

巻頭言

1 知る権利と説明責任、そして納得感

櫻井敬子

時論

2 原子力災害の被害を最小にとどめる対策 —日本の科学者コミュニティの合意形成と社会への助言

原子力を利用すれば、原子力災害は起こり得る。それに備えて被害を最小にとどめる対策を準備すべきである。

長瀧重信

4 新しい米韓原子力協定

新協定では再処理の研究に対する規制が一部、緩和された。

遠藤哲也

解説シリーズ 原子力安全のための耐津波工学の体系化(4)～(6)

30 津波の作用と津波防御に関する工学的 手法

原子力発電所では津波作用の評価を行った上で、防御のための技術や工学的対応を行う必要がある。深層防護の概念規定から発電施設の要求性能をまとめ、レベルに対応した津波制御方法の考え方を提案した。

今村文彦, 越村俊一

35 津波フラジリティ解析と耐津波工学 関連の解析コード

原子力発電施設の津波フラジリティは、原子力発電施設を襲う津波の発生頻度を代表する津波ハザードとの組み合わせによって、施設全体のリスクを求めるために使用されるものである。ここでは、その定義について述べたのちに、解析における特徴について、地震フラジリティとの違いを意識した解説を行う。

香月 智, 松山昌史

41 施設周辺地域における防災・減災対策 の推進とリスクコミュニケーション

東日本大震災の巨大津波を受けて、二段階の津波規模が設定され、具体的な防災・減災計画が策定される。原子力施設周辺地域では施設事故への対応も考慮する必要があるため、事前の対策がさらに重要となることを指摘した。

佐藤慎司, 山田博幸

解説

19 原子力を取り巻く世論の状況と情報提供のあり方についての考察

日本原子力文化財団による「原子力利用に関する世論調査」の結果を紹介し、今後の原子力やエネルギーに関する情報提供のあり方について考察する。

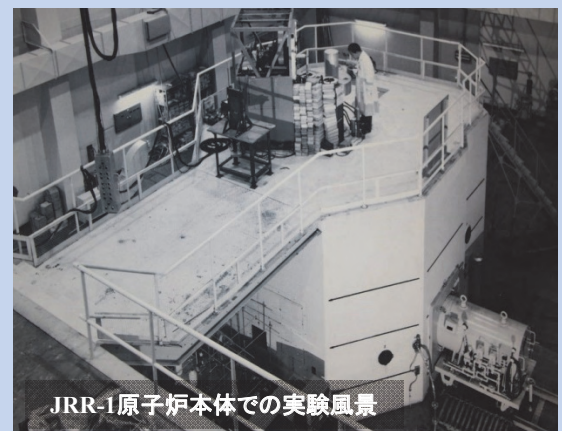
木村 浩

解説 「匠」たちの足跡 8

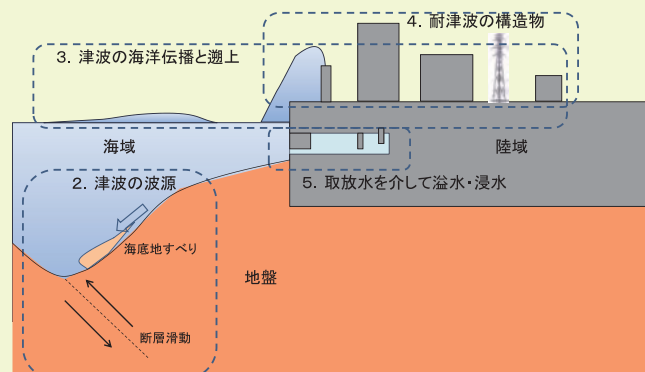
12 研究用原子炉の歴史を顧みて(上) —第一歩を踏み出した JRR-1 と本格的な多目的利用の JRR-2

日本原子力研究所は昭和 30 年代に研究用原子炉の建設・運転・利用を始め、さまざまな知見や多様な経験を入手した。ここでは、わが国初の原子炉 JRR-1 と本格的な多目的原子炉利用の中心であった JRR-2 について紹介する。

飯島 勉, 宮坂靖彦, 白井英次



JRR-1原子炉本体での実験風景

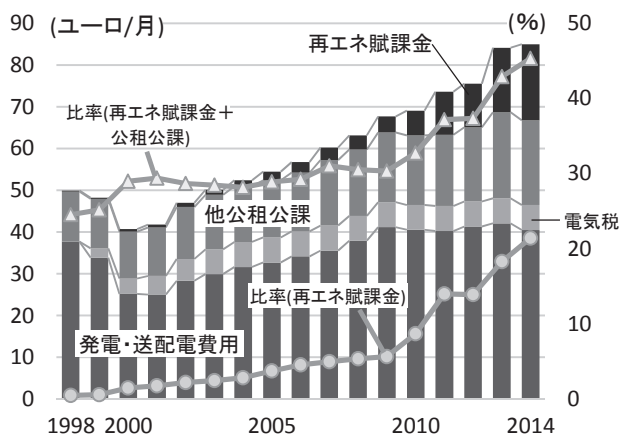


津波の挙動と解析コード分類

24 再生可能エネルギー普及に向けた課題

再エネ電力の固定価格買取制度 (FIT) により、わが国では太陽光発電が急速に増加したが、買取費用増加等のリスクが懸念されている。FIT で先行している欧州は電気料金上昇、火力発電の不採算化と廃止に見られる電力供給信頼度確保の問題に直面している。

小宮山涼一



* 比率(再エネ賦課金)、比率(再エネ賦課金+公租公課)は右軸を参照

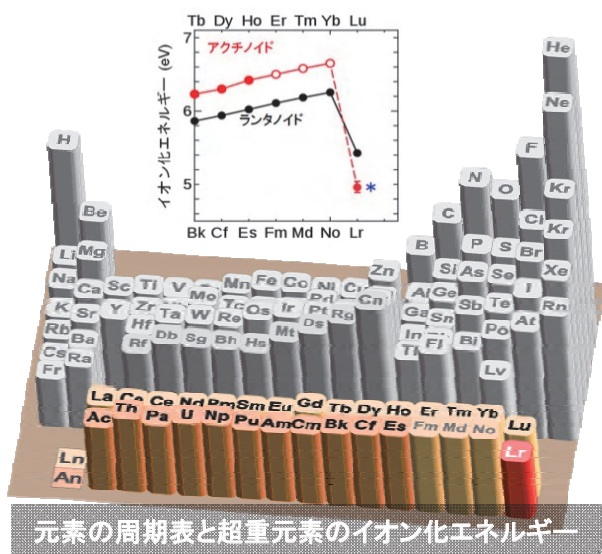
ドイツでの家庭用電気料金(月額)の推移

サイエンスよみもの

51 103 番元素が解く、周期表のパズル ローレンシウムのイオン化エネルギー測定に成功

核反応によって人工的に作られる超重元素の性質はこれまで、ほとんどわかっていなかった。そんな超重元素の一つであるローレンシウムの性質の一端がこのほど、明らかになった。

佐藤哲也



元素の周期表と超重元素のイオン化エネルギー

6 NEWS

- 学会秋の大会、知の統合や廃炉テーマに
- 非会員・女性原子力業務従業から見た学会とは
- 研究炉に関する検討で提言へ
- 檜葉町の避難指示を解除
- 2016 年度予算、概算要求が出そう
- 再処理事業の実施主体を「認可法人」に
- 海外ニュース

解説シリーズ 意思決定プロセスとしてのリスク コミュニケーション(3)

46 リスク・コミュニケーションの現場から

東海村で10年以上、現場視察を軸としたリスク・コミュニケーション活動を進めてきた。事業者が住民の理解度や関心事を把握できていない点が、リスク・コミュニケーションの障害の一つとなっている。

土屋智子, 服部成雄

談話室

55 地球温暖化解決に向けた日本の原子 力専門家の役割—化学工学会のエネ ルギーロードマップ作成に参加して

関本 博

会議報告

57 第23回原子力工学国際会議 (ICONE-23) 報告

高瀬和之

理事会だより

58 福島復興

- 18 新刊紹介 秋江拓志
- 45 From Editors
- 59 会報 原子力関係会議案内、寄贈本一覧、新入会一覧、「2015年 秋の大会」学生ポスターセッション、受賞者一覧、英文論文誌 (Vol.52, No.11) 目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「目安箱」(<https://ssl.aesj.net/publish/meyasubako>)にお寄せください。

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

知る権利と説明責任，そして納得感

巻頭言



学習院大学教授

櫻井 敬子 (さくらい・けいこ)

東京都大学大学院法学政治学研究科博士課程修了。
ハイデルベルク大学税財政法研究所客員研究員，内閣府参与等を経て，2003年より現職。専門は行政法。

原子力事業者は官と民の性格を併せ持つ独特の存在といつてよいが，公益事業を担う主体として，国民に対して重い責任を負っている。とくに，2011年3月11日の福島第一原発事故の後，その責任は格段に緊要度を増しており，事業のプラス・マイナス両面につき，どのような形で情報発信を行っていくかは，その絶えざる課題となっている。

説明責任(accountability)という言葉がもともと会計上の専門用語であることはよく知られているが，最近では，この言葉は官民を問わず，ほとんどすべての主体に対して責任を追及する場面で用いられる。その契機となったのは，1999年に制定された情報公開法1条の目的規定において政府の「国民に説明する責務」が明文化されたことである。ここにいう政府の説明責任とは，憲法にいう国民主権の理念から導かれるものであり，その含意は，主権者である国民が国政上の重要問題について適切な判断を下すためには，判断の前提となる有意な情報が適時適切に提供されなければならないという点にある。その後，民間企業であっても，不祥事が起きればその説明責任が要求されるという構図も生まれ，これに伴い，説明の相手方も，国民，住民，株主，債権者などの具体的な利害関係者を超え，マスコミや社会全体，ときには国際社会にまで大きな広がりを見せている。

説明責任の構造に関わるが，情報公開法の制定過程においては，情報公開の目的について，「国民の知る権利」と書くか，それとも「政府の説明する責務」として書くかという対立軸の中で，最終的に後者が選択されたという経緯がある。ロッキード事件以来のコンテクストを意識して，憲法論として「知る権利」を主張する立場からすると不満の残る顛末であったことは想像に難くない。行政サイドが「知る権利」と表記した場合の濫用の弊を警戒したことは事実であるが，他方で，行政実務を多少でも知る者からすると，当時，知る権利なる概念にはまだ成熟感がなく，なまじ抽象的に「知る権利」を掲げると，単なる政治的スローガンとなって法文が空振りしてしまう公算が高く，むしろ，着実に情報公開を定着させるには，公務員ないし政府の「行為規範」として「説明する責務」をセットした方がより実効性があると考えられたことを指摘しておくべきであろう。現在でも情報公開法には知る権利という表現は入っていないが，今日における説明責任という用語のインパクトと定着度を見る限り，このような選択はあながち的外れではなかったように思われる。

説明責任をめぐる近年の新たな問題は，説明をした結果どうなるかという「その後の展開」，別言すれば，説明責任がいつの時点で果たされたことになるのかという点に向けられている。説明するのは相手に理解してもらうためであるから，その根底には，言葉を尽くして説明すれば，積極的な賛意が得られないまでも，概ねわかってもらえるはずだという，予定調和的な発想がある。しかし，これは，法が一般に想定する近代合理主義的な人間同士の関係を想定して初めて成り立つ，ある種の共同幻想なのであろう。現実の人間は，説明する方も，される方も，日々の生活に追われ，しがらみに捉われ，私利私欲から自由でなく，感情的で，不条理な，しかも弱い存在である。説明の仕方に問題があることも多いが，だからといって説明される方も無限責任を追及できるわけではない。ありのままの人間像を前提とした場合の説明責任の果たし方とはどのようなものか，そして，どうしたら受け手に生の納得感を持ってもらえるかという問題が，様々な場面で，日々，問われている。これは，原子力事業者のみならず，現代法律学の課題でもある。

(2015年8月3日記)



原子力災害の被害を最小にとどめる対策

日本の科学者コミュニティの合意形成と社会への助言



長瀧 重信 (ながたき・しげのぶ)

長崎大学名誉教授，放射線影響協会理事
長

東京大学大学院修了，医学博士。長崎大学教授，放射線影響研究所理事長などを経て2013年から現職。放射線の健康影響についての国際的な科学的合意に深く関わってきた。

はじめに

「原子力を利用すれば，原子力災害は起こり得る」ということが福島の大きな教訓である。起こり得る原子力災害に備えて被害を最小にとどめる対策を準備することが必須であるということも教訓として学んだ。災害発生以来4年6カ月が経過した現在，福島の災害の経験を基に，原子力災害の被害を最小にとどめる対策を考えてみたい。もちろん，この時論で全ての対策を語る紙数はない。いくつかの事例を取り上げて問題点を明らかにし，日本の科学者コミュニティの合意形成と社会への助言の意義について述べることにする。

緊急時の対応

避難，退避，安定ヨウ素剤：どの範囲の住民が，どのくらいの時間をかけて，どの方向に，どのような手段で，どの場所に避難するか，あるいは一定期間退避が必要か，どのように退避するのかを，対策本部の責任者が格的に指示することが必須であり，医療まで含めて円滑に避難できるような体制ができていなければならない。一方避難指示を出すための環境放射線の地上と航空機からの測定と測定結果の即時公開も必須であり，安定ヨウ素の投与方法も¹³¹Iプルームの動きから，どのくらいの期間(1回から数週間もあり得る)，どのくらいの量を，どのくらいの頻度で服用させるかという指示も必要である。さらに福島の教訓として，住民の将来の甲状腺癌の可能性を考慮し，事故後の甲状腺の¹³¹Iの摂取量を地域別に十分な数の子供で測定した記録を残すべきである。避難所における医療も含む引き受け体制も前もって企画しておかなければ確実な対応は不可能であろう。

現存被曝時の対応

避難と帰還，移住の決定：避難とは一時的な現象で数日，数週間から数カ月で帰還するという概念である。¹³¹Iのプルームが通り過ぎた後は，あるいは環境放射線が避難の基準の線量以下になった時には，避難しなかつ

た住民と同じ条件になったので，避難する根拠はないとして帰還し，避難しなかった住民と同じように自ら除染するという構図も存在する。帰還して非避難地域の住民と同じように，除染を続け，参考レベルを次第に下げても1mSvに近づけるのである。一方，環境放射線が避難の基準線量以下にならない期間が長いと予想される場合には，避難ではなく移住として対策を考えるという避難と移住の概念がある。

福島では避難した後は，環境放射線の追加分が年間1mSv以下にならないと帰還できないという風潮であり，4年半たった現在も避難が続いている。環境放射線が避難勧告レベルにまで減少すれば，帰還して非避難地域の住民と同じように自ら除染を行うのか，あるいはいったん避難したら1mSvになるまで国が除染するのを待って帰還するのかについては，福島の現状を教訓として，今後の災害の対策として，国，自治体，住民など関係者が学識専門家を交えて冷静に，「被災者の健康被害を最小にする」という視点から十分に議論をすべき重要な問題である。

除染：福島を経験し，セシウムの人体内の動態に加えて，植物，土壌の中での動態についても幅広く知見が得られている。事故の初期の知識とは格段に違う。まず，避難，帰還などの議論に従って除染の目標を決め，そのうえで，宅地，農地，山林等による除染の有効な方法の検討，たとえば農地における土地の上下のひっくり返し(反転耕，深耕)なども対象に，現在のように表層を削り取る除染以外の方法も考慮に値するかどうか，十分に議論して今後の対策に備えるだけの知識は獲得していると信じている。

被災住民の健康管理

被曝線量測定：健康管理の基礎は被曝線量である。混乱の中で測定法を模索するのではなく，前もって健康管理に必要な測定を想定し，たとえば半減期を念頭に測定する時期を明確に，外部被曝，内部被曝とも測定の対策

を立てておく。そして、被曝線量推定に必要な環境放射線の測定は可能な限りの方法で期間にとられず正確を期することが原則である。被曝のないところには被曝の影響もないという定量的な健康影響の考え方の啓発もその対策の重要な事項である。

被曝者、被災者に対する健康検査：放射線の影響が怖いということだけから検査を行うことは決して被災者のためにならないことを銘記すべきで、健康検査の目的を推定された被曝線量から検討することが基本である。大量に被曝した場合には影響は数週間以内に出現するのに対し、低線量の被曝の影響は数年たつてからはじめて出現し、その影響例えば甲状腺癌は、一人の患者さんをいくら調べてもその原因が放射線であると決めることは不可能である。原因を確かめるためには、現在は疫学的調査しか方法はない。この現状を理解したうえで、健康検査の目的を議論することが必須である。その際、スクリーニング的な検査の功罪についての対話も欠かせない。被災者の受診の自由、個人情報の保護と同時に疫学調査の科学的信頼性がどこまで必要かという議論も避けては通れないし、差別につながる不利益、被災者の心理的影響も大きな問題である。あらゆる意味で被災者の不利益にならないような配慮を忘れてはならない。

日本の科学者コミュニティの反省

福島原発事故後の放射線健康影響に関しては、様々な科学者、専門家の意見が、対立したまま主張されている。さらに、科学者間の議論に加え、それぞれの意見に科学者ではない一般の支援者が存在し、自分が賛成する科学者を支援し、反対する科学者を誹謗している。また、個人的な科学者の意見が、科学者コミュニティの中での中立的な科学的な発表、討論、さらに評価の過程を経ることなく直接社会に発表され、報道されてきたことが、この4年間の混乱の大きな要因であると思われてならない。日本の科学者は深刻な反省のもとに、日本の科学の総力を結集して一つの合意した科学者の声として社会に対しての助言を行う時期であるとの自覚を持つべきではないかと考える。

日本の科学者コミュニティの合意と助言

被曝線量のモデルによる推定、個人の実測値、不確実性も含めた総合的な被ばく線量に基づき、今まで数十年にわたって蓄積されてきた科学的な知識を利用して放射線の健康影響を推定するという科学的な思考過程、思考の結果を日本社会が共有することは、日本の科学者コミュニティの重大な責任である。日本の科学者コミュニティは科学の能力を結集して合意した声として社会に助

言し、科学者の同意の助言が、社会から信用されるようになる努力も当然科学者コミュニティの責任である。

放射線影響に関する科学者の合意と助言は誰のためか
筆者は、核兵器廃絶と世界恒久平和の実現に寄与することを理念とする長崎平和推進協会の理事長を務め、また原爆被曝者の健康影響を科学的に追及する放射線影響研究所の理事長も務めたが、被曝者を取り巻く様々な社会的な運動、反原爆運動、原子力利用に関する賛否の運動などから被曝者、最近では被災者を守るということが、我々科学者の義務であるという気持ちになっている。そして科学者、医学者の一員としての筆者の責任は、医学的な放射線の健康影響の知識を記録して、後世に伝えること。その知識が原爆被曝者、放射線被曝者、すべての被災者の健康管理、健康維持、そして、福祉に役立つこと。最後に、原子力利用に関する賛成・反対の運動から被災者、被害者を守る。端的には、健康影響の主張を、自然科学的な医学的な健康影響の主張とし、被災者の健康被害をあらゆる意味で最小にすることと考えている。

精神的社会的な影響を通じての放射線の健康影響

放射線の身体的影響に比べて、精神的社会的な影響を通じての健康影響は、より複雑な因子が絡まり、事故に関しての総合的な対応が必要である。そして現在の福島では、放射線の身体的な影響はほとんど予想されず、問題の大部分は精神的社会的影響を通じての健康影響である。ここでは全ての利害関係者(ステークホルダー)が対話を続けながら対策を決定していくことが原則であり、リスクコミュニケーションが大きな手段となる。その対話の中に、日本の科学者の総力を挙げた放射線の生物学的影響の合意と助言が堂々とした位置を占めることが重要であり、利害関係者の全てが科学者の一致した合意と助言を共有しながら対話を続けることが、今後の復興に必要であると思われる。

終わりに

「原子力を利用すれば、原子力災害は起こり得る」、そして、起こり得る原子力災害に備えて被害を最小にとどめる対策を準備すべきであるという方向で、日本の科学者コミュニティは合意した声として社会に対しての助言を行う時期であると述べてきた。

日本は原爆の被爆国として、さらに原発事故を経験した国として、「原子力災害による被害を最小にする災害の対策」を世界に堂々と発信できることを願っている。

(2015年8月26日 記)



新しい米韓原子力協定



遠藤 哲也 (えんどう・てつや)

在ウィーン国際機関政府代表部初代大使，国際原子力機関理事会議長，外務省科学技術審議官，原子力委員会委員長代理などを経て，日本国際問題研究所特別研究員

新協定の署名

5年間の厳しい交渉の結果，去る6月15日に新しい米韓原子力協定が正式に署名された。韓国の方はこの種の協定は国会の承認を必要としないが，米国の方は原子力法(1954年)の規定(第123条)により議会に90日間(議会日)上程し，その間に不承認決議がない限り可決されることになっている。オバマ大統領は，翌6月16日に協定を連邦議会に提出した。9月にはイランの核合意が審議されるので，米韓協定がとりあげられるのは，その後となる。

これまでの米韓原子力協定(1973年に締結，74年に一部改正，2014年3月に新協定交渉中とのことで，二年間単純延長。従って期限は2016年3月まで)は，1968年の日米原子力協定とほぼ identical といってもいい位であった。例えば，核燃料サイクルについて，濃縮は双方とも規定なし，再処理はいずれも共同決定が必要なことが規定されていた。使用済燃料の管轄外移転は米国に規制権のあることが規定されていた。日本については，1988年の協定によって包括事前同意が認められたが，韓国も同様の取り扱いを強く要求していた。

米韓交渉における韓国側のねらい

韓国は，世界第5位の原子力発電を持つ原子力先進国として核燃料サイクルの確立は是非とも必要であり，韓国の主張する「核主権」の一部として強く要求し，大統領レベルの問題となっていた。また，実際上も国土のせまい韓国として使用済燃料の処理に困り始めており，リ・ラッキング等で対応しているものの，あと10年位つまり2020年代には貯蔵庫が満杯となるおそれがあるので，再処理によって高レベル放射性廃棄物の減容をはかる必要性を痛感していた。

更に，韓国は隣国日本は米国から核燃料サイクルに対し，包括事前同意制度を認められているのに，同じく原子力先進国である韓国には，何故認められないのかと言う国民感情もあったのではないかと思われる。ちなみに，韓国は日本が如何にして包括事前同意を獲得したのかについて強い関心を抱き，日米交渉の代表をつとめた

筆者を数回ソウルに招き交渉の経緯についてブリーフィングを求められた。

いずれにせよ，韓国は再処理技術のうちでも核拡散抵抗性に優れているとされるパイロプロセッシングに焦点をあて，米国のアイダホ国立原子力研究所に多くの科学技術者を派遣し，研究に従事させるとともに，将来的に商業化を目指していた。その基礎として米韓原子力協定を改正し，包括同意制度の導入を強く求めたのであった。

米国の対応ぶり

これに対し米国は安全保障上の見地から，核不拡散，核セキュリティを重視し，核燃料サイクルはNPTの非核兵器国では日本とユーラトムにだけしか認められないとした。但し米国のこの方針はかなり弾力的で，NPTの非加盟国でしかも核兵器保有国のインドにはこれを認めている。

韓国に対しては，核開発を進める北朝鮮との関係上，地政学的見地から，プルトニウム利用を認めることは出来ないと強く主張した。又韓国の過去の好ましからざる実績(朴正熙 大統領時代の核開発の計画及び2000年代初めに表沙汰になった少量ではあったが，韓国原子力研究所(KAERI)によるプルトニウム及び高濃縮ウランの保有問題)に鑑み，核燃料サイクルは認められないとして，米韓の議論は平行線をたどった。

(新協定の合意)

このように，米韓の立場は大きく隔たっていたが，韓国のねばり強い交渉，活発なロビイングも功を奏してか，ようやく何とか合意に至った。新協定は韓国にとっては100%満足するものではないかもしれないが，核燃料サイクルに向かって一歩踏み出した，ということで，一応成功であったと評価できるのではないか。しかし，新しい米韓原子力協定は，韓国にとっては，あくまで問題先送りの過渡的なもので，米韓関係の今後はパイロプロセッシングの進展と米韓の話し合いにかかっていると見えよう。

新協定の主な内容は次の通りである。

1. 使用済燃料の第三国移転

- ・英仏への移転について事前同意(advanced consent)の付与
- ・再処理によって取り出されたプルトニウムの韓国への移転については、米ユーラトム協定で、米ユーラトムに対し同意を与えることを約束
- ・その他の国への移転については米韓間の文書による合意が必要(日本はこのカテゴリーに該当する)
(輸送の際のプルトニウムの形態及び核物質防護措置などについては両当事国で合意が必要)

2. 濃縮

- ・経済性、技術的実現性、核不拡散性を考慮した上で、将来合意される取極に基づき 20% までの濃縮が実施可能

3. 形状・内容の変更(再処理)

- ・Annex に掲げる施設(韓国側ではとりあえず KAERI)での試験・研究については事前同意
- ・新たな施設の Annex への追加については、適切な保障措置が IAEA との間で合意されることを条件に可能
- ・現在、実施されている Joint Fuel Cycle Study の完了後、経済性、技術的実現性、核不拡散性の見地から検討する。その結果により、施設を Annex に掲載することに事前同意を与える可能性を排除しない。

(註：結局、新協定は当分の間、米韓で再処理の共同研究を行い、その結果、経済性、技術性、核不拡散性などを確認した上で「自由な再処理」「20%までの自由な濃縮」の可能性を検討することとし、結論を先送りする形で決着した。)

4. 米韓原子力二国間委員会

- ・米エネルギー省副長官、韓国外務省次官を代表として構成
- ・委員会の下に、核燃料供給保証、使用済燃料管理、原子力輸出、核セキュリティの四つの作業部会を設置

5. 有効期間

- ・20年、1回(5年)のみ延長可能

- ・発効後 17 年後に延長するか否かの協議を開始
- ・1 年前の書面による通知によっていつでも(協定終了時に限らず)終了させることが可能

(註：米国は最近、議会の意向により二国間協定の有効期間を限定する傾向にあるが、他方、韓国側もパイロプロセスが認められていない今般の協定については、必ずしも長期の有効期間を希望していなかったのではないと思われる。)

日米原子力協定との関係

米韓協定が何とかまとまったことは日本としても評価できる。もし、韓国が自国の再処理にあくまでこだわって協定がまとまらなかったとすれば、米国は日韓という東アジアの同盟国の間で困惑した立場になり、また、韓国から日本の原子力政策批判などが出たりして、場合によっては、日米協定の行方にも影を落としかねなかったからである。

2018年7月に満期を迎える日米原子力協定の行方については、いくつかのシナリオが考えられる。20年ないし30年といった相当長い期間、現行協定そのままの延長、大幅な修正を加えた新協定の締結などが考えられる。目下のところ、自動延長説が有力である。原子力分野での日米関係は順調に進んでおり、このままで良いのではないか、あえて協定を変える必要はないのではないかなどの見方が基礎にある。だが、不透明な部分がないわけではない。日本は利用目的のないプルトニウムは持たないとの方針を堅持しているが、特に福島事故以降、期待したようにプルトニウムを消費できないまま、大量に保有している。米国の連邦議会の一部、シンク・タンク、大学などには強い懸念が抱かれている。日本が核武装に向かうのではないか、という懸念ではなく、使用の用途のつかないプルトニウムの保有を認めることは他の国に対して示しがつかない、テロリストの標的になるといった、核セキュリティの懸念である。今回の米韓交渉をみても、米国の再処理、プルトニウムに対する見方は非常に厳しかった。

米国の再処理に対する現状認識を知る意味でも、米連邦議会での米韓協定の審議は、日本にとっても大いに注目される。今後の「日米」協定の行方を占うものとして「米韓」に注目する必要がある。

(2015年8月20日記)



このコーナーは各機関および会員からの情報をもとに編集しています。お近くの編集委員(目次欄掲載)または編集委員会 hensyu@aesj.or.jp まで情報をお寄せ下さい。

原子力学会の秋の大会， 知の統合や廃炉をテーマに議論

日本原子力学会は9月9日から11日までの3日間、静岡大学で秋の大会を開いた。

編集委員会セッションでは「知の統合」をテーマに、政府事故調査委員長を務めた畑村洋太郎氏が、事故はこれからも起きることを前提に減災を考慮ことや失敗知識の抽象化とそれをふまえた具体化により知識を体系化すること、他産業の失敗事例を十分に学ぶ必要性を述べた。また、科学社会学会の松本三和夫会長は、さまざまな学をつなぐ回路は不十分であり、その場限りの反省と対症療法が繰り返された構造的な問題が、福島事故の背景にはあると指摘。関係者が事前にあえて耳の痛いことを指摘しあい、不断に軌道修正をする行動様式への変更を求めた。

また理事会セッションは「あなたにとって原子力学会とは」というテーマで、原子力学会が果たすべき役割を議論。学会としての知見の集約や情報発信のあり方、今後の福島での活動などについて会場参加者と意見を交換した。

最終日には丸一日を使って、学会に設けられた廃炉検討委員会による検討状況などを紹介。福島第一原子力発電所の炉内状況や廃炉のための研究開発の状況、廃棄物の処理処分研究などについて、現状や今後について議論した。

* 廃炉検討委員会セッションの内容については学会誌でのちほど、詳しく紹介します。

(原子力学会誌編集委員会)

非会員・女性原子力業務従事者から見た原子力学会とは？

原子力学会男女共同参画委員会は9月10日、静岡大で開かれた秋の大会で、「原子力を支えて活躍する女性たちー日本原子力学会の外からのメッセージ」をテーマにした企画セッションを開催した。

本会の女性会員比率は2015年9月末現在約4%に留まっており、また、女性委員数がゼロの常置委員会もある。男女共同参画委員会の女性会員数増に向けた取組の中で「原子力・放射線分野で働く女性は現場では実は多い。彼女達が学会に入らないのはなぜか？」との問題提起がなされ、その背景を探るべく今回の企画開催に至った。

今回、講演者として招聘したのは東京電力の文書管理業務を担う東京レコードマネージメントに勤務し福島第1原子力発電所に常駐する佐藤正子氏と、東北電力の女川原子力発電所で放射線管理業務に従事する紺野敦子氏の二人。両氏はそれぞれ東北大地震を現在の勤務先で経験し、地震・津波発生時の所内の混乱した様子や安全性向上に向けた現在の取組等について、実体験と今後の安全確保に向けた強い決意に基づく講演を行い、聴講者に感銘を与えた。

また両氏は「学会」に対し、「研究者・技術者が新しい研究成果を発表するための所」だというイメージを持っており、原子力関連業務に携わる担当者が原子力学会に入会するためには入会する利点が明快である必要があると

指摘。一方で、「同じように原子力の現場で働く女性達とのネットワークを構築する場が欲しい」との意見もたされた。

日々現場で奮闘しながら原子力を支える担当者がぜひ入会したいと思えるのはどんな学会か、また、学術的成果だけでなく彼女らが現場業務で得た貴重な知見も活用し、今後の技術や安全性の向上を図るために学会はどのような役割を担うべきか、示唆と反省を与えるセッションとなった。



(原子力学会男女共同参画委員会)

原子力学会，研究炉に関する検討で提言へ

日本原子力学会の上塚寛会長は9月4日、都内で記者会見を行い、同氏が6月に会長に就任して以来取り組んでいる研究炉に関する検討の状況について説明した。同学会では専門分科会を設け、大学や研究機関の持つ研究炉が人材育成に果たす役割や、新規制基準への対応などを検討するために、専門分科会を設置。同分科会によるこれまでの調査結果から、研究炉では人材育成の役割が占める割合が大学炉で90%超、研究機関の原子炉で30~40%を占めており、教育や実習のみならず、研究開発を通じた研究者・技術者育成に貢献していることが示された。一方、現在は新規制基準への対応のために、す

べての研究炉が停止。再稼働に向けて原子力規制委員会による審査が進行中だが、見通しが不透明な状況となっており、このままでは研究開発の停滞や実習経験なしでの人材育成など、弊害が生じると懸念している。

その上で分科会は研究炉の運営上の課題として、(1)施設の高経年化対策、(2)使用済み燃料の管理、(3)安全規制・核セキュリティ強化に対応した予算と人員の確保、(4)長期間の停止状態下での運転員の力量と士気の確保——をあげており、できるだけ早期に提言を発表することとしている。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

楢葉町避難指示解除，町長が町の環境整備に意欲

楢葉町では9月5日に避難指示が解除され、楢葉町復興祈念式典が同日、町立おおぞらこども園で開催された。同町は2015年4月より準備宿泊を進めてきた。

楢葉町の松本幸英町長は今回の解除を受けて、「町で止まっていた時計の針が再び動き始めた」として、2012年8月の警戒区域見直しや2014年5月の「帰町の判断」などの悩みぬいた末の決断があったからこそ、除染やインフラ復旧、生活環境の回復が加速し復興や再生を前進させることができたとの考えを述べた。

また、原子力災害により大きく失われた安全・安心に対する信頼は簡単に回復できるものではなく、避難生活

の更なる長期化は決して望ましくないと明言。同町では復興計画に「安心できる生活環境の回復」、「生活再建支援策の充実」、「住み良い魅力あるまちづくり」の3つの重点施策を掲げて、かつての原風景を取り戻すとともに「新生ならば」の創造を目指して全町を挙げて取り組んできたことを振り返った。

避難指示の解除は「ようやく復興のスタートラインに着いたに過ぎない」と述べ、目指すべきゴールの1つの形として「町民が安心して、心豊かに暮らすことができる環境を整備すること」を挙げて、町民と協力しながら新たなまちづくりに取り組んでいく意欲を示した。

2016年度予算，概算要求が出そろう

2016年度予算の概算要求が8月31日、各省庁より出そろった。

経済産業省では、「福島復興の加速に向けて全力を傾注しながら、『長期エネルギー需給見通し』の実現、『システム改革』の実行に取り組む」基本的方向性のもと、エネルギー対策特別会計として、前年度比22.5%増の9,757億円が計上された。「廃炉・汚染水対策の着実な実施と原子力発電の安全基盤の確保」としては、福島第一原子力発電所の廃炉・汚染水対策を進めていく上で、技術的に難易度の高い研究開発に取り組むために、前年度からほぼ倍増の325億円を要求している。また、廃炉が行われる原子力発電所が立地する市町村に対して、エネルギー構造転換に向けた地域の理解促進を支援する「エネルギー構造転換理解促進事業」として、新規に45億円が計上された。

