

巻頭言

1 放射性廃棄物の地層処分を実現するために

近藤駿介

時論

2 安全の確保はリスクの管理から

過去の事故の経験を過小評価することなく、また過大評価することもなく、リスクに関する不確かさを真摯に見出す努力を続けることが大切だ。

山口 彰

4 「エネルギー・デモクラシー」の挑戦 —新潟県原発検証委員会について

リスクを共有した共同体の成員が、相互に徹底した対話と熟議を積み重ねる。検証委員会の試みは、新しい〈知〉の創生に向けた挑戦でもある。

佐々木 寛

6 スロバキアの日本人医学生から 原発を見て

スロバキアに住んで2年余り。現地では原発や事故がどうとらえられているか。

妹尾優希

解説シリーズ 「世界の原子力事情」(5/最終回)

27 途上国は原子力に傾斜—新規導入国時代へ

福島原発事故で世界の原子力開発には一定のブレーキがかかったものの、多くの国では原子力推進の姿勢を堅持している。アラブ首長国連邦とベラルーシでは、初の原子力発電所が建設中である。

小林雅治



世界の原子力発電所の着工基数

解説

14 組織文化に根差す原子力安全の課題

IAEA 報告書は福島原発事故が起きた要因の一つとして、日本の原子力発電所は非常に安全であるという想定が事業者や規制当局に共有されていたと指摘した。なぜ、どのような「思い込み」が生まれたのか。

久郷明秀

19 原子力研究(核燃およびRI)に関わる 法規制の動向—秋の大会から

研究炉3基が再稼働した。しかし、核燃使用施設やRI施設については各大学や施設で改正規正法への十分な準備ができておらず、今後の人材育成への懸念材料となっている。

佐田 務

22 廃棄物ドラム缶のウラン量を短時間で精度良く定量できる革新的アクティブ中性子非破壊測定技術 高速中性子直接問かけ法の実用化

廃棄物ドラム缶内のウラン量を定量する従来の非破壊測定法は、測定誤差が大きく測定時間が長いなどの欠点があった。ここでは、これらをクリアした高速中性子直接問かけ法の紹介を行う。

大図 章, 米田政夫, 呉田昌俊, 中塚嘉明, 中島伸一



パッシブ法(左)とアクティブ法(右)の測定原理

報告

49 福島県における東日本大震災に伴う 関連死に関する検討

東日本大震災に関連した死者数は今も福島県内では漸増している。本稿では、主に復興庁のデータを基に福島県における関連死の動向を分析した。

久保 稔, 土田昭司, 静間健人

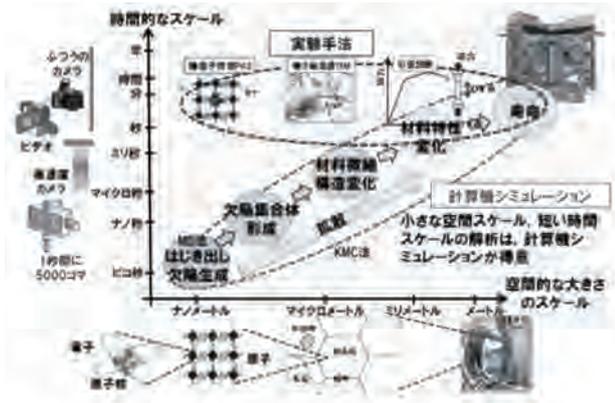
連載講座

材料挙動と計算機シミュレーションの接点 (第2回)

34 原子力材料の分子シミュレーション、現状と展望

原子力材料の照射下特性変化を原子スケールの現象に基づいてモデル化する分子シミュレーションは、極短時間・極微小スケールの現象を定量化・解明・再現するため、幅広く用いられている。

沖田泰良, 板倉充洋



照射損傷のマルチスケールモデリング

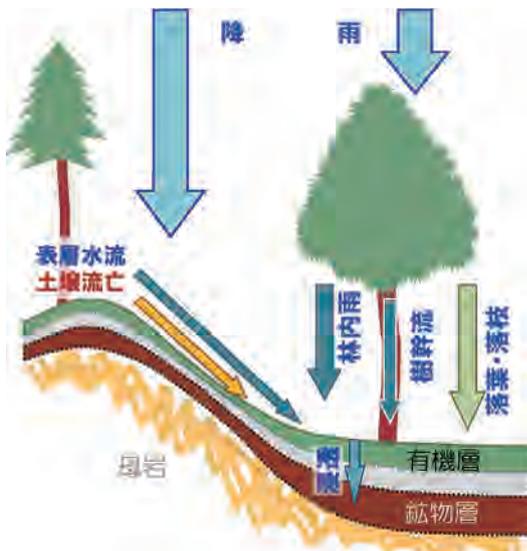
連載講座

福島の環境回復に向けた取り組み (第8回)

44 森林・流域圏内のセシウムの動態

森林や河川にある放射性セシウムが今後、どのように動くかを調べるのが環境動態研究だ。原子力機構と国立環境研究所が森林や河川を対象に実施している環境動態研究を紹介する。

飯島和毅, 林 誠二, 鶴田忠彦



森林内における放射性セシウムの移動経路

8 NEWS

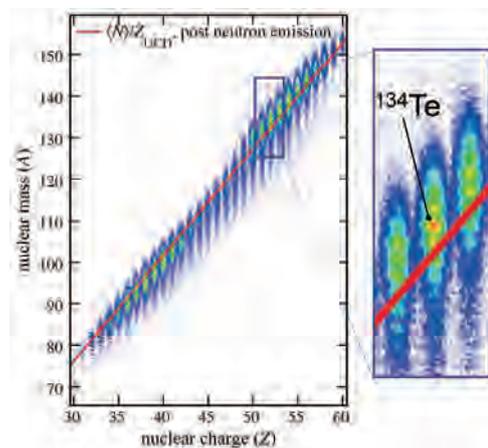
- 規制委による東海第二の審査が終了
- 原子力委, プルトニウム利用で解説
- 海外ニュース

連載講座 核データ研究の最前線 (第3回)

39 核分裂データの最前線: 実験と理論

核分裂は複雑な現象であるため、限られた実験データを現象論によって記述し、核データとして利用されるにとどまっていた。しかし近年、実験技術と理論計算の進展により、新たなデータが取得できるようになった。

西尾勝久, 千葉 敏



逆運動学法による ^{238}U の核分裂片の (A, Z) 分布

会議報告

54 原子力施設の廃止措置ワークショップ報告

田中健一

理事会だより

55 大学での原子力教育を考えて

深田 智

38 From Editors

56 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 新入会一覧, 平成30年度フェロー推薦募集, 英文論文誌 (Vol.54, No.12) 目次, 和文論文誌 (Vol.16, No.4) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧
後付 総目次・著者索引 (vol.59, Nos.1~12)

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「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.or.jp/atomos/>

放射性廃棄物の地層処分を実現するために

巻頭言



原子力発電環境整備機構 (NUMO) 理事長

近藤 駿介 (こんどう・しゅんすけ)

東京大学大学院工学系研究科博士課程(原子力工学専攻)修了, 工学博士。東大工学部教授, 原子力委員会委員長などを経て, 2014年7月から現職。

7月の末に科学的特性マップが公表された。このマップは、政府が関連分野の専門家集団の意見を踏まえて、地層処分場に適している地域が備えるべき地質環境および廃棄物輸送に関する要件を検討し、これらの要件で地図を色分けしたものである。これを示す目的は、我が国においても地層処分場の建設に適している可能性の高い地域があることを具体的に示すことで、この点に関する人々の疑念に真摯に向き合い、国民の関心を高めることにある。

我が国が地層処分する高レベル放射性廃棄物のガラス固化体は、長半減期の放射性物質を高い密度で含むので放射線レベルが高く、発熱密度が低下するまで地上で冷却する必要がある。だが、ガラス固化体は放射性物質をガラスの分子構造に取り込んでおり、金属容器に収められているので、地下に埋設されて地下水と接しても地下水中に放射性物質が溶出するには長い時間がかかる。なお、長半減期の放射性物質を多く含む非発熱性廃棄物 (TRU 等廃棄体) も併置処分する。

これらを地下 300m より深い安定していて緻密で地下水の流れが遅い岩盤中に、膨潤性のある粘土で包んで埋設、即ち、地層処分した場合、放射性核種は水溶性のものを先頭にいつかは地下水に溶け出し、その後、さらに長い時間をかけて地表に達する。しかし、この移動の間に崩壊が進むので、これが地表の放射線レベル(地中にはカリウムやウラン等の長半減期の放射性物質が含まれていて、それにより我々は年間 0.4mSv 程度被曝している。)に検出できるほどの変化を与える可能性は極めて小さいと推定される。また、このことを確かにするために、将来世代に積極的な安全管理の取り組みを求める必要もない。このことから、地層処分はこれらの廃棄物から人間社会の安全を確保するために現在利用可能な最良の方法であるとの共通認識が国際社会には形成されており、例えば EU (欧州連合) においては、各国は原子力の専門家が存在する今からその実現に着手することという指令が 2011 年に発せられている。

この処分場の立地点の決め方は国によって異なる。スイスでは実施主体が地質学的見地からこの処分場の設置に適した地下の範囲を国にいくつか提案し、次に、国がこの範囲の地上にある自治体を構成員とする会議体に地上施設の設置場所を決定してもらい、候補地下の物理探査に進むアプローチを採用している。

一方、我が国では、個人等から私有地に関して文献調査の依頼があってもその存する自治体が応募・受託してからこれを実施し、次に物理探査等を伴う調査を行う意味ありと判断した場合には再び当該自治体のご意見を伺うこととしている。この事業は着手から埋め戻すまでに 100 年を要し、地上で廃棄物を容器に収納する等の作業を行うことや地下坑道を掘削・維持管理する設備や廃棄物輸送のための港湾・道路などの整備が必要であり、地域の経済・社会・環境に大きな影響を与える。このため、共生の相手として NUMO が信頼できるかを地域社会に対話を通じて見極めていただき、着手を共同決定することが大切と考えたからである。

NUMO は、このマップの提示を契機に、事業の意義やその内容・影響等について説明・対話を行う取り組みを全国各地で一層強化し、この調査を受け入れて社会の課題解決に貢献することを考えていただける自治体の一つならず現れるよう、力を尽くす所存である。会員諸氏のご支援を心から願います。

(2017年9月28日記)



安全の確保はリスクの管理から



山口 彰 (やまぐち・あきら)

東京大学大学院 教授

工学博士。専門は原子炉工学。東京大学原子力工学科卒業、同大学院博士課程修了後、日本原子力研究開発機構にて高速炉研究に従事。2005年より大阪大学大学院教授。2015年より現職。

2017年9月13日、日本原子力学会秋の大会(北海道大学にて開催)で設立総会を開催、19番目の部会としてリスク部会が発足しました。日本原子力学会のホームページには、原子力学会員が部会に参加・活動することによって会員相互の交流が広がり、部会・連絡会活動並びに学会活動が一層活発化するとの期待が記載されています。原子力分野におけるリスク研究に関する組織的基盤はこれまでありませんでした。しかし、福島第一原子力発電所の事故以来、リスク評価研究とリスク管理研究の重要性が増しており、2014年には電力中央研究所に原子力リスク研究センターが設立されるなど多くの活動が行われてきました。ここにリスク部会が発足し、学会活動の母体が設立されたことは時宜を得たものと考えます。ご賛同いただいた関係各位のご尽力、ご支援のたまものであり、紙面を借りてここに感謝申し上げます。

リスク評価への学術的な取り組みとしては、欧州と米国に比べてアジア地域は後塵を拝していました。欧州にはESREL(安全と信頼性に関する欧州シンポジウム)、米国にはPSA(米国原子力学会主催の確率論的リスク評価に関する国際会議)があり、貴重な意見交換の場となっています。しかしアジア地域にはリスク評価に関する学術的会合はありません。PSAM(確率論的安全評価とリスク管理に関する国際会議)は国際理事会(IAPSAM)を組織し、米国、欧州、米国、アジアの順序で隔年に(アジアでは8年に1回)開催しています。アジアでは最初に、第5回PSAMが2000年に大阪にて開催されました。

ここ10年来、筆者は韓国原子力研究所のE. J. Yang氏とアジア地域におけるリスク研究の活性化とリスク活用 の進展について意見を交わしてきました。現在、世界で原子力利用の成長がもっとも著しいのはアジア地域です。そのアジアで、福島第一事故が2011年に、韓国では2016年に慶州地震が発生しました。慶州地震が大きな要因となって原子力発電所の安全性についての懸念が囁かれ、それが2017年の文在寅大統領の脱原子力宣言の引き金となりました。Yang氏とは、中国を含めた三ヶ国を中心にアジア地域でのリスク評価とリスク管理に関

する国際会議体の設置を模索していました。2016年10月7日、ソウルにて、中国は清華大学のTong教授を交え、ASRAM(リスク評価とリスク管理に関するアジアシンポジウム)発足の同意にこぎつけることができました。慶州地震(9月12日)の3週間後のことです。最初の会議として、2017年11月13日から15日に横浜にてASRAM2017を開催することを決定しました。リスク部会は、これら国際学術活動に対しても積極的に貢献してまいります。原子力学会員各位におかれましては、リスクの問題について議論を深め適切な安全の確保について考察を深める場であるこれらの会議にご参加いただければ幸いです。

さて、本誌10月号に新潟県の米山隆一知事が、「福島第一事故の科学的検証が日本の原子力の科学力・技術力を向上させる」との巻頭言を寄稿されました。福島第一事故を踏まえるとシビアアクシデントの再来期間は500炉年に1基あるいは1,500炉年に1回であると指摘され、原子力関係者に対してその頻度を一桁下げるよう、そして原子力の科学力と技術力に期待するという激励と叱咤の言葉をいただいています。エネルギー基本計画(2014年)によれば「安全性の確保を大前提に、エネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源」と原子力は位置づけられています。放射性物質の利用は発電だけにとどまらず、医療、工業、農業と多様です。便益のある放射線の利用に伴うリスクは、広く受容される領域があるとの認識が世界で共有されています¹⁻³⁾。米山知事の事故の頻度を一桁下げるべしというご指摘を真摯にうけとめ、広く受容されるリスクの領域に、原子力発電所のリスクを抑え込まなければなりません。

これまでに軽水炉の炉心溶融事故(発電目的以外の原子炉を除く)は3度、5基の原子炉で発生しました。最初は米国のTMI2号機(1979年)、そして旧ソ連のチェルノビル4号機(1986年)、さらに日本の福島第一の1,2,3号機(2011年)です。軽水型原子力発電所の総運転期間はおおよそ15,000炉年です。これから炉心溶融事故の発生頻度を計算すると 2×10^{-4} 回/炉年、もしくは 3×10^{-4}

基/炉年となります。日本だけに限定すれば、軽水炉の運転経験はおよそ1,500炉年ですから、炉心溶融の発生頻度は 7×10^{-4} 回/炉年、もしくは 2×10^{-3} 基/炉年となります。

原子力発電所は、その厚い安全設計のゆえ、いくつかの故障や失敗が重なってはじめてシビアアクシデントに至ります。TMI-2(Combustion Engineering社製の加圧水型軽水炉)では、運転開始以来、数多くのトラブルが発生していたにも関わらず完全に解決しないうまま運転を継続していたこと、他の発電所で発生した類似事象の経験が反映されなかったこと、設計上の問題や運転員の誤操作などが原因でした。チェルノビル発電所(ロシアの黒鉛減速沸騰軽水圧力管型炉)は、ポジティブスクラムや格納容器がないなどの設計思想の問題、運転員の規則違反、さらには安全文化の欠如などが原因として指摘されました。我が国の軽水炉とは設計、運転、品質管理などが異なるのであるからそのような事故は発生しないという考えは、問いかけ学ぶ姿勢を尊重する安全文化の精神に背くものです。これらの事故からいかに多くの知見と教訓を導き出し、原子力安全の向上に貢献するかが重要です。

原子力の安全確保の観点からは、福島第一事故からシビアアクシデントの発生頻度を計算するよりも、教訓を見出す方ははるかに重要です。一般に、事故の後には原因究明が多角的な視点からなされ、その根本原因に遡って多くの改善がなされます。これらの事故は重苦しい経験ではありますが、その後、同じ類いの事故を発生させないことはもちろん、根本原因に対処することにより、安全性を総合的に向上させることが大切です。

世界の原子力発電所の運転経験は、たかだか15,000炉年です。たとえ最高の安全対策を施したとしても、この程度の経験を持ってシビアアクシデントの発生頻度が僅少であると証明することはできません。同時に、シビアアクシデントを経験したことをもって原子力のもたらす便益を棄却することも現実的な選択ではありません。これら事故の経験から、不確かさが残るがゆえにシビアアクシデントを完全に防止することは困難であること、事故の防止だけでなくそれが発生した時の影響の緩和についても十分に配慮すること、そのためには考えるシナリオをしっかりと理解することが大切と言えます。

福島第一事故の原因は東日本大震災の巨大津波に起因する全電源喪失でした。津波のリスクについては、1,000年に1回の津波が考慮されていなかったと指摘されました。深く反省すべきことです。新しい規制基準を踏まえれば、少なくとも10,000年に1回程度の津波に対してもプラントは耐性を備えているといえるでしょう。それならば、これで原子力発電所の炉心溶融事故の発生頻度は一桁下がったと安心して良いのでしょうか。不確かさを見出し、安全を不断に向上させる至極当然のことを行なっているにすぎず、不確かさが解消したわけではあり

ません。過去の事故の経験を過小評価することなく、過大評価することもなく、リスクに関する不確かさを真摯に見出す努力を続けることが大切であると思います。

リスク評価を行う理由は、どれだけ安全性を高めようとして、様々な活動をしたとしても、なお不確かさが残り、知見の不十分さがあるからです。米国原子力規制委員会は、「便益を伴う放射性物質の利用をしつつ絶対的な安全あるいはゼロリスクを達成することは不可能であるとの認識のもとに、“適切な防護”あるいは“不当なリスクがないこと”という文言を使用することとした。“適切な防護”や“許容できるリスク”という言葉の使い方に賛否はあるかもしれない。いずれにせよ(安全とリスクの)評価と規制判断はリスクトリプレットに関する問いかけを含意するのである」と述べています²⁾。リスクトリプレットに関する問いかけとは以下に示すものです。

- (1) うまくいかないとしたら、それは何か(What can go wrong? 事故のシナリオ)
- (2) それは起こりそうか、どの程度か(How likely is it? 確からしさあるいは発生頻度)
- (3) うまくいかないとどんな結果になるのか(What are the consequences? 被害や影響度)

リスクトリプレットは、シナリオ、発生頻度、影響度を総合的に分析してリスクを低減することを求めています。頻度を小さくすることはリスク低減のごく一部に過ぎません。

シナリオを網羅的に検討できることはリスク評価の特徴です。リスク評価はレベル1, 2, 3の三段階で実施され、レベル1は炉心損傷・溶融を、レベル2は格納機能の喪失と放射性物質の放出を、レベル3は施設の敷地外の公衆と環境への影響を評価します。それぞれのシナリオに対して頻度と影響度を階層的に評価するので、リスクトリプレットを分析できる方法です。深層防護の考え方に従い決定論的に定めたシナリオについて、設置した工学的安全設備が働かないときにそのようなシナリオ群に対して影響を緩和する機能を備えること、格納機能が失われるような状況を考察して緊急時計画・対応を行なう緩和対策を用意することが、受容される領域にリスクを閉じ込めるに不可欠で、それら対策の適切性はリスク評価により確認・検証することが可能です。公衆と環境を守るという原子力安全の目的を達成するために、リスク評価は不確かさを管理するものと言えます。

－ 参考文献 －

- 1) IAEA, Fundamental Safety Principles, No. SF-1.
- 2) U. S. NRC, A proposed risk management regulatory framework, NUREG-2150, 2012 April.
- 3) Reducing risks, protecting people, HSE's decision making process (2001).

(2017年10月16日記)



「エネルギー・デモクラシー」の挑戦 ——新潟県原発検証委員会について



佐々木 寛 (ささき・ひろし)

新潟国際情報大学国際学部 教授
専門は、政治学(エネルギー・デモクラシー論)。著書として、「『3・11』後の平和学」(編著)、「地方自治体の安全保障」(編著)など多数。「新潟県原子力災害時の避難方法に関する検証委員会」副委員長。環境エネルギー政策研究所 (ISEP) 理事。

「エネルギー・デモクラシー」実験場としての新潟原子力問題が、単に科学技術の発展やエネルギー供給の問題にとどまらず、その管理や運用をめぐる、社会全般にまたがる、すぐれて「政治的」な問題でもあることは言をまたない。原子力という人類史上最大の人為的エネルギーが社会に及ぼす影響の大きさを考えれば、それはごく自然なことである。そして、ロベルト・ユンクの「原子力帝国」論やウルリッヒ・ベックの「リスク社会」論に代表されるように、原子力発電から核兵器に至るまで、原子力技術がもたらす秘密主義や専門家支配が、私たちの社会に一種の非民主主義的な状況をもたらす危険性についても、すでに広範に指摘されている通りである。

そこで、原子力発電のような巨大なテクノロジーをいかに民主的に管理・運用できるのか、あるいはその「民主化」の過程で、そのテクノロジーに依存している社会そのものがいかに「民主化」してゆくのかという、きわめて基本的な問題が浮かび上がる。「エネルギー・デモクラシー」の視点は、このような原子力技術と民主主義との関係を包括的に捉えようとする視点である。

私が住む新潟は、世界最大といわれる柏崎刈羽原発を抱え、今この「エネルギー・デモクラシー」のもっとも先鋭的な実験場となっている。昨年の県知事選挙では、柏崎刈羽原発の再稼働の是非が最大の争点であった。勝利した米山隆一現知事は、その公約の中で、「福島原発事故およびその影響と課題に関する3つの検証(事故原因検証、事故の健康と生活への影響の検証、安全な避難方法の検証)がなされない限り原発再稼働の議論は始められない」とした。周知の通り、電力事業者である東京電力と新潟県の間には1983年より「安全協定(柏崎刈羽原子力発電所周辺地域の安全確保に関する協定書)」が締結されており、事実上、県知事の同意なしに原発の再稼働は難しい。県知事選は、原発再稼働をめぐる事実上の県民投票の様相を呈し、また勝利した新知事は、その検証には最低でも3~4年かかるとしているため、この新しい新潟県政の誕生は、東京電力のみならず、日本全体の原

子力行政にも大きな影響を与えた。

「熟議」の場としての検証委員会

しかし、現代における民主主義の機能は、政治的政策決定の是非を一度の投票(多数決)で決めることのみにあるのではない。是か非かという結論よりむしろ、その決定を導き出す「熟議」のプロセスにこそ、民主主義のより重要な機能が存在する。

米山知事は、2003年からすでに存在している「技術委員会(新潟県原子力発電所の安全管理に関する技術委員会)」「(委員15名)に加え、「健康・生活委員会(新潟県原子力発電所事故による健康と生活への影響に関する検証委員会)」「(委員9名)、および「避難委員会(新潟県原子力災害時の避難方法に関する検証委員会)」「(委員9名)という新たに2つの委員会を立ち上げた。これら新委員会はすでに去る9月に第1回目の会合が開催されたが、さらにこれら3委員会の上に、すべての検証を総括する「検証総括委員会」の設立も予定されている(下記の筆者作成図参照)。

「技術」「生活・健康」「避難」の各検証委員会は、それぞれ前記知事公約の3つの検証に対応しているが、それぞれの議論は互いに連携・共有され、より有機的な検証が



可能となっている。

これまで、福島第一原発事故に関しては、「国会事故調」、「民間事故調」などいくつかの包括的な検証が試みられてきたが、原発立地自治体が自前の予算で設立し、運用するものとしては、この新潟の試みは、これまでになく包括的なものとなっている。また、避難者への新たな生活調査や地域住民による避難訓練、広く市民への意見聴取なども実施し、これらを前提に時間をかけて「徹底的な検証」を行うという意味では、歴史的にもきわめて挑戦的な試みであると言えるだろう。単に専門家が議論することに終始するのではなく、その議論の争点や成果は地域住民に広く還元され、まさに市民が「熟議」するための材料や基盤となる。原発が立地する自治体や地域住民が、いったんは賛成反対の立場や結論を脇において、徹底的に議論を積み重ねる。この新潟検証委員会の歴史的な意義は、まさにその議論のプロセスと、そこで生み出される相互の学びにこそあると言える。またその蓄積された議論は、おそらく国内外のすべての人々、あるいは将来の世代にとっても大きな財産となりうるだろう。残念ながら、地元メディアの一部では、個々の委員会委員の現在の政治的な立場のみに焦点を当てた報道がなされたが、それはこの委員会の試みが内包する普遍的な意義への無理解が原因となっている。

検証の包括性について——「避難委員会」の議論からそれにしても、「徹底した検証」とは何か。それはおそらく、あらかじめ議論の枠組みを限定しない、あるいは結論ありきの議論をしないということである。福島第一原発の事故とそれがもたらした〈現実〉をつぶさに再検討し、その〈現実〉から、そしてまた常にその〈現実〉に立ち返って議論を行うということである。

筆者も一委員として参加する「避難委員会」の初会合(9月19日実施)では、その点をはじめ、この検証委員会が目指すべき検証の包括性に関する議論がなされた。まず、原子力災害において「安全な避難」とは何か、という基本問題が存在する。そもそも放射性物質が外部に拡散している状況下で、一定の被ばくを前提にしない避難は本当に可能であるのか。仮にもし被ばくを前提にするとすれば、それはどの程度までが「安全」であるといえるのか。また、「避難」とはいったい何を意味するのか。通常、避難者にとっては、避難先から帰宅するまでが「避難」にあたる。しかし原子力災害では、長期にわたって帰還が困難な地域も発生しうるため、避難計画に帰還までを含めることで、想定しなければならない事態や争点が飛躍的に増えてしまう。検証委員会では、この「避難」のどこまでを対象にして議論を行うのか、それ自体が大きな争点となった。

また、原発から5km圏内の「即時避難区域(PAZ)」や30km圏内の「避難準備区域(UPZ)」といった既存の同心

円の地域区分が、本当に現実の避難計画に有効であるのかという根源的な問いも浮かび上がる。これもまた福島原発事故等の実際の原子力災害の経験から再検証されなければならないだろう。その場合、国際原子力機関(IAEA)の国際基準や、政府の原子力防災対策指針そのものも、それがもし災害経験の〈現実〉に照らし合わせて不十分であるならば、それ自体が再検討の対象となるだろう。

このほかにも、避難者の中の「要配慮者」の具体的定義をめぐる問題、あるいは放射性物質の放出状況を具体的に想定するために必要となる、災害要因の多様な想定、すなわち自然災害のみならずテロやミサイル攻撃などの事態も想定に含むべきかどうかなど、数多くの抜本的争点が存在する。初回の会合では論点の洗い出しが目的であったため、提起されたこれらすべての争点が排除されずに今後の討議課題として位置づけられた。

「リスク社会」を生きるための〈知〉

だが、このような包括的かつ徹底的な検証を行うことは、実際は原発の再稼働を遅延させるための単なる時間稼ぎにすぎない、という批判もあるかもしれない。また、民主主義のためと称して、あれこれ議論ばかりして結果的に日本の科学技術の進歩や経済成長を遅らせているだけだ、という批判もありうるかもしれない。たしかに、「技術委員会」や「生活・健康委員会」で提起されたものも含め、前述のような多くの基本争点を十分に議論するためには、現時点で気の遠くなるような時間が必要であるように思える。

しかし、国内のすべての原発が再稼働する場合はもちろんのこと、たとえすべての原発が停止していたとしても、いずれにせよ私たちは原子力災害のリスクの中で生き続けなければならない。私たちはもはや既存の原発が「ノーリスク」であるという前提には立てなくなった。そしてもしそれが動かさえない〈現実〉であるならば、私たちは自分たちの子孫の遠い未来をも射程に入れつつ、現実の「リスク社会」の中でどう生きていくのかについて、今一度立ち止まって考えなければならない時期を迎えているのだといえるだろう。

この問題には、じつは右も左も、保守も革新もない。「リスク社会」は既存の政治的枠組みを超えた、境界横断的な問題を提起している。ここで一政治研究者が出すことのできる当座の結論は、この問題に立ち向かう方法が、単なる個別の「専門知」からはけっして生み出されることはないだろうということである。唯一の「解」は、リスクを共有した共同体の成員が、あらゆる既存の〈知〉の境界を超え、相互に徹底した対話と熟議を積み重ねる事にしか見いだせない。新潟における検証委員会の試みは、この新しい〈知〉の創生に向けた挑戦でもある。

(2017年10月12日記)



スロバキアの日本人医学生から原発を見て



妹尾 優希 (せのお・ゆうき)

スロバキア国立コメニウス大学医学生
栃木県下野市出身。幼少期をアメリカ・ボストンで過ごし、ニュージーランド、南島へ渡航。ニュージーランドの公立高校卒業。現在、スロバキア国立コメニウス大学医学部英語コースに在籍中。

I. はじめに

私は2015年よりスロバキアのコメニウス大学医学部英語コースにて、医学を学んでいます。中学生時代から留学しており、6年前の福島第一原発事故の際も、ニュージーランドに滞在していました。昨年8月に福島県の病院を見学した事をきっかけに、原発周囲に住む人たちが安心して生活する為の取り組みに興味を持ちました。その後、スロバキアの原発を見学し、現地の医学生グループとチェルノブイリ原発事故についてインタビューする活動をしています。本稿では、あまり馴染みのないスロバキアの原発について、見学やインタビューを通じて私が感じた事の一部を紹介させていただきます。

II. スロバキアの原発事情

スロバキアでは首都ブラチスラバから約150km東北に位置するヤルロウスケー・ボフニチェと、約130km東に位置するモホフツェの2箇所に原子力発電所があります。ボフニチェではV2-1、V2-2号基(VVER440/V-213)が、1984年、1985年より稼働中です。モホフツェでは1,2号基(VVER440/V-213)が1998年、1994年より運転中で現在3,4号基の建設も行っています。原子力発電の割合は国の総発電量の約55%(15.7TWh)で、原発依存度はフランスの72%に続き世界で2位です。

スロバキアの原子力発電開発は、社会主義時代のチェコスロバキア政府が導入したロシア製のガス冷却重水炉A-1号基の1972年12月25日運転開始が出发点です。このA-1号基は、HWGCR(Heavy Water Gas Cooled Reactor)という開発初期の原子炉で、沸騰水型や加圧水型の原子炉で冷却材として使用される軽水の代わりに、冷却材に炭酸ガスが使用されています。こちらのA-1号基は人為的な事故が1976年と1977年に起こった後、1977年に閉鎖されました。その後、ボフニチェでは1972年にV1-1、V1-2号基と二つの原子炉が着工し、1978年から稼働していましたが、いずれもEU加盟の条件の一つとして2006年と2008年に運転停止しました。運転停止後はスロバキア政府が運営する廃炉会社JavysがA-1号基とV1-1、V1-2号基の管理をしています。

現在スロバキアの電力は、EU加盟に伴い自由化されていますが、それ以前はSlovenskéElektrárne(スロバキア電力会社/SE社)が国営で独占的に発電や送電、電力輸出入を行っていました。2002年にSlovenská elektrizačná prenosová sústava(スロバキア電力伝送社/SEPS社)とTepláreň Košice, a. s.(コシツェ熱併給発電株式会社/TEKO社)を分離しましたが、現在稼働中の4つの原子炉を所有しているのは本体であるSE社です。また民営化によりSE社の株式は、34%をスロバキア政府が、33%をイタリアのエネル社が、残りの33%をチェコmpEnergeticky a prumyslový holding(エネルギー・産業ホールディング/EPH)が所有しています。

モホフツェで建設中の3,4号基(VVER440/V-213)は1986年にSE社によって着工され、チェコスロバキアが分裂するビロード離婚前年の1992年に一度建設が停止されました。その後2009年に建設が再開され、2018年に完成予定です。この建設にあたりエネル社は8億3,900万ユーロの投資をし、さらに今後2億2,800万ユーロの投資が考えられています。この3,4号基の他にもボフニチェではJadrová energetická spoločnosť Slovenska(スロバキア原子力発電社/JESS社)によって2021年に新しい原子炉の建設着工が始まります。

