

### 巻頭言

#### 1 なぜ原子力は面白いのか

山根一真

### ショートインタビュー

#### 2 原発のリスクとメリットを十分見極めよう

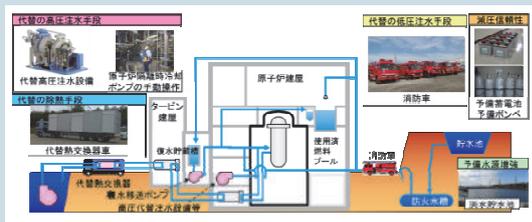
品田宏夫

### 特集 国内原子力発電所における新規制基準、運転期間延長等への対応

#### 14 福島事故の教訓と新規制基準を踏まえた柏崎刈羽原子力発電所の安全性向上について

安全性向上対策は外的事象に対する防護、共通要因故障防止、設計を超える事態における事故進展防止と緊急時対応能力、放射性物質放出による影響の緩和などからなる。

川村慎一



重大事故時の多種、多様な注水、除熱手段例

### 時論

#### 3 太陽光発電の電気を揚水発電で貯蔵しなければならない愚

九州地区では太陽光発電設備が電力系統の受け入れ能力を上回るまでに増えすぎた。

小野章昌

#### 5 いま改めて湯浅年子を語る

国際的女性物理学者の草分けである湯浅の名がNEAの会議室の名称に採用された。

千野境界

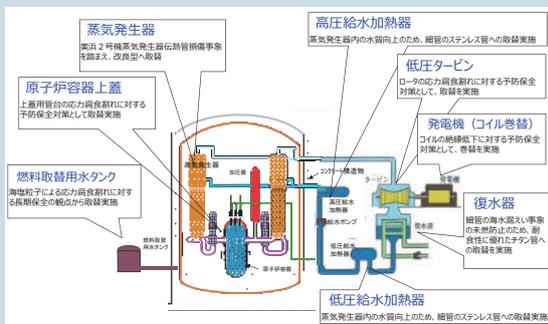
### Column

#### 7 川口マーン恵美, 竹内純子

#### 18 原子力発電所の長期運転（運転期間延長）への対応について

高浜1, 2号機と美浜3号機について、60年の運転に対し設備の健全性を十分維持確保できることを確認し、原子力規制委員会から運転期間延長認可を得た。

南 安彦

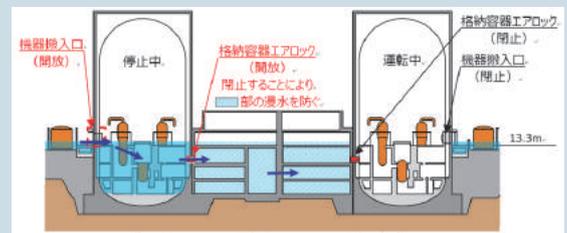


大型機器の取替実績

#### 21 川内原子力発電所の安全性向上評価について

九州電力は2017年に川内1, 2号機の安全性向上評価を原子力規制委員会に提出した。

江藤和敏



停止中ユニットから運転中ユニットへの浸水の概念図

## 25 再稼働する原子力発電所の安全性 —新規規制基準と安全目標の関係

安全目標は事業者がめざすべき目標ではなく、原子力規制委員会が規制を進めていく上で達成をめざす目標である。

諸葛宗男

## 29 市民との対話 —我が国における活動事例

消費者庁や学協会などの従来型、参加型のリスクコミュニケーションや筆者の地域参画型リスクコミュニケーションの実践経験を通して、市民との対話はいかにあるべきかを考える。

山野直樹

## 33 ステークホルダーとの対話 —海外の事例と日本への展開

賛否両論がある事項やベネフィットとリスクとを勘案して判断しなければならない問題を議論する際には、誰が何のために議論をするのかを明確にしなければならぬ。「国民全体」を対象としたアプローチには限界がある。

村上朋子

## 連載講座 核データ研究の最前線 (第5回)

## 37 IAEA の核データ事業

IAEA 核データセクション (NDS) は、核データの収集・整備・配布・教育を通じて、原子力・非原子力分野における核物理の成果の平和利用を半世紀以上にわたり支援している。