文部科学省は原子力関係の研究開発・人材育成の取組

として、前年度比25.7%増の1,854億円を要求した。このうち廃止措置研究開発の加速プランでは57億円が計上され、国内外の英知を結集する場として日本原子力研究開発機構に設置された「廃炉国際共同研究センター」の施設整備を進めるほか、原子炉内の状況把握手法開発などの廃炉研究、国際機関との連携を強化する。そのほか核燃料サイクル施設・高レベル放射性廃棄物処理処分の研究開発で439億円、原子力施設の新規制基準対応・安全確保対策として前年度の約3.5倍となる324億円を要求している。また、高温ガス炉関連では前年度より5億円増の18億円が計上されており、高温工学試験研究炉「HTTR」の運転、水素製造技術などの研究開発を推進する。

復興庁は原子力災害からの復興・再生として、前年度比22.8%増の9,585億円を要求。そのうち除染が4,527億円、放射性物質汚染廃棄物処理と中間貯蔵施設整備が3,561億円となっている。また、福島県における放射線

測定、風評被害対策などの原子力災害特有の課題に対応するとともに、被災者に対して短期の就業機会を創出す

るための「原子力災害対応雇用支援事業」として、新規に47億円が計上された。

原子力規制委発足3年の見直し、内閣府へは移管せず

原子力規制委員会発足から3年以内の見直しを行う政府の検討チームは9月4日、最終報告書を取りまとめた。同委設置法に基づいて2014年9月より、内閣府原子力防災担当副大臣を座長とする検討チームで、(1)原子力規制組織の要件、(2)意思決定過程の透明性確保、(3)助言機関・評価機関の設置、(4)専門能力と責任感ある人材の育成・確保、(5)ノーリターンルール/再就職規制、(6)原子力規制委員会の内閣府への移管、(7)わが国の危機管理体制の見直し(原子力防災)——の点から検討してきたもの。検討事項のうち原子力防災に関しては、

本検討チームによる方針を受け、既に2014年10月に内閣府原子力防災担当政策統括官の設置などの充実・強化が図られている。

今回の最終報告書では原子力規制委員会の位置付けについて、いわゆる「三条委員会」として、政治や推進側の省庁からの独立性が大きく高まったことや、組織運営の透明性を評価したほか、海外の原子力規制組織の状況と比較した上で、「原子力規制委員会を内閣府へ移管する必要性は見出しがたい」と結論付けている。

再処理事業の実施主体を「認可法人」に

総合資源エネルギー調査会の専門ワーキンググループは8月31日、今後の再処理事業の実施主体について、日本原燃とは別の「認可法人」とする方向で検討に入った。

同日の会合で資源エネルギー庁は、再処理事業は引き続き民間を主体として進めることが適切とした上で、自由競争下でも必要な資金が安定的に確保されるよう、現

行の積立金制度を発電時に資金を実施主体に拠出することを義務付ける「拠出金制度」に改める方向を打ち出した。実施主体については、競争環境下でも使用済み燃料の再処理が滞ることなく全うされるよう、民間主導で設立される一方で国が必要な関与を行うことのできる「認可法人」を念頭に検討すべきとしている。

放医研など5施設が「高度被ばく医療支援センター」に

原子力規制委員会は8月26日、原子力災害に対応する医療施設「高度被ばく医療支援センター」および「原子力災害医療・総合支援センター」として放射線医学総合研究所、長崎大学など国内5施設を指定した。同日改定された原子力災害対策指針により、原子力災害医療体制の整備として新たに定められたもの。発災時に立地地域の「原子力災害拠点病院」では対応できない高度専門的な医

療・支援や、関連医療機関とのネットワーク構築を図る。

両支援センターの選定に際しては、それぞれ施設要件を定めた上で公募を行い、「高度被ばく医療支援センター」には、放射線医学総合研究所、長崎大学、福島県立医科大学、広島大学、弘前大学が、「原子力災害医療・総合支援センター」には、長崎大学、福島県立医科大学、広島大学、弘前大学が指定された。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【国際】

IAEAが福島第一発電所事故に関する最終報告書

国際原子力機関(IAEA)は8月31日、東京電力・福島第一原子力発電所事故の原因と評価に関する事務局長名最終報告書を公表した。世界中の政府、規制当局およ

び原子力発電事業者が必要な教訓に基づいて行動可能となるよう、人的、組織的および技術的要因を考慮し、何かなぜ起こったのかに関する理解の提供を目指す内容。42の加盟国、および国際機関の専門家約180名が5つの作業部会を設置して、同事故の原因と影響、および教訓について、事実に基づいた信頼できるバランスの取れた評価を行ったとしている。同報告書は9月にウィーンで開催するIAEA総会に提出予定である。

天野之弥事務局長は巻頭言部分で、事故につながった大きな要因の1つは「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まったく考えられない」という想定が日本で広く受け入れられていたことだと指摘。原子力発電事業者に受け入れられた同想定は規制当局、政府からも疑問を呈されることはなく、同発電所では重大原子力事故への備えが不十分になっていたとの認識を示した。また、日本の規制枠組における弱点として、責任がいくつもの機関に分散し、権限の所在が必ずしも明らかでなかった点に言及した。発電所の設計や緊急時対策と対応の制度、重大な事故対策計画などにも弱点があり、長時間の全電源喪失や同一施設で複数の原子炉が同時に危機に陥る可能性も想定されていなかったとした。このような事実を背景に、天野事務局長はいかなる国においても原子力安全について自己満足に浸る余地はなく、福島第一事故につながった要因のいくつかは日本に特有であったわけではないと明言。安全文化への鍵は常に疑問を持ち、経験から学ぶ開かれた姿勢であり、これは原子力発電に携わるすべての人々にとって必要不可欠だとした上で、これらの人々に対して安全を常に最優先するよう訴えている。

同事務局長はこのほか、「事故以降、日本は従来以上に国際基準に合致すべく規制制度を改革した」と明言しており、福島第一事故を受けて世界各地で原子力安全により強い関心が集まることを確信すると述べた。これまでに訪れた全ての原子力発電所で安全措置・手順が改善されていることを目にしたとした上で、「このような事故が二度と起きないようにするために、人知の限りを尽くさなくてはならないという認識が広がっている」と指摘。今後数十年にわたり原子力発電の利用が世界的に拡大し続けると見込まれる中で、こうした認識は一層重要との見解を表明している。

IEA と OECD/NEA が電源別発電コストを予測

国際エネルギー機関(IEA)と経済協力開発機構・原子力機関(OECD/NEA)は8月31日、「発電コスト予測2015年版」を公表し、一部の再生可能エネルギーによる発電コストが5年前の前回結果から大幅に下がる一方、原子力発電もその他のベースロード電源と比較して競争力があるとの分析結果を示した。

同報告書は両機関が数年おきに発表している共同研究結果で、2015年版は8版目に当たる。割引キャッシュフロー(DCF)メソッドという所定の割引率を使って、建設に要する数年間の実費用を運転開始時の現在価格に換算し、「耐用期間中の均等化発電コスト(LCOE)」を算出す

るという方式を採用。中国やブラジル、南アフリカを含む22か国の様々なタイプの発電設備181基(うち11基は原子力発電プラント)のデータに基づき、現在建設中で2020年までに起動する発電設備について、国毎、電源毎に発電コストを試算・分析した。それによると、前回の2010年版と比較して風力と太陽光の発電コストが継続的な技術開発の進展により大幅に下落。原子力発電については、新しい発電所の耐用期間全体の比較で資金調達費が相対的に低ければ、石炭や天然ガスといった既存のベースロード発電所より安価になるとの結果が出ており、これら2つの側面は過去5年にわたって発電におけるコスト・インフレを抑える一助になったと指摘した。

具体的な試算結果について報告書はまず、天然ガス複合火力発電(CCGT)と石炭火力、および原子力という3種類のベースロード電源について、LCOEを3%の割引率で比較した場合、すべての国において原子力が最も安価なオプションになるとした。しかし、原子力が石炭やガスより資本集約的技術であるという事実を反映し、割引率を上げた場合、原子力のコストは相対的に上昇。割引率7%で原子力発電コストの中央値は石炭の中央値に近くなり、10%では石炭とガスよりも高くなるという結果だった。数値的には、OECD加盟諸国における原子力設備の金利抜き建設コスト(オーバーナイトコスト)の幅が大きく、1kWeあたり2,021米ドル(韓国)から6,215ドル(ハンガリー)までと様々。LCOEに関しては、割引率3%で1MWhあたり29米ドル(韓国)~64ドル(英国)、7%で40ドル(韓国)~101ドル(英国)、10%では51ドル(韓国)~136ドル(英国)だったという。

同報告書は前回版でベースロード電源の大幅なコスト上昇を指摘していたが、今回はそうしたコスト・インフレが抑えられつつあることを示唆。あらゆる条件下で常にコストが最小という発電技術は存在せず、市場構造や政策環境、資金援助など、多くのファクターによって最終的なコストが決まると強調した。前回版とおおよそ同水準のコストがかかるとした原子力技術については特に、コストが世界的に上昇し続けるという認識が徐々に崩れつつあることは注目に値すると結論づけている。

【ロシア】

80万kW級高速炉用のMOX燃料の試験集合体が完成

ロシアのシベリア中央部、クラスノヤルスク地方にある鉱業化学コンビナート(MCC)は8月20日、80万kW級高速炉(BN-800)の仕様に合わせて製造した最初のウラン・プルトニウム混合酸化物(MOX)燃料集合体をウラン燃料ペレットとともに試験した結果、良好な結果

が得られたと発表した。ロシアでは昨年6月に BN-800 設計を採用したペロヤルスク原子力発電所4号機が初臨界を達成。来年にも営業運転を開始する同炉用として、MOX 燃料集合体を商業生産していくための重要段階を完了したと評価している。

ロシアでは現在、原子炉からの使用済み燃料は部分的に再処理しているのみだが、基本的には全量を再処理する方針。ウラン資源を有効利用する観点から高速炉開発を積極的に進めている。すでに、60万kW級の BN-600 がペロヤルスク3号機として1980年から稼働中のほか、建設中の同4号機に加えて、120万kW級の BN-1200 も同5号機として計画中。ロシアの原子力総合企業ロスアトム社傘下の MCC はロシアの核燃料サイクルを完結させる総合センターの役割を担っており、プルトニウム生産炉やロシア型 PWR(VVER)用の使用済み燃料再処理実証プラント、使用済み燃料の乾式/湿式貯蔵施設などが建設中、あるいは稼働中となっている。

【ウクライナ】

ロブノ3号機の運転期間延長申請に向けた準備作業が進展

ウクライナの原子力発電公社であるエネルゴアトム社は8月19日、ロブノ原子力発電所3号機の運転期間延長を申請するための準備作業が順調に進展していると発表した。同発電所では40万kW級のロシア型 PWR(VVER)である1,2号機について、国家原子力規制検査庁(SNRC)が2010年12月に同国の原子炉としては初めて、20年間の運転期間延長を承認。3号機と同じ100万kW級 VVER である南ウクライナ原子力発電所1号機についても、SNRCは2013年に、2023年まで10年間の運転期間延長を承認した。エネルゴアトム社では2006年に内閣が承認した2030年までのエネルギー戦略に従い、国内の稼働中原子炉15基中、経年化した11基について、VVERの公式運転寿命である30年を超えた運転継続を目指す考えだ。

同社が現在3号機で進めている作業は、許可の取得に必要な電気機器や制御システムなどの改修工事あるいは取り替えて、原子炉設備の新しい診断システムと地震モニタリング・システムの導入も含まれる。こうした作業の結果は「定期安全評価報告書」としてまとめられ、同炉の運転が改修計画に沿ったものであるとともに、安全運転の条件やパラメーター、安全レベルの改善を目的とした改築・最新化対策にも適合していることを保証。規制当局はこの報告書に基づいて、同炉の運転期間を延長すべきか判断することになる。

なお今年5月12日、エネルゴアトム社は南ウクライ

ナ2号機(100万kW級 VVER)の運転期間を10年間延長するために同炉を停止。配管の最新化やタービン機器の取り替えを含む大規模な総点検・改修作業に入った。また、同月20日には、今年末に30年の公式運転寿命を迎えるザポロジエ1号機(100万kW級 VVER)についても運転期間延長を SNRC に申請している。

【リトアニア】

廃止措置から出る固体廃棄物施設が予備試運転開始

リトアニアでイグナリナ原子力発電所の廃止措置業務を担当する「国家企業イグナリナ原子力発電所(SE-INPP)」は8月25日、廃止措置から出る短・長寿命固体廃棄物12万立方メートルの回収・輸送・分類・包装・特性評価・貯蔵を行う施設(SWMSF)の予備的な試運転が始まったと発表した。2005年に始まった同施設の建設プロジェクトも終盤に近づいており、今後は2016年3月まで非放射性の模擬固体廃棄物で機器・システムの実証試験を行い、設計要件を満たした安全運転が可能かを検証。2017年に放射性廃棄物を使ったホット試験を行ったあと、2018年にも運転を開始する。

リトアニアではかつて、大容量のイグナリナ原子力発電所1,2号機(各150万kW)で総発電電力量の8割を賄っていたが、チェルノブイリ発電所と同じ黒鉛チャンネル型炉(LWGR)であったため、両炉とも2009年までにリトアニアの欧州連合(EU)への加盟と引き替えに閉鎖された。現在、両炉とも廃止措置作業が進められており、それに伴う廃棄物を中心的に処理する施設として使用済み燃料中間貯蔵施設(ISFSF)や SWMSF、低中レベル廃棄物の浅地層処分場などの建設が並行して進展中である。

【ドイツ】

放射性廃棄物の包括的処分プログラム案を内閣が承認

ドイツの連邦環境・建設・自然保護・原子力安全省(BMUB)は8月12日、国内で発生するすべての放射性廃棄物を安全かつ責任を持って処分するための包括的概念を示した「放射性廃棄物処分国家プログラム案」を内閣が承認したと発表した。低・中レベル廃棄物(L & ILW)の最終処分場としてすでに決定済みのコンラート旧鉄鉱石鉱山に加えて、高レベル廃棄物(HLW)の最終処分に新たに1か所を選定する方針だが、今回 BMUB は、地域住民らの懸念を特別に斟酌してコンラート処分場の拡張計画を実施しないと明記。これにより、今後2022年までに排出される放射性廃棄物はすべて、HLW用の

施設に処分されると見られている。同プログラムは放射性廃棄物に関する欧州連合(EU)指令に基づき、BMUBが戦略的な環境評価と国民からの意見聴取を経て策定したもので、8月23日までにEUの執行機関である欧州委員会(EC)に提出するとしている。

ドイツでは福島第一事故を受けて2022年までにすべての原子力発電所を段階的に閉鎖すると決定。このため、BMUBはこれらの廃止措置にともなう廃棄物や海外での委託再処理から出る廃棄物も含め、2080年までに発生する全種類の廃棄物の総量を試算した。それによると、

- (1) 発電所からの使用済み燃料は10,500トンで、CASTOR型キャニスターに封入した場合約1,100本分、
- (2) 欧州で使用済み燃料を再処理した後に発生するL & ILWとHLWはキャニスター300本分、
- (3) 研究開発や実証試験用の原子炉から出る使用済み燃料が500本分、である。

このほか、60万立方メートルのL & ILWを処分する必要がある。これらは主に、原子力発電所の運転と廃止措置、および放射性物質の工業・医療・研究利用に伴う廃棄物である。BMUBはまた、かつてL & ILWの試験処分が行われていたアッセⅡ岩塩坑の廃棄物もすべて取り出して処分する考えで、それらは20万立方メートルほど。アッセⅡでは塩水が流入するなど地層が安定しないため、1978年に処分が停止していた。さらに、グロナウにあるユレンコ社のウラン濃縮工場からの廃棄物10万立方メートル分も処分が必要だとしている。

使用済み燃料とHLWの処分については、2013年7月に最終処分場のサイト選定に関する新たな手続法案が議会で可決。それまではニーダーザクセン州のゴアレーベン岩塩坑を候補地として適合性調査が進められてきたが、連邦政府は同年4月にこれらの作業を白紙としたほか、国民の合意に基づいたサイト選定を行うため、連邦政府や州政府、各界の代表による委員会が安全要件やサイト選定基準に関する提案を作成することを決定。同委は遅くとも2031年までに合意ベースの候補地を議会に勧告することになっているが、ゴアレーベンも新たな選定プロセスにおける候補地の1つとして残留した。

【イラン】 原子力発電開発拡大で中国と協力覚書

イラン国営通信(IRNA)によると、イラン原子力庁(AEOI)のA. サレヒ長官が8月26日から3日間、中国を公式訪問し、イラン国内における民生用原子力発電規模の拡大で中国と協力するための覚書に調印した。イランの核開発疑惑問題解決のため、7月に同国が国連安保理5か国およびドイツと合意した「包括的共同行動計画(JCPOA)」についても、両国は協力して実行していくとしている。

サレヒ長官はまず、中国国家原子能機構(CAEA)の許達哲・事務局長を含む中国側当局と会談し、原子力の平和利用分野で両国が協力を深めていくことを確認した。AEOIはCAEAとの協力により、狭い地域に低コストの小型炉(出力10万kW)を海水脱塩と熱電併給用に建設する用意があり、これらを複数設置することで総計100万kW程度の発電容量を得たい考え。このため両国の当局者は、開発協力基盤の検討で双方の専門家を任命したという。

一方、JCPOAの実施協力については、アラク重水炉で兵器級プルトニウムの生産が不能になるよう設計変更する際、中国が建設的な役割を担うなど、両国が緊密に協働していくことになったと中国の国営新華社が伝えている。

同長官は翌27日には、中国の王毅外務大臣と会談。その後、中国核工業集团公司(CNNC)などの原子力平和利用関係機関を訪問予定であることを明らかにした。

イランでは現在、ロシアとの協力で建設したブシェール原子力発電所1号機(100万kW級PWR)が2013年から稼働中のほか、昨年11月に同発電所Ⅱ期工事として2基(各100万kW級PWR)増設する契約をロシアと締結。これに加えて同サイトでさらに2基、およびその他のサイトで4基をターンキー契約で建設していく方針である。また、中国との協力で建設する小型炉2基の建設サイトについては、イラン南部・ペルシャ湾の外側に位置するマクラン海岸になるとの見通しをAEOIが7月に公表していた。

「研究用原子炉の歴史を顧みて(上)」

～第一歩を踏み出した JRR-1 と本格的な多目的利用の JRR-2～

飯島 勉, 宮坂 靖彦, 白井 英次

旧日本原子力研究所においては、昭和 30 年代に研究用原子炉の建設・運転・利用が始まり、さまざまな知見や多様な経験を入手した。研究者・技術者にとってすべてが勉強であり、さまざまなトラブルにも常に安全運転を目指して工夫をして乗り越えてきた。最初に、わが国初の原子炉 JRR-1 と本格的な多目的原子炉利用の中心であった JRR-2 について紹介する。

KEYWORDS: *research reactor, JRR-1, the first reactor in Japan, JRR-2, multipurpose reactor utilization*

I. はじめに

わが国における原子力の研究が本格的に開始されてから、約 60 年を経過することとなった。1953 年 12 月のアイゼンハワー米国大統領の原子力平和利用の声明を受けて、国内でも原子力関連の研究がスタートした。将来のエネルギー資源を考え、早く原子力研究を開始したいという国内の機運に乗ったものであった。

原子力研究開発の担当機関として日本原子力研究所(現:日本原子力研究開発機構。以下、「原研」)が 1955 年 11 月に設立され、研究を進めるための中心施設として研究用原子炉(以下、「研究炉」)の建設、運転、利用等が進められた。原子力研究開発の黎明期を経験し、昭和 30 年代の研究炉に関与した世代として、関連する経験等について JRR-1 から JRR-4 までを 2 回に分けて紹介する。

新しい技術であるという認識は当時の関係者全体の共通意識であり、慎重な検討や予備試験を行いながら安全を確保しつつ一步一步進むということができた時代であった。安全に関するリスクを検討しながらも前へ進まない現在の風潮に少し懸念を感じている。ここでは、経験した思い出を中心にまとめ、原子力界における技術の進歩の理解の一助となることを期待している。

Reflecting on research reactor developments in Japan (1), JRR-1, took the first step, and JRR-2, started multipurpose reactor utilization: Tsutomu Iijima, Yasuhiko Miyasaka, Eiji Shirai.

(2015 年 7 月 6 日 受理)

II. JRR - 1

わが国最初の研究炉として熱出力 50kW のウォータールーボイラー(WB)型炉が選ばれたのは以下の理由による。

- ①本炉はすでに多数作られ声価の定まった安全性の高い炉で、発注から 1 年程度で建設が可能である。
- ②米国から借用する 20%濃縮ウラン(U-235 量で 6kg)を次の本格的な研究炉(JRR-2, CP-5 型)に活用するため、1 号炉にはウラン必要量の少ない炉が望ましかった。

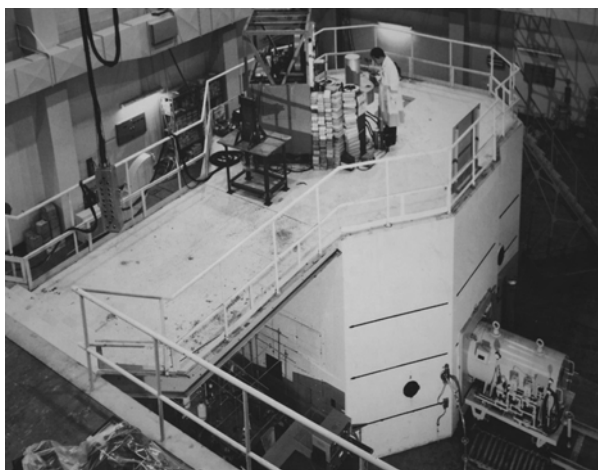
JRR-1 の年譜を第 1 表に、実験風景を第 1 図に示す。

1. 原子炉の建設

JRR-1 は直径 40cm のステンレス鋼製球状タンクに

第 1 表 JRR-1 年譜

年 月	主要項目
1956 年 3 月	米国, NAA 社と契約締結
1956 年 8 月	着工
1957 年 8 月	初臨界(8/27 5時 23 分, U-235 量: 1.170g)
1957 年 11 月	定格出力(50kW)運転達成(11/26)
1958 年 7 月～	共同利用開始
1958 年 9 月～	原子炉運転訓練
1968 年 9 月	運転永久停止(9/19)
1969 年 10 月	解体届の提出(10/20)
2003 年 7 月	廃止届の提出(7/31)

第1図 JRR-1 原子炉本体での実験風景⁸⁾

20%濃縮ウランの硫酸ウラニル水溶液を入れ、4本の B_4C 制御棒で出力を制御する。外側は黒鉛反射体で囲まれ、さらにその外側は重コンクリート遮蔽体で取り囲まれている。原子炉には大小計16本の水平および垂直実験孔が設けられている。炉心直下の地下室(サブパイルルーム)には炉心で発生した酸素・水素を水に戻すガス再結合器、燃料ドレンタンク、熱交換器、ポンプ類、等が置かれている⁴⁾。この炉は水溶液中で核分裂連鎖反応が起こるので核分裂生成物による水の分解で酸素と水素が泡状に大量に発生し、あたかも水が沸騰している様相を呈することからウォーターボイラー型と呼ばれている。

炉の仕様として、国産1号炉(JRR-3)のための指数関数炉実験ができるようにサーマルコラムを設ける等の変更をして、大部分のWB型炉を製作した米国ノースアメリカン航空会社(NAA社)と1956年3月に購入契約を結んだ。

1956年8月10日に起工式が行われ、建家建設工事が昼夜兼行で進められた。建設は、原子炉開発部WB・CP-5班が中心で、指揮官は神原豊三氏であった。建家関係は原研建設部が設計し、工事は主に鹿島、清水の両建設会社が請負った。本体機器の溶接や機械的な組立作業は日立製作所が、電気関係の配線は三菱電機がそれぞれ請負った。

(1) 当時の社会環境と筆者のJRR-1への参加

6号国道が舗装されてなく、また、常磐線も電化前でジーゼルの準急や蒸気機関車が引く列車が走っていた時代である。筆者は原研公募一期生として1957年4月に入所した。1ヵ月の研修の後WB班に配属されたのは、筆者と佐藤一男、富井格三の3人で、佐藤氏と筆者は5月20日東海へ赴任した。ドシャ降りの雨の中ずぶ濡れになったことを憶えている。宿舎はJRR-1から歩いて20分程の民家を借り上げた寝るだけのためのもので、8月に独身寮(真砂寮)ができて入寮するまで3ヶ月近く佐藤氏と8畳間同室で寝起きした。当時のJRR-1は機器の据付調整の段階で、突貫工事の真只中に放り込まれた

のである。筆者の直属の上司は制御関係担当の苦米地顕氏、佐藤氏は炉本体関係で上司は松本元一氏であった。富井氏は東京本部駐在で、現地要求に対する部品等の調達に活躍した。

(2) JRR-1 建設の進捗

原子炉の部品は1956年11月から翌年3月にかけて3回に分けて到着した。また、現場据付、調整試験、臨界実験の指導のためにNAA社の技術者が滞在した。最初は据付・組立段階で機械技師のスチュアート氏が1956年12月から翌年5月まで、計測制御関係技師のクックラム氏と臨界実験専門のロードバック氏が1957年5月から9月まで滞在した。みな仕事熱心で優秀な人たちで、原研職員とも良好な関係を保てたことがほぼ順調に工程を守れたことにつながったのだと思う。

WB班の松本元一、古橋晃の両氏は運転訓練等のため1956年10月から約4ヶ月間NAA社に出張した。特に古橋氏はNAA社が自社用に建設したばかりのAE-6炉(WB型)の初臨界実験、特性試験に参加することができ、この経験はJRR-1の臨界実験等を進めるのに大いに貢献した。両氏は工場で作成中のJRR-1炉心タンク本体を見せてもらったとのことである。ちなみに、JRR-1に搬入された炉心部は高さ3.4mの円筒状で、本日の炉心部を見た者は両氏以外には誰もいなかったのである。文字通りブラックボックスで、内部については図面すら無かったのである(1次冷却水を流す螺旋状の細管がある等の説明はあったが)。

炉の建設は、建家工事と原子炉関係機器の据え付け工事が並行して進められる形で行われ、いくつものトラブルはあったが、幸い決定的なトラブルに見舞われることなく、原子炉の組み立ては予定より2ヶ月遅れただけで完了した。一番大きなトラブルは原子炉冷却用の主熱交換器の水漏れであったが、急遽米国から空輸で取り寄せた新品と取り替えられた。

(3) 法規制との関連

原子炉等規制法が成立したのが1957年5月15日、同法施行は同年12月9日で、従って、JRR-1は特例として同法の規制を受けずに建設、臨界実験、出力上昇試験まで実施できたのである。すなわち、現在の原子炉設置許可申請、安全審査、設計・工事の方法の認可等の規制は確立されて無く、自由に工程等を調整できたのである。これが建家掘削開始から臨界まで1年間で行った最大の理由であると思う。JRR-1は多くの予期しない不具合を短期間に改良、改善して現場技術的に完成させた部分も多い。

2. 臨界までのトラブル・エピソード

(1) 制御棒を削る

JRR-1の制御棒はステンレス鋼製被覆管の中に B_4C を詰めたもので、炉心タンクに設けられた案内管の中を

上下に移動する。制御棒は電磁石で吊り下げられており、スクラム時(緊急停止時)には電磁石の電流を遮断して自由落下して炉を停止させる。現地で組立時、実際に制御棒を挿入してみると途中で引っかかり完全挿入できなかった。コックラム技師の指示で筆者は制御棒のステンレス被覆管をサンドペーパーで磨いて、数時間かけてなんとかスムーズに挿入できるようにした。多分、工場では全体の組立調整を行なっていなかったであろう。

(2) リレーのパンク

丁度梅雨期で湿度が高く、制御盤のリレーが次々と絶縁不良(パンク)を起こした。苫米地、富井の両氏が秋葉原を探し回ったが代替品となるものが見つからず、苫米地氏の発案で数十個のリレーの絶縁物をパラフィンで「天麩羅する」ことで乗り切った。米国規格の製品が湿度の高い日本の気候には耐えられなかった例である。

(3) 2次冷却水流量計の破損

JRR-1の2次冷却水は近くの阿漕ヶ浦の水を使っているが、主熱交換器の出口配管は制御室内を通過しており、下から上へ流れる垂直配管に全流量が流れる機械式流量計が取り付けられていた。ところがその流量計が破損し制御室が水浸しになるトラブルが起きた。同じタイプの流量計の入手が緊急となったが、米国から取り寄せるのでは臨界が遅れるので、急遽東京本部の富井氏が入手を命じられた。氏は東奔西走した挙句、島津製作所の大洋工場に利用可能な流量計があることが判り、東京まで特急で持参してもらい東京駅で受取り東海まで運ぶことができた。神原氏はじめ全員から最高の感謝をもらった。

ちなみに、JRR-1のログシート(運転記録)では1次冷却水などの流量はgpm(ガロン/分)で記されているが、2次冷却水だけはリットル/分であり、これは流量計破損の後遺症である。

(4) 燃料溶液の黒化

JRR-1の燃料は、20%濃縮ウランの硫酸ウラニル($\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)粉末の形で米国マリンクラフト社から1957年5月に搬入され金庫に保管されていたが、その溶解は8月13日から化学部の担当で行われた。ところが水溶液の色が黄色になるべきところ、どす黒い溶液になってしまった。これは固体の不純物によるものと分かり、フィルターによる徹夜の濾過作業により予定通りの黄色の溶液になり臨界実験に臨むことができた。

3. 臨界実験・特性試験・出力上昇試験

各種機能試験も終了し、前述のような種々のトラブルも解決して1957年8月26日から、関係者、報道陣注視のうちに臨界実験が始まった。こちらは驚くほど順調に進み、余勢を駆って徹夜で進めることになった。翌27日早朝、7回目の燃料溶液の追加で、4本目の制御棒を半分ほど抜いたところで、5時23分日本で初めて核分裂連鎖反応を起こさせるのに成功した。臨界量はU-235で

1170g、出力は60mWであった。報道機関もわが国に初めて「第3の火」が灯されたことを大々的に報道した。

その後は余剰反応度を追加し最終装荷量はU-235で1296g、硫酸ウラニル水溶液で26.23リットルとなった。炉の特性試験を行いながら出力上昇試験を実施し、9月6日には40kWまで上げることに成功した。定格出力の50kWまで持って行きかけたが、残暑が厳しく2次冷却水温度が高かったため(23℃、仕様では18℃以下)後日に持ち越された。いずれにしても臨界から10日間で高出力運転を達成したことは驚異的なことである。制御室内を流れる2次冷却水配管を触ると温かく、核エネルギーを体感できたときは感激した。そして11月26日に50kWを達成した。

1957年9月18日、JRR-1の完成式が正力原子力委員長はじめ多数の参加者のもと大々的に行われた。見学者も含めた総参加者は1万数千人といわれ壮観であった。

4. 運転、利用等の経緯

1958年1月には定常運転に入り、同年7月からは本格的な共同利用に供された。同年秋にはセミホットラボや気送管設備も完成し、所内外からの照射や実験利用が年とともに増加していった。JRR-1は小回りが利き、小さいながらも研究炉としてのすべての特長を備えており、原子炉利用技術の発展に貢献した。

共同利用の例では、各種照射実験、放射性同位元素(RI)製造、パイルオキシレーター法による熱中性子吸収断面積の測定、放射化分析、中性子散乱実験、指数実験、炉雑音その他の炉物理実験等がある。サーマルコラム設置の目的であったJRR-3のための指数関数炉実験は実施されなかったが、代わりに重水均質炉の酸化トリウム重水スラリーブランケット指数実験(拡散距離の測定)、20%濃縮ウラン板コンバーターを使った高速炉天然ウランブランケット指数実験、生物照射実験等が行われた。

運転訓練：JRR-1の目的の一つである原子力技術者養成のため、1958年9月から短期運転訓練コース(2週間)を開設し、また、1960年3月からは原子炉研修所一般課程の原子炉運転実習及び実験(6週間)を年2回実施した。

5. 運転永久停止と解体

1963年からJRR-2の本格的利用が始まり、照射利用がJRR-2に移行したので、JRR-1では実験に重点を置くようになった。このような状況の中でガス再結合器の触媒機能が徐々に低下する傾向にあり、また、JRR-3も共同利用を開始したので、JRR-1の共同利用は1967年8月をもって終了した。以後は原子炉研修所の訓練専用として利用したが、これもJRR-4で実施できるようになり、1968年9月にすべての運転を停止した。JRR-1は原子力開発の初期段階における唯一の原子炉としてそ

の特長を生かし、実験、照射、技術者の養成等の役目を十分に果たした。

JRR-1 はわが国最初の原子炉であるので、原子炉としての機能は喪失させるが、可能な限り原型をとどめる形で保存を図ることとした。この方針に基づき解体届を提出し、1969年11月から解体工事に着手した。燃料溶液は取り出して保管廃棄し、原子炉施設は、冷却水の取り出し、燃料系統の洗浄、弁類の封印、電源の遮断、実験装置の撤去等を行い、1970年3月をもって解体工事を完了した。

解体後の原子炉は、法的な要請から、その後も解体中の原子炉として管理してきたが、2003年6月に炉心本体および地下サブバイルルームは核燃料物質の使用施設として管理することが許可され、同年7月31日「JRR-1 原子炉施設の廃止届」を提出し、JRR-1 を廃止した。

