のとおり NEA-TDB 選定値だけでは不十分であることから、独自の判断で多数の溶存化学種や固相の設定と反応の平衡定数の追加を行っている。また、NEA-TDB 選定値に対しても、実測データが限定的であった 4 価金属イオンなどを対象として、最新の文献情報などを基に熱力学データを見直したものがある。

JAEA-TDB の整備対象元素について、後述する欧州における各 TDB の整備対象元素と比較できるようにしたものを図 4 に示す。TDB の整備対象元素が鉱物/水反応と溶解・錯生成挙動のどちらに分類されるかは、必ずしも明確ではない。例えば、C-14 や Cl-36 の水溶液中での挙動については、鉱物/水反応の TDB で説明される。

なお、JAEA-TDB 選定値のうち放射性核種の溶解や錯生成挙動を評価する熱力学データについては、298.15 K、0.1 MPa、イオン強度 0 における log₁₀ K°のみを選定している。ギブズ標準自由エネルギー変化(Δ_fG_m°)など、

他の熱力学データを選定していくことが今後の課題である。

IV. 欧米諸国における TDB 整備

1. スイス

スイスにおける放射性廃棄物処分実施主体(以下、実施主体)である放射性廃棄物管理協同組合(Nagra)は、国立の研究機関であるポール・シェラー研究所(PSI)と共同で TDB (Nagra/PSI-TDB) の整備を進めている。TDB の更新は地層処分に関するとりまとめに合わせて実施されており、最新版は 2014 年 8 月に公開された 12/07 版¹²⁾である。JAEA-TDB と同様に、NEA-TDB で選定されていない化学種や整備対象外の元素の熱力学データについては、NEA-TDB のガイドラインなどを基に、独自に文献を調査・レビューしたうえで選定している。PHREEQC で利用可能な様式が PSI の Web サイトで公開されている。

2. フランス・ベルギー・英国

フランスにおける実施主体である放射性廃棄物管理機関(ANDRA)では、“ThermoChimie”¹³⁾と呼ばれる TDB を整備している。最新版は 2018 年 9 月に公開された Ver. 10a である。この Ver. 10a より、かつては独自に TDB 整備を進めていた、ベルギーの放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関(ONDRAF/ NIRAS)と英国の放射性廃棄物管理会社(RWM 社)が参加している。図 4 に示すとおり、整備対象となっている元素や化学種が多いのが特徴である。最近では Web サイトの充実により追跡性に関する情報が充実しつつあるものの、熱力学データの設定根拠となっている文献が ANDRA の非公開資料であることも多く、情報の追跡性に難点がある。PHREEQC や GWB など種々の地球化学計算プログラムで利用可能な様式が Web サイトで公開されている。

3. ドイツ

ドイツにある 4 つの研究機関とスイス PSI は、共同で“THEREDA: Thermodynamic Reference Database”という熱力学データベースを整備している。2002 年に 5 機関によるワーキンググループが設立され、最新版¹⁴⁾が 2015 年に公開されている。全体をひとつにまとめたフォーマットは提供されていないものの、いくつか(本稿執筆時点では 12)の環境条件に応じた PHREEQC、GWB および熱力学平衡計算プログラムライブラリー(ChemApp)用の様式がインターネットで公開されている。放射性核種の溶解・錯生成反応に関する熱力学データ選定については作業途上であり、これまでに紹介した JAEA-TDB、PSI/Nagra-TDB および ThermoChimie に比べると整備済元素が限定的である。その一方で、イオン強度補正を、SIT モデルより高イオン強度環境に適

用可能な Pitzer モデル³⁾で実施していること、また各熱力学データの品質評価が数値化されていることが特徴的である。

4. 米国

米国では、ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)が放射性廃棄物処分のための TDB(以下、LLNL-TDB)を整備している。LLNL-TDB の特徴として、希土類元素すべての熱力学データが整備されているなど整備対象元素が非常に多いこと、 $\Delta_r H_m^\circ$ の整備を進めていることが挙げられる。さらに、PHREEQC 用様式については、粘土鉱物などに対する収着(イオン交換反応)や水和酸化鉄に対する収着(表面錯生成反応)に関する平衡定数が記載されているほか、いくつかの鉱物の風化速度が評価できるようになっている。その一方で、NEA-TDB の整備対象元素については、NEA-TDB 選定値をそのまま採用しているようで、JAEA-TDB や PSI/Nagra-TDB、ThermoChimie のように化学種とその熱力学データを追加していることはなさそうである。TDB 整備作業は継続されているものの、筆者が調査した限り、最新版は GWB 用様式“thermo.com.V8.R6.230”の 2000 年 3 月版であることから、現在有効な NEA-TDB 選定値は収録されていない。

5. 地層処分事業の実施国

地層処分が事業として進められているスウェーデンおよびフィンランドでは、独自の TDB 整備は行われていない。スウェーデンにおける地層処分の実施主体であるスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社では、Nagra/PSI-TDB(2002 年に公開された 01/01 版)に $\Delta_r H_m^\circ$ を追加するなどの改良を施したものを使用している。また、フィンランドにおける地層処分の実施主体であるポシヴァ社では、ThermoChimie(2009 年に公開された Ver. 7b)を使用している。英国やベルギーが独自の TDB 整備をやめていること、また米国でも TDB 更新が滞っていることを鑑みるに、地層処分性能評価用の TDB は、Nagra/PSI-TDB、ThermoChimie、そして JAEA-TDB に絞られてきていることが窺える。

V. おわりに

地下水に溶出する放射性核種の溶解や錯生成の挙動を評価するために、各国とも熱力学データベース(TDB)の整備を進めており、その中核に経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)の TDB プロジェクトが存在することを概説した。この TDB プロジェクトは今後も継続される一方で、地層処分性能評価用 TDB の整備実施機関が減少傾向にあることも論じた。原子力機構においては、今後とも OECD/NEA をはじめとする欧米諸国の TDB 整備状況を参考にしつつ、わが国で想定される地

層処分環境に応じた TDB を整備するために、実験データを含む調査や更新作業を実施していく。

－ 参考資料 －

- 1) 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-023 (1999).
- 2) M.-E. Ragoussi and S. Brassinnes, Radiochim. Acta, 103(10), 679(2015).
- 3) I. Grenthe, F. Mompean, K. Spahiu and H. Wanner, TDB-2: Guidelines for the extrapolation to zero ionic strength, <http://www.oecd-nea.org/dbtdb/guidelines/tdb2.pdf>(2013).
- 4) J. S. Martinez, E.-F. Santillan, M. Bossant, D. Costa and M.-E. Ragoussi, Appl. Geochem., 107, 159(2019).
- 5) D. L. Parkhurst and C. A. J. Appelo, Techniques and Methods 6-A43, (2013).
- 6) T. J. Wolery, UCRL-MA-110662 PT I, Lawrence Livermore National Laboratory, (1992).
- 7) Aqueous Solutions LLC, <http://www.gwb.com/>.
- 8) 吉田泰, 北村暁, JAEA-Data/Code 2014-022 (2014).
- 9) NEA, Symp. Proc. "From Thermodynamics to the Safety Case", May 2010, Karlsruhe, Germany (2011).
- 10) A. Kitamura, JAEA-Data/Code 2018-018, JAEA, (2019).
- 11) 原子力機構, 平成 29 年度地層処分技術調査等事業(処分システム評価確証技術開発)報告書, http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/library06.html (処分システム評価確証技術開発平成 29 年度) (2018).
- 12) T. Thoenen, W. Hummel, U. Berner, E. Curti, Arbeitsbericht NAB 14-49, Nagra, (2014).
- 13) E. Giffaut, M. Grivé, P. Blanc, P. Vieillard, E. Colàs, H. Gailhanou, S. Gaboreau, N. Marty, B. Madé, L. Duro, Appl. Geochem., 49, 225(2014).
- 14) M. Altmaier, F. Bok, X. Gaona, C. Marquardt, V. Montoya, H. C. Moog, A. Richter, T. Scharge, W. Voigt and S. Wilhelm, GRS-396, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, (2015) [in German].

著者紹介



北村 暁(きたむら・あきら)

日本原子力研究開発機構 核種移行研究グループ
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処分・核種移行挙動評価・アクチニド元素の溶液化学



書籍販売のご案内

■『原子力のいまと明日』出版：丸善出版株式会社，B5 判 329 ページ，定価 2,200 円(税込)

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

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

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

本書は、丸善ネットストア、Amazon、そのほかオンライン書店などでお買い求めいただけます。日本原子力学会事務局からの直販は行っておりませんので、ご了承ください。
「2020 年春の年会」の会場では販売予定です。



イギリスの高校生たちが見た福島

フリージャーナリスト 井内 千穂

10月中旬の一週間、英国カンブリア州の高校生20人が福島を訪ねた。彼らの学校「ウェスト・レイクス・アカデミー」は原子力施設セラフィールドからわずか8kmの距離にある。去る8月には福島県の高中生20人が英国を訪ね同校と交流。4年ほど前から広野町のNPO法人ハッピーロードネット(西本由美子理事長)が積み重ねてきた国際交流プロジェクトである。折しも各地に甚大な被害をもたらした台風19号(ハギビス)襲来の中、稲刈りや和太鼓など日本文化に触れ、福島第一・第二原発、中間貯蔵施設、双葉町役場や町内の小学校も見学するというプログラムをほぼ実施できたのは強運というほかない。

最終日にはJヴィレッジで報告会が開催され、日英双方の高校生による発表が行われた。昨年10月に開催されたベラルーシの学生たちを迎えての報告会を聴きに行ったご縁で、今年は英国の高校生たちの通訳として参加する機会に恵まれた。自分の英語力不足を痛感しつつも、それを上回るほどに、人と人の触れ合いや次世代の交流の価値を肌で感じた次第である。

1957年10月、ウィンズケール(現セラフィールド)の原子炉火災事故が発生し周辺地域に多大な放射能汚染をもたらした。「カンブリアは60年前には今の福島と同じでした」と発表者の生徒が語った。避難命令が出なかったため、地元住民の健康被害について論争が続いている。別の生徒は、無人の双葉町で見た「津波が来た時刻のまま止まった時計や、震災の日のままのカレンダー、避難当時のままの場所に靴やかばんが残る小学校の有り様に胸のつぶれる思いでした」と言った。日英いずれも、どうしたほうがよかったのだろうか? 100年がかりで廃炉に取り組むセラフィールドだが、地元でも実際に見学した生徒は少ないと聞いた。「私たちは廃炉に向き合っていく」と力強く語り合う福島の生徒たちに、イギリスの生徒たちが神妙な面持ちで耳を傾ける。廃炉はこの世代に引き継がれて続くのだ。

Column

グレタ・トゥーンベリさんの国連スピーチに対する 各国の医学生の反応

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。ノーベル平和賞の候補としても注目を集めていたグレタ・トゥーンベリさんによる国連気候行動サミットでのスピーチが、大学内で話題となっていました。私の在籍するコメニウス大学には、近隣国のドイツ、オーストリア、ポーランドを中心に世界中から学生が集まり、出身国によってグレタさんのスピーチへの反応が異なっていたのが印象的でした。

近年、再生可能エネルギーの開発に力を入れているオーストリアとドイツ出身の学生は、「環境問題に熱心に取り組んでいて好印象」と話していました。普段の大学生活からも、両国の学生は、水筒を持参し、数km圏内であれば自転車に通学したり、地球環境問題に関心が強い様子が見えます。

対して、消費電力の8割を石炭に依存しているポーランド出身の学生は、「誰にでも問題を指摘する事はできる。具体的な解決案について言及していない」や、「ノーベル賞はありえない」と批判的な意見が多かったです。石炭にまつわる問題はポーランド人にとって身近で、価格が高い事から給湯器熱源による暖房へ切り替える事ができず、今でも石炭ストーブを使用する家庭が多いです。また、ほとんどの学生が『Kanarek』と呼ばれる、ポーランド国内の大気汚染の度合いを示す携帯アプリを持っています。

スウェーデンの2018年における一人当たりのGDPは\$53,873であるのに対して、ポーランドは\$15,431で大きく差があります。大気汚染の影響を身近に感じる中、石炭に頼らざるを得ないポーランドの人々にとって、経済力を持つスウェーデン出身の女の子のスピーチは、聞くに堪えないものであったのだと思います。

竹のようにになっているだろうか？

京都女子高校3年生 鳥居 千智

学校行事において主体的に動いてみると、そこは社会勉強ができる絶好の機会がごろごろ転がっている。前までよくわからなかったことや、理解しているつもりでそうでなかったことの本質に近づくように思えるのだ。まだまだ学ぶことは山のようにあるとはいえ、たくさん学んだ。そのうちの一つは「正論は必ずしもベストな解答になるとは限らない」だ。私がここで具体例を挙げなくとも思い当たることがあるのではないだろうか？ 相手が理不尽だとしても(または自分がそうだととしても)、それを通すのが一番の解決策になってしまうこともある。数によるものだったり、立場や勢いによるものだったり、あるいは情報の偏りによるものだったり要因はいくつも思い浮かぶ。生きていれば不条理なことに会う。一生懸命であればあるほど出会うのかもしれない。そこでは我慢せざるを得ない状況に置かれるのだろう。

ただし、理不尽が通るのに慣れたくはない。流さず、本来していいことか考え続け、本来は間違ったことだと思う感覚を持ち続けたい。それは辛いことでもあるが、自分の道に大きく外れて道を見失うことはなくなると思う。理不尽なことに抗えなくても心の中でそれを批判することができれば、それは完敗ではない。

とある研究者の方が高校生の私にこう言った。「竹のようにしなやかに真っ直ぐ進んでください。最終的に辿り着けば良いのですから」そのとき彼女はたくさんの苦勞をしてきたのだろうな、と直感的に思った。なぜかその言葉は私の中にスッと入って、今でも片隅に根を生やしている。