III. チェルノブイリ原発事故とスロバキア

1986年4月25日23時、ウクライナの小さな町で行われた原子炉のテスト中の人為的なミスによって起きた、チェルノブイリ原発事故は、隣国であるスロバキアにも大きな影響を与えました。1990年に行われた調査では、スロバキアの放射性降下物による被害レベルは調査の基準では「低い」とされており、検出されたセシウム137は、4,000Bq/m²以下でした。1998年にチェルノブイリから751km(原著論文では1,600kmとなっているが誤記と思われる)離れた東スロバキアの街、ロズナバ市で行われたチェルノブイリ事故後の白血病と甲状腺癌患者数に関する調査結果によると、事故後と事故前では急性リンパ性白血病の患者数は2.1倍に、甲状腺癌の患者数は1.3倍に変動し、急性骨髄性白血病において変化はあり

ませんでした。もっとも論文の結果では、チェルノブイリ事故による放射能の影響と白血病や甲状腺癌の関連性は有意でないとされています。

上記を踏まえた上で、チェルノブイリ事故時にボフチェ原発付近のセニカ市に住んでいたアンナ・スチャンコバさん(当時43歳)にインタビューをしました。当時の政府は、事故を3日後に報道しましたが、アンナさんによると、街周辺に設置された放射能計測器によって翌日には異変に気づいたそうです。その為、街の住人はヨウ素タブレットを服用し、洗濯の回数を増やすなど対策を早期にしたそうです。また、健康被害について、原発事故による放射能の影響でがんや妊婦への影響がある事や、ウクライナの住民が亡くなっていると人づてに聞いたとのことでした。

IV. 1976年スロバキアの原発事故

前述しましたがスロバキアの原発では、チェルノブイリに相当する事態になる可能性があった事故が、1976年と1977年に起きています。この事故は、スロバキアで最初に作られた、ボフニチェ原子力発電所のA-1号基に起きました。最初の事故は、1976年1月5日に燃料交換の際に新燃料集合体が炉心から飛び出した事によって起きましたが、国際原子力事象評価尺度レベルに至らず、問題視されませんでした。その翌年2月22日の事故も燃料交換時によるもので、広範囲にわたる燃料被覆材の腐食破損と、それに伴う放射性物質の発電所敷地内への放出を引き起こしています。この2度目の事故は、国際原子力事象評価尺度(INES)レベル4の深刻な事故で、ボフニチェ発電所敷地外のDudvah川へ汚染の被害がありました。

一度目の事故では、緊急システムへの反応が遅れた作業員2名が一酸化炭素中毒により命を落としています。また、事故が深刻化しなかったのは「異変に気がついた作業員が、鉄の塊が飛び交う中ガスマスクを装着し、コントロール室から原子炉容器の開いた部分を押しもどす事に成功したから」だそうです。ボフニチェ周囲の街ではこの作業員は英雄的存在として扱われていますが、報道自体は全くされず1998年に初めてFrišovaらの論文によって公に発表されました。

二度目の事故によって、A-1号基の再稼働は不可能となりましたが、死者やけが人はでませんでした。しかし、周囲の環境へ影響があったにもかかわらず、廃炉が決定されたのは1979年で、財政難から処理はかなり遅れました。二度目の事故はINESレベル4と評価されたのにも関わらず、事故による放射能汚染について発表されたのは1996年になってからです。また、この事故が起きた事は他の国のINESハンドブックに含まれる事が殆どありません。驚く事にこのスロバキアの事例は

IAEAのINESハンドブックにも、スロバキアのINESハンドブックにも記述がありません。

V. 最後に

スロバキアはチェルノブイリ事故と2つのボフニチェ事故の他に、冷戦下の核戦争の恐怖など、放射能汚染と直面する場面が数多くあった国です。しかし、過去にスロバキアで行われた反原発運動への市民の参加は少なく、GreenpeaceやIpel Unionなど環境保護を訴えるNPO団体が反対デモの主な参加者です。これには、スロバキアが貧しい国である事が大きく影響しています。スロバキアの英新聞社Specterによると、原発職員の年収は1,600ユーロ/月(1ユーロ129円で約20万円)でこれは、スロバキアの平均収入の約2倍です。スロバキアの病院勤務医の給料が800ユーロ/月と考えると、原発職員の給与はかなり高額です。そして、2018年にはモホフツェの建設中の原発の稼働により、新たに3,500人の職員の採用が見込まれています。そうしたことから、住民からは「怖いけど、仕方ない」と考えている印象を受けました。実際に現地の原発を見学し、通信管理者の方から事故につながる操作があった場合に自動運転に切り替わる事や、スロバキアの地形から地震や津波の影響は考えられないと説明を受けました。しかし、国全体が原発村化してしまっているスロバキアに必要なのは、事故防止に対するアプローチだけではなく、福島で事故後複数年経過し一番問題となっている、避難した住民へのいじめや風評被害であると感じます。今を生きる市民の生活を支えるのは、自分たちが未来に抱えるリスクを伝えていく事にあると考えます。

— 参考文献 —

- 1) Nuclear Power in Slovakia | Slovakia Nuclear Energy-World Nuclear Association <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/slovakia.aspx>
- 2) Kuruc, Jozef, and L'ubomir Matel. Thirtieth anniversary of reactor accident in A-1 Nuclear ...Department of Nuclear Chemistry, Faculty of Natural Sciences, Comenius Univeristy. Pedraza, Jorge Morales.
- 3) Koprda, V. "Dry, wet and cumulative fallout and milk contamination in Bratislava (Czecho-Slovakia) after the Chernobyl accident." *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters*, vol. 146, no. 5, 1990, pp. 323~331.
- 4) Ics, J., and M. Sz Li Sov. "Leukemia and Thyroid Tumour in an East-Slovakian District after Chernobyl." *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 77, no. 1, Jan. 1998, pp. 129~131.
- 5) Deutsche Welle. "Few resist as Slovakia pursues nuclear power | DW Environment | DW | 25.04.2013." DW.COM, www.dw.com/en/few-resist-as-slovakia-pursues-nuclear-power/a-16765458.

(2017年8月15日記)



規制委による東海第二の審査が終了

日本原子力発電は原子力規制委員会に対して10月未だまでに、東海第二原子力発電所の新規規制基準に対する適合性確認のための審査対応の説明を終え、11月8日にこれまでの審査状況を反映した申請書の補正書を提出した。今後は工事計画認可申請に係る審査対応に取り組

み、40年超の運転期間延長認可をめざす。

福島第一原発事故の後、40年を超える運転延長が認められたのは高浜1、2号機と美浜3号機の3基。いずれもPWRで、東海第二の運転延長が認められればBWRとしては初となる。（原子力学会誌編集委員会）

原子力委、日本のプルトニウム利用について解説

原子力委員会は10月3日、原子力発電に伴い発生する使用済み燃料を再処理して得られるプルトニウムの利用について解説する「日本のプルトニウム利用について」をまとめた。解説文書は、プルトニウム管理とその削減の必要性に対する国際的関心が高まっている状況を受け、日本政府の方針について国内外に一層適切に説明していく必要から、取りまとめ、公表する運びとなったもの。プルトニウム・バランスの確保として、「利用目的のないプルトニウムを持たない」との方針を堅持すること、を改めて明記している。今後、英語版を作成し、IAEAにも報告を行う予定だ。

文書ではまず日本のエネルギー事情と原子力発電、核燃料サイクル政策に基づくプルトニウム利用の歴史について振り返り、商業用再処理利用の研究、英国と仏国へ

の使用済み燃料の再処理委託、MOX燃料を軽水炉で利用するプルサーマル実績などを示している。

また、日本では、「利用目的のないプルトニウムは持たない」との原則を一貫して堅持しており、プルトニウム利用は、IAEA保障措置等の厳格な実施などにより、平和利用が高い水準で担保されていることを記載した。

さらに今後の見通しについて、六ヶ所再処理工場やMOX燃料加工工場のしゅん工時期が遅れる可能性があるものの、両施設のしゅん工のタイミングの差が大幅にかい離することはないなどとして、プルトニウムが溜まり続けることはなく、「長期的に、日本のプルトニウム保有量の削減という目標が達成されるであろう」と、プルトニウム・バランス確保の認識を示した。

（資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ）

海外ニュース（情報提供：日本原子力産業協会）

【国際】

OECD/NEAとWANOが原子力安全強化で協力覚書

経済協力開発機構・原子力機関(OECD/NEA)と世界原子力発電事業者協会(WANO)は10月4日、世界で稼働している商業用原子力発電所の安全性強化を積極的に推進するため、具体的な取り組みアプローチや手法、良慣行などの開発促進で協力する覚書を締結したと発表した。

NEAは、原子力を安全かつ環境的にも受け入れ可能な経済的エネルギー資源として発展させることを目標

に、1950年代にOECD内で設立された専門機関。原子力発電所を持たない国も含めて32か国の政府が加盟している。一方、チェルノブイリ事故を契機に約20年前に設立されたWANOは、世界中で440基以上の商業炉を保有する事業者の非営利団体で、発電所の安全性と信頼性を共同で最高レベルまで高めることを目的としている。今回の覚書により、政府間の協力機関と産業界の事業者団体は、原子力発電所の安全運転や安全確保の人的側面に関する情報交換も含め、透明性のある協力の枠組を設定する予定。安全文化上の課題について共通の理解を深めるとともに、世界中の原子力発電所で安全性向上に向けた全般的な取り組みを支援していく考えだ。

覚書への調印はパリのNEA本部で、D. イラカーン

事務次長と WANO の J. レガルド議長立ち会いの下で行われた。両者はすでに、共通して関心を抱いている基本的課題として原子力安全文化を特定しており、これに対する国民的文化の影響を探る議論を、2018 年から国ごとに開始する準備を共同で進めている。レガルド議長は「WANO と NEA には世界中の原子力発電所における安全性と信頼性の向上という共通目標があるため、覚書に基づく共同作業を通じてお互いの組織だけでなく加盟メンバーも恩恵を得ることができる」と述べた。

NEA の W. マグウッド事務局長も、「原子力発電所の安全性確保は、世界各国の国民や政府、独立した規制当局および産業界など、すべてのステークホルダーが責任を負うべきもの」と指摘。今回、WANO と覚書を締結したことは、NEA 加盟国の意志決定者が産業界の経験に基づく包括的な情報を入手できるよう保証する上で、NEA がさらに一歩前進することを意味しているとした。WANO を通じた産業界との交流により、NEA の各種委員会は安全文化上の良好事例を産業界と共有する一方、産業界に提言を発する機会を増やすこともできると強調。NEA の使命である「加盟国における高度な安全性確保の支援」を、成功裏に達成する一助になるとの認識を示している。

【中国】

年内に完成する高温ガス炉実証炉で 大気汚染改善へ

中国山東省の石島湾で 2012 年から電気出力 20 万 kW の高温ガス炉 (HTGR) 実証炉の建設を請け負っている中核能源科技有限公司 (チナジー社) は 9 月 19 日、年内にも同炉が完成する見通しとなったことから、多数の産業用石炭火力発電所をリプレースして国内の大気汚染と CO₂ 排出を劇的に改善することが可能になるとの認識を明らかにした。10 月 18 日から国際原子力機関 (IAEA) がオーストリアで開催している総会のサイド・イベントで同社の呉郁龍総経理が述べたもので、ウランとプルトニウムを燃料球として使用する革新的 HTGR の建設状況を詳細に説明した。

すでに中国では北京の清華大学が中心となって、2003 年から同大の研究院で熱出力 1 万 kW の実験炉「HTR-10」を運転中。同大と協力関係にある核工業建設集団公司、および華能集団公司が「華能山東石島湾核電有限公司」を設立して実証炉「HTR-PM」の建設を進めており、チナジー社はエンジニアリング・資材調達・建設 (EPC) 契約を請け負っている。

同総経理はまた、江西省瑞金市などでは、出力 60 万 kW の商業用 HTGR を複数、建設する構想も進展中と

述べたことが伝えられている。HTGR は発電だけでなく地域熱供給や脱塩、水素製造にも利用できるため、ポーランドが大型炉建設計画と並行して導入の実行可能性を模索しているほか、サウジアラビアも韓国製小型モジュール炉などとともに中国製 HTGR を建設する可能性調査を実施中。すでに高温工学試験研究炉 (HTTR) を保有する日本も、米国が主導する国際実証炉 (開発) 計画「PRIME」に参加しており、固有の安全性を有するという第 4 世代の HTGR は、実用化への期待が世界レベルで高まっている。

「産業プロセスへの高温核熱利用」に関する IAEA の円卓会議では、中国のほかにポーランド、米国、日本から専門家が出席した。HTGR が排出する高温熱の潜在的な活用方法について議論を交わした結果、産業用の代替エネルギー源として世界全体の CO₂ 排出量を削減する重要ツールになり得るなど、地球温暖化の影響緩和で直接的な役割を担う可能性がある点を指摘。HTGR は今後数年以内に導入できると予想されることから、輸送用の低炭素エネルギー源としてだけでなく、高温熱を必要とする数多くの産業への適用が期待されるとした。IAEA の M. チュダコフ原子力エネルギー局担当事務次長も開会挨拶の中で、「原子力開発を行っている多くの加盟国が、発電以外で原子力を活用する方向性として輸送市場や熱供給市場への進出を確信している」と指摘した。

同会議ではまた、ポーランド・エネルギー省の原子力局長が、2020 年代後半に熱出力 1 万 kW の研究用 HTGR、2030 年代前半に 20~35 万 kW の実用 HTGR を導入するという同国の計画の進展状況を説明した。HTGR によって、ポーランドは年間 1,400~1,700 万トンの CO₂ 排出を抑制するとともに、年間 500 万トン以上の LNG や石油を消費する大型化学プラントには、HTGR の高温熱を供給予定だと明言。現在、化石燃料が 100% を占める同国の熱供給市場においては、HTGR による高温熱の産業利用は途方も無く大きなポテンシャルを持っていると強調した。

このほか、ポーランド国立原子力研究センター (NCBJ) から参加した専門家が、欧州域内で HTGR によるコジェネレーション・システムを共同開発するという多国間のイニシアチブについて考察。米国の「次世代原子力プラント (NGNP) 産業アライアンス」が取りまとめている「PRIME」にも参加して、EU や日本、韓国の核熱利用開発に協力していく考えを示した。

【米国】 エネ省長官、送電網の回復力保全で 原子力支援を指示

米エネルギー省(DOE)のR.ペリー長官は9月29日、国内送電網の信頼性、およびトラブル等による一時的な機能停止から回復する力を保全するため、電力卸市場における原子力と石炭火力への支援措置も含め、直ちに行動を起こすよう連邦エネルギー規制委員会(FERC)に正式に指示した。

FERCは1990年代半ば、電力卸市場を自由化する目的で複数の独立系統運用者(ISO)や地域送電機関(RTO)の設立を推奨。これらは国内の送電施設を広域に制御しているが、取引を組織的に運用する市場においては、様々な災害等で燃料供給が途絶した場合でも発電可能な伝統的ベースロード電源の閉鎖が急速に進んでいる。このため、送電網の信頼性と回復力の維持に資するこれらの電源に対し、十分な対価を与える方向で市場改革を進めるため、新しい規則の制定を要求した。このような喫緊の課題には迅速に対応するとの方針により、ペリー長官はFERC委員長と委員らに宛てた28日付けの指示書簡に、同規則の制定案告示(NOPR)を同封した。NOPRが連邦官報に掲載されてから60日以内に規則制定のための最終アクションを固めるよう指示しているほか、代替案として、提案規則を暫定的な最終規則として直ちに発令し、パブリック・コメント収集後に修正することを指示。ISOとRTOに対しては、規則発効後15日以内に、同規則の遵守を誓約する文書の提出を要請している。

ペリー長官は就任した翌月の今年4月、信頼性の高い電力システムを確保するための政策提言に向けて、国内電力市場や送電網に関する60日間の調査をスタッフに指示した。これを受けてDOEスタッフは8月下旬、改革された電力卸市場の全体像と、送電網の信頼性と回復力に関する評価報告書を同長官に提出。FERCに対する今回の指示は、この報告書等に基づくもので、FERC宛て書簡の中で長官はまず、近年の市場構造の変化が引き起こした結果として、伝統的なベースロード電源の多くが閉鎖に追い込まれている実態を解説した。2010年から2015年までに閉鎖された発電所は石炭火力が主流だったが、2016年から2020年までの5年間に閉鎖済み、および閉鎖が計画されている発電設備3,440万kWのうち79%が石炭と天然ガス蒸気タービン発電所であった。これらに次いで多いのが原子力発電所の15%で、2002年から2016年までに466.6万kW分の原子力発電設備がすでに閉鎖済み。2016年以降、閉鎖計画が発表さ

れた8基、716.7万kWの設備容量には、州政府の救済により早期閉鎖を免れた7基分が含まれていない事実を明記した。

同長官は次に、ISOやRTOが制御する卸市場においては、送電網の回復力保全に資する特質をもった電源に対して、必要な対価が支払われていないとの認識が高まっていると指摘。そのような利点を適切かつ正しく評価した上で、それを十分理め合わせるだけの価格が市場で設定されていないことを理由として挙げた。

また、FERCの指定機関である北米電力信頼度協会(NERC)の見解を引用し、「北米の電力システムは、LNGと再生可能エネルギーが成長する一方、化石燃料と原子力による発電設備が閉鎖していくなど、急速に大きな変革を遂げつつある」と断言。こうしたシフトは、連邦政府や州政府、地方自治体による政策、および低価格な天然ガス、電力の市場原理などによって引き起こされたもので、電源構成要素が変化したことは基幹電力系統(BPS)の運用特性も大きく変化させた。

送電網の信頼性と回復力を今後も保証するためには、この運用特性の変化をよく理解した上で、適切に管理しなければならないと警告しており、石炭火力と原子力の発電設備は特に、稼働率が高くて施設内に燃料を貯蔵しておけるという付加価値があると指摘。燃料の供給チェーンが途絶しても数か月間、運転継続が可能な点を強調した。

過去数年の間に、FERCはISOやRTOが制御する電力卸市場において広範な価格形成を進めてきたが、ペリー長官によれば、このようなエネルギー市場や設備容量市場、電気品質の維持(アンシラリー)サービス市場での価格形成方法に欠陥があることをFERCはすでに気付いている。それらの欠陥は、送電網の信頼性と回復力を弱めることにつながるため、FERCは直ちに行動を起こさねばならない。今のところ、FERC、およびISOとRTOは根本的課題解決のための取り組みを十分行っていないが、送電網の回復力維持に必要な燃料貯蔵型ベースロード電源、すなわち石炭火力と原子力がこれ以上失われることは阻止する必要があると同長官は指摘。具体的には、送電システムの回復力にとって脅威となる市場構造の歪みが長期化しないように、ISOとRTOに要求する規則を制定しなくてはならず、そのために燃料貯蔵型ベースロード電源の特質と価値を高く評価した上で、経費の全面的な回収を許可するなどの行動を取ることは、FERCが緊急に負うべき責任だと声明した。

原子力技術革新推進組織、SMRの商業化で政府に支援要請

米国の「原子力イノベーション連合(NIA)」は10月11日、国内企業が進めている小型モジュール炉(SMR)の開発・商業化活動に対し、支援提供することを政府組織に呼びかける報告書を公表した。NIAは、原子力分野の技術革新と革新的な原子炉設計の商業化を提唱する技術専門家や企業、投資家、環境保護団体、学者等の連合組織で、新しいSMR設計の技術開発を国内で後押しすれば、今後数十年にわたって米国が世界の原子力技術開発のリーダー的地位を確保することにつながると認識している。全50頁におよぶ同報告書では、連邦政府や州政府、その他の政策立案者それぞれについて、「このように極めて貴重なエネルギー技術」の開発を支援する際のガイダンスとなるものを明記。国家安全保証上の責務と世界規模のエネルギー問題に対処することが可能なSMR設計の開発支援を、軽水炉と非軽水炉の両方について加速するよう勧告している。

米国では、巨額の初期投資がネックとなって従来大型発電炉の新設気運が一段落する一方、SMRについてはメーカー各社の研究開発活動が年々活発化しており、米エネルギー省(DOE)は2016年2月、アイダホ国立研究所内にニュースケール社製SMR初号機を建設するための支援協力で、事業者となるユタ州公営共同電力事業体(UAMPS)と合意。ニュースケール社は今年1月、SMRとしては米国で初めての設計認証(DC)審査を原子力規制委員会(NRC)に申請した。また、テネシー峡谷開発公社(TVA)は2016年5月、2基以上のSMR建設を想定した事前サイト許可(ESP)をテネシー州クリンチリバー・サイトについてNRCに申請。NRCは同年12月にこの申請を受理しており、米国初のSMR建設に向けた様々な動きが、現実味を帯びて見受けられるようになった。

こうした動向を背景に、NIAは米国内で石炭火力発電所と原子力発電所の経年化が進んでいることや、地球全体では温暖化問題への対応が差し迫っていることを挙げ、再生可能エネルギーその他の低炭素電源と同様、SMRはクリーンかつ発電量の制御が可能な次世代のエネルギー源として適していると指摘。世界中で増加するエネルギー需要を満たす一助としてのポテンシャルをSMRは有しており、出力も途上国で必要とする規模に合わせやすいなど、従来の大型軽水炉を代替する技術選択肢になるとした。また、天候に左右される再生エネ発電の補完能力など、運転上の柔軟性や安全性も向上しており、国内での建設から海外に輸出する機会までを合わせると、SMR産業は数十万人分の雇用を米国で創出・

維持できる可能性があるとしている。

NIAはまた、様々な原子炉技術に対して投資を行い、開発の各段階を通して継続的に支援することで、米国政府は選択すべき技術への誘導を市場に任せつつ、SMRの技術革新を支えることができると指摘。SMRに的を絞った開発気運が、この国の将来的なクリーン・エネルギー・オプションの選択肢に大きな違いを生じさせるかもしれないという重要な岐路に、米国は差し掛かっていると述べた。

【英国】

EU離脱後に備え独自の保障措置体制を構築中

欧州連合(EU)からの離脱(Brexit)にともない、欧州原子力共同体(ユーラトム)からも離脱が予定されている英国のG. クラーク・ビジネス・エネルギー・産業戦略(BEIS)大臣は9月14日、準備作業の一環として原子力規制庁(ONR)と連携しながら英国独自の原子力保障措置体制を構築中であることを明らかにした。Brexit後も英国が責任ある原子力開発国としての立場を今後も維持していくとともに、英国における保障措置基準や監視体制が将来的に弱体化することのないよう保証していくのが主な目的。英国政府のEU離脱担当省は今年1月、議会に提出した「EUからの離脱通告法案」の説明文書のなかで、ユーラトムからの離脱も含まれると明記した。

7月には、EUからの離脱プロセス開始とともにユーラトムからの離脱条項も発動されるとの認識を示しており、核物質と保障措置の問題に関する英国としての交渉方針書を公表。原子力資機材と技術の自由移動を保証するユーラトムからの離脱によって、保障措置関係の取り決めに途絶が生じないように英国独自の保障措置体制へスムーズに移行する、などの原則をユーラトム側に提案していた。

クラーク大臣の声明文によると英国政府は、ユーラトムが提供中の保障措置体制と同程度に包括的かつ堅固なものを、ONRが運営する新たな体制として英国に構築することは極めて重要だと確信している。そのため、ユーラトムが設定した既存の基準を遵守するだけでなく、国際社会が国際原子力機関(IAEA)加盟国としての英国に要求する基準をも超える内容とすることを政府は決意。国際的な監視が行われることは新たな体制作りにおける主要部分であり、英国はIAEAとの現行協定と同じ原則に基づいて新たな協定を締結する道を模索している。それによって、IAEAは英国の民生用原子力施設すべてを査察する権限を維持するとともに、保障措置関連の報告書もこれまで通りすべて受領するなど、国際的な

確証体制が英国における保障措置活動を今後も盤石なものとして保証することになるとした。

同大臣はまた、EUとの協議が現在も進行中であり、英国としては現在のユーラトム体制から独自体制にスムーズに移行するためのオプションを複数、模索しているところだと説明した。民生用原子力部門の性質が特殊で重要であるという点から、英国とユーラトム加盟国の間には今後も緊密に連携していきたいとの強い思いが共通しており、英国としては、これら加盟国と効率的で親しい関係の維持を強く希望。また、それ以外の国々とも、英国とユーラトム加盟国双方の専門的知見や、その共有利益を最大限に活用しているため、同様の関係を維持したいと述べた。現行レベルの保障措置体制と基準を保つことにより、ユーラトム加盟国とは協力の継続に向けて最良の基盤を築くことが出来るとしている。

クラーク大臣はさらに、協議の結果がどう出ようとも英国政府としては、新体制で少なくとも現行レベルの保証を提供できるよう確約すると明言。そのための法整備を行う方針についても女王陛下が演説の中で表明しており、しかるべき時期に関連法案の提案が行われるとの見通しを述べた。今回の声明文は、そうした重要な背景を議会、および9月の最終週に開催されるEUとの協議に際して提供するのが目的だと説明している。

【フィンランド】

TVO社、仏アレバ社の再建計画でECの承認を上訴

今年1月に欧州委員会(EC)が仏アレバ社再建計画の一環として、仏政府による合計45億ユーロ(約5,900億円)の公的資金投入プランを承認したことについて、フィンランドのティオリス・ポイマ社(TVO)は9月13日、欧州司法裁判所に上訴したことを明らかにした。TVOは2003年12月、アレバ社と独シーメンス社の企業連合にオルキルト原子力発電所3号機(OL3)(172万kW, PWR)の建設計画を発注したが、作業の遅れにより工費が大幅に増加したためアレバ社とは賠償請求裁判で争っている。しかし、アレバ社が原子炉事業部門「アレバNP社」の子会社として「ニューNP社」を発足させ、フランス電力(EDF)に売却する取引においては、OL3関係など問題のある契約はすべて除外され、アレバNP社内に留め置かれる計画だ。

このため、今回の訴状のなかでTVOは特に、「アレバ社への現在の資金投入プランでは、OL3建設プロジェクトでTVOが必要とする財政的、技術的、および人的資源が十分に確保されない」と主張。プロジェクト最終段階におけるすべての負債を、アレバ社が将来的に支っ

ていけるかについても、このプランから保証は得られないとの見解を示した。当初は2009年に完成予定だったOL3の最新スケジュールでは、TVOが運転認可を2018年初頭に受領した後、同年末に営業運転を開始する予定。TVOとしては今回の上訴の主要目的は、アレバ社らが契約上の義務事項に沿って現在のスケジュール範囲内でOL3を完成させることだと強調している。

【UAE】

「今後30年間のエネ政策で原子力優先」を再確認

アラブ首長国連邦(UAE)のS. アル・マズルーイ・エネルギー大臣は9月25日、2050年までの国家エネルギー戦略の中で原子力推進を優先項目とするほか、再生可能エネルギーなど環境に優しいエネルギー源の利用を推進し、今後30年間でそれ以外のエネルギー源への依存度を低減していくと改めて表明した。

UAE初の原子力発電設備となるバラカ1号機の運転開始を2018年に控え、首都アブダビでは10月30日から11月1日まで、国際原子力機関(IAEA)が経済協力開発機構・原子力機関(OECD/NEA)との協力で「21世紀の原子力発電に関する国際閣僚会議」を開催する。ホスト国としての記者会見で同大臣は、今年1月にM. ラーシド首相が公表していた長期エネルギー戦略の概要を再確認したもので、「エネルギー需要の増加に対処する上で原子力は最良の選択だとUAEは確信している」と明言。原子力発電所によって連邦内の電力需要を満たすとともに、持続可能な発展という同連邦の目標を支えていく方針を強調した。バラカ原子力発電所では現在、140万kW級の韓国製PWR「APR1400」設計を採用した1~4号機の建設工事が同時並行で進められており、7月末時点の進捗率はそれぞれ96%、86%、76%、および54%。発電所全体としての進捗率は82%に到達している。

エネ相によると、UAEが国際閣僚会議のホスト国に選ばれたのは、原子力平和利用プログラムの進展におけるUAEの努力と国際的に重要な立場が認められたため。同会議で、原子力部門が直面する課題や喫緊の課題である地球温暖化について様々な国々と議論し、原子力技術の平和利用と各国のコミュニティにおける活用を促せるような勧告を策定したいと述べた。同相はまた、2010年に閣議決定した「UAEの2021年ビジョン」において、UAEを世界でも最良の国の1つとするために燃料や天然ガスの消費量を削減し、エネルギー源を多様化する政策を打ち出していたことに言及。同会議ではUAEのそうした政策に沿って、国家的長期目標の達成

を目指すとした。

同相としては、エネルギー関係の専門家や業界関係者が世界中から一堂に会するこの会議を、最近のエネルギー市場動向やその影響、天然資源の温存、持続可能な開発に向けた官民協力の方法等を議論する理想的な機会であると認識。将来的なエネルギー需要を満たし、地球温暖化を抑制する上で原子力が果たす役割、持続可能な開発への貢献、原子力開発における重要課題等について、閣僚級の政府高官も交えた意見交換を促進している。

UAEのH. アル・カービ IAEA 大使も、「世界の原子力政策で建設的かつ能動的な役割を担う UAE にとって、今回の会議を開催することは重要だ」と強調した。UAE がこの分野で世界的に認められている理由は、原子力プログラムの実施で責任あるアプローチを取り、成功につなげることができたからであり、原子力平和利用に関心を抱く多くの国にとって手本になるからだの説明。UAE が 2009 年に米国と原子力協力協定を締結した際、領土内でウラン濃縮と再処理を行わないと確約したことにより、見習うべきモデルだと称賛された事実を示唆した。

UAE は飛躍的な経済成長にともなう電力需要の急増に対処するために原子力平和利用プログラムを開始したが、国際社会ではまた、安全・セキュリティ関係の基準遵守や核不拡散の枠組など、利用に付随する条件整備が進捗途上にあると同大使は指摘。それでも、地球温暖化への取り組みや持続可能な開発への貢献という点で、原子力が重要な役割を果たすと考える国は増加しており、導入に関心を表明した国の数は、すでに開発利用中の国を除き 30 か国以上にのぼると強調している。

【サウジアラビア】

中小型炉の開発でロシアとの協力を加速

サウジアラビアの原子力導入計画に協力を働きかけているロシアの国営原子力企業ロスアトム社は 10 月 6 日、ロシアとサウジ両国が原子力平和利用分野における協力プログラムに調印したと発表した。2015 年 6 月に両国がこの分野で締結した政府間協力協定(IGA)の枠内で結ばれたもので、この協力プログラムによりサウジは、小型炉や中型炉の開発を含めた重要分野でロシアとの協力を加速。発電や脱塩のみならず、国家原子力プログラム

の進展とともに必要になる人的資源と原子力インフラの構築で、これらの原子炉を活用していくとした。両国はまた、ロシア製研究炉を備えた「原子力科学技術センター」をサウジ国内で建設することについても、将来的に検討する予定だとしている。

今回のプログラム調印は、サウジのサルマン・ビン・アブドゥルアズィーズ国王による公式ロシア訪問に合わせ、5 日にモスクワで行われた。サウジ側から署名したのは、K. アル・ファリハ・エネルギー産業鉱物資源相と、原子力導入計画の担当機関「アブドラ国王原子力・再生可能エネルギー都市公団(K. A. CARE)」の M. アロダン原子力首席。一方のロシア側は、ロスアトム社の A. リハチョフ総裁、および同社の国際事業部門であるルスアトム・オーバースーズ社の E. パケルマノフ総裁が署名した。両国の IGA では、発電炉と研究炉の設計・建設・運転・廃止措置に関係する協力のほかに、核燃料サイクル・サービス、使用済燃料と放射性廃棄物の管理、放射性同位体の生産と工業・医療・農業利用、原子力専門家の教育訓練、協力を具体的に進める調整委員会設置、情報交換のためのセミナーやワークショップ開催、人的資源育成支援を目的とした共同ワーキング・グループ設置などについて、ロシアが協力すると明記されていた。