6. JRR-1 記念展示館

JRR-1 は1978年8月にJRR-1 記念展示館として開館した。館内にはJRR-1 だけでなく、東海研究所(現：原子力科学研究所)の諸活動情況が展示され見学者の理解に資している。特に、「JRR-1 の建設開始から臨界まで」、「JPDR(原子力発電試験炉)の建設から解体まで」、「放射能拡散予測システム SPEEDI」については動画で見られることもできる。筆者は晩年見学者案内に携わり、延数百回にわたり案内し、半世紀前の自分自身の映像と対面して元気をもらった。筆者にとっては正に「JRR-1 に始まりJRR-1 に終わる」という社会人人生であったことに感謝している。

原研一期生として研究炉の建設、運転等に参与し、さまざまな経験を得ることができた。JRR-1 における中性子を利用したさまざまな実験はその後の研究炉利用の展開の元となり、ここから国内の原子力に関連する研究者が育っていくこととなった。わが国における原子力開発の記念碑として、先人の心意気を感じて欲しいものである。

[飯島 勉]

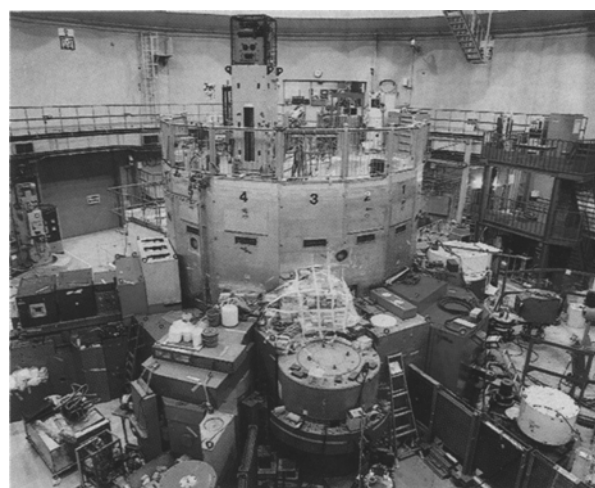
III JRR - 2

今振り返れば、筆者は1960年4月に入所し、臨界準備中のJRR-2 建設室に配属され、臨界準備のため炉心タンクに重水注入、燃料交換機による燃料取出し訓練などを行い、また、グラストン/エドランドなどの教科書で原子炉理論を勉強していたことが思い出される。

筆者にとってJRR-2 は、熱交換器、主重水ポンプ、制御棒駆動装置、燃料交換機などの交換工事、重水漏洩等のための大改修、板状燃料(角型)の国産化、板状燃料から円筒燃料内でのインコア照射による燃料・材料の照射技術の開発に関わった施設である。

第2表 JRR-2年譜

年 月	主要項目
1956年11月	米国、AMF社と契約締結
1957年8月	工事開始
1960年10月	初臨界(10/1 4時49分、20% EU : 15本)
1962年4月	臨界(90% EU : 13本)
1962年10月	定格出力(10MW)運転達成(10/9)
1970年9月	主重水熱交換器交換
1973年12月～	上部遮蔽体更新、重水漏洩対策等の改修工事
1976年5月	10MW 利用運転再開
1986年6月	炉心入口弁より重水漏洩事故(6/25)と補修
1987年11月	45% EU 燃料炉心に変更
1996年12月	運転永久停止(12/19)
1997年5月	解体届の提出(5/9)
2004年2月	一次系などの原子炉施設撤去完了
現在	原子炉本体のみ密閉管理



第2図 JRR-2 炉室内風景(中性子ビーム実験装置等)⁸⁾

JRR-2 は、建設から運転時において多くのトラブルを乗り越え、また、板状燃料のウラン濃縮度20%から90%への変更、さらに45%に下げる許認可変更を行っている。炉の利用では、中性子ビームによる物性研究、燃料・材料の照射研究、RIの製造、放射化分析などで成果を得ている。JRR-2 の現況は、1996年12月に永久停止、一次系など設備の撤去を2004年2月に完了し、それ以降、原子炉本体のみ密閉管理状態になっている。

JRR-2 の年譜を第2表に、炉室内風景を第2図に示す。

1. 建設・臨界試験

原子力委員会は、1955年に米国から20%濃縮ウランの貸与の可能性が示されたことを受け、原研の設立の年である1956年にCP-5型原子炉を米国から購入し、

JRR-2として建設をすることを承認した。米国のアルゴン国立研究所(ANL)の研究炉CP-5は、熱出力5MW、90%濃縮ウラン板状燃料を用いた重水減速・重水冷却型原子炉で、基礎研究用の研究炉として順調に稼働していた。

JRR-2の選定にあたっては、JRR-1が主に訓練用であるのに比べ、基礎研究の中核施設となるものと位置づけられた。熱出力10MW、最大熱中性子束が約 2×10^{14} n/cm²sと高く、中性子ビーム実験、RI製造、材料照射等に活用することを目標にした。発注では米国の4社から応札があり、CP-5の設計・建設経験があるゼネラル・エレクトリック社ではなく、最終的に10MW運転を保証したアメリカ・マシン・アンド・ファクトリー(AMF)社と契約した。しかし、AMF社の原子力技術の未経験により建設中から多くの問題が発生し、例えば、アルミニウム製熱交換器は伝熱管の溶接欠陥のため米国へ送り返して修理を行い、また、熱遮蔽軽水タンクのフランジシールの不良など数々のトラブルを招いた。重水節約のために重水タンクの周りに設けた軽水タンクは、結果的に裏目となり、後述する大改修が必要となった。熱交換器も重水漏洩のため補修後にステンレス鋼製のものに交換した。

燃料はAMF社の仕様書に基づき米国M&C社が落札し、購入することになった。しかし、燃料に欠陥が見つかり、当初24本入手の予定が、1960年8月に使用できると判断された19本だけが到着した。この燃料の欠陥は、ウラン濃縮度を90%から20%に下げたため燃料芯材(U-Al)のウラン密度が約5倍となり、圧延工程で燃料芯材にインクルージョン(偏析)が発生したのが原因であった。しかし、それでも臨界試験の準備が進められ、同年10月1日に初臨界に到達した。この臨界試験では予定臨界燃料本数8本に対し15本を要し、当時の原研首脳陣、担当先輩方の苦悩が思い出される。この燃料での運転は、AMF社の見解では2MWまでしか認めなかったが、原研の独自判断により19本炉心で3MWでの短期間の試験運転をようやく達成した。

2. 炉心の変遷とインコア照射

20%濃縮ウランを用いた板状燃料は前述のような問題があったため、1962年4月以降90%濃縮ウラン燃料に切り換えられた。90%濃縮ウラン燃料の入手には、当時、極めて困難な交渉が伴ったようである。それでも米国から高濃縮ウランの提供をうけ、米国のB&W社で製造した燃料により1962年10月ようやく定格出力10MWを達成した。

その後、燃料については、1964年より国内の燃料メーカー3社と角形燃料(17枚の燃料板を側板2枚に固定した形状)の国産化及びインコア照射ができる円筒燃料の開発を進め、以後、国産燃料が用いられた。円筒燃料は、

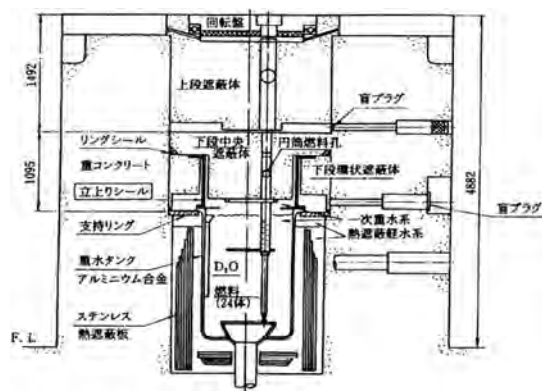
3分割4重で12枚の燃料板で構成し、その中心部に照射キャプセルを挿入することができるもので、燃料孔番号6Cの位置でのインコア照射を実現した。

米国カーター大統領が提唱した1977年の核拡散防止政策により、研究炉燃料の濃縮度を20%以下に低減することが要求され、その対応に苦慮した。1977年11月以降、研究炉燃料濃縮度低減計画に基づきウラン濃縮度が90%から暫定的な条件(技術的に未確立)のもとで45%に変更された。海外の研究所を含む海外メーカーの燃料製造技術調査の結果、ANLにおいて現在JRR-3Mで用いられているシリサイド燃料(心材:U-Al-Si)が開発・検討の段階であり、当時の技術では直ちに20%に変更するのは困難であるとわかった。米国から45%濃縮ウランの供給を受けるには、45%というクラス区分がないだけにかかなり困難な交渉を伴った。また、国内メーカーからは軽水炉燃料の製造に集中する意向が示されたため、JRR-2の燃料はフランスのCERCA社から輸入することとなった。海外燃料の入手にあたり板状燃料の仕様、検査方法の確認に加え、フランス、ドイツ等の研究所と多くの技術情報を交換することができたことは貴重であった。

JRR-2燃料の燃焼度は、前述のウラン濃縮度の変更等の機会に燃料要素当たりウラン235量を175gから195g、さらに220gへと増量し、初期の燃焼度20%から30%、さらに40%と変更した。その効果は、288時間の1サイクル運転後の燃料交換本数を3~4本から2~3本、さらに1~2本と低減している。円筒燃料によるインコア照射は、試作試験されたサンプルであるUO₂燃料、FBR用のプルトニウム燃料(NaKキャプセル使用)、高温ガス炉の粒子燃料コンパクト、グラファイト、鋼材などの照射による先導的な役割に寄与できた。次に述べる原子炉本体等の大改修により、改良型の円筒燃料(3分割5重で15枚)によるインコア照射を増強し、1983年以降は7本の円筒燃料での計装キャプセルの照射を実現した。

3. 大改修工事^{5),6)}

JRR-2では、1965年、1968年、1972年と度重なる補修経験にもかかわらず、軽水タンク側への重水漏洩、下段遮蔽体の燃料孔の角管スリーブの変形による燃料交換作業時の不具合、制御棒駆動装置の電磁石不良に伴う計画外停止等が度々発生し、安定した運転維持が困難になった。このため、所内に「JRR-2原子炉改修委員会」が1972年4月に設置され、検討された。最終的には燃料交換機の新装置への変更、アルゴン41の環境への放出低減のための減衰タンク設置を含む改修計画が認められた。原子炉本体等の大改修で、原子炉上部の遮蔽体の燃料孔形状を変形対策及び円筒燃料によるインコア照射増強を考へて、80mm×80mm角管スリーブから111mmφ円形スリーブに変更した。重水タンク上部等の改修概要を第

第3図 JRR-2の重水タンク上部等の改修⁶⁾

3図に示す。

改修工事は、国の安全審査を受け、1974年5月から開始し1975年9月に完了した。これらの工事の基本設計、炉本体の上段遮蔽体、下段遮蔽体等の撤去作業および組立作業は、JRR-2職員を中心とするメンバーで実施した。また、これらの工事に伴う機器製作は、原子力部門に関心のある企業の協力を得て実施した。重水タンクフランジのシール不良箇所は、フランジ部に立上りシールを溶接する方法を採用し、鉛ガラスで溶接状況を観察できる自動溶接で実施した。改修工事の結果、重水漏洩の完全防止、改修後数年間の計画外停止は年0.5回以下を記録し、また、1987年から1989年まで3年間無事故を記録した。

この改修の成功の鍵は、トラブル原因の徹底した究明と対策、適切なモックアップ炉外試験、製作工場での仮組立試験などである。また、この改修には所内の材料研究者等の専門家の協力があつたことを追記したい。

4. 炉の利用⁷⁾

JRR-2の36年間の利用は、水平実験孔関係でのガスループ、燃料照射ループおよびナトリウムループでの実験、中性子回折実験、医療照射(ホウ素中性子捕捉療法: BNCT)、中性子ラジオグラフィ実験などが行われ、また、照射関係では、前述のインコア照射を除き、垂直実

験孔での工業用、医療用等のRI生産、燃料・材料照射(高温ガス炉の燃料・材料、核融合炉の材料およびトリウム製造)、半導体素材の生産(シリコンドーピング)および気送管による放射化分析等、極めて広範囲にわたっている。ガスループ等の実験は、比較的、短期間で実験を終了し、その後の水平実験孔には多数の中性子回折研究のニーズを受けて、多くの回折実験装置が設置された。炉室内は利用者の研究炉利用要望が多く、いつも多くの実験装置で埋まり、装置設置・配置等の取り合いに苦心した。それでも研究炉管理者側と炉利用者側と活発な意見交換が行われ、良き協力関係が継続した。

5. 運転永久停止⁷⁾

JRR-2は、大改修後、概ね順調に運転していたが、やはり30年を過ぎると他の部分の老朽化も心配された。また、旧JRR-3の原子炉の撤去跡に設置した高性能の新JRR-3M(後述する)が1990年に完成し、安定運転の実績が得られ、利用者がJRR-3Mに徐々に移動した。これらの状況を総合的に判断し、最後の数年間はJRR-3Mを補完する運転となり、稼働率を徐々に下げて1996年12月に36年間の運転を永久停止した。

わが国における原子力開発の黎明期に建設されたJRR-2は、その歩は必ずしも順調とは言えず苦難の連続であった。しかし、問題を一つ一つ解決してきた技術によって、また、新規技術の取り入れに果敢に取り組み、その結果として36年間の運転実績に結実した。

筆者は、JRR-2を振り返ってみると、1979年からJRR-3Mの設計に携わり、当時の研究炉利用の研究者等の要望をいかに実現するか苦心した時期を思い出す。そのルーツはJRR-2での貴重な体験であったと思う。JRR-3Mでは、JRR-2での重水漏洩などの苦い経験、諸外国の高性能研究炉の情報を参考に冷中性子源の設置など意欲的な設計をした結果、高性能の研究炉として順調に稼働した。この機会に計画・設計、建設・運転に関わった多くの方々に改めて感謝したい。大震災から4年

Appendix JRR-1からJRR-4までの各炉の特徴比較

施設名称	JRR-1	JRR-2	JRR-3		JRR-4
定格熱出力	50kW	10MW	10MW(国産1号炉)	20MW(JRR-3M)	3.5MW
最大熱中性子束	$1.2 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$	$1.3 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$	$3 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$	$3 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$	$7 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$
燃料	20%濃縮ウラン 硫酸ウラニル水溶液	90%/45%濃縮ウラン 板状燃料	天然ウラン金属燃料/ UO ₂ (天然・1.5%濃縮) 棒状燃料	20%濃縮ウラン 板状燃料	90%/20%濃縮ウラン 板状燃料
運転目的等	基礎研究 教育訓練	中性子ビーム実験 燃料・材料の照射 RIの生産 医療照射	基礎研究 燃料・材料の照射 RIの生産	中性子ビーム実験 燃料・材料の照射 RIの生産 放射化分析	放射化分析 RIの生産、医療照射 遮蔽・工学実験 教育訓練
運転開始/期間	1957年/11年間	1960年/36年間	1962年/21年間	1990年/25年間	1965年/50年間

を越える現在、計画・設計・建設を担当した者の一人として JRR-3M の早期の再稼働を願ってやまない。

[宮坂靖彦]

— 参考資料 —

- 1) 日本原子力研究所原研史編纂委員会, “日本原子力研究所史”, 日本原子力研究所(2005).
- 2) 原研 20 年史編集委員会, “原研二十年史”, 日本原子力研究所(1976).
- 3) 研究炉管理部, “研究炉 33 年のあゆみ”, 日本原子力研究所(1990).
- 4) 日本原子力研究所, “JRR-1 の概要とその安全対策”, JAERI 6001(1962).
- 5) Y. MIYASAKA et al., “Modification of JRR-2”, JAERI-M 7484 (1978).
- 6) 番場正男 等, “重水タンクシール及び炉心上部遮蔽体の改修 - JRR-2 改修工事 -”, JAERI-M 7617(1978).
- 7) 研究炉部, “JRR-2 の運転経験と利用の成果 研究用第 2 号炉(CP-5 型)の 40 年の軌跡”, 日本原子力研究所(1997).
- 8) 提供: 日本原子力研究開発機構.

著者紹介

飯島 勉 (いいじま・つとむ)

元日本原子力研究所
(専門分野/関心分野) 炉物理, 核融合



宮坂靖彦 (みやさか・やすひこ)

元日本原子力研究所
(専門分野/関心分野) 廃止措置, 廃棄物処理処分, 原子力規制



白井英次 (しらい・えいじ)

元日本原子力研究所
(専門分野/関心分野) 核設計, 安全評価, 原子力規制



新刊紹介 科学論文のミスコンダクト

山崎茂明著, 147p. (2015.5)

丸善出版(定価 2,400 円 + 税) ISBN 978-4-621-08939-2

本書は、研究発表の倫理について著者が医学系の雑誌などに連載、掲載した記事の一部をまとめ直したものである。筋道立った議論展開から結論を導く種類の本ではなく、どこからでも読めるような構成となっている。

著者は研究の不正行為「ミスコンダクト」の存在を認めることから始めるべき、と提案する。感染症は薬物で治療できても、衛生環境の悪化を見なければ症状をくり返すだけだから。

研究不正といえば、FFP (fabrication, falsification, plagiarism: ねつ造, 改ざん, 盗用) であり、本書もそのように説明するが、本当に FFP が“あたりまえ”に存在するのか。実をいうと、本書で FFP に割くスペースは多くない。では他に何が書かれているか。

例えば、重複発表について。会議における重複発表。一回の発表ですむ内容を多数に薄く切り分けるサラミ論文や、本質的に同一の成果の一部データを加えて連続発表する Imalas 出版など。だれを著者にするか「オーサーシップ」について。多すぎる著者問題、著者の順番。実際の寄与なく著者となるギフト(ゲスト)・オーサーシップなど。確かに存在する問題であろう。

競争的資金や産学連携の増加といった“衛生環境”の変化にも言及され、倫理・不正教育やレフェリーシステムなど“公衆衛生的介入”への指摘もある。ほかに、(医学分野の)わが国の英文論文発表の国際性や例の細胞についても取り上げるが、本書はとりわけオーサーシップに焦点をあてる。

上述のようなオーサーシップの混乱を避けるには、生物医学分野の「統一投稿規程」で求める著者の定義 3 項の普及が重要としている。すなわち、(1) 研究の着想とデザイン、またはデータの取得、またはデータの分析と解釈、(2) 論文の執筆、または原稿内容への重要な知的改定、(3) 出版原稿への最終的な同意、である。2013 年にはさらに第 4 の定義が加わった。

この統一規程は、この分野の“国際ルール”(を目指すもの)といえる。そこには、分野を問わない普遍性がある。ボスの名前を必ず共著者に入れる、そんなローカル・ルールは通用しなくなる。そしてさらに、オーサーシップから「コントリビューターシップ」へ変化のとき、と本書はまとめる。

「存在するミスコンダクト」が少しでも気になったなら、本書を手にとってみてはいかがだろうか。

(日本原子力研究開発機構・秋江拓志)



解説

原子力を取り巻く世論の状況と情報提供のあり方
についての考察

特定非営利活動法人パブリック・アウトリーチ 木村 浩

2015年8月11日、川内原子力発電所において、東日本大震災以降初めてとなる本格的な原子力発電所の再稼働が始まった。今こそ、社会と原子力との関係を見直す機会であろう。本稿ではまず、そのための基礎情報のひとつとして、原子力を取り巻く世論の状況を、日本原子力文化財団が実施した「原子力利用に関する世論調査」の結果を用いて簡単に紹介する。後半は、原子力やエネルギーに関する情報提供について、どう取り組んでいけばよいかを考察する。

KEYWORDS: *nuclear energy, public opinion survey, provision of information*

I. はじめに

2015年8月11日、川内原子力発電所において、東日本大震災(以降、単に「震災」と記す)以降初めてとなる本格的な原子力発電所の再稼働が始まった。震災によって根本から検討し直さなくてはならなくなった原子力が、再び前進するための初めの一步と言えるだろう。

社会と原子力との関係は、震災前からも様々なことについて考えられてきた。しかし、震災は、それまでに考え、取り組んできたことを根本から覆したと言ってよい。社会と原子力との関係も、震災後には考え直さなければならなくなった。原子力発電所が再稼働したことは、もう一度その関係を見直す機会であると捉えるべきだろう。

本稿ではまず、そのための基礎情報のひとつとして、原子力を取り巻く世論の状況を簡単に紹介したい。紹介するデータは、2014年10月～11月に日本原子力文化財団が実施した「原子力利用に関する世論調査」によって収集されたものである。その概要を第1表に示す。

第1表 「原子力利用に関する世論調査」実施概要

対 象：全国15～79歳男女
方 法：オムニバス調査、割り当て留め置き法
回収数：1200
実 施：2014年10月31日～11月12日

Introduction of the public opinion and discussion how to provide information concerning nuclear energy : Hiroshi Kimura.

(2015年8月31日 受理)

II. 原子力に関する世論

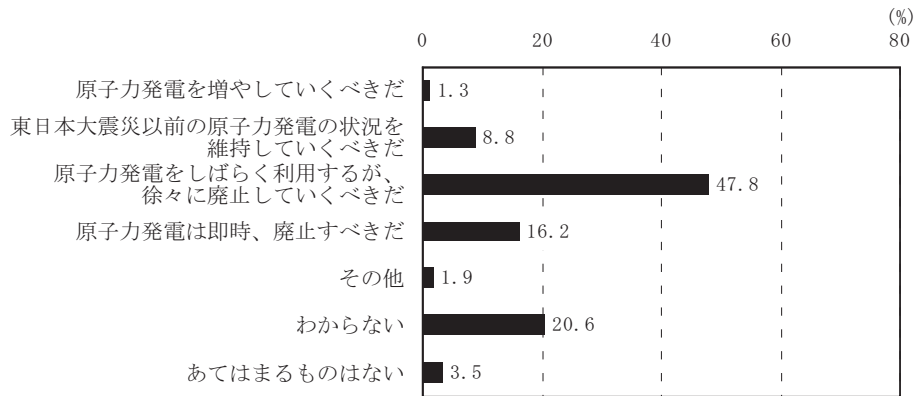
本節では、原子力に関する世論として、「原子力発電の利用に関する認識」「原子力に関する有用性認知」「原子力に関するリスク認知」の調査結果をそれぞれ簡単に紹介する。

なお、紙面の都合上、原子力に関わる心理的要因として重要な「信頼」について述べることはしないが、そちらは日本原子力文化財団の一連の調査報告書¹⁾(特に平成25年度分)に考察されているので、参照願いたい。

1. 原子力発電の利用に関する認識

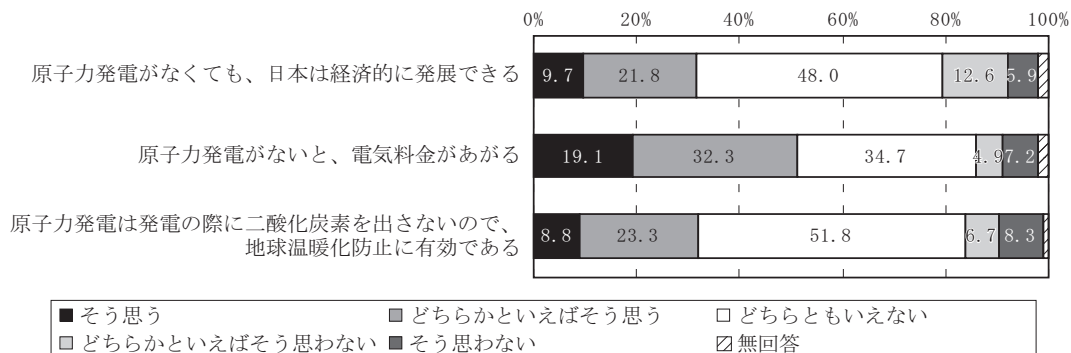
第1図は、原子力発電の利用に関する認識についての結果を示している。これを見ると、「原子力発電をしばらく利用するが、徐々に廃止していくべきだ」との回答が半数近くになっている。多くの人が、将来的には原子力発電を使って欲しくないが、今は仕方ないと思っていることがわかる。その他、「原子力発電を増やしていくべきだ」「東日本大震災以前の原子力発電の状況を維持していくべきだ」を併せて1割程度、「原子力発電は即時、廃止すべきだ」が2割弱、「わからない」が2割という回答の分布になっている。

なお、たとえば、書籍「福島原発事故と国民世論」²⁾に引用されているような既往の調査では、半数以上の回答者が「原子力発電の廃止」を望んでいる、という結果がよく見られるが、それは「利用」と「廃止」という二項対立的な問い方をするためである。本調査は、原子力発電に対して利用と廃止とも割り切れない人々の意見を引き出している興味深い結果と言えるだろう。



第1図 原子力発電の利用に関する認識

「問6 今後日本は、原子力発電をどのように利用していけばよいと思いますか。」



第2図 原子力に関する有用性認知

「問7 あなたは、次のそれぞれの事柄について、どう思いますか。(関連質問を一部抜粋)」

2. 原子力に関する有用性認知

第2図は、原子力に関する有用性について、3つの観点(経済性(国レベル・個人レベル)、二酸化炭素排出抑制効果)からの調査結果である。これを見ると、経済性に関して、国レベルでは、原子力発電がなくても経済発展が可能であると認識しつつも、電気料金という個人レベルでは、原子力発電がないと高くなるとの認識が強いことがわかる。二酸化炭素排出抑制効果については、肯定的な認識がやや多いものの、震災前に行われたその他の調査を参照すると、その認識の割合は大きく下がっていると考えられる³⁾。

ところで、原子力に関する有用性認知は、原子力発電の利用に関する認識との関係において、興味深い傾向が見られる。第2表は、「原子力に関する有用性認知」と「原子力発電の利用に関する認識」のクロス集計を示したものである。この中の「即時廃止」区分の行に注目すると、特に経済性(個人レベル)と二酸化炭素排出抑制効果の項目において、回答の分布にピークが2つある(中庸回答部と強い否定回答部)。つまり、原子力発電を即時廃止すべきとする回答者は、原子力に関する有用性のある程度は認めながらも即時廃止と判断している者と、そもそも有用性自体を認めていない者が含まれている可能性がある。本調査ではこれ以上の分析が難しいが、原子力発電即時廃止という同一の意見を持ちながらも、そ

の意見を導出する情報の認識にずれが生じているという状況については、その認識形成プロセスも含めて、さらなる詳細な分析や研究が求められるだろう。

3. 原子力に関するリスク認知

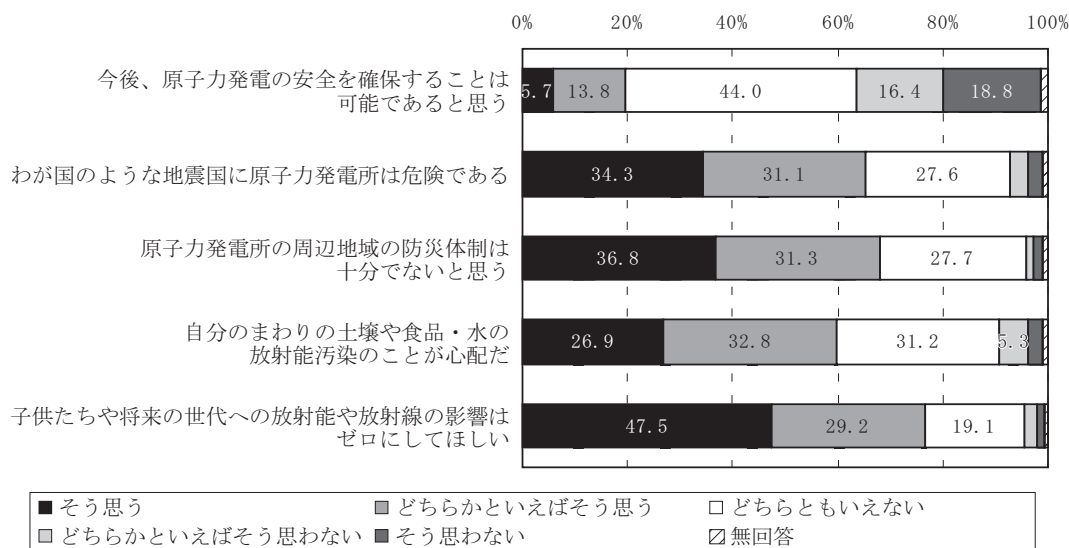
第3図は原子力に関するリスク認知について、5つの観点(原子力発電安全性、地震、防災体制、放射能影響(自分自身・将来世代))からの調査結果を紹介している。全体を見てわかることは、原子力に関するリスク認知は、あらゆる事柄について高めであるということである。地震による危険性に関する認識は、東日本大震災前から高かったが、震災後にはさらに高くなった³⁾。震災後には防災体制を整えるための取り組みが行われてきているが、未だ十分であるとは思われていないようだ。

また、放射能汚染や放射線影響についての不安は消えていない。そして、自分自身への影響よりも、将来世代への影響を強く懸念する傾向が見える。原子力発電を行う際の大きな課題のひとつに、高レベル放射性廃棄物処分の問題があるが、田中(1998)の研究でも指摘されるように、高レベル放射性廃棄物は、原子力発電所よりも高いリスク認知を示す⁴⁾。それに加えて、将来世代への影響の大きな忌避感が加わるとすると、高レベル放射性廃棄物処理事業の実施は、大きなハードルを越えていかなければならないだろう。

第2表 「原子力に関する有用性認知」と「原子力発電の利用に関する認識」のクロス集計表

	原子力発電がなくても、日本は経済的に発展できる					原子力発電がないと、電気料金がある					原子力発電は発電の際に二酸化炭素を出さないの、地球温暖化防止に有効である				
	Yes	←	→	No		Yes	←	→	No		Yes	←	→	No	
全体 N=1,200	116 (9.7)	261 (21.8)	576 (48.0)	151 (12.6)	71 (5.9)	229 (19.1)	387 (32.3)	416 (34.7)	59 (4.9)	86 (7.2)	106 (8.8)	280 (23.3)	621 (51.8)	80 (6.7)	99 (8.3)
原子力増加 N=16	0 (0.0)	3 (18.8)	4 (25.0)	4 (25.0)	5 (31.3)	4 (25.0)	8 (50.0)	0 (0.0)	4 (25.0)	0 (0.0)	3 (18.8)	6 (37.5)	3 (18.8)	3 (18.8)	1 (6.3)
震災前維持 N=105	0 (0.0)	9 (8.6)	44 (41.9)	38 (36.2)	13 (12.4)	31 (29.5)	37 (35.2)	31 (29.5)	4 (3.8)	1 (1.0)	19 (18.1)	33 (31.4)	47 (44.8)	6 (5.7)	0 (0.0)
徐々に廃止 N=573	59 (10.3)	143 (25.0)	276 (48.2)	68 (11.9)	18 (3.1)	123 (21.5)	215 (37.5)	175 (30.5)	28 (4.9)	23 (4.0)	54 (9.4)	152 (26.5)	287 (50.1)	39 (6.8)	35 (6.1)
即時廃止 N=194	52 (26.8)	60 (30.9)	55 (28.4)	8 (4.1)	13 (6.7)	26 (13.4)	54 (27.8)	51 (26.3)	16 (8.2)	45 (23.2)	11 (5.7)	39 (20.1)	74 (38.1)	17 (8.8)	52 (26.8)
わからない N=247	2 (0.8)	35 (14.2)	169 (68.4)	23 (9.3)	15 (6.1)	31 (12.6)	62 (25.1)	133 (53.8)	5 (2.0)	10 (4.0)	10 (4.0)	35 (14.2)	180 (72.9)	14 (5.7)	5 (2.0)

括弧内は各行における百分率(%)。「原子力の利用に関する認識」における「その他」「あてはまるものはない」、「原子力に関する有用性認知」における「無回答」は表には含めていない。なお、「原子力増加」区分はNが小さく、参考値として捉えるのが良い。



第3図 原子力に関するリスク認知
「問7 あなたは、次のそれぞれの事柄について、どう思いますか。(関連質問を一部抜粋)」

Ⅲ. 情報提供のあり方に関する考察

さて、ここからは少し話題を変えて、情報提供のあり方について考察していく。これから原子力を適切に用いていくためには、当然、人々への適切な情報提供が前提となるからだ。

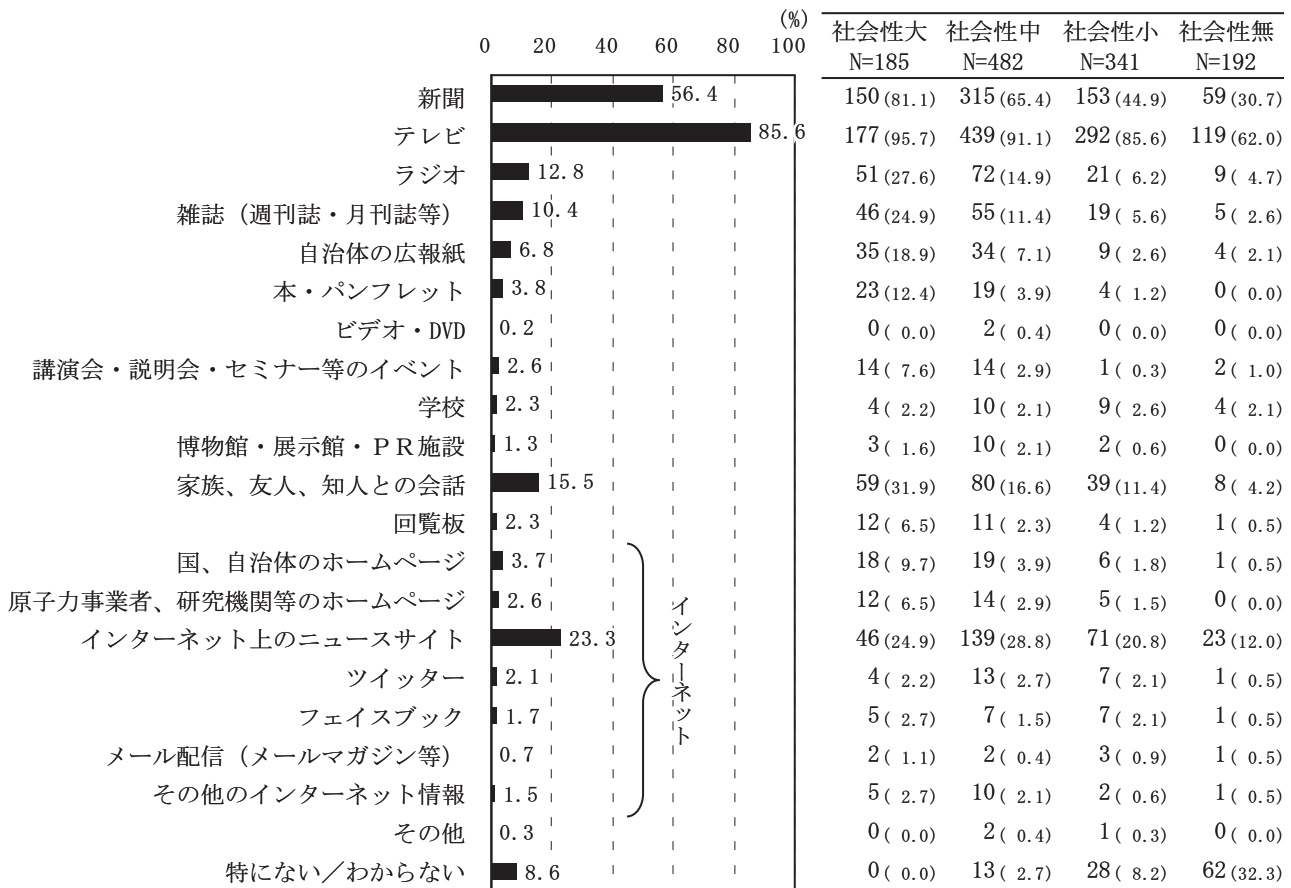
まず、人々の情報獲得行動について見ていく。第4図は、人々が原子力やエネルギーに関する情報をどこから得ているのかを示したものである。一般に情報源として、テレビが第1位、新聞が第2位、インターネットが第3位とは、多くの調査でよく見られる。本調査においても、「テレビ」が第1位(85.6%)、「新聞」が第2位(56.4%)であるが、インターネットについては、細かく分解して聞いている。すると、「インターネット上のニュースサイト」が第3位(23.3%)となり、その他のインターネットの情報源からはあまり情報を得ていないとい