さて、私がだんだん近づいている大学や科学の世界はどんな世界なのだろうか。私はしなやかに真っ直ぐ進めるだろうか。

Column

「嫌な空気」を晴らして進む

フリーライター 服部 美咲

社会学者の橋爪大三郎ⁱは、日本人の考え方と行動様式を「特異」と指摘した。世界の他の文化圏ではまず「自己主張する」ところから始まるが、日本だけは「自己主張する前に、まず相手の様子を見る」からだ。確かに、日本では自己主張すると「嫌な空気」が生じる。我々はこの「嫌な空気」が苦手だ。

福島に関わる執筆活動を始めた頃、ある媒体で、福島についての企画が全て却下された。都内で媒体を運営するNPO団体の職員には「原発事故後の福島について、私たちの媒体に書いてほしくない」と言われた。「私たちは痛みについて考えないようにしているから」という。彼女が避けたいという「痛み」の内容を聞けば、前述の「嫌な空気」を指していたようだ。原発事故後の福島には「嫌な空気」が充満していると思ったのだろうか。納得できないなら辞めてくれと言われ、そのまま辞めた。

秋、福島県阿武隈山系の香茸(イノハナ)を楽しむ。福島の天然の茸は、種類や採取する場所によって、法定基準値100 Bq/kgを超えることがある。採った茸や山菜の放射能濃度を計測し、リスクを知った上で、食べる人も避ける人もいる。強制も禁止もしないのがマナーだ。互いの選択や主張を尊重することで、「嫌な空気」は晴らすことができる。原発事故後の福島で学んだことのひとつだ。福島には、確かに様々な主張や価値観の相違がある。それでも、人々は、「嫌な空気」を晴らしながら、共に歩む。あの媒体を去り、福島で働いている今を喜びたい。

ⁱ 「4行でわかる世界の文明」橋爪大三郎。

科学の心-チェルノブイリの教訓

NPO あいんしゅたいん 坂東 昌子

最初、甲状腺がんと放射線の影響が問題になったのは医療被ばくだった。Ronの研究結果「5歳未満の小児の発がんリスクが高い」ことから「5歳以下の子供には放射線治療を控える」という認識が広まり、甲状腺がんは外部被ばくが原因というのがチェルノブイリ事故以前の常識だった。事故後、小児の甲状腺がんがウクライナの医者たちから報告された時、科学者たちから「内部被ばくはあり得ない」「スクリーニング効果では?」「潜伏期間が短すぎる」等の疑問がでた。しかし、地元の医師達の粘り強い調査が進むと、さすが科学者である、事故後5年頃から動き始めた。日本の調査団も調査を開始(1990)、Ronは12万人の医療被ばくデータの再調査を開始し報告した(1996)。画期的だったのは1996年のIAEA国際会議で、「まだ、線量—リスクの関係は明確でないが、調査を始めよう」との決議が記録にある。そこには、「これは人類全体の問題、国際連携の下で取り組む」とあり、「対等平等な研究体制、公開の原則」が明記された感激的な文章だ。調査結果を独占すれば偏った結論が導かれる可能性が増える。科学者が平等にアクセスできる公開データの存在は、疑問があれば自ら検討できる、だからこそ偏らない結論に達するのだ。即、Cardis 団長の下、国際チームによるケースコントロール調査が行われ、2005年にDose-response relationshipという放射線影響の基本に則った結果がでて、科学者は全員納得した。これが、疫学調査から放射線の人体影響について明確にした唯一の経験なのだ。表皮近くにある甲状腺は外部被ばくも内部被ばくも無視できない。固定概念を科学で打ち破ったRonとCardisはともに女性科学者。福島健康調査は、この教訓を受け継いでいるのだろうか。気になる。

Column

デジタル世代の責任

東京学芸大学附属国際中等教育学校 6年 マイケル 瑛美

食料の枯渇、資源の枯渇、有限であるものを無限にあるように使い続けてきた私たち人間は、気候変動によって訴えかけられている地球の悲鳴によりやく気づき始めた。

スウェーデンの高校生グレタさんの“*How dare you!*”という大人への強烈なメッセージも話題を呼んだ。けれども、私は今行うべきことは過去への批判ではなく自分を顧み、具体的な解決方法を生み出すことだと考える。デジタル世代である私たちこそ、地球温暖化を進めている大きな要因であるようにも思う。何も、頭ごなしに大人を批判したって現実是不変変わらない。それはむしろ、今まで一部のリーダー達が行ってきた心地いい言葉を並べて、地球の叫びを無視し、現実から目を背けていることに他ならない。そして、これらのメディア映えする心地いい言葉を並べることの多くは日本を含めた先進国で行われている。

一歩引いて、世界を見渡して見るとどうだろう。貧困、紛争によってそもそも電気や水道が通っていない地域が世界にはまだまだたくさん存在する。その一つがウガンダのビディビディ難民居住地だ。私は、今月この難民居住地を訪れる予定だ。私は、難民居住地の同世代の若者との交流の中で、地球市民として何をすべきなのかを話し合いたいと考えている。文化も、言葉も生活している環境も違う彼らと、完全に分かりあうことは難しいかもしれない。まして、具体的な行動をなかなか起こせない先進国側の人間である私は難民居住地では批判の対象であるかもしれない。けれども、その批判も含め、言葉だけではない具体的な地球市民としての行動を彼らと考えていきたい。

私たちデジタル世代の強みは何であろう。それは、情報を得、発信することを素早く行えることではないだろうか。どんどん加速し積み重なっていく課題を、私たちの世代で解決したい。

わが国の電力市場の全体像と今後の原子力発電

第2回 電力市場と原子力発電の収支

電力中央研究所・社会経済研究所 服部 徹

原子力発電も、自由化された電力市場において競争に晒されることとなり、その収益は市場の価格によって左右されることになる。その費用構造や技術的特性から、原子力発電にとって重要な市場は、エネルギーとしての電力(kWh 価値)を取引する卸電力市場、供給力(kW 価値)を取引する容量市場、そして非化石証書(環境価値)を取引する非化石価値取引市場となる。特にベースロード電源としての役割が重視される原子力発電にとって、卸電力市場で決まる収入が重要となるが、海外の事例を見ると、原子力発電の収支は非常に厳しくなる可能性もある。

KEYWORDS: Profitability, Base-load Generation, Price, Revenue, Cost, Risk, Wholesale Electricity Market, Capacity Market, Non-Fossil Value Market

I. はじめに

電力システム改革により、発電事業にとって重要な卸電力市場での競争促進が進められるとともに、電気の持つ様々な価値を取引する新市場が創設されつつある。原子力発電も、こうした市場における競争に晒され、その収益は、市場の価格によって左右されることになる。自由化後の競争の中で収支が悪化すれば、原子力発電も市場から退出せざるを得なくなる。

典型的なベースロード電源である原子力発電は、可変費は小さいが、固定費が非常に大きいという費用構造の特徴がある。原子力発電の今後の収支やそれを踏まえた様々な経営の意思決定においては、こうした費用構造や技術的特性を考慮した上で、様々な市場で得られる収益の見通しを立てることが重要になる。

卸電力市場のように、取引所の価格情報が蓄積されている市場もあれば、まだ創設されたばかりの市場や、これから創設される市場もある。そのため現時点では、海外の類似の市場を参考にすることも有用である。

以下では、原子力発電の費用構造や技術的特性について確認した後、特に重要となる市場に焦点を当て、海外事例も交えつつ、それぞれの市場でどのように価格が決まり、それが収支にどのような影響を与えるのかについて論じる。

Impact of Electricity Market on Profitability of Nuclear Power Generation : Toru Hattori.

(2019年11月5日 受理)

II. 原子力発電にとって重要な市場

原子力発電は、発電量に応じて変化する可変費用の割合が小さく、限界費用が非常に安いという特徴がある。原子力発電の限界費用が安いということは、取引所において限界費用で入札しても、ほぼ確実に落札されるため、結果的にベースロード電源として運用することが可能となる。しかも、その時の市場価格は、原子力発電の限界費用よりも高い限界費用の発電所の入札価格で決まることが多いため、固定費を考慮しなければ、卸電力市場だけで大きな利益を得ることができる。卸電力市場では、相対取引や取引所取引が可能だが、結果的には、相対取引でも取引所取引でも、得られる収入は同じになると考えられる。いずれにせよ、発電した電力(kWh)を卸電力市場で売って得られる収入が、原子力発電にとって重要な収入となる。

次に、原子力発電は、その供給力(kW 価値)を容量市場に売って、収入を得ることも可能である。容量市場で約定すれば、卸電力市場からの収入に加えて、追加的な収入を得られるが、ベースロード電源として運用される電源にとって、容量市場で得られる収入は、通常、卸電力市場からの収入と比較して小さくなる。

さらに、原子力発電は、発電時に二酸化炭素を排出しない非化石電源であり、その非化石価値を今後創設される非 FIT 対象電源の非化石価値取引市場に売って、収入を得ることが可能となる。これも基本的には追加収入

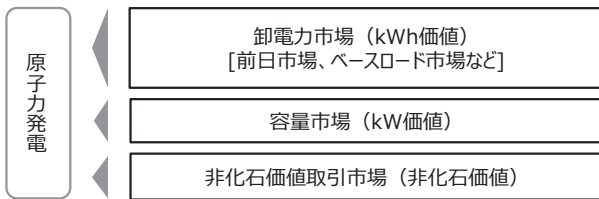


図1 原子力発電が収入を得る市場

となる。

他方で原子力発電は、一度運転を開始すれば、安定的に発電することができる一方で、起動・停止を頻繁に行うことは難しく、その出力を柔軟に調整することは難しい面もある¹。そのため、調整力として提供できるΔkW 価値は限られることになり、その価値を取引する需給調整市場に参加して収入を得ることは難しいと考えられる。もっとも、需給調整市場は卸電力市場と代替の関係にあり、通常、調整力としての価値を売る電源は、その時に発電できる電力を卸電力市場で売って収入を得ることはできない。したがって、卸電力市場で電力を売ることができれば、需給調整市場に参加できないということは必ずしもマイナスとはならない。

以上をまとめると、原子力発電にとっての主要な収入源は、卸電力市場で取引される kWh 価値、容量市場で取引される kW 価値、非化石価値取引市場で取引される非化石価値となる(図1)。

それぞれの市場でどのような価格が実現するかが、原子力発電の収支にとって重要となる。

III. 卸電力市場と原子力発電の収支

以下では、kWh 価値を取引する卸電力市場とベースロード市場での取引と、それが原子力発電の収支に与える影響について見ていく。

1. 卸電力市場の価格と収支への影響

発電した電力(kWh)を相対取引や取引所取引で取引することで大きな収入を期待できる原子力発電だが、収入の大きさは、取引所で決まる価格に依存するようになる。前回述べたように、相対取引の価格も長い目で見れば、取引所の価格と同じ水準になると予想される。そして、その価格は、基本的には市場全体の需要と供給のバランスによって決まる。需給がひっ迫すれば卸電力の価格は高くなり、供給余剰の状態となれば、価格は安くなる。需要と供給は短期的にも中長期的にも変動し、様々な時間軸において価格も変動する。

このことは、原子力発電が卸電力市場から得られる収入も、大きく変動することを意味する。通常、原子力発電は、一定の出力で発電するため、価格が高いときによ

り多く発電し、安いときには出力を抑制するといった調整はしない。販売する電力量が変動しないので、卸電力市場での収入は価格の変化で決まることになる。

また、原子力発電の費用は大部分が固定費であるため、その収支(利益)も大きく変動することを意味する。同じ発電電力量であっても、卸電力価格が高くなれば、大きな利益を獲得でき、逆に価格が低くなれば利益が出ないこともありうる。卸電力価格は、短期的にも中長期的にも大きく変動する可能性があるため、原子力発電は、卸電力市場での販売収入だけで考えると、「ハイリスク・ハイリターン」の電源といえるのである。

そのような収入の変動に対しては、長期にわたって一定の価格の下、一定量を販売する相対契約を結ぶことが考えられる。しかし、契約の相手方となる小売電気事業者も、小売市場で競争に晒される中、長期にわたって価格を固定化する契約を結ぶことはリスクであり、躊躇するであろう。契約期間が1年から2年程度であれば、先渡し市場(後述するベースロード市場を含む)や先物市場で、価格を固定化する取引を行うことは可能である。しかし、卸電力価格が下落し続ける状況の場合、そのような市場で取引していたとしても、収益の減少は避けられないことになる。

2. ベースロード市場の価格と収支への影響

原子力発電がベースロード電源であることから、卸電力市場と同様に kWh 価値を取引する市場として、新たに創設された「ベースロード市場」での収入も考えられるが、これは、原子力発電所を保有する大手発電事業者が、通常なら卸電力市場で売っていた電力の一部を売り入れなければならない市場であり、約定したとしても追加的な収入を得られるわけではない。約定すれば、1年間の先渡し契約となるため、価格を固定化できるメリットはあるが、入札価格はベースロード電源の平均費用を上限とすることになっている。このことは、卸電力市場の価格が高くなったとしても、ベースロード市場に販売する電力の分は、それよりも安い価格で取引せざるをえないことを意味する。すなわち、スポット市場の価格が高いときには、本来得られたであろう収入よりも低い収入しか得られないことになる。

一方で、スポット市場の価格がそこまで高くならなければ、ベースロード市場の価格は、スポット市場の価格とほぼ同水準になると思われる。なぜならば、買い手である新電力は、スポット市場でも電力を調達することができ、1年間、固定された価格で調達できるというメリットはあるものの、スポット市場の価格よりも明らかに高い価格で取引する必要はないからである。

海外でも、自由化の初期の頃に、既存の大手事業者によるその電力を強制的に販売させる市場が存在していた²⁾。それは、発電所そのものは大手事業者が所有し続けるも

¹ ただし、海外では、出力調整が可能で、負荷追従運転のできる原子力発電所もある¹⁾。

表1 スペインのベースロード市場(VPP)の落札価格

	2007年 7~9月	2007年 10~12月	2008年 1~3月	2008年 4~6月
落札価格から算出したMWh当たりのVPPの単価(落札価格+可変費)	44.78	38.44	55.82	59.61
VPP受渡期間を対象とする先物価格(VPPオークション前日の終値)	44.96	39.27	60.05	60.13
参考: VPPオークション前日のスポット価格	48.66	37.01	50.08	59.42
参考: VPP受渡期間中のスポット価格の平均	36.43	47.93	65.86	56.92