サウジは国内の原油資源を温存しつつ国内の電力需要増に対処する目的で、2040 年までに 1,200 万~1,800 万 kW 分の原子力発電設備導入を計画。これまでにロシアに加えて、フランス、アルゼンチン、中国、韓国などと原子力平和利用分野の協力協定を締結、あるいは仮調印した。今年 7 月には内閣が国家原子力プロジェクトの起ち上げを承認しており、その中で出力 120 万~160 万 kW のベースロード用大型炉 2 基に加えて、一体型小型炉を複数建設することも視野に入れていることを明らかにした。

サウジ政府はすでに、アレバ社製欧州加圧水型炉(EPR)の建設を想定した実行可能性調査(FS)の実施で 2015 年にフランスと合意。韓国とは、韓国原子力研究所(KAERI)製モジュール式小型炉「SMART」に関するパートナーシップの構築、および世界市場に向けた同設計の共同輸出を念頭に協力協定を締結した。また、今年 3 月には、中国製高温ガス炉をサウジ国内で建設するための共同 FS 実施について、中国の原子炉建設会社である中国核工業建設集団公司(CNEC)と協力協定を締結済みとなっている。

組織文化に根差す原子力安全の課題

原子力安全推進協会 久郷 明秀

原子力発電関連施設の安全性を確保するためには、技術的知見・改善策の追求と安全基準との整合性をとるだけでなく、組織文化を理解して、堅牢で深層的な制度的備えを構築することも提案されている。福島第一原子力発電所事故を分析評価したIAEAの事務局長報告書には、事故の要因の一つに安全のレベルに疑問を持たない傾向すなわち組織文化の奥底にある「基本的想定」が影響したと指摘している。本稿ではそのメカニズムと対応策について述べる。

KEYWORDS: *Culture for Safety, Basic Assumption, Oversight, Peer Review, Organizational Culture, Institutional Strength in Depth, Systemic Approach*

I. はじめに

2011年3月に福島第一原子力発電所事故が起きて以来、当面の事故の後始末、復興計画は着々と進められていると報道されているものの、当該地域の方々にとっては忍耐を要する長い復興の途上にある。事故の経緯や原因の分析、対策の方向性など事故後に種々の報告書が出ているが、筆者の知るところで最近のものは国際原子力機関(IAEA)が、40を超える加盟国から180人の専門家の膨大な英知を集めて分析評価した図1に示す報告書で、2015年8月に事務局長報告¹⁾の形(以下IAEA報告書)で公表されている。

そのIAEA報告書の巻頭言には、『事故につながった大きな要因の一つに日本の原子力発電所は非常に安全であり、これほどの規模の事故は全く考えられないという、日本で広く受け入れられた想定があった。この想定は原子力発電所事業者により受け入れられ、規制当局によっても政府によっても疑問を呈されなかった。その結果、日本は2011年3月には重大な原子力事故への備えが十分ではなかった。』と記載されている。

本稿では、原子力事業者と規制を含む業界関係者に広く受け入れられていたとされる「想定」、すなわち無意識に安全思考のバイアスとして働いた「思い込み」のメカニズムを社会科学的に解説したい。日本の原子力事業に関わってきた関係者が嵌った心理的陥穽が、今後の我が国をはじめとして原子力事業を進める各国の一人一人の原子力安全文化醸成に参考となれば幸いである。



図1 福島第一事故 IAEA 事務局長報告 2015.8

II. 人間の脳の働き

人間の脳には視覚や聴覚など五感から膨大な情報が入ってくる。この情報処理が追いつかなくなり機能麻痺を起こすことを防ぐために、情報に優先順位をつけて選択的に取り込もうとする機能が脳には備わっている。

例えば、注意を払うべきものから意識が反らされる時、それが眼前に現れても認識できず見落とすことがある。この情報選択機能は、脳幹の中にある神経の束(網様体賦活系)の働きと言われている。携帯電話を掛けながら自動車を運転していると事故を起こしやすいのはこの情報選択機能が働き安全運転に必要な情報量が低下するからである。この情報処理選択機能は生命体の生存本能として備わる機能なので、誰もが持つ機能であり、暗示でこの選択機能が働くことも実証されている。

また、自らを問い直す自己省察力が働くと、大脳に答

Industrial Challenge of Basic Assumption : Akihide Kugo.
(2017年8月10日 受理)

えを求める信号が発信されてこの選択機能の見直しが始まること²⁾もわかっている。問いかけることの重要性を脳科学の力を借りて説明するとこのようになる。原子力安全文化の大事な要素の一つに「問いかける姿勢」(Questioning Attitude)が挙げられるが、まさにこの効能を期待しているわけである。

原子力安全推進協会の当直長研修では、この脳の情報選択機能の存在を示す心理学実験のビデオを時々紹介して、原子力発電所で自分や同僚が陥るかもしれない見落としの罠を自覚してもらう講義を行っている。

ただし、個人の意識の持ち方に対して注意喚起することは簡単だが、組織の中で無意識のうちに各人の脳にバイアス効果を働かせている時は、これを取り払うことは簡単ではない。このバイアス効果は、潜在意識の中で働く「思い込み(mindset)」と呼ばれ、「重大事故は起こり得ない」「安全は確立されている」などの「思い込み」が組織の中に存在すると、万一の事態への備えを遅らせる要因となる。IAEA 報告書ではこの「思い込み」が事業者や関係者の間に存在していたのではないかと指摘している。

III. 組織文化

1. 基本的想定

IAEA 報告書では、無意識の「思い込み」を「基本的想定」(Basic Assumption)という言葉を使って言及した箇所がいくつかある。

例えば、行政の施策について、『基本的想定は、原子力安全・保安院が十分な権力を行使しないことに影響を及ぼし、このため、原子力安全・保安院は原子力安全に関するその他の想定に疑問を唱えることができなかった。(中略)技術的設計の頑強性が仮想リスクに対する十分な保護を与えるという基本的想定により、原子力安全・保安院は概してあまり統合的ではなく、より受動的な態度で業務に取り組み、時として短期的活動に集中し、IAEA の安全基準の考察と適用のようなより根本的かつ長期的な問題に取り組みなかった。原子力発電所は基本的想定に反して安全ではないという印象を公衆に与えかねないという懸念のため、規制が更新されなかったり、複雑な緊急時演習が実施されなかったりすることもあった。』と記述している。

また事業者の組織文化に言及する箇所では、『原子力発電所は安全であるという同様の基本的想定は、東京電力の対策にも影響を及ぼし、シビアアクシデントを回避するための同社の発電所の技術的特性の能力に自信を与えることになった。これは、東京電力が2011年3月の事故を緩和するために十分準備できていなかったことを意味する。原子力事故を引き起こす洪水のリスクは基本的想定の外にあったため、シビアアクシデントマネジメントに関する最新の国際指針には必ずしも従っていなかった。基本的想定は、複数ユニットの全交流電源喪失

につながり得る共通原因故障の可能性も除外していた。』と記述している。

同報告書では、このような基本的想定が潜む組織文化を人間・組織・技術の複雑な相互関係に留意しながら分析し、原子力安全の観点から心理的陥穽に陥らないよう対策を講じなければならないとしている。

世界の原子力事業者で組織する世界原子力事業者協会(WANO)は、事業者の安全姿勢を高めるために専門分野のエキスパートでチームを作って本社組織や発電所を訪問し、現場観察、インタビューを通して課題を見つけて指摘するピアレビューと呼ばれる活動を行っている。課題を指摘する際には基準となるものがになるので、「パフォーマンス目標と基準」(PO&C: Performance Objective and Criteria)が用意されている。この「パフォーマンス目標と基準」は、これまで蓄積された知見に加えて福島第一原子力発電所事故の教訓を加え2013年に大幅に改定されている。専門領域で細分化されたこれまでの観点を分野横断的な共通事項と専門領域の二つに再分類し、原子力安全文化やリーダーシップの実態などの組織文化は、共通事項として組織の有効性を確認することとなっている。

2. 組織文化の構造

組織を集団心理の視点で研究する社会心理学者の E. Schein は組織文化が図2のようにいくつかの異なったレベルで構成される^{3,4)}と考えている。最も表層レベルにあるものは動作や呼称、組織の掲げるミッションやビジョン、組織図や文書規定などの人工の産物(Artifact)として現れており、このレベルはきわめて観察しやすいが、ここから組織文化を解釈することは解釈者個人の感性と反応が投影されるため誤解を招きやすく、これだけで組織文化の本質を論ずることは難しいとされる。実際、その時の組織内の価値観、規範、ルールなどは日々の運用のための原則や基準を提供するものであり、これがどのような背景や意味を持っているかを知るためには次の深層レベルにある組織グループの心情や価値観を、

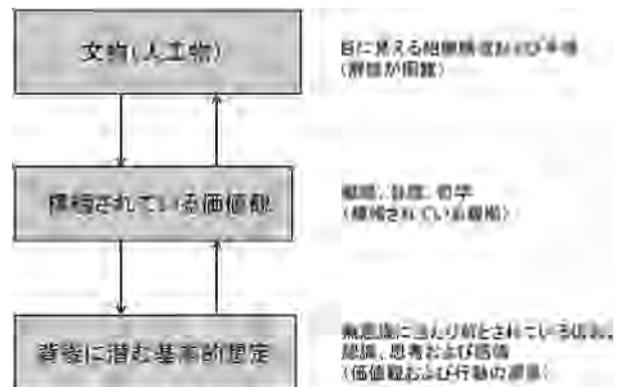


図2 文化の3層レベル

出典 E. Schein, The Corporate Culture Survival Guide

中に入り込んで時間をかけて分析する必要があるとされる。一般にこれらの組織で信奉される信条と価値観(Espoused belief and values)は、組織文化としてまだ定着し普遍的なものとはなっていない可能性がある。例えばこれらは製品の売上げが伸びたこと、あるいは組織内で問題解決がなされたことなどの成功体験を反映して定められたものであり合理的な産物として存在するが、外部環境や内部環境の変化に応じて疑問視され、修正されることもある。もしこの成功体験が繰り返されて当然視され、この信条や価値観が組織の中で意味と安心を提供し続けると、やがてこれは疑問を差し挟む余地のない安定した基本的前提(Basic Assumption)となる。IAEAの報告書に記載された「基本的想定」という用語は、この認められ定着した意識の深層レベルの組織文化を指している。

IV. 福島第一原子力発電所事故の社会的評価

1. 組織文化の中の安全文化

IAEAでは、最近、これまで使われてきた Safety Culture(安全文化)という用語を Culture for Safety⁵⁾へと変えつつある。

これは、「安全文化」が目標、規律、行動規範、体制、管理方法、個人の振る舞いなど組織の中に目に見える形で存在するものの特徴だけをもって捉えられることを懸念し、表層に現れるものだけでなく組織の中で共有されている価値観や深層心理の中に組み込まれた基本的な想定認識まで解釈して組織文化の本質に迫るように配慮したものと考えられる。

IAEA 報告書 2.2.6「人的および組織的要因の評価」の項で、『日本の原子力発電所は安全であるとの基本的想定のために、組織とその人員が安全のレベルに疑問を提起しない傾向があった。原子力発電所の技術設計の頑強性に関する利害関係者間で強化された基本的想定は、安全上の改善が迅速に導入されない状況をもたらした。』として『福島第一原子力発電所の事故は、発電所の脆弱性をよりよく特定するためには、人、組織及び技術の複雑な相互作用を考慮する統合的なアプローチをとることが必要であることを示した。』と記載され、基本的想定に留意し、原子力安全に与える影響を統合的に理解しようと努めることが大事としている。

IAEAは2016年に安全基準シリーズ No.GSR-3を置き換えて新たに GSR Part 2「安全に対するリーダーシップとマネジメント」⁶⁾を発行し、総合的なマネジメントシステムと体系的なアプローチ(技術的要因・人的要因・組織的要因の関係が適切に考慮されたシステム全体へのアプローチ)を重視した安全対策と安全文化の醸成について取り組むべき指標を公表している。この技術要因・人的要因・組織要因の関係が適切に考慮され、システム全

体に目を向けたアプローチを IAEA では「システミックアプローチ」(Systemic approach)と呼んでいる。

2. 日本社会の文化人類学的分析

いつのまにか我々の心に入り込んで組織の通念を形づくってしまう意識⁷⁾を、社会学者の中根千恵は文化人類社会学の観点から考察している。

同氏は社会には同列に置かれない個人を結ぶタテの関係で成り立つ組織と、同質のものあるいは同列に並ぶ個人の関係で成り立つヨコ組織の二つの組織概念が存在すると主張する。中根氏は、タテ社会の組織は一人一人の人間関係が重視されるため感情に左右され易い。また、強いタテの人間関係が組織力を強めやすいが、一方で共有する価値観に異を唱えることは難しくなる特徴も存在する。またタテでつながっていくので、ヨコに位置する他者には関心を示さない特徴もあると分析している。

中根氏によると、日本社会はタテの関係性が色濃く現われており、組織内の上から下まで価値観を共有することが容易に出来る特性を持つが、その価値観は誰からも挑戦を受けないで硬直的になり易い側面も持っている。また、リーダーの力が弱くても指揮命令の機能が活きているので、組織文化を変える時はよほど強いリーダーシップがないと難しいとされる。

注目すべきは、同氏の言葉を借りると、『日本においては、どんなに一定の主義・思想を錦の御旗としている集団でも、その集団の生命はその主義(思想)自体に個人が忠実であることではなく、むしろお互いの人間関係自体にある。』とされることである。

いかに「安全文化を最優先にする」と主義主張を唱えたところで、「発電をできるだけ計画通り継続したい」という会社組織の意向が伝わると、人間関係に基づく感情が強く影響し、原子力安全最優先の原則が脆くも崩れてしまい易いことを意味する。

一旦こうなると、組織の目的を重んずる価値観が自ずと増してバイアスとして働き、網様体賦活系の機能で情報がスクリーニングされ、本来、気づくべき安全のポイントに注意が向かわなくなる。また仮に気づいたとしても、組織の支配的な概念との間で生ずる認知的不協和は、自己正当化の心理作用によって押しやられ、安全よりも組織の合理性が優先する。

簡単に言うと、思想よりも人間関係、個人よりも組織が優先される。一旦、定着した組織の通念は無意識の中で生き続けて容易に組織から離れない。こうして組織内で共有される価値(通念)が挑戦を受けることなく定着すると組織文化となり、個人の判断に時としてバイアスとして働くわけである。

国会事故調査委員会の主査を務めた黒川清氏は、著書「規制の虜」⁸⁾の中で、日本社会は異論を唱えにくく、周りに同調することを求める無言の圧力の存在が大きいと

して、「クリティカルシンキング」や「ロジカルシンキング」は日本の組織、特に役所や大企業には形成されにくいと述べている。

一方、基本的想定によって原子力安全に脅威を招き、深刻な事態に至る一歩手前まで行った事例として海外の事例を紹介しよう。2002年に米国デービスベッセ原子力発電所では原子炉容器上蓋にホウ酸の漏えいによるフットボール大の腐食が発見された。発見された時は原子炉容器上蓋の制御棒駆動装置の付け根の炭素鋼が15cmも侵食され、厚さ数ミリのステンレス鋼の被覆材だけが残っていた。もしも発見されずにそのまま運転継続していたら、原子炉容器から高温高圧の冷却材が直接抜けていく重大事故を招いたであろう。この腐食の穴の発見が遅れた要因には組織文化の問題があったとされる。すなわち、「冷却材の漏えい量は認可を受けた規則の制限値を超えるものではないから大丈夫」、「漏えい箇所は大體検討がつくので次回の定期検査で対処すれば良い」、本社からの意向を受けて「高い稼働率で発電を継続したい」などの共通の価値観が発電所の職員の意識にあり、職員は前兆事象を通常の出来事の延長だと評価し、幹部の管理職も疑問を投げかけなかった。事業者は規制委員会の即時点検要求を6か月先のプラントの計画停止まで延ばそうと交渉していた。まさに組織合理的な価値観が組織の人々の脳の中で認知バイアスとして働き、原子力安全に関わる重要な視点を失念させていたのである。

タテ社会の組織構造によって陥り易い基本的想定のみ日本社会が嵌りやすいことを認識しておくことは大事だが、いずれにせよ基本的想定に陥るは人間の特性から、誰にでも、どこでも起きることなので、やはり自己省察力を高めることが必要であろう。

V. 基本的想定への挑戦

1. 体制的深層防護

2017年5月、IAEAの国際安全グループはINSAG-27 “Ensuring Robust National Nuclear Safety Systems -Institutional Strength in Depth”⁹⁾を公表した。これは福島第一原子力発電所事故が国際的な安全基準の一層の強化と種々の技術的改善の提案を継続するだけでは不十分で、関連する様々な組織が、人的及び組織的な要素を考慮した上で、揺るぎなく効果的にこれらの基準及びツールを適用するための原子力安全システムを備える必要があるとの認識を踏まえ、原子力安全を確保するための体制を事業者、規制、社会のステークホルダーの3層構造に分け、さらに各層は多段階多様化した制度で担保する概念を図3に示すようにまとめたものである。

例えば第1層の事業者の活動は、第1段は事業者の規制対応及び自主的活動、第2段は国内の事業者間のピアプレッシャーを与える活動(JANSIのピアレビューなど)、第3段は国際事業者機関のピアプレッシャーを与



図3 原子力安全システムに適用される深層的な強さ
INSAG-27 Ensuring Robust National Nuclear Safety System-
Institutional Strength in Depth- より作成

える活動(WANOのピアレビューなど)、第4段は国際機関による評価活動(IAEAのOSARTなど)で深層構造的に原子力安全を確保することを推奨している。JANSIの活動はこの第1層第2段に位置づけられる。

2. 「基本的想定」への挑戦

業界・組織の通念が形成され易く、その通念が疑問視されることもない中で、これを打開する方策として認知科学の分野では自己省察力の強化と外部からの俯瞰的・客観的・多角的な観察と助言すなわちオーバーサイトが有効であるとされる。

知覚の技法¹⁰⁾について述べた美術史家エイミー・ハーマンは、知覚の技法は観察(Assess)、分析(Analyze)、伝達(Articulate)、応用(Adapt)の四つの技法を核としており、大事なポイントは、全体を捉えつつも細部をおろそかにしないこと、複雑さを恐れず結論を急がないこと、疑問を持つ心をわすれないこと、客観的事実だけを扱うことの重要さだと主張している。

同氏の主張は、俯瞰的に多様な価値観で観察するオーバーサイトにおいて有効な手法を提供するものであり、ピアレビューなどの活動において観察手法に活かすことができる。また自らを問いかける姿勢(Questioning Attitude)の大事さを知らしめてくれる。

原子力安全推進協会(JANSI)は福島第一原子力発電所事故と同じことを二度と起こしてはならないとする日本の原子力事業者の決意の下に作られた自主的な規制組織である。JANSIの役目をこれまで説明してきた論点で整理すると、ピアプレッシャーの力を活かして事業者に自己省察力を働かせることを促す活動と、第三者の目で客観的、俯瞰的に事業者の活動に口を挟む活動に整理することができる。後者は事業者に対する外部からのオーバーサイト機能と言える。

具体的には、事業者の自己省察力を促す活動として事

業者全体の中で自らの存在位置を確認するためのランキング指標を提供すること、他者の運転経験を基に自分を見つめ直す材料を提供することなどがある。また、客観的・俯瞰的・専門的な第三者の視点からオーバーサイトする活動として、3年に一度のインターバルで職員や作業員へのインタビューや質問票を基にした組織の安全文化診断や、4年に一度の頻度で現場を訪問して作業手順書の確認や現場観察を行い、業界の良好事例などのエクセレンスとのギャップを踏まえて必要な改善事項を伝えるピアレビュー活動がある。また、事業者の組織文化の強化や変革を支援するために、リーダーシップ等の強化トレーニングプログラムの提供、緊急時の訓練を専門的知見で助言する活動も行っている。

VI. まとめ

組織の人々の間で無意識のうちに共有される「基本的想定」は組織文化の深部に存在して認知バイアスとして働き、原子力安全のための積極的活動を抑制することがある。これを打破するためには、まず組織文化の構造を認識することが必要で、深部に潜む基本的想定が悪影響を与えていないか見つけ出し、自らの暗示を解くことが大事である。このためには、ピアプレッシャーを使って個人や組織の自己省察力を高めること、そして認知バイアスの存在を知って、その影響を冷静に分析し、個人や組織の活動を客観的・俯瞰的・専門的に外部からチェックする“オーバーサイト”機能が有効とされる。このオーバーサイト機能を有効に発揮させるためには技術的アプローチだけでなく、技術・人・組織の複雑な相互作用に注目するシステム的なアプローチも必要である。この分野は従前の自然科学のアプローチとは違い、社会科学のアプローチが必要とされ、技術者だけでなく幅広い専

門家の視点を取り入れなければならない。第三の専門家として事業者の安全向上活動を牽引する自主規制組織の価値もそこまで上げていく必要がある。

－ 参考資料 －

- 1) IAEA, 福島第一原子力発電所事故 IAEA 事務局長報告書, 2016.
- 2) Richard Paul, Linda Elder, Critical Thinking 2002, 邦訳「クリティカルシンキング」, 東洋経済新報社, 2013.
- 3) Edgar H. Schein, Organizational Culture and Leadership, 邦訳「組織文化とリーダーシップ」, 白桃書房, 2010.
- 4) Edgar H. Schein, Corporate Culture-Survival Guide, 2009, 邦訳「企業文化-ダイバーシティと文化の仕組み」白桃書房, 2016.
- 5) IAEA, Culture for Safety, 16-2483, https://www.iaea.org/sites/default/files/culture_for_safety_leaflet.pdf#search=%27Culture+for+Safety+IAEA+162483%27
- 6) IAEA, 安全基準シリーズ GSR Part 2 Leadership and Management for Safety, IAEA, 2016.
- 7) 中根千枝, タテ社会の人間関係 0105, 講談社現代新書, 1967.
- 8) 黒川 清, 規制の虜, 講談社, 2016.
- 9) IAEA International Nuclear Safety Group, INSAG- 27, Ensuring Robust National Nuclear Safety Systems-Institutional Strength in Depth, IAEA, 2017.
- 10) Amy E. Herman, Visual Intelligence-Sharpen Your Perception, Change Your Life, 邦訳「観察力を磨く」, 岡本由香子訳 早川書房, 2016.

著者紹介



久郷明秀 (くごう・あきひで)

原子力安全推進協会

(専門分野/関心分野) リスクコミュニケーション, リーダーシップ, 組織文化, 安全文化, 教育・人材育成

原子力研究(核燃および RI)に関わる法規制の動向

秋の大会での理事会セッションから

本誌 佐田 務

原子力基礎研究に不可欠な研究炉については、新規制基準対応などを経て近大炉、および京大の「KUCA」、 「KUR」の3基が再稼働した。これに対し、核燃および RI の使用施設については各大学、施設において十分な対応ができておらず、原子力分野における人材育成への懸念材料となっている。こうした状況をうけて原子力学会が開催した秋の大会の理事会セッションでは、「原子力研究に関わる法規制(核燃および RI)の動向」と題するセッションを企画。今後の大学等の研究施設の在り方と、法規制への対応について議論を深めた。

KEYWORDS: *regulations, nuclear research, nuclear fuels, radioisotopes*

I. はじめに

会合では冒頭で原子力学会の上坂充会長があいさつ。IAEA の総合的規制評価サービス (IRRS) が昨年の報告書で指摘した勧告や提言を受け、日本では原子炉等規制法と放射線障害防止法が今年4月に改正・公布されたことをまず紹介した。一方で国内では、老朽化が進んでいる核燃や RI 施設が数多くあり、この法律改正によってそれらを管理している多くの機関では、その管理体制を見直すことが迫られていると報告。原子力学会では「研究炉等の役割検討・提言分科会」を設けて、研究炉の長期停止による原子力人材育成への影響調査を行ってきたことや、新規制基準の適用のあり方について検討を進めていると説明した。さらに「大学等核燃および RI 研究施設検討・提言分科会」を立ち上げ、核燃・RI 施設の法規制に関する提言を検討していると述べた。

これらを踏まえ上坂氏は「核燃や RI 使用施設では規制に対応するためのさまざまな課題を抱えており、人材不足とあいまって、原子力分野における基礎・基盤研究の展開への影響が懸念されるとともに、次世代の人材育成が課題となっている」と指摘。この会合で規制庁を含めた関係者による講演と意見交換により、この問題に関する議論が深まることへの期待を述べた。

Regulations on Nuclear Research (Nuclear Fuels and Radioisotopes): Tsutomu Sata.

(2017年10月2日 受理)

II. 核燃に関わる法規制の動向

続いて原子力規制庁の沖田真一氏が、「核燃料物質の使用施設に関する規制」というテーマで講演。核燃料物質はその種類や数量、化学的性状、物理的形態、取扱方法など多種多様であり、それに応じた規制がなされていると説明。多量のプルトニウムを研究等のために使用している施設や、原子炉で照射された核燃料を試験、分析、研究している施設などが原子炉等規制法施行令第41条の対象になっていること、その対象となっている11事業所については保安検査や施設検査の受検義務が課せられていると説明した。

一方、今年4月には原子炉等規制法が改正・公布された。この改正のポイントについて同氏は、「一定量以上の核燃料物質の使用者に対して、廃止措置計画の認可よりも早い段階から、廃棄する核燃料物質によって汚染された物の発生量の見込み等の廃止措置実施方針を作成し公表させることを義務づけた」、「これまで規制委員会が行ってきた施設検査や溶接検査を使用前検査として事業者が行うこととし、規制委員会が事業者の保安活動全般を包括的に監視・評価して、その結果に応じた措置を講じる仕組みに転換した」と述べた。

さらに、核燃料物質の使用許可の要件に、使用施設等の保安のための業務に係る品質管理体制が基準に適合することを追加したほか、保安規定の認可時期を使用施設等の設置の工事に着手する前に前倒しして、施設の設置段階も含めて保安規定の対象とするとともに、保安規定

の認可の要件に、使用の許可・届出と整合することを追加したと述べた。

また、同氏は最近の核燃料物質使用施設に関するトラブル及び保守管理の問題を紹介。今年6月に起きた原子力機構大洗研究開発センターの燃料研究棟における作業員の汚染については、概要や推定原因を紹介した後、問題点として、放射線分解によるガス発生(エポキシ樹脂との混合)を起因として多量のPuが密封を確保されない状態でフードで作業していたこと、除染設備の機能の維持及び事故対応資機材の準備等が不十分であった等を指摘した。

さらに平成28年度の立入検査結果では、①使用・貯蔵・廃棄施設に関する注意事項の未揭示、②保管廃棄に関する表示の未揭示、③放射線業務従事者の未登録、④保安教育の未実施、⑤管理区域からの退出時における汚染検査の未実施、⑥排気口での放射性物質濃度測定の実施、⑦放射性廃棄物でない廃棄物(NR)の誤認識による間違っただ判断等の事例があったことを紹介した。

Ⅲ. RIに関わる法規制の動向

放射線障害防止関係の最近の動向については、原子力規制庁の吉岡正勝氏が講演。法令改正については、原子力規制委員会は昨年1月のIAEAによるIRRSレビュー及び「放射性物質及び関連施設に関するセキュリティ勧告」において、放射線源による緊急事態への対応や放射線源規制に関する取り組みを強化すべきとの指摘を受けたことを踏まえ、同委員会では昨年5月に「放射性同位元素使用施設等の規制に関する検討チーム(以下「RI検討チーム」という。)」を設置し、外部有識者を交えて議論を行ってきたと経緯を説明した。これらのうち法改正が必要事項については、放射線障害防止法の改正案を策定し、第193回通常国会における審議を経て成立し、改正案は平成29年4月に公布された。また、同委員会では現在、放射線障害防止法関係法令の整備に取り組んでおり、それらの内容等について次のように紹介した。

公布後3年以内で、今後施行される特定放射性同位元素(以下「特定RI」という。)に対する防護措置が法律の目的に追加された際には法律名が「放射性同位元素等の規制に関する法律」に変更される。改正のポイントは、①報告義務の強化、②廃棄に係る特例、③試験、講習等の課目の規則委任、④特定RIに対する防護措置(セキュリティ対策)の義務化、⑤法律名の変更及び法目的の追加、⑥事業者責務の取り入れである。

このうち①の報告義務については、放射線障害のおそれがあるような事象等が発生した際に、すべての事業者が同委員会への報告を法律で義務づけた。また、報告しなかった場合には罰則を設けている。

②では許可届出使用者や許可廃棄業者に対し、放射線障害防止法規制下の放射性同位元素又は汚染物(RI等)

について、原子炉等規制法の廃棄業者に廃棄の委託をしたRI等を原子炉等規制法下の核燃料物質又は汚染物とみなすことで、放射性廃棄物の規制を原子炉等規制法に一元化した。

試験や講習等の課目の規則委任を定めた③では、RI利用の新たな形態や技術の進歩等に応じ、最新の知見を試験、講習等の課目に適宜反映が行えるよう、法律の別表から規則に委任した。

防護措置(セキュリティ対策)の義務化を定めた④では、特定RIを取り扱う許可届出使用者及び許可廃棄業者を対象に、有害な放射線影響を引き起こすことを意図した、または起こし得る悪意のある行為を防止するために、特定RIの防護措置(セキュリティ対策)を法律で義務づけた。

⑤の法律名の変更及び法目的の追加では、現行法は「放射線障害の防止」の観点から規制要求を行っているが、法改正により「特定RIの防護」を法目的に追加することに伴い、法律名を「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」から「放射性同位元素等の規制に関する法律」に変更した。

⑥の事業者責務の取り入れはすべての事業者が対象で、事業者が規制要求を満足させるために最新の知見を踏まえることや事業者の実態に即して安全性を向上させることを法律上に位置づけた。

また、RI検討チームにおいて、放射線障害防止法施行規則を改正する事項として、極めて大量のRI又は大規模研究用加速器を使用する許可使用者に対して「放射線障害のおそれがある場合又は放射線障害が発生した場合」について具体的に判断するための基準を設定し、基準に対応した措置の手順を放射線障害予防規程等に定めることを要求することとした。そのために組織・資機材の整備、訓練を行うこと、消防機関や医療機関等との間で事前対策の共有など、事前対策を行っておくことも要求した。

さらに危険時の措置として、外部に正確な情報を提供し、外部からの問い合わせに対応するための方法(情報提供の内容・手順等)を放射線障害予防規程等に記載することを要求した。

一方、同氏は最近の事故・トラブル事例や放射線障害防止法に基づいて実施した立入検査結果等についても次のように紹介した。

- ・使用の方法を正確に把握していなかったため、週又は3月の使用時間を逸脱した。
- ・申請に併せて放射線施設の図面を作成し直した際に、現状の施設・各室の出入口・標識等を正確に反映できず、申請書と実態とが乖離した。
- ・永久保存すべき健康診断の記録を他の部門が管理していたため、他法令の健康診断の記録の保存期限と混同し、主任者に確認せずに誤廃棄した。

- ・非密封 RI の管理システムの不備及びシステムへの過信により、一時的に非密封 RI の貯蔵能力を超過した。
- ・従来は法の規制対象外であったが、平成 17 年の下限数量の法改正により廃棄時に規制を受ける RI (校正用線源、装備機器) について、このことを認識せず、誤廃棄した。
- ・一斉点検を数度実施しているが、湧き出し(管理下でない放射性同位元素)に関する報告が絶えない。
- ・PET 薬剤の合成装置の管理不備(リーク等)により、排気口における排気中濃度限度を超えるおそれがあった。

IV. パネル討論

パネル討論では東北大学の佐藤修彰氏が、同大の多元物質科学研究所では核燃および RI 施設を両方扱える施設を維持しており、福島事故対応を踏まえた研究や人材育成を行う必要があるが、法改正に対応した施設の維持管理とその人員確保に苦慮していると指摘した。また、全国には核燃や RI 使用施設が多数あり、それらが老朽化していること、それに伴って縮小や廃止が検討されている中で、散在する核燃および RI を全国レベルで集約的に管理する機関や施設を作ることを提案した。さらに、核燃施設と RI 施設との共存、小規模核燃の取り扱いと施設のあり方、セキュリティなど防護体制の在り方(毒劇物対応)についての検討が進むことへの期待を述べた。