う結果となった。このことは、人々は、原子力やエネルギーに関する情報のかなり多くの部分を、テレビ、新聞、インターネットというツールの違いはあるにせよ、マスメディアを通して得ていることを示している。

では、続く順位はどうなっているのか。情報源の第4位は「家族、友人、知人との会話」(15.5%)となっている。実は、原子力やエネルギーに関する情報は、マスメディア経由に続き、フェース・トゥ・フェースの対話から得ることが多い。

さて、第4図の右には、情報源と社会性とのクロス集計表を載せておいた。ここで言う社会性とは、第3表に示した項目の選択数によって区分したものであり、いわば「社会へのコミットメントをどれだけ大切に考えるか」ということを示したものだと思ってもらえばよい。

これを見ると、社会性の大小にかかわらず、「新聞」と「テレビ」はそれぞれ、第1位、第2位の情報源であるこ



第4図 原子力やエネルギーに関する情報源

「問12 あなたは、ふだん原子力やエネルギーに関する情報を何によって得ていますか。(複数選択)」

図中の右表は、各項目と社会性とのクロス集計表。括弧内は各列における百分率(%)。なお、社会性の区分は、第3表を参照のこと。

とがわかる。ただし、社会性が小さくなるに伴い、特に新聞から情報を得る割合は急激に小さくなる。社会性のない層では、情報源が「特にない/わからない」という回答者が3割を超える。一方、社会性の大きい層では、新聞、テレビに続く情報源として、「家族、友人、知人との会話」が挙げられる。社会へのコミットメントが大切だと考える人ほど、フェース・トゥ・フェースの対話を大切なものと捉えているようだ。

第5図は、参加したい原子力やエネルギーに関するイベント等についての結果である。まず、「あてはまるものがない」が6割を超えていることは認識しておくべきだろう。第5図の右にも社会性とのクロス集計表を載せているが、社会性のない層においては、「あてはまるものはない」との回答は実に9割を超える。逆に、社会性が大きくなるにしたがって、この回答率は下がってくる。

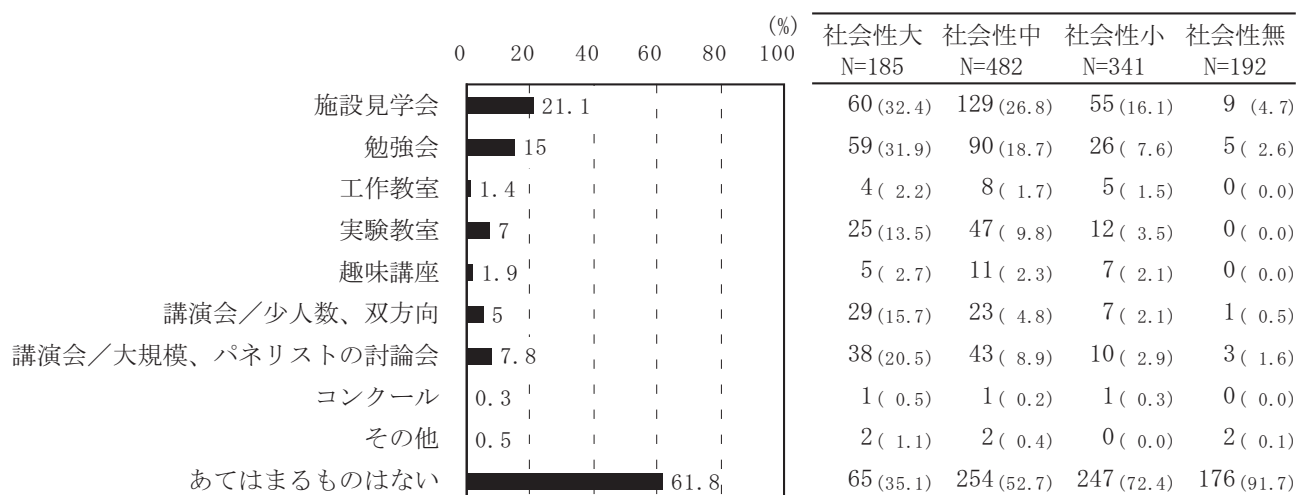
社会性が中程度の層では、「施設見学会」「勉強会」といったイベントへの参加意欲が向上してくる。さらに社会性が大きくなると、それらに加えて、「講演会/大規模、パネリストの討論会」「講演会/小人数、双方向」のようなフェース・トゥ・フェースの対話を含むようなイベントに参加したいとの回答も大きくなっていく。

これらのことは、情報提供のために何かのイベントを

第3表 「社会性」指標

1. 現在、ボランティア活動をしている。もしくは近年に活動したことがある
2. ボランティア活動の経験はないが、機会があればぜひしたいと思っている
3. 地域の行事・イベント、地域の祭りなどにはよく参加するほうだ
4. 選挙はできるだけ欠かさずに投票したいと思っている
5. 地域(コミュニティ)における住民同士のふれあいを大切にしている
6. 自治会・町内会、PTAなどの活動には進んで参加している
7. 街の美化や美観の保全是大事だと考えている
8. 市民はだれも、外からの訪問者や観光客に気を配り、もてなすべきだ
9. 地域の伝統や文化は大事であり、継承していくように努めている
10. 地域の防犯や環境問題など、ご近所と協力し合って具体的に対処している
11. 児童や若者の公共心の希薄化が気がかりだ
12. 地域の問題や課題を行政まかせにしないで、市民も一緒に考え行動すべきだ
13. 地域の出来事には常に注意して、さまざまな情報を見聞きするようにしている
14. 災害時には市民の助け合いが必要であり、ふだんから準備・訓練をしておくべきだ
15. 地域の寺・神社などの文化財は心のよりどころとして大切にすべきだ
16. あてはまるものはない

あてはまる項目を複数選択。なお、1~15番の選択数が、1~2個の回答者は「社会性小」、3~7個の回答者は「社会性中」、8~15個の回答者は「社会性大」、16番を選択した回答者は「社会性無」と区分。



第5図 参加したい原子力やエネルギーに関するイベント等

〔問15 以下に挙げている「原子力やエネルギーに関するイベント」の中で参加してみたいものはどれですか。(複数選択)〕

図中の右表は、各項目と社会性とのクロス集計表。括弧内は各列における百分率(%)。なお、社会性の区分は、第3表を参照のこと。

用意したとしても、ほとんど特定の層(社会性の大きい層)からの参加しか見込めないということを示している。情報提供に関して、「無関心層をどうすればよいのか」という課題はたびたび聞かれるものであるが、本調査の結果を見れば、(本稿では示していないが、社会性のない層は、原子力やエネルギーに関する事柄全般に対して関心が低いことが、同調査からわかっており、)その層に情報を届けられるのは、ほとんど唯一「マスメディア(それもテレビを経由して)」であるということになる。

筆者はむしろ、社会性の大きい、すなわち、社会へのコミットメントを大切なものとする人々に、どのような情報を、どのように届けるのかをもっと真剣に検討すべきだと考える。この層は、情報獲得のチャンネルを多く保有しており、特に「家族、友人、知人との会話」が大きな情報源となっている(すなわちマスメディア経由ではない情報源を持っている)。さらに、原子力やエネルギーに関するイベント等にも参加する意欲が高い。しかし現状では、このように情報受信体勢を持っている人々に対してさえも、エネルギーや原子力に関する情報が十分に伝わっているとは言いがたい。したがって、まずはこのように情報受信体勢を持っている人々と共にフェイス・トゥ・フェイスの対話を行う機会やイベントを創り、大切に育てて、そこに参加してくれる人々が、エネルギーや原子力に対して、自ら考え、オピニオンを持てるような社会状況を作っていくべきだろうと考える。

る。では、そこからどう活動を広げていくのか——これは次の段階で考えることだろう。

近年、「草の根」活動が、エネルギーや原子力に関連する分野において活発に行われている。地道ではあるが、これらの活動に、原子力業界の専門家や事業者等が積極的に参加して、人々の意見や考え方を知り、人々が自らオピニオンを作り上げていくための手助けをすることから始めるのが大切なのではないだろうか。

－ 参考資料 －

- 1) 日本原子力文化財団, 平成26年度原子力利用に関する世論調査・平成22～25年度原子力利用の知識普及啓発に関する世論調査, <https://www.jaero.or.jp/data/01jigyoutyousakenkyu.html>
- 2) 柴田・友清, 福島原発事故と国民世論, ERC出版, 2014
- 3) 日本原子力学会, エネルギーと原子力に関するアンケート, <http://www.ponpo.jp/DMWG/index.html>
- 4) 田中, 高レベル放射性廃棄物地層処分場立地の社会的受容を決定する心理的要因, 日本リスク研究学会誌9, 51, 1997

著者紹介



木村 浩(きむら・ひろし)
特定非営利活動法人パブリック・アウトリーチ 研究企画部 研究統括
(専門分野/関心分野)社会と原子力との関係領域におけるリスク・コミュニケーション, 社会調査等。

転機を迎えるエネルギー市場

(その1)再生可能エネルギー普及に向けた課題

東京大学 小宮山 涼一

2012年7月に始まった再エネ電力の固定価格買取制度(FIT)により、わが国では太陽光発電が急速に増加したが、再エネ買取費用増加等のリスクが懸念されている。FITを世界に先駆け導入した欧州の一部の国は再エネ普及に伴い、既に賦課金増加による家庭用電気料金上昇、火力発電の不採算化と廃止に見られる電力供給信頼度確保の問題に直面している。わが国でも再エネ調達コスト抑制と電力安定供給確保を図りつつ、再エネ普及に資するさらなる効果的な政策支援が期待される。

KEYWORDS: *renewable energy, feed-in tariff, power generation mix, power grid operation, surcharge, ramp generator, feed-in premium, electricity market reform*

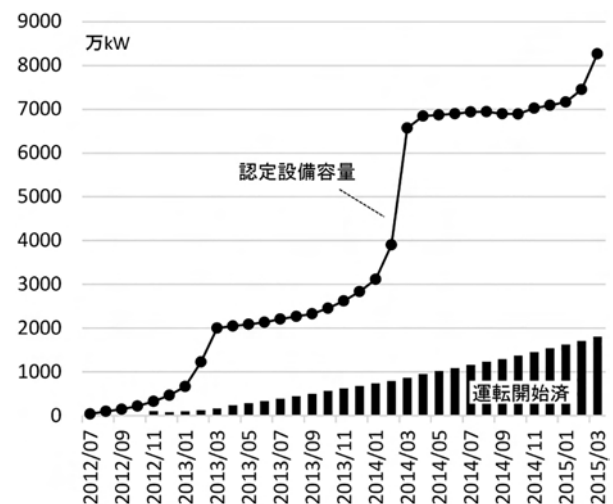
I. 再生可能エネルギー普及動向

経済産業省は2015年7月、長期エネルギー需給見通しを新たに公表し、2030年の再生可能エネルギーの電源比率を22~24%とした¹⁾。2009年の長期エネルギー需給見通し²⁾では、2030年の再エネ電源比率(最大導入ケース)を19%としており、電力市場における再エネ発電導入を一層拡大する方針を示している。

再エネ電力の持続的普及に向け、政府は2012年7月に再生可能エネルギー発電電力の固定価格買取制度(FIT)運用を開始し再エネ支援を強化した。これにより、日本の電力供給構造に新たな変化の兆候が現れつつある。最長20年間におよぶ政府による再エネ電力の買取保証を受けて、再エネ設備の投資リスクが軽減し、再エネ事業者の投資インセンティブが働きやすい開発事業環境が形成された。その結果、太陽光発電の導入が急速に増加している。国際的に見ても日本は2014年にドイツ、中国に次ぐ世界第3位の太陽光発電導入国となり、国際市場での存在感が再び増しつつある³⁾。FIT運用開始以降での再エネ設備の導入量は2015年3月末時点で1876万kWに達し、運用開始前(2060万kW)と比べ約9割も再エネ設備量が増加し、同3月末時点の再エネ設備の認定量も8768万kWに急増した⁴⁾。再エネ設備導入

量、認定量のうち9割以上が太陽光発電である。太陽光は他の再エネに比べ事業化が容易なため、わが国では太陽光を主として再エネ導入が拡大した。

FITによる太陽光発電の累積導入量は2015年3月末で1811万kW(住宅用:310万kW、非住宅用:1501万kW)、認定量は8263万kWに達し⁴⁾、FITに後押しされ着実に増加した(第1図)。RPS制度や、2009年8月施行のエネルギー供給構造高度化法に基づき2009年11月~2012年7月に運用された余剰電力買取制度の下では、住宅用を中心に太陽光発電システムが増加したが、FIT開始後は非住宅用(メガソーラー)で急増し、現在、太陽



第1図 太陽光発電設備のFIT認定容量と運転開始量(参考資料⁴⁾より作成)

Turning point in energy market : (No.1) Challenge for the promotion of renewable energy : Ryoichi Komiyama.

(2015年8月1日 受理)

光累積導入量の約半分を占める。

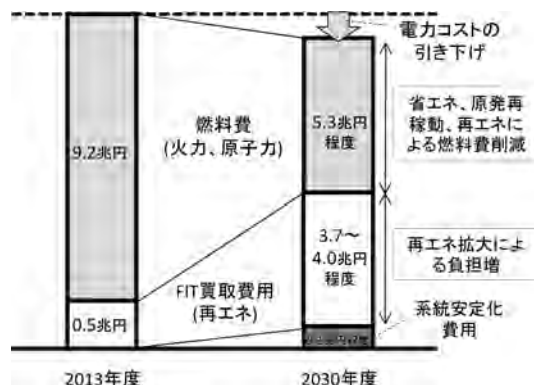
FIT は、電気の市場取引価格よりも高い価格で再生電力を事業者より調達することで、再生設備投資の促進を目指す政策措置である。FIT は日本の再生普及に大きく貢献しているが、再生電力の連系拡大に伴い、わが国の電力システムは賦課金増加による電気料金上昇への懸念や電力系統運用上の課題に直面しつつある。また、長期需給見通しでの再生導入目標値を実現する場合、さらに域内系統や地域間連系線、バッテリー増強等に伴うコスト負担増加をもたらす可能性もある。太陽光発電等の再生は、助成により投資回収が保証される限り、導入が継続的に伸びると見られるが、電力需給制約から系統の再生接続可能量にも一定の上限があり、過度な再生連系拡大は、経済的な電力需給運用を困難にする。

国際的に見ると、固定価格買取制度(FIT)運用国は2014年現在で約70カ国に達し⁵⁾、FITは内外の再生投資支援の中核的制度的の一つとなっている。世界の再生導入量は増加基調にあり、2014年の世界の太陽光発電導入量は1.8億kW(5年前に比べ7倍増)、風力発電は3.7億kW(同2倍増)まで拡大した³⁾。しかし、FITを世界に先駆け導入した欧州は、これまでFIT導入を奨励する基本方針を維持していたが⁶⁾、電気料金上昇と電力供給信頼度確保の課題に既に直面し、再生政策の再検討が進められている^{7),8)}。本稿では内外の電力市場に影響を及ぼしているFITを中心に、再生普及に向けた課題について解説する。

II. 固定価格買取制度の概況

2012年7月より、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」により、FITの制度運用が開始した。太陽光を助成対象とした余剰電力買取制度と異なり、買取対象を風力、地熱、バイオマス、水力まで広げ、全量買取に関しても大規模な一定規模以上の設備量で認可された。同制度により、一層の再生投資インセンティブが働く市場環境が整備され、わが国で太陽光発電が急速に普及する礎となった。

固定価格買取制度では、経済産業省が設備費用(原価)に事業者利潤を上乗せした調達価格(買取価格)を毎年度見直し、年度末までに次年度の調達価格を決定する。現行のFITは再生を類型、規模別に分類し、各再生設備の原価に利潤を上乗せして買取方式を採用している。このFIT運用の結果、日本では開発期間が短く事業化が容易な太陽光発電の普及が進化した。メガソーラーの場合、発電容量が1000kW程度で約1年、電力系統への接続契約等に時間を要する特別高圧案件2000kW以上でも約2年で事業化可能で投資効率が高い。太陽光以外の再生は、環境アセスメントや事業化可能性調査などに時間を要するため(風力、中小水力、バイオマスの



第2図 電力コストの見通し(参考資料¹⁾より作成)

開発期間は5年前後、地熱は10年以上)、最近ではFIT制度開始以前より計画された設備が認定される場合が主である。2015年度の再生買取価格は、太陽光発電(10kW以上)で2014年度の32円/kWhから29円/kWhへ引下げられた(7月から事業者利潤上乘せをさらに2円引下げ27円/kWhとなった)。家庭用太陽光発電(10kW未満)の買取価格も、2014年度37円/kWhから2015年度は33円/kWh(出力制御機器なし)へ引下げた。買取価格引下げは、最近の太陽光発電コスト低下を速やかに反映している。政府は太陽光に偏った再生導入を是正するため、太陽光に比べ普及量が少ない風力や、再生中でも安定的発電出力が期待される地熱、バイオマス、中小水力の買取価格は据え置き、これらの再生資源への優先的な投資支援の方針を示している。

III. 賦課金や買取費用の概況

1. 賦課金の動向

FITでは、法律により原価に事業者利潤の上乗せで定められた価格で、電気事業者が再生電力を買取る。この買取費用は、回避可能費用を事業者の火力燃料費用の節約分として差引いた上で、賦課金として需要家の電気料金に転嫁される。この需要家へ課される賦課金が、再生電力買取の資金源となる。2011年3月における再生特別措置法原案の閣議決定当初、賦課金単価は0.5円/kWh、標準家庭の月間負担額は150円/月が予想されていた。2015年度時点で、賦課金単価は1.58円/kWh、標準家庭の負担額は474円/月、賦課金総額は年間1.3兆円となっている。2014年度の賦課金総額0.7兆円からほぼ倍増した。再生設備約7千万kW(2014年6月末の認定量相当)を仮に全て導入した場合、賦課金単価は3.12円/kWh、標準家庭の負担額は935円/月、賦課金総額は年間2.7兆円に増加すると推定されている⁹⁾。

2. 買取費用の展望

経産省の長期需給見通し¹⁾では(第2図)、FIT制度による買取費用は2013年度0.5兆円から2030年度には3.7~4兆円へ拡大すると見込まれている。その一方、電



第3図 ドイツでの家庭用電気料金(月額)の推移(参考資料¹⁰⁾より作成)

力コストは2013年度の9.7兆円から2030年度には9.1~9.4兆円へ3%~6%ほど低下する。電力コストの一層の低減を実現するには、再エネ買取費用の削減が必要となる。2030年度に向けた買取費用の比率増加により、再エネ電力を長期で買取保証を行うFITの制度上、電力コストが低下しづらくなるリスクがある。燃料価格が将来下落してもそれによる燃料費削減効果が弱まり、燃料価格が想定より上昇すれば2030年度の電力コストは現状以上に高くなる可能性にも配慮する必要がある。経産省は報告徴収や聴聞を踏まえ、FIT設備認定を既に受けた太陽光案件のうち、住宅用は1割、非住宅用は4割の案件が着工せず、住宅用は9割、非住宅用は6割がこれまでの買取価格で導入され、残りは2030年までにより低い買取価格(22円/kWh)で導入される想定で買取費用を予測している¹⁾。既に認定を受けた太陽光発電認定量のうち、着工の辞退や取消が政府の予測を上回れば、将来の新規着工分は現行の高めの買取価格ではなく、より低い買取価格が適用され、買取費用を第2図の推定よりも削減できる。FIT認定案件のうち、着工実施が見込めない案件の取消しと健全な新規案件の導入促進は買取費用低下をもたらす。電気料金上昇リスクを抑制できる。よって、認定後も着工しない滞留案件や接続枠の空押さえの案件を、買取費用が安くなる新規認定分に積極的に置き換えることが、電力コストの一層の抑制の上で重要となる。空押さえ防止策(予定日までに運開しない場合等に接続枠を解除可能)や180日ルール(太陽光発電(50kW以上)の事業認定後180日経過後も設備確保が未確認の場合、設備認定が失効する解約条件)を経産省は既に講じており、着実な実施が求められ、政府の再エネ支援に係る監督上の役割は一層重要になると考えられる。

3. 欧州での買取費用増加とその対応策

買取費用増加は、既に欧州で問題となっている。FITを採用して再エネ導入量を伸ばし、世界最大の太陽光発電導入国(約3820万kW, 2014年³⁾)であるドイツでは

賦課金が増加し、FITが電気料金(家庭用)上昇の一要因となっている。ドイツの賦課金は太陽光導入量が飛躍的に増加した2010年以降、急速に上昇しており(第3図)、標準家庭(年間電力消費3500kWh)のFIT賦課金は18ユーロ/月に達し(年間約220ユーロ、日本円で年間約3万円)、賦課金総額は3兆円を超える。賦課金が家庭用電気料金に占める比率は約2割、賦課金と他の公租公課が占める比率は5割近くに達する(第3図)。また、ドイツの家庭用電気料金はFIT開始時(2000年)に比べ約2倍へ上昇し、他の欧州諸国でも再エネ賦課金が物価以上のテンポでの電気料金上昇を招いた要因の1つとして指摘されている。

FIT運用による買取費用や賦課金の増加等に係る問題は、既に欧州の再エネ政策にも影響を与え、再エネ調達コストを抑制しつつ、再エネ電力の持続的普及を図ることがエネルギー政策上の重要指針となっている。欧州委員会は2014年、環境・エネルギー領域での国家助成政策のあり方に係るガイドライン¹¹⁾を発表し、EU加盟国の再エネ支援措置の認定基準が示された。このガイドラインでは、再エネの競争力の向上を受け、再エネの技術進歩に応じて過度な助成を停止して需要家の負担を軽減し、競争的市場環境の中で再エネ普及を進め、市場機能の活用による再エネ投資の効率化を目指す方向性が示された。その中で特に、市場価格に上乗せした割増金(FIP(feed-in premium)等)による助成措置や、再エネ事業者の調達価格や発電量を競争入札制度で決定するオークション方式¹²⁾の採用が挙げられている。FIPは、再エネ事業者が市場価格での卸電力販売収入の他に、割増金(プレミアム)による収入を得る制度である。市場価格で助成額が決まるため、FITと異なり採算確保が保証されるとは限らず、再エネ支援は市場環境に連動する。欧州では他に、調達価格改正期間の短縮化、調達コスト総額の制限、再エネ年間導入量の制限といった施策が採用され、ドイツは2017年よりオークション方式を採用する方針を示している。このように欧州の一部ではFITでの再エネ支援の見直しが行われている。

わが国ではFITは事業者の再エネ投資リスクを軽減することで再エネ普及を推進する重要な役割を果たした。今後は再エネ大量導入に適応し、賦課金抑制と国民負担の軽減に資する再エネ支援の構築が期待される。欧州の指針等を参考に、再エネ調達に競争入札制度を導入し、事業効率性が高く買取費用を抑制しうる事業者に系統連系を認可する方式や、年間の再エネ発電量や買取費用に上限を設定し、賦課金を制御する方式も考えられる。しかし、欧州では再エネ支援制度の複雑化等を背景に2011年以降、再エネ投資が減少傾向にあるとの報告もあり¹³⁾、再エネが持続的に普及するように、引き続き投資リスク軽減にも配慮した事業環境の整備が必要である。

IV. 再エネ導入と電力供給信頼度の確保

1. 再エネ系統接続の保留

FIT による再エネ接続申請の増加により、昨年、電力会社は電力需給の制約等から電力系統の再エネ接続可能量に一定の限界があるとして、接続申請への回答を一時保留した。電力会社は再エネの系統接続申請の受入義務があるが、九州電力、中国電力、四国電力など計4社に多数の太陽光発電の系統連系が申請され、電力供給信頼度維持への懸念から、接続回答が一時保留された。現在、九州電力の太陽光接続可能量は817万kWだが、2015年4月末時点で太陽光の接続済・契約申込量は1326万kWに達し、同管内の低負荷期のピーク電力約800万kWや接続可能量の1.5倍以上の規模となった。北海道電力の接続可能量も117万kWであるが、太陽光の接続済・契約申込量は248万kWに達し、接続可能量を上回った。また、北海道の冬のピーク電力が約550万kWのため、申請量を全て連系すれば、管内の系統運用は従来より困難になると予想される。

2. 再エネ系統接続への対応策

再エネ普及量が接続可能量を超過した場合、電力供給信頼度の維持が困難になるため、対応策として出力制御ルール(出力抑制)が現在導入されている。2015年1月、再エネ大量連系下での需給運用をさらに柔軟にするため、再エネ特別措置法の一部が改正された。太陽光発電の出力制御の対象範囲を住宅用まで広げ、出力制御期間を日単位から時間単位に変更して柔軟な出力制御を実現すること、出力制御期間を年間30日以上に増やせる指定電気事業者制度の活用拡大等の対策が追加された¹⁴⁾。これにより太陽光の場合、従来の360時間ルール(年間360時間上限での無補償での出力制御)の他に、接続可能量を超過した電力会社は年間360時間の上限を超える出力制御が認可されている。そのため今後太陽光がより普及し接続可能量を超過すれば、メガソーラー事業者や融資を行う金融機関等にとって、太陽光の事業収益の不確実性や投資リスクが高まる可能性もある。火力や蓄電池による太陽光の最大限の出力調整を考慮しても、太陽光の普及につれ、その出力制御量も一層増加すると見込まれるため¹⁵⁾、太陽光の投資効率は今後、徐々に低下する可能性もある。

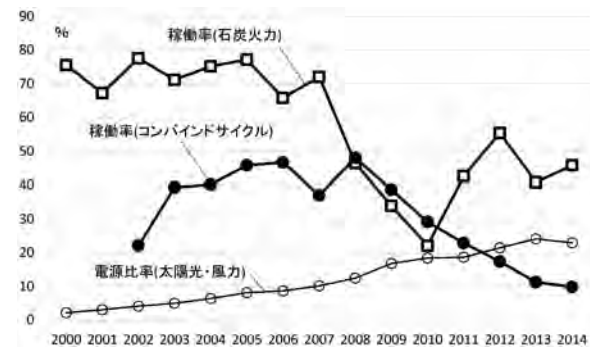
また、現行のわが国の電力系統は、電力各社がその管内の電源を主に用いて需給調整を行う形で基本的に整備されており、太陽光や風力等の地理的に偏在する間欠性電源の電力系統への大量連系は難易度が高い。例えば北海道は、風力や太陽光の資源ポテンシャルを有するが、北海道と本州の連系線(北本連系線)容量は小さく、さらに北海道管内の需給調整容量も小さいため、北海道での再エネ接続量にも限界がある。そのため、偏在する再エ

ネを大量連系するには、日本全国の火力等の需給調整資源を広域で活用できる大規模な系統増強投資が必須の課題であり、従来の電力系統のあり方を変える必要がある。電力システム改革の一環として、電力広域的運営推進機関が設立されたが、今後その役割は重要性を増すと考えられる。一方、域内系統、連系線¹⁶⁾や蓄電池¹⁷⁾の増強等の投資は電気料金の上昇圧力になりかねず、経済合理性にも配慮した再エネ接続拡大が求められる。欧州送電系統運用者ネットワーク(ENTSO-E)は2014年11月、再エネの系統接続に関して、2030年までに欧州全体で約20兆円(1500億ユーロ)にのぼる巨額の設備投資額が必要であると試算している¹⁸⁾。また欧州では再エネ普及拡大に対して、系統増強等の供給力確保とともに、再エネの変動を電力系統で吸収する柔軟な需給調整能力確保が、エネルギー政策上の重要な課題として位置付けられている¹⁹⁾。

3. 再エネ普及と電力市場への影響

FIT がもたらしうる再エネ大量接続は、電力需給運用にも影響を与えるため、わが国の今後の電力システム改革とも合わせた検討も重要である。既に欧州では太陽光、風力大量連系により、それらの需給調整を行う火力発電の稼働率が低下し採算性が悪化し、また、欧州の一部の国では、偏在する再エネ電源連系拡大が送電混雑をもたらし、電力供給信頼度確保に係る問題が顕在化しており、諸対策が検討されている²⁰⁾²¹⁾。例えば欧州では、従来の各管内での独立的な需給運用の広域化を図り、需給調整資源の確保と経済合理的な電力供給を実現するため、欧州内で需給調整の統一化を目指す構想がある²²⁾。

欧州の電力市場の需給調整では、可変費の安価な電源より優先的に連系し給電する方式が採用されている(メットオーダー)。太陽光や風力等の再エネは固定費が火力より全般的に高いが、可変費は経済優位性があるため、優先的に連系される。しかし欧州での太陽光、風力大量連系が系統運用に与える影響を見ると、メットオーダー方式での大量連系は、電力供給信頼度確保に悪影響を与えている。理由として、風力や太陽光発電はkW 価値(発電が必要な際、要請される出力で発電可能な能力)²³⁾²⁴⁾²⁵⁾が極めて小さく、火力電源等の設備量を全面的に代替することは困難である。よって、風力や太陽光はkW 価値が小さく、大量連系されても設備量(kW)で見ると火力電源を代替できない一方、風力や太陽光の発電量(kWh)は火力電源の発電量を代替できるため、火力の稼働率低下を引き起こす。特に、再エネの出力変動は予測が難しく²⁶⁾²⁷⁾、その出力調整の役割を担う負荷追従性に優れたガス複合発電は、予備力確保の上での待機電源として重要性が高まっているが²⁸⁾²⁹⁾、欧州の一部の地域ではFITによる助成を受け優先的に給電される再エネ電源に締め出される形で、稼働率が低下し



第4図 スペインでの火力発電稼働率の推移(参考資料³⁰⁾の各年版より作成)

ている。

4. 欧州での再エネ普及の影響

スペインでは出力が不安定な風力や太陽光の電源比率が20%を超え、調整電源(コンバインドサイクル)の稼働率が以前の40%から10%まで低下している(第4図)。また卸電力市場では、風況や日照が良好で、限界費用が安い風力や太陽光の発電出力が系統で増加する際、メリットオーダー方式によりシステム全体の限界費用が低下し、卸売電力価格が下落する。これにより火力電源等の販売収益の減少と経済性の悪化を招き、火力等の投資や系統での維持に関して、事業者のインセンティブが低下する。例えばドイツでは2011年前後より再エネ大量連系を反映して、卸売電力価格は低下傾向にある。稼働率低下と卸売電力価格低下により火力発電事業が不採算化し、ドイツ、スペイン、イタリア等では廃止や休止となる火力の案件が現れている。これにより再エネ電力の出力調整用電源が不足し、電力の供給信頼度確保に支障を生じる可能性がある。そこで火力の採算性を維持するため、容量市場(発電能力(kW)に報酬を付与し取引する市場)の整備等の方策が検討されているが、多くの市場ではまだ十分に整備されておらず、容量確保のコストも最終的に需要家に転嫁されるため、電力コスト抑制への配慮も必要となる。また欧州では、再エネ接続による火力発電量の減少が排出権の需要低迷を招き、排出権価格が下落傾向にある。そのため石炭火力は、低迷する排出権価格とさらに最近の石炭価格低下を受けて経済優位性を維持し、気候変動対策強化の下でも、石炭火力の発電量は安定的に推移している。ドイツでは近年、再エネ電力普及拡大にもかかわらず、石炭火力発電量も増加し、二酸化炭素排出量も同時に増加する逆説的な現象が見受けられる。

V. 固定価格買取制度と再エネ支援の課題

FITは再エネ普及に大きく貢献した。一方、その課題は買取価格の調整により系統接続可能量に見合う適切な再エネ導入量の制御が困難な点にある。法律上、再エネ

原価に事業者利潤の上乗せで決めた価格で再エネ電力を調達する枠組みでは、調達価格引下げには限界があり、再エネ普及速度をうまく制御できず系統の最適運用を実現しづらい。また、FITの助成対象となる再エネ技術の多くは、技術進歩や普及規模に応じて、発電原価が速やかに低下すると考えられる。技術進歩や普及に合わせ再エネ発電原価の動向を詳細に把握して買取価格をスムーズに調整できないと、割高で陳腐化の速い再エネが市場に一気に普及して当面固定化し、電気料金上昇の抑制が困難となる。そのため、再エネがある程度の市場競争力を持ち、一定の普及量の実現段階で、再エネ助成策をFITからFIPやオークション制度、再生可能エネルギー利用基準(RPS)などの市場原理に基づく制度に移行し、事業者を経営性を意識させ、再エネの投資効率向上が自律的に進む市場環境を形成することが重要となる(RPSは学術的に見れば、支援対象となる再エネの種類を広げた形でのオークション制度に相当する)。また欧州で見られるように、FITの助成を受けた再エネが競争力のある火力を市場から締め出す等、市場機能を歪める副作用をもたらした点にも配慮が必要である。長期需給見通し¹⁾でも、FITの制度見直しが記載されており、今後の法改正により、電力システム全体を俯瞰の上、買取価格を柔軟に調整可能で、市場機能が働く制度へ見直すことも一つの選択肢として考えられる。そして再エネ連系下でもシステム全体の需給バランスを適正に維持し、経済性、環境適合性のある最適な電源構成を実現する視点も重要となる³¹⁾。

VI. おわりに

買取費用増加や電力供給信頼度確保への懸念、太陽光に偏った再エネ普及拡大など、FIT開始から3年目を迎え、具体的課題が現れつつある。再エネ政策や電力自由化で先行する欧州等の動向は、日本の再エネ政策にも参考となる。わが国の電力システム改革で、卸電力市場の活性化の下、市場競争に基づき電力価格が形成されれば、欧州と同様に段階的廃止も含め、市場機能を阻害することのないようにFIT制度を適正化する必要がある。再エネが一定の競争力を有した段階で、電力市場取引価格に連動したFIPのような市場機能が働く再エネ支援制度への移行も、一つの政策オプションとして考えられる。

また経産省は2016年の電力小売市場全面自由化に合わせ、卸電力市場での取引価格で算定する小売事業者の電力調達コストを基に、回避可能費用を決める方式に変更する予定である。回避可能費用は市場連動ベースになる。しかし現在の卸電力市場の取引量は小さく、取引価格も現在の回避可能費用と比べ高い傾向にある。卸売価格が高いと小売事業者の調達コストが上がり、再エネ普及にも影響すると考えられる。卸市場活性化など再エネ普

及とも調和した電力システム改革の制度設計も重要となる。

そして、再エネ支援を極度に弱めることも望ましくない。欧州の大手エネルギー企業の中には、収益が低迷する火力発電事業を縮小する一方、再エネ事業を収益性の高い中核的事業に発展させた企業もあり(イタリア Enel 社等)、再エネ分野の事業開発への取組みの度合いが、将来の企業価値や国の競争力に影響を与える可能性もある。わが国でも再エネ事業が徐々にその比率を伸ばすと見られ、適切な支援の下での継続的な取組みが重要である。再エネの技術進歩も踏まえれば、将来、再エネも原子力や火力と同じく競争市場での一定の担い手となることが想定される。しかし欧州に見られる再エネ拡大による賦課金増加、電力供給信頼度に係るリスク上昇を抑制するためにも、わが国の需給環境に適合した再エネ支援制度を構築し、電力安定供給に支障をきたすことなく、持続可能な電力市場の実現に向けた構造改革を着実に進めることが必要であると考えられる。

－ 参考資料 －

- 1) 経済産業省, 長期エネルギー需給見通し, 平成 27 年 7 月
- 2) 経済産業省, 長期エネルギー需給見通し(再計算), 平成 21 年 8 月
- 3) BP, Statistical review of world energy, 2015.
- 4) 経済産業省, 固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト, 平成 27 年 6 月
- 5) REN21, Renewables 2014 Global Status Report, 2014
- 6) European Commission, The support of electricity from renewable energy sources, SEC(2008)57, 2008.
- 7) IEA/IRENA, Global Renewable Energy Policies and Measures Database (<http://www.iea.org/policiesandmeasures/renewableenergy/>).
- 8) 一般社団法人 海外電力調査会, 海外諸国の電気事業 第 1 編 2014 年版, 2014 年
- 9) 経済産業省, 最近の再生可能エネルギー市場の動向について, 平成 27 年 1 月
- 10) BDEW, BDEW-Strompreisanalyse Juni 2014, 2014.
- 11) European Commission, Guideline on state aid for environmental protection and energy 2014-2020, 2014.