出所: Federico and Vives (2008)³⁾

の、その発電する電力を使う権利を新規参入者に与えるものとみなせるため、「仮想発電設備(Virtual Power Plant, 以下 VPP)」などと呼ばれていた。VPPの価格は、受渡期間が同じ商品(将来の電力)が先物市場で取引されている場合には、その価格に近い水準で決まることが知られている。例えば、スペインで取引されていた四半期単位のベースロードのVPPの発電電力量当たりの単価は、VPPのオークションが開催された時に取引されていた先物の価格(VPPオークション前日の終値)とほぼ近い水準であったことが分かる(表1)。

わが国のベースロード市場も、始まったばかりではあるが、これまでの2回の取引(7月および9月)の結果を見ると、前年度のスポット市場の年平均価格を若干下回る水準で決まっている⁴⁾。

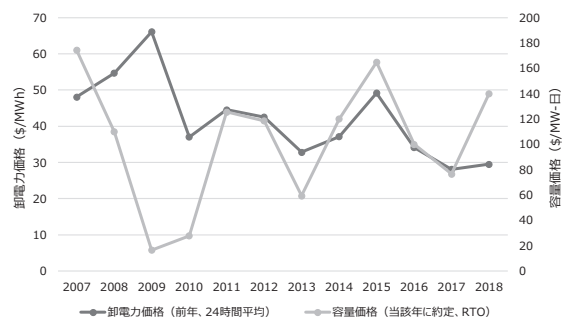
IV. 容量市場と原子力発電の収支

1. 容量市場の価格と収支への影響

原子力発電は、その供給力(kW 価値)を容量市場に売ることができ、卸電力市場からの収入とは別に収入を得ることができる。ただし、卸電力市場と容量市場から得られる収入の合計が、容量市場が存在しない時の卸電力市場からの収入のみと比較して必ずしも大きくなるわけではないことに留意する必要がある。容量市場がない状態では、需給ひっ迫が生じるリスクがある中で、卸電力価格が上昇する局面が多くなる一方、容量市場がある場合には、十分な供給力が確保された、いわば供給余剰の状態では、卸電力市場における競争が行われ、卸電力価格が低く抑えられると考えられるためである。

容量市場の価格は、広域機関が設定する需要曲線と、供給力を提供できる電源等の入札した価格の曲線(入札曲線)の交点で決まる。容量市場の需要曲線自体は、目標とする調達量において、容量市場の収入と卸電力市場の収入を合わせて、新設電源の総費用(固定費と可変費)がちょうど回収できるように設定されている。そのような価格は、指標価格と呼ばれるが、それは実際の容量市場の価格がその指標価格で決まることを意味しない。価格はあくまで入札曲線との交点で決まるので、供給力が不足している状況では価格が高くなり、逆に余剰がある状況では価格は安くなる。

容量市場のルールが価格に影響を与えることもある。約定した電源は、容量の確保期間中に、発電能力を維持



出所: PJM のデータより作成

図2 米国 PJM の卸電力価格(前年)と容量価格の推移

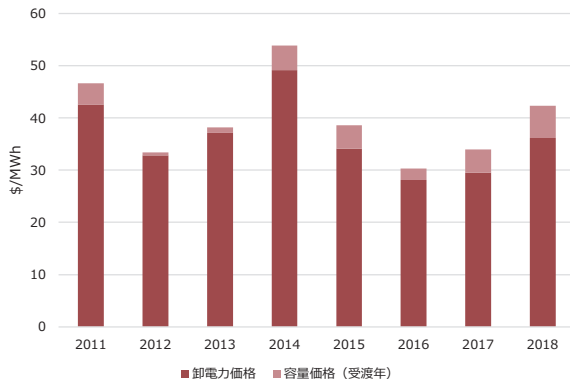
する必要があり、維持しているとみなされるのに必要な要件(例えば、需給ひっ迫時に発電していること、等)のことを「リクワイアメント」と呼ぶ。このリクワイアメントが満たせない場合にはペナルティが課せられる。リクワイアメントが厳格だったり、ペナルティが高額だったりすると、より確実にリクワイアメントを満たすのに追加的な費用もかかることから、発電事業者は、入札価格を高めに設定する必要があり、その結果、市場価格が高くなると考えられる。

容量市場の価格は卸電力市場の価格の影響も受けると考えられる。卸電力価格が低く、卸電力市場で得られる利益が限られる場合、発電事業者は、容量市場で確実に落札できるよう、入札価格を低めに設定しようとすると考えられる。図2は、長年、容量市場を運営している米国北東部の PJMⁱⁱ と呼ばれる地域で、毎年の容量価格(RTO エリア)と、容量価格が決定した年(オークションが行われた年)の前年の卸電力価格(前日価格の24時間平均値)の推移を示している。実際には容量価格は様々な要因の影響を受けるものの、特に2011年以降は、卸電力価格が上昇(下落)した後は容量価格も上昇(下落)する傾向にあることが分かる。

なお、ベースロード電源である原子力発電の場合、容量市場からの収入は、卸電力市場からの収入と比べると小さく、言い換えれば、収入面での容量市場への依存度は小さいといえる。図3は、同じく米国の PJM で、年間稼働率90%の原子力発電を想定して、実際に収入を得る年の卸電力価格と容量価格を MWh 当たりに換算して合わせた値、すなわち発電電力量当たりで得られるそれぞれの市場からの収入を示したものである。容量市場からの収入は多い時でも、合計した収入の2割に満たない。

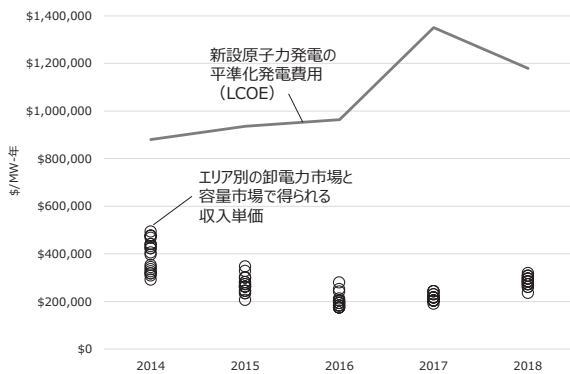
また、原子力発電の場合、燃料費などの可変費の割合が小さく、収入の大部分は固定費の回収に充てられるが、図3からは、容量市場が存在しても、収入が毎年大きく変動する可能性があることを意味する。

ⁱⁱ Pennsylvania, New Jersey, Maryland の3つの州名に由来しているが、現在は他の州も含まれている。



出所：PJM のデータより作成

図3 PJMの発電電力量当たりの卸電力価格と容量価格



出所：Monitoring Analytics (2019)⁵⁾より作成

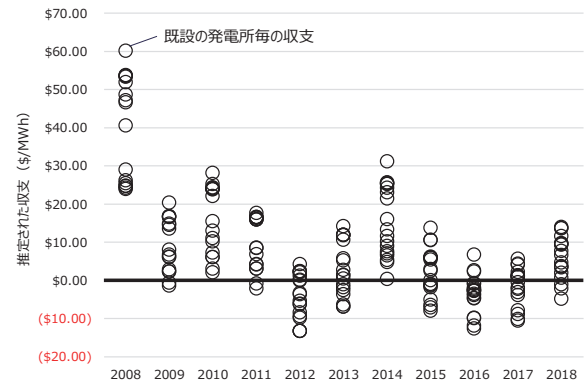
図4 新設原子力発電の費用(LCOE)と米国PJMにおける卸電力市場と容量市場で得られる収入の比較

2. 卸電力市場と容量市場を考慮した収支

以下では、米国 PJM のデータに基づき、卸電力市場と容量市場の収入を考慮した、原子力発電の収支の状況を見てみよう。

図4は、原子力発電所を新規で建設する場合(2,200 MWの AP1000 を想定)の毎年の平準化発電費用 (Levelized Cost of Energy, LCOE) と、PJM 管内の 20 のエリア別に、卸電力市場と容量市場で得られる収入の単価(図4の丸印が対応)を比較したものである。いずれの年も、市場で得られる収入は、新設の費用水準を大きく下回っていることがわかる。同じような計算を他の電源に対して行くと、石炭火力もやはり収入が費用を下回るが、ガス火力(CCGT)は、平均的な収入で、新設の費用を回収できる水準になっている。

次に、既設の原子力発電所について、発電所を維持するために必要な費用を回収できているかどうかを確認したのが図5である。図5の丸印で示しているのが、発電所ごとに立地エリアの卸電力市場と容量市場からの収入から、個別に発電費用を差し引いた値(推定収支)である。発電費用には、公開されている全米平均の燃料費、運転費、追加的な投資費用が含まれる。年による変動はあるが、いくつかの発電所がその維持に必要な平均的な



出所：Monitoring Analytics (2019)⁵⁾より作成

図5 米国PJMにおける既設原子力発電所の維持費用と卸電力市場と容量市場で得られる収入に基づく収支

費用を回収できていないと推察される。実際、米国では早期閉鎖に踏み切る原子力発電所もあるが、こうしたデータはその背後にある厳しい収支状況を裏付けている。

このように、原子力発電の収支が厳しい背景には、米国の卸電力価格が、シェールガス革命による燃料(ガス)価格の下落に伴い、低い水準となっていることがある。少なくとも米国 PJM の場合、卸電力市場から十分な収入が得られないと、容量市場があっても、既設の原子力発電所を経済的に維持できない場合もあることを示している。同じような状況は、再生可能エネルギー電源の普及で卸電力価格が下落している欧州でも生じていると推察される。

V. 非化石価値取引市場と原子力発電の収支

原子力発電は非化石電源でもあり、非 FIT 電源を対象とする非化石価値取引市場において、その価値を非化石証書という形で売ることができ、卸電力市場や容量市場からの収入とは別に、追加的な収入を得ることができる。

FIT 電源対象の非化石価値取引市場のオークションは、既に開始しているが、マルチプライスオークションで行われ、上限価格と最低価格が定められていた。しかし、非 FIT 電源対象のオークションは、容量市場などと同様に、シングルプライスオークションで行われる。また、上限価格のみが設定されるため、価格は0円/kWhから上限価格の4円/kWhの範囲内で決まることになる。

非化石価値取引市場の価格は、目標とする非化石電源の比率の影響を受ける。それが現実的に厳しい目標であれば、価格は高くなることが予想される。FIT 電源対象のオークションにおいては、ほとんどの約定価格が最低価格となっていた。その理由については、他の文献⁶⁾に譲るが、FIT 対象電源の市場に特有の仕組みの影響もあ

るため、留意が必要である。

非FIT対象電源の市場は、まだ詳細設計の段階で、将来に向けて不確定な要素も残されている。非化石電源を以前から所有する事業者とそうでない事業者のイコールフットイングの観点から、2030年度までの事業者ごとの目標値の設定に関して、複雑な特例措置が導入される他、目標値から一律に一定量を控除する激変緩和措置が導入され、当面は価格高騰のリスクが抑えられているとされている⁷⁾。しかし、こうした措置の詳細は適宜見直すことになっており、それが価格にどのような影響を与えるのかを見極める必要もある。

なお、非化石価値取引市場は、筆者の知る限り、海外に同様の市場が存在せず、先行事例の経験を参考にすることができない。米国の一部の地域では、既設の原子力発電の非化石価値について、連邦政府が推計する「炭素の社会的費用」に基づいて、一定の対価を支払うゼロ・エミッション・クレジットと呼ばれる制度が導入されているが、市場でその価格を決める制度ではない。

また、欧州などは、電力の環境価値に関しては、汚染者負担原則に基づき、化石電源に排出権(証書)の購入を義務付け、排出権取引市場で決まる価格の支払いを義務付けている。その結果、化石電源の発電費用は増加し、卸電力取引所で取引する際には、その分だけ入札価格を上昇させることになる。すると、卸電力市場の価格は上昇し、二酸化炭素を排出しない原子力発電は、その分高い価格で電力を売ることができるようになっている。

VI. 原子力発電の収支リスクとその影響

以上、卸電力市場や原子力発電が実質的に参加可能な新市場における価格の決まり方や収支への影響について見てきた。まだ取引を開始していない市場や、詳細設計の残る市場もあるため、現時点で価格の見通しを立てることは非常に難しい面もあるが、基本的には、それぞれの市場において、需要と供給がどのような関係になっているのかを見極めることが重要である。需要と供給は常に変動するため、その交点で決まる価格も変動し、それに伴い収入も変動する。発電所を安定的に運転できたとしても、固定費が大半を占め、容易に費用を削減できない原子力発電にとって、それは収支が変動するリスクが極めて大きくなることを意味している。このことは、長

期にわたって安定的な価格で電力を販売する契約を結ぶことでもない限り、原子力発電で安定的な収入を得ることは難しいとされ、新たに投資することが難しいとされる。加えて、今後、再生可能エネルギー電源の発電費用が低下していくと、卸電力価格も低い水準で推移する可能性もある。すると、原子力発電のシェアは小さくなっていかざるを得なくなる。市場メカニズムを活用する中で、果たして原子力発電は生き残っているのか、という非常に厳しい問いが投げかけられている。

もちろん、市場の設計が不完全であるがゆえに、そのような状況に陥っていると見ることもできる。例えば、kWh 価値や kW 価値、非化石価値以外にも、原子力発電が社会にもたらす価値があるにもかかわらず、そのような価値を取引する市場がないために、過小評価されている可能性も否定できない。また、再生可能エネルギー電源が固定価格買取制度による政府の支援を受けて大量導入されていることが市場を歪めている面もある。しかし、競争的な市場における、民間の事業者による原子力発電の推進はリスクが大きく、政府の支援策が必要との認識が広まっている。

－ 参考資料 －

- 1) Lokhov, A. "Load-following with nuclear power plants," NEA updates, NEA News, No.29.2, 2011.
- 2) 服部徹, 電力市場の競争促進および活性化に向けた制度的措置の課題, 電力中央研究所報告 Y15010, 2016年.
- 3) Federico, G. and X. Vives "Competition and Regulation in the Spanish Gas and Electricity Markets" Report of the Public-Private Sector Research Center, 2008.
- 4) 資源エネルギー庁, ベースロード市場 2019年度第2回取引結果について, 制度検討作業部会, 2019年.
- 5) Monitoring Analytics, State of the Market Report for PJM, 2019.
- 6) 朝野賢司, 非化石価値取引市場の現状と展望, エネルギー・資源, Vol.40, No.4, 271-275, 2019年.
- 7) 総合資源エネルギー調査会, 電力・ガス事業分科会, 電力・ガス基本政策小委員会制度検討作業部会, 第二次中間とりまとめ, 2019年.