京都大学の中島健氏は、同大原子炉実験所では研究炉の新規制基準への対応で品質保証対応を先行実施しているが、その対応は大きな負担となっていると報告した。また、核燃や RI 施設に関する共通課題のうち外部要因では保安活動の品証対応、検査制度の見直し(炉規法改正)、RI セキュリティへの対応、炉規法と RI 法の整合性あるいは多重規制の問題があると指摘。内部要因としては業務の増加・人員/予算の削減、炉の安全規制への対応が課題だと述べた。

一方、規制庁の沖田氏は、各地の施設に存在している使用していない核燃料物質や廃棄物を全国レベルで集約して管理する提案については、一般的に一元化した方が安全が高まるのは確かだが、受け入れ態勢や維持管理費用の問題をクリアしなければならないとした。吉岡氏は、「本件に関連して、廃棄物埋設の実施については、その実施主体である日本原子力研究開発機構が主体となって対応すべきであるが、関係省庁含めて検討が進むことを期待する」と述べた。

会場からは運搬時における防護措置について質問があり、吉岡氏は「法改正は関係事業者等へのヒアリングを踏まえて平成 28 年 11 月に取りまとめた「放射性同位元素使用施設等の規制の見直しに関する中間取りまとめ」に基づいて実施している」旨回答した。締めくくりに上坂氏が、「学会に規制庁の方が登壇し、意見を交換できたのは貴重であり、今後も議論を深めていきたい」と述べた。

V. おわりに

最後に原子力学会の岡嶋成晃副会長が「原子力学会の定款には『公衆の安全をすべてに優先させて、原子力および放射線の平和利用に関する学術および技術の進歩をはかり、その成果の活用と普及を進め、もって環境の保全と社会の発展に寄与すること』との記載がある。今日の会合では、原子力および放射線の平和利用を進めるに当たって、規制の考え方を示していただいた。これを守ることは最低限の条件であり、それを守りつつ学術及び技術の進歩をどのように進めていくかを考えることが重要である。今回は規制側と使用者側の議論のキックオフの機会であったと考えるとともに、今後も安全確保の点で学会の場を利用してお互いに知見をだしあうことができると願う」と述べて、会合を締めくくった。

*本原稿は当日の講演内容を、予稿集や当日の放映資料などで一部補足しています。

[登壇者]

- ・「開会挨拶」上坂充(東京大学大学院工学系研究科原子力専攻教授)
- ・「核燃料物質の使用施設に関する規制について」沖田真一(原子力規制委員会原子力規制庁 原子力規制部研究炉等審査部門)
- ・「放射線障害防止関係の最近の動向」吉岡正勝(同 長官官房放射線規制部門)
- ・「パネルディスカッション」上記のほかに
佐藤修彰(東北大学多元物質科学研究所教授)
中島健(京都大学原子炉実験所教授)
- ・「閉会挨拶」岡嶋成晃(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門副部門長)

[文責] 佐田 務(本誌)

[編集協力] 石島暖大(JAEA)、千葉 敏(東工大)、
春口佳子(東芝)

廃棄物ドラム缶のウラン量を短時間で精度良く 定量できる革新的アクティブ中性子非破壊測定技術 高速中性子直接問いかけ法の実用化

日本原子力研究開発機構 大図 章, 他

廃棄物ドラム缶内のウラン量を定量する従来の非破壊測定法は、内容物の種類やウランの偏在に起因する測定誤差や測定時間の長さが問題となっていた。これらの問題を解決するためにアクティブ非破壊測定法の一つである高速中性子直接問いかけ法の研究開発を実施し、同手法を用いた実廃棄物ドラム缶用のウラン定量装置を実用化することができた。本報では、本測定法を解説するとともに今後の展望について述べる。

KEYWORDS: uranium waste, 14 MeV neutron, interrogation, non-destructive assay, accountancy, measurement, decommissioning, calibration, Monte Carlo calculation

I. はじめに

1. 開発背景

原子力事業者は、日・IAEA 保障措置協定において重要な保障措置の実施手段として計量管理を行っており、それにより核物質(U, Pu 等)の量を正確に把握しなければならない。核物質に中性子等を照射して、核物質を非破壊で定量する技術の総称をアクティブ非破壊測定法(以下、「アクティブ法」と呼んでいる。アクティブ法の一つであるパルス中性子を照射するダイアウェイ時間差分析技術(DDT法: Differential Die-away Technique)は、1980年に米国のロスアラモス研究所から発表された¹⁾。当初の目的は、超ウラン元素が含まれる廃棄物ドラム缶内の超ウラン元素を非破壊かつ高感度で測定することであった。その最大の特長は、核物質から自然に発生するガンマ線や中性子線を測定することにより核物質量を定量するパッシブ非破壊測定法(以下、「パッシブ法」)に比べ、高感度で測定時間が短いという点にある。DDT法は、約100kgの砂の入った200Lドラム缶の中心に置かれた0.4mgの²³⁹Puを検出でき、分析感度は約7.4Bq/g、測定時間は約80~200秒である。

Advanced non-destructive analysis technique capable of rapidly determining uranium mass contained in waste drum with high accuracy: Akira Ohzu, Masao Komeda, Masatoshi Kureta, Yoshiaki Nakatsuka, Shinichi Nakashima.

(2017年10月4日 受理)

DDT法の発表を契機に、世界各国の研究機関でDDT法による廃棄物ドラム缶内の核分裂性物質質量測定装置の開発が始まった^{2,3)}。日本国内でも国や企業の研究機関でDDT法の実用化に向けた研究開発が精力的に実施されたが、後述する致命的な問題が判明し、廃棄物ドラム缶用の核分裂性物質測定装置は実用化に至らなかった。

2. アクティブ法とパッシブ法の測定原理

一般的なアクティブ法とパッシブ法の測定原理を概念図(図1)により説明する。まず、パッシブ法(図1(a))は、核物質が自発的に崩壊する際に放出されるガンマ線や中性子を測定することにより核物質量を定量する。ガンマ線でウランを定量する場合には²³⁸Uの子孫核種である^{234m}Paから放出される1001keVや766keVが利用される。また、中性子で定量する場合には、²³⁸Uの自発核分裂中性子や廃棄物中に共存するフッ素等との²³⁴U(α, n)反応で生じる中性子が測定される。



図1 パッシブ法とアクティブ法の測定原理

これに対してアクティブ法(図1(b))は、外部から人為的に中性子または高エネルギー X 線を照射して核物質に核反応を誘発させ、放出される中性子またはガンマ線を測定して核物質量を定量するものである。アクティブ法の一つである DDT 法では、小型の加速管内の D-T 核融合反応によって発生する高速中性子(14MeV)または小型加速器の電子ライナックによる Be(γ , n)反応のパルス高速中性子を減速し、熱中性子化させて核物質に照射する。ウランを定量する場合には、 ^{235}U の核分裂反応によって生じる誘発核分裂中性子を測定して ^{235}U 量を定量する。また、高エネルギー X 線を照射するアクティブ法では、電子ライナックを用いて発生した X 線(10MeV 以上)を照射して励起させ、誘発された光核反応(γ , n)で発生する中性子を測定する。

これらの方法で測定されるガンマ線と中性子の量は測定対象物に含まれる核物質量に比例して増加するため、単純なモデルでは各測定装置で取得される校正曲線を用いることにより核物質量を定量することができる。実際にドラム缶の内容物が詳細に把握されていて、かつ内容物が均質である場合には、校正係数を用いるだけで計量値が得られる場合もある。しかしながら、ドラム缶は厚みがあるため、金属やコンクリート等といった内容物の種類や高密度、不均一性、および核物質の偏在等が測定に大きな影響を与え、多くの場合に正確な計量値を得る事が困難であった。

3. アクティブ法とパッシブ法の長所と短所

廃棄物ドラム缶に含まれる微量なウランを測定する場合におけるアクティブ法(ここでは DDT 法とする)とパッシブ法の長所と短所を表1に示す。DDT 法は、パッシブ法に比べて中性子発生装置が必要なため設置コストが高くなるが、測定感度が高いため測定時間は1/10以下と短く、測定手法として概してパッシブ法よりも優位である。両手法とも、前項で説明したようにドラム缶

表1 アクティブ法(DDT法)とパッシブ法の比較

測定手法	感度	測定時間	コスト	内容物
パッシブ法	低	長い	低	影響大
アクティブ法	高	短い	高	影響大

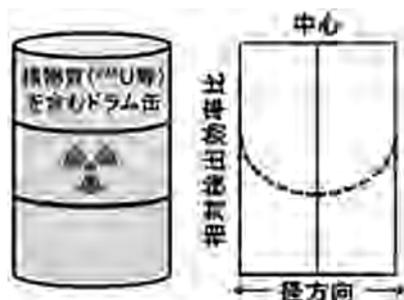


図2 検出効率の位置依存性

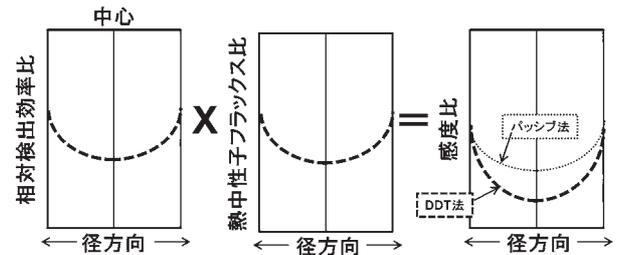


図3 アクティブ(DDT)法の測定感度の変化

内の内容物の種類や偏在に大きく影響を受ける。

図2は、中性子の検出効率がドラム缶内のウランの位置によって変化する様子を示している。これはドラム缶の内容物が均一であると仮定し、ウランの塊が存在する位置をドラム缶の中心の高さで径方向に変えた場合の依存性であり、DDT 法でもパッシブ法でもほぼ同じである。ウランから発生するガンマ線や中性子は、ドラム缶外に設置された検出器に届くまでに、缶の内容物による吸収による影響を受けるが、端にあるウランより中心にある方が内容物を通る距離が長い分だけ吸収されやすいため、図2に示すように下に凸の形状をした曲線となる。この中心と端の感度差は内容物の種類によって変化し、ガンマ線、中性子の吸収割合が高いほど感度差は大きくなる。

パッシブ法の場合には、検出効率の位置依存性がそのまま測定感度の変化を示すことになる。一方、DDT 法の検出効率の位置依存性はパッシブ法と同等であるが、DDT 法ではドラム缶の内容物に熱中性子を照射する過程が入るため、その熱中性子が内容物によって受ける影響も考慮しなければならない。照射された熱中性子はドラム缶内部に行くほど吸収を受けるため、その結果として図3のように中央部での熱中性子フラックス量は減少し、検出効率の位置依存性と同様に、下に凸の曲線となる。DDT 法の径方向の測定感度の変化は、検出効率比と熱中性子フラックス比を掛け合わせたものとなるため、パッシブ法よりも中心と端の感度差が拡大し、内容物によっては50~100倍程度になる。これが、冒頭で述べた DDT 法による廃棄物ドラム缶内の核分裂性物質測定装置の実用化に至らなかった致命的な問題である。

II. 高速中性子直接問いかけ法

1. 高速中性子直接問いかけ法の特長

前述した DDT 法の致命的な問題を解決するため、日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」)では DDT 法の改良型である高速中性子直接問いかけ法(FNDI法: Fast Neutron Direct Interrogation)を開発してきた^{4~6)}。

FNDI 法概念図を図4に示す。DDT 法では中性子発生管で発生した高速中性子を遮蔽体の内壁(グラファイト、ポリエチレン等)を利用して熱化し、ドラム缶に熱

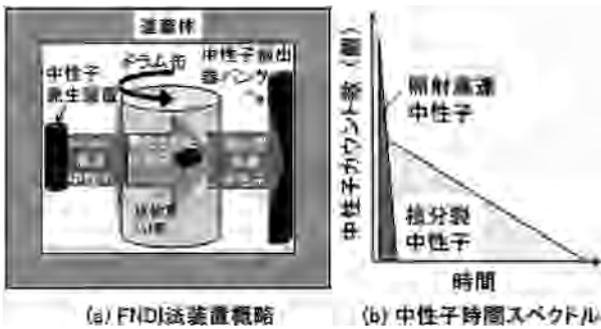


図4 FNNDI法の測定原理説明図

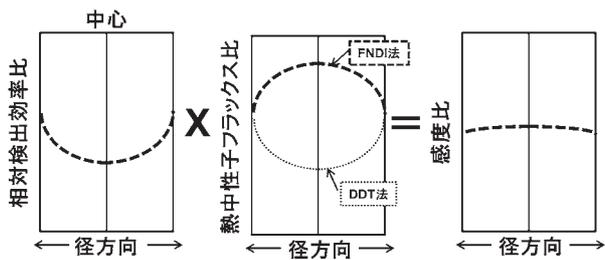


図5 FNNDI法の感度比

中性子を照射しているのに対し、FNNDI法では高速中性子を直接ドラム缶に照射する。ドラム缶内に入った高速中性子は、缶内の内容物で減速されて熱中性子となるが、中性子が中央に到達するためには、より長く飛行する必要があるため、中央に行くほど熱化が促進される。結果として、熱中性子フラックス分布は、図5に示すような上に凸の曲線となる。FNNDI法の径方向の測定感度の変化は、下に凸の形状をした検出効率比と上に凸の熱中性子フラックス比を掛け合わせたものとなるため、DDT法のものとは対照的にフラットなものとなる。このフラットな測定感度によって、核物質の偏在がもたらす測定への影響を大幅に低減することができ、実用化における問題を克服する事ができる見込みが出てきた。

図4(b)には、DDT法またはFNNDI法での中性子検出器バンクで測定される高速中性子の時間変化を示す。検出器では、最初に中性子発生管から照射された高速中性子の一部が検出され、その後、照射された高速中性子が熱中性子となってドラム缶内に滞留する間に²³⁵Uとの核分裂反応により発生した核分裂高速中性子を検出する。熱中性子がドラム缶内に滞留する時間が高速中性子の照射時間よりもはるかに長いために核分裂中性子は図のように長い時間発生する。これにより、照射高速中性子と核分裂中性子の判別が容易となる。これがダイアウェイ時間差分析法と言われる所以である。

2. 実用化への課題とその解決法

FNNDI法は、DDT法における測定感度の致命的な位置感度差の問題を解決することができたが、その実用化に際してはまだ非常に大きな問題が残されていた。それ

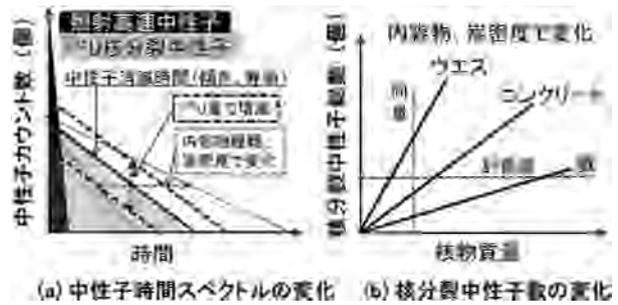


図6 核分裂中性子数の内容物依存性

は、DDT法でも問題となっていた内容物による感度差である。ドラム缶の内容物の種類、例えば金属、コンクリート、ウエス等で感度が異なるということは、内容物が異なると測定される核分裂中性子の量が核物質の量に比例しないということであり、核分裂中性子の量から核物質の量を求める事ができないということを意味する。

内容物で感度が異なる様子を、実際に測定された中性子時間スペクトルの変化として図6(a)に示す。高速中性子を照射した結果、発生する核分裂中性子の総数(図6(a)の核分裂中性子の三角形の面積に相当する部分)は、内容物が同じであれば、核物質質量に比例して増減する。このとき核分裂中性子カウント数の消滅時間(傾き)は変化せず、太い点線で示すように変化する。しかし、内容物が異なると同じ核物質質量でも細い点線のように変化し、測定される核分裂中性子の総数は同じではなくなる。

図6(b)に、内容物の種類を変えた実際の校正試験で得られた核分裂中性子の総数と核物質質量との関係を示す。図から明らかなように、感度差(単位核物質質量に対する核分裂中性子の総数)は、内容物によって大きく異なっている。また、図には示していないが、種類が同じでもその高密度によっても変化することが分かっている。原理的にはドラム缶内の内容物の種類、高密度が既知であれば、図6(b)から導き出される補正係数により核分裂性物質質量が定量できる。しかしながら、内容物が未知のドラム缶を測定する場合には、その補正係数が得られず、定量することができない。

核分裂中性子は、ドラム缶内の熱中性子による誘発核分裂で生成されるため、核分裂中性子の総数は、熱中性子の総数に比例する。つまり、内容物によって感度差が変わる原因は、ドラム缶内に発生する熱中性子の総数が内容物によって変化するためである。

内容物が金属類の場合、コンクリート、ウエス等に比べて小さい中性子減速効果と大きな吸収効果のため、結果として熱中性子の総数が少なく、かつ早く減衰する。また、内容物が同じでもその量、つまり高密度が増した場合も吸収の効果が大きくなるため、熱中性子の総数は少なくなる。ここで、消滅時間は、内容物の中性子減速・吸収能を表す指標として用いる事ができる。つま

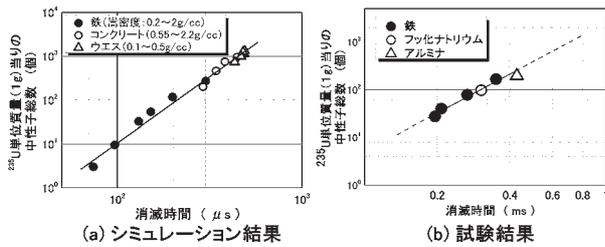


図7 FNDI法での消滅時間と核分裂中性子数の関係

り、消滅時間が同じであれば内容物を同じものと見なすことができるのではないかと考えた。この考えのもと、消滅時間から核分裂性物質量を補正する係数を導出し、定量値を得る手法の開発に着手した。様々な核分裂性物質の単位質量当りの消滅時間と核分裂中性子数の関係を、シミュレーションや試験結果から求めると、図7のようにほぼ直線の関係となることを見出した。このことは、内容物によらずに消滅時間のみを使って補正係数を得ることができることを示している。この補正法の確立によって、消滅時間から内容物が未知の廃棄物ドラム缶に含まれる核分裂性物質量を定量することが可能となった⁶⁻⁸⁾。

III. FNDI法の実用化

1. ウラン実廃棄物ドラム缶への適用

開発したFNDI法の実用化をめざして、原子力機構・人形峠環境技術センター(以下、「人形峠」)内にウラン廃棄物の計量管理用測定装置(JAWAS-N: JAEA Active Waste Assay System-Ningyo)を構築した(図8)。

従来のDDT装置では、高速中性子を熱化するため必要があるため中性子減速材としてグラファイトを用い、中性子の遮蔽体として高密度ポリエチレン(HPDE)等を用いるなど高価な材料が多量に使用されていた。FNDI法では高速中性子をそのまま用いるため、中性子減速材は必要ない。中性子遮蔽材は必要であるが、JAWAS-Nでは



図8 JAWAS-Nの外観写真



図9 JAWAS-Nの測定空間

低コスト化を図るためにコンクリートブロックを用いた。その結果、装置の具体的な仕様(装置体系、測定システム等)は参考文献⁷⁾に譲るが、従来のDDT法より約10分の1のコストで構築することができた。外寸は、縦200cm、横200cm、高さ約220cmであり、側面及び上面のコンクリートブロックはそれぞれ厚さ50cm、40cmである。図9に示すドラム缶を設置する内部空間は、縦100cm、横100cm、高さ約175cmで、内面には熱中性子を吸収するための厚さ3mmのB₄Cラバーシートが貼り付けられている。また、ドラム缶回転台、中性子発生管、イールドモニター用の³Heガス中性子検出器、及び長さ100cm、直径2.54cmの³Heガス中性子検出器が14本組み込まれた中性子検出器バンク(外寸: 162.2 × 51.5 × 7.7cm)が設置されている。

中性子発生管(直径10cm、長さ約43cm)は、100Hzで動作し、時間幅約10 μ sのD-T反応による14MeVのパルス中性子を1パルスあたり約10⁶個発生させることができる。典型的な測定時間は、10分間である。中性子検出器バンクは、核分裂高速中性子と熱中性子を弁別測定できるように外側に厚さ0.3cmのカドミウムシートが設置され、内側にポリエチレンが配置されている。また、その中性子検出器には、中性子を照射した直後の短時間で発生する夥しい数の高速中性子を損失無く計数するため、原子力機構が独自に開発した高計数率増幅器が装備されている。

ドラム缶は、中性子発生管と検出器バンクの中間にある回転台の上に設置され、ドラム缶を回転(2.5rpm)することにより径方向の内容物及びウランの密度分布を平均化することができる。また、ドラム缶の周囲には、照射する高速中性子をドラム缶内での熱化を適度に促進させるため、図8の測定装置の内部に見えるポリエチレン製のモデレータ(白い円筒体部分、厚さ2cm)をドラム缶の周囲に取付けている。

完成したJAWAS-N装置を用いて、図10に示すよう

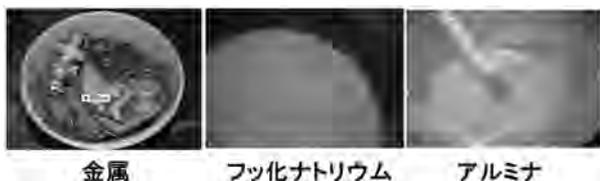


図10 人形峠の実廃棄物ドラム缶の内容物例

な内容物のウラン実廃棄物1,800本余りのドラム缶の測定を行い、数年でそのウラン量を定量することができた。検出限界は、内容物が金属系の場合において、天然ウランとして約10g程度(誤差は±20%程度)である。内容物が金属以外のものであれば、検出限界、誤差ともに2倍以上良い結果が得られている。

2. IAEA への実証試験

JAWAS-N が保障措置の査察(検認)活動のための測定装置として適切なものであるかどうかを検証するためにIAEA に対してデモンストレーション試験を実施した。IAEA 側が査察に用いている既存の装置(CANBERRA 社製:ISOCS)を準備し、JAWAS-N と標準試料を用いて比較試験を行った。その結果、IAEA が満足する良好な測定結果が得られたため、PIV 検査でJAWAS-N で測定したデータが査察検認値として採用された。また、人形峠において計量管理用の測定装置として運用を開始することができた。

IV. 今後の展望

人形峠に保管されているウラン実廃棄物ドラム缶(図10)の測定が、JAWAS-N 装置を用いることでほぼ完了することとなったため、より複雑な内容物を含む廃棄物ドラム缶への適用試験を実施している。これまでの測定で、単一の種類の廃棄物の測定は十分正確な値が得られることを確認しているが、複数の種類の内容物が含まれる場合や、水分や塩化ビニール等の中性子吸収材が含まれる場合において、それらが定量値に与える影響について調査している。

例えば、水分が珪藻土の内容物に含まれる場合、少量のときには図6(a)に示す時間スペクトルは殆ど変化しないが、数wt%以上では発生する核分裂中性子数と消滅時間の変化が定量値に与える影響を無視できなくなる。これまでのシミュレーション及び試験結果では、水分量が30wt%付近までは核分裂中性子数が10%程度増加して消滅時間は数%程度増加すること、水分量が30wt%を越えると核分裂中性子数と消滅時間は共に大きく減少に転じることが確認されている。この調査に基づき、このような場合での補正法やドラム缶内の水分量

を予測する手法を開発している。また、中性子吸収材がFNDI 法に与える影響を明らかにしつつ、どのような内容物でもFNDI 法を適用できるように技術開発を進めていく予定である。

FNDI 法は、これまでの研究開発により核物質の偏在や内容物の影響を受け難く、核物質に対して高い感度を持ち、短時間測定が可能であるという特長を有することからも計量管理分野以外のクリアランス検認、核セキュリティ等への応用研究も実施していきたい。

— 参考資料 —

- 1) W. E. Kunz, et al, Nuclear Materials management, 9, 131-137 (1980).
- 2) J. R. Dherebey, et al, "Determination of Alpha Activity and Fissile Mass Content in Solid Waste by Systems using Neutron Interrogation", EUR-12890, 327, 97 (1990).
- 3) A. -C. Raoux, et al, Nucl. Inst. Meth. B 207, 186-194 (2003).
- 4) 春山満夫, 他, 日本原子力学会誌, 43[4], 397-404 (2001).
- 5) M. Haruyama, et al, J. Nucl. Sci. Technol. 45, 432-440 (2008).
- 6) 春山満夫, 他, J. the RANDEC, 37, 17-24 (2008).
- 7) 大図章, 他, 日本原子力学会和文論文誌, 15[2], 115-127 (2016).
- 8) M. Komeda, et al, "Analytical Study on Uranium Measurement in Uranium Waste Drums by the Fast Neutron Direct Interrogation Method", Proceedings of INMM55th Annual Meeting (CD-ROM) (2014).

著者紹介

大図 章 (おおず・あきら)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)レーザー工学, プラズマ工学, 光計測, 放射線計測

米田政夫 (こめだ・まさお)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)非破壊測定技術, 中性子計測, 放射線利用, 原子炉物理

呉田昌俊 (くれた・まさとし)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)原子力工学, 熱流動工学, 中性子ビジュアルセンシング, 非破壊測定技術, 可視化技術

中塚嘉明 (なかつか・よしあき)

日本原子力研究開発機構 人形峠環境技術センター
(専門分野/関心分野)放射線計測

中島伸一 (なかしま・しんいち)

日本原子力研究開発機構 人形峠環境技術センター
(専門分野/関心分野)保障措置, 核物質防護, 放射線計測

途上国は原子力に傾斜—新規導入国時代へ

日本原子力産業協会 小林 雅治

21世紀に入って原子力カルネッサンスが到来するかと期待されたが、2011年の東京電力・福島第一原子力発電所の事故で、世界の原子力開発には一定のブレーキがかかった。脱原子力国として、ドイツやベルギーが挙げられるが、福島事故以前からの政策を加速させたと見るべきだろう。その他の多くの国では、地球環境問題やエネルギー安全保障の面から、原子力推進の姿勢を続けている。リーマンショック以来の経済停滞や安全対策による原子力発電所の建設費高騰などで、予想よりも原子力開発のペースが鈍っているのも事実である。福島事故後、アラブ首長国連邦(UAE)とベラルーシでは、両国にとって初めての原子力発電所の建設が始まり、近く原子力発電国の仲間入りを果たす。本稿では、世界動向を俯瞰した上で、開発途上国を中心に、本シリーズの第1~4回で取上げなかった幾つかの国の原子力開発動向を紹介する。

KEYWORDS: Fukushima Daiichi, Nuclear Power, Nuclear Energy Policy, Developing Countries, Emerging Countries, Climate Change, Energy Security

I. 総論：新規導入国時代へ

図1は、最近約10年間の世界の原子力発電所の新規着工基数を示す。福島事故発生前年の2010年までは、新規着工基数は増加傾向を示し、所謂「原子力カルネッサンス」到来を思わせた。しかし、福島事故後の新規着工基数は一進一退を繰り返している。

ついでに、これまでの世界の原子力発電開発の歴史を俯瞰してみる(表1参照)。1950年代に、原子力開発がスタートし、1973年、78年の二度にわたる石油危機で、原子力開発は急成長を遂げた。しかし、1979年の米国でのTMI事故、1986年の旧ソ連でのチェルノブイリ事故で、原子力開発は「冬の時代」に入り停滞した。

21世紀を迎えると、2001年の米国ブッシュ大統領の原子力・エネルギー政策の発表や2005年のフィンランドでの久方ぶりの新規原子力着工などの動きを背景に、前述のように「原子力カルネッサンス」到来と喧伝された。

表1に示すように、2000年代(の10年間)は新規の原子力発電開始国はゼロだったが、2010年代に入ると、2013年にイラン初のブシェール1号機が営業運転を開始し、今後、アラブ首長国連邦(UAE)とベラルーシの2ヶ国が原子力発電国に仲間入りする予定である。2020

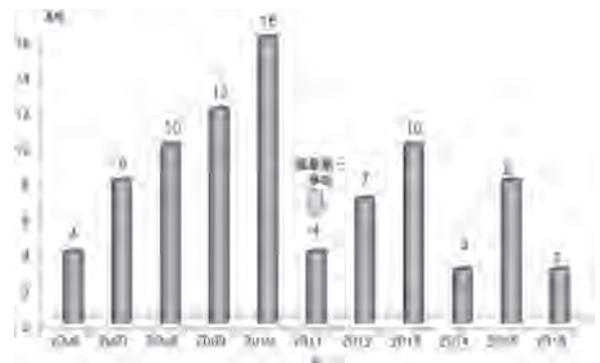


図1 世界の原子力発電所の着工基数

出典：IAEA・PRIS

年代は、さらに数ヶ国が新たに加わる見込みであり、「新規導入国時代」と言えそうである。

今後の原子力発電規模の見通しについて、表2に国際原子力機関(IAEA)の予測値を示す。2015年の世界全体の原子力規模3.8億kWは、低予測ではほとんど伸びず2030年に3.9億kW(1.02倍)だが、高予測では5.98億kW(1.56倍)に拡大する。地域別に見た場合、北米と西欧では、伸びは鈍化しており、低予測では減少する可能性がある。それに比べて、旧ソ連・中東欧、中東・南アジア、極東、中南米などでは、原子力発電は増加を示している。

IAEAは、天然ガスの低価格、補助金による再生可能エネルギーの拡大、さらに、いまだ継続中の経済危機や、安全対策の強化などによる建設期間の長期化や建設コスト

Nuclear Development Status in the World (5) ; Developing Countries Inclined to Nuclear Energy - Advent of Newcomer Countries Age : Masaharu Kobayashi.