- 12) IRENA, Renewable Energy Auctions: A Guide to Design, 2015.
- 13) OECD/IEA, Medium Term Renewable Energy Market Report, 2014.
- 14) 経済産業省, 固定価格買取制度の運用見直し等について, 2015 年 1 月
- 15) Komiyama, R. and Fujii, Y., Energy Policy, Vol.66, pp.73-89, 2014.
- 16) Schaber, K. et. al., Energy Policy, Vol.43, pp.123-135, 2012.
- 17) Hadjipaschalis, I. et. al., Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(6), pp.1513-1522.
- 18) ENTSO-E, Fostering Electricity transmission investments to achieve Europe's energy goals: Towards a future-looking regulation, November 2014.
- 19) Gottstein, M. and Skillings, S. A., Proceeding in 9th International Conference on the European Energy Market (EEM), pp.1-8, 2012.
- 20) OECD/IEA, The Power of Transformation - Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems, OECD, Paris, 2014.
- 21) ENTSO-E, Scenario Outlook & Adequacy Forecast Evolutions, July 2014.
- 22) ACER (Agency for the Cooperation of the Energy Regulators), Framework Guidelines on Electricity Balancing, September 2012.
- 23) Milligan, M. et. al., NREL/CP-500-43433, June 2008.
- 24) Sigrin, B. et. al., NREL/TP-6A20-61182, March 2014.
- 25) Mills, A. and Wiser, R., LBNL-5933E, December 2012.
- 26) Lew, D. et. al., NREL/CP-5500-50814, April 2011.
- 27) Zhang, J. et. al., NREL/CP-5500-60142, October 2013.
- 28) Milligan, M. et. al., NREL/CP-5500-49019, October 2010.
- 29) Ela, E. et. al., NREL/TP-5500-51978, August 2011.
- 30) REE, Informe del Sistema Eléctrico Español 2014, 2014.
- 31) 小宮山涼一, 藤井康正, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 7, pp.639-647, 2012.

著者紹介



小宮山涼一 (こみやま・りょういち)
 東京大学
 (専門分野/関心分野) エネルギー需給分析, 電力システム, エネルギー安全保障

原子力安全のための耐津波工学(その4)

津波の作用と津波防御に関する工学的手法

東北大学 今村 文彦, 越村 俊一

既設または建設予定の原子力発電所において、津波作用の評価を行った上で防御のための技術や工学的対応を行う必要があり、それらの基本概念や課題を整理した。まず、津波の作用について機構と推定・評価法について、次に深層防護の概念規定から発電施設の要求性能をまとめ、各レベルに対応した津波制御方法の考え方を提案した。

KEYWORDS: *Tsunami, Engineering Frameworks, Nuclear Power Plant*

I. はじめに

本稿では、津波工学的な視点から、プラントシステムへの津波の作用を第II章にまとめ、津波がプラントシステムへ及ぼす影響を如何に防御するかを主眼に置いて、津波防御に関する工学的方法を整理する。ここで最も重要なのが、津波防御の要求性能について深層防護レベル1から5までに分けて整理することであり、第III章で各要求性能に対する津波防御の対応について工学的に対応出来る施設やシステムを耐津波工学的な役割も入れて整理した。次に、第IV章では、津波防御に関する工学的方法を検討する際に必要な設計津波の考え方、重要な安全機能を有する施設等に対して津波による影響が発生することを防止するための津波防御施設・設備の設計の考え方をまとめた。津波防御施設・設備の性能は、津波の浸入(浸水)状況の予測、浸水経路の推定を踏まえて、津波防御施設・設備の性能(許容値)と津波の作用(浸水深、圧力、波圧等)を比較することにより検証(確認)する。さらに、第V章で、様々な機能や対応を駆使して設計津波の影響(外力)を軽減させるための工学的手法を整理し、工法や情報システム等の提案を行った。対象エリアに応じた多重防護・深層防護等の考え方を示し、国内で実施されている主な工学的方法の整理や対策の提案を行っ

た。また、既存の技術、施設やシステム等の実際の原子力発電所への適用状況に関する調査、把握を実施した。詳細については報告書¹⁾を参照されたい。最後に、第VI章で、まとめとして今後さらなる向上・適用拡大に向けた検討項目を抽出した。

II. 津波の作用

まず、プラントシステムへの津波の作用について整理する。その内容は、地震工学会・原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会編纂、「原子力安全のための耐津波工学－地震・津波防御の総合技術体系を目指して－」の内容を抜粋したものである。詳細については上記報告書²⁾を参照されたい。

1. 津波の発生

津波は、水域で発生する大規模擾乱によって励起される。その擾乱の要因としては、地震、火山、陸域からの土砂・土石流の海中への突入、海底地すべり等が挙げられるが、最も発生事例が多いのが地震である。津波の発生地域による分類としては、近地津波・遠地津波の2種に分類される。近地津波は、我が国の沿岸から600km以内に発生した津波のことであり、多くがプレート境界で発生する巨大地震によるものである。

一方、遠地津波とは、我が国本土の沿岸から約600km以遠の海域で発生した津波のことを指す。津波の発生予測には、断層破壊により生ずる海底面の隆起・沈下の空間分布を推定し、波伝播計算の初期条件・境界条件として用いる。また、規模の大きな地震に対しては、断層面のアスペリティなどを反映したすべり分布の不均一性、断層の動的な破壊過程(破壊伝播時間や立ち上がり時間)

Tsunami resistant engineering for nuclear safety (No. 4) ; Actions of tsunamis and engineering framework for tsunami protection of NPPs : Fumihiko Imamura, Shunichi Koshimura.

(2015年8月31日 受理)

■前回タイトル

シリーズ(その3)原子力発電所の津波事故シナリオと津波安全への性能要求

を考慮する必要がある。

2. 津波の浅水変形と増幅

津波が水深の浅い海域に進入すると、浅水変形により津波背後の水位が波頭に追いつくために前傾化し、津波の前後(岸沖方向)の水位差が大きくなり、段波を形成する。特に、河川のように水深の浅い水域が長距離にわたる場合には、段波となりやすい。段波の形式は波状段波と碎波段波の2種類に大きく分類される。

さらに津波が湾に進入すると、共振現象が発生する場合がある。湾の奥で反射して外洋に戻る津波と、続いて来襲してくる津波の位相が一致する場合には共振現象が顕著に表れ、その条件は湾の長さや津波の周期および平均的な波速との関係で決まる。津波の場合には、入射波が3波もあると共振が励起され、湾奥では波高増幅が非常に大きくなる。原子力発電所に限らず、重要施設における基準津波及び入力津波の設定に当たっては、津波による港湾内の局所的な海面の固有振動の励起を適切に評価し考慮する必要がある。具体的には、港湾周辺及び港湾内の水位分布、速度ベクトル分布の経時的变化を分析することにより、港湾内の局所的な現象として生じているか、生じている場合、その固有振動による影響が顕著な範囲及び固有振動の周期を把握しておく必要がある。

3. 津波ハザードの表現

津波ハザードの表現としては、津波高さや流速等の津波の流体力学的な指標や、津波強度といった指標で表す以外に、「千年に一度の津波」といった発生頻度(または発生確率)で表す場合もある。津波強度は沿岸部での情報が、発生頻度は津波発生位置での情報が用いられ、両者は異なる位置で表現されていることに注意が必要である。確率論に立脚した津波評価方法を確率論的津波ハザード評価と呼び、津波の流体力学的な指標とあわせて、原子力発電所において襲来する津波の可能性を津波強度とその超過頻度(または確率)の関係で表すものであり、原子力発電所の津波リスク評価にとって必須の情報である。確率論的津波ハザード評価は、将来の津波発生の可能性を予測する問題である。そのため、自然現象が有する偶然的な不確実性や、津波発生、伝播などの現象のモデル化に伴う認識論的不確実性を適切に取扱う必要がある。

土木学会の確率論的津波ハザード解析の方法³⁾では、偶然的な不確実性に分類される地震規模の設定に際し、地震規模に幅(マグニチュード範囲)を設けて不確実性を考慮している。しかし、このマグニチュード範囲は限定的であり、その範囲設定の基本は既往最大の地震規模である。東北地方太平洋沖地震は、日本海溝沿いのプレート境界で発生し、既往最大の地震規模を大きく上回り、巨大津波を発生させた。プレート間地震は、同様な規模や

場所でほぼ一定の時間間隔で繰り返し発生する固有地震の概念で捉えられてきたために、東北地方太平洋沖地震の発生を予想することができなかった。東北地方太平洋沖地震を経験した今、将来の津波発生の予測に係る問題では、限られた歴史記録に基づく科学的知見には限界があることを真摯に受け止め、科学的想像力をもってこの問題に取り組む必要がある。

4. 構造物への津波の作用

ここでは、原子力発電所の施設に類する構造物への波力式を整理する。構造物への津波荷重(波圧・波力)の算定は、水深係数に基づいた静水圧として扱う方法、動的な抗力として扱う方法の大きく2つに分けられる。なお構造物への作用力の研究は、特に東日本大震災以降精力的に行われているものの、未解明な点も多い。そのため、今後の研究の進展に応じて、逐次その適用性を検証しながら更新していく必要がある。

(1) 防波堤・防潮壁・堤防

防波堤においては、国土交通省より、設計のためのガイドライン^{4),5)}により津波力の基本的な考え方が示されている。すなわち、波状段波が発生するかしないか、越流が発生するかしないかによって、条件を分けて波力を検討する。防潮壁についても、波力ならびに越流時における波力を検討する必要があるが、特に数メートル程度の高さの胸壁について、国土交通省によるガイドライン⁵⁾にまとめられている。東日本大震災においても様々な被害態があり、堤体そのものの破壊もあるが、地盤の洗掘等、構造物周辺の安定性が重要である。これまで多くの波力評価式が提案されているが、その適用条件は不明瞭であり、研究途上にある。

(2) 堤防(盛土)

海岸堤防のうち、特に盛土形式の堤防の被災形態については、Katoら⁶⁾が詳しい。それによると、海岸堤防の被害は、裏法尻(堤防背後ののり面を超えた付近)の洗掘からの被災が全体の50%程度を占める結果であった。多くは、背後、前面側の地盤洗掘か、波返工の破断等が主因となっていたことが分かった。加藤ら⁶⁾は、堤防表法面に作用する孤立波の波力について検討しており、津波先端部の波力として参考とすることができる。

(3) 津波作用力推定の課題

構造物への津波の作用力については、特に土木学会、建築学会が中心となり、その評価方法と課題について議論してきた。防波堤・防潮壁・堤防への津波作用、建物・橋梁への津波作用、建物内部や地下空間への津波の浸水を考慮する際の波力式を整理し、現状と課題が整理されているので、詳細については参考文献等を参照されたい。原子力発電所の津波リスク評価の観点からは、防潮壁等の越流により敷地内へ津波が流入することも想定し、防潮堤背後の建屋等施設への作用波力評価手法も整

備する必要がある。従来の波力推定方法(平面2次元の津波解析手法及び波力評価式を併用した算定方法)では、作用波力を精度よく評価できない。従来の波力推定方法の課題は、対象構造物の形状や配置の効果、防潮壁等の越流の効果等について十分な検証がなされていないことが挙げられており、これらの課題を解決するためには、3次元の津波遡上解析手法の標準化および Verification & Validation の手順を整理することである。

Ⅲ. 各深層防護レベルの津波防御の要求性能

津波影響下における要求性能については、深層防護の概念規定から第1表のように各レベルに対しての要求性能をまとめた。この議論は初めてのものであり、委員会および担当者で幅広く意見を交換しまとめたものである。

例えば、深層防護レベル1においては「敷地を津波から護る(津波の敷地への浸入防止)」ことへの対応は、防水や浸入防止による津波の「回避」である。津波の回避の最も基本的な対応としては、原子力発電所施設を高所に設置し、津波が来襲した場合でも施設に達しないようにすることである。これはレベル2に対応する。また、取水口や放水路といった海と施設が繋がった水路からの浸入に対しても対策が必要であり、レベル3で早期に回復するための要求として入れている。

対象とする津波との関係もまとめた。深層防護レベル1の要求性能は設計水準津波に対する設計で達成すべきもの、深層防護レベル2及び3の要求性能は事故水準津波に対する設計で達成すべきもの、深層防護レベル4の要求性能は想定事故津波への対応である。

Ⅳ. 津波防御の手段と性能・検証

原子力安全を実現するためには超長期的な視点から津波防御を考えることが必要になる。津波防御の手段は、それぞれの時代の技術水準に応じて最適手段が変化するものと考えられるが、津波防御の目的に関しては時代を超えた普遍的な物の考え方が必要である。津波防御の

手段を具体化するためには、その前提となる津波防御の目的を明確にしておくことが必要であることから、ここでは、まず、土木工学及び構造工学の工学的視点から津波防御の目的について検討している。

第1表に整理された要求性能に対する制御の手段は以下の3つに分類される：

1) 津波の回避

- ・部分的回避(過酷事故に関連する設備等を津波が到達しない場所に移設する等)

2) 津波からの隔離

- ・完全隔離：施設の全体を構造体によって隔離または被覆(全体的対策)
- ・部分隔離：施設の一部を構造体によって隔離または被覆(個別的対策)
- ・構造体を用いた隔離：防波堤等の活用
- ・構造体を用いた被覆：箱形構造、ドーム構造等の活用(施設全体を被覆)

3) 津波への対抗

a) 水理学的な津波防御

- ・津波の浸入防止：防波、防水、遮水、遮蔽等(個別的対策)
- ・浸入した津波の処理：排水(個別的対策)

b) 構造力学的な津波防御

- ・耐波、免波、制波等(個別的対策)

これらをまとめた結果を第2表に示す。回避、隔離、対応は深層防護レベル1から3に対応している。これらの手段を実施するには、各津波防御施設・設備の持つ性能をまとめて設計することが必要になる。場合によっては、組み合わせもある。さらに、現場等でその検証(確認)を行う必要がある。どのような性能に対してどのように検証していくかを第3表にまとめる。

実際のサイトにおいては、ターゲットとする敷地及び周辺での対象津波の解析により、時々刻々変化する浸入(浸水)状況を予測し、この浸入経路を推定する。この時に、津波防御施設・設備の性能(許容値)に対して、予測される津波の作用(浸水深、圧力、波圧等)を比較し、許

第1表 津波防御の要求性能への工学的対応

深層防護レベル	津波防御の要求性能	津波防御への工学的対応		
		工学的対応方法	対象とする津波との関係	
1	敷地を津波から護る (津波の敷地への浸入防止)	防水や浸入防止による津波の「回避」	設計水準津波に対する設計で達成すべきもの	設計津波 想定津波
2	施設を津波から護る (津波の施設への浸入防止)	耐水性や水密性による津波からの「隔離」 (津波に対する個別的防御技術)、津波高さの検知	事故水準津波に対する設計で達成すべきもの	
3	早期に津波の影響から復帰する	遮水や排水による津波への「対抗」		
4	アクシデントマネジメントの措置を施す	津波防御の「強化」		
5	地域との連携	地域への津波影響評価と対応、放射性物質の重大な放出がなされる事態への対応	想定事故津波への対応	

第2表 津波防御の手段

手 段		概 要		対 象
回 避	完全回避	・本質的な津波防御の基本原則 ⇒津波が来ない場所に発電所を構える ⇒地点選定条件の防災化		新規地点
	部分回避	・放射線災害に係るものと係わらないものの峻別 ⇒放射線災害に関係するものを津波が来ない場所に設置 ⇒放射線災害に着目した部分回避(既設地点では移設)		
隔 離	完全隔離	・発電所全体を構造体によって完全に被覆・隔離する概念(例:ドーム型構造や箱型構造による被覆等)		新規地点
	部分隔離	・放射線災害に係るものを集めて、それらを構造体によって被覆・隔離する概念		
対 抗	水理学的対抗	防波	・サイト内への津波の浸入防止(例:防波堤等)	既設地点
		防水遮水	・サイト内に浸入した津波の構築物/設備等の内部への浸入防止(例:防水扉, 遮水壁等)	
		排水	・サイトや構築物内に浸入した津波の排水 ・ヘドロ等の混在物を多く含んだ海水の排水	
	波動への構造力学的対抗	耐波	・津波による損傷・破壊に耐える構造(形状, 方向性等)	
		制波	・津波の破壊力等を軽減・制御する構造	
		免波	・津波の破壊力等を受け流す構造	

第3表 津波防御施設・設備の性能と検証

性 能	定 義	性能の検証(確認)
遮断性【防水】	津波(流れ)をさえぎって止める性能。さえぎって、他の動き・作用等が及ばないようにする性能。	一定の全作用力。水圧力(単位面積)に破壊しない、転倒モーメントにより移動しない。基礎等が洗掘されない。漂流物等にも耐えうる。
耐波性【耐水】	津波による作用力に耐える性能。	一定の全作用力。水圧力(単位面積)により破壊しない。漂流物等にも耐えうる。
水密性	水圧力が加わった環境下において密閉した水が外部に洩れない又は内部に水が流入しない性質。	一定の全作用力。水圧力(単位面積)により水が漏れない(実験等で確認)。漂流物等にも耐えうる。
隔絶性【避水】	影響が及ばないように離れておくこと(性能)。	浸水範囲・高さによる比較。
通水性	水を通す性質(性能)。	一定の全作用力・水圧力(単位面積)による水の通過量。
排水性	冠水した水を排除する性能。	排水能力。

容値を上回る場合には、それぞれの施設・設備の機能を喪失させ(損傷モード)、そこでの津波の浸入を許可させ次の段階に移行させることになる。このような解析は、津波の3次元流体モデルなどを用いて構築物との相互作用・破壊過程を十分に再現できる必要があり、解析手法の開発と標準化が必要である。

V. 具体的な工学的手法提案の例

国内では、新規基準(2013)⁷⁾に基づき、最新の科学的・技術的知見を踏まえて施設の安全設計に用いる基準津波を策定し、重要な安全機能を有する施設は基準津波に対してその安全機能を損なわない設計とすることを基本方針とし、以下の要求事項を満たすこととしている。

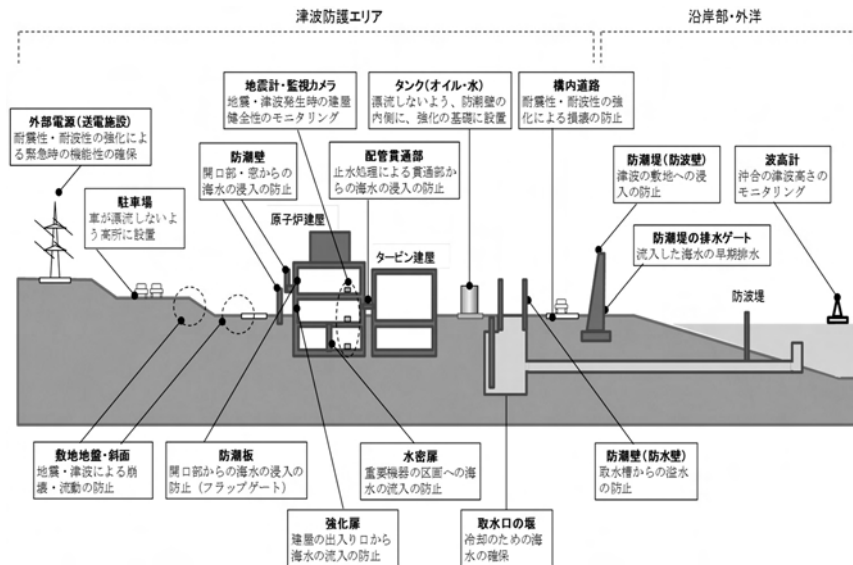
1. 津波の敷地への流入防止：津波の敷地への浸水を防止するための対策を施すこと。
2. 漏水による安全機能への影響防止：敷地への浸水対策を施した上でもなお漏れる水、設備の構造上、津波による圧力上昇で漏れる水による浸水範囲を限定し、安全機能への影響を防止すること。
3. 津波防御の多重化：津波に対する防護を多重化するもので、また、地震・津波の相乗的な影響や津波以外の溢水要因も考慮した上で安全機能への影響を防止すること(設計を超える事象、津波が防潮堤を超え敷地へ流入する事象等)に対して、一定の耐性を付与すること。
4. 水位低下による安全機能への影響防止

ここでは、具体的な対策例を検討している。例えば、1.の代表的な対策は、防潮堤及び堤防(改良土)である。防潮堤は、海岸線に沿った陸域に、強固な基礎に支持された鉄筋コンクリートまたは鉄鋼製の壁体である。また、堤防(改良土)は、セメント改良土等を用いて津波による浸食対策を施した堤体である。いずれも、想定される津波高さに対して十分な高さや耐波力性を確保する必要がある。

2.の代表的な対策は、①原子炉建屋の周辺や壁に設置する強固な防潮壁の設置、②浮力を利用してフラップゲートによる開口部からの海水の流入を防ぐ防潮板の設置、③原子炉建屋の出入り口や原子炉建屋内の区画の出入り口への耐波性、水密性の高い強化扉、水密扉の設置、④配管貫通部からの海水の流入を防ぐための止水処理、⑤取水槽からの溢水防止のためのフラップゲート付きの防水壁の設置等が挙げられる。

3.の津波防御の多重化は、1)及び2)の各対策を施すことによって、津波の敷地内への流入の防止、敷地内へ流入した場合における建物内への流入の防止、建物内へ流入してしまった場合における重要区画への流入防止と、安全機能への多重化が図られる。

4.の水位低下は、主に引き波が原因となるが、取水口周辺の堰等の海水を貯めておく場所を設置する等の対処



第1図 津波防御のための工学的手法の模式図(主として深層防護レベル1~3の対策)

が取られる。

このような工学的手法を深層防護レベル1から3に対応して対策を行う例を第1図に示す。ここでは、津波防護エリアと沿岸部・外洋に大きく分け、それぞれのエリアでの対策手法の具体例を示している。特に、地震計・監視カメラ、波高計など地震・津波の関連のリアルタイムでの監視に関する手法も入れている。今後、このような関連情報は、実際に沿岸部、サイトや敷地内での津波挙動を正確に知るための情報であり、これらの情報活用については、地震発生後津波来襲までのフェーズ、来襲後から収束までのフェーズ、収束後のフェーズで整理していかなければならない。これについても報告書では、具体的な提案を行っている。

VI. まとめ

原子力発電所において、津波防御のために実施あるいは実施される予定の施策を調査し、津波防御に関する既存の技術や工学的対応を調査し、課題を整理した。今後は、東北地方太平洋沖地震以降に精力的に行われている津波堆積物調査等の結果を踏まえて、設計津波は高くなる傾向にあり、また、個々のサイトに応じて考慮すべき事象が多様化することが予想される。さらに、原子力発電所において、より高い安全性の実現と効率的な対策を行うためには、漂流物の評価、波力の評価、地盤変状の評価、砂移動の評価などの課題も残されており、これらの影響をハザードに考慮することにより評価の向上が可能となり、また新しい工法を導入することにより適応範囲も広がると期待される。

— 参考資料 —

- 1) 日本地震工学会 原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会：原子力安全のための耐津波工学—地震・津波防御の総合技術体系を目指して—, pp.143-167., 2015.
- 2) 同報告書, pp.170-187., 2015.
- 3) 土木学会 原子力土木委員会 津波評価部会：確率論的津波ハザード解析の方法, 145p., 2011. http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/system/files/PTHA20111209_0.pdf (2015.08.15 参照)
- 4) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン, 2013.9. オンライン <www.mlit.go.jp/common/001012142.pdf> (2015.08.15 参照)
- 5) 国土交通省港湾局：港湾における防潮堤(胸壁)の耐津波設計ガイドライン, 2013. オンライン <www.mlit.go.jp/common/001020131.pdf> (2015.08.15 参照)
- 6) Kato, F, Y. Suwa, K. Watanabe and S. Hatogai: Mechanisms of Coastal Dike Failure Induced by the Great East Japan Earthquake Tsunami, Proceedings of 33rd Conference on Coastal Engineering, Santander, Spain, 2012
- 7) 原子力規制委員会：基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド <www.nsr.go.jp/data/000069166.pdf> (2015.02.23 参照)

著者紹介



今村文彦 (いまむら・ふみひこ)

東北大学災害科学国際研究所
(専門分野/関心分野)津波工学, 数値解析,
自然災害科学



越村俊一 (こしむら・しゅんいち)

東北大学災害科学国際研究所
(専門分野/関心分野)津波工学, リモート
センシング, 数値解析

解説シリーズ

原子力安全のための耐津波工学(その5)

津波フラジリティ解析と耐津波工学関連の解析コード

防衛大学校 香月 智, 電力中央研究所 松山 昌史

原子力発電施設の津波フラジリティは、原子力発電施設を襲う津波の発生頻度を代表する津波ハザードとの組み合わせによって、施設全体のリスクを求めるために使用されるものである。ここでは、その定義について述べたのちに、解析における特徴について、地震フラジリティとの違いを意識した解説を行う。また、フラジリティ解析の骨幹ともなる耐津波工学関連解析技術(コード)の現状について述べる。

KEYWORDS: *nuclear power plant, tsunami, fragility, numerical analysis, reliable codes, risk analysis*

I. はじめに

原子力発電施設のリスク評価のためのフラジリティ解析については、対応するハザード解析およびシークエンス解析などとともに、永年の知識や技術に関する具体化が進んできた。津波に対するフラジリティについても、基本概念は同様であるものの、事故事象に至る具体的な物理現象が異なるため、必ずしも同じであるとは言い難いことがある。

つまり、津波フラジリティは、①サポートシステムから順次に不具合に至る時系列性がつよい。②炉心や格納容器が直接事故事象に至ることはないので、不具合に至る時間的なラグがある。③システムを構成する要素の位置によって、脆弱性が支配される、などの特徴がある。

要素の位置がフラジリティを支配する最大要因となる理由としては、防潮堤(壁)に代表される津波の侵入防止施設(構造)によって、地域(場所)が隔離されるからであるが、これらの破壊パターンは、津波の侵入形態の非相関性を強くする。つまり、シナリオ依存性が強まる。

シナリオ分岐が生ずる理由としては、津波の越流や管路内の逆流といった強非線形な流体解析(一般に分岐問

題となる)に依拠するからに他ならない。また、地盤内の海水の逆流方向への浸透流解析などは、解析問題の非線形性だけでなく、解析パラメータの不確実性が大きいといった問題も横たわっている。以下、II章でフラジリティ解析、III章で津波のハザードおよびフラジリティ解析に有益な解析コードについて概要を述べる。

II. 津波フラジリティ解析

1. 津波フラジリティ解析の定義

津波フラジリティ解析は、第1図に示すように、事故発生確率と津波強度との関係を表す曲線を求めることである¹⁾。ここで、縦軸の事故発生確率とは、炉心損傷頻度(CDF)と格納容器破壊頻度(CFF)などがあり、用途となるリスク分析の種類に応じて選ばれる。また、横軸の津波強度の代表値については、原子力施設のある海岸線からある程度離れた線上を通過する津波の強度の代表値(通常、波高)を指定する。この横軸のパラメータの定義は、津波ハザード曲線の横軸の定義と一致している。なお、定義の位置を海岸線以遠とすることによって、防波堤の状態が変化しても津波ハザードに影響しないことが担保される。

2. 要素の存在位置・防水などによる区分

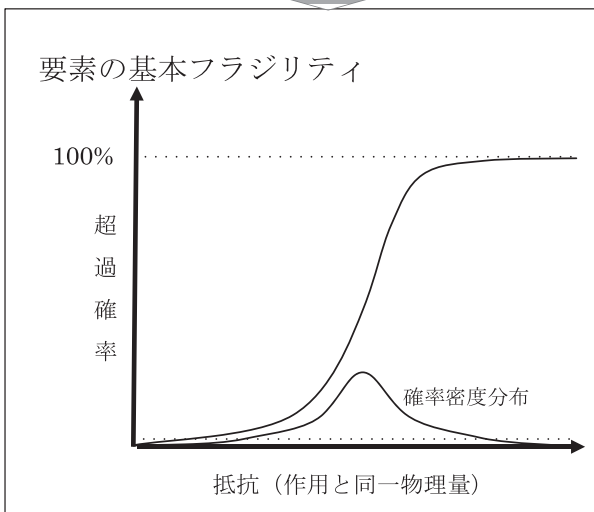
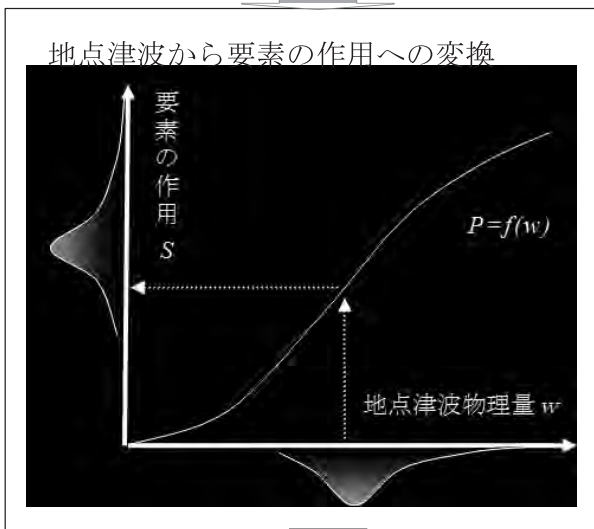
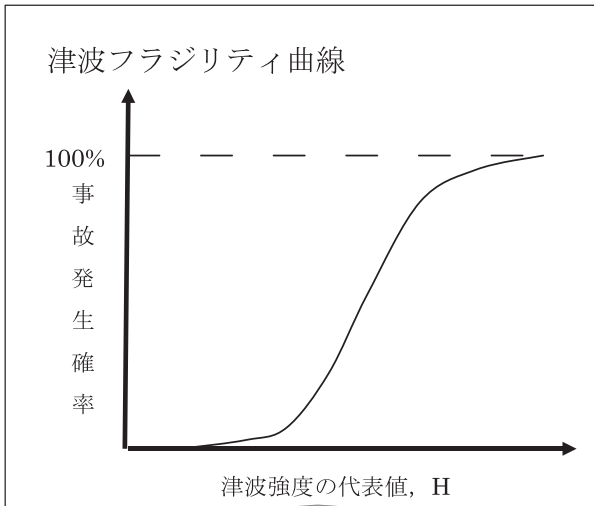
耐津波に関する限り、同種類の要素(電気機器や機械など)であっても、どこに「位置」するものであるかによって、そのフラジリティは全く異なったものとなる。「防水、耐水、避水」と呼ばれる対策行為は、位置を変化させることによって、要素のフラジリティ特性が激変す

Tsunami resistant engineering for nuclear safety (No. 5) ; Tsunami fragility analysis and numerical analysis codes for tsunami engineering field : Satoshi Katsuki, Masafumi Matsuyama.