著者紹介

服部 徹 (はっとり・とおる)

本誌, 61[12], p.31(2019)参照.

最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構

第2回 1Fの廃炉と環境回復をめざして(2)

佐藤 優樹, 川瀬 啓一, 飯島 和毅, 小林 卓也

前回は福島第一原子力発電所(1F)事故への対処のための研究のうち、廃炉の取り組みを紹介した。今回はその続きと、1F事故対処のもう一つの大きな柱である福島環境回復について紹介する。

KEYWORDS: Japan Atomic Energy Agency, Fukushima daiichi NPS, decommissioning, Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Fukushima Environmental Safety Center, Cesium concentration, Ocean pollution

I. 1F 建屋内の放射性物質を可視化

“見えない放射線を見る”—これは、放射線から人を守ることはもちろん、その場所がどういうところかを知るためにも重要となる。福島第一原子力発電所(1F)の廃炉作業においても、目に見えない放射性物質を可視化することにより、作業員の被ばく線量を少なくし、かつ除染を効率的に進める手助けをすることができる。

1F 建屋内では床面や壁、天井、機器、がれきなどのさまざまな物体に放射性物質が付着しており、3次元的に拡がった汚染が存在している。また、建屋内は作業員が侵入できない、長時間作業が実施できないといった放射線量率が高いエリアが存在する。

このような高線量率環境において3次元的な放射性物質の分布を遠隔で測定することにより、汚染源を特定し、効率的な除染に役立てることができれば、廃炉作業の一層の加速につながる。

放射性物質の拡がりを“視える化”

飛散した放射性物質の分布を測定するための装置として、ガンマカメラという放射線測定器が有望視されている。しかし、従来のガンマカメラは数kgから数十kgと重く、廃炉現場での活用が容易ではなかった。このような中、早稲田大学の片岡淳教授や浜松ホトニクスに

Fukushima Daiichi Decommissioning and Fukushima Remediation (2): Sato Yuki, Kawase Keichi, Iijima Kazuki, Kobayashi Takuya.

■前回のタイトル

第1回 1Fの廃炉と環境回復をめざして(1)



図1 仮想空間に再現した原子炉建屋にホットスポットのイメージを重ねた。奥の白丸部分がホットスポット

よって小型・軽量ガンマカメラが開発され、重さ1.9kgとかなり軽量化が図られた。

原子力機構ではこれらの技術を基盤として、線量率が高い現場でも持ちこみやすく、小型ロボットにも搭載可能な小型軽量化したコンプトンカメラ(ガンマカメラの一種)を開発した。このカメラを東京電力の地上走行型遠隔ロボットに搭載して、1号機原子炉建屋内の調査を実施した結果、周囲に比べて線量率が局所的に高いホットスポットを遠隔にて可視化することに成功した。加えて、作業現場で撮影した写真や動画を組み合わせることによって現場の3次元モデルを仮想空間上に構築し、ここにホットスポットを表示することによって、ホットスポットの在りかを3次元的に把握できるようにした(図1)¹⁾。

また、このような遠隔にて放射性物質を可視化する技

術は、1F サイト内に限らず福島県の帰還困難区域において屋外環境に飛散・沈着した放射性物質の分布測定にも応用されつつある。原子力機構は㈱千代田テクノと共同で、福島県の復興を目的として実施されている地域復興実用化開発等促進事業費補助金事業において浜通り地域の地元企業と連携し、コンプトンカメラをドローンに搭載した遠隔放射線イメージングシステムを開発した²⁾。同システムを用いた帰還困難区域における実証試験では、点在した複数のホットスポットを従来のサーベイメータを用いた測定よりも短時間で検知・可視化することに成功した。

上述した遠隔での放射線イメージング技術について、今後は、1F の建屋内でドローンやロボットにコンプトンカメラを搭載し、高線量な場でも遠隔で詳細な3次元汚染分布が把握できるよう研究開発を進めるとともに、これらの詳細な3次元汚染分布に関する情報を提供することにより、汚染源の効率的な撤去を通して廃炉作業の円滑な推進に貢献することを目指す。

II. セシウムはどう動くのか

ここまでは原子力機構が取り組んでいる1F事故への対処のうち、廃炉に関する研究を紹介してきた。ここからは事故対処のもう一つの大きな柱である環境回復について紹介する。

原子力機構は「ふくしま」の環境回復に取り組むために事故直後から、ヘリコプターや自動車、あるいは徒歩により放射線量率を調べ、それらをまとめた分布マップを作成してきている。また、除染技術のモデル実証や環境動態研究、さらには住民からの質問に答える「放射線に関する質問に答える会」を実施してきている。その拠点となっているのが、当機構の福島環境安全センターである。同センターは現在、福島県が設置した福島県環境創造センター内にあり、県や国立環境研究所と協力・連携



図2 現地調査：水源めざし、やぶの中を進む

して業務を進めている。

現在、力を入れて取り組んでいる研究の一つが、事故によって環境中に放出された放射性物質が、未除染の森林から河川水系を通過して河口域に至るまで、環境中でどう動いているのか、これからどう動くのか、を調べる「環境動態研究」である。研究は、「現地調査」と「シミュレーション開発」の二本柱で成り立っている。ここでは、この研究の二本柱のあらましについて例をまじえて紹介する。

「現地調査」では、森林、河川、河口域などの様々な構成物(土壌、水、植物等)を採取し、そこに含まれる放射性セシウム濃度の経時変化や、地域ごとの放射性セシウムの分布状況の違いを調べることにより、放射性セシウムの起源や移行プロセスを明らかにし、シミュレーションに必要なモデル(物理・化学現象を表す数式)を確立することを目的としている。

福島県東部に位置する南相馬市と浪江町にまたがって流れる太田川の源流域には、深い森が広がる。ここで進められている源流域調査では、河川水に含まれる放射性セシウムのうち、溶存態(イオンのように水に溶けているもの)の起源を突き止めることが目的だ。溶存態は植物や魚などの生態系に移行しやすいといわれており、これらの濃度の将来予測をする上で重要なものであるが、その濃度は時間とともに減少している。現在は全ての河川で1 Bq/L未満と非常に低く(最も高い河川でも0.1 Bq/L程度)、食品衛生法上の飲料水の基準値(10 Bq/L)と比較しても問題のないレベルである。

林道の終点で車を降り、源流まで沢を詰める(図2)。湧水点付近では、地表からしみ出す湧水、地表を数m流下した渓流水、付近の落葉層等を採取した。

下流のダム湖では深度40mの湖底の堆積物、深さごとの湖水を採取し、さらにその下流の河川では、自動観測装置を用いて、水位・濁度を継続観測するとともに、水位上昇時には自動で河川水を採水した。河口域では、河口前面の数地点で、海水・堆積物を採取した。多様な環境で継続的な調査を行っているのは、陸域から水域にかけて放射性セシウムの移行挙動について、包括的に理解することを目的としているためである。

これらの現地調査の結果、溶存態放射性セシウムは、湧水点から森林表土を流出する過程で水に溶出していること、放射性セシウムの物理減衰より早い速度で濃度が減少していること、夏場は高く、冬場は低い濃度になる季節変動を示すことなどを、明らかにしている(図3)。これらは、溶存態の起源や移行プロセスを明らかにする上で重要な知見で、微生物が活発になる時期などと比較しながら、解明を進めていく。

シミュレーション開発：様々な条件下での濃度を予測
「シミュレーション開発」では、「現地調査」で得られた

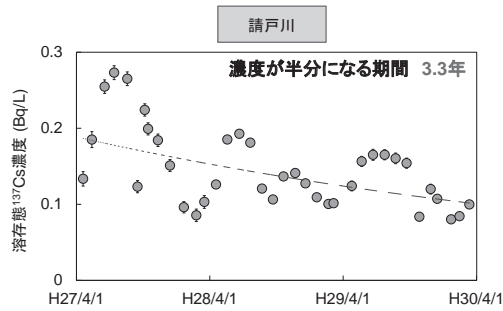


図3 下流域で測定した河川水中に溶存する放射性セシウム濃度の経時変化(請戸川の例)

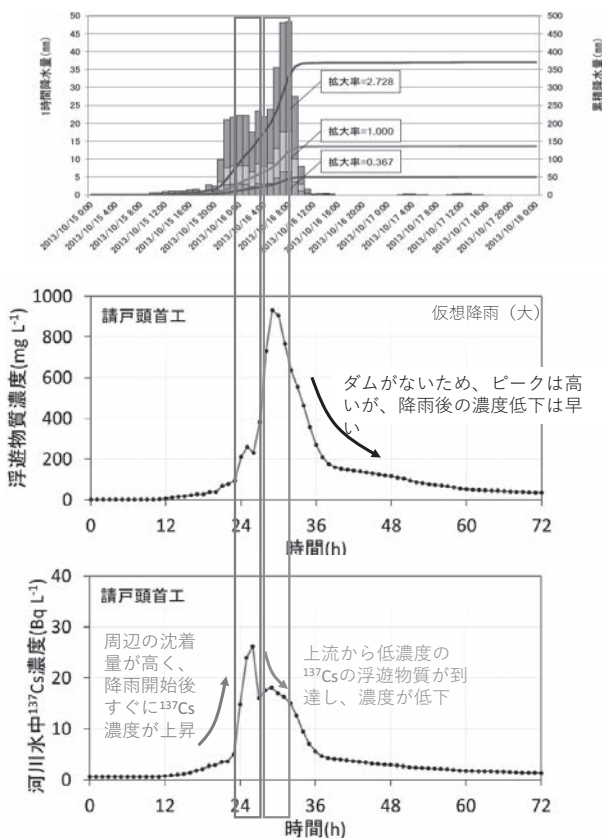


図4 シミュレーションによる大雨時の高瀬川請戸頭首工における河川水中セシウム濃度の経時変化予測

知見・モデルに基づき、様々な環境条件下での放射性セシウムの挙動を表現できるコンピューターシミュレーションツールを整備することを目的としている。主なツールは二つで、一つは環境中で最もダイナミックな河川水による移動挙動のシミュレーション、もう一つは生態系も含めた環境中の様々な構成物間の移行挙動のシミュレーションである。このうち、河川水系移動挙動シミュレーションは、地質構造を基に地下を3次元、標高データを基に地表を2次元でモデル化し、地表水と地下水を同時に計算して、得られた水循環場から土砂、セシウムの動態を予測する。予測結果と観測結果を比較したところ、現地調査で確認されている溶存態濃度の季節変動等を十分再現できなかったものの、土壌粒子等に吸着

された放射性セシウム(懸濁態)の挙動は良好に再現できた。

このシミュレーションを用いると、例えば様々な降雨を想定した際の各水門における放射性セシウムの濃度変化を予測できる(図4)。その結果、ある水門では、比較的強い雨が降ると、放射性セシウム濃度のピークが2回あることが明らかとなった。降雨時には、放射性セシウムは主に懸濁態として流れるが、1回目のピークは比較的沈着量が多い中流域から流出してきたもので、川の濁りがそれほど多くなくても放射性セシウム濃度は高くなる。一方、2回目のピークは比較的沈着量が少ない上流域から流出してきたもので、川の濁りは非常に多くなるが、放射性セシウム濃度のピークは小さくなる。つまり、農地への影響を少なくするためには、1回目のピークより前に、すなわち、川の水の濁りのピークより前に水門を閉めたほうが良いということが言える。

「福島総合環境情報サイト」を開設

原子力機構では、放射性物質の沈着分布やその経過を把握し、住民の方々の被ばく線量の推定や除染の計画立案の基本情報として整理し、関係機関によるデータを集約した「放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト」を公開している。

また、これまでの環境動態研究等で得られた知見を、Q&A形式で整理し、「根拠情報Q&Aサイト」として公開している。本サイトは、住民の方々のニーズの高いQを出発点としていること、知りたい情報の詳細度に応じて階層的に情報を整理し、根拠となる論文まで追跡できることが特徴である。

さらに、開発したシミュレーションツールを用いて環境中の空間線量率や放射性セシウムの動きについて様々な環境条件下での解析の結果をまとめた「解析事例サイト」を整備し、これまでに公開してきた各サイトと合わせて「福島総合環境情報サイト」を平成31年3月に公開した³⁾。このサイトでは、実際の観測データ、現地調査に基づく放射性セシウムの分布や動き、それらに基づく数値解析の結果等多角的に情報を知ることができる。このように、研究開発で得られた知見・情報を分かりやすく提供することで、住民の方々の疑問解消はもちろん、自治体・関係機関の施策検討まで、幅広く役立てていただけるよう努めている。

このような環境動態研究の成果は、福島県での復興の進展に合わせて、毎年自治体や国等の関係機関に取りまとめて提供しており、避難指示解除の判断根拠や、農林水産業の復興計画策定のための基盤情報として活用いただいている。これらの貢献を評価いただき、平成31年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞(開発部門)をいただいた。今後も、将来の放射性セシウムの挙動を予測する上でカギとなる溶存態の生成・移行プロセ