(2017年6月23日 受理)

表1 世界の原子力発電開発の推移

	年代区分	世界の主な出来事	原子力発電開始国
草創期 ↓	1950年代 (5基/年)	1953 米アイゼンハワー大統領, 「アトムズフォーピース」演説 1954 ソ連, 世界最初のオプニンスク原発(6000kW)運転開始 1956 英国, コールダーホール・ガス炉(6万kW)運転開始 1957 国際原子力機関(IAEA)発足	《3ヶ国》露(1954), 英(1956) 米(1957)
成長期 ↓	1960年代 (14基/年)	1964 中国, 初の核実験 1965 日本, 東海ガス炉(16.6万kW)発電開始 1968 国連, 核不拡散条約(NPT)支持決議可決(1970年発効)	《9ヶ国》仏(1964), 伊(1964), 日(1966), 独(1967), 加(1968), 印(同), 蘭(同), 西(同), スイス(同)
成長促進期 ↓	1970年代 (31基/年)	1973 第4次中東戦争勃発, 第1次石油危機 1974 インド, 核実験 1974 国際エネルギー機関(IEA)発足 1977 米カーター大統領, 再処理凍結・高速炉開発延期決定 1977-80 国際核燃料サイクル評価(INFCE) 1978 第2次石油危機 1979 米スリーマイルアイランド(TMI)原発事故	《12ヶ国・地域》パキスタン(1972), スロバキア(同), スウェーデン(同), カザフスタン(1973), アルゼンチン(1974), ブルガリア(同), ベルギー(1975), アルメニア(1977), フィンランド(同), 韓(1978), 台(1978), ウクライナ(同)
減速期 ↓	1980年代 (14基/年)	1980 スウェーデン, 国民投票で2010年迄の原発廃止方針 1986 ソ連チェルノブイリ原発事故 1987 核物質防護条約, 発効 1989 世界原子力発電事業者協会(WANO), 発足	《6ヶ国》ハンガリー(1983), リトアニア(同), スロベニア(同), 南ア(1984), ブラジル(1985), チェコ(同)
停滞期 ↓	1990年代 (3基/年)	1990-91 東西ドイツ統一, ソ連崩壊 1992 国連環境開発会議, 気候変動枠組み条約採択 1996 原子力安全条約, 発効 1997 COP3, 京都議定書採択	《3ヶ国》メキシコ(1990), 中(1994), ルーマニア(1996)
(原子力カルネッサンス?) ↓	2000年代 (5基/年)	2001 米ブッシュ大統領, 原発導入含む国家エネルギー政策発表 2001 ドイツ政府と電力, 脱原子力取り決めに署名 2005 フィンランド, 西側世界として約20年ぶりの新規着工 2006 東芝, WH買収。日立とGE, 合弁会社設立, など 2008 リーマンショック(世界経済危機) 2009 アラブ首長国連邦(UAE), 同国初の原発4基を韓国に発注	—
新規導入国時代 ↓	2010年代 (7基/年)	2010 ベトナム, 原発2基建設者に日本選択(2016年計画中止) 2011 東電・福島第一原子力発電所事故 2013 ベラルーシ, 同国初の原発建設開始 2015 COP21, 「パリ協定」採択(2016年11月発効)	《3ヶ国見込み》イラン(2013), UAE(2018予定), ベラルーシ(2018予定)
	2020年代		《数ヶ国見込み》トルコ, ヨルダン, バングラデシュ, リトアニア, ポーランド, サウジアラビアなど

(備考)年代区分の数値は, 原子力発電所の年間平均の新規着工基数を示す(出典: IAEA・PRIS)

原子力発電開始国とは, 当該年代区分において同国最初の原子力発電所が営業運転を開始したことを示す

表2 世界の原子力発電規模予測

単位: 100万kW

地域	2015年	2030年		2050年	
		低予測	高予測	低予測	高予測
北米	112.7	92.5	126.0	60	130
中南米	5.0	7.9	12.5	11	35
西欧	112.1	77.0	111.8	48	118
旧ソ連・中東欧	50.5	49.9	75.7	75	113
アフリカ	1.9	2.9	8.9	8	23
中東・南アジア	6.9	27.7	47.7	55	116
東南アジア・太平洋	0.0	0.0	4.0	5	12
極東	93.8	132.2	215.5	154	351
世界合計	382.9	390.2	598.2	417	898

出典: IAEA, 20016年

トの増加が, 開発の遅れにつながっていると指摘している。IAEAは, 長期的には, 開発途上国における人口増加や電力需要の増加に加えて, 気候変動対策や大気汚染問題, エネルギーセキュリティなどの観点から, エネルギー・ミックスの中で原子力が重要な役割を果たすと強調している。

今後, 開発途上国等の新規導入国での原子力開発が注目され, それらの国における原子力人材育成や原子力インフラの整備が重要になるとともに, 原子力輸出者の役割も重要になって来る。

参考までに, 世界各国の原子力発電所の運転・建設・計画状況を表3に示す。本シリーズで既に紹介した国以外の幾つかの国の動向を以下に示す。

表3 世界各国・地域の原子力発電開発状況

地域	国・地域名	2016年の原子力発電量とシェア		運転中の原子力発電所		建設中の原子力発電所		計画中の原子力発電所		検討中の原子力発電所	
		億 kWh	%	基	万 kWe	基	万 kWe	基	万 kWe	基	万 kWe
北米	米国(1)	8,053	19.7	99	9,967.8	4	500.0	16	560.0	19	2,850.0
	カナダ(7)	974	15.6	19	1,355.3	0	0	2	150.0	0	0
中南米	ブラジル(20)	159	2.9	2	189.6	1	140.5	0	0	4	400.0
	メキシコ(25)	103	6.2	2	160.0	0	0	0	0	3	300.0
	アルゼンチン(24)	77	5.6	3	162.7	1	2.7	2	195.0	2	130.0
	チリ	0	0	0	0	0	0	0	0	4	440.0
西欧	フランス(2)	3,840	72.3	58	6,313.0	1	175.0	0	0	0	0
	ドイツ(9)	801	13.1	8	1,072.8	0	0	0	0	0	0
	英国(10)	651	20.4	15	888.3	0	0	11	1,560.0	2	230.0
	スウェーデン(11)	606	40.0	9	884.9	0	0	0	0	0	0
	スペイン(12)	561	21.4	7	712.1	0	0	0	0	0	0
	ベルギー(13)	413	51.7	7	594.3	0	0	0	0	0	0
	スイス(17)	203	34.3	5	333.3	0	0	0	0	3	400.0
	フィンランド(18)	223	33.7	4	276.4	1	170.0	1	125.0	0	0
	オランダ(30)	38	3.4	1	48.5	0	0	0	0	0	0
	トルコ	0	0	0	0	0	0	4	480.0	8	950.0
	イタリア	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
旧ソ連・中東欧	ロシア連邦(5)	1,797	17.1	35	2,686.5	7	590.4	26	2,839.0	22	2,100.0
	ウクライナ(8)	810	52.3	15	1,310.7	0	0	2	190.0	11	1,200.0
	チェコ共和国(16)	227	29.4	6	390.4	0	0	2	240.0	1	120.0
	ブルガリア(19)	158	35.0	2	192.6	0	0	0	0	1	120.0
	ハンガリー(21)	152	51.3	4	188.9	0	0	2	240.0	0	0
	スロバキア(23)	137	54.1	4	181.6	2	94.2	0	0	1	120.0
	ルーマニア(26)	104	17.1	2	131.0	0	0	2	144.0	0	0
	スロベニア(29)	54	35.2	1	69.6	0	0	0	0	1	100.0
	アルメニア(31)	22	31.4	1	37.6	0	0	1	106.0	0	0
	ベラルーシ	0	0	0	0	2	238.8	0	0	2	240.0
	ポーランド	0	0	0	0	0	0	6	600.0	0	0
	リトアニア	0	0	0	0	0	0	0	0	2	270.0
	カザフスタン	0	0	0	0	0	0	0	0	3	180.0
アフリカ	南アフリカ(22)	152	6.6	2	183.0	0	0	0	0	8	960.0
	エジプト	0	0	0	0	0	0	2	240.0	2	240.0
中東・南アジア	インド(14)	350	3.4	22	621.9	5	330.0	20	1,830.0	44	5,100.0
	パキスタン(27)	51	4.4	4	104.0	3	266.2	0	0	0	0
	イラン(28)	59	2.1	1	91.5	0	0	4	220.0	7	630.0
	UAE	0	0	0	0	4	560.0	0	0	10	1,440.0
	バングラデシュ	0	0	0	0	0	0	2	240.0	0	0
	ヨルダン	0	0	0	0	0	0	2	200.0	0	0
	サウジアラビア	0	0	0	0	0	0	0	0	16	1,700.0
東南アジア・太平洋	イスラエル	0	0	0	0	0	0	0	0	1	120.0
	インドネシア	0	0	0	0	0	0	1	3.0	4	400.0
	タイ	0	0	0	0	0	0	0	0	5	500.0
極東	マレーシア	0	0	0	0	0	0	0	0	2	200.0
	日本(3)	175	2.2	42	3,995.2	2	275.6	9	1,294.7	3	414.5
	中国(4)	2,105	3.6	36	3,263.7	21	2,308.6	41	4,685.0	174	20,000.0
	韓国(6)	1,542	30.3	25	2,308.1	3	420.0	8	1,160.0	0	0
	台湾(15)	351	16.3	6	492.7	2	270.0	0	0	0	0
世界合計	ベトナム	0	0	0	0	0	0	4	480.0	6	710.0
	北朝鮮	0	0	0	0	0	0	0	0	1	95.0
世界合計	49ヶ国・地域	24,900	11.5	447	39,208.0	59	6,344.0	170	17,781.7	372	42,659.5

出典：WNA データ(2017年5月2日現在)をもとに作成。世界の地域分類はIAEAの世界原発規模予測分類に準拠。

国・地域欄の()表示は、運転中原子力発電規模の世界順位を示す。

運転中=送電開始を含む、建設中=原子炉建屋への初コンクリート打設、又は大規模改修工事中

計画中=承認、投資確認、8~10年以内に運転開始見込み、検討中=個別プログラム、サイト提案、15年以内に運転見込み。

太字は原子力発電国(原子力発電所が運転している国、現在31カ国・地域)。台湾の原子力発電量データのみ2015年値。

細字は新規導入国(運転中の原子力発電所を持たない国、表には主南国として18カ国列挙)。

発電規模(kWe)については、運転中はネット出力、その他はグロス出力を示す。

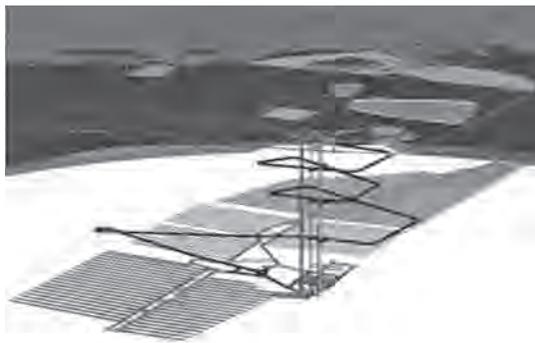


図2 オルキルト最終処分場(想像図)

II. 原子力発電国

1. フィンランド：世界初の最終処分場建設

フィンランドでは現在、ロビーサ1,2号機とオルキルト1,2号機の計4基が運転中で、ほぼ90%台の平均設備利用率を維持するなど、高稼働実績を誇っている。

2005年、仏アレバを主契約者として、オルキルト3号機の建設が始まった。同機は、EPR(欧州加圧水型炉)という新型軽水炉の初号機であり、西側世界では約20年ぶりの建設ということで、工期の大幅遅延、建設費の高騰(当初予定の32億ユーロが85億ユーロに高騰)を招き、現在のアレバの経営再建(再編)の大きな要因になった。それでも、同機の着工は、ある意味で原子力カルネッサンスの先触れとなった。因みに当初予定の2009年の運転開始は、2018年末にずれ込んでいる。

フィンランドでは、もう1基の建設計画が進行中である。フェンノボイマ社が計画しているハンヒキビ1号機で、2013年にロシア炉導入で供給契約を締結した。2018年着工、2024年運転開始予定である。ロシアはフェンノボイマ社の株を34%所有することで合意している。

2015年12月、世界で初めて高レベル廃棄物の最終処分場の建設が始まった。フィンランドは直接処分方式を採用しているため、高レベル廃棄物は使用済燃料を指す。処分場はオルキルト地域に設置される(図2)。

2. ドイツ：福島事故前の脱原子力路線に回帰

福島第一事故によって、ドイツが脱原子力を決めたと言われるが、必ずしも正確ではない。

ドイツは、1986年の旧ソ連のチェルノブイリ事故の影響を受けて、原子力反対の傾向が強まり、1998年の社会民主党(SPD)と緑の党による初の左派連立政権発足で、脱原子力政策が明確に表面化した。電力会社との交渉の末、原子力発電所の運転期間を32年とする脱原子力法が2002年4月に施行された。

その後、原子力に理解のあるキリスト教民主・社会同盟(CDU/CSU)が政権を握り、メルケル政権下で2010年11月、原発の運転期間を平均12年延長する原子力法改

正法案を成立させた。これにより、運転期間は44年に延びた。

ところが、その数か月後の2011年3月に福島第一事故が発生、原子力反対の機運が再び盛り上がりとともに、州議会選挙で政権与党が大敗北を喫し、メルケル政権としては、政治的に脱原子力に舵を切り戻さざるを得なくなった。脱原子力法が可決成立し同年8月施行された。同年3月に停止させた8基はそのまま廃炉にし、残り9基は2022年迄に閉鎖されることになった。

2010年の運転期間延長との抱き合わせで導入された核燃料税を巡る訴訟で、憲法裁判所が今年6月違憲判決を下し、これ迄の納税分の返還を命じた。2011年に運転延長が取り消されたため、電力会社は、核燃料税の納付義務はないとして、提訴していた。

ドイツでは、原子力の廃止による電力供給の穴埋めに補助金政策による再生可能エネルギーの導入が急ピッチで進んでおり、ドイツの電力料金は他の欧州諸国に比べて割高になっている。

3. スイス：繰り返される国民投票

スイスは国民投票が制度化されているため、原子力推進の賛否を巡っても度々、国民投票が繰り返されてきた。

原子炉5基がスイスの全電力の34%、水力が60%を供給しており、ゼロ・カーボン電源がほぼ全体を占めている。原子力の歴史も古く最初の原子炉ベツナウ1号機は1969年に発電開始した(既に48年間運転!)

スイスの原子力発電所に法的運転期限がなく、技術的に可能な限り運転を続けることができる。しかし、福島第一事故後の2011年5月、政府は原発の運転寿命を50年として、段階的に原子炉を廃止する方針を決定した。一番新しいライブシュタット原発は1984年の運転開始なので、2034年迄に全5基が廃止されることになる。

2014年5月にミュレバルク原発の即時停止を問うベルン州の住民投票が行われたが、反対63.3%、賛成36.7%で否決された。

原発の運転期間50年について、野党の緑の党が、5年短縮して45年にする案の是非を問う国民投票を提起し、2016年11月実施された。反対54.2%、賛成45.8%で同案は否決された。

今年5月21日に新たな国民投票が実施された。脱原子力の国民投票と言われているが、原発の運転期間50年、原発の新設禁止という内容は、これまでの政策と変更はない。今回の国民投票は、従来よりも再生可能エネルギーの拡大やエネルギー消費量の削減などを強化するという改正エネルギー政策法の賛否を問うもので、コスト増加の負担が主要論点となった。58.2%の賛成で、改正エネルギー法は承認された。



図3 チェルノブイリ4号機を覆う新シェルター

4. ウクライナ：原子力5割依存路線を堅持

1986年に史上最悪の事故が起きた直後は、さすがに原子力に否定的な気運が高まったが、電力不足への懸念から、原子力開発が継続した。まず、事故を起こしていないチェルノブイリ原発1～3号機は、1986年後も数～十数年運転を続けた。更に、1986年から現在までに新規原発、計9基が運転開始した。

現在、ウクライナではロシア製の原子炉(VVER)が15基運転中で、総発電量の約50%を占めている。政府は2006年策定の「2030年迄のエネルギー戦略」で掲げた原子力発電シェア約5割維持という基本方針を堅持している。

2014年3月のロシアによるクリミア併合を契機に、脱ロシア化が加速している。原発の安全性・運転保守技術の向上などで欧米企業との協力が進んでいる。原発の核燃料は従来、ロシア製が100%を占めていたが、2015、16年には、サウスウクライナとザポロジエの両原発向けに、WH製の核燃料が納品された。建設が中断されたままのフメルニツキ原発3,4号機についても、ロシア離れの影響で、2016年9月、韓国水力・原子力発電会社(KHNP)の協力で完成させる方向で覚書が署名された。

2016年11月、事故を起こしたチェルノブイリ4号機の老朽化した石棺を覆う新シェルターの設置が完了した(図3)。総工費15億ユーロで、4号機に残存する放射性物質を100年間安全に閉じ込めることができる巨大なアーチ型構造物である。同4号機では、1986年の事故発生直後に石棺を建造して封じ込めたが、急場凌ぎでつくったため、後年には崩壊と放射能漏れの危険が生じていた。

5. アルゼンチン：SMR炉「カレム25」建設中

アトーチャ2号機が2014年6月に初発電、2016年5月に商業発電を開始し、現在アルゼンチンでは3基(いずれも重水炉)の原子炉が全電力の約1割を供給している。

同国4基目としては、2014年7月のロシアとの原子力協定締結時、ロシア製炉(VVER)の導入を考えていた。しかし、その後、中国が巻き返し、2015年11月、アルゼンチン国営原子力発電会社(NA-SA)は、4基目、5基目

の建設協定を中国と締結した。ロシア製炉は6基目として導入することに落ち着いた。

今年5月17日、習近平国家主席とマクリ大統領の首脳会談の際に、2基の具体的な建設契約が締結された。4基目はアトーチャ3号機としてCANDU炉を採用、2018年に着工。5基目は華龍一号炉を採用し、サイトは未発表であるが、2020年着工の予定である。これらの必要資金の85%を中国側が支援する。

アルゼンチンは、自前の原子力技術を保有しており、4基目のCANDU炉建設でも国内企業がかなり関与する見込みである。アルゼンチン国家原子力委員会が独自に開発している小型モジュール炉(SMR)の原型炉「カレム25」(電気出力2.5万kW)が2014年2月、本格着工した。カレム25は発電だけでなく海水淡水化にも有効で、アルゼンチンは将来的には、国内利用だけでなく輸出を意図している。

また、2015年11月にはリオネグロ州ピルカニエウ複合施設で、ガス拡散法によるウラン濃縮工場の開所式が行われたと伝えられている。

6. 台湾：アジア初の脱原子力法可決

台湾は、恐らく福島第一事故の影響をもろに受けた。原子力反対運動が高揚する中で、台湾政府は、2011年11月、運転中の3原発6基について、寿命40年として、順次廃炉にすることを決定、更に2014年4月、建設中の龍門原発2基(ほぼ完成)については、運転開始計画の先送りを決定した。

2016年1月、台湾総統選挙で、野党であった民進党の蔡英文主席が圧勝し、同日の立法院(議会)選挙でも民進党が圧勝した。民進党はかねてから「非核家園」(原子力発電のないふるさと)政策を標榜してきた。

新政権発足に伴い、脱原子力のエネルギー政策が立案され、2017年1月、2025年迄の非核家園の実現を定めた電気事業法改正案が可決された。アジアでは初の脱原子力法である。

建設中の龍門原発は、日本以外で建設された初の改良型沸騰水型炉(ABWR)であり、原子炉压力容器などの主要機器は日本企業が供給している。運転しないまま、廃炉になる見込みである。

台湾の原子力発電シェアは16.3%(2015年実績)。電気事業法改正により、代替となる太陽光や風力などの再生可能エネルギーの発電量シェアを現在の4%から2025年に25%に引き上げるとしているが、実現できるかどうか焦点となる。

III. 新規導入国

1. アラブ首長国連邦(UAE)：2018年に運開

2009年12月、アラブ首長国原子力公社(ENEC)は、国際競争入札の結果、韓国電力主導の韓国製APR1400、

表4 バラカ原子力発電所運転開始予定

	炉型	万 kW	建設開始	運転開始
バラカ 1	APR1400	140	2012年7月	2018年
バラカ 2	APR1400	140	2013年5月	2018年
バラカ 3	APR1400	140	2014年9月	2019年
バラカ 4	APR1400	140	2015年9月	2020年



図4 バラカ原子力発電所外観

4基の発注を決めた。

バラカ原発1号機は2012年7月に着工し、その後1年毎に2, 3, 4号機が着工した。当初、1号機は2017年運開予定であったが、慎重を期して1年ずれ込んでいる(表4, 図4)。

2016年5月にはENECが82%、韓国電力が18%出資して、バラカ原発の運転・保守担当の会社としてNAWAH エナジーが設立された。2016年7月には、ENECと韓国水力・原子力発電会社(KHNP)が運転支援サービス契約を締結、2030年迄、KHNPが400人規模の有資格人材を派遣し、NAWAH エナジーを支援する。

2020年迄にバラカ原発の4基が全て運転すると、UAE全体の電力の25%を供給することになる。UAEは、ガス火力を原子力で置き換えることにしており、一部の原子力による電気は近隣諸国にも輸出する意向である。

2. ベラルーシ：2019年に運開予定

ベラルーシは、エネルギー需要の多くを、ロシアからのガス輸入に依存(その大半は発電に利用)しており、ガス依存の低減策として原子力の導入を検討してきた。

福島第一事故が起きた2011年3月、ロシアとの間で原子力建設の政府間協定が署名され、同年10月にはロシアのアトムストロイエクスポート(ASE)との間で原子炉(AES-2006)2基を建設するターンキー契約が締結された。ロシアが建設費の90%を融資する。

オストロベツ1,2号機の建設は、2013年11月、2014年5月に夫々始まった。2016年7月、1号機の原子炉圧力容器の移動作業中に、地上への落下事故が起きた。ロシア側の検査では損傷がなく、そのまま利用できることであったが、ベラルーシ政府は圧力容器の取替を要



図5 オストロベツ1号機の原子炉容器据付

求し、ロシア側は、パブリックアクセプタンスの観点を強調して2号機用の圧力容器で代用することにした。1号機への圧力容器の据え付けは今年4月1日に完了した(図5)。建設は半年位遅れているが、大体スケジュール通りで、1号機は2019年末、2号機は2020年後半に運転開始予定である。

3. バングラデシュ：年内に本格着工

バングラデシュでは、国民の30%が電気のない生活を送っており、電気が利用できてもしばしば停電に遭遇している。

政府の2010年電力基本計画では、2021年迄の電源開発目標を2,400万kWとし、その内訳は、国内石炭30%、輸入石炭20%、ガス25%、液体燃料5%、原子力・再生可能エネルギー20%としていた。

原発計画の提案は1961年に遡り、1963年には建設用地としてルプールサイトが確保された。当初は中小規模の原子炉が検討され、中国や韓国も輸出を働きかけていたが、最終的にはロシア製炉の建設が決まった。

2011年2月、バングラデシュ原子力委員会とロシアの国営原子力企業ロスアトムとの間で、第3世代VVER炉(AES-2006)、2基建設で合意。1号機は2023年、2号機は2024年の運転開始を目指している。建設費総額は126億5,000万ドルで、ロシアはそのうちの90%を融資する。

2013年秋からサイト準備工事が始まっており、今年秋には本格着工の見込みである。

4. トルコ：3プロジェクト(計12基)が進行中

トルコは建国100周年の2023年に世界10位の経済大国入りを目指し、その一環として原子力発電の導入を進めている。

政府は2030年の総発電設備容量を1億5,000万kWと予測し、そのうち1,000万~1,500万kWを原子力で賄いたいと考えている。

第1~第3プロジェクトが進行中である。

第1プロジェクトは、地中海沿岸のアックユにロシア製VVER炉(AES-2006)を4基建設する計画で、2010年にロシアが受注した。世界初のBOO(建設・所有・運転)

方式の契約である。2015年4月に起工式が行われた。同年11月、シリアを巡る対立から、トルコによるロシア軍機の撃墜事件が起き、建設の中止又は遅延の懸念が出ていたが、その後、両国の和解が成立し、工事計画は再開となった。営業運転開始は、1号機と2号機が2023年、3号機2024年、4号機2025年である。

第2プロジェクトは、黒海沿岸のシノップに三菱重工業と仏アレバの合弁アトメア社製のATMEA1炉を4基建設する計画で、2013年5月の日本・トルコ首脳会談の際に合意された。両国の政府間協定(IGA)と施設国政府契約(HGA)は、2015年4月、トルコ国会で承認された。1,2号機は2023年、2024年の運転開始を目指している。

第3プロジェクトとして、2014年11月にトルコ発電会社(EUAS)、米WH及び中国国家核電技術公司(SNPTC)が原子炉4基建設について、優先交渉開始の覚書を締結した。サイトは未定だがイイネアダ等が候補に挙がっており、炉型としてはAP1000, 2基、中国国産のCAP1400, 2基が想定されている。

5. ベトナム：日口受注の2計画中止

ベトナムは原子力発電所の建設計画を早い時期から進め、2009年12月、ニントゥアン省のフォックディンの第1原発(2基)についてロシア型炉の採用を決定、2010年10月、同省のビンハイの第2原発(2基)については日本製原子炉の採用を決定した。ベトナム政府は、電力需要の高成長予測では、2030年には1,500万kWの原子力発電が必要と予測していた。

フォックディンの第1原発計画は2014年中の着工を予定していたが、福島第一事故を受けて、安全性確保や人材育成・インフラ構築・資金面などから、着工をわずら方向に傾いていた。

2016年11月、ベトナムの国会は、ロシアと日本による同国初の原発建設プロジェクトの実行中止決議を9割以上の圧倒的多数で可決した。中止の理由として、ベトナム政府は、マクロ経済情勢が大きく変化し、近隣諸国からの電力購入可能性の拡大、空港・鉄道・高速道路な

どのインフラ整備費などを挙げ、日口両国の原子力技術の安全性に係るものでないと強調している。原子力の建設費が当初予定から増額していることが大きな要因とも言われている。原子力発電計画を再開するには、もう少し時間がかかりそうである。

6. サウジアラビア：石油資源温存し原子力開発

サウジアラビアは2010年4月、原子力開発の主体として、王令により、「アブドラ国王原子力・再生可能エネルギー都市」(KA-CARE)を設立した。

KA-CAREは2013年4月、2032年迄の電源開発計画を発表し、合計設備1億2,300万kWで、そのうち原子力1,760万kW、太陽4,100万kW、風力900万kW、炭化水素6,000万kWなどと想定している。2015年1月、政府は、原子力開発目標を2040年に繰り延べた。

UAEやサウジアラビアのように石油の豊富な国が原子力開発に傾注するのは、地球温暖化対応もあるが、自国に資源を温存して輸出に回したいという考えがある。更に中東諸国は発電だけでなく、海水淡水化のためにも、大量の化石燃料を消費している実態がある。

サウジアラビアへの原子力輸出を睨んで、アルゼンチン、中国、フランス、ロシア、韓国、フィンランドなど多くの国が原子力協定を締結している。

韓国の未来創造部(省)は2015年3月、サウジアラビアに韓国製小型炉(SMART)を2基以上建設する可能性に関する調査協力覚書を締結した。

フランスは2015年6月、2基のEPRをサウジアラビアに建設するためのフィージビリティ・スタディを行う基本合意書に調印した。

2016年1月には、中国核工業建設集団公司(CNEC)が高温ガス炉(HTR)建設に関する協力覚書を交わした。

韓国のSMARTや中国のHTRは発電だけでなく海水淡水化にも有効な原子炉である。

著者紹介

小林雅治(こばやし・まさはる)

本誌, 59[11], P.24(2017)参照.

材料挙動と計算機シミュレーションの接点

第2回 原子力材料の分子シミュレーション, 現状と展望

東京大学 沖田 泰良,
日本原子力研究開発機構 板倉 充洋

原子力材料の照射下特性変化を原子スケールの現象に基づいてモデル化する分子シミュレーションは、極短時間・極微小スケールの現象を定量化・解明・再現するため、幅広く用いられるようになってきた。本稿では、Ⅰ. 分子動力学法を用いた高速中性子との弾性衝突に伴う結晶欠陥形成過程の定量化、Ⅱ. 分子動力学法を用いた結晶欠陥集合体-転位接触による転位チャネリング形成過程の解明、Ⅲ. 分子動力学-キネティックモンテカルロ融合法を用いた結晶欠陥集合体の3次元的運動・転位へ吸収される過程の再現、に関して近年の研究進展を紹介する。

KEYWORDS: *molecular dynamics, kinetic Monte Carlo, collision cascade, dislocation channeling, conservative climb, vacancy, self-interstitial atom, dislocation*

Ⅰ. 高速中性子と固体材料の相互作用, それに伴う材料特性変化

原子力材料が他の巨大人工物構成材料と際立って異なる点は、放射線環境下で供されることである。特に、高速中性子と固体材料の相互作用を介して、材料中には種々の特有な現象が発生し、その結果として供用時間とともに材料特性が変化する。原子炉システムの安全性を確保し、機器補修・取換の決定に関する科学的根拠に基づいた指標を示すため、あるいは新たな材料の開発に関する指針を与えるため、原子力材料の特性変化を予測するモデルの構築が行われてきた¹⁾。

放射線環境下での材料特性変化は、固体を構成する原子と高速中性子の衝突反応に始まり、運動エネルギーの分配、結晶欠陥の形成、それらの移動(拡散)、結晶欠陥同士の反応に伴う微細組織変化等、様々な物理的素過程に基づくものである。さらにこれらの過程は、図1に示すように、時間的にも空間的にも10桁以上に亘る典型的なマルチスケール現象である²⁾。このような現象を単一の手法で解析することは非常に困難であり、スケールごとに適切な方法を選択し、現象を結びつけてゆくマルチスケールモデリングが必要となる。本稿では、特に極

短時間・極微小スケールの現象に着目し、分子動力学(Molecular Dynamics: MD)法に代表される分子シミュレーションによって得られた近年の研究成果について示す。

MD法とは、計算セル内の原子をニュートン運動方程式に従う古典的質点と考えた上で、原子核の位置によって原子間ポテンシャルが一意的に決まると近似し、原子個々の位置、速度等の情報を求める計算手法である。統計力学的処理を行うことで、数多くの熱力学的パラメータを求めることが可能である。MD法の鍵ともいえる原子間ポテンシャルに関しては、第一原理計算や実験データに基づいて求められるが、近年の計算技術の発達に伴いその精度も向上している。更に、米国Sandia国立研究所が開発した広汎且つ高効率な計算コードLAMMPSが無料で使用可能となり³⁾、MD研究は益々活発になってきていると言える。一方、MD法の時間ステップは、計算セル内で一番速く動く原子の1ステップあたりの移動距離が0.01a(aは格子定数)程度以下になるように決



図1 照射損傷のマルチスケールモデリング²⁾

Computational modeling of the behavior of nuclear materials (2); Molecular simulations for nuclear materials -current situation and future perspective-: Taira Okita, Mitsuhiro Itakura.