(2015年8月19日 受理)

■前回タイトル

シリーズ(その4)津波の作用と津波防御に関する工学的的方法



第1図 要素のフラジリティ解析

ることを象徴した言葉とも言える。フラジリティ解析では、これらの対策が解析結果に定量的に反映できる仕組みがなければならない。

第1表に、前述の「位置」を区分するための基本的な考え方の基礎となる用語を示す。この区分の要点は、①サ

第1表 防護域(対象)による施設・機器・構造の区分

施設等の呼称	防護域(対象)	代表的該当施設・機器・構造等
前面海域内施設・構造	サイト前面海域を含む広域(取水、排水施設)	防波堤 (津波監視施設)
サイト外郭施設・構造	サイト内全域	防潮堤 防潮壁 防水壁 漂流物止
建造物外郭施設・構造	特定建造物内	防水壁 水密扉 漂流物止
建造物内領域水密化施設・機器	建造物内特定領域	水密扉 排水ポンプなど
防水材・防水機器	機器	防水材 防水被覆など
基礎・支保構造等	構造(例えば鉄塔)	緩衝材
当該機器	機器・構造自体	電気機器など

イト外郭施設と呼ばれる防潮堤等によって、サイトが狭義にサイト内と外に区分されること、②構造物外郭施設・構造と呼ばれる防水壁や構造物外壁に備え付けられる水密扉などによって、津波から遮蔽された建造物の内部空間と外部とに区分されること、換言すると構造物外郭施設・構造がない建造物にはこのような区分が存在しないこと、③建造物の内部においても、建造物内領域水密化施設・機器と呼ばれるものによって水密化が計られる室内(領域)とその外に区分されることである。

3. 要素のフラジリティ解析の手順

任意のハザードを与条件とする一連のフラジリティ解析の手順は、次のようになる。

STEP1: 地点津波状態の解析

地点津波とは、任意の要素の機能喪失確率を算定するために必要な、当該要素の存在する地点における津波、もしくは湛水状態のことであり、サイト外郭施設と建屋外郭施設の内外によって、①サイト外津波、②サイト内・建屋外津波(湛水)、および③建屋内海水(海水)に分けられる。

このとき、①サイト外郭施設の機能喪失シナリオ、②建造物外郭施設の機能喪失シナリオの組み合わせと、当該要素の位置によって要素に到達する津波の状態が確率変数として与えられることになる。

STEP2: 地点津波の要素に対する作用への変換

求められた地点津波は、水深や流速として与えられるが、要素が破壊に至る作用は、力、濁度、塩分などの物理量である。よって、第1図に示すような作用と地点津波の物理量との関係を通して、その要素に対する作用の確率分布に変換される。

STEP3: 要素の破壊確率(沖合津波与条件付き)

この作用の確率分布を第1図に示す要素が基本的に有する作用に対するフラジリティ曲線と組み合わせることによって、沖合津波状態を任意の与条件(津波強度の代表値H)とする破壊確率が求められる。

4. 津波フラジリティ解析の特徴

以後は、各要素の破壊確率を基に、地震と同様にシークエンス解析を行うが、津波の場合には、次のような特徴がある。

- 1) 地点津波の解析において、外郭構造の破壊状態によるシナリオ分岐が生起するため、異なる要素においても存在位置による破壊状態の相関性が生ずる。これは、シークエンス解析における状態組み合わせに影響する。つまり、共通原因によるシステム同時故障状態となるが、これは外郭構造の破壊状態ごとに生ずる各シナリオに依存していることになる。
- 2) 防潮堤の越流解析に象徴されるように、強い非線形解析を介することになるので、数値解析に使用するパラメータによって解析結果が大きくばらつくことになる。対策として、精緻な解析法を選択すると、膨大な組み合わせに対する数値解析の負担が爆発的に増大することになる。
- 3) 津波が浸水して、油脂が漏出すると、広範囲に火災が生ずる可能性がある。また、津波のサイト内への浸水に伴って、サイト内にある物が漂流したり、サイト外からの漂流物が流入したりすると、建造物に衝突して基本要素を故障に導いたりすることが考えられる。これらの事象は、定性的には想定可能であるが、定量的な確率値への変換は難しい。よって、これらの事象を抑制する対策についての現地確認等の手法を組み合わせる必要がある。

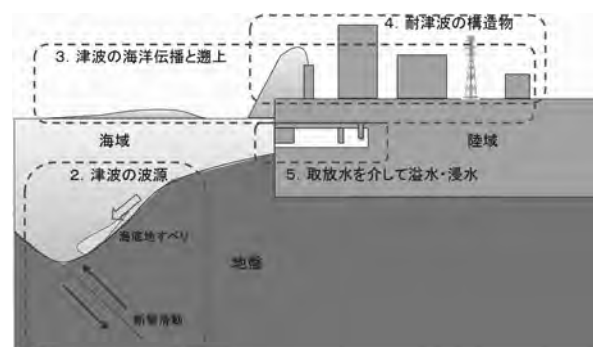
Ⅲ. 解析コード

1. 解析コードの役割

ここでは、耐津波工学を体系化し、実践する場合に必要な解析コードについて記述する。具体的には、流体としての津波について、津波の発生、海域伝播、陸上遡上、沿岸での構造物との干渉、取放水路での挙動、地形変化と流れによって地表が削られる洗掘過程(第2図)、これらに関する解析コードについて紹介する(第2表)。これらの解析コードは、津波の発生から沿岸での原子力発電所の影響を評価する上で活用されることを想定したものである。なお、本解説では、詳細な各解析コードの引用文献は紙面の都合上省略させていただく。詳細は本報告書を参照していただきたい²⁾。

2. 津波の波源に関する解析

津波は一般的に海中におきた擾乱によって発生する。ここではその擾乱を解析する手法について記述する。



第2図 津波の挙動と解析コード分類

(1) 地震による津波の発生

地震による津波の直接の要因は海底地殻変動による海底面の変形である。この地殻変動解析には、半無限地盤を仮定したくい違いの弾性論に基づいた理論解を用いて計算するのが一般的である(第2表(a)(1))。これらの理論解が論文等に明示されているので、解析コード化が比較的容易である。津波解析プログラムの代表的な解析コードとして東北大学が開発したコードがあげられるが、その中にもこの理論解に基づく解析コードが含まれている。

また、当初はこの理論解の鉛直変位量分布のみを入力条件としていたが、海底面の勾配が一定の大きさを超えた場合には、水平変位量による影響も考慮すべきとした手法が提案された。この解析コード化は地形データを用いて比較的容易にコード化することができる。

なお、3次元数値解析モデルによる海底地殻変動解析も行われるようになっている。不均質地殻構造が海底面の変形解析結果に大きな影響を与える場合には、このような手法を用いることも可能である。

(2) 山体崩壊、海底地すべりによる津波の発生

山体崩壊や地すべりを模擬する方法が複数提案されており、それぞれ津波の海域伝播解析コードへの入力データを作成する解析コードや山体崩壊や地すべりの運動と海域伝播とを連動させた解析コードが開発されている。おおまかに分類した例を下記に示す。

1) 流量入射

陸域からの土砂や岩砕の突入による津波発生をある境界での流量の時間変化で模擬した津波の入力方法である。相田は1792年眉山崩壊による有明海で発生した津波の再現のための数値計算モデルの入力条件として採用した。

2) Kinematic モデル

陸域からの土砂や岩砕の突入や海底地すべり時における固体の運動を動的な海底地形の変化としてモデル化する方法である。Satakeはこの手法を提案してコード化し、日本海の渡島大島における火山活動に伴う山体崩壊を対象にして再現計算を実施した(第2表(a)(2))。

3) 二層流モデル

海底地すべりや海中の乱泥流について、その土砂や乱泥流を流体として取り扱い、海水との二層流としてモデル化する方法である(第2表(a)(3))。また、近年発達した粒子法による数値計算モデルも提案されており、これも二層流モデルの一つと分類することができる。

4) その他

上記以外には、水理模型実験や数値計算結果を基にして、陸域からの土砂や岩砕の突入と海底地すべりについて、津波入力初期波形を設定する方法が提案されている。簡易的な津波入力条件作成手法である。ただし、土砂や岩砕などの運動方向に有意な水平成分がある場合に、発生した津波に方向性があると考えられるが、それについては考慮されていない点に注意が必要である。

(2) 津波波源のインバージョン解析

津波記録を用いた津波波源のインバージョン解析の主な目的は、津波波源像を明らかにすることである。海域で得られた津波記録と複数の単位的な波源から得られたグリーン関数(基本解)を基に、津波記録はグリーン関数の重ね合わせで表現されるとして各単位波源の強度分布を未知数として定式化する。定式化された方程式の最適解を推定して強度分布を求めることにより、津波波源像を明らかにするものである(第2表(a)(4))。他には、津波記録を用いた準リアルタイム津波予測を実現するための研究等で、インバージョン解析は活用されている。

3. 津波の海洋伝播と遡上に関する解析

(1) 外海における津波の解析

1) 平面2次元モデル

津波は、海底地形の影響を受けて、浅水変形、屈折、反射、回折といった現象を繰り返しながら伝播・減衰していく。これらの現象を、実際の地形上で表現するために、長波理論に基づく基礎方程式が一般的に用いられ、この方程式を数値的に解析する解析コードが、原子力発電所の最高水位と最低水位の評価や津波のハザードマップの作成に一般的に用いられる。東北大学による解析コードが代表的であり、この解析コードは世界にも提供され、利用されている(第2表(b)(1))。同様の方程式系を用いた解析コードは、他にも複数ある。デンマーク水理環境研究所(DHI)のMIKE21HDでは河川流れも考慮した河川遡上解析との結合も可能である。

沿岸での水位上昇量や遡上高等の水位を再現するには非線形長波モデルも実用的と考えられているが、さらに高精度な波の変形を表現する場合には、運動方程式に分散項を加えた高精度な非線形分散波理論が用いられる(第2表(b)(2))。具体的には、遠浅海岸において津波の先端が10数秒の波に分裂する波状段波(ソリトン分裂)

現象等、津波の中で比較的短周期の波が重要となる時に必要となる。一般的に、非線形長波理論より水位や流速の時間変化を高精度に表現することができるが、計算時間等の計算コストも大きくなる。数値計算方法はそれぞれの研究で異なり、ADI法、二段階混合差分法、分散項をポアソン方程式として解く方法等が用いられている。

チリで発生した津波の日本への伝播を計算するような場合(遠地津波)には、対象領域が1000kmを越えるため、平面座標系では誤差が大きくなるために、地球座標系(極座標系)を用いた解析コードが用いられる。

2) 3次元モデル

Navier-Stokes方程式の直接数値解析により、発生から沿岸までの伝播を再現した事例としては、Saito and Furumuraの研究があげられる(第2表(b)(3))。計算領域は1000km四方以上であり、計算格子幅は水平1km、鉛直0.2kmである。この計算コードは、並列計算機の仕様を想定し、計算領域を分割して各領域にCPUを振り分けることにより効率化を図った解析コードである。

(2) 陸上を含む沿岸における津波の解析

1) 平面2次元モデル

沿岸は水深が外洋より小さく、外洋から到達した津波は、長波として取り扱うことができる。そこで、前節に示した非線形長波モデルを用いた数値解析を用いることができる沿岸においては、数値計算の目的、条件(格子幅等)、と土地利用を勘案して、底面摩擦条件を設定する必要がある。また、遡上計算を行う場合には、計算ステップ毎に津波の先端条件を設定する必要がある。

なお、外洋の数値解析モデルと同じであり、コーディングは3次元数値計算モデルと比較して容易である。

2) 3次元モデル

急激に地形が変化する場合や構造物近傍において、鉛直運動を含む3次元的な挙動を示すことがある。このような3次元的な挙動については、3次元数値解析モデルが有効な手法としてあげられる。近年、流体に関する3次元数値計算モデルの研究が盛んである。実用的な計算格子数の観点から、沿岸を数m程度の解像度で扱う場合には適用範囲は沿岸数km四方に限られることが多い。また、圧力を静水圧近似した準3次元モデルも開発されている。この場合には、津波波源域から沿岸に至る津波伝播解析が可能である(STOC-ML, C-HYDRO3D, ROMS)。非静水圧3次元モデルについては、近年の海岸工学分野では、CADMAS-SURF/3Dの利用が広がっている(第2表(b)(4))。また、STOC-ICは、沿岸数10km四方を対象にした非静水圧3次元モデルであり、臨海部の海岸構造物周辺の津波挙動を解析するコードである。さらに市販解析ソフトやオープンソースコードが発表され、コード開発者以外にも普及しつつある。オープンソースコードの代表例としてCADMAS-SURF/3D

第2表 代表的な解析コード

(a) 津波発生に関連した解析

	コード名	開発者・グループ	計算法の特徴	適用範囲
(1)	Mansinha and Smylie もしくは Okada の方法による海底地殻変動解析	東北大学, 他	地震津波の発生を担う地震時の海底地殻変動を計算する。	断層による海底地殻変動に適用可能
(2)	山体崩壊土砂の海中突入による津波発生に関する解析	Satake, 産業技術総合研究所	陸域からの土砂等の海中突入を動的な海底地形の変化としてモデル化	山体崩壊や海底地すべりの津波発生
(3)	海底地すべりによる津波発生に関する解析	Imamura, 東北大学	海底地すべりの土砂を流体として取り扱ってモデル化	海底地すべりの津波発生
(4)	津波記録を基にした津波インバージョン解析の	Satake, 東京大学地震研究所, 他	沿岸の水位記録などの津波記録を基に津波波源モデルを推定	地震津波

(b) 津波の伝播解析

(1)	津波の伝播解析(非線形長波理論)	後藤・小川, Imamura et. al, 東北大学	実用的な平面2次元モデル	津波波源から沿岸, 遡上域まで
(2)	津波の伝播解析(非線形分散波理論)	佐藤, 土木研究所 Iwase and Imamura, 他	平面2次元モデル浅海域のソリトン分裂を再現	津波波源から沿岸まで
(3)	津波の伝播解析(3次元モデル)	Saito and Furumura	津波波源も含めた3次元モデル	津波波源から沿岸まで, 沿岸の格子幅は1km程度と粗い
(4)	CADMAS-SURF/3D*	港湾空港技術研究所 沿岸技術センター	非静水圧3次元モデル	遡上津波の挙動解明, 気体・地盤・固体との連成可能
(5)	OpenFOAM*	OpenFOAM Foundation	非静水圧3次元モデル	遡上津波等の沿岸の津波挙動, 構造物との連成

(c) 津波の取放水路を介した溢水・浸水解析

(1)	管路・開水路の水面応答計算	中部電力	管路と開水路の各1次元方程式を連携	取水路・放水路の水面応答解析
(2)		高島ら, 大成建設	立坑接続部の局所的な圧力差を考慮	取水路・放水路の水面応答解析

(d) 津波による地形変化解析

(1)	津波地形変化予測	高橋ら, 東北大学	平面二次元数値モデル	地形変化予測 対数則による摩擦速度
(2)		藤井ら, 東電設計	平面二次元数値モデル	地形変化予測 log-wake 則による摩擦速度

や OpenFOAM(第2表(b)(4)および(5))をあげることができる。

4. 耐津波の構造物に関する解析

剛体が三次元流動場において相互に影響を及ぼしながら移動・回転する現象を予測評価できる三次元流体・剛体連成解析コードが開発されている。これらにより, 流体が剛体等に作用する圧力分布等による剛体の挙動とその剛体が流体に及ぼす影響, すなわち流体と構造物の相互作用を考慮した数値解析が可能となる。川崎・袴田や米山らはナビエ・ストークス方程式を有限差分法により直接解析する手法を用いている。一方, 小笠原らはMPS法(Moving Particle Semi-implicit)を用いている。MPS法は非圧縮流体を解明するために開発された粒子

法の一つであり, 格子を用いないため, 界面の大変形を伴うような解析に適しているだけでなく, 流体のみならず剛体を用いた流体-構造連成解析にも適用されているといわれている。これらの解析コードは, 津波の漂流物挙動, 防潮堤やフラップゲート等の構造物の津波作用時の挙動, これらの再現に適用されている。

5. 取放水路を介した溢水・浸水に関する解析

沿岸に津波が到達した場合に, 防潮堤等で直接的な津波遡上を防止しても, 取放水路等を介して陸域に溢水もしくは浸水する場合がある。このような現象の解析には, 管路・開水路の解析による水路内の水面応答計算(サージング)による解析が実施されている。これら解析コードにより, 津波による沿岸での水位変動を入力条件

として、水路内部の溢水や配管に作用する圧力などを推定することができる(第2表(c)(1)および(2))。このような現象では水路系の応答周期を確認することが重要である。入力条件の周期が近い場合に、共振現象により大きな水位変動を起こす可能性があるからである。共振周期は理論的もしくは数値実験により確認することができる。また、高畠らは、管路解析の1次元モデルを改良し、より高精度に溢水量を推定する数値解析モデルを提案した(第2表(c)(2))。なお、ここで示した手法による水路から陸域への溢水量を入力条件として、3.(2)(陸上を含む沿岸における津波の解析)で示した手法により敷地や建物内の浸水氾濫解析が可能となる。

6. 津波による地形変化に関する解析

津波による地形変化現象は、波浪と比較すると津波は流れに近く、河川流と比べると、非定常性が大きい現象であり、河川・海岸工学の知見を取り入れつつ研究が今も進められている。局所フラックスモデル+浮遊砂移流拡散モデルによる解析コードが代表例である(第2表(d)(1)および(2))。

IV. まとめ

本稿では、原子力発電施設の津波フラジリティ解析の概要と特徴について述べた後、主として津波ハザードおよびフラジリティ解析に使用される解析コードの現状について解説した。

社会的重要性に鑑みると、個々の解析コードにおいては、十分に信頼性の高い数値解析コードを使用する必

要性生ずる。解析コードの検証方法としては、既往の津波記録や実験結果の再現があげられる。例えば Synolakis et. al³⁾は既往の津波調査結果や実験結果を取りまとめており、解析コードの検証を行う上で有用である。ハザード解析のみならず、フラジリティ解析は複雑なシナリオに対して、極めて多数の異なる解析問題を解く必要があるため、個々の解析コードの信頼性のバランスに配慮した解析システムの創出が求められている。

— 参考資料 —

- 1) 日本地震工学会, 原子力安全のための耐津波工学—地震・津波防御の総合技術体系を目指して—, pp.61-62, 2015.3.
- 2) 日本地震工学会, 原子力安全のための耐津波工学—地震・津波防御の総合技術体系を目指して—, pp.247-257, 2015.3.
- 3) C. E. Synolakis et.al, Validation and Verification of Tsunami Numerical Models, Pure and Applied Geophysics, vol.165, pp.2197-2228, 2008.

著者紹介



香月 智 (かつき・さとし)

防衛大学校システム工学群建設環境工学科教授
(専門分野/関心分野) 土木構造力学, 信頼性工学



松山昌史 (まつやま・まさふみ)

電力中央研究所地球工学研究所
(専門分野/関心分野) 海岸工学, 津波工学

解説シリーズ

原子力安全のための耐津波工学(その6)

施設周辺地域における防災・減災対策の推進とリスクコミュニケーション

東京大学 佐藤 慎司, 電力中央研究所 山田 博幸

東日本大震災の巨大津波を受けて、二段階の津波規模が設定され、具体的な防災・減災計画が策定されるとともに、沿岸の重要施設周辺の減災対策も検討されることになる。原子力施設周辺地域では、津波災害に続いて発生するおそれがある施設事故への対応も考慮する必要があるため、事前の対策がさらに重要となる。施設周辺地域の津波に対する防災・減災対策を進めるためには、国・自治体・事業者のそれぞれが役割分担のもとで連携し、市町村および住民と協力しながら対策を進めることが重要である。

KEYWORDS: Nuclear Safety, Tsunami disaster mitigation, Level-1 tsunami & Level-2 tsunami, Risk communication

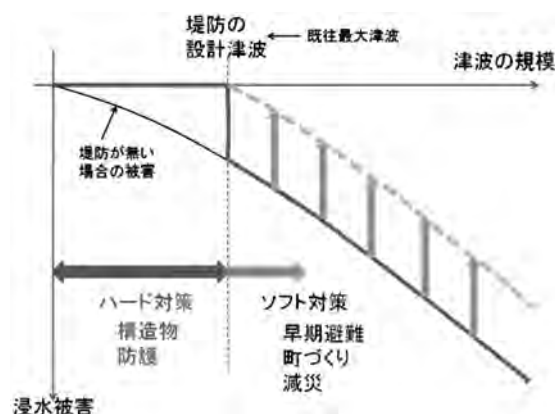
I. 津波防災と減災

1. 津波に対するハード対策とソフト対策

津波防災は、堤防などの構造物によるハード対策と、警報や避難を中心とするソフト対策を組み合わせる総合的に計画されてきた。これは、自然現象としての津波規模の変動の大きさ、頻度の低さ、局所性、予測の困難さなどによるものである。明治三陸津波(1896)以後においても、岩手県唐丹村の集落の高所移転、田老町の防潮堤整備など事例を挙げることができる。津波防災を公共的に実施する根拠となる法律は、海岸法と災害対策基本法である。海岸法では、都道府県が堤防などの海岸保全施設を整備し、災害対策基本法では、市町村が地域防災計画を策定することになる。陸上部への大規模な氾濫が見られた奥尻津波(1993)、スマトラ津波(2004)などの経験を経て、公共として実施するいわゆる「公助」だけでなく、「共助」や「自助」の重要性が指摘されている。

第1図は、ハード対策とソフト対策の組み合わせによ

る総合的な津波防災の概念を示す模式図である。横軸は津波の高さ(規模)であり、縦軸には負の方向に被害の大きさを示してある。ハード対策では、同図に示すように既往最大津波の記録などをもとに計画対象とする津波の規模を決定し、波浪や高波の検討も踏まえたうえで、これらに基づいて設計される海岸堤防により陸地への浸水を防護する。さらに、それを超える規模の津波に対しては、早期避難を中心とするソフト対策で被害の最小化を図るというのが総合的な津波防災の理念である。東日本大震災では、多くの科学者・工学者が協力して津波調査を実施し、今後の津波の対策に有効となるデータを取得することができた。それらの分析から、具体的な想定に



第1図 総合的な津波防災の概念図

Tsunami resistant engineering for nuclear safety (No. 6) ; Promotion of disaster reduction around nuclear facilities and risk communication : Shinji Sato, Hiroyuki Yamada.

(2015年8月24日 受理)

■前回のタイトル

シリーズ(その5)津波フラジリティ解析と耐津波工学関連の解析コード

基づくソフト対策の重要性が指摘されるとともに、ハード対策の効能と限界が解明されつつある。

2. 二段階の津波規模設定

数百年以上の再現周期となる巨大津波に対しては、構造物のみによる対策には限界がある。ソフト対策においても、具体的な津波規模を設定する必要がある。また、コンクリート構造物の耐用年数がせいぜい50年程度である¹⁾ことから、現実的な津波の頻度と規模を設定することが合理的である。これらから、以下の二段階の津波規模が導入された²⁾³⁾。

- ・国・自治体による防護施設の整備については、数十年から百数十年に一度の津波を対象とする(レベル1津波)
- ・市町村における減災対策の推進においては、数百年に一度の最大クラスの津波を対象とする(レベル2津波)

以上のように二段階の津波規模を設定することになったが、発生確率が明確でない最大クラスの津波(レベル2津波)はもちろん、数十年から百数十年に一度という目安のある頻度の高い津波(レベル1津波)でも、必ずしも確率論に基づく定義がされているわけではない。原子力施設に対する施設整備の水準がレベル1津波より大きいことはもちろん、レベル2津波より大きいことも考えられる。なお、ここでは堤防の高さのみが被害の期待値に対応しているが、堤防以外の対策により被害の期待値を下げることも考えられる。

II. 沿岸の重要施設の対策

沿岸部には各種工業施設、化学プラント、発電所などの重要施設が存在する。これらの施設は堤防によって防護されていない地区(堤外地)に位置しているため、津波におけるこれらの施設の防災・減災対策はそれぞれの地域・事業者が、以下の観点から別途検討する必要がある。

1. 津波による産業の被災と復旧

堤外地の重要施設は、レベル1津波でも浸水被害が想定される。重要施設の津波リスクと被災シナリオの把握(弱点の洗い出し)が必要である。その際、自然現象の不確かさを踏まえた多数シナリオを想定することが重要である。東日本大震災において多くの産業が被災した。柴崎⁴⁾によると、2m程度の浸水深になると最低でも復旧まで100日程度かかる可能性があることがわかる。ただし、復旧までの日数は、産業の種別、周辺事情、経済事情にも大きく影響する。

2. 事業継続性の観点から見た津波対策

最新の知見と最大限の努力で信頼性の高い被害想定を事前に行うことは必要である。しかし、想定とは異なる

事象が発生する可能性は残るため、被災状況を迅速に把握する準備も重要である。重要施設においては、一般市民以上の情報収集能力を持つ必要がある。気象業務法の改正⁵⁾により、個別に津波予報を出せるようになっていたため、重要施設は独自の防災情報システムを構築することも検討すべきである。

3. 周辺地域への影響

適切な事業継続計画に基づき、ハード面の整備が必要になった場合においては、周辺地域に対して津波の高さの影響を及ぼす可能性があることを注意しなければならない。たとえば、有川ら⁶⁾では、新たな防波堤を設置した場合における背後地および周辺地域の津波高さの比較を行っている(第2図)。これによると、設置により背後の地域の津波高は半分以下になっていることがわかるが、特に北側の地区においては、津波高が、設置前に比べて60cm程度高くなっていることがわかる。これは、内陸のほうに浸水し抜けていくエネルギーが反射することと、反射する位置が沖側になったことに伴い回折波の位相が異なったことによる影響である。従って、一概にその影響の良し悪しを評価することはできず、位相が反対になることで、かえって津波高が小さくなることも考えられる。そのため、数値シミュレーションを用いて詳細に検討し、その影響度合いを調べ、周辺住民との合議に基づき、必要に応じて対策を施すことが望ましい。東日本大震災において様々な想定外の被害が多数発生した反省を踏まえると、社会が抱えているリスクを住民、企業、行政が共有した上で、地域防災力向上のための議論と対策を進めていくことが重要である。

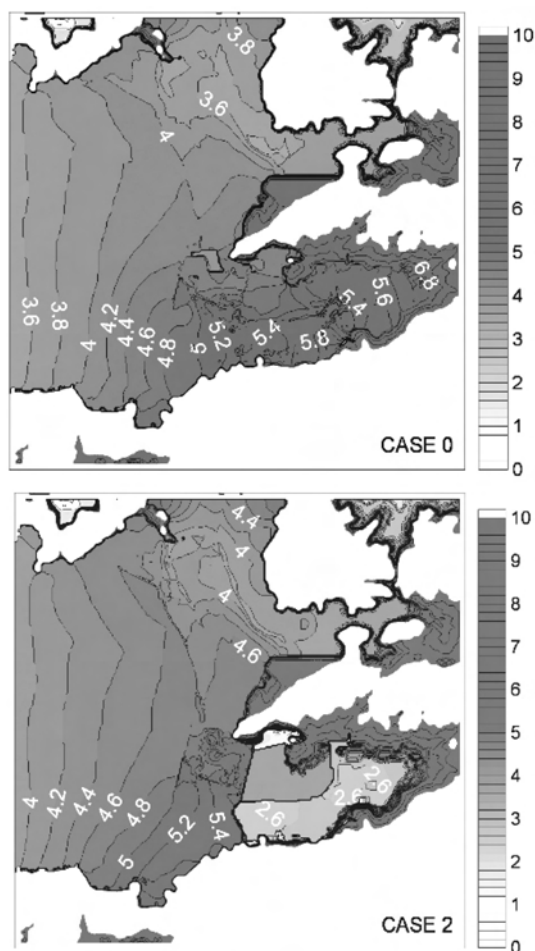
III. 原子力防災における各種連携の推進

1. 津波災害を想定した原子力防災の備え

(1) 原子力災害と東日本大震災における課題

福島第一原子力発電所事故においては、地震発生一日後に半径20km圏内の住民に避難指示が出された。この避難指示に対応するために、大熊町のオフサイトセンターにはバスが集められたが、バスの各自治体への割り振りがスムーズに行われず、バスを必要とするすべての自治体に必要な台数が行きわたることはなかった。これは、現地対策本部に必要な要員が集まらなかったこと、地震による道路の損壊や避難車両による道路渋滞の影響が大きかったと報告されている(政府事故調査委員会)⁷⁾。また、避難経路の選択については、緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム(SPEEDI)による放射性物質の拡散予測結果が活用されなかったことが問題としてあげられている(政府事故調査委員会)⁷⁾。

女川原子力発電所が立地する牡鹿半島に押し寄せた巨大津波は、沿岸集落に大きな被害を及ぼし、沿岸の周辺住民は津波災害で住宅を失い、避難施設へ移動する必要



第2図 防波堤の設置の有無による津波高の違い(上:設置前, 下:設置後)⁶⁾

があった。しかし、牡鹿半島内の道路が地震と津波で損壊したため、半島東部は陸の孤島と化した。同発電所周辺集落の被災者は、近隣の避難施設などへのアクセスが不可能となり、女川原子力発電所に助けを求め、同発電所は、被災者を受け入れた。原子力発電所は、健全性を保っていれば、その地域において有数の頑強な施設であり、緊急の避難所として活用された事例となった。但し、見方を変えれば牡鹿半島に立地する女川原子力発電所が、道路被害により外部とのアクセスに障害を起こし、外部からの支援が受け難い状況に陥ったと見ることができる。このように津波災害直後に陸の孤島となる点は牡鹿半島の地域としての課題であろう。

2. 原子力防災の外部の備え

原子力災害の危険性が高まり避難指示が出た時点で迅速・円滑な避難が必要となる。津波災害が想定される原子力立地地域では、以下の備えが重要と考えられる。

- 外部アクセスの物理的な強靱化：道路や周辺斜面の耐震性
- 原子力災害対策拠点(オフサイトセンター)の対原子力災害も含めた強靱化

a)は、大規模の避難ということを除けば、沿岸の津波や火山等の災害時における避難にも有効な内容である。このような災害が想定されている地域の道路整備では、自然災害、原子力発電所周辺では原子力災害を想定して検討すべきである。b)は、原子力災害時の関係機関の情報共有、原子力災害時の円滑な緊急事態対応(放射線観測データ収集、情報発信、避難活動の指揮)の能力を発揮するために必要となる。福島第一原子力発電所事故において活用されなかった SPEEDI による放射線量空間分布予測も共有すべき情報である。具体的な要件については、原子力安全・保安院が取りまとめた資料⁸⁾に記載されているが、

- 複数の自然災害と原子力災害の複合時にも機能すること
 - 代替施設の確保
 - 平時の有効な教育・訓練とその継続
- の3点に集約される。

IV. 原子力防災における地域連携の推進

1. 地域住民を対象としたリスクコミュニケーションの重要性

- 東北地方太平洋沖地震、津波及び原子力事故における原子力リスク情報の住民との情報共有と地域連携の課題

東北地方太平洋沖地震、津波による福島第一原子力発電所事故では、オフサイトセンターが地震や津波の被災により機能を失った。さらに、周辺住民の避難に係る重要な情報収集・伝達のインフラに障害が生じ、原子力事故の情報や避難に係る情報伝達に混乱が生じた。このような事態を回避するには、リスクの原因・要因と対策及び対策の効果について、ステークホルダーの多面的な意思決定におけるニーズに合致した双方向情報伝達を限られた時間の中で効果的に実施することが求められる。そのため、平常時からの双方向対話によるリスクコミュニケーションの実践により、信頼性が醸成されていることが肝要となる。

今後、原子力のリスクコミュニケーションでは、従来の広報活動で陥ってきた PA (Public Address) ではなく PA (Public Acceptance) すなわち、情報を公衆が受け入れることに主眼を置くことから、リスクを減らす取り組みを進めるリスクマネジメントの中で、ステークホルダーの意見を取り込む双方向対話への方向転換が必要となる。リスクコミュニケーションの目的である原子力の信頼醸成には、先ず、安全性向上のスパイラルアップのためのリスクガバナンスの枠組みと仕組みを明示する必要がある。次いで、具体的なリスク低減の取り組みとして、リスクプロファイルを明示し、防護対策の効果、技術的限界及び限界の基準等について、科学的・合理的に示すとともに、住民や地元メディア及び自治体等と情報

や意見のやりとりを重ね、一連のプロセスの結果がリスクマネジメントに反映されることが求められる。また、リスクマネジメントでは、広報部門とリスク管理部門及び技術部門等の組織内リスクコミュニケーションも重要な位置づけとなる。

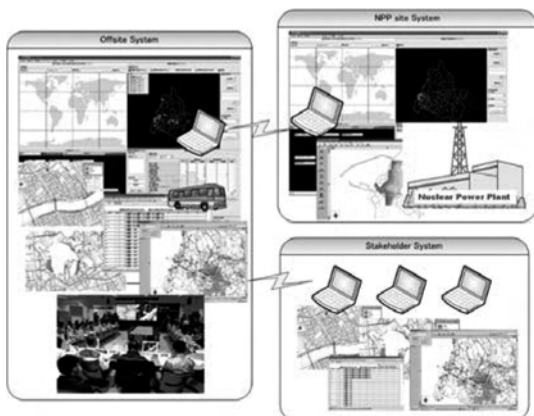
(2) 原子力立地地域でのリスクコミュニケーションの実践的取り組み例

原子力立地地域での実践的なリスクコミュニケーション研究の既往事例⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾では、事業者と地域住民との双方向の(リスク)コミュニケーションに取り組み、それを如何に継続するかという観点で研究が進められ、一定の成果がまとめられている。