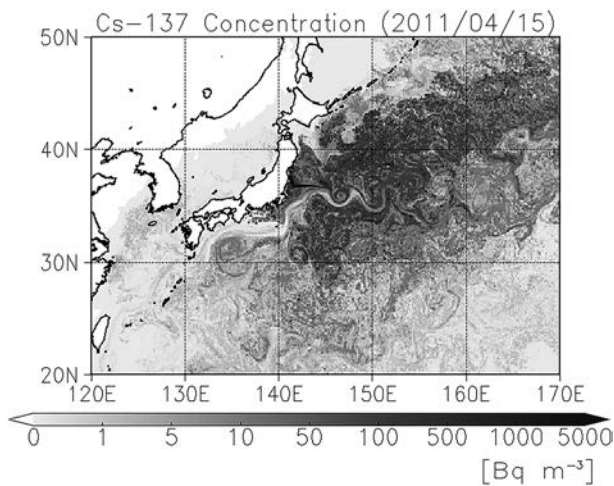


図5 2011年4月15日におけるセシウム137の海表面濃度分布

スを中心に調査研究を進め、シミュレーションツールの精度向上と、分かりやすい多角的な情報の発信を継続してまいりたい。

Ⅲ. 事故による海洋汚染を予測する

原子力施設等で万一の事故により放射性物質が環境中に放出されると、放射性物質は大気・陸域経由または直接海洋へ放出され、海洋汚染を引き起こす。海洋環境の汚染状況を把握し緊急時対策を検討するために、事故により放出された放射性物質の分布と移行過程を予測することは重要である。

このため原子力機構では放射性物質の海洋拡散モデルの開発を進めてきており、福島第一原発事故の際には、その海洋拡散モデルを福島沿岸域に適用し、海水中における放射性物質の移行過程を再現した。

しかし、これらは事故が発生してから数週間経過してから過去の海流場を用いて計算を実施したものであり、「将来の汚染状況を把握する」計算の即時予測性能はなかった。同時に、計算に必要な海流等の入力データの作成や妥当な計算条件の設定に3週間程度かかるなどの課題があった。

1ヵ月後までの海洋汚染を3時間で予測

そこで原子力機構では、2014年8月から配信が開始された気象庁の海象予報オンラインデータを活用することなどにより、日本周辺の海域や海水中および海底堆積物中の放射性物質の濃度を1ヵ月先まで迅速に予測することができる緊急時海洋環境放射能評価システム(STEAMER: Short-Term Emergency Assessment system of Marine Environmental Radioactivity)⁴⁾を開発した。

このシステムは、原子力機構が開発した放射性物質の大気拡散を予測する緊急時環境線量情報予測システム(世界版 WSPEEDI)とあわせて用いることで、大気を経由して海洋へ降下する放射性物質の分布も予測すること

が可能である。

このシステムには、日本を含む東アジア諸国の原子力施設と米国の原子力艦船の停泊港の位置情報が登録されており、これらの施設で事故が発生した際には、単位放出条件を用いて速やかに海洋拡散予測計算を実施することができる。

また、登録された施設から海洋への直接放出を仮想した事前予測計算を毎日自動で実行する機能も備えている。事故発生から30日後までの予測に必要な計算時間は約3時間である。

登録地点以外で原子力事故が発生した場合や、放射性物質の施設から海洋への直接放出に加えて大気を経由して海洋へ降下する場合、そして放射性物質の放出量情報が事故の進展に伴い明らかになった場合は、計算条件の変更が必要となる。そのため詳細計算機能として、放射性物質の種類、放出海域の位置・深度、放射性物質の放出モードの形態、放出量情報の時間変化等の計算条件を詳細に設定して予測計算を行うことが可能である。

このシステムの計算モデルの予測性能を確認するために、1F事故によって発生したセシウム137による海洋汚染の再現計算を実施した。WSPEEDIで計算された大気から海洋への降下量と海洋への直接放出量を入力して計算した結果、東京電力、文部科学省、そして各研究機関が測定した本州沿岸から沖合海域におけるモニタリング値を良好に再現できたことを確認した。2011年4月15日におけるセシウム137の表層濃度分布を再現したのが図5である。さらに試験運用として、原子力施設からセシウム137が1 Bq/hの放出率で海洋へ直接放出することを仮想した計算を2014年9月から2019年10月(執筆時現在)まで毎日実行し、システムの安定性と堅牢性を確認した。

このシステムの開発により、海洋汚染の予測情報に基づいて海水を採取する場所の設定、分析結果を用いた放射性物質の海洋への放出量推定と汚染分布の再現、これらに基づく禁漁海域や航行禁止海域の設定など、緊急時対策の検討や事故の詳細解析に役立てることも可能となる。このほか沿岸部での詳細な予測機能の追加⁵⁾を手がけていく予定である。

なお、1F事故後の海洋汚染については本誌にいくつかの解説記事等が公表されている。ここではそれらの記事のあらましと本研究との関連について紹介する。

日下部正志「環境における放射性核種の分布と動態 3. 海洋における人工放射性核種の動態」(2011)は、環境に放出された人工放射性核種がその後どのような分布挙動をするかについて、過去の研究成果を総括することにより、その後の調査研究に示唆を与えることとなったものである。

中野政尚「長期的な海洋環境影響は？」(2011)は1F事故直後に放出された放射性物質が地球規模では長期的に

— 参考文献 —

どのように海洋拡散するかを、原子力機構が開発した計算コード LAMER を用いて広域的な海水中濃度を 2041 年まで予測し、それによる海産物摂取による被ばく線量を推定したものである。

青山道夫「福島第一原子力発電所から放出された放射性セシウム同位体の北太平洋における総量と分布」(2012)は、事故に由来する放射性セシウムが北太平洋全域にどのように拡散し、これからどうなるのかを、過去の研究成果と当時の観測結果をもとに推定したものである。

なお中野、青山の論文は 1F 事故発生から間もない時点での限定的な情報と当時の計算コードにもとづいて書かれたものであり、実測データはその後に相当程度、拡充された。また、将来の予測についても、LAMER は計算の容易さを特徴としているため、低分解能の計算格子で単純な物理モデルを解いており、概況を把握することはできたが、今回紹介した STEAMER のような高分解能で詳細な物理則にもとづいて計算された海象データを援用するならば、より正確な予測が可能となることが期待される。

本多牧生、乙坂重嘉「福島原発事故由来の放射性物質が付着した海底堆積物の再懸濁と水平輸送過程」(2016)は、1F 事故由来の粒状態放射性セシウムが、海洋内でどのように移動しているかを 3 年間にわたって調べたもので、その結果、放射性セシウムが沈着した海底堆積物が大陸斜面に水平方向に移動していることがわかったことを紹介したものである。今となってはさらに、沿岸域における表層堆積物中のセシウム 137 濃度減少には、生物攪乱等による堆積物の鉛直混合に伴う希釈が最も大きく寄与する⁶⁾などの知見が得られている。

青山道夫、山澤弘実、永井晴康「福島第一原発事故の大気・海洋環境科学的研究の現状 事故の何が分かったか、事故から何がわかったか」(2018)は、1F 事故により大気や海洋に放出された核種や放出量、放出の時間経過について、2017 年までに明らかになったことをまとめたものである。

- 1) Y. Sato, Y. Terasaka, W. Utsugi et. al., Radiation imaging using a compact Compton camera mounted on a crawler robot inside reactor buildings of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2019, Vol. 56, pp. 801-808, doi:10.1080/00223131.2019.1581111
- 2) (国研)日本原子力研究開発機構, (株)千代田テクノ, プレスリリース “空からすばやく環境中の放射性物質分布を 3 次元で可視化”, 令和元年 5 月 9 日, <https://www.jaea.go.jp/02/press2019/p19050901/>
- 3) <https://fukushima.jaea.go.jp/ceis/>
- 4) T.Kobayashi, et al., “Development of a short-term emergency assessment system of the marine environmental radioactivity around Japan”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2017, Vol. 54, p. 609-616.
- 5) Y. Kamidaira, et al., “Development of regional downscaling capability in STEAMER ocean prediction system based on multi-nested ROMS model”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2019, Vol. 56, p. 752-763.
- 6) S. Otosaka, “Processes affecting long-term changes in ¹³⁷Cs concentration in surface sediments off Fukushima”, *Journal of Oceanography*, 2017, Vol. 73, p. 559-570.

著者紹介

執筆順, 所属はすべて日本原子力研究開発機構

佐藤優樹 (さとう・ゆうき)

(専門分野・関心分野)放射線計測・放射線測定器とロボットおよび環境認識デバイスを組み合わせた遠隔放射線イメージングシステムの開発と実証

川瀬啓一 (かわせ・けいいち)

(専門分野・関心分野)除染・環境回復

飯島和毅 (いいじま・かずき)

(専門分野・関心分野)陸域・地質環境における放射性核種移行

小林卓也 (こばやし・たくや)

(専門分野・関心分野)海岸工学・砕波帯における波浪の現地観測

基礎から分かる未臨界

第4回 臨界安全と未臨界

日本原子力研究開発機構 山根 祐一

核燃料物質を取り扱う施設特有のリスクに対して「安全」を保つための考え方や技術が「臨界安全」である。臨界安全において第一に重要なことは未臨界を保つことであり、その要点は未臨界である条件を明白にしてそれを守ることにある。そのために中性子の漏れや吸収の効果を利用して臨界安全管理を行う。今後の課題の一つとして、事故時の未臨界条件を明らかにするために、不均一な体系の物質分布の計算モデルの検討が期待される。

KEYWORDS: *subcriticality, criticality safety, criticality safety control, criticality accident, neutron infinite multiplication factor, neutron effective multiplication factor, reactivity, inhomogeneous*

I. 臨界安全とは

1. 臨界安全の位置づけ

機械設備等に関する ISO/IEC ガイド 51 では「安全」を「許容できないリスクがないこと」と定義している¹⁾。核燃料を取り扱う施設特有のリスクは2つに分けられる。万一臨界事故が生じたときに生成される核分裂生成物 (FP) からの放射線による外部被ばくおよび FP の摂取による内部被ばくが公衆および作業員に対するリスクであり、核分裂から直接照射される放射線による作業員の外部被ばくのリスクも重視される。「臨界安全」の目的はこのような放射線の被ばくによる身体への影響のリスクを可能な限り低減し、許容できる範囲に留めることであるといえる。

運転中の原子炉では制御棒やケミカルシムなどを用いて安定した臨界状態を保つ。このように臨界を制御できる状態で核燃料を取り扱う場合を除いて、核燃料物質を扱ういたるところで、臨界安全を考慮する必要がある。その対象となる施設は図1に示すほぼすべての施設である。輸送容器(矢印上で用いられる)もその対象となる。

核燃料施設の中で、特に再処理施設が内蔵する放射性物質の量が多く、工程上の核燃料物質の物理的・化学的形態も多様である。再処理施設では、さまざまな燃焼度、冷却期間の燃料、すなわちウランなどの核燃料と FP の量がそれぞれ異なった燃料を受け入れる。それを剪断して硝酸で溶解する溶解槽では、固体状、液体状の

燃料が共存しうる。ウランやプルトニウムの抽出では有機溶媒を使用する。核燃料を粉末状にする工程では、高熱で水分を飛ばす。工程により温度も異なり、沸騰状態で行われる工程もある。このため、物理以外に化学、放射線等の知識もその臨界安全に必要である。

過去に核燃料施設の工程上で生じた臨界事故のほとんどは水溶液もしくはスラリー状の核燃料で起きている。文献 LA-13638²⁾で報告されている臨界事故の年代と核分裂数をみると(図2)、1950年代から1960年代にかけて多くの臨界事故が発生している。この頃は臨界安全の考え方や技術が十分に確立されておらず、定められた手順そのものに問題があったためにこれを守っていても臨界になったということもあった。報告されている史上最大規模の臨界事故は1959年に米国アイダホのICPP (Idaho Chemical Process Plant)で発生し、その終息までに 4×10^{19} の核分裂を生じた。この例を除けば、大半の臨界事故の核分裂数は 1×10^{15} から 3×10^{18} の範囲にあったことがわかる。1970年以降は臨界安全の技術も

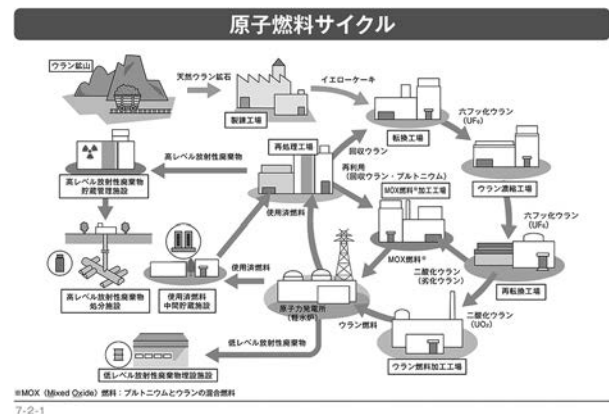


図1 臨界安全の対象となる施設
(出典:「原子力・エネルギー」図面集)

Subcriticality from basics to applications (4); Criticality Safety and Subcriticality: Yuichi Yamane.