(2017年9月4日 受理)

■前回タイトル

第1回 原子力材料挙動のカイネティック計算と実験分野への期待

定されるため、およそ $(0.01-10) \times 10^{-15}$ s 程度となる。そのため、現実的に到達しうる時間スケールは最大で数 10ns である。また、立方体の計算セルでは、数百万個の原子を配置した場合でも、一辺あたりの長さは数 10nm である。このように MD 法は、実験で検証可能なスケールとは大きな隔りがある極短時間・極微小スケールの現象のみ検証可能な手法であり、原子力材料を対象とした場合、その適用先は結晶欠陥形成過程、及び転位と欠陥集合体の相互作用過程の定量化等に限定されてしまうのが実情である。本稿では、以降この二つの研究成果について示す。

II. カスケード損傷下結晶欠陥形成過程の定量化

核分裂反応によって生成した高速中性子が材料構成原子に弾性衝突すると、その原子は弾き出されて、原子空孔と自己格子間原子 (Self-Interstitial Atom : SIA) を形成する。この最初に中性子と衝突する原子 (Primary Knock-on Atom : PKA) が受け取る平均運動エネルギー \bar{E}_{PKA} は、中性子エネルギーを E_n 、中性子、原子の質量数を M_1, M_2 とすると、以下の式で与えられる⁴⁾。

$$\bar{E}_{PKA} = \frac{2M_1M_2}{(M_1+M_2)^2} E_n$$

Fe を対象材料とした場合、 $E_n = 1\text{MeV}$ を代入すると、 $\bar{E}_{PKA} \sim 35\text{keV}$ となる。この値は、一原子あたりの凝集エネルギー (3-5eV)、原子空孔と SIA を 1 対形成する際に必要なエネルギー (20-60eV) と比較しても、桁違いに高い値である。そのため、多数のはじき出しが極めて局所的に形成することとなる。これがカスケード損傷と呼ばれる高速中性子照射環境を特徴づける現象である。

カスケード損傷で形成される原子空孔や SIA は、それぞれ単独で存在する場合の他、同種の結晶欠陥同士が ps オーダーの極短時間に集合体を形成している場合もあり、 E_{PKA} が高いほどより大きい欠陥集合体が高確率に形成することが確認されている⁵⁾。カスケード損傷で形成する結晶欠陥においては、その総数の他、欠陥集合体数とサイズ、欠陥集合体の形態が、MD で定量評価すべき重要なデータである。何故なら、欠陥集合体の移動度及び反応度は、サイズや形態に大きく依存し、これらの分布の相違により、微細組織発達、更に材料特性変化が大きく異なるためである⁶⁾。特に、一部の SIA 集合体が、特定の結晶方向に高速一次元運動を行い、その活性化エネルギーは単独の SIA 移動エネルギーよりも低いことが発見されて以来⁷⁾、SIA 集合体の不動/可動に着目した解析が行われるようになってきた。

面心立方 (FCC) 金属で形成する SIA 集合体には、3 次元の不規則な欠陥集合体の他、積層欠陥を有する不動な

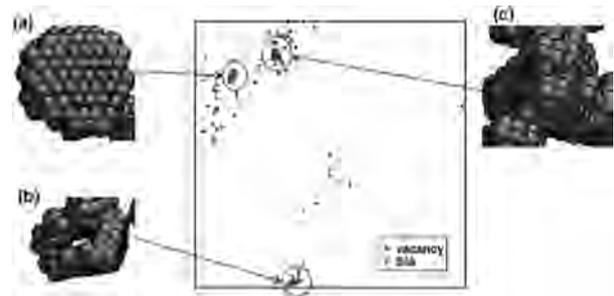


図2 カスケード損傷により形成する結晶欠陥集合体⁹⁾
 (a) 不動なフランクループ (SIA 集合体),
 (b) 可動な完全転位ループ (SIA 集合体),
 (c) 積層欠陥四面体 (原子空孔集合体)

欠陥集合体であるフランクループ、可動な完全転位ループが存在する。静的エネルギー計算に基づく、これら集合体の形成確率は積層欠陥エネルギー (Stacking Fault Energy : SFE) と言われる材料物性に応じて変化すると考えられる。しかし、これらの形成エネルギーの相違は数 eV オーダーであるため⁸⁾、それよりも数桁高いエネルギー散逸過程であるカスケード損傷下で、欠陥集合体形態に及ぼす SFE 影響の有無については、未解明であった。我々のグループでは、SFE、 E_{PKA} を系統的に変化させてカスケード損傷の MD 計算を行い、SIA 集合体形態に及ぼす SFE の影響を明らかにした^{9, 10)}。すなわち、低 SFE では、不動なフランクループ (図 2(a)) に加えて集合体縁に積層欠陥を有する完全転位ループ (図 2(b)) の形成が促進されるため、結果として可動な SIA 集合体の形成確率が增加すること、これは大きな SIA 集合体が形成しうる高 E_{PKA} でのみ観察され、 E_{PKA} の上昇に従って SFE の影響が顕著になることを明らかにした。軽水炉炉内構造材料として使用されるオーステナイト鋼は SFE が最も低い FCC 金属の一つであるため、本結果に基づくカスケード損傷下での可動な SIA 集合体形成確率が高いと考えられる。このため、SIA 集合体の一次元運動と (後述する) 保存的上昇運動により転位に吸収される過程が高頻度で発生すると考えられる。

III. SIA 集合体と転位との相互作用の解明

カスケード損傷下で形成した原子空孔、SIA、及び可動な SIA 集合体は材料中を拡散し、一部の SIA (集合体) と原子空孔は再結合により消滅するが、残りの一部は同種の欠陥を吸収することで、そのサイズが増加する。7 原子以上を含む SIA 集合体では転位ループとしての性質も持つため¹¹⁾、これが材料の塑性変形を担っている転位線と相互作用することにより機械的特性に大きな影響を及ぼす。また空孔集合体が材料中でほとんど動かないのに対し、可動な SIA 集合体は極めて低い活性化エネルギーで一次元移動するため、SIA 集合体と転位線の相互作用を明らかにし転位の動きをどの程度阻害す

るかを評価することが、原子力材料の特性変化を予測するモデル構築の上で重要となる。更に、不動な SIA 集合体(フランクループ)と転位線の相互作用が繰り返されることで、材料中に SIA 集合体の密度が極めて低い転位チャネリングと呼ばれる微細組織が生成される場合があり¹²⁾、この領域に塑性変形が集中することで結晶粒界に応力集中が発生し割れの要因になることも指摘されている¹³⁾。このような組織が生成する温度、照射、化学組成等を機構論的に明らかにすることも、材料劣化の進行具合を把握し、寿命を予測する上で重要である。

FCC 金属の場合、転位線はすべり面上で 2 本の部分転位に分解し、その間に一定の幅をもつ積層欠陥が存在するリボン状の形態をとる。移動する転位線が不動なフランクループと交差して相互作用する場合、バーガースベクトルの関係、積層欠陥の幅、及びフランクループの大きさ等によって、様々に異なる相互作用の形態をとることが我々の MD 計算研究によって判明した¹⁴⁾。

転位チャネリング生成に於いては、転位線との相互作用によりフランクループの積層欠陥が解消され完全転位ループに変換する「アンフォールト」が発生する過程が鍵になると考えられる。従来、アンフォールトについては変換前後および中間の峠点状態の静的エネルギー差に関する考察に基づいて、小さいフランクループで、また高 SFE での発生確率が高いと考えられてきた¹⁵⁾。しかしこれらの条件を様々に変化させて MD 計算を行ったところ、これまで発見されていたアンフォールト過程の他にも、新たに 4 種類のアンフォールト過程があり、SFE、フランクループの大きさ、転位線との位置関係等で発生確率が異なることが分かった。そのうちの一つの概略を図 3 に示す¹⁴⁾。これらの過程は、リボン状の転位線とフランクループが交差して部分転位同士が結合し別のバーガースベクトルを持つ転位に変換する反応が複数の段階にわたって生起され、それぞれの段階で SFE などの条件が異なる影響を与えるため、単一過程の静的エネルギーを比較するのみでは発生過程の定性的傾向すらつかめないことを示している。転位動力学モデルにアンフォールト過程を取り入れて転位チャネリング生成をモデル化する場合、このような原子論的計算に基づいて正しいアンフォールト過程を取り入れることが重要となる。

IV. SIA 集合体の保存的上昇運動による転位への吸収過程に関するモデル化

SIA 集合体の運動には、MD 法で再現される高速一次元すべり運動の他、すべり方向と垂直な方向への運動も実験により確認されている¹⁶⁾。SIA 集合体は、この 2 つの運動を組み合わせることで、図 4 に示すように、三次元的運動が可能となり、転位に吸収され消滅する確率が

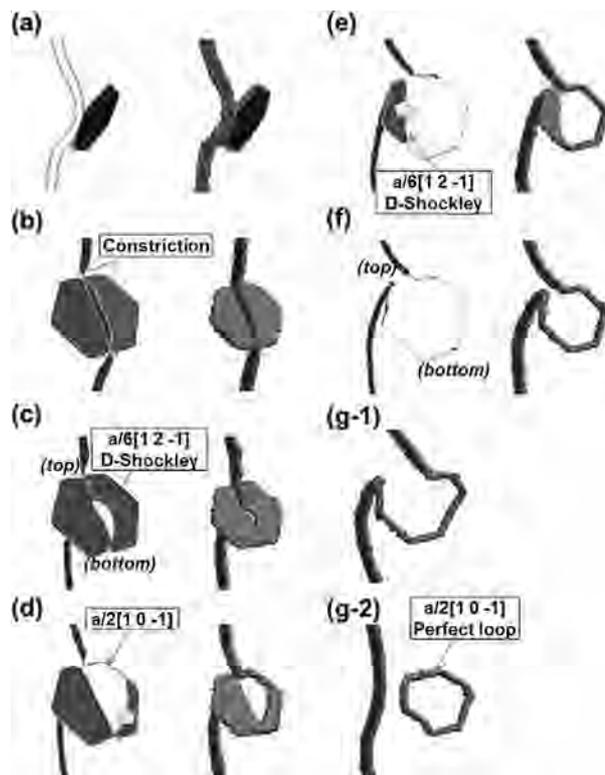


図 3 新たに見つかった転位線とフランクループの交差によるアンフォールト過程¹⁴⁾

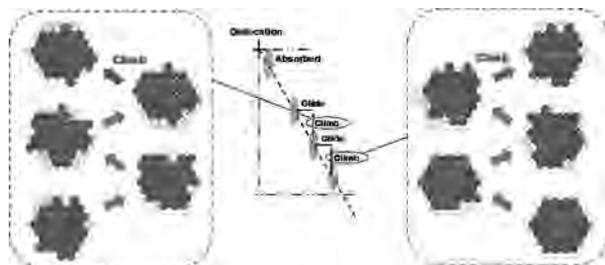


図 4 SIA 集合体保存的上昇運動による転位への吸収過程¹⁷⁾

大幅に増加する。この挙動を通して、カスケード損傷で形成した結晶欠陥のうち、原子空孔より SIA の方が消滅しやすくなるため、残った原子空孔同士が集まりポイドを形成・成長し、最終的にスエリング(材料の膨れ)が発生する。SIA 集合体の三次元的運動こそが結晶欠陥流束の対称性を崩す要因であり、生成バイアスとも呼ばれる⁶⁾。

SIA 集合体のすべり方向と垂直な方向への運動は、集合体を構成する原子が、その周辺に存在する転位(あるいは転位ループ)の応力と相互作用し、集合体縁部に沿って応力の拡張側へ移動することにより発生する。集合体のサイズを保ちつつ、形状を変化させアメーバのように重心が移動する現象である。この運動中、SIA 集合体に含まれる原子数が一定に保たれることから、保存的上昇運動と呼ばれる。

保存的上昇運動のモデル化に当たっては、結晶性を反映した原子論的取り扱いが必要な事は自明である。しか

し、運動の素過程が複数原子の多段階に亘る拡散であるため、 10^{-6} s オーダー以上、条件によっては 10^4 s オーダー以上で発生する現象であり¹⁸⁾、MD 法で再現可能な時間スケールを大幅に上回る。そのため、既往研究では、原子的取り扱いを一切無視した弾性理論に基づく解析のみが行われてきた^{18, 19)}。我々は、キネティックモンテカルロ (Kinetic Monte Carlo: KMC) 法を用いることにより、原子論的モデルに基づいて SIA 集合体の保存的上昇運動を定量化することに成功した¹⁷⁾。

KMC 法では、欠陥に発生しうる事象(本計算では SIA 集合体縁上に存在する原子の拡散に相当)の全てを事前に列挙し、各々の活性化エネルギーを予め MD 法などで計算する事によりイベントリストを作成する。発生頻度に比例して 1 つの事象をリストから選定し、それを実行し、その事象の発生頻度に応じて時間を経過させる、というプロセスを繰り返して行う手法である。この手法を用いることにより、欠陥挙動という意味において何も起こらない“空白の時間”を、必要以上に細かな時間ステップで更新することがなくなるため、MD 法よりはるかに長い時間スケールの計算が可能である。しかし、物理的に重要な全ての活性化過程を漏れなくイベントリストに含める必要があり、計算対象に応じた様々な工夫が必要となる。

本計算において、全ての SIA 集合体形状を対象として、縁上に存在する原子の移動エネルギーを事前に求めておくことは、ほぼ不可能に近い。我々は原子の移動エネルギーが第二近接までの原子配置で決定されると仮定し、さらに図 5 のように、段差が一段のみの原子移動を考え、二段以上の段差を形成する原子移動を禁止することで、全ての配置における移動エネルギーを MD 法で算出することに成功した。これらのパラメータを用いた KMC 計算により、応力勾配の影響下で SIA 集合体が保存的上昇運動により移動し、転位に吸収される現象を再現した。

保存的上昇運動の速度は、従来の拡散モデル(アインシュタインの関係式)と同様の温度・応力勾配依存性を示すが、その活性化エネルギーは、素過程である単独 SIA 原子の集合体縁上での移動エネルギーよりも大き

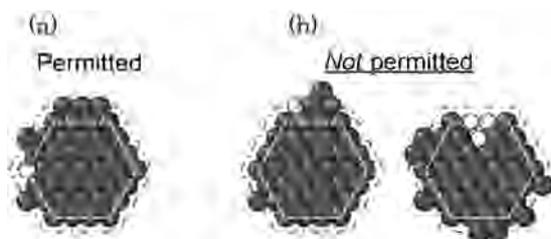


図 5 保存的上昇運動のモデル化において許される原子移動 (a) と禁止される原子移動 (b)。内側の破線が SIA 集合体の元々の縁部を表す。この状態から二段分変形するような原子移動は除外した。

い値となった。また、SIA 集合体サイズの増加に伴って、保存的上昇運動の活性化エネルギーは大きくなるという結果が得られた。これは、縁部に発生した段差のペアが、集合体サイズの増加に伴ってより長距離を移動する必要があるため、拡散中にペアの対消滅が起こる確率が高くなることが原因と考えられる。これらの知見は、従来の弾性理論に基づく解析のみで取得することが不可能であり、原子的挙動を取り入れた本計算によって初めて明らかとなったものである。

このように、MD 法で得られた結果を KMC と有機的に繋ぐことにより、原子力材料の特性変化において鍵となる現象、且つ MD 法で再現しうる時間スケールを大幅に上回る現象の原子論的取り扱いが可能となった。今後は、照射下での in-situ 透過型電子顕微鏡観察等により、妥当性検証を行っていく予定である。

V. まとめ：分子シミュレーションの展望

原子力材料の照射損傷過程は、はじき出しに代表される極短時間・極微小スケール現象を内包し、それらの現象が長時間・巨視的スケールの現象を決定づける、典型的なマルチスケール現象である。MD 法によって、実験では解明が困難な短時間・微小スケールの挙動を明らかにしていくことが可能である。近年、計算機能力の飛躍的向上に伴い、分子シミュレーションの活躍の場は、益々増加してきている。また、第一原理計算により原子スケールでの新たな知見が加速的に蓄積されており、それに基づいて原子間ポテンシャルの高精度化も進んでいる。今後は、複雑な化学組成を有する実用材料を対象とした特性変化予測等、より詳細な検討が求められる。それと同時に、本稿で示した保存的上昇運動のように、他手法と結びつけることで長時間スケール・大きなスケールの現象をモデル化していくことも求められる。

— 参考資料 —

- 1) 沖田泰良, シミュレーション Vol. 30, No. 2 (2011) 8.
- 2) 森下和功, 渡辺淑之, 吉松潤一, 日本保全学会第 5 回学術講演会予稿集 (2008) 193.
- 3) <http://lammps.sandia.gov/>.
- 4) 石野栞, 照射損傷(東京大学出版)1979.
- 5) R.E. Voskoboinikov, Y.N. Osetsky, D.J. Bacon, J. Nucl. Mater. 377 (2008) 385.
- 6) C.H. Woo, B.N. Singh, Phil. Mag. A 65 (1992) 880.
- 7) Y.N. Osetsky, D.J. Bacon, A. Serra, B.N. Singh, S.I. Golubov, J. Nucl. Mater. 276 (2000) 65.
- 8) S.J. Zinkle, L.E. Seizman, W.G. Wolfer, Phil. Mag. A 55 (1987) 111.
- 9) T. Okita, Y. Yang, J. Hirabayashi, M. Itakura, K. Suzuki, Phil. Mag. 96, No. 15 (2016), 1579.
- 10) Y. Yang, T. Okita, M. Itakura, T. Kawabata, K. Suzuki, Nucl. Mater. Ener. 9 (2016) 587.

- 11) B. D. Wirth, G.R.Odette, D.Maroudas, G.E. Lucas, J. Nucl. Mater. 244 (1997) 185.
- 12) D. Rodney, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B, 228 (2005) 100.
- 13) J.I. Cole, S.M. Bruemmer, J. Nucl. Mater. 225 (1995) 53.
- 14) S. Hayakawa, Y. Hayashi, T. Okita, M. Itakura, K. Suzuki, Y. Kuriyama, Nucl. Mater. Ener. 9 (2016) 581.
- 15) G. Saada, J. Washburn, J. Phys. Soc. Jpn. 18 (1963) 43
- 16) Z. Yao, M.L. Jenkins, M. Hernandez-Mayoral, M.A. Kirk, Phil. Mag. 90, 35-36 (2010) 4623.
- 17) T. Okita, S. Hayakawa, M. Itakura, M. Aichi, S. Fujita, K. Suzuki, Acta Mater. 118 (2016) 342.
- 18) J.A. Turnbull, Phil. Mag. 21 (1970) 169.
- 19) F. Kroupa, P.B. Price, Phil. Mag. 6 (1961) 243.

著者紹介



沖田泰良 (おきた・たいら)
 東京大学人工物工学研究センター
 (専門分野/関心分野)原子力材料, 分子シミュレーション



板倉充洋 (いたくら・みつひろ)
 日本原子力研究開発機構システム計算科学センター
 (専門分野/関心分野)固体シミュレーション, 第一原理計算, 統計力学解析



From Editors 編集委員会からのお知らせ

ー最近の編集委員会の話題よりー

(11月7日第4回論文誌編集幹事会, 第5回学会誌編集幹事会)

【論文誌編集幹事会】

- ・平成29年9月16日~10月15日に英文誌へ25論文, 和文誌へ1論文の投稿があった。
- ・東電福島第一事故関連和文論文及びアトモス掲載解説記事の英訳出版WGの進捗状況が報告された。翻訳会社2社と打ち合わせをした。事業計画書を改訂し, 次回の幹事会で検討後に総務財務委員会に諮ることとした。
- ・編集委員会運営細則の改定案を検討した。
- ・JNST Most Cited Article Award 2017の選定経過が報告され, 引用数の飛

び抜けて多い3論文の授賞を決定した。

- ・論文審査遅滞の状況が報告され, その対応策を検討した。

【学会誌編集幹事会】

- ・木下委員長より, H29年度見込み・H30年度予算について理事会報告があった。12月の幹事会で承認後, 理事会に提出の予定となっている。
- ・10月号のアンケート結果の報告があった。以前掲載した対談記事等についてアンケート回答者からコメントがあり, 今後の記事企画について検討した。
- ・「編集委員会運営細則」の改定案の説明があった。
- ・巻頭言, 時論, 他の記事企画の進捗状況について検討した。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

核データ研究の最前線

～たゆまざる真値の追及,そして新たなニーズへ応える為に～

第3回 核分裂データの最前線：実験と理論

日本原子力研究開発機構 西尾 勝久,
東京工業大学 千葉 敏

核分裂は原子力エネルギー利用の基礎となる現象であるが、その複雑さのため、質および量ともに限られた実験データを現象論によって記述し、核データとして利用されるにとどまっていた。近年、新規の実験技術の確立に加え、高性能計算機を活かした理論計算に大きな進展があったので、最新の成果を見ながら議論する。

KEYWORDS: Nuclear Fission, Scission, Fission-Fragment Yield, Prompt Neutron, Total Kinetic Energy

I. 核分裂と核データ

核分裂は原子力エネルギー利用の基礎となる物理現象である。核分裂過程が関与する核データを見ると、核分裂直後の独立収率、運動エネルギー、即発中性子やガンマ線がある。つづいて、核分裂片の β 崩壊が関与する遅発中性子の数や累積収率、さらには崩壊熱などは、独立収率を通じて核分裂過程に大きく支配される。軽水炉など従来の原子炉に利用されてきた核分裂データは、中性子入射エネルギーで見ると最大20MeVまでである。近年、長寿命マイナーアクチノイド(MA)の核変換を目的とした加速器駆動型原子炉の設計が行われている。ここでは、高エネルギー中性子が核分裂に与するとともに、取り扱うべき核種(高次のMA核種など)も増える。このように、必要となる核分裂データは、核種およびエネルギーにおいて大きな広がりを見せている。

本解説では、これら近年の動向もふまえ、新たに進んでいる新規測定技術を紹介する。これまでに無い新たな核分裂データの取得や、核種とエネルギー範囲を広げた測定が進んでいる。一方、実験だけですべてのデータを得ることは困難なため、やはり理論予測が不可欠である。この10年で理論は飛躍的に進み、現象論によらず、例えば核分裂片の質量数分布 $Y(A)$ を基礎的な物理過程の考察から計算できるようになってきた。実験で取得できないデータを予測するには、このような汎用性の高い理論

が必要であるが、ようやくこの仕組みが整いつつある。

著者らは核分裂過程の解明と核分裂核データ評価との融合を目指しているが、この仕組みを説明する。サドル点(鞍部点)を超えると核分裂が進み、ある程度伸びた所で切断する。この瞬間を切断点(scission)といい、質量分割が決まる。ここで、2つの核分裂片は変形した形で接触している。クーロン反発力によって核分裂片が加速され、それぞれ運動エネルギーを持つ(全運動エネルギーをTKEとする)。個々の核分裂片の変形エネルギーは、加速後に内部励起エネルギーに変化し、これに比例して即発中性子が放出される。よって即発中性子はさまざまな核分裂片を起源とし、 $\nu(A)$ と表現され、scissionでの形状を通じて原子核がたどる変形経路とリンクする。入射中性子エネルギーが上がると複合核に余剰の励起エネルギーが与えられるが、これは2つの核分裂片にある法則で配分される。これは解決されていない問題であるが、このメカニズムに対応して即発中性子数およびエネルギースペクトルに直接影響が出るのは明らかである。核分裂現象の解明が核データ評価方法に指針を与える良い例であるが、このような核分裂の本質を平行して追及することがこれからの核データ評価に求められる。

II. 新規測定技術と実験データ

中性子入射核分裂などでの核分裂片の質量数 A に対する収率は、原子核が有する殻構造を顕著に表しており、原子核の性質を調べる上でも重要である。よく使われる手法は2つの核分裂片の運動エネルギーを同時計測し、運動学的に質量数を決定するものである。1960年代からシリコン(Si)検出器がよく使われた。一方、Si検出器には、パルス波高欠損、すなわち検出器内で生成され

Cutting-edge studies on Nuclear Data for Continuous and Emerging Need(3); Recent advancement of fission studies: Experimental and theoretical approaches: Katsuhisa Nishio, Satoshi Chiba.

(2017年8月25日 受理)

■前回タイトル

第2回 共鳴領域における核データ測定と理論解析

たキャリアが再結合によって一部失われる現象があり、分解能に限界があった。1980年代後半からグリッド・イオンチェンバとよばれるガス検出器が多用されるようになった。ガス検出器は、O.R. Frishが1939年に核分裂片が有する大きな運動エネルギーを初めて観測したことに遡るが、リバイバルした背景には波高欠損が少なく、Si検出器より高い分解能が得られたことがある。

質量数 A と原子番号 Z の収率 $Y(Z,A)$ は、崩壊熱や遅発中性子数の決定に重要であるが、上の方法では質量数に対する収率 $Y(A)$ しか得られない。特殊な分離装置を用いて $Y(Z,A)$ を決定した例があるが、軽い核分裂片の分析にとどまった。放射化学法がこれまで活用されてきた理由もここにある。データ点は限定的であるものの (A,Z) 値を導出できる。もちろん、放射化学法では、核分裂片の運動エネルギーや即発中性子の測定はできない。これらを解決した以下に示す手法を含め、1990年以降の核分裂測定の実進については、最近のレビュー¹⁾が参考になる。

2000年ごろドイツ重イオン研究所(GSI)において、画期的な測定方法が開発された。逆運動学法による核分裂片の測定である²⁾。1次ビームとして核子あたり1GeVの²³⁸Uを加速してBe標的に照射し、フラグメンテーションを起こす。2次ビームの中には、核分裂測定の対象となる核種(例えば²³⁴Uや²²⁹Th)があるが、高速で飛び出したこれら核種を事象ごとに同定するとともに、鉛標的でクーロン励起(励起エネルギー平均約15MeV)を起こして核分裂を観測する。生成される2つの核分裂片も高速なため、この特徴を活かして核分裂片の Z を高精度で分析した。開発当時、 $Y(Z)$ だけが得られていたが、近年のSOFIAプロジェクトでは、 $Y(A,Z)$ 分布を決定することに成功している。図1に、例として²³⁸Uのデータを示す³⁾。ほぼ中心を通る直線は Unchanged Charge

Density(UCD)を表す。すなわち、生成される核分裂片の Z/A 比は、複合核のそれと同じであるとした線である。明らかに分布の中心は、UCDからずれている。これまでの研究から、軽い(重い)核分裂片はUCDよりも Z が多い(少ない)ことが知られているが、データはこの傾向と一致している。

GSIのデータから、核分裂片の全運動エネルギーTKEや、即発中性子数 $\nu(A)$ (または $\nu(Z)$) が導かれた(図3(a)参照)。中性子検出器を使わずに間接的に決定できるのも (A,Z) の高い分析能力によってもたらされた特徴である。

一方、逆運動学法で不利な面もある。まず第1に²³⁸Uより重い元素の同位体の加速は困難なので、重い元素の核分裂データは得られない。また、クーロン励起を利用するため、励起エネルギーはあくまで平均値となり、これ以下にもこれ以上にもコントロールできない。

原子力機構は、多核子移行反応を正運動学法(標的に重い原子核を用いる)に適用する新しい測定方法を確立した⁴⁾。この手法では $Y(A,Z)$ 分布までは分析できず、取得データは $Y(A)$ に限られる。しかし、以下に示すように逆運動学法では不可能なデータを得ることができ、相補的である。測定には入射核¹⁸Oを利用し、アクチノイド標的核に照射する。陽子や中性子が移行するパターン(チャンネル)の違いに応じて生成される複合核が異なるため、これらを同定することで様々な核種のデータを一度に取得できる。移行チャンネルを同定するため、反応後に放出される散乱粒子(projectile-like nucleus)をシリコン $\Delta E-E$ 検出器で検出する。厚さの均一性の良い ΔE 検出器を開発することで酸素までの同位体の分析(^{16,17,18}O)に成功した。この結果、1回の実験で15核種に及ぶデータを取得できるようになった。²³²Th, ²³⁸Uはもとより、²³⁷Np, ²⁴⁸Cmといった様々な α 放射性核種を標的として利用できるのも、その周囲の多くのデータを取得できる。また、反応の特徴として、複合核の励起エネルギーが最大60MeVまで分布することを利用し、 $Y(A)$ の励起エネルギー依存性も同時に得られる。¹⁸O+²³⁸Uの反応で取得したウラン同位体のデータを図2に示す⁵⁾(実際には、Np, Puなど他の核種のデータも取れている)。縦の並びは、複合核の励起エネルギーを表す。低い励起エネルギーでは殻構造が強く効くため非対称性がはっきりしている。励起エネルギーが高くなると、殻構造が消滅するために、ふた山構造が弱くなっていく。

図2に重要なメッセージとして、マルチチャンス核分裂の効果がある。これは高励起状態にある複合核が、1つまたは複数の中性を放出してから核分裂が起こる現象である。放出される中性子が多いと、これに応じて励起エネルギーも低下する。図の細い青線は、マルチチャンス核分裂を無視し、最初の励起状態の核分裂だけを考

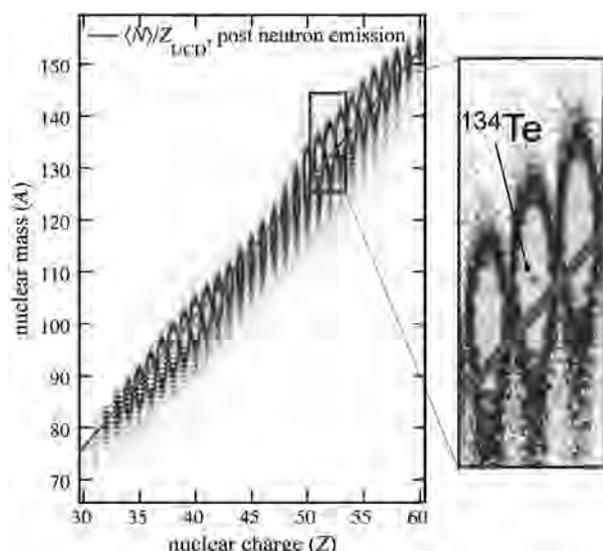


図1 逆運動学法による²³⁸Uの核分裂片の (A,Z) 分布³⁾

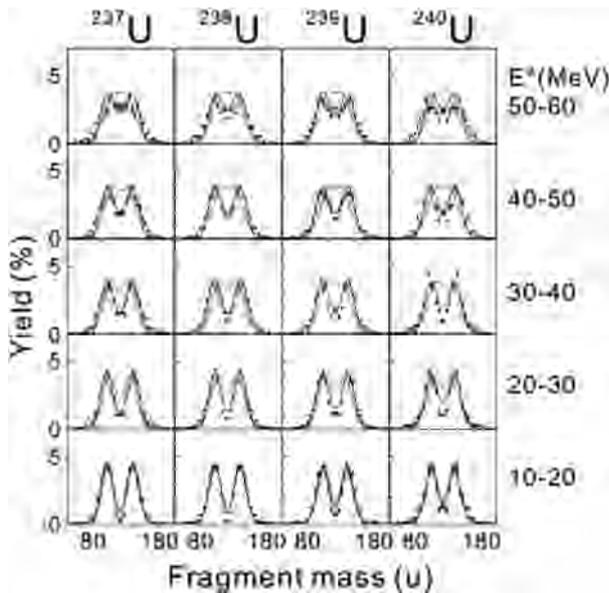


図2 多核子移行反応によるウラン同位体の核分裂片質量数分布⁵⁾。複合核の励起エネルギー E^* 依存性も示す。原子力機構・タンデム加速器を用いて測定した。

えたランジュバン模型による計算結果(Ⅲ. 参照)である。一方、太い線はこれを考慮したもので、 $E^*=20\sim30\text{MeV}$ ですでに影響が現れ、高エネルギー領域に残るふた山構造をうまく説明している。高エネルギーでの核分裂データの評価およびモデル構築のために取り入れるべき効果として重要である。

次に、即発中性子 $\nu(A)$ について議論する。いわゆる中性子エネルギースペクトル $\chi(E_n)$ も、すべての核分裂片からのスペクトル $\chi_A(E_n)$ を足し合わせたものとなる。 $\nu(A)$ は逆運動学法でも間接的に導かれるが、中性子エネルギーを得るには正運動学法しかない。2000年ごろ京大炉において $\nu(A)$ と $\chi_A(E_n)$ が3つの反応 $n_{th} + {}^{233,235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$ で取得され、これまで核分裂モデルの構築に多く利用された。例として ${}^{233}\text{U}(n_{th},f)$ のデータ⁶⁾ を図3に示す。 $\nu(A)$ は鋸歯状の分布を示し、scissionにおいて左右の核分裂片が異なる変形を持つことがわかる。図3(b)の $\eta(A)$ は中性子の平均エネルギー(重心系)で、 $\chi_A(E_n)$ から求めたものである。興味深いことに左右対称の形をしている。 $\nu(A)$ と $\eta(A)$ の間の分布の違いは、核分裂過程ではなく、むしろ個々の核分裂片のエネルギー準位構造に由来する。ここでは殻補正エネルギーを取り上げ、これを反映し、また実験データからも導出できる量としてレベル密度パラメータ $a(A)$ を見てみる。核分裂片は安定同位体に比べて中性子が過剰なため $A=132$ を持つ核分裂片は2重魔法数核 ${}^{132}\text{Sn}$ に接近した原子核となる。これらの殻補正エネルギーは、負の大きな値を取るが、計算をしてみると図3(c)の実線のように $A=132$ あたりで $a(A)$ を大きく引き下げる。実際に、 ${}^{233}\text{U}(n_{th},f)$ の実験値 $\nu(A)$ と $\chi_A(E_n)$ から得た $a(A)$ 値はこの計算と合っており、同図に示す安定同位体での

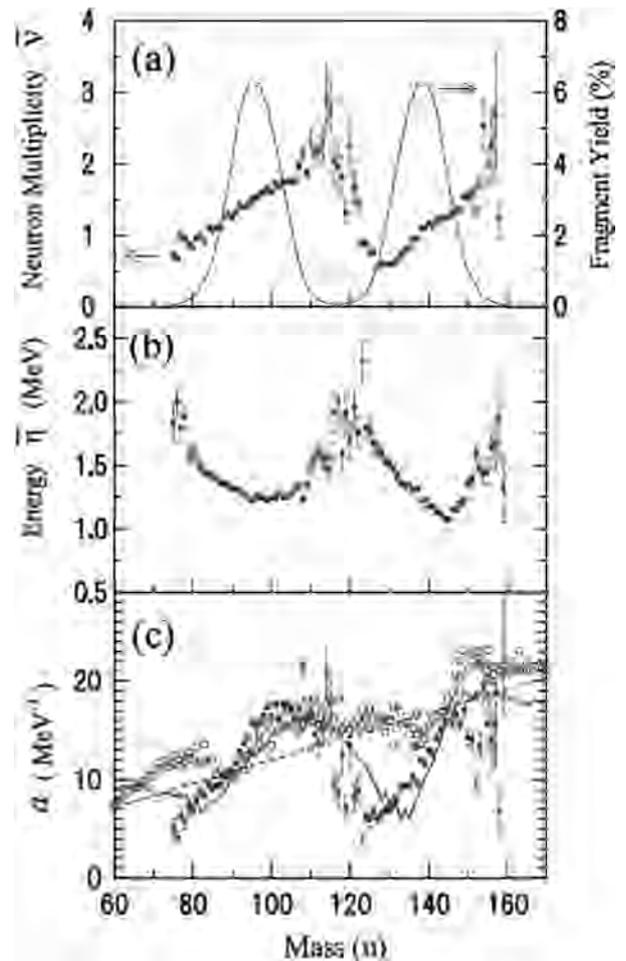


図3 ${}^{233}\text{U}(n_{th},f)$ における (a) 核分裂片から放出される即発中性子数 $\nu(A)$ と質量数分布 $Y(A)$ 、および (b) 即発中性子の平均エネルギー $\eta(A)$ 。 (c) レベル密度パラメータ $a(A)$ 。●は ${}^{233}\text{U}(n_{th},f)$ データから導出したもので、○印は安定同位体の値。実線は核分裂片の殻補正エネルギーから求めた計算値、破線は $a(A)=0.12A$ を表す。