2. 地震・津波等外的事象と原子力事故の複合災害に対する地域連携の具体化技術

自然災害と原子力事故の複合災害に対する地域連携の具体化技術に関する研究開発は、東日本大震災の7年前よりJNESにおいて実施されていた。JNESは、2004年12月のスマトラ島沖地震、津波による原子力発電所の被災を受け、原子力施設及び周辺地域の津波防災の重要性をIAEA加盟国と共有し、地震・津波と原子力災害の複合災害時の住民避難の高度化に資するための災害対応情報システム「TiPEEZ」(Protection of nuclear power plants against Tsunamis and Post Earthquake considerations in the External Zone)¹²⁾を整備した。

TiPEEZは、原子力施設の津波リスク等の評価を行うサブシステム、原子力施設周辺の地震・津波被害情報(推定・実被害)に基づき住民の避難計画を推計し、周辺自治体等への情報支援を行うサブシステム及び周辺自治体や関係機関との情報共有を行うサブシステムで構成されている。サブシステムは、それぞれが自律的に機能し、かつ連携することで、複合災害における時々刻々変化する地域情報の収集と評価を行い、実効的な住民避難推計を行う特徴を有している(第3図)。TiPEEZは、2009年4月にインドに提供され、JNESからの技術支援により、インドのモデルサイトでのカスタマイズが実施された。



第3図 TiPEEZのシステムの構成

その後、2010年2月には、ムンバイのインド原子力発電公社 NPCIL (Nuclear Power Corporation of India Limited)本部において、TiPEEZを用いた模擬緊急時訓練が実施された。

日本においては、東日本大震災後に原子力立地自治体のひとつである柏崎市が、地元大学である新潟工科大学に対し、原子力防災訓練計画の立案等に関する技術支援を要請した。これを受け、同大学は、地震・津波に対する原子力防災訓練の実効的なシミュレーションを行うための手段としてTiPEEZシステムを用いることとし、JNESとの共同研究による柏崎刈羽地域へのTiPEEZの適用検討が行われた¹²⁾。TiPEEZの適用検討では、新潟工科大学が中核となり、自治体職員及び地域住民を対象としたデモンストレーションが複数回実施されている。

3. 原子力施設と地域の連携の推進

現行の原災法や原子力災害対策指針などの関連法規制では、原子力複合災害時において自らが被災者となる自治体に住民避難の主体としての行動を要求しており、自治体支援のための原子力事業者や国との災害対応での連携の枠組みが求められている。リスクコミュニケーションの観点では、原子力施設の自然外部事象のリスク評価において得られる情報には、周辺地域の防災対策に役立つと思われる重要な知見が含まれるため、原子力施設のリスク情報を周辺自治体や地域住民と共有することにより、津波等の自然災害対策と原子力災害対策のシームレスな連携が期待できる。今後、原子力プラントと地域の連携によるリスクマネジメントの枠組みの具体化とそれを支える法整備、さらには、法規制の枠に囚われない原子力施設と地域連携の取り組みが期待される。

V. まとめ

津波常襲国である我が国においては、構造物によるハード対策と、警報や避難を中心とするソフト対策を組み合わせて総合的な津波対策が推進されてきた。東日本大震災の巨大津波を受けて、二段階の津波規模が設定され、具体的な防災・減災計画が策定されるとともに、沿岸の重要施設周辺の減災対策も検討されることになる。原子力施設周辺地域では、津波災害に続いて発生するおそれがある施設事故への対応も考慮する必要があるため、事前の対策がさらに重要となる。

海岸保全の一部としての津波対策は、海岸法のもとで都道府県が国と連携しながら実施される。一方で、地域の減災計画は、災害対策基本法のもとで、市町村が実施主体となる。原子力施設周辺では、これに原子力災害対策特別措置法が加わり、民間事業者を含めた総合的な連携が不可欠となる。施設周辺地域の津波に対する防災・減災対策を進めるためには、国・自治体・事業者のそれぞれが役割分担のもとで連携し、市町村および住民と協

力しながら対策を進めることが重要である。

－ 参考資料 －

- 1) 財務省：減価償却資産の耐用年数等に関する省令，昭和40年3月31日大蔵省令第15号。
- 2) 土木学会：津波特定テーマ委員会 第1回報告会(2011/5/10)資料，<http://committees.jsce.or.jp/2011quake/node/79>，2014年8月アクセス。
- 3) 中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」：今後の津波防災対策の基本的考え方について(中間とりまとめ)(平成23年6月26日公表)，2011。
- 4) 柴崎隆一：東日本大震災による港湾都市における産業・物流の被害・復旧状況，国土技術政策総合研究所資料第677号，2012，p.106。
- 5) 気象庁：気象業務法及び国土交通省設置法の一部を改正する法律の公布，<http://www.jma.go.jp/jma/press/1305/31a/250531koufu.pdf>(2015年8月アクセス)
- 6) 有川太郎，野村逸人，富田孝史，小林真，虎石龍彦，荒井清，木原一禎：直立浮上式防波堤による現地津波防護効果に関する検討，海岸工学論文集，第54巻，2007年，pp.936-940。
- 7) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会(政府事故調査委員会)：中間報告(本文編)，平成23年12月26日，<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/>。(2014年4月アクセス)
- 8) 原子力安全・保安院：オフサイトセンターの在り方に関する基本的な考え方について取りまとめ，平成24年8月，<http://www.nsr.go.jp/activity/bousai/data/torimatome.pdf>。(2014年4月アクセス)
- 9) 八木絵香，高橋信，北村正晴：「対話フォーラム」実践による

原子力リスク認知構造の解明，日本原子力学会和文論文誌，Vol.6, No.2, p126-140, 2007.

- 10) 谷口武俊：平成16年度 原子力安全基盤調査研究 原子力技術リスク C3 研究 社会との対話と協働のための社会実験実施報告書，2005。
- 11) Eiichi Sato, Hiroyuki Yamada, Hideto Taoka, Kyoko Sano, Katsumi Ebisawa, Ichiro Abe, Tomohiko Sato, Tsuyoshi Takada: Study on Understandability of Seismic Information on Nuclear Power Plant, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, 2012.
- 12) Hiroyuki Yamada, Hidefumi Kawauchi, Hideto Taoka and Katsumi Ebisawa: International application of risk communication system considering evacuation in case of multiple disaster involving Earthquake, Tsunami and Nuclear Disaster, PSAM Topical Conference in Tokyo in light of the Fukushima Dai-ichi Accident, 2013.

著者紹介



佐藤慎司(さとう・しんじ)

東京大学

(専門分野/関心分野) 海岸防災，海岸波浪，津波・高潮，海岸浸食とその対策



山田博幸(やまだ・ひろゆき)

電力中央研究所

(専門分野/関心分野) 地震・津波・原子力防災，リスクコミュニケーション，耐震，リスク論



From Editors 編集委員会からのお知らせ

－最近の編集委員会の話題より－

(10月6日第4回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・9月期に英文誌へ31論文，和文誌へ4論文が投稿された。
- ・英文誌インパクトファクターの維持向上策の一貫として掲載著者にアンケートを実施することとした。
- ・英文誌投稿急増に対応するため，一部分野で審査前スクリーニングを実施することとし，その方法を検討した。
- ・学会賞論文賞への編集委員会推薦論文を最終決定した。
- ・幹事会の位置づけを再検討し，また，メール審議規定を作成することとした。

【学会誌関係】

- ・編集長より，委員会活動の進め方と記事企画について説明があった。また秋の大会セッションの報告や，報道関連記事の紹介があった。
- ・今月も論文誌委員2名に出席願い，学会誌記事について意見交換をした。
- ・記事の企画，進捗状況，編集上の課題について協議した。
- ・学会誌記事の編集・校閲工程と記事作成の手順の改定について，最終案の説明があった。最終確認した後，HPに掲載する。
- ・学会誌記事の評価のためアンケートを10月号の記事から始めることになった。
- ・次号以降の記事進捗状況の報告と確認を行った。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

意思決定プロセスとしてのリスク・コミュニケーション—原子力の未来に向けて

第3回 リスク・コミュニケーションの現場から

HSE リスク・シーキューブ 土屋 智子, 服部 成雄

原子力平和利用発祥の地である東海村でリスク・コミュニケーション活動を始めて10年以上。手探りで作り上げてきた視察プログラムを紹介するとともに、現場の経験を踏まえたリスク・コミュニケーションの実践と継続のための留意点を述べる。参加している住民にとって、リスク・コミュニケーションの成立を阻んでいる大きな要因は、事業者が一般住民の理解度や関心事を把握できていない点にあり、両者の距離を縮めることに努める活動が重要である。

KEYWORDS: *risk communication, public participation, trust, risk management, nuclear power, severe accident*

I. はじめに

福島第一原子力発電所の事故が発生する以前、「リスク・コミュニケーション」という言葉を知っている原子力関係者はごく限られていた。しかしながら、2000年以降、我が国でも複数のリスク・コミュニケーション活動が展開された¹⁾。本稿で紹介するのは、リスク・コミュニケーションの社会実験プロジェクトから誕生したNPO法人による活動である。活動の経緯、具体的な活動内容を説明したのち、リスク・コミュニケーションが定着するための課題を示すとともに、活動に参加している住民の思いと意見を紹介する。未だにリスク・コミュニケーションを「専門家や行政・企業から市民・住民へのリスクの説明」と理解されている方が多いように感じているが、本稿が日本原子力学会のリスク・コミュニケーションに対する正しい理解につながれば幸いである。

Risk communication for stakeholders making decisions about the energy future with atomic power (3) : *Grass roots activities of risk communication* : Tomoko Tsuchiya, Shigeo Hattori.

(2015年7月31日 受理)

■前回タイトル

(2) 福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえた東京電力におけるリスクコミュニケーション活動

II. 活動の経緯

1. 原子力を語らない・語れない村

1999年9月30日、原子力関係者の意表をつく事故が茨城県東海村の株式会社ジェー・シー・オー東海事業所で発生した。19時間もの間臨界状態が続き、我が国の原子力開発史上初の住民避難が行われた。わずか1日の避難であったが、これを契機に法律も制度も規制機関も変化した。

臨界事故は、日本の原子力技術開発の発祥の地である東海村の住民の意識にも変化をもたらした。東海村住民意識調査によれば、チェルノブイリ事故前後で「原子力は安全」「まあ安全」と考える人が約5割と変化がなかったものが、臨界事故後は14.2%に激減した²⁾。訪問調査では、「今後は原子力のリスクとともに暮らしていることを意識する必要がある」といった発言がある。一方で、女性グループへのインタビュー結果には、「避難したことを周囲に言えない」「不安だと言えない」といった発言が見られる。事故が起きて、「原子力のリスクや原子力に対する不安や疑問を口に出せない」のが立地地域である。そして、この「語れない・語らない」雰囲気は、時間の経過とともに強まっていった。

2. 社会実験のスタート

「事故を経験した東海村にこそリスク・コミュニケーションが必要」との強い思いから、当時新設された原子

力安全・保安院の公募研究に応募、採択され、2002年12月に社会実験プロジェクトが始まった。2003年4月からは、公募で集まった住民による「東海村の環境と原子力安全について提言する会」(以下、「提言する会」)を立ち上げ、住民アンケートの結果も参照しつつ、村民に求められている活動として何を行うべきかを議論し、「視察プログラム」を考案した。

(1) 視察プログラムとは

視察プログラムでは、原子力事業所の安全対策を見学に行く。しかし、「いつもの見学会ではないものを！」が基本コンセプトである。このため、第1図に示すように、視察場所の検討段階から住民が関わり、事前説明、視察当日の議論、視察レポートを巡るやりとりと、原子力事業所とコミュニケーションを行う。さらに、NPO法人となつてからは、より多くの方々に活動内容を紹介するため、広報誌を原子力事業所と協力して作成している。安全対策が十分か否かについて住民側と原子力事業所側とで必ずしも意見が一致することはないので、原子力事業所が希望すれば、NPOの見解と原子力事業所の見解を並列して提示している。NPO法人としては、原子力に反対/賛成といった主張や原子力事業所の安全対策の評価を目指しているのではなく、より多くの人に東海村内の原子力事業の実態を伝えたいと考えている。

(2) 視察プログラムが必要とされた理由

「提言する会」に参加した東海村の住民はなぜ視察プログラムを考案したのであろうか？ 第一の理由は、臨界事故時に(株)ジェー・シー・オーが臨界を起こすような事業活動を行っていることをほとんどの住民が知らなかったことにある。第二の理由は、多くの住民が村に原子力事業所への監視・監督能力をもつことを期待していたものの、事故から3年を経ても村の原子力行政がほとんど変化していなかったためである。「村任せにせず、自分たちで取り組もう」と考えたのである。もちろん、「素人では分からない」「事業所は素人の話を聞いてくれない」

という否定的な意見もあったが、一步を踏み出してみることにした。

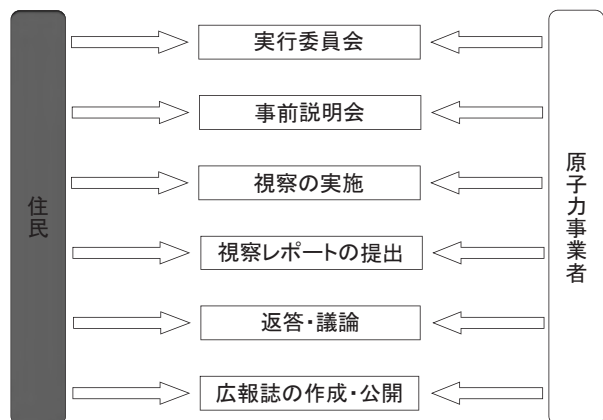
(3) 視察の成果

第1回の視察は核燃料サイクル研究開発機構(当時、以下サイクル機構)の再処理工場と廃棄物関連施設であった。2回の事前説明会を経て、2003年10月20日から夕方まで現場見学と議論を行った。当時は視察レポートの作成方法や位置づけ、事業所からの回答の扱いが決まっていなかったこともあり、視察の感想文を送付した後、追加説明を受け、翌年2月視察レポート提出、6月に回答と補足説明と、10か月間の取り組みとなった。その後、第2回視察を日本原子力発電株式会社の東海発電所廃止措置と東海第二発電所を対象に行い、さらに茨城県主催の原子力防災訓練に参加して、村への提言も行った。

「提言する会」にとって、視察プログラムは活動の重要性と可能性を認識させるものとなった。第2図は、プロジェクト評価の一環として行った「提言する会」メンバーへのアンケート調査の結果である。プログラムを検討していた段階の否定的な意見はなく、「住民の活動に自信が持てるようになった」との意見が寄せられている。実際、プロジェクト終了に際して、参加者は「視察プログラムを継続する」ことを強く希望したのである。

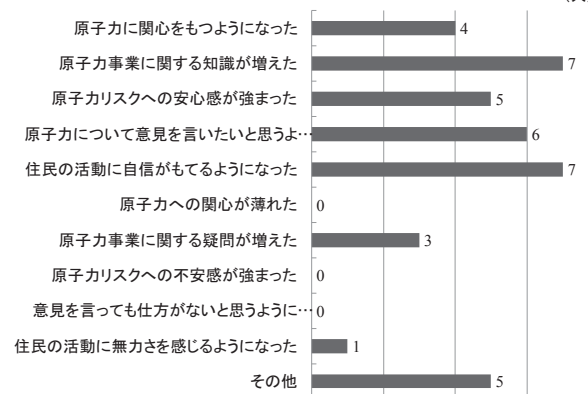
もちろん、第2図に示されているように、住民側の「原子力事業に関する知識が増えた」ことも視察プログラムの成果である。「提言する会」メンバーは東海村に暮らして30年以上という人が多い。それでも、IAEAが査察していることや、東海発電所が1998年から廃止措置作業を行っていることは知られていなかった。逆に言えば、こうしたリスクの評価や管理に関わる情報はほとんど提供されていなかったということである。

視察対象となった原子力事業所にとっても、この視察プログラムは「ていねいに説明を聞いてもらえる」場として、有効なコミュニケーション機会と評価されたが、他方、「こちらの説明を理解してもらえなかった」との不満



第1図 視察プログラムのプロセス

参加住民自身の変化の内容(12名中11名が「変わった」と回答)(人)



第2図 「提言する会」の活動評価

の声も聞かれた。例えば、原子力事業所では取り扱う放射性物質や放射線の量とその危険性に応じてそれぞれの施設ごとに管理基準やルールを設けているが、それは「提言する会」メンバーにとって同じ事業所内に異なる管理基準やルールがあるように映ってしまう。東海村の事業所は年数を経た施設が多いため、放射性物質や放射線の管理は厳しいものの、労働安全衛生の観点からはかなり旧式のマネジメントと感じられる施設も多い。このため、不慣れな作業者や緊急事態に十分対応できないのではないかとの疑問が出される。原子力事業所側は、「教育訓練を重ねている」と説明するのであるが、「提言する会」側はなかなか引き下らない。常に不慣れな人は存在し、緊急時には普段でできることができないことを知っているからである。残念ながら、ある事業所では、視察から8日後、ベテラン作業員の操作の詳細がマニュアルに記載されていなかったために、不慣れな職員が追加操作をせずトラブルが発生して手動停止となった。

しかしながら、視察プログラムの実施中に、少なくともサイクル機構の担当者は「提言する会」の信頼を得た。初めての試みだったこともあり、繰り返し説明した過程について、ある参加者は「私が今一番変わってきていると(今後の原子力事業所に)期待しているのは、こうして毎回来て、資料を作り、見学場所についての準備をなさっているということである。」との意見を寄せた。また、「過去のトラブルは？」との質問に正直に答えたことに対して、「ここまで話してくれるとは思わなかった」との感想をもったメンバーもいる。直接繰り返しコミュニケーションを行う中で、事業所側が努力し変化していく姿が信頼を築いた。

ただし、サイクル機構に対する評価はそれほど高くなかった。前述したとおり、最終的な回答が10か月後だったことが最大の要因である。サイクル機構としては組織として正式に回答をしようと考え、組織内の了解を得るために時間を要したとのことである。また、担当者らは組織内の調整に相当労力を費やしたと聞いている。リスク・コミュニケーションを成功させるためには、組織全体でその意義を認識し、協力体制をつくる必要がある。

III. NPO 活動の可能性と課題

研究プロジェクト終了後、2005年に特定非営利活動法人HSEリスク・シーキューブ(以下、シーキューブ)を設立し、視察プログラムを継続的に実施してきた。NPO法人としての活動を選択したのは、原子力事業所だけでなく、村とも一定の距離を保ち、住民の視点を伝えるためである。臨界事故を経験した東海村民にとって、原子力事業所の安全対策だけでは安心できない。村をはじめ県や国の原子力防災体制が信頼できてこそ、原子力は安全であると実感できるのである。シーキューブも2004

年度の原子力防災訓練から訓練に参加し、避難や屋内退避を体験したり、村対策本部の活動を見学したりすることを通して、東海村に改善提案を行ってきた。住民側の知識も必要と考え、分かりやすいコンパクトな原子力防災の手引きをつくり、住民に説明したり、防災訓練参加者へのアンケート調査を行ったりした。残念ながら、福島第一原子力発電所の事故は、これまでの想定をはるかに超える規模であり、シーキューブは新たな原子力防災体制を学ぶところから始めようと考えている。

視察プログラムのような活動は、どの立地地域でも実施可能であるし、原子力に限らず、様々な問題で市民がリスク評価やリスク管理に関わり、行政や事業者とともに考える関係をつくるきっかけとなるだろう。しかしながら、実現と継続のためには留意すべきことがある。

第一に、NPOや市民グループ側にも行政や事業所側にも、しっかりとした事務局機能が必要であり、事務局間の信頼関係が不可欠である。行政や事業所側担当者の協力がなければ視察プログラムは実現しなかった。また、市民グループ側も主義主張ではなく、行政や事業所の状況や努力を理解した上で、伝えるべきことを伝えるために、内部で協力することが必要であり、事務局が調整役になる必要がある。例えば、過去の経緯を知らない新しいメンバーの意見をどう扱うかは難しい判断である。シーキューブはできるだけ新メンバーの意見を大切にするとともに、時間をかけて議論することを心がけている。

第二に、行政や事業所が組織全体としてリスク・コミュニケーションを理解し推進・支援する体制になっている必要がある。一般的に行政や事業所の説明は特有の用語や言い回しが用いられ、とにかく分かりにくい。聞き手のニーズを踏まえた分かりやすい説明を工夫することは基本である。次に、市民は必ずしも行政・事業所の説明に納得するわけではなく、時には行政・事業所の考えに否定的な意見も出す。このとき、行政や事業所側は「市民は理解できない」と感じる傾向が強いが、理解と納得は異なるし、理解していても厳しい意見は出される。組織として市民の意見を受け止め、リスク管理に役立てる意識が必要である。説明者が「持ち帰って検討します」と発言する権限がないと、とにかく住民意見に反論するしかなく、そのような対応は組織に対する印象にも影響を及ぼしかねない。さらに、できれば事務局や窓口担当者はあまり異動しない方が望ましい。視察プログラムは同じ事業所を対象に複数回行っているが、以前と同じ担当者がいたり、引き継ぎが行われている場合と、毎回異なる担当者が対応する場合とでは、視察プログラム実施の円滑さも住民側の印象も異なってくる。信頼関係を築くには時間がかかるのである。

第三の留意点は、説明や議論だけでなく、何かを協働して作り上げる活動を行うことである。視察プログラム

は、住民と事業所が原子力施設のリスク管理のために協働する活動と言える。さらに具体的な作業を一緒にすることも有効である。例えば、研究プロジェクトの広報誌は、研究者側が作成していたが、NPOになってからは住民が原稿を作成し、編集に関わるようになった。人に伝えるために文章を書いてみると理解していなかったことが分かり、疑問が出てくる。ここから本当の意味での議論が始まるのである。シーキューブの広報誌「シーキューぶ東海村」は、視察実施後、何度も事業所に追加質問をし、メンバー内で議論し、事業所側に確認してもらい、3~4か月かけて発行している。協働作業によって、市民の理解が深まるだけでなく、行政や事業所側も市民を理解することが可能になるだろう。

NPO 活動として原子力利用に伴うリスク・コミュニケーションを行う上での最大の課題は、原子力立地地域の「原子力について語れない」雰囲気である。シーキューブには推進の人も反対の人も参加しており、「原子力施設の安全」という共通の目的のために議論し活動している。しかし、原子力事業所で働いていたり、家族が勤めていたりすれば、活動に参加しにくい。“原子力”について語る人は、常に推進側なのか、反対側なのかで色分けされてしまう。色分けされてしまうと、異なる考え方の人は参加しにくい。この「語れない」壁を崩し、原子力問題について自由に議論できる場の実現を目指していかなければならない。今年3月に広報誌を発行した際、「賛成でも反対でもない団体が情報発信するのは重要」との電話をいただいた。この言葉を励みに東海村での活動を続けるとともに、全国で類似の活動を構想する団体や行政・企業を支援したいと考えている。

IV. 「原子力の村」でのリスク・コミュニケーション

1. 一住民にとっての原子力

1956年の日本原子力研究所設立に始まり、原子力民生利用の初物づくしの東海村は、地方の村の割には異例の活況を続け、住民の多くも原子力との共存を受け入れていた。しかし、前述ジェー・シー・オーでの被曝死亡事故で、村民は強いショックを受け、原子力への不安を強めた。

その後も国内の原子力発電所で、機器やシステムの大小トラブルが相次ぐ中、一村民であり、プラントメーカーの技術者でもあった本著者の一人は、電力会社などの微妙な立場を知りつつも、市民にとって理解し易い透明性の高い原子力情報が提供されていない点が問題と考えていた。その頃、リスク・コミュニケーションの普及を追究しているシーキューブを知り、東海村支部に加わった。そして事業所、住民、行政の三者がどんな情報をどうすれば共有できるかを、視察プログラムなどに参加しながら議論をしてきた。地道な活動は広報誌などを通じ

て、ある程度村民に認知されるようになったと思う。

しかし、2011年の東日本大震災時、東海第二発電所も危機に見舞われ、震災後4日目に冷温停止に達した経緯が公表されたのは、事故の11日後の茨城新聞によってであった。この間、村民のほとんどは地震による家屋の損壊や停電、断水などへの対応に追われ、東海村も福島事故と紙一重の状態にあったことは知らされずにいた。かつてのように「原子力の村」と胸を張って言えるような空気が失われた今、信頼を回復するリスク・コミュニケーションが求められていると感じている。

2. 住民から見た原子力事業所と行政

住民の目には事業所はどのように映り、信頼関係はどうなっているのか。シーキューブの視察プログラムなどを通じて感じたところを述べる。

(1) 原子力事業所

事業所の住民に対する原子力施設の安全対策などについての説明は概して懇切、丁寧だと言える。特に福島での事故を経てからは、その教訓を生かした津波・防水対策、非常用電源・冷却水源の多重化、それらを実際に運用するための訓練などについて、図解も交えて多様に繰り返しPRしている。しかし実のところ、「色々と対策しているようだけど、だから安全だと言われてもよく分からないし何だか怖い」と言う近隣の主婦らの感覚には「安全≠安心」といった心理が表れている。事業所の「説明する」というアクションはリスク・コミュニケーションの発端となり得る。しかし遺憾ながら現在までの東海村ではそれがうまくいったという例を聞かない。要するに事業所が伝えんとすることが一般住民の理解や心情に十分届いていないのだ。その理由としては、

- ① 絞切型の安全対策の有効性を一方的に押しつける、組織人としての振舞いが目立つ、
- ② 住民の理解、疑問から距離のある専門的、技術的な説明が多く、柔軟性に乏しい人が多い、
- ③ 残っている課題やリスクなどには言及しない傾向、といった点が考えられる。今後は、事業所の努力の実態を、高経年化や放射性廃棄物処理などに関連するリスクを自ら摘出しながら、率直に分りやすく住民との情報共有を目指すという姿勢が強く望まれる。

原子力事業所の住民対応での拙さ(リスク・コミュニケーションが進展しない)を感じた例を示しておこう。

- (a) 福島での事故の教訓を反映した安全対策の計画と実施状況について、事業所主催の住民説明会が何度か開かれている。これは全村民(約15,000世帯)が対象ということだが、参加はハガキによる事前申し込み制で、各回とも先着30名限定、と著しく少ない。少数に絞って質疑応答をじっくりできるのかと期待したが、説明とQ&A合わせて1時間。説明内容は

ホームページにあるものと大差なく、質疑は数分で時間切れとなった。結局やらないよりはまし、という程度で「住民説明会」の実績作りに過ぎないもののように思えた。

- (b) 東海村主催の住民原子力懇談会が、高レベル放射性廃液ガラス固化技術開発施設を対象に実施された。事業所から施設の概要と見学箇所の説明があり、「それでは現場の方へご案内」と呼びかけた。その時、住民の一人が「この施設では何を目的として何をやっているのかもさっぱり分からずに現場を見ても意味がない！」と声を荒げると、他の参加者たちからも同様な声が上がった。結局、担当者が改めて再処理とは何かから説明をして、ようやく全員が納得して見学に移った。事業所側では、この施設の役割をだれもが知っているとの思い込みがあったようで、このようなすれ違いを起こしてしまったと思われる。要するに専門家である職員は、無意識に上から目線で対応していたのだろう。素朴な疑問や関心を抱く住民に寄り添って説明、案内をすることで、自分たちの仕事の意義や作業におけるリスクとそれへの対処の方法を理解してもらい、といった闊達な作風が欠けていたと思わざるをえない。

(2) 村の原子力行政

ジェー・シー・オーでの事故以来、原子力施設の安全、健康管理、非常時対応などの面で、東海村は住民へのきめ細かいサービスや情報提供に努め、改善努力を続けてきたと評価している。例えば、

- ◆広報紙の発行、各種懇談会の開催、勉強会、出前講座などによる知識・情報提供、
 - ◆放射線モニタリング、ハザード・マップの作成、避難所整備や避難訓練、防災用資器材の備蓄など
- などである。但し、これらのサービスの機能や実態が住民に十分浸透し、理解されているかどうかには疑問がある。

行政での問題点としては、

- ①原子力安全に関わる役場内部署の分担が多少複雑で分かりにくい。
- ②緊急時の役場と住民自治組織との連携が不明確。
- ③数年で職員の異動があり、事業所、住民との安定した連携の構築に困難がある。
- ④広域防災・避難の点で、近隣市町村や県との連携に未確定な部分が多く残されている。

などの点でさらなる検討が必要であろう。

3. リスク・コミュニケーションの確立へ

歩みが遅く、小規模な活動ではあるが、シーキューブの視察プログラムを通じて原子力に関する東海村でのリスク・コミュニケーションの種が播かれ、チラホラと芽も始めている。原子力事業所との対話、現場視察を繰り返す中で住民目線でのリスクを丹念に抽出し、リスク管理の具体的手法について徹底的に意見を交わし、事業者、住民、行政の三者間で共有できる情報や知見を増やしてゆく、そのための媒介役として活動できることがシーキューブの理想であると考えている。

ただ、シーキューブの先々を考えての重い課題の一つに、上記の理想を実現して広めてゆく活動を引き継ぎ、発展させてくれる若年層のメンバーがおらず、何とかしてそういう仲間を得たいということがある。別に、シーキューブの会員にならずとも、リスク・コミュニケーションという同じ目標に向かって活動する若い世代のグループとの協働ができれば希望を先へつなげる。東海第二発電所の再稼働の有無によらず、この原子炉、大量の使用済み核燃料や高レベル放射性廃液などは長期に亘ってこの村に在り続けるのだから、現在の若い世代はもとより、その後続く世代もこれらの厄介者と共存せざるを得ない。これらを適切に処理・処分する技術開発に意欲を持つ技術者を育成するとともに、世代間のリスク・コミュニケーションを深めてゆくことも望まれる。

— 参考資料 —

- 1) 土屋智子(2013)原子力リスクコミュニケーションの5重の壁, 日本リスク研究学会誌, Vol.23, No.1, pp.11-16.
- 2) 東海村(2000)まちづくりと防災 住民意識調査.