(2019年7月30日 受理)

■前回のタイトル

第3回 未臨界度測定のいろは

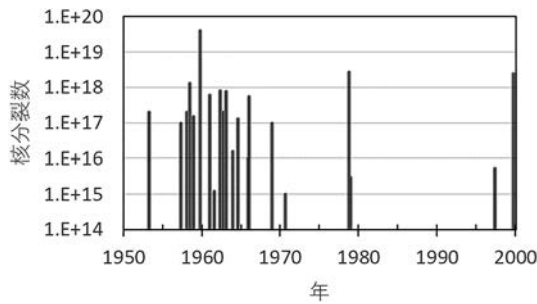


図2 世界の臨界事故の推移
(出典：A Review of Criticality Accidents²⁾)

進歩し、それほど頻繁に臨界事故は発生していない。1999年に日本で臨界事故が発生し、 2.5×10^{18} の核分裂を生じた(2名が死亡した)が、このときは認可を受けた手順とは異なったやり方で核燃料溶液を扱っていた。その後2016年にもロシアで臨界事故が発生したとの報告がある。

国内の再処理施設では、臨界事故を含む様々な設計上想定すべき事故(設計基準事故)に対して以下のような措置を講ずることとなっている³⁾。

- ①何らかの故障や異常から事故に至らないようにする
- ②事故が生じた場合でもそれが拡大しないようにする
- ③事故が生じた場合でも工場等周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないものであること

設計基準を超える重大事故についても対策が求められている。

世界の約170ヶ国が加盟するIAEAの安全基準⁴⁾では、想定し得る異常状態(通常状態以外の状態)で、かつ発生確率が十分に低いとは言えない異常状態において臨界事故の発生を防止するように、設計および運用を行うよう要求している。十分に低い発生確率としては 10^{-6} 回/年以下とされる例がある。

幾重もの安全策を重ねる(深層防護)ことでリスクの低減を図るが、その第一番目にあたるのが、臨界を防止することである。その意味で臨界安全の第一の目的は未臨界を担保することであるといえる。次が、万一臨界になった場合でもその影響を拡大させないことであり、続いて早期に臨界を終息させることである。

臨界事故の発生確率を十分に小さくする為、「生じる可能性の十分小さい異常が、二つ以上同時に発生しない限り臨界に達しない」ようにすることが求められる。これを二重偶発性の原則(Double Contingency Principle)と呼ぶ。

2. 臨界安全における未臨界とは

対象である核燃料体系から漏れ出ることにより(単位時間あたりに)失われる中性子数 N_l と体系内の物質に吸収されて失われる中性子数 N_a との和に対する、核分裂で生じる中性子数 N_p の比を中性子実効増倍率 k_{eff} と呼ぶ。

$$k_{eff} = \frac{N_p}{N_l + N_a} \quad (1)$$

狭義の臨界では $k_{eff}=1$ である。これに対して、体系から漏れる中性子の数をゼロとし、吸収で失われる中性子数だけを分母とした場合の比を中性子無限増倍率 k_{∞} という。

$$k_{\infty} = \frac{N_p}{N_a} \quad (2)$$

漏れは体系が有限の大きさを持っている場合に生じるので、 k_{∞} は無限にその核燃料物質が広がっている場合の中性子増倍率に相当する。 k_{∞} は形状に依存せず物質固有の値であり、同じ物質(や混合物)に対しては必ず $k_{\infty} > k_{eff}$ となる。従って、 $k_{\infty} < 1$ である物質だけで臨界状態になることはない。中性子が体系から漏れない確率 P_{nl} を用いると、

$$k_{eff} = k_{\infty} \cdot P_{nl} \quad (3)$$

の関係が成り立つ。

臨界安全に関する設計では、想定される核燃料物質の組成と容器形状等に基づいて数値計算を行い、中性子実効増倍率 k_{eff} を計算して、未臨界が担保されることを確認する。各国で開発されている主要な臨界計算コード(またはコードパッケージ)には、MVP(日)、MCNP、SCALE(米)、CRISTAL(仏)、MONK(英)などがある。これらのコードで計算に用いるための核反応断面積データは、核データライブラリーから生成される。各国の主な評価済み核データには、JENDL(日)、ENDF/B(米加)、JEFF(OECD加盟国)などがある。

核燃料施設について数値計算により k_{eff} を求めて未臨界を判定するときの基準は $k_{eff} \leq 0.95$ が用いられている⁵⁾。PWRの使用済み燃料プールでは解析で考慮していない可溶性ホウ素の効果も加味して0.98を用いている。

ある物質を核燃料体系の内部もしくは周辺に配置したときに、核燃料体系の臨界性にどのような影響を与えるか知りたいときには、臨界を基準(ゼロ)とした数値の方が使いやすい。臨界からどれだけ離れているかを表す指標が反応度 ρ である。 ρ は生成(N_p)と消滅($N_l + N_a$)の差を N_p で除して規格化したもので、

$$\rho = \frac{N_p - (N_l + N_a)}{N_p} \quad (4)$$

臨界のときゼロ、未臨界で負、超臨界で正となる。反応度と中性子実効増倍率の間には

$$\rho = \frac{(k_{eff} - 1)}{k_{eff}} \quad (5)$$

が成り立つ。

例えば、核燃料の内部に中性子吸収材などの物質を入れたときの反応度 ρ の変化分を反応度値という。 ρ が低下した場合、その物質はそこで負の反応度値(逆の

場合、正の反応度値)を持つという。反応度値はその物質が核燃料全体のどの位置に挿入されるかで変わってくる。大雑把に言えば真ん中の中性子が多いところの方が、周辺部分よりも反応度値が高い(中性子束のエネルギースペクトルにも依存する)。物質が3つあって、相互の干渉効果を見捨てる場合には、それぞれの反応度値を足し合わせた値が3つ全体の反応度値となる。

重要なことは、同じ物質をどこへ持って行っても同じ反応度値を持つとは限らないことである。むしろ核燃料体系が異なれば、そこでの反応度値も異なると思われるべきである。

II. 臨界安全の技術

1. 中性子の減速

核分裂で生じた中性子の多くはおおよそ 20,000 km/s に相当する運動エネルギー(約 2 MeV)を持っている。 ^{235}U の核分裂断面積はもっと低いエネルギーの側で大きく、例えば約 2 km/s(約 0.025 eV)程度まで減速された中性子(熱中性子)が入射するとより核分裂を起こし易い。中性子を減速する能力は軽い原子ほど大きいので、水素原子を多く含む水やポリエチレンはよい減速材である。ウラン燃料体系の水素原子の個数密度 $H(\text{個}/\text{cm}^3)$ とウラン原子の個数密度 U の比 H/U が中性子の減速し易さの指標として用いられる。 H/U が小さいと減速されにくく中子のエネルギーの高い側が大きい分布となる。 H/U が大きいと減速され易く、低エネルギー側の大きい分布となる。例えば H/U が小さい高速増殖炉と H/U が大きい熱炉の中性子束のエネルギースペクトルは大きく異なる(図3)。

硝酸ウラニル水溶液の場合を例として考える。 H/U を小さい値から徐々に大きくしていくと、中子が減速される途中での ^{238}U による吸収(共鳴吸収)が減るので、 ^{235}U に吸収されて核分裂を生じやすくなるため k_{∞} が大きくなる。さらに H/U を大きくしていくと今度はウランの密度が小さくなることで中子がウランに出会

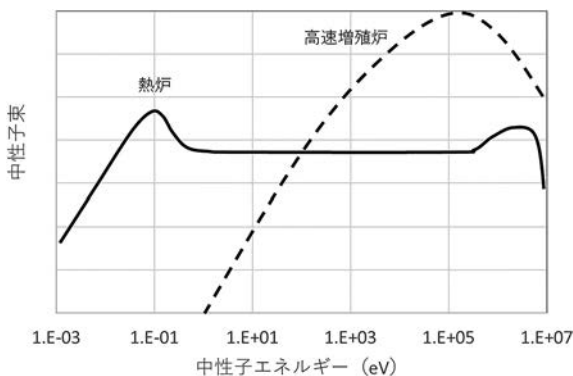


図3 中性子束のエネルギースペクトルの概略

う確率も小さくなり k_{∞} は小さくなる。つまり H/U が大きすぎても核分裂は生じにくくなる。これらのことから k_{∞} が最も大きくなる H/U 比の値(最適減速)が存在する(図4)。 k_{eff} についても同様である。プルトニウムでは H/Pu が小さくなるほど k_{∞} が大きくなるような例もある(図5)。

臨界安全上重要な点は、減速不足の状態(最適減速よりも H/U が小さい側)にある核燃料に水などの減速材を加えると臨界に近づくことであり、減速過剰の状態(H/U が大きい側)にある核燃料では、減速材を減らす方が臨界に近づくということである。

2. 中子の漏れと吸収

前項で述べたように、中子が ^{235}U 以外の物質に吸収される割合が高くなると k_{∞} が小さくなり、それが1より小さくなれば臨界にならない。使用済み燃料にはサマリウムなど中子吸収断面積の大きいFPが含まれる。使用済み燃料プールでは貯蔵能力向上のためにボロンを添加したステンレス鋼が用いられる。中子吸収は確実に負の反応度効果を生じるため、臨界安全管理で用いられる効果の一つである。

核燃料体系の外に飛び出し他の物質に吸収されるなどして失われる中子が存在する。中子の体系外への漏れが大きいほど、(3)式において P_{nl} が小さくなり k_{eff} が小さくなる。中子の漏れは後述する質量管理や形状寸法管理などの臨界安全管理で有用な基本的効果である。

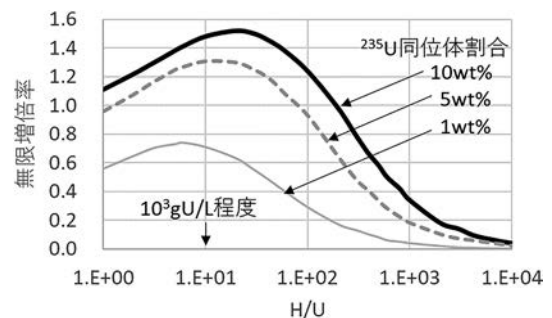


図4 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液の無限増倍率(k_{∞})
(出典：臨界安全ハンドブック・データ集第2版⁶⁾)

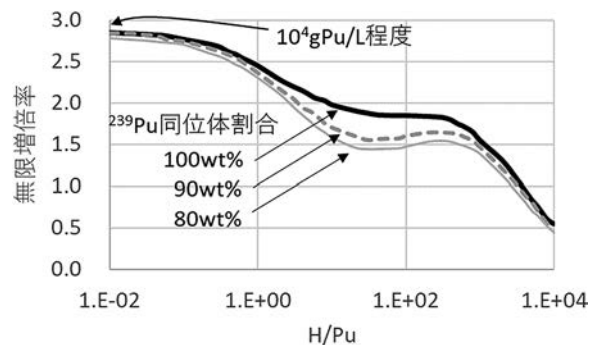


図5 均質 $\text{PuO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系の無限増倍率(k_{∞})
(出典：臨界安全ハンドブック・データ集第2版⁶⁾)

核燃料体系から漏れ出た中性子が外部の物質に衝突して跳ね返ってくる場合、漏れて消失する中性子が減るため、臨界になり易くなる。このような中性子を戻す効果のあるものを反射体とよぶ。反射体がない場合に比べ反射体があるとより少量の核燃料で臨界に達することができる。この核燃料の減少分を反射体節約という。中性子を減速して戻す能力の高い水素を多く含む水やポリエチレンはよい反射体であり、人が近づいたら臨界になった事例もある。中性子吸収の少ないベリリウムや黒鉛も良い反射体である。臨界安全上は好ましくない効果である。

万一臨界事故が生じた時、放っておくと多量の核分裂生成物の放出が予想される場合には、作業員の操作によって臨界を終息させなければならない。ポロン水等の中性子吸収材の投入や、可能であれば核燃料溶液の一部を別の容器等に遠隔で移送するなど、確実に負の反応度効果が期待できる対策を備えておく必要がある。

3. 臨界安全管理

臨界安全管理の要点は、

- ・未臨界を担保する条件を明白にして
- ・その条件を守ること

である。核燃料施設では、さまざまな形態の核燃料を扱うことと、工程ごとに異なった要求を満たす必要があることから、核燃料を扱う設備が臨界にならないようにするために複数の臨界安全管理方法が用いられている。それぞれの方法は中性子の漏れと吸収の効果により未臨界を担保する。単体の管理には以下のようなものがある。

質量管理：取り扱う核燃料の質量を制限することで未臨界を保つ方法を質量管理という。今、ある少ない量で臨界になっている($k_{eff}=1$)核燃料を考える。 k_{∞} は1より少しだけ大きい値とする。ここから核燃料を少量ずつ取り去ると、その分体積が小さくなり、相対的に表面積の体積に対する割合が大きくなるため、中性子の漏れの効果がだんだんと大きくなって(3)式で P_{nl} が小さくなることで k_{eff} が1より小さくなる。体積が変わらないように少量ずつ取り去ろうとすると、全体の密度を低下させることになる。 k_{∞} (そして k_{eff})はやはり小さくなっていき、やがて1より小さくなる。このようにして臨界になるために最低限必要な量(最小臨界量)が存在することがわかる。この最小臨界量よりも十分小さな量を基準としてそれ以下の質量の核燃料物質しか扱わないように管理すれば、未臨界を担保できる。このような管理は、フードやグローブボックスなど少量の核物質しか扱わない設備で主に用いられる。

形状寸法管理：同じ体積でも表面積が大きい形状(例えば球よりも円筒)であるほど、中性子の漏れが大き

くなって k_{eff} が低下する。このように形状や寸法に制限を設けて、中性子の漏れを大きくすることで未臨界を担保する方法を形状寸法管理という。容器の直径を小さくし、非常に細長いパイプ状にすることで、どのような濃度の核燃料溶液に対しても未臨界を担保することができる。このような形状を全濃度安全形状という。一般に核燃料の濃度に制限を設けるよりも有効な場合に選択される。再処理施設ではパルスカラム等で用いられる。

濃度管理：核燃料物質の濃度に上限を設けることで、 k_{∞} が大きくなるようにし、未臨界を担保する方法を濃度管理という。工程の都合により質量管理や形状寸法管理が適切でないような場合に用いられる。再処理施設では廃液受槽等で用いられる。

容積管理：容積に制限をかけることで、未臨界を担保する方法を容積管理という。ポンプや弁など、質量や濃度単体による管理が適切でない場合に用いられる。

中性子吸収材管理：核燃料間にカドミウムなどの中性子吸収材を挟んで中性子の入射を制限し、未臨界を担保する方法を中性子吸収材管理という。円環状タンクの内側に中性子吸収材を配置するなど、形状管理と合わせて用いられる。ガドリニウム溶液の添加もこの管理である。