大塚直彦, 河野俊彦, 国枝 賢, 大澤孝明

## 連載講座

## 材料挙動と計算機シミュレーションの接点(第4回)

## 42 第一原理計算によるタングステン中の水素の研究

核融合炉材料として利用が予定されているタングステンと水素および水素同位体との相互作用を第一原理計算によって研究した。

大澤一人

## 8 NEWS

## 連載講座 福島環境回復に向けた取り組み (第10回 / 最終回)

## 47 線量評価とリスクコミュニケーション

原子力機構では、1F事故により放出された放射性物質に起因する外部被ばく線量、内部被ばく線量を評価するとともに、リスクコミュニケーション活動を継続して実施してきた。

齋藤公明, 高原省五, 植頭康裕

## 部会トピックス

## 52 水化学部会の将来構想に係る取り組み

震災以降プラントが長期停止する中で、水化学分野では人材育成・将来構想をテーマにパネル討論を行った。今後はハンドブックやロードマップの改訂作業により次世代を育成しつつ、世界水準をリードすることをめざす。

寺地 巧, 渡邊 豊, 久宗健志

## Short Report

## 56 原子力学会からの情報発信—広報情報委員会を通じた情報発信の課題と今後

布目礼子

## 理事会だより

## 58 誕生日の問題と稀有事象

山口 彰

- 59 会報 原子力関係会議案内, 次年度会費請求のお知らせ, 書籍販売のご案内, 「2018 春の年会」見学会案内, 英文論文誌 (Vol.55, No.2) 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://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>)にお寄せください。

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

# なぜ原子力は面白いのか



ノンフィクション作家

山根 一眞 (やまね・かずま)

獨協大学外国語学部ドイツ語学科卒業。著作は『小惑星探査機はやぶさの大冒険』など多数。最新作は『理化学研究所 100 年目の巨大研究機関』『スーパー望遠鏡「アルマ」の創造者たち』。獨協大学特任教授、理化学研究所相談役、JAXA 客員、日本文藝協会会員。

東京・日比谷の帝国ホテルの一室。その日、私はある電力会社のトップと「ものづくり」がテーマの対談を行っていたが、話題は地震と原発の安全性に移っていた。2007年7月、中越沖地震の発生数日後に現地入りしたが、震源地に近い山の斜面が大きく崩壊、道路が陥落しているのを見て、この地震の巨大さに愕然。だが、そのわずか500m北の東京電力柏崎刈羽原子力発電所の被害はごくわずかだった。

なぜ巨大地震でも大きな被害がなかったのかを知りたいと、同原発内部をくまなく取材した。対談で、「原子炉下の制御棒の部分も見ることができ、日本の原発の安全性を実感した」と話していた時、経験したことのない大きな揺れが見舞いテーブル上のコーヒーカップがひっくり返った。東北地方太平洋沖地震だったのだ。

その日を境に、原子力の世界と巨大地震、巨大津波が大きなテーマとなった。原子力の世界を描くことは、大手メディアにとってはいわばタブーだった。だが「3・11」を境に、私は積極的に原子力をテーマにしなければと思うようになった。原子力災害を受けた福島県各地も取材、地元の方々の怒りや絶望も多く聞きながら、放射能汚染に対応する支援活動も行ってきた。一方、福島第一原発の構内や関連企業の取材も続けるうちに、大きな不安を覚えた。それは、「反原発」の風潮が大きくなることで、原子力を専門とする若い科学者や技術者が減ってしまうのではという不安だ。

福島第一原発の廃炉には40年かかると言われているが、科学も技術も、科学者やエンジニアの情熱と志次第で、革命的なイノベーションがもたらされることは歴史が物語っている。福島第一原発の廃炉は、熱い、強い意志があれば20年で終わることすら可能のはずなのだ。それは、原子力災害の被災地の皆さんが最も望んでいることでもある。それを担うのは、より深い、より革新的な原子力研究と技術開発に取り組む若い世代だ。だが「反原発」という世論にはその発想はなく、また若い世代にいかにもその研究や仕事が重要で挑戦的なのかをどう伝えればいいのか、答がみつからないままだった。

そういう思いを抱きながら、昨年10月、日本原子力研究開発機構のJ-PARCセンターを中心とする原子力科学研究の現場を2日間にわたり取材する機会を得た。そして、大きな発見があった。ひとことで言えば、「原子力は面白い！」だ。陽子加速器群をコアに大強度陽子ビームや中性子、ニュートリノ、さらに核種変換まで、これでもかこれでもかと見せられた現場と研究内容は、人類科学のフロンティアだった。