著者紹介



土屋智子 (つちや・ともこ)

特定非営利活動法人 HSE リスク・シーキューブ
(専門分野/関心分野) リスク・コミュニケーション



服部成雄 (はっとり・しげお)

特定非営利活動法人 HSE リスク・シーキューブ
(専門分野/関心分野) 原子力構造材料腐食、溶接技術/日本の適正電源構成

サイエンスよみもの

103 番元素が解く、周期表のパズル —ローレンシウムのイオン化エネルギー測定に成功—

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 佐藤 哲也

2015年4月、我々の研究グループは、103番元素ローレンシウム(Lr)のイオン化エネルギー測定に成功したとして、「103番元素が解く、周期表のパズル」というタイトルでプレスリリースを行った¹⁾。この成果は、Nature 2015年4月9日号(520号)に掲載され²⁾、同誌の「News & Views」で紹介されただけでなく、さらに同号の表紙を飾ることとなった。

「周期表のパズル」とはなんだろうか？よく知られているように、元素をある周期性をもって原子番号の順に並べたものが元素周期表である。しかし中学校の教科書にも出ているこの元素周期表は、実は未だ議論の余地を残している。

KEYWORDS: *lawrencium, ionization energy, actinide, superheavy elements, ISOL (Isotope Separator On-Line), periodic table, surface ionization*

I. 103 番元素ローレンシウム

1. 奇妙な元素ローレンシウム

103番元素ローレンシウム(Lr)は、1961年にA.Ghiorsoらによって初めて合成された人工元素であり、もちろん自然界には存在しない。元素周期表上ではもっとも重いアクチノイド元素として、アクチノイド系列の末端に位置する。Lrは、1997年に国際純正・応用化学連合(IUPAC)によって104番元素ラザホージウム以降が元素周期表に追加されるまで、長く周期表最後の元素として知られていた。

原子番号が100を超える元素を合成するためには、加速器を用いた重イオンビーム核反応を用いる。生成した同位体はすべて短寿命であるため、化学実験に用いることができるのは、一度に原子一個ないし数個ずつしかない(atom-at-a-time)。これらの制限のため、その化学的性質はよくわかっていない。

Lrについても例外ではなく、これまでにLrの原子価が3価であることは確かめられたものの、その化学的性質はほとんど知られていない。事実、これまでに、Lrがアクチノイド最後の元素としての性質をもつことを実験的に示した例はなかった。

では、なぜLrでアクチノイドが終わることになったのか？それは、約70年前、1940年代にG. T. Seaborgが提唱したアクチノイド仮説による。これは、「ランタン(La)から始まる15個の元素で構成されるランタノイドと同様に、アクチニウム(Ac)で始まる元素グループが存在する」というものである³⁾。彼は実験化学者の立場から、自身が発見して間もないアメリシウム(Am, 95番元素)やキュリウム(Cm, 96番元素)の化学的挙動に疑問を抱き、これを説明するために、4f軌道に電子が詰まり始めるランタノイドと同様、5f軌道が占有され始めるアクチノイドという元素群があると考えた。発表当時は様々な批判もあったようだが、続く重アクチノイド元素の発見や、原子軌道計算の発展によって、現在は常識として受け入れられている。

ところが皮肉にも、アクチノイドの存在を裏打ちした原子軌道計算は、最後のLrに至って、その化学的性質が周期表からの予想と異なる可能性があることを予言した⁴⁾。

そもそも、元素の化学的性質が周期性をもつ理由は、ある周期ごとの元素の電子配置が似ているからに他ならない。たとえば1族元素、すなわちアルカリ金属は、最外殻電子軌道がs軌道であり、1つの価電子をそのs軌道にもつ。セシウム(Cs)なら、キセノン(Xe)の閉殻構造を[Xe]と表現して、[Xe]6sというように表す。同じく1族であるフランシウム(Fr)であれば[Rn]7sとなる。ランタノイド末端に位置するルテチウム(Lu)の電

Where is an appropriate place for element 103 on the periodic table? : Measurement of the first ionization potential of lawrencium : T. K. Sato

(2015年7月20日 受理)

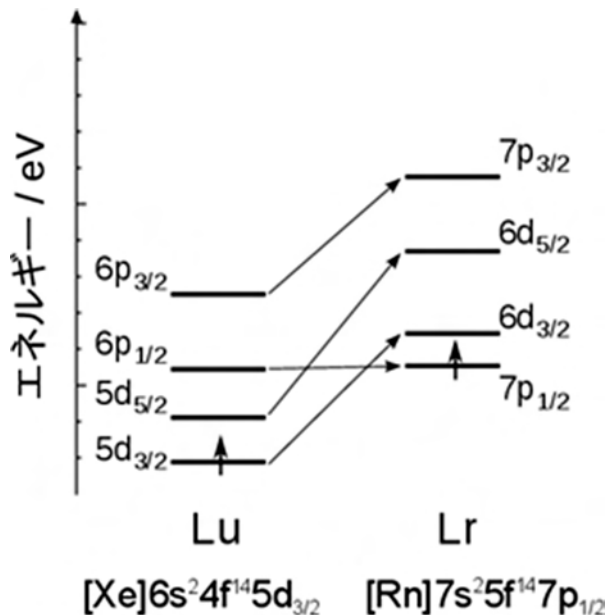
第1図 元素周期表。アクチノイドの前半の元素のAcからネプツニウム(Np)については、最高酸化数が遷移金属と類似することが知られている。また、104番以降の超アクチノイド元素については、112番元素コペルニシウム(Cn)を除く109番元素マイトナリウム(Mt)以降の化学的性質に関する情報がほぼ皆無である。これらの事情を反映して、AcからNpまでと、Cnを除くMt以降の元素はざらして表記してある。

子配置が $[\text{Xe}]6s^24f^{14}5d$ であることを踏まえると、Lrの電子配置は、 $[\text{Rn}]7s^25f^{14}6d$ となると推測できる。ところが、原子軌道計算からは、もっとも安定な電子配置は $[\text{Rn}]7s^25f^{14}7p_{1/2}$ となることが予想されている。この違いは相対論効果の影響による。

Lrのように、原子番号が大きな元素では、中心電荷付近に存在確率をもつs軌道や $p_{1/2}$ 軌道などにある電子が、原子核に強く引きつけられるために、その運動が光速に近くなる。そのため電子の質量が増加し、軌道はより収縮する。逆に中心電荷付近の存在確率が低いd軌道やf軌道では、s軌道などの収縮によって中心電荷からの静電引力がさらに遮蔽されることになり、軌道が広がる。結果として、s軌道や $p_{1/2}$ 軌道は安定化し、d軌道やf軌道は不安定化する。これらの現象を相対論効果と呼び、すべての元素に内在し、原子番号が大きくなるほど顕著となる。Lr原子では、この相対論効果の影響によって、6d軌道に比べて $7p_{1/2}$ 軌道がより安定となるため、最外殻電子軌道が、周期表から予想される6dではなく $7p_{1/2}$ となることが予想された(第2図)⁵⁾。

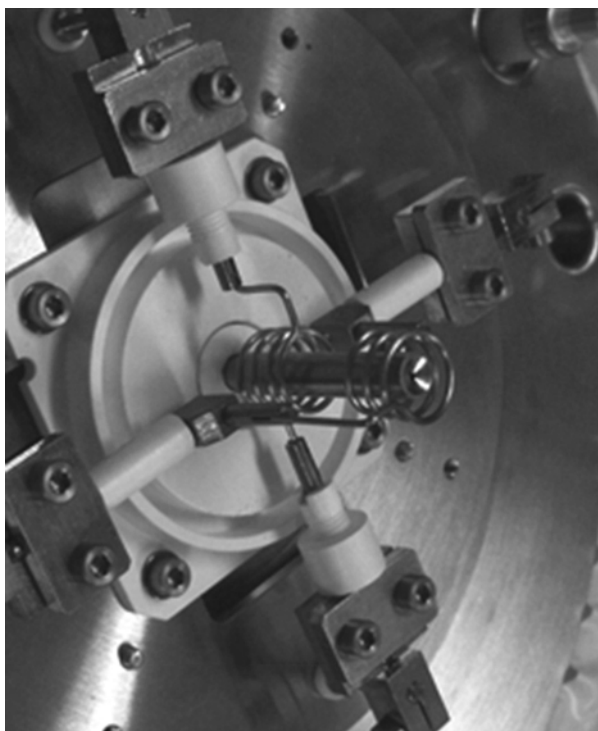
元素の化学的性質は最外殻電子軌道によって特徴づけられるため、Lrの化学的性質が、元素周期表の予想から逸脱する可能性が出てきたことになる。

2. Lrの化学的研究



第2図 LuおよびLr原子の基底および励起状態の最外殻電子軌道のエネルギー準位図。Luでは $5d_{3/2}$ 軌道、Lrでは $7p_{1/2}$ 軌道に価電子がひとつ入っている。Lrでは、相対論効果によって $7p_{1/2}$ 軌道が安定化する一方で、6d軌道が不安定化するため、エネルギー準位の入れ替わりが起こる。

原子の持つ電子配置、とくに化学結合に関わる最外殻電子軌道は、その元素のもつ化学的性質に反映される。Lrにおいては、周期表からの予想と異なるほどに相対



第3図 JAEA-ISOL用ガスジェット結合型表面電離イオン源。中央の筒状のイオン化室を二つのフィラメントで取り囲むことにより、イオン化室温度の高温・等温化およびイオン源の長時間運転を可能にした。

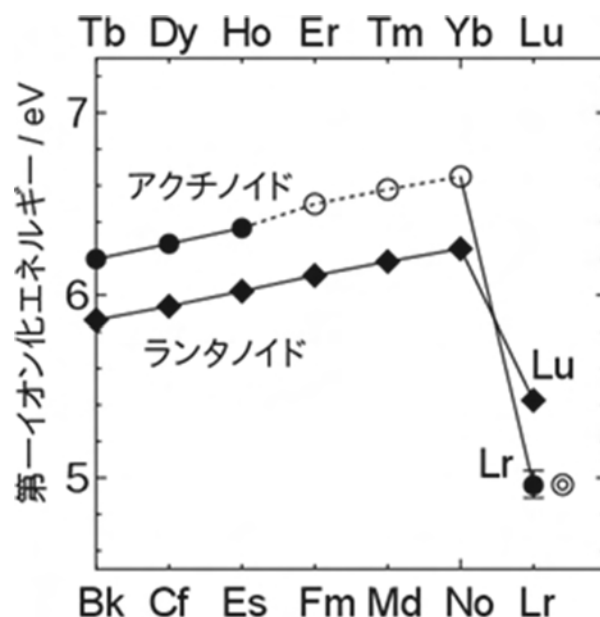
論効果による影響を受けた電子軌道が、どのように化学的性質に発現するのか、俄然興味が持たれる。

これまでになされたいくつかの化学的アプローチのうち、特に周期表からの“ずれ”を意識したものは、Lrの揮発性研究である。B.Eichlerらは、Lrの最外殻電子軌道がd軌道である場合と $p_{1/2}$ 軌道である場合について、価電子をd軌道に持つ3族元素と、p軌道にもつ13族元素の熱力学的データをもとに、Lrのもつ揮発性を推測した⁶⁾。それによれば、仮にLrが $p_{1/2}$ 軌道を最外殻にもつなら、大幅に揮発性が高くなる。この予測に基づき、D.T.JostらによりLr原子の石英またはプラチナカラム表面に対するガスクロマトグラフ挙動が調べられたが、少なくとも1000°Cの温度条件では、Lrが揮発性を示すことは確認できなかった⁷⁾。

このように、Lr原子の最外殻電子軌道が周期表からの予想と異なるか否か、これまでに実験的に確かめられた例はなかった。

3. Lrの第一イオン化エネルギー

第一イオン化エネルギーは、原子の性質を表すもっとも基本的な物理量の一つである。真空中で中性原子から最外殻電子軌道にある電子一個を取り去るエネルギーに相当する。したがって、これを求めることができれば、最外殻電子軌道に関する情報を得ることができる。また、第一イオン化エネルギーは、原子軌道計算によって



第4図 ランタノイドおよびアクチノイドの第一イオン化エネルギーの推移(●, ◆:実験値, ○:計算値, ⊗:本研究で得られた理論計算値)

算出できる数少ない物理量でもある。実験値と理論値を直接比較することが可能であるため、理論計算の格好のベンチマークとなりうる。

しかし、Lrの第一イオン化エネルギーを測ると言っても、マクロ量に対して確立された従来法を一度に原子一個しか扱えないような系に適用することは難しい。実際、これまでに第一イオン化エネルギーが測定されたのは、99番元素のアインスタイニウム(Es)までに留まっている。Esのイオン化エネルギー測定には、レーザーを利用した共鳴イオン化法が用いられた。この実験では、原子炉で生成した²⁵⁴Es(半減期276日)をフィラメントに電着し、このフィラメントを熱することで昇華した²⁵⁴Esを、レーザーでイオン化して共鳴波長領域を調べることにより、イオン化エネルギーを決定した⁸⁾。このとき測定に必要とした原子数は 10^{12} 個である。化学実験に用いることのできるLr同位体の半減期が数十秒ないし数分であり、生成率も数秒に1個程度であることを考えると、Lrのイオン化エネルギー測定がいかに困難であるかがよく理解できる。

そこで我々は、表面電離過程を応用することで、これを可能にした。表面電離過程は、高温の金属表面と、その表面に吸着した原子との間の相互作用によって、原子がイオン化される現象である。このときのイオン化効率、イオン化をおこなう金属表面の温度、仕事関数、そしてイオン化される原子のイオン化エネルギーなどに依存する。すなわち、イオン化効率のイオン化エネルギー依存性を利用することで、Lrの第一イオン化エネルギーを決定できる。

実験では、カリホルニウム標的(²⁴⁹Cf)へのホウ素イオ

ンビーム (^{11}B) 照射によって Lr 同位体 (^{256}Lr (半減期 27 秒)) を合成した。合成した ^{256}Lr を、ガスジェット搬送法によって、迅速に実験装置へと運搬する。この搬送法では、ヘリウムガス中にヨウ化カドミウムエアロゾル粒子を浮遊させたものを用いる。核反応で生成した核反応生成物をエアロゾル粒子に付着させ、そのままガス流にのせて運ぶことで、生成から数秒以内に実験装置に導入することができる。エアロゾル粒子に付着した ^{256}Lr は、オンライン同位体分離器 (JAEA-ISOL, Isotope Separator On-Line) に装着されたガスジェット結合型表面電離イオン源 (第 3 図) に導入される。この表面電離イオン源のイオン化室はタンタル製であり、2900 K までの高温でイオン化が可能である。この装置を用いて ^{256}Lr をイオン化し、そのときのイオン化効率を測定することで、Lr のイオン化エネルギーを求めた。なお、この実験は日本原子力研究開発機構タンデム加速器実験施設で行った。本施設は、カリホルニウムのような α 放射性同位体を核反応のための標的に使える世界有数の実験施設である。

こうして得られた Lr の第一イオン化エネルギーはアクチノイドのなかで最も低い $4.96 \pm 0.08\text{eV}$ だった²⁾。これまでわかっている全元素の中では、5 番目に低い値であり、この値の低さはアルカリ金属であるナトリウム (5.1391eV) に匹敵する。このイオン化エネルギーの値だけを見れば、Lr はアルカリ金属的であるとさえ言えるかも知れない。第 4 図に、今回測定された Lr の第一イオン化エネルギー実験値を、理論計算値とともに示す。ランタノイドでは、テルビウム (Tb) からイッテルビウム (Yb) まで単調に第一イオン化エネルギーが増加し、Lu で小さくなることが知られている。今回、Lr が非常に小さなイオン化エネルギーをもつことを示したことにより、Lr でアクチノイドが終わることを初めて実験的に確かめることができた。さらにこの実験値は、電子配置 $[\text{Rn}]7s^25f^{14}7p_{1/2}$ に基づいた理論計算値 ($4.963 \pm 0.015\text{eV}$) と非常によく一致した²⁾。このことは、Lr の最外殻電子軌道が p 軌道であることを強く示唆している。

II. Lr にふさわしい居場所はどこか？

冒頭で述べたように、Lr はアクチノイド最後の元素として周期表に載せられている。Lr のイオン化エネルギーを求めたことで、アクチノイド仮説が提唱されて 70 年以上経って、初めて「アクチノイドはここで終わる」という、周期表のパズルのひとつのピースをはめ込むことができた。特に今回、原子番号が 100 を超える超重元素領域で、初めて原子の電子配置に関する情報が得られた。Lr も含めたアクチノイド全体の理解が深まることにつながると期待できる。

ところで、IUPAC 公式のものをはじめ、現在の周期表では、アクチノイドはランタノイドとともに、スカンジウム (Sc)、イットリウム (Y) の真下に置かれ、別表として表記されているのが一般的である。しかし化学的性質の周期性を考えた場合、Sc-Y-Lu-Lr とするべきだ、という意見がある⁹⁾。今回、Lr のイオン化エネルギーが決定されたことで、改めて周期表としての整合性を考えることができるようになり、議論が再燃しつつある。

その一方、本研究により、Lr は d 軌道ではなく、p 軌道を最外殻にもつことが強く示唆された。IUPAC の定義によれば、遷移金属は「原子が完全に満たされていない d 軌道を持つ、あるいは d 軌道によって陽イオンとなることができる」とある。したがって、その定義に従えば、「Lr は遷移金属ではない」ということになる。周期表全体の整合性は、ここでも問われることになる。

Lr の適切な位置について議論が進めば、さらに周期表全体が洗練されることにつながるだろう。

Nature Web 版の News 記事には、IUPAC の無機化学部門部門長 Jan Reedijk から、今回の議論をもとに、Lr と Lu の周期表上での位置について夏の会議で取り上げる可能性があるというコメントが寄せられた¹⁰⁾。今回の成果が、化学者にとっての「地図」である元素周期表を、今一度見直すきっかけになることを期待している。

— 参考資料 —

- 1) プレス発表「103 番元素が解く、周期表のパズル - ローレンシウム (Lr) のイオン化エネルギー測定に成功 -」
<http://www.jaea.go.jp/02/press2015/p15040901/>
- 2) T. K. Sato, *et al.*, Nature, 520, 209-211 (2015).
- 3) G. T. Seaborg, Science, 104, 379-386 (1946).
- 4) J. -P. Desclaux & B. Fricke, J. Physique, 41, 943-946 (1980).
- 5) A. Borschevsky, *et al.*, Eur. Phys. J. D 45, 115-119 (2007).
- 6) B. Eichler & S. Hübener, Inorg. Chim. Acta, 146, 261-265 (1988).
- 7) D. T. Jost, *et al.*, Inorg. Chim. Acta, 146, 255-259 (1988).
- 8) J. R. Peterson, *et al.*, J. Alloy. Comp. 271-273, 876-878 (1998).
- 9) W. B. Jensen, J. Chem. Edu. 59, 634-636 (1982).
- 10) Nature NEWS (2015 年 4 月 8 日)
<http://www.nature.com/news/exotic-atom-struggles-to-find-its-place-in-the-periodic-table-1.17275>

著者紹介



佐藤 哲也 (さとう・てつや)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 核化学/オンライン質量分離器 (ISOL) を用いた原子核物理・化学研究ならびに気相化学的手法を利用した超重元素化学研究。

談話室

地球温暖化解決に向けた日本の原子力専門家の役割
化学工学会のエネルギーロードマップ作成に参加して

東京工業大学 関本 博

1. 現時点で作成する日本の原子力ロードマップ

化学工学会ではエネルギー部会および次世代エネルギー社会検討委員会が中心となって2005年より5年ごとに日本のエネルギー技術ロードマップを提案してきている。本年度はそれを英文で作成し、Future Energy Systems Based on Feasible Technologies Beyond 2030, Springer, として電子出版する(現在校正段階)。このロードマップの目指すところは、地球温暖化の防止であり、温室効果ガスの削減である。

私は依頼を受け、原子力の部分を執筆した。ところが全ての原子炉が運転停止していて、しかも脱原発の意見が国民の過半数を占める状況にある。このようなことから、内容は今まで国が作成してきたようなものとはかなり異なるものになってしまった。

また書いていて、日本の原子力開発の問題点が色々出てきた。しかし、日本人以外の読者が多くと考えられ、これらの問題点の多くはふれないか、さらにと流すだけのものにしてしまった。その中には、日本の原子力学会の会員に読んでもらいたいことが多々あった。

これらのことから、このロードマップが従来の形を逸脱してしまった内容、及び書いて出てきた日本の原子力の問題点とおもわれることについて、ページに収まる範囲で本欄に書かせていただくことにした。

2. 世界の原子力ロードマップ

OECDのIEAとNEAは世界全体のエネルギーに関する技術予想を発表している。それによると地球平均温度の上昇を2度以下に抑えるには、2050年に原子力発電を900GWe程度にまで増やす必要があるとしている。

ところで、現在OECD諸国で使われている原子力は全部で300GWeになるが、この量は2050年でもほとんど変わらないとしている。ということは、現在100GWe程度しか使っていないその他の国の原子力を600GWe程度にまで増やすことになる。特に現在無視できる程度の中国の使用が200GWe程度にまでなる。

日本の寄与は、例え福島事故前の50GWeまで復活できたとしても、残念ながら、この程度では地球温暖化に与える影響は無視されるレベルである。日本の原子力専門家が、地球温暖化阻止を本当に実現しようとするのな

ら、自国の原子力以上に開発途上国の原子力利用への寄与に力を入れるべきだと考えられる。これは原子力ニーズが大きく不足する日本の原子力産業界にとって、ビジネスチャンスと考えることもできる。

3. 開発途上国における原子力ニーズ

開発途上国のニーズとは、具体的にどのようなものであろうか。4半世紀ほど前、インドネシアを訪問したとき、彼らは軽水炉建設を考えていた。しかし安全性が大きな問題となり未だに建てられていない。インドネシアの原子力専門家の多くは小型炉に関心があり、私にも問い合わせがかなりあった。しかし彼らが望む実証された小型炉はどこにも無く、満足してもらえない回答を与えられなかった。最近では、より安全だということで、高温ガス炉に最も力が入れている。他の開発途上国でも似たような傾向がみられる。

即ち、これらの国の多くでは、現在先進国で使用されている原子炉に比べ、格段に安全で簡単で容易に運転管理ができるものが望まれている。福島事故をみて、事故時に周辺住民が避難する必要のないことも要求される。また単独で使用される場合、出力変更の容易な原子炉が望まれる。小型炉はこのような要求を満たすには適しているが、スケールデメリットがある。

4. 中国とロシア

OECDの原子力ロードマップを見ると、これから中国やロシアの寄与が重要になることが示されている。これは単に原子炉を建設するというだけでなく、より優れた原子炉の開発がこれらの国で行われていくことを意味している。

中国は、今はまだ既成の原子炉を建てているだけに見えるが、日本以上に新しい原子炉に挑戦している。高温ガス炉の開発を始めたときには、米欧日に大きく遅れていた。しかし今では先頭を走っている。中国は自国に大きなマーケットを持っているので、またたくまに原子力先進国になるであろう。

ロシアの原子力に関しても、その基礎技術の広さは日本を大きく凌駕している。私事で恐縮であるが、4半世紀前、私は高速炉の小型化を検討していて、中性子の閉

じ込め性能に優れた鉛ビスマスを冷却材に用いることを提案した。これに対してロシアは熱中性子炉に対してではあるが、すでに鉛ビスマスを冷却材として使う技術をマスターして開発を開始し、今では世界初の鉛ビスマス冷却高速炉の建設を開始できる状態にある。

5. アメリカの頑張り

近年になって、アメリカにおいては DOE の援助を受けて、いくつかの小型炉の開発が積極的に推進されている。どのような原子炉が開発されているか具体的なイメージを持っていただくため、これらのなかでも特徴的な NuScale について少し説明させていただく。

NuScale の格納容器は極めてコンパクトで細長く、中には炉心、蒸気発生器、加圧器が入った圧力容器が収められている。炉心は自然循環で冷却される。全体は工場生産され、トラックやバージで原子炉サイトまで輸送される。プラントは複数の格納容器を水プールに設置した構造になっている。説明は省略するが、従来の原子炉に比べて格段に安全な原子炉になっているとされる。

大学にいたものとして書かざるを得ないのは、この炉はオレゴン州立大学で開発された MASLWR から生まれたということである。1999 年、DOE による公募型研究プログラム NERI に採択された。軽水炉の技術を基にしていて、実用化が容易であるということで、2007 年には商用化のための新会社が設立され、名前も NuScale とされて本格的な開発が開始された。今では建設会社や運転会社も決まり、NRC ライセンスの取得活動が続いている。最初はアメリカに建てる計画であるが、将来は海外に展開することを考えている。

6. 日本の小型炉

日本では、大型軽水炉が市場を独占しており、小型炉のニーズは無いと言わざるを得ない。たとえ一部の企業が使えるかどうか検討を始めたとしても、周りに知れると問題にされるので、秘密にするのが実情である。また原子炉の地元対策に取り組む人たちの中には、軽水炉より安全な原子炉があるということが広く伝わると困るという考えもあるようである。

アメリカなどの積極的な動きに、日本は太刀打ちできそうにない。しかし昔はそうではなかった。4 半世紀前、日本でも小型炉の国際会議 (SR/TIT) が開催された。ここでは、多数の炉型にわたって時代を先取りする特徴的な炉型が、日本から多数提案された。また米国 NERI が推進されたとき、日本においても革新的な原子力研究が多額の資金援助を受け、目覚ましい進展があった。しかし、その後、資金の多くがもんじゅ再開等にまわされ、援助がほとんど得られなくなり、活動は止まってしまった。

過去の小型炉の活動が盛んだった頃を振り返ると、革

新的な炉には一見子供のようにかつ強靱な精神をもった人たちがいて、活気あふれる研究開発がなされていた。彼らは組織の枠にとらわれず、自由奔放に活動しているように見えた。今このような人がいないように見えるが、ぜひ現れてほしい。かつて東工大で「世界の持続的発展を支える革新的原子力」というタイトルで 21 世紀 COE プログラムをおこなったことがある。このときのモットーは「自由な発想と全体を見通す目」であった。今こそこのモットーが実践されるべきときであろう。

7. 日本への期待

地球温暖化に寄与するレベルにまで小型炉を導入するには、大量に導入する必要がある。この場合、大型炉に競合できる経済性が必要となる。これには工場での大量生産が必須となる。多くの発注を得る必要がある。ただし、一旦小型炉の経済性が大型炉に追いついたなら、その後は小型炉が市場を席卷するであろう。しかし例えそのような状況がきても、大量生産に適した基数は膨大で、マーケットはごく少数のメーカーによって抑えられると考えられる。この中に入るのには容易ではない。

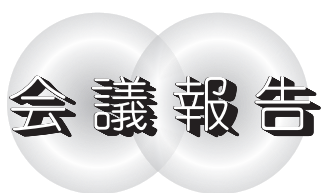
日本は原子力に関する多くの優れた人材と技術を育ててきており、すでに述べたように小型炉に関しても過去にかなりの研究をしてきた。困難ではあるが、日本にはぜひこの原子力の歴史的な転換点で頑張ってもらいたい。

ここで書いたのは、日本で原子力を研究してきたものが、ロードマップを作成して考えたことである。もっと高い立場で考えたなら、目的は地球温暖化の防止であり、温室効果ガスの放出削減である。アメリカや中国、ロシアなどの貢献により、すぐれた原子炉が開発され、それによってこの問題が解決されるとしたら、日本の貢献が小さくても、それはそれで結構なことかもしれない。

しかし、日本の原子力に関する実力を考えるなら、斬新な小型炉の実用化といったことがなされてよいと考える。それが、諸外国の期待に沿うことになるからである。ただし、外国で出来上がった炉を日本で少し改良して作ってみるのは違い、具体的なものは自分で模索して見つけねばならない。トップが小型炉をやるといっただけで、うまくいくようなものではない。自由な発想と全体を見通す目を持ったユニークで才能ある人が何人も出てくる必要がある。私は、日本はそれが可能であると信じており、期待している。

なお、ここでは経済性と安全性・使い勝手に絞って議論した。原子力を利用する場合、資源、廃棄物、核拡散・核防護などの検討も忘れてはならない。これらについては別の機会に書かせていただければと思っている。

(2015 年 8 月 20 日 記)



第 23 回原子力工学国際会議 (ICONE-23) 報告

Nuclear Power – Reliable Global Energy

2015 年 5 月 17～21 日 (千葉市, 日本)

日本機械学会 (JSME), 米国機械学会 (ASME) 及び中国原子力学会 (CNS) の共同主催による第 23 回原子力工学国際会議 (ICONE-23: The 23rd International Conference on Nuclear Engineering) が 2015 年 5 月 17～21 日の 5 日間, 千葉市幕張メッセの国際会議場で開催された。

本会議の来場者は 915 名で, 前回 ICONE-22 の 850 名を上回るとともに, 2011 年大阪までの過去 6 回の日本における ICONE 来場者数の中で最大となった。国別では, 日本 442 名, 中国 229 名, 米国 50 名, 韓国 36 名, カナダ 29 名, フランス 25 名, ドイツ 24 名, チェコ 13 名の順であった。本会議には 1000 件を超えるアブストラクトの投稿があり, 最終的には技術論文 585 件, 口頭発表 114 件及び学生論文 74 件であった。

今回の基調テーマ「Nuclear Power – Reliable Global Energy」は, 東京電力(株)福島第一原子力発電所 (1F) の事故を踏まえ, 原子力の安全利用を再認識するとともに, 地球温暖化を抑制するエネルギーとしての原子力の役割を再確認することを目的として設定された。

本会議は, 5 月 17 日の数値流体力学 (CFD) セミナーと 7 つのワークショップから始まり, 18 日はオープニングセッションとプレナリーセッションが行われた。また, 18 日から 20 日にかけて招待講演者らによるパネルセッションが開催された。CFD セミナーは, 流体力学分野の数値計算初心者, 解析コード利用者, 数値モデル開発者らに数値シミュレーション技術の現状や課題等をわかりやすく解説することを目的として, 著者と米国テキサス農工大学 Hassan 教授が企画したものである。学生を中心に 100 名を超える参加者があり, 使用した部屋が狭く感じるほどの盛況であった。一方, 18 の専門分野からなるテクニカルセッションと学生参加者を対象にした学生プログラムは 18 日午後から開催された。さらに, 21 日には電力中央研究所の我孫子研究所と日本原子力研究開発機構の大洗研究開発センターへのテクニカルツアーが催された。

オープニングセッションでは, ICONE-23 組織委員長である松浦祥次郎原子力安全推進協会代表の挨拶に始まり, ASME 会長 Sims 氏, CNS 事務局次長 Zhang 氏, 欧州委員会研究エネルギー総局上席研究官 Goethem 氏が基調講演を行った。

続いてのプレナリーセッションでは合計 9 名の講演者

による基調講演が行われた。特に, 経産省資源エネルギー庁の土井審議官による「1F の廃炉計画と原子力利用を含む今後の日本のエネルギー基本計画」の講演では, 耐放射線性を高めたロボット技術の確立やミュオン透過法による燃料デブリ蓄積位置の可視化など, 廃炉に向けた課題解決のための対応策の詳細が示され, 各国の原子力専門家が強い関心を示していた。また, 関西電力(株)の豊松副社長による「日本の原子力発電所の運転再開に向けた事業者の取組み」の講演では, 原子力発電所再開に向けた日本の新規制基準への対応に関する詳しい説明があり, 国内外の電気事業者や原子炉機器メーカーにとっては特に興味を引く内容であった。

本会議の基調テーマに沿って構成された 10 件のパネルセッションでは合計 53 名のパネリストによる討論が行われ, エネルギー政策, 原子力規制, 福島原子力発電所事故対応, 高経年化対策, 人材育成, 新型炉開発, 原子力 PA 等の議題に対して活発な意見交換がなされた。

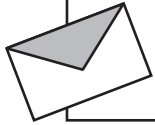
テクニカルセッションでは, 学生プログラムも加えると合計 19 の専門分野に対して, 160 のセッションが設定され, 合計 752 件の発表が行われた。今回は発表件数が多いことから, 最大 16 のセッションが同じ時間帯に並行して設けられた。発表内容に関しては, すでに多くの研究成果が公開されているにもかかわらず, 同様の研究を発表しているケースが途上国の研究者を中心に見られ, これらの国の原子力平和利用研究に対して日本が主導的役割を果たす意義は大きいと感じた。

学生プログラムでは, アジア 43 件, 北米 16 件及び欧州 15 件の合計 74 件の論文発表が行われた。会場には学生に加えて多くの一般参加者も集まり, 活発な討論がなされた。ポスター発表も行われ, 論文とポスターの各発表に対する評価により, アジア, 北米及び欧州の各学生に対して最優秀論文賞と最優秀ポスター賞が選考された。

最後に, 長年の本会議への多大な貢献を称え, JSME と ASME の合同による功労者表彰が行われ, 日本からは元三菱重工業(株)の藤井澄夫氏と元関西電力(株)の千草直樹氏が受賞されたことを付記する。また, 次回 ICONE-24 は ASME のホストにより, 2016 年 6 月 26～30 日の日程で米国ノースカロライナ州シャーロットで開催されることが決まっている。

(原子力機構 高瀬和之, 平成 27 年 8 月 4 日 記)

理事会だより



福島復興

東日本大震災の被災から4年、宮城県女川町の新駅開業や、石巻市の仙石線全通の復興に関するニュースをTVで見て、素直に心嬉しい一方、地元南相馬市に帰省する度に相双地区の復興の遅さに心が痛みます。原子力発電所事故は未だ福島の住民に大きな影響を残しています。

事故から暫く経った何度目かの帰省の折、新地火力から白煙が上がるのを国道6号線から見た時は、復興への期待は大きく膨らみました。東北電力原町火力発電所が、予定より約一年早く再稼働を果たした折り、お会いした南相馬市長も今後の復興への大きな期待を話されました。事故を乗り越え福島復興を果たすことは、被災地住民の悲願でもあります。

静岡大学を会場として開催された今年の秋の大会では、福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッションに講演時間を大きく割り、3日目に終日一般公開として開催しました。福島廃炉の第一歩として必須な、廃棄物の処理処分や炉心内部状況の把握に関する研究、デブリ取り出しに関する研究等について取り上げられました。福島復興につながる廃炉関連研究は、理事会としても最重要課題の一つであり、福島復興へ向けて廃炉推進を継続して支援していきます。しかしながら、廃炉に関わる課題はさらに深く、また被災地復興を果たすために解決すべき課題は、本会を超えてさらに多岐に亘っています。

福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会の開催に向けて、上塚会長が主導しています。福島復興と廃炉に向けて大きな期待を共有したいと思います。もちろん、廃炉推進も長期に亘る極めて困難な課題がありますが、その中で技術的な課題と解決への目標を明確にし道筋をつけることで、具体性を持たせることができると考えます。一方、福島復興は何を持って復興と言えるのかと問えば、市町村や人々によっても異なり、具体的な道筋と目標を画一に決めることはとても難しいと思います。その点で、多様な学協会との連絡会は、福島復興に大きな力になると期待します。

地元の人々と話してみると、多くは元の平穏な生活に戻りたいと考えています。除染、環境回復、風評被害など、福島復興の前提となる解決しなければならない課題には、多様な学会との協働が必要です。平成27年9月5日午前0時に、楢葉町に出されていた避難指示が解除されました。全町帰還は復興への第一歩に過ぎません。南相馬市は居住制限区域、避難指示解除準備区域、及び既

に帰還を果たしている区域があり、復興への目標は複雑です。全村が、帰還困難区域と居住制限区域、避難指示解除準備区域にある飯舘村村長とお話しをする機会がありました。原子力事故は人々の心を切り離すと話されていきました。仕事のために地元に戻りたいと思う一方で、子供への影響が心配で被災地には戻りたくないと思う、家庭内での心のすれ違いから来る複雑な問題の解決には、さらに多様な学会との協働が求められます。

また、住民の区域間での心のすれ違いから来る、さらに複雑な問題もあると思います。一家で帰還を果たした近しい友人からは、将来子供に影響が出るのではと言う、長期に亘るリスクへの不安を聞きました。元の普通の生活に戻りたいという復興への願いに叶うにはまだまだ遠いけれど、継続して取り組まなければなりません。

難しいことに、リスクへの不安は一様ではありません。我が国では、小学校の国語教科書の最初には、ほのぼのとした文章と綺麗な風景が載っています。欧州のそれには、お母さんがアイロンをつけたまま電話をしている姿と、熱くなったアイロン台を見ている子供の絵が挿入された読本があります。我が国では、リスクとは何かと教えられる機会は極めて稀です。産業や生活に必須でも、原子力発電所や化学プラントなどのリスクが、我が国で合理的に受け入れられるには、まだ時間が必要で

す。

平将門以来、旧相馬藩から千年続く国の重要無形民俗文化財、相馬野馬追は、相馬氏の居城があった相馬市中村から、南相馬市鹿島区に御神輿と軍馬行列を進めます。さらに南下し原町区の雲雀ヶ原へ陣を張って、壮大な甲冑競馬と神旗争奪戦を決行します。翌日、未だ避難指示解除準備区域にある小高区の神社で、神に叶う野馬を捕らえて奉納するという重要無形民俗文化財である野馬懸の神事が、今年も果敢に繰り広げられました。避難指示解除準備区域にあって避難していた多くの住民もこのときは一時帰宅して、伝統ある相馬野馬追を支えました。福島の被災地住民は強く、その復興への思いを諦めることはありません。一研究者としても、生涯福島復興に残る力を捧げたいと思います。

(理事・副会長 森 治嗣)

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