再処理施設の溶解槽に対しては質量管理、濃度管理、形状寸法管理、中性子吸収材管理が併用されている。

2つ以上の核燃料容器がある場合、1つの容器から飛び出した中性子が、他の容器に入射して核分裂を生じる可能性があるため、容器間を十分に離すか、中性子吸収材を間に挟むなどして、中性子を入射させないようにする必要がある(多体の臨界安全管理)。

使用済み燃料の取り扱いでは、燃焼によるアクチニドの変化(^{235}U の減少や ^{239}Pu の生成など)とFPの中性子吸収が k_{∞} を低下させる効果を利用することができる。このような燃焼度に応じた k_{eff} の低下分を燃焼度クレジットという。燃焼度や冷却期間を一定の範囲に制限することで、一定量の低下分を確保して用いる。

UO_3 粉末燃料では、水分量を制限することでH/Uの範囲を限定し、 k_{∞} を限定する減速度管理も検討されている。

^{235}U 等の核分裂性同位体の濃縮度が高いほど臨界になり易いが、通常は濃縮度がある範囲に限定されるように品質管理するので、臨界安全管理のために濃縮度を調整するようなことはしない。

上述の管理の実施は、設計および運用で行う。設計では臨界実験データを用いて性能評価された計算コードが用いられる。運用では、予め手順を定める、インターロックをかける(要件を満たさないと機械的に次の操作

ができないようにする)などの方法を用いる。

Ⅲ. 不均一と未臨界

1970年に英国 Windscale Works で起きた臨界事故では、ともにプルトニウムを含んだ有機溶媒層(55 gPu/Lit.)と水層(6~7 gPu/Lit.)がはっきり分離しているときは未臨界だったが、水層上部にエマルジョン層が形成(有機溶媒の小滴が水層中に分散)されて一時的に $k_{eff} \geq 1$ になったと考えられている。ところで、有機溶媒火災でも水層と有機溶媒層の間にエマルジョンが生じることが知られているが、 $k_{eff} < 1$ は保たれるだろうか。

蒸発乾固事故では、高レベル廃液貯槽の冷却機能が失われることで、FPとマイナーアクチニドの崩壊熱により廃液が沸騰し、水分が蒸発していく。H/Uに伴って k_{eff} が大きく変化するので、仮に初期状態では減速過剰であったとすると、乾固するまでの間に k_{eff} が1に近づくことになる。濃縮状態の溶液や乾固物にあるかもしれない不均一さはこの評価にどの程度影響するだろうか。

プルトニウムの溶液では酸濃度が低下するなど一定の条件下でプルトニウムのポリマーができることが知られている。均一であれば未臨界でも、不均一状態でそれが維持されるかどうかは自明でない。

物質の分布が不明であれば、まずは均一と仮定して k_{eff} を評価するが、次の課題は分布を考慮することである。エマルジョン層中の小滴の大きさや分布、沸騰から乾固に至る間の物質の分布状態、プルトニウムポリマーが生成する過程での分布の様子など、時間的に物質の分布が変化し、 k_{eff} も同時に変化する。

核燃料物質の考えられるすべての分布の状態を計算することは不可能なので、物質分布の計算モデルの検討が必要である。例えば、想定すべき分布について範囲をある程度限定することができるか、その分布の特徴を把握できるかどうかが重要となる。化学反応の結果、物質の状態がどのように変化するのか知ることが課題であるから、炉物理以外の分野からの貢献が期待される。

このようなことは燃料デブリにも当てはまるだろう。均一である保証はなく、未臨界状態であると推定されているとしても、どのような条件で未臨界になっているのかは明確でない。重要なことは、臨界安全管理された状態にできるだけ早く移行することである。

未臨界が保たれない場合には、放射線被ばくによるリスクに見合った対策(グレーデッドアプローチ)が必要になる^{7,8)}。そのためには、リスクが適正に評価される必要がある。蒸発乾固と臨界事故の個別の発生確率が非常に小さいとしても、仮に停電から蒸発乾固事象に進展した上で臨界に至ることまで懸念されるとリスクは個々のリスクの和とは異なる上、2つの事故対応を同時に進めなければならない。

どのような事故からでも、臨界に至る(至らない)条件が明確になっていれば、事故対策等の策定に役立つので、考慮すべき検討課題である。万一臨界になった場合の被ばくリスクの評価といった課題も含め、炉物理の専門家に限らず、化学や放射線その他の専門家が連携してこのような課題に向き合うことで、施設の臨界安全性をより高められると期待する。

— 参考資料 —

- 1) ISO/IEC, Safety aspects-Guidelines for their inclusion in standards, 3rd edition, Guide 51, ISO/IEC, 2014.
- 2) McLaughlin T.P. et al., A Review of Criticality Accidents, LA-13638, Los Alamos National Laboratory, 2000.
- 3) 再処理施設の位置、構造および設備の基準に関する規則、平成二十五年原子力規制委員会規則第二十七号。
- 4) IAEA Safety Standards, Safety of Nuclear Fuel Cycle Facilities, SSR-4, IAEA, 2017.
- 5) 臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ、臨界安全ハンドブック第2版, JAERI 1340, 日本原子力研究所, 1999.
- 6) 奥野浩, 他, 臨界安全ハンドブック・データ集第2版, JAEA-Data/Code 2009-010, 日本原子力研究開発機構, 2009.
- 7) IAEA Safety Standards, Fundamental Safety Principles, SF-1, IAEA, 2006.
- 8) 日本原子力学会再処理・リサイクル部会核燃料サイクル施設シビアアクシデント研究ワーキンググループ、核燃料サイクル施設における対応を検討すべきシビアアクシデントの選定方法と課題、日本原子力学会再処理・リサイクル部会, 2014.

著者紹介



山根祐一 (やまね・ゆういち)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)原子炉物理学, 臨界安全, 臨界事故, 未臨界度測定, 重大事故, 蒸発乾固

FORATOM の主張にみる欧州の低炭素社会実現に向けた原子力の必要性

日本原子力産業協会 大野 薫

EU は温室効果ガス排出量の削減に熱心であり、パリ協定発効後は長期戦略として、2050 年 ネットゼロ(炭素排出正味ゼロ)実現に向けて、世界をリードしている。こうしたなか、欧州の原子力産業団体である FORATOM(欧州原子力産業協会)は、ポジション・ペーパー(政策方針書)を相次いで発表し、持続可能で低炭素な未来社会実現のためには、原子力発電の価値が発揮されるべきとの主張を積極的に展開している。とりわけ、このうちの 2 つのポジション・ペーパーでは、2050 年に向けて、原子力シェア 1/4 の維持と運転期間の長期化が鍵になると強調している。

I. EU における原子力発電の現状と見通し

FORATOM が元気だ。FORATOM とは、欧州原子力産業協会と呼ばれる欧州の原子力産業団体で、ベルギー・ブリュッセルに本拠を置く。欧州連合(EU)の機関やその他のステークホルダーとのエネルギー政策の討議において、欧州の原子力産業を代表して発言している。15 か国の原子力産業団体を会員とし、3,000 社を超える企業を代表する組織である。そんな欧州の原子力産業界の代弁者である FORATOM は 2018 年から今年にかけて、ポジション・ペーパーを精力的に発表し、低炭素社会実現のための原子力発電の必要性や産業としての原子力発電の経済面における重要性を強く訴えている。2018 年 11 月から 2019 年 9 月までに発表したポジション・ペーパーは約 10 にのぼり、EU において持続可能で低炭素な未来の実現のためには、原子力発電が有する環境面での持続可能性やエネルギーの供給安定性、経済への貢献等にもっと目を向けるべきと主張している。

2019 年 10 月現在、EU では 14 か国・126 基、合計出力約 1 億 2,000 万 kW の原子炉が運転中で、EU 域内の原子力シェアは 26 %、低炭素電力に占める原子力の割合は 50 % と高い。また欧州の原子力産業は、年間 1,020 億ユーロを売り上げ、雇用は 110 万人と、経済面でも非常に重要なセクターとなっている。建設中は 4 か国(フィンランド・フランス・スロバキア・英国)で、さらに新規建設を計画中の国(ポーランド)もある。

しかしながら、欧州における原子力の展望は、決して明るくない。2019 年 9 月に発表された IAEA の「世界の原子力発電予測」によれば、欧州の今後の原子力発電規模見通しは、低・高予測とも、大幅減少あるいはかなりの減少が予想されている。実際、IEA(国際エネルギー機関)のビロル事務局長は、2019 年の欧州原子力エネ

ギーフォーラム(ENEF)で「政策変更がなければ、欧州の原子力発電所群の 3/4 は、2040 年までに廃止措置を迎えるであろう」と述べている。

II. EU の気候変動をめぐる最近の動き

現在の EU の気候変動政策は、2030 年の温室効果ガス排出量を 1990 年比で少なくとも 40 % 削減するとともに、再生可能エネルギー(以下、再エネ)が占める割合を少なくとも 32 % とする目標を掲げている。現在ではパリ協定に基づく長期戦略として、2050 年ネットゼロ実現に向け、2030 年の排出削減目標をさらに 55 % へ引き上げようとする動きも出ている。

こうしたなか、EC(欧州委員会)は 2018 年 11 月、2050 年に向けての長期戦略「全ての人々のためのクリーンな地球(A Clean Planet for all)」を公表した。そのなかで、2050 年までに気候中立(温室効果ガスの正味排出量を実質ゼロとする)な経済を達成するための EU の戦略的長期ビジョンが概説されているが、重要な点は、原子力が再エネとともに、カーボンフリーな欧州の電力システムのバックボーンを形成すると認識されている点である。この戦略によれば、2050 年の原子力発電設備容量は 9,900 万 kW ~ 1 億 2,100 万 kW が必要であると分析しており、原子力は EU のエネルギーミックスの 15 % 前後を占める。

最近では国際機関においても、気候変動対策に原子力が有効とする主張が見られるようになった。最新の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)報告書「1.5℃の地球温暖化」(2018 年 10 月)が公表されたが、世界の温度上昇を 1.5℃未満に維持しようとするならば、原子力発電が不可欠であると指摘されている。また前述のビロル IEA 事務局長は、欧州における廃止措置の増加見通しをふまえ、原子力発電所の長期運転を支持、再エネの増加

と石炭の段階的廃止で排出量を40%削減することができ、原子力を維持することでCO₂の排出削減を加速させることができると発言している。さらにIEAは、2019年5月に発表した報告書「クリーンエネルギーシステムにおける原子力発電」でも、「原子力発電の急速な低下は、エネルギーセキュリティや気候目標を脅かす」、「既存原子炉の運転延長は、エネルギー移行を順調に進めるために重要である」と述べ、原子力についてさらに踏み込んだ内容を盛り込んでいる。

III. FORATOMの主張

このような背景のなか、FORATOMはまず一つ目のポジション・ペーパーとして、2018年11月に「2050年までの道すじ—低炭素な欧州における原子力の役割(Pathway to 2050: role of nuclear in a low-carbon Europe)」を発表した。これは、FORATOMがコンサルティング会社に委託、発表した研究レポートで、欧州が2050年の低炭素目標を確実に達成するためには、原子力発電は電力ミックスの1/4を占める必要があるとし、市民や産業が必要な時に必要とする低炭素電源に確実にアクセスでき、そして低炭素経済への移行に伴う消費者への経済負担を軽減することに確実に役立つと結論している。

報告書では、2050年の原子力発電規模と原子力シェアの3つの下記シナリオを想定し、主に供給安定性や持続可能性の確保、経済性といった重要なエネルギー政策目標の各視点から、原子力がいかに2050年に低炭素目標の達成に役立つかを分析している

- ・低:原子力発電規模3,600万kW, 原子力シェア~4%
- ・中:同1億300万kW, 同~15%(現在のECの戦略)
- ・高:同1億5,000万kW, 同~25%(現在のレベル)

高シナリオと低シナリオで比較すると、運転寿命等により退役する原子力発電設備容量の1億1,400万kWを補填するためには、再エネは4億1,500万kW(太陽光1億9,000万kWと風力2億2,500万kW)、貯蔵9,500万kW、火力も2,500万kWの設置が必要となるとし、さらに2020~2050年間にEUの電力部門のガス(36%増)と石炭の消費(18%増)が増え、欧州の化石燃料依存を高め、ひいてはCO₂の追加排出増(22億トン以上)につながる指摘している(参考:2017年のEU28か国の天然ガス依存度は74.4%)。また原子力発電はCO₂排出量削減以外にも、大気汚染の減少や土地利用の節約に貢献するとしている。

脱炭素化移行に伴う消費者への負担軽減および欧州経済への影響についても検討している。具体的には、高原子力シナリオでは、2020~2050年間に欧州において、①約100万人年の高度な熟練した直接雇用を創出、②設備投資額が技術の向上やスケールメリットにより37%減、③運転期間延長や新規建設による発電コストの低減

により3,500億ユーロの節約(=2020~2050年間のEUの全消費者コストの5%を節約)、④退役する原子力発電設備容量を穴埋めする新たな太陽光や風力の設備容量を設置するための追加送配電網コスト関連で約900億ユーロの節約——等、経済面への恩恵を強調している。さらに、原子力は実証済のカーボンフリーかつ給電可能な電力としてシステムに柔軟性を提供しており、出力変動する再エネの支援が可能であるとして、原子力のバックアップ電源機能もアピールしている。いずれにしろ、全てのシナリオで2050年の気候目標は達成できるものの、高原子力シナリオは、状況の劇的な変化を抑えつつ、目標を達成できる可能性が高いというのがFORATOMの主張だ。

もう1つのFORATOMの報告書「EUの既存原子力発電所群の長期運転の重要性(Long-Term Operation of the Existing EU Nuclear Fleet)」は、2019年7月に発表された。FORATOMは、既存原子力発電所の長期運転なくして、2050年に向けた移行期における中期の脱炭素化目標は達成できないと指摘、逆にEUがこの期間、全運転中原子力発電所の維持に投資するならば、2030年までに電力の58%は低炭素電源由来となり、気候変動政策のグローバル・リーダーになると述べ、長期運転の重要性を訴えている。さもなければ、低炭素電源由来の発電シェアは38%に下落し、2030年までにCO₂の累積排出量が約15億トンも増加すると警鐘を鳴らしている。