値と大きく異なる。このように中性子エネルギースペクトルを核分裂の原点に帰って評価するには、核分裂過程のみならず、原子核の構造を取り込む必要がある。

入射中性子エネルギーに対する $\nu(A)$ や $\chi_A(E_n)$ の測定は、さらなるチャレンジとなる。 ${}^{237}\text{Np}$ に入射する中性子のエネルギーが 0.8MeV から 5.5MeV に上がった場合、重い核分裂片の $\nu(A)$ だけが増え、軽い核分裂片からの中性子数に変化はなかった⁷⁾。I. でも述べたように、これはまだ未可決な問題として残っているが、次節で示す理論で理解されつつある。原子力機構は、図2のデータを得た装置に中性子検出器を組み合わせることで、 $\nu(A)$ の励起エネルギーおよび核種依存性を測定するプログラムを進めている。

Ⅲ. 核分裂理論の進展

核分裂の最初の理論は、1939年のBohr-Wheeler⁸⁾によるものである。原子核の電荷を有した液滴としてとら

え、変形に対するポテンシャル曲面を書かせたところ、サドル点を見出し、核分裂の重要な概念を導いた。同時に導入された fissility は、核分裂のしやすさを表し、原子核の存在限界を議論する重要なパラメータとなった。1960年代、原子核の殻構造が導入され、核分裂障壁の2重構造と、これに起因する核分裂アイソマー、およびしきい値以下の核分裂断面積の微細構造(中間状態に起因する共鳴構造)が説明された。ウランなど核分裂片の質量数分布が非対称性を示すこともこのころ説明された。一方、核分裂片の質量数分布等を定量的に満足いく精度で説明するには、さらに長い道りを要した。1980年代後半、Brosa⁹⁾らはマルチモード核分裂の概念を提案した。ポテンシャル曲面の計算を行い、サドル点またはそれを過ぎてから、原子核が経路する変形ポテンシャル平面上での経路(モード)が複数存在することを見出した。ここで非対称核分裂モードを“Standard-I、および-II”, 対称分裂モードを“Super-long”と命名した。当時、この概念を引用しながら、質量数分布など実験データを各モード成分に分解するなどして多くの考察が行われた。一方、この理論では Standard モードの具体的な質量非対称度や、各モードへの分岐確率までは計算されなかったため、一般性に欠け、未測定核種のデータを予測するには至らなかった。

2010年に入って質量数分布の理論に大きな進展があった。一つは、ランダムウォーク法による記述¹⁰⁾、もう一つは揺動散逸理論による計算である¹¹⁾。

米国バークレイ国立研究所とロスアラモス国立研究所が進めているランダムウォーク法による計算では、まず(i)原子核の形状を5つのパラメータ(5次元)で記述してポテンシャルエネルギー曲面を描く。(ii)この曲面上を、原子核がランダムウォークによって進み、最終的に切断するまで追跡する、というものである。ここで得られた結果を実験データとともに図4に示す¹⁰⁾。全体的によい一致を示しているのに加え、Y(Z)分布に現れ

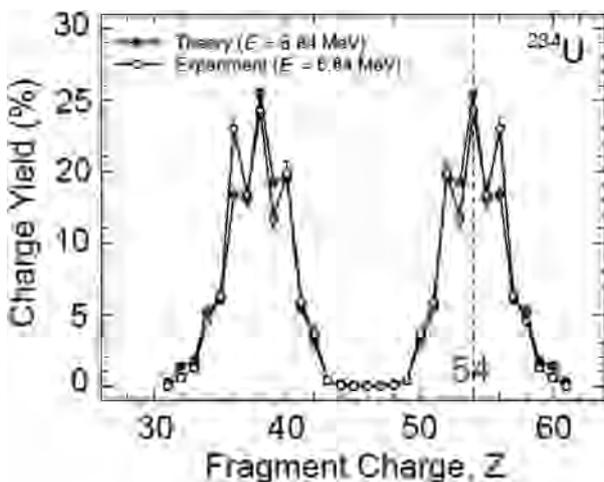


図4 ^{234}U の核分裂における核分裂片の電荷分布(○が実験値、●印がランダムウォーク法の計算)

る微細構造、特に $Z=54$ のピークがうまく説明できている。II. で述べた GSI のデータ²⁾によると、Th, Pa, U で測定した 21 核種の非対称核分裂成分の Z 値の平均はすべて 54 となっており、核分裂を支配する重要な陽子数と言える。これは、1976 年、Wilkins らが理論の中で重視した scission での核分裂片の中性子閉殻 $N=88$ ¹²⁾ の役割とは異なっている。

近年、揺動散逸理論による核分裂の記述が世界的に盛んになっている。花粉から出た微粒子が水面上をランダムに動くブラウン運動を記述するのと同じランジュバン模型を核分裂に適用したものである。微粒子の動きは原子核の形状の変化、水分子の微粒子へのランダムな衝突は核子が原子核表面(形状)に衝突することに対応する。違いとして、水面にはポテンシャルの勾配がない一方、原子核には複雑なポテンシャル構造がある。ランダムウォーク法との大きな違いは、摩擦の概念を取り込んでいる点で、具体的には原子核表面の動きと核子の運動が互いに影響を及ぼしあうことで、核子が原子核表面にランダムに及ぼす力の大きさが揺動散逸定理によって摩擦係数と系の温度から一意に決まる。また、核分裂が時間に依存する物理過程として記述されるため、中性子蒸発との競合を考慮することができる。ランジュバン模型の例として、すでに図2に質量数分布の結果を示した。ここでは、原子核の形状を3つのパラメータ(伸び、質量非対称度、変形度)で表した、いわゆる3次元(3D)計算であり、近畿大学で計算された。

最近、東工大のグループは4次元(4D)のランジュバン計算手法を開発した¹¹⁾。3D から4D への必要性は、特に $v(A)$ の記述にある。図3(a)に示したとおり、 $v(A)$ は左右で非対称な形を有しており、一般に2つの核分裂片の変形 δ_1 と δ_2 は等しくない(3D 計算では $\delta=\delta_1=\delta_2$ とする)。まず核分裂片の全運動エネルギーについて計算したところ、図5に示すように3D 計算に比べて良く再現

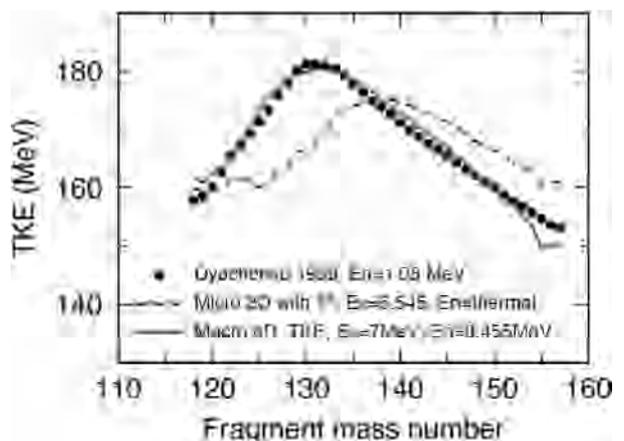


図5 ^{235}U の熱中性子核分裂における核分裂片の全運動エネルギー(TKE)の核分裂片質量数依存性。黒丸は実験値、ランジュバン模型計算を実線(4次元)と破線(3次元)で示す。

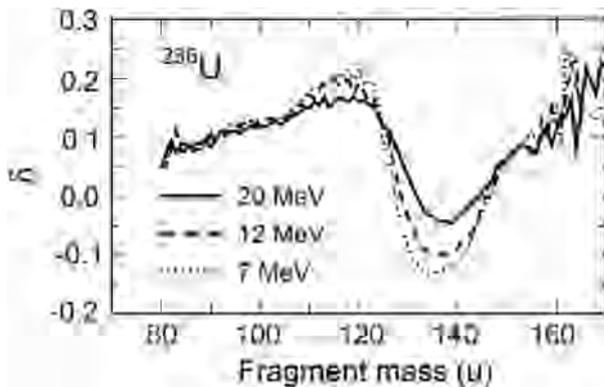


図6 ^{236}U の核分裂における核分裂片の質量数に対応する変形度 δ 。異なる複合核励起エネルギー(7, 12, 20MeV)に応じて、3つの曲線を示した。 δ がプラス方向に大きいと ν が大きくなる。

できている。この理由は、4D化において、 ^{132}Sn 近傍の核分裂片が、軽い核分裂片とは独立した形で、理想的な球形形状を持って生まれるため、結果として scission でのクーロンエネルギーを押し上げるためと考えられる。また、解析から、最終的に得られる TKE のうち約 10% の運動エネルギーが、scission 時に発生していることが分かった。続いて、4D 計算で得た変形度 δ の分布を図6に示す。計算で定義する δ は、正と負の両方の極性を持つことができ、正の大きな値に向かって scission での変形エネルギーが大きくなると考えてよい。まず明らかなのは、ペアを組む左右の核分裂片において、明らかに $\delta_1 \neq \delta_2$ となる点である。また、全体的に分布が鋸歯状を示しており、図3(a)に示した $\nu(A)$ の傾向に似ている。図には、複合核の励起エネルギーを7, 12, 20MeVと変化した時の値を合わせて示した。興味深いことに、軽い核分裂片では δ に変化がないのに対し、重い核分裂片、特に2重魔法数核 ^{132}Sn 近傍の原子核($125 < A < 150$)において、 δ が正方向に向かって増加している。現在、scission 時の変形から $\nu(A)$ を導出する解析が進んでいるが、長らく謎とされてきた $\nu(A)$ の励起エネルギー依存性⁷⁾について解決できる可能性がある。

IV. 課題と将来への進展

理論では、当面、ランジュバン模型が核分裂過程と核データを結ぶ中心的なツールになると考えられる。一方、並行して微視的なモデル、例えば時間依存 Hartree-Fock 理論¹³⁾などの計算も可能になってきた。まだ核分裂観測量の多くを記述するには至っていないが、より基礎原理に立脚した概念として発展が期待できる。

核分裂の理解は、測定装置の開発と新データの導出とともに進んできた。ここでは紹介しなかったが、核分裂片の脱励起過程で放出される複数のガンマ線を分析し、核分裂片の $Y(A, Z)$ 分布を導出する実験が行われている。

る。正運動学法であるため、即発中性子と同時に測定するなど、新しい相関測定も可能であろう。

I. で述べたように、核分裂を理解することで、結果的に核データ評価方法の基礎が築かれる。その意味で、核図表上、多くの原子核を対象として核分裂を調べることも有用である。例えば、自発核分裂において ^{256}Fm から ^{258}Fm になると、質量数分布が非対称からシャープな対称分裂に遷移することが分かっている。これは、原子核の現象の中でも究極ともいべき変化であり、この現象の解明は、核分裂実験と理論にとっての試金石と言える。

核分裂データの利用として、これまで原子炉設計や核変換技術にふれた。その他、工学的には核セキュリティ、医療分野では同位体の製造にも必要である。基礎科学分野では、不安定原子核の生成、天体での元素合成の最終段階で生じる反応として重要性が認識されている。各分野における核分裂データの需要は、質・量とともに今後ますます増大すると思われる。一方、核分裂研究と核データ評価を支えるコミュニティーの規模は、国内・国外合わせても小さく、今後の課題として検討する必要がある。

— 参考文献 —

- 1) A. Andreyev, K. Nishio, K.-H. Schmidt, Rep. on Prog. Phys., in press (2017).
- 2) K.-H. Schmidt et al., Nucl. Phys. A665, 221 (2000).
- 3) E. Pellereau et al., Phys. Rev. C, 95, 054603 (2017).
- 4) R. Léguillon et al., Phys. Lett. B, 761, 125 (2016).
- 5) K. Hirose et al., Phys. Rev. Lett., in print.
- 6) K. Nishio et al., J. Nucl. Sci. Technol., 35, 631 (1998).
- 7) A. Naqvi et al., Phys. Rev. C, 34, 218 (1986).
- 8) N. Bohr and J.A. Wheeler, Phys. Rev. 56, 426 (1939).
- 9) U. Brosa, S. Grossmann, A. Müller, Phys. Rep. 197, 167 (1990).
- 10) P. Möller and C. Schmitt, Eur. Phys. J. A, 53, 7(2017).
- 11) C. Ishizuka et al., submitted to Phys. Rev. C.
- 12) B.D. Wilkins, E.P. Steinberg, R.R. Chasman, Phys. Rev. C 14, 1832 (1976).
- 13) A. Bulgac et al., Phys. Rev. Lett. 116, 122504 (2016).

著者紹介



西尾勝久 (にしお・かつひさ)

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター
(専門分野/関心分野) 核分裂, 核データ測定, 超重元素合成



千葉 敏 (ちば・さとし)

東京工業大学
(専門分野/関心分野) 核分裂核データ, 原子核物理, 核変換

福島県の環境回復に向けた取り組み

第8回 森林・流域圏内のセシウムの動態

日本原子力研究開発機構 飯島 和毅, 国立環境研究所 林 誠二,
日本原子力研究開発機構 鶴田 忠彦

本稿(第8回)では、森林と河川の流域圏における放射性セシウムの移動挙動の理解を目的として、日本原子力研究開発機構と国立環境研究所が実施している環境動態研究について、これまで得られた知見と今後の課題を報告する。

KEYWORDS: radioactive cesium, transport behavior, forest, river system, dissolved cesium, particulate cesium, discharge rate, accumulation

I. はじめに

東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所(以下、1F)事故により放出された放射性核種のうち、現在、そして将来の被ばく線量の主たる原因となるのは、放射性セシウム(^{134}Cs , ^{137}Cs)である。陸上に沈着した放射性セシウムの70%以上は森林に沈着しており、住居に隣接する林縁等を除き、その多くは具体的に除染される計画はなく、今後も引き続き森林に残存すると考えられるが、時間とともに雨・風等の自然の力により環境中を移動する可能性がある。このような環境中における放射性セシウムの移動挙動を調べる環境動態研究が、国内外の大学、研究機関等により、事故直後から進められてきた。日本原子力研究開発機構(以下、JAEA)では、平成24年11月から福島長期環境動態研究(F-TRACE; Long-term Assessment of Transport of RadioActive Contaminant in the Environment of Fukushima)プロジェクトを開始し、福島県浜通りの8河川水系を対象とし、森林から河川水系を通り、河口に至る動態の解明と移動挙動シミュレーションツールの開発を進めてきた^{1~3)}。また、国立環境研究所(以下、NIES)においては、事故直後から宇多川流域を端緒として浜通り北部地方の河川流域を対象に、放射性セシウムの移動と集積の実態把握や予測数値モデルの開発、淡水生態系における放射性セシウムの影響の把握と移行特性の評価を進めてきた^{4, 5)}。両機関の環境動態研究のチームは、平成28年5月から福島県三春町の福島県環境創造センターに本拠を移し、福島県を

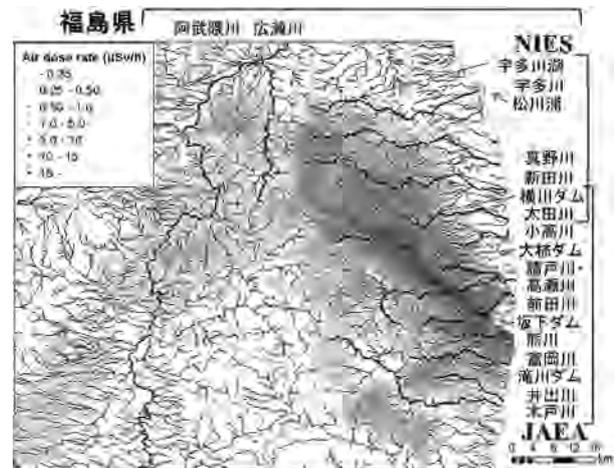


図1 三機関の福島県における主な研究対象流域圏

含め三機関で協力しつつ、流域への放射性セシウムの沈着量が比較的多かった河川水系を対象として、環境動態研究を進めている(図1)。本稿では、JAEAとNIESの取り組みを中心に、これまでに森林と河川の流域圏における環境動態研究で得られた重要な知見を整理するとともに、引き続き取り組むべき課題について述べる。

II. セシウムの動態に関する知見

1. 森林における動態

森林内の放射性セシウムの動きとしては、(1)樹冠から地表面に向かう移動、(2)地表面から地下に向かう移動、(3)斜面の上から下に向かい、河川水系に流入する移動の3つに大別することができる(図2)。

(1) 樹木から地表面に向かう移動

葉、枝、樹皮等に付着していた放射性セシウムは、落葉・落枝、林内雨(樹冠を通過して地表面に落ちる雨水)、樹幹流(樹冠から幹を伝い地表面に落ちる雨水)により、地表面に移動する(図2)。樹種が異なる川内村および川

Challenges for enhancing Fukushima environmental resilience (8); transport behavior of radioactive cesium in forests and river system : Kazuki Iijima, Seiji Hayashi, Tadahiko Tsuruta

(2017年9月5日 受理)

■前回タイトル

第7回 福島沿岸域における放射性セシウムの動きと存在量

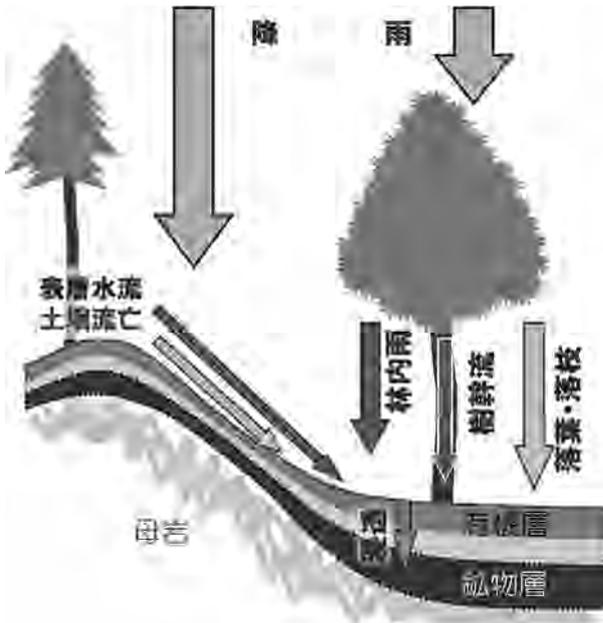


図2 森林内における放射性セシウムの移動経路



図3 JAEA 観測地点における放射性セシウムの樹冠から斜面への流入量および斜面からの流出量の比較⁶⁾

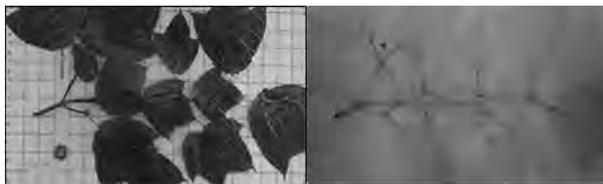


図4 ウリハダカエデの枝葉のオートラジオグラフィー例 (2016年9月採取)

俣町の森林3地点において、2013年および2014年の放射性セシウムの移動挙動を調べたところ、放射性セシウムの大部分は落葉・落枝により樹冠から地表面に移動しており、林内雨および樹幹流の寄与はわずかであった(図3)⁶⁾。事故から3年が経過した2014年時点で、樹木に存在していた放射性セシウムの多くは地表面に移動していることから、今後は樹皮等に付着したものがわずかに樹幹流により少しずつ移動していくと考えられる。一方で、事故後に成長した枝や葉のオートラジオグラフィー画像を見ると、一様に放射性物質が分布しており、放射性セシウムの転流(栄養分や合成された物質が植物内で他の部分に運ばれること)が起きていると考えられる(図4)。したがって、今後も落葉による樹冠から地表への移動は継続すると推測される。

(2) 地表面から地下に向かう移動

林内雨あるいは樹幹流とともに地表面に移動した放射性セシウムは、表層水とともに徐々にリター層(分解前あるいは分解途上の落葉・落枝の層)等の有機物を多く含む有機層に浸透し、やがて有機物の少ない鋳物層に到達する(図2)。また、落葉・落枝とともに地表面に移動した放射性セシウムはリター層に留まり、リター層が分解されるにしたがって溶出し、鋳物層方向に浸透していくと考えられる。放射性セシウムは、鋳物層に含まれる粘土鋳物等の鋳物に強く吸着されるため、鋳物層の表面付近にとどまり、地下深くまでは移動しない。これまでの調査結果においても、時間とともにわずかに下方への浸透が認められるものの、いまだに鋳物層表面から5cm以内に90%前後の放射性セシウムが存在している。また、5cmより深い部分では、深さ方向の放射性セシウム濃度の減少傾向が緩やかになる傾向が認められる。このような深さ方向の分布の特徴を説明するモデルの一つとして、移流拡散に加えて、放射性セシウムの鋳物に対する吸着反応として、時間とともに徐々に可逆吸着から不可逆吸着に変化する速度論的な反応を考慮した改良拡散吸着固定化(mDSF)モデルが提案されている⁷⁾。

(3) 斜面から流出し河川水系に流入する移動

川内村のスギ林(急傾斜)および川俣町の落葉広葉樹林(急傾斜・緩傾斜)の3地点の斜面に設けた観測区において、2013年および2014年の放射性セシウムの移動挙動を調べたところ、4月から11月にかけての降雨期に斜面から流出する放射性セシウムは、樹種や傾斜によらず、いずれも初期沈着量の0.05~0.19%と極めて少なく、その大部分は懸濁態(土壌粒子などに吸着する等してくっついた形態)であった(図3)⁶⁾。これは、いずれの森林も下層植生が繁茂し、リターも十分積層しているため、土砂の流出が抑制されていると考えられる。河川水系の上流域における観測でも、同様の結果が得られている。宇多川(2012~2015年)および太田川(2014~2015年)の上流森林域からの放射性セシウム流出は、主に懸濁態で生じており、1年間の流域全体からの流出量は、初期沈着量の0.04~0.38%と、森林斜面に設置した観測

表1 森林流域からの放射性セシウム流出状況

	宇多川上流 (2012~2015年)	太田川上流 (2014~2015年)
沈着量(Bq/m ²)	170	1,900
平均土砂/由木の ¹³⁷ Cs 平均濃度(Bq/kg)	6.0~9.5	61~130
平均土砂/由木の ¹³⁷ Cs 流出量(kBq/m ²)	0.51	6.8
平均土砂/由木の ¹³⁷ Cs 流出率(%)	0.30	0.48
¹³⁷ Cs年間流出量(Bq)	0.04~0.16	0.08~0.38

区画における観測結果と同程度であった(表1)。このことから、通常の斜面に比べて土壌粒子が流出しやすいと考えられる谷地形部を含めても、河川水系の山地上流域からの放射性セシウムの流出割合は、森林斜面と同様極めて低いといえる。

2. 流域圏における動態

森林から懸濁態あるいは溶存態として河川水系に流入した放射性セシウムは、河川水の流れにより移動するとともに、河川敷や河床に堆積しながら、下流へと流れる。後述するように、河川水系を通して海へ流出する放射性セシウムの大部分は懸濁態である。そのため、河川敷への堆積による空間線量率の変化や、海への流出量の評価という観点からは、懸濁態の動態が重要となる。一方、動植物に取り込まれやすいことから、生態系内での放射性セシウムの移行や、農産物・水産物中の濃度への影響という観点からは、溶存態の動態が重要となる。そこで、溶存態と懸濁態の放射性セシウムそれぞれについて、流域圏における動態を整理していく。

(1) 溶存態

2017年現在、いずれの調査対象河川水系においても溶存態の放射性セシウム濃度は、1Bq/Lを下回っており、時間とともに徐々に減少する傾向である。農林水産省によると、溶存態の放射性セシウム濃度が一般的な検出下限値(1Bq/L)未満であれば、玄米中の放射性セシウム濃度に及ぼす水中の放射性セシウムの影響は限定的である⁸⁾。したがって、いずれの河川水系においても溶存態の放射性セシウム濃度は、灌がい用水として用いても影響は限定的なレベルにあると言える。

また、放射性セシウムの濃度は、夏場に高く冬場に低くなる季節変動が認められる。太田川上流域における溶存態放射性セシウム濃度の観測結果では、5~10月は0.3~0.6Bq/L程度になるが、12~4月は0.1~0.2Bq/L程度である(図5)。

また、2014年から2016年にかけて、濃度は徐々に減少している。同様の濃度の季節変動や経時変化は、他の河川においても認められている。一方、大雨などの高水

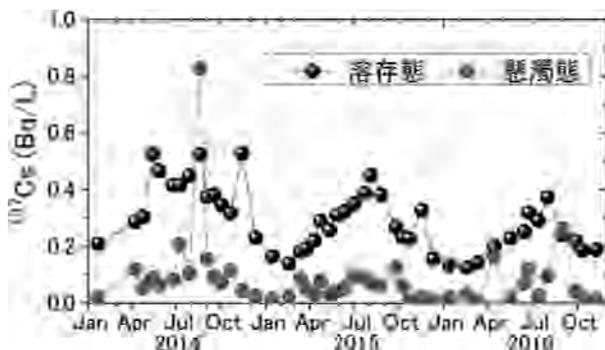


図5 太田川上流森林河川における平水時の放射性セシウム濃度の推移

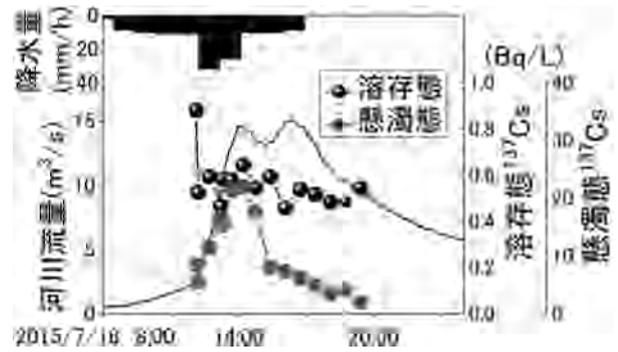


図6 太田川上流森林河川における降雨流出時の放射性セシウム濃度の変化(観測日:2015年7月16日)

時には、降雨のごく初期に一時的に溶存態放射性セシウム濃度が増加し、その後河川流量が大幅に増加してからも、平水時と同程度かやや高い濃度を維持するという興味深い挙動を示した(図6)。

これらの挙動から、溶存態放射性セシウムの発生源として二つのものが考えられる。一つは、森林や河畔に堆積しているリターである。これらが微生物等によって分解されることにより、植物の構造中に存在していた放射性セシウムが溶出しやすい状態となり、降雨時に洗い流されて降雨初期の一時的な濃度の増加を引き起こしたと推測される。また、微生物活性の高い夏場に濃度が高く、活性の低い冬場に濃度が低くなる季節変動とも整合的と言える。また森林域では、降雨流出に伴い普段枯れた状態にある谷部を中心とした表面流の発生により河道網が拡大する。その際、谷部等に堆積しているリターからの放射性セシウムの溶脱と河川水への直接流入が活発に生じることで、増水過程でも平水時と同程度かそれ以上の溶存態濃度の形成に寄与していることが推測される。

もう一つの発生源として、河川敷や河床の堆積物が考えられる。これらの堆積物中の放射性セシウムの一部は可逆的に吸着されており、冠水すると河川敷や河床の堆積物から放射性セシウムが河川水中に溶出するため、河川流量が増えても平水時と同程度の濃度が維持されると推測される。これは、大柿ダム湖や横川ダム湖において、表層水に比べて底層水中の溶存態放射性セシウム濃度の方が高く、湖底堆積物からの放射性セシウムの溶出によるものと推測されることと整合的である。したがって、河川水中の溶存態放射性セシウム濃度は、今後も吸着・脱離を繰り返しながら、ゆっくりと濃度が低下していくと推測される。

(2) 懸濁態

大雨等の高水時には、河川流量の増加とともに、放射性セシウムは、吸着された土壌粒子とともに山地森林から河川に流入し、懸濁態として下流へと輸送される。2014~2015年の請戸川における調査結果では、河川水位の上昇とともに浮遊懸濁物質(SS)および懸濁態放射性

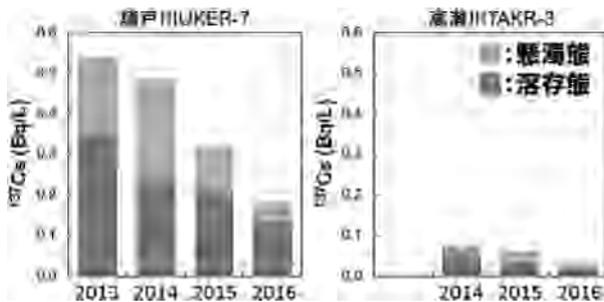


図7 溶存態(青)及び懸濁態(橙)のセシウム137濃度(請戸川及び高瀬川)

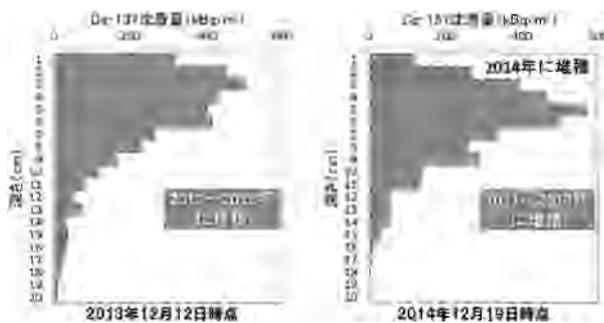


図8 請戸川河川敷の堆積物中における放射性セシウム濃度の深さ方向分布の例

セシウムの濃度が上昇するのが認められた。また、時間とともにSS1kgあたりに含まれる懸濁態放射性セシウム濃度は減少しており、年平均値で見ると溶存態に比べて速い速度で減少していることが分かる(図7)。

下流における高水時のSS濃度を、請戸川とその支流である高瀬川で比較してみると、高瀬川は請戸川より約一桁高い。これは、高瀬川にはダムがないが、請戸川には大柿ダムがあり、高水時に上流で発生した土砂の約90%がダムで堆積されるためである。このような挙動は、計算機シミュレーションにおいても明らかになっている⁹⁾。

下流に輸送された懸濁態の放射性セシウムの一部は、河川敷に堆積する。そのため、事故後間もなくは、土砂が堆積しやすい植生が繁茂した高水敷において、懸濁態の放射性セシウムの堆積により、周辺よりも空間線量率が高くなるのが認められた¹⁰⁾。しかし、そのような場所においても、その後は全般に物理減衰よりも早く線量率が減少した。河川敷堆積物中の放射性セシウム濃度の深さ方向分布をみると、表層に新たに堆積する堆積物中の放射性セシウム濃度が徐々に低下していることが分かる(図8)。これは、SS1kgあたりに含まれる懸濁態放射性セシウム濃度が時間とともに減少していることとも整合している。

河川敷に堆積しなかった懸濁態放射性セシウムの多くは、その後河口から海に流出する。浜通りを流れる河川において、流域全体に沈着した放射性セシウム量に対する1年間に流域全体から海に流出した放射性セシウム量

表2 浜通り河川から海への放射性セシウム流出量(2015年)

河川	年間流出量		9月豪雨時の流出量	
	流出量 (TBq)	初期沈着量に対する割合 (%)	流出量 (TBq)	年間流出量に対する割合 (%)
小高川	0.074	0.5%	0.053	72%
請戸川	0.224	0.1%	0.089	40%
高瀬川	1.195	0.4%	0.811	79%
前田川	0.057	0.3%	0.035	73%
順川	0.312	0.5%	0.233	79%
富岡川	0.022	0.1%	0.013	58%

の割合は、0.1~0.5%程度であった(表2)。これは、森林から河川水系に流出する放射性セシウムの割合と同程度かやや大きい値である。全ての河川水系で流域の大部分を森林が占めており、そこからの流出挙動が大きく影響しているが、森林以外の土地利用からの流出割合の方がやや大きいため、このような値になったと推測される。また、2015年においては、9月の関東・東北豪雨時の流出量が、2015年1年間の流出量の48~79%を占めており、特にダムのない河川では72~79%と大きな割合を占めた。このように、豪雨時の放射性セシウムの流出が年間流出量の多くを占め、特に、ダムのない河川ではその傾向が強くなり、そのため流域の初期沈着量に対する年間流出量の割合も比較的大きくなったと考えられた。本連載講座の第7回においても述べられているように、河川水系からの流入は、小規模ながら今後も継続的な海洋への放射性セシウムの供給源となる可能性があり、継続的なモニタリングや中・長期的な視点での機構解明が重要である。

Ⅲ. 今後の展望

森林に残存する放射性セシウムは、河川水系への移行率が年間0.1%程度と極めて低いため、そのほとんどが今後も森林に留まるだろう。福島県において、森林はキノコ、山野草、木材等の林産物生産の場である。その再生に向けた第一歩として、森林生態系の中で放射性セシウムがどのように循環していくのか、その挙動の評価が必要である。また、森林内の湧水点や渓流水は、放射性セシウムの巨大なインベントリーである森林と、移動経路となる河川水系の接点となっている。ここで、放射性セシウムがどのように河川水系に溶出しているのか、挙動評価を進めていく必要がある。一部の淡水魚では、溶存態の放射性セシウム濃度が非常に低いにもかかわらず、未だに比較的高濃度の放射性セシウム濃度が検出されており、河川水系の生態系において、放射性セシウムがどのように移行しているのか、慎重に評価を進めていく。これらの将来の挙動を予測し、福島県の環境回復に資する情報を的確に発信するためには、移動現象に基づ

く予測モデルが必要となる。そのため、データ取得による挙動の定量的評価のみならず、室内実験・分析等を組み合わせ、予測モデリングに必要なメカニズムの解明を進めることが不可欠である。これまでの調査結果を踏まえると、河川水系における放射性セシウムの移動は、緩やかな長期的な減少が示唆される。避難指示解除区域を中心とした、地域住民の方たちの安全や安心に繋がる流域圏における放射性セシウムの動態に係るモニタリングを、今後中長期的にどのような枠組みでどのように継続的に進めていくのか、早急な検討が必要である。

－ 参考資料 －

- 1) 原子力機構「環境回復に向けた取り組み 福島環境安全センターの取り組み」<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/>
- 2) K. Iijima: Global Environ. Res., 20, 53-58(2016).
- 3) 飯島和毅：日本原子力学会誌, 57, 588-593(2015).
- 4) 国環研「研究・活動内容－環境回復研究(PG1)」<http://www.nies.go.jp/fukushima/act-pg1.html>
- 5) S. Hayashi: Global Environ. Res., 20, 45-52(2016).
- 6) T. Niizato, H. Abe, K. Mitachi, Y. Sasaki, Y. Ishii, T. Watanabe: J. Environ. Radioactiv., 161, 11-21(2016).
- 7) H. Kurikami, A. Malins, M. Takeishi, K. Sasito, K. Iijima: J. Environ. Radioactiv., 171, 99-109(2017).
- 8) 農林水産省「放射性セシウム濃度の高い米が発生する要因と

その対策について」<http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/kome.pdf>, 農林水産省ホームページ, 2014.