FORATOMは、長期運転の主な利点として、①低い資本コスト、②既存原子力施設に対する合理的かつ実効可能な安全性向上のタイムリーな実施(旧世代原子炉の原子力安全基準のレベルアップ)、③EUのエネルギー輸入依存低減および送電網に対する信頼性向上、④電力システムへの確実な容量の提供、を挙げ、とりわけ、経済面については、長期運転は多額の投資コストを必要とせず、投資家・資本市場の投資リスクの低下や消費者コストの低減につながるとした。

また、2050年までにEU経済の脱炭素化目標を実現するには、あらゆる低炭素電源を総動員する必要があるとしたうえで、長期運転と新規建設(約1億kW)双方への投資が必要であり、そのどちらもEUの関係機関や加盟国、欧州の原子力産業界が連携協力すれば、達成可能であると自信をのぞかせている。そして、長期運転がもたらす利点をEU域内で最大限に活用するため、次の4点を政策面での勧告として提示している。①首尾一貫した矛盾のない安定したEUの政策枠組の確保、②ECの気候中立的な経済に対する長期ビジョンに沿って、2050年のEUの野心的なCO₂排出量正味ゼロの目標に合意、③技術的リーダーシップ維持のための強力な産業戦略の開発と実施、④人材能力開発の支援。

(2019年10月16日記)



～福島浜通りだより～(8)

当たり前の日常がそこにある

一般社団法人 AFW 吉川 彰浩

10月5日、福島県双葉郡八ヶ町村合同のお祭り「ふたばワールド2019 in J ヴィレッジ」が開催された。この「ふたばワールド」というお祭りは震災前より続き、毎年開催会場を八ヶ町村で持ちまわっている。

双葉郡で暮らす人達、そして双葉郡に暮らしていた人達にとっては馴染みのお祭りでもある。

出店ブースには各町村の商店や商工会らが並び、それぞれの地域の特色を味わうことが出来る。

今となれば、原発事故で離ればなれになった人達の再会の場でもある。目を凝らせば、遠い場所に普段住んでいるのだろう、住んでいた町のブースに顔をだし、買い物だけでなく声をかけて、談笑している姿があちこちで見ることが出来る。

今回、会場になったJ ヴィレッジは震災からしばらく、福島第一原発復旧のための最前線基地となった場所だ。現在は、面影がまったく消えてしまったが、サッカーピッチがあった場所には、砂利が敷かれ駐車場となっていたし、本館はオフィスとして貸し出され、サッカー日本代表が宿泊していた場所とは思えないほど殺伐とし、支援物資が置かれ、作業服を着た人達で溢れる風景が広がっていたのだ。私も東京電力在職時にJ ヴィレッジにお世話になっていた。同施設にあるサッカースタジアムの中に作られたプレハブの宿舎にも住んでいたこともある。

私の中では、ふたばワールドを味わうと共に、原発作業員として使わせてもらった場所がまた昔のように人々の憩いの場として復活した姿を味わうために会場へと向かった。

J ヴィレッジに新しく建設された全天候型ドームの前に、各町村の出店ブースが並んでいる。芝生の上では小中学生が楽しむためのブースもあった。数千人の人達、肩がぶつかるほどの距離感で歩き回っている。とにかく子供が多い。車道から隔離された場所にあること、子供向けのブースが立ち並んだこと、もっと言えば、福島第一原発から約20kmという距離感に対して抱いていた恐れが、情報が正しく伝わることで、親御さんにとって子供たちと一緒に遊びに行く場所という認知になったのだろう。子供たちがあちこちで駆けずりまわっているものだから、すぐにぶつかりそうになる。楽しくて仕方がないのか、猪突猛進。こちらがひらりとかわさなくてはならない。足にぶつかる小さな子供に大丈夫？などと手



を添える一面も何度もあった。

これまでのふたばワールドは「復興」という言葉があちこちに掲げられた。そして復興のためのイベントというイメージを持っていた。だが、今回のイベントはなんていうことのない、秋のイベントの匂いがする。普通なのだ。ただただ楽しい雰囲気に包まれている。

これは時が流れ平時の感覚が広がっていったことに他ならない。復興を謳うのではなく、本来の祭りの在り方、秋を迎え入れ楽しむことが当たり前になってきたのだ。それは遠く福島を見守る皆さんからすれば、意外に写るだろうし、それで良いのかとも問われそうだが、しかしながら、この普通の日常こそが待ち望んでいたものでもある。

かくいう私自身も、気が付けば両手が買い物袋でうまり、焼き鳥を口にくわえながら誰か知り合いでもないかと随分と歩きまわった。

久方ぶりに友人に会った。傍らで元貴乃花がちゃんこを一人一人手渡しで配っている。それを見ながら、芸能人を生でみる感動でふざけ合う。奥さんと子供と一緒にいた。この日は季節外れの暑さ、ずいぶんとはしゃぎ過ぎて熱にあたったのか、出来たばかりの全天候型ドームへ涼みにいったようだ。「熱中症には気をつけないとなあ」会話が当たり前の日常に戻っている。

お祭りのメに恒例の風船飛ばしが行われた。色とりどりの風船が雲一つない青空へと飛び立っていく。

これまでの復興を背負い、また今日から頑張らなくては！といった肩ひじを張った思いとは別に「ただただ楽しかった」という晴れやかな気分が胸を駆け巡っていった。
(2019年10月17日記)

視点

〈社会〉を語る

第7回 社会調査に協力することのメリット/デメリット

岡山大学 齋藤 圭介

社会学者である私は、社会調査の専門家(専門社会調査士)として、これまで数々の調査を実施してきました。今回の第7回からは実践編として、社会調査のじっさいのところをお伝えしながら、その魅力をお伝えできればと思います。

今回は実践編初回なので、私が現在おこなっている社会調査——生殖補助医療技術を用いた夫婦のうち、夫側へのインタビュー調査——について紹介しましょう。生殖の問題は、これまで女性の問題と考えられてきたため、女性(妻)へのインタビュー調査はたくさんありますが、パートナーである男性(夫)が妊娠中(/不妊治療中/出生前診断の検査中)に何を考えていたのかは、まったく調査されてきませんでした。そこで、共同研究者とともに、男性に生殖一般にまつわる経験をきくという調査を2016年度から実施しています。

さて、こうした社会調査に協力してくださる対象者には、調査に協力するメリットが何かあるのでしょうか。この問いは社会調査を行う私たち社会学者を悩ませてきました。社会調査に協力したからといって、対象者に何かいいことがすぐに起こるわけではありません。調査に協力するメリットを教えてくれといわれると、口ごもってしまうのが正直なところです。敢えていえば、〈公共の蓄積〉に貢献できるという大げさな表現になりますが…。他方、時間やエネルギーを使ってプライバシーをわざわざ話してくださるわけですから、対象者の方には負担が重くデメリットの方が大きいようにみえます。すると、なぜ社会調査に協力してくださる方がいるのか、という素朴な疑問が生じます。

これまで社会調査が対象者に与える影響については、大きく二つの考え方がありました。一つは、社会調査の対象者にとっては、調査が迷惑なものでしかないという考え方です。調査者(社会学者)は社会調査をとおして貴重な情報を得ることができますが、対象者は情報を一方的に聞かれるだけです。社会調査は、対象者の大きな負担(協力)のうえに成り立っていることは紛れもない事実です。社会調査という大義名分のもと、他者のプライバシーを聞いてまわる私たち社会学者は、たしかに迷惑な存在かもしれません。

私の現在の調査でも、不妊治療のときに対象者が感じる男性としての不甲斐なさや、パートナーが流産をしたときの悲しい経験を聞くこともあり、対象者に大きな心

理的負担をかけていることは間違いありません。もちろん、言いたくないことは言わなくてもいいですよと事前に伝えますが、会話の流れでつい思い出させてしまうこともあるでしょう。そのたびに、申し訳なく感じます。

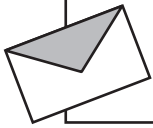
しかし同時に、社会調査が対象者の負担にはならず、むしろ対象者を力づけ、エンパワメントしうる側面があるのも事実です。これが二つめの考え方です。インタビュー調査を終えたあと、対象者から感謝されることがあります。私たち調査者が色々と質問をすることで、対象者はこれまで曖昧だった思いや感情を言語化する機会となり、自分の頭のなか整理されていくことがあるようです。また、対象者のなかには、インタビュー調査を受けることで、忘れていた自分の昔の感情を思い出し、その結果として現在の状況や気持ちを再解釈していく方々も多くいらっしゃいます。

私の現在の調査でも、数度の流産を経てやっとの思いでお子さんが産まれた男性にお話を伺ったさい、とても感謝されたことがありました。インタビュー時、その男性のお子さんはイヤイヤ期まったなかで、子育てが非常に大変な時期だったようです。その男性も育児ノイローゼ気味で疲れ切っていました。しかしインタビューのなかで、妻が繰り返し流産を経験していた時期の辛いお話を私にしてくれているうちに、やっとの思いで生まれてきてくれたお子さんへの当時の愛情を再確認し、インタビューが終わると同時にお子さんに会いたくなくなったといって飛んで帰って行きました。後日、その男性から、当時を振り返る機会をいただきありがとうございました、という大変丁寧なお礼の連絡をいただいたことがあります。調査者である私が感謝を伝えるべきなのに、むしろ対象者からも感謝をされることは社会調査をしているとたびたび経験することです。

このように社会調査には、社会の実態を明らかにするという理論編で論じたようなマクロな水準での問題群だけではなく、調査者と対象者の相互関係というよりミクロな水準の問題群もあるのです。

専門社会調査士として、できるだけ対象者にもメリットがあるような調査を私は心掛けていますが、正直、まだ試行錯誤の連続です。今回からの実践編では、私が調査のなかですってしまった失敗なども紹介しながら、社会調査の魅力をお伝えしていきたいと思います。

理事会だより



秋の大会理事会セッション報告

2019年秋の大会(富山大)において、企画委員会が「社会課題への貢献に向けた学会の役割」と題した理事会セッションを設けた。これは、去る4月25日に開催された「日本原子力学会創立60周年シンポジウム」(東工大)において議論されたことのうち、温暖化などの地球環境問題へ原子力が貢献できるポテンシャル、および国のエネルギー政策での原子力の位置づけと学会の役割を取り上げて、再度会員間の議論に供したものである。90分の間の講演2件と総合討論において表出された意見、議論は実に興味深く、議事録をここに丸ごと掲載してお知らせしたい気分だが紙幅が許さない。ご講演資料はいつでも何らかの方法で公開することを考えるとして、セッション内容をほんの数行でまとめるとすると以下の通り。

小宮山先生(東大)はご講演「地球環境問題と原子力」で、地球環境問題とエネルギーセキュリティの観点から原子力は不可欠(2011~2017年に太陽光発電は9.1倍導入されるも発電部門のCO₂排出量は1.1倍と増加)であり、原子力が有するゼロエミッション、基盤技術を有していること、ベースロード電源としての優位性などのポテンシャルを活かすべく努力すべきと主張された。山口先生(東大)は、「将来の原子力の展望と学会の役割」と題するご講演の中で、エネルギー源は、受容性、安定性、経済性などの要求と、地政学リスク、送電網関連リスク、事故リスクなど多様なリスクとを考慮したうえで選択されるものであり、そうして選択された原子力の価値を大きな視点で語ることが原子力学会の役割とした。もちろん、3.11以前は「賛成派」だったが3.11以降は「反対派」の大多数を構成するようになった「かつての無関心層」が再び原子力に真に安心して「無関心」でいられるほど(土田先生(関西大))の社会からの信頼回復への努力は無論である。なお、この議論の中で、原子力がゼロエミッション電源であることや放射線利用が豊かな生活にもたらす便益が意外なほど認知されていないという事実が紹介された。

最後に若手層の活動の活性化について、若手およびフロアからいただいた意見を岡嶋会長が受け、理事会レベルでも検討していることを表明した。

以下、60周年シンポジウムおよび今回の理事会セッションの

企画、実施に関連して、理事会で話題とされた事柄があるので紹介する。

一つ目は、各年会・大会における部会セッションが会期内の特定の時間に集中配置され、関連する複数のセッションを聴講することが出来ないという事態が往々にして発生していることについてである。これについては、従前より年会・大会参加者から指摘を受け、部会等運営委員会で鋭意改善策が検討されている。会期期間の割に多くのセッションが組まれること、各セッションでは登壇者の都合により開催時間に制約がかかるなど事情があること、さらに、一般セッションの間にばらまくと一般セッションとの間で重複が発生し解決にならないなど過去の検討結果を踏まえ、現在の配置に至っている。それでもなお参加者からの改善要望の声がある限りはその声に応えるべく学会内で検討を継続していく。

二つ目は、アンケート結果への取組みについてである。60周年シンポジウムにおいてもアンケート回答を受け付けた。多くのイベントで、今後の運営改善等のための貴重な参考データとしてアンケートが行われる。原子力学会内でも、特に会員以外を参加対象としているイベントでは、しっかりとした設問と回答の分析がされている例を散見する。60周年シンポジウムのアンケート結果に対してもその分析・活用を考えられないかとの意見があったものの、富山大学でのセッションの中で、回答者の年齢分布から予想された通り若手の活動の活性化を指摘する材料として紹介するに留めた。それは、回答数が少なかつたうえに多様な意見があり、個々のご意見を拝承する以上のことを抽出しにくかったためである。種々イベントを進めるうえでアンケート結果への真摯な対応が不可欠と認識されている今、アンケート結果をイベント主催者の終了報告に終わらせず、学会大でアンケート結果を刈り取り共有して活かす仕組みがあってもよい。また、会員には、アンケートへ回答することは自分が属する学会の活動を良くする方向へ貢献することとの意識をもっていただければと思う。

(日本原子力研究開発機構・中山 真一)

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