- 9) H. Kurikami, A. Kitamura, S.T. Yokuda, Y. Onishi: J. Environ. Radioactiv., 137, 10-17(2014).
- 10) H. Saegusa, T. Ohyama, K. Iijima, H. Onoe, R. Takeuchi, H. Hagiwara: J. Environ. Radioactiv., 164, 36-46(2016).

著者紹介



飯島和毅 (いじま・かずき)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)環境中・地下深部における放射性核種の移行挙動



林 誠二 (はやし・せいじ)

国立環境研究所
(専門分野/関心分野)水環境における溶存態放射性セシウムの挙動と生物移行特性



鶴田忠彦 (つるた・ただひこ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)流域圏・沿岸域、並びに深部地質環境における放射性物質の移動挙動

日本原子力学会誌「ATOMOS」アンケートのご案内

日本原子力学会
編集委員会

編集委員会では、多くの読者から意見を伺いその結果を記事企画に反映し、誌面内容の向上を図るため、2016年9月号より毎月、原子力学会会員を対象に学会誌「ATOMOS」のアンケートを実施しております。皆様の率直なご意見・ご要望をお聞かせください。

いただいた回答については集約した上で、学会誌で随時、紹介しております。会員の皆様からのご意見をお待ちしておりますので、ご協力をお願い申し上げます。

- アンケートは所要時間1分です。
- 毎月月初に、AESJ-NEWSで回答URLと回答期限のご案内をお送りしています。
- アンケートに関するお問合せ先
一般社団法人 日本原子力学会 編集委員会
学会誌編集長 佐田 務
E-Mail: q_atomos@aesj.or.jp

報告

福島県における東日本大震災に伴う関連死に関する検討

(公財)つくば科学万博記念財団 久保 稔, 関西大学 土田 昭司, 関西大学 静間 健人

2011年に発生した東日本大震災から6年が経過した現在でも関連死は福島県内では漸増している。本稿では、主に復興庁のデータを基に福島県における関連死の動向を分析した。その結果、(1)福島第一原子力発電所に近いほど関連死と認定された数が多いこと、(2)東日本大震災時において、高齢者であることが関連死の原因ではないことなどが明らかになった。従来、関連死の原因として、被災者は希望と生きる意欲を持っていない等のメンタル面で、精神的な負担が大きくなっていると指摘されている。そこで、孤独死の発生率を分析したところ、最近の東北3県の孤独死の発生率は上昇傾向にあった。関連死への対策が引き続き必要とされている。

KEYWORDS: *The Great East Japan Earthquake, Fukushima accident, Disaster-related death, Stigma, Risk communication, Care communication*

I. はじめに

災害関連死(以降、関連死という)はこれまでどのように着目されてきたのであろうか。過去の災害において防災白書¹⁾(内閣府)に「関連死」が取り上げられた事例を検索してみると、1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災以前には「関連死」の記述は見つからない。しかし、阪神・淡路大震災以降、新潟県中越地震、東日本大震災、広島豪雨、熊本地震等の災害が発生する度に「関連死」についての記述が多く表れている。

全国五大紙に「関連死」として掲載された記事について、記事データベース検索システムによれば、「関連死」という言葉が記載されている記事には以下のような掲載傾向があった。1992年1月1日から2017年5月15日までの約25年間の記事を対象として、一度以上「関連死」が使用された記事を1件とカウントしたところ、阪神・淡路大震災以前には、産経新聞及び毎日新聞が医療問題として3件のエイズ等の関連死を取り上げていたのみであった。しかし、阪神・淡路大震災以降に「関連死」の用語を含む記事数は増加した。さらに、新潟県中越地震、東日本大震災等の震災が発生する都度、「関連死」が大きく取り上げられた。特に、東日本大震災以降、「関連死」が多く取り上げられ、この10年間、「関連死」の記事掲載が急激に増えた。2016年4月に発生した熊本地震においては、1年経った現在でも「関連死」に関する記事



図1 新聞全国五大紙が掲載した関連死に関する記事件数²⁾ 1992年1月1日～2017年5月15日までの、五大紙(読売、産経、日経、毎日、朝日)の記事を記事データベース検索システムで分析・作成したものの。

が掲載されている。(図1)

ただし、全国五大紙では「関連死」について必ずしも明確な定義はなされておらず、火災・水難・家屋の倒壊など災害の直接的な被害による死と区別して、一般的には、地震や豪雨等による災害による被災のショックや避難生活の疲労が蓄積して体調を崩したり、持病が悪化したりして死亡する場合を関連死としている。東日本大震災以降、復興庁等によって定義されている関連死とも違いがある。

II. 東日本大震災の関連死

1. 東日本大震災に係る直接死と関連死

復興庁の関連死の定義は、建物の倒壊や火災、地震や津波による直接的な被害ではなく、その後の避難生活での体調悪化や過労など間接的な原因で死亡することとして

A study on Disaster-related death s associated with the Great East Japan Earthquake in Fukushima Prefecture: Minoru Kubo, Shoji Tsuchida, Taketo Shizuma.

(2017年8月5日 受理)

2. 福島県における関連死と原子力発電所

野口(2015)は、東日本大震災時の福島県内における関連死が、福島第一原子力発電所(以降、福島原発)の事故に起因することの可能性を指摘している⁶⁾。この指摘を踏まえ、福島県内の関連死の地域分布を調べると、関連死者数は東西方向の地域分布では福島県内の会津地区、中通り地区、浜通り地区(太平洋側)の順に多くなっている。また、南北方向の地域的な分布では福島原発が位置している中部地域が多く、北部、南部の地域が少なくなっている。概略的には、福島原発から離れるほど、関連死者数は少ない。(表2)

3. 年齢別関連死者

上田⁷⁾(2012)や三谷他⁸⁾(2014)は、阪神・淡路大震災や東日本大震災時には、高齢者の関連死が多かったことを指摘している。

確かに、東日本大震災における関連死者数を年齢別に分類すると、66歳以上の死者数は、3,183人であり、関連死者総数3,591人に対して88.6%を占めており、高齢者が多いことを示している。(表3)

しかしながら、毎年厚生労働省が実施している全国の人口動態調査⁹⁾によれば、年齢別の死亡者数は、2015年

には65歳以上は89.0%になっており、表3に示すように66歳以上の関連死者数の割合とほぼ一致している。従って、関連死者に高齢者が目立つものとはいえない。一般的には、震災時に高齢者が関連死する割合は多くなると思われているが、全死亡者数に対する高齢者の関連死者数が占める割合は特に多くなっていない。

Ⅲ. 関連死の原因及び今後の展望

1. 関連死に関する復興庁等の報告書の概要

復興庁を事務局として関係省庁を構成員とする検討会は2012年8月に、東日本大震災における関連死について、その原因を把握するとともに、講ずべき対応策等を取りまとめた¹⁰⁾。その報告書によれば、2012年3月31日現在で、全国の関連死者数が1,632人であり、関連死の死者数が多い市町村と原発事故により避難指示が出された市町村の1,263人を対象に、原因の調査を行った。

その結果、特に福島県における関連死の原因は、

- ①「避難所等における生活の肉体・精神的疲労」(約3割)
- ②「避難所等への移動中の肉体・精神的疲労」(約3割)
- ③「病院の機能停止による初期治療の遅れ等」(約2割)
- ④その他(約2割)

としている。

また、復興庁は、福島県では「避難所等への移動中の肉体・精神的疲労」による死亡者が多く、福島原発事故に伴う避難等の影響が大きいと分析している¹¹⁾。発災直後からの避難(移動)や避難生活による疲労、ストレス、運動不足、医療事情がもとで、徐々に衰弱した事例がほとんどであり、平均移動回数は7回であった。

2014年6月に開催した「第7回東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う住民の健康管理のあり方に関する専門家会議」で、環境省は、WHO福島原発災害の健康リスク評価報告書¹²⁾を説明し、リスク評価の概要の中で、原子力災害後、精神的な影響として、被曝の程度とその影響についての説明が理解しにくいことから、心理的影響が大きくなると考えられると指摘している。原子力災害後の社会心理的な影響が及ぶ地域は直接影響を受ける地理的範囲をはるかに超え、慢性的ストレスを訴える人々の数は極めて大きく、影響を受けた地域の住民に負わされる社会的汚名がこの問題を悪化させること、原子力災害後の精神的な影響が大きい、それらの影響の定量的な評価はされていないと指摘している。

2. 精神的疲労に影響する要因

宮崎ⁱ⁾(2013)は福島県においては当面急ぐべきことは関連死増加の歯止めであると主張している¹³⁾。原発事故に伴う大規模避難は、コミュニティの崩壊とともに高齢化の進行、人口の減少・分散、多世代・大家族同居の

表2 福島県内の関連死の地域的分布
(2017年3月31日現在) (人)

	会津地区	中通り地区	浜通り地区	合計
北部	0	37	576	613
中部	3	31	1,360	1,394
南部	0	3	137	140
合計	3	71	2,073	2,147

出典：東日本大震災における震災関連死の死者数(2017年6月30日、復興庁等発表)

表3 東日本大震災に伴う東北3県の年齢別関連死者数(*1)
(2017年3月31日現在)

	20歳以下	21～65歳	66歳以上	合計
岩手県	1	62	400	463
宮城県	2	118	806	926
福島	1	211	1,935	2,147
その他	3	10	42	55
合計	7 (0.2%)	401 (11.2%)	3,183 (88.6%)	3,591 (100.0%)
2015年の 全国年齢別 死者数(*2)	19歳以下 4,834 (0.3%)	20～64歳 137,644 (10.7%)	65歳以上 1,147,471 (89.0%)	合計 1,289,949 (100.0%)

出典：(*1)東日本大震災における関連死の死者数(2017年6月30日復興庁等発表)下段の()の数字は割合(*2)2015年人口動態調査(厚生労働省)下段の()の数字は割合

ⁱ⁾ 宮崎真 福島県立医科大学放射線健康管理学講座講師

暮らしが世代ごとに離散・核家族化，生活の都市化の流れを加速化した。先の見えない長期的な避難が，疲労感の増幅，地域コミュニティ力の低下を招いたと指摘している。

堀ⁱⁱ (2015)は震災後に南相馬市は急激に高齢化が進行したと指摘している¹⁴⁾。この原因として，若年層を中心に放射線の影響の懸念から避難生活を継続していることを挙げている。

堀は放射線の低線量被曝が想定される地域で暮らす精神的負担の主要なものを以下のように挙げている。

- ①突然に“放射線とその健康影響”という科学的な主題について学び，居住先の決定などの自分と家族の生活についての重要な決定を行わなければならない負担
- ②スティグマとセルフ・スティグマの負担。なお，スティグマとは，他者や社会集団によって個人に押し付けられた負の表象・烙印などのネガティブなレッテルのことであり，一方，セルフ・スティグマとは，自分の弱さ等から自分を価値の低い者とみなすことである。

- ③“あいまいな喪失”や重要な人や仕事・財産を失う“喪失体験”による負担。この「あいまいな喪失(ambiguous loss)」を「はっきりしないまま残り，解決することも，決着を見ることも不可能な喪失体験」と定義した。そして，通常の喪失と異なり，あいまいな喪失の中にある人は，その悲しみのために，「前に進むことができなくなってしまう」。(Boss¹⁵⁾(2000))

堀は以上の指摘に加えて，除染だけではなく，地域住民に対してリスクをどのように考えるのかについての一貫した方針が提示され，リスクコミュニケーションのための更なる努力が継続されるべきであると主張している。

筒井ⁱⁱⁱ (2016)は，福島県が経験した原子力災害の研究には心理学的に未解決な問題があり，被災者の精神的健康に被害が現れることが想定される事態を防ぎ，問題を取り除くための努力が専門家に求められると主張している¹⁶⁾。このように，原子力災害後の放射線の健康影響への不安に対して，科学的な説明だけではなく，心理学的側面でのケアが必要であるとしている。

3. 孤独死対策(精神的孤立対策)の重要性

田中他(2009)は神戸市における応急仮設住宅(1995~1999年)での孤独死の実態を通して阪神・淡路大震災時の仮設住宅での孤独死について研究調査を行った¹⁷⁾。神戸市内の孤独死者数は，1995年以降，入居者1万人当たり，9.9人から1999年には65.2人まで上昇したと分析した。仮設住宅での孤独死者数は入居者数の減少

ⁱⁱ 堀有伸 2012年4月に東京都から南相馬市に移住した精神科医

ⁱⁱⁱ 筒井雄二 福島大学共生システム理工学類，災害心理研究所

表4 東北3県における孤独死者数の推移

年度	県名	入居者数(人)	孤独死者数(人)(※3)	1万人換算(人)
2011年度末	岩手県	(※2) 30,755	5	1.6
	宮城県	(※1) 53,276	8	1.5
	福島県	(※2) 27,309	3	1.1
2012年度末	岩手県	(※2) 28,968	11	3.8
	宮城県	(※1) 49,376	16	3.2
	福島県	(※2) 32,567	11	3.4
2013年度末	岩手県	(※2) 25,619	6	2.3
	宮城県	(※1) 42,310	23	5.4
	福島県	(※2) 31,520	12	3.8
2014年度末	岩手県	(※2) 21,530	11	2.3
	宮城県	(※1) 33,915	15	4.4
	福島県	(※2) 28,036	18	6.4
2015年度末	岩手県	(※2) 15,776	5	3.2
	宮城県	(※1) 22,385	22	9.8
	福島県	(※2) 22,679	22	9.7

出典：(※1)宮城県の仮設住宅入居者数に関するデータは東日本大震災復旧・復興支援みやぎ県民センター 東日本大震災 5年宮城の復旧・復興の現状と「創造的復興」¹⁹⁾(※2)岩手県及び福島県の仮設住宅入居者数に関するデータ²⁰⁾は岩手県復興局生活再建課及び福島県災害対策本部土木課(※3)孤独死者数は岩手日報が岩手，宮城，福島県警の情報を基にしたもの¹⁸⁾

とともに，1997年をピークに減少するが，発生率という点では一貫して上昇を続けたと結論付けている。

岩手日報では2016年3月1日付けの新聞¹⁸⁾で東北3県(岩手県，宮城県，福島県)の各県警からの情報として，孤独死者数が2011年の16人から49人に増加したことを取り上げている。これらの数字を基に入居者数1万人当たりの孤独死の発生率を計算した。(表4)

応急仮設住宅における1万人当たりの孤独死の発生率は2011年から2015年まで，岩手県で1.5から3.2，宮城県で1.5から9.8，福島県で1.1から9.7と上昇傾向にある。東日本大震災時の東北3県(岩手県，宮城県，福島県)の孤独死者数は阪神・淡路大震災時の孤独死者数よりも減少した。しかし，東日本大震災時の孤独死の発生率が阪神淡路大震災時の孤独死の発生率の上昇と同じ傾向にあり，孤独死対策を今後も十分に検討する必要がある。

4. まとめ及び今後の展望

東日本大震災から6年経った現在でも関連死は若干の減少があるものの，今も続いている。特に，福島県の福島原発に近い地域では，福島原発事故からの放射能汚染等による不安・ストレス，不十分なインフラ整備等から，家族と共に帰還したいにもかかわらず，未だに帰還を難しくしている。

震災時に高齢者の関連死が多いことが指摘されてきたが，全死者数に対する高齢者の死亡者数の割合に比べ高齢者の関連死者数が特に増加したとはいえなかった。

被災者は高齢化の進行、避難生活が長引いて、将来生活の展望が見えないこと、家族と一緒に住めないことなど、希望と生きる意欲を持っていない等のメンタル面で、精神的な負担が大きくなっている。原子力災害後の精神的な影響についての定量的な評価を含めた総合的な分析と対策が重要である。また、実効性のある、被災者の気持ちに添ったきめの細かいリスクコミュニケーションやケア・コミュニケーションの更なる努力が必要である。

阪神・淡路大震災時に比べて、東日本大震災時の孤独死の発生率は関係者の努力もあり、低い。しかしながら、東北3県の孤独死の発生率は現在上昇傾向にあり、孤独死対策も忘れてはならない課題である。

－ 参考資料 －

- 1) 内閣府 防災白書 1998～2016年.
- 2) 読売新聞, 産経新聞, 日経新聞, 毎日新聞, 朝日新聞に掲載された関連死に関する記事 1992年1月1日～2017年5月23日.
- 3) 警察庁 東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置(2016年12月9日, 警察庁発表)2016年.
- 4) 復興庁等 東日本大震災における震災関連死の死者数(2017年6月30日復興庁等発表)2017年.
- 5) 東京新聞「震災関連死 認定に差」2014年3月10日 <http://www.tokyo-np.co.jp/feature/tohokujisin/archive/threeyears/140311-12.html> (2017年7月1日アクセス).
- 6) 野口典子 3.11「震災関連死」という問い 中京大学現代社会部紀要第8巻第2号 2015年.
- 7) 上田耕蔵 東日本大震災, 医療と介護に何が起こったのか—震災関連死を減らすために— 萌文社 2012年.
- 8) 三谷智子, 村上由希, 今村行雄 阪神・淡路大震災, 東日本大震災の直接死・震災関連死からみる高齢者の脆弱性(日本保健医療行動科学会雑誌 29(1) pp.23-pp.30 2014年).
- 9) 厚生労働省 人口動態調査 2015年.
- 10) 復興庁 福島県における震災関連死防止のための検討報告 2013年.
- 11) 復興庁 東日本大震災における震災関連死に関する報告 震災関連死に関する検討会 2012年.
- 12) 環境省 WHO 健康リスク評価報告書におけるリスク評価の概要 第7回東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う住民の健康管理のあり方に関する専門家会議 資料4 pp.17-pp.18 2014年.
- 13) 宮崎真 原発事故に伴う放射線に対する健康不安に対応するための保健医療福祉関係職種への支援に関する研究(—福島県内の活動—)厚生労働科学研究費補助金 厚生労働科学特別研究事業 平成24(2012)年度 総括・分担研究報告書 pp.22-pp.33 2013年.
- 14) 堀有伸 南相馬市における被災者の心のケアから見えてきたもの Isotope News 2015年2月号 No730 pp.31-pp.35 (公社)日本アイソトープ協会 2015年.
- 15) Pauline Boss Ambiguous Loss- Learning to Live with Unresolved Grief- Harvard University Press 2000.
- 16) 筒井雄二 原子力災害が引き起こす心理的影響—福島県が経験した原子力災害の5年間 機関誌「心理学ワールド」72号 pp.10-pp.12 日本心理学会広報誌 2016年.
- 17) 田中正人, 高橋智香子, 上野易弘 被災市街地における住宅セーフティネットの構築に関する研究 住宅総合研究論文集 No.36 2009年度版 pp.363-pp.374 2009年.
- 18) 岩手日報 仮設の孤独死3県で188人昨年末まで, 本県38人 2016年3月1日 http://www.iwate-np.co.jp/cgi-bin/news.cgi?sh=20160301_2 (2017年7月25日アクセス).
- 19) 東日本大震災復旧・復興支援みやぎ県民センター 東日本大震災 5年 宮城の復旧・復興の現状と「創造的復興」 2016年6月19日.
- 20) 岩手県復興局生活再建課 応急仮設住宅, みなし仮設住宅の被災者の状況(2011～2015年度). 福島県災害対策本部 応急仮設住宅・借上げ住宅・公営住宅の進捗状況(東日本大震災)(2011～2015年度).

著者紹介



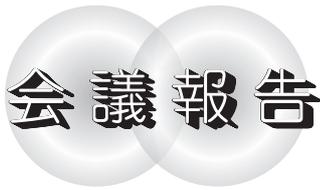
久保 稔(くぼ・みのる)
(公財)つくば科学万博記念財団
(専門分野/関心分野)核燃料輸送, リスク
コミュニケーション論



土田昭司(つちだ・しょうじ)
関西大学
(専門分野/関心分野)リスクコミュニケーション論・社会心理学



静間健人(しずま・たけと)
関西大学
(専門分野/関心分野)リスクコミュニケーション論・社会心理学



原子力施設の廃止措置ワークショップ報告

Workshop on decommissioning of nuclear facility

2017年7月25日(東京大学 武田先端知ホール)

日本原子力学会標準委員会廃止措置分科会(分科会)の主催で原子力施設の廃止措置ワークショップ(WS)を開催したので報告する。

WSは、7月25日に東京大学武田先端知ビル5階武田ホールで開催した。10時から17時までの長丁場ではあったが、主催者の想定を3倍以上も上回る170余名もの参加者を得て活発な討論を行うことができた。

WSでは、(1Fを除く)通常の手続きに従って廃止措置を行っている又は行おうとする原子力施設に焦点を絞り、プロジェクトマネジメント(PM)の観点から安全かつ効果的、効率的な廃止措置の計画及び実施について討論を行うことを目的とした。

WSの冒頭に、文部科学省西條原子力課長と経済産業省資源エネルギー庁松野原子力政策課長の御両名からご挨拶をいただき、続いて分科会主査の岡本教授が、WSの趣旨説明と国内の廃止措置の概要に関する講演を行った。

その後、「マネジメントとしての原子力施設廃止措置」と「様々な原子力施設廃止措置と廃棄物処分」の2つのテーマについて8件の講演があり、最後に原子力規制庁青木審議官に規制の取り組みに関するご講演をいただいた。

WSのプログラム(講演タイトルと講演者)は以下の通りである。また、講演終了後に1時間という短い時間ではあったが討論の時間も設け、喫緊の課題について意見交換を行った。

<プログラム>

開会挨拶 文部科学省(西條原子力課長)

開会挨拶 経済産業省(松野原子力政策課長)

Session 1 マネジメントとしての原子力施設廃止措置

1-1 廃止措置総論 岡本(東京大学)

1-2 廃止措置標準作成活動 田中(IAE)

1-3 日本と海外の廃止措置の主な相違 林道(IAE)

1-4 米国における廃止措置の現状 C.Austin
(EnergySolutions)

Session 2 様々な原子力施設廃止措置と廃棄物処分

2-1 浜岡1号機、2号機 仲神(中部電力)

2-2 もんじゅ・ふげん 伊藤(JAEA)

2-3 再処理施設 大森(JAEA)

2-4 低レベル廃棄物処分 大浦(電事連)

2-5 廃止措置の課題と提案 山内(日本原電)

2-6 廃止措置/廃棄物処分規制の取組み 青木審議官
(原子力規制庁)

現在、分科会では廃止措置の計画に係る標準の改定及び安全評価に関する標準並びに施設の特性調査に係るガイドの新規制定を進めている。この活動では、廃止措置に係る国際的な安全要件への準拠を前提とし、IAEAの安全要求の体系に基づき、国内の実情に即した標準類の制定を進めている。原子力施設のライフサイクルの最終段階である廃止措置の特徴、特に、運転中との違いを明確にし、廃止措置にふさわしい安全確保のための要求を標準に規定していく方針である。

安全確保のために過度の施策を行うことは、資源投入のアンバランスを生じさせ、却ってリスクを増大させてしまうことがある。廃止措置では、リスクの変化(低減)を的確に把握し、適切な安全かつ効果的、効率的な施策を講じていくことが必須の事項である。海外の先行事例は、工事の進捗と共に変化する廃止措置対象施設の状況を的確に把握し、適切なPMを行っていく重要性に示唆を与えていた。特に、Austin氏の「廃止措置対象は低レベル廃棄物の塊に過ぎない。」という発言はやや極端ではあるものの、廃止措置の本質を言い得たものであろう。

国内では、原子力発電所の他、JAEAの核燃料取扱施設や再処理施設が廃止措置段階にある。いずれの施設においても、施設の特徴や汚染の特性に基づき廃止措置が計画され実施されている。本WSを通して明らかになった原子力施設の廃止措置に共通した課題は次の通りである。

(1) 廃止措置に係る意識の変換

廃止措置の推進側、規制側共に、廃止措置施設の特徴や特性、リスクの変化を理解し、状況に応じたPM又は規制の実施、すなわち、具体的にはグレイデッドアプローチの適用を確実にしていくこと。また、廃止措置に関する積極的な情報提供により地域の理解を醸成すること。

(2) 廃止措置で発生する廃棄物等の取扱い

現行の放射性廃棄物の処理処分制度、クリアランス制度及びNR(Non-Radioactive materials)制度のリスクに応じた運用上の合理化と処分先及び再利用先の確保。

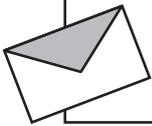
(3) 廃止措置を完遂するための資源の確保と維持

長期にわたる事業を維持していくための資金の確保と維持の施策。技術、知識の伝承を踏まえた継続的な人材確保と育成。廃止措置における資金と人材の適切な配分に係る知見の蓄積。

(エネルギー総合工学研究所 田中健一、

2017年8月31日記)

理事会だより



大学での原子力教育を考えて

今年度平成 29 年度から、主に九州支部会員の方々から推薦いただき、理事会に参加させていただいています。まだ原子力学会理事会に入って 3ヶ月程度であり、理事会だよりによりに仕事内容を紹介するには至りませんので、わたくしがこれまで関わりました大学での原子力教育の状況について、考えてみたいと思います。

原子力工学、放射線・量子ビームの利用・測定、核燃料サイクル等を専門に教育する原子力(核)工学科の変遷は全国的に似た経緯を経て現在に至っています。それまでであった各大学個別の研究室を核にして、1960 年頃から 1970 年頃にかけて全国 9 大学に原子力・放射線工学を専門に教育する原子力(核)工学科や原子力(核)工学専攻が設置されました。これはちょうど日本の原子力発電開始時期と歩調を合わせます。約 30 年経過後、エネルギー多様化の中で原子力を考えるという位置づけと重なりますが、それまでに設立された原子力関係学科や専攻が、1993 年頃から 1998 年頃にかけて名称や組織変更され、各大学の状況に応じ、例えば理工工学科や電気電子情報工学科の一部近接学科と複合した学科を構成しています。その動きは、2010 年頃から最近でも改組が行われている大学もあり、現在ではさらに多くの私立大学を含めて原子力や放射線利用の関連分野の教育が広く行われています。

九州大学でも、1967 年に応用原子核工学科が定員 40 名で工学部に設置され、それまでにあった Co-60 照射施設、コッククロフト加速器施設に隣接する場所に建物が建設され、RI と核燃料の取扱施設も整備されました。1971 年に大学院応用原子核工学専攻が設置され、その後応用原子核工学科は、1998 年に定員 100 名のエネルギー科学科の一コースに組織変更され、広く原子力工学分野の教育は、プラズマ・核融合、環境、先進材料、計測分野等を専門とする総合理工学研究院の講座と協調して、学部教育が行われています。現在エネルギー科学科卒業生は、多くエネルギー量子工学専攻と総合理工学府 4 大学院専攻研究室に進学しています。

教育内容も、分野研究内容の進展や多様化とともに、現状で最も必要な教育内容に合わせて変化しています。例えば、原子力発電の内容も、学部 4 年生あるいは大学院修士課程でおこなわれ、学生がエネルギーベストミックスの内容、少なくとも 40~50 年先を見通した安定エネルギー資源のための選択がおこなえるように教育がなされている様に私自身は考えています。

原子力と深く係わる放射線・量子・電子ビーム利用・測定、量子線計測、エネルギー工学、熱流動、核燃料サイクル、プラズマ・核融合、高温・高エネルギー対向材料、保健物理、加速器ビーム、高温プラズマ状態物理・核融合エネルギー利用等の関連する教育は、一つの専攻内のみではなく、大学院の講座単位や教育分野体制で実施され、学生が関係ある分野、興味ある分野を選択し、内容が進歩し変遷しても、それに応じて勉強できる様になっています。原子力学会の九州支部会としても、他の 8 支部会と同様に毎年講演会、支部発表会、小学生から一般向けオープンスクール等を実施し幅広く理解が進むよう活動しています。

放射線の発見から約 120 年、米国で世界最初の原子炉臨界達成から 75 年が経過し、日本でも 1970 年に最初の商業用原子炉である美浜 1 号機が運転開始され、エネルギー供給の一翼を担い、現在も九州電力川内原子力発電所で 2 基、関西電力高浜原子力発電所で 2 基が運転中で、四国電力伊方発電所を始め、すでに再稼働していたり定期点検中の原子炉もあります。福島第一原子力発電所廃炉処理に今後数十年が必要とされ、原子力教育の必要性が継続し、教育内容を最新技術の変化に対応させ、技術進化に応じて教育内容とシステム内容を変化させる事が必要です。私自身高校生のとき、大阪万博で原子力による発電を知り、まだ日本で原子力教育が始まった頃の感覚が生々しい時期、第一次第二次オイルショック後のエネルギー安定供給政策の重要性について、十分理解しています。現在日本のエネルギー自給率 6% の非常に不安定な基盤の上に立っている状況は、昔も今も変わりません。CO₂排出削減やエネルギー経済性を総合的に考慮したエネルギーベストミックスの議論を通し、将来の日本の私たちの生活が苦境にならない様にすることが必要だと思います。

日本の将来のエネルギー政策や、原子力への依存度について、現在様々な議論の争点になっていますが、主にエネルギーの安定供給、今後の原子力安全性への監視体制を強化するとともに、エネルギー基盤技術の信頼性を得るための努力を怠らず、原子力に関係する教育分野の一つに携わる人間として、できる範囲ではありますが、努力したいと思っています。(理事 深田 智)

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