そのひとつ、原子力機構が米国から初購入した99番元素、アインスタイニウムの研究には興奮を禁じ得なかった。この元素の化学的特性や核分裂のメカニズム解明は40年近く行われていなかったが、それは、宇宙での物質の起源の解明にも通じる挑戦だ。厳重に管理されているアインスタイニウムが封入された容器を見せてもらったが、中味のアインスタイニウムはわずか0.5マイクログラムだという。日本でこの超微量元素の解明研究が可能なのは、研究蓄積がある原子力機構のタンデム加速器があつてこそだと知った。その研究解明は、原発の廃炉処理や高レベル放射性廃棄物の処理処分法の開発にも大きな貢献が期待されるという。

福島第一原発の廃炉は日本の科学技術が経験したことのない史上最大の厳しい課題だが、課題は大きければ大きいほど取り組み甲斐がある。その研究、仕事を通じて、日本ははかりしれない科学力と技術力を手にすることは間違いない。アインスタイニウムの解明もそのひとつ。こういうことをわかりやすく、しっかりと伝えるジャーナリストが一人くらいいてもいいのではと思っている。

# SHORT INTERVIEW

## 原発のリスクとメリットを十分見極めよう

刈羽村長 品田 宏夫

澤田 最近、原子力発電所を見学されたと聞きました。

品田 2017年10月20日に見学に行きました。現場で働いている所員に明るさが出てきたと思います。安全装置がたくさん追加され、消防車が全部で37台も配備されていました。しかし、これは果たして実効性があるものでしょうか。ともあれ、いろいろな対策で安全性は確実に高まっていると思います。

澤田 福島第一原発事故で環境に放出された放射性セシウムの量は、約1万テラベクレルでした。今の規制でめざしている目標値は100テラベクレルです。柏崎刈羽の6、7号機が仮に重大事故を起こした際の最悪ケースの評価値は16テラベクレルです。

品田 私たちは確率論的リスク評価(PRA)とは何かということをよく理解しないとイケません。確率論的“安全”評価(PSA)ではなく“リスク”評価だと思います。

澤田 リスクに対する理解が進めば、16テラベクレルという評価値をどう解釈すればいいかが分かってきます。その数値は福島第一原子力発電所事故時と比べると、放出量が約千分の1。だとすると、外部被ばく線量もずっと低いものになります。

品田 自治体は住民の安全確保の観点から、避難計画を進化させることに責任があると考えています。リスクを理解できれば、避難計画も確実性が高まります。

柏崎刈羽6、7号機を見学して、新たな発想で整備される除熱システムや自身の蒸気で動かす高圧注水装置など様々な工夫がされていることを知りました。これらは、当事者の自主的な経営判断のもとでやっているということですが相当の費用をかけていると聞いています。

澤田 新たに設置された循環冷却システムは実にシンプルで、良くできていると思います。これは本店と現場の技術者がコミュニケーションを良くして出来たものだと聞き、なおさら感心しました。さて、品田村長は、東電は変わったかと思われませんか。

品田 17年村長をやっていますが、様変わりしました。殿様から庶民になった感じがします。これはいいことですが、言うべき主張をしなくなった面もあります。また、以前より柏崎刈羽の現場に権限が集約されたことで安心感は増しています。ただ、東電に対しては批判されることが多いものの、努力や成果は正当に評価することも必要です。

澤田 再稼働に向けて対策を施している原子力発電所の追加的な安全措置の中には、過剰なものがあります。これは新たな安全神話の現物ではないかと思えます。

品田 リスクとは天秤にかけることです。日本が原子

力発電を利用しない時のリスクと利用した際のリスクを考えないといけない。社会としての損失はどちらの方が大きいのか。神話が私達の助けにならないことは明白です。現実をもっと見据えた対策をめざすべきでしょう。

澤田 衆院選では原発ゼロも争点になりました。

品田 原発ゼロを主張するのであれば、それに至るロードマップをきちんと示すことが必須です。日本の脱原発はリスクゼロの幻想とセットになっています。日本のエネルギー需要を満たすために世界の各所から日本に向かうシーレーン上に石炭や天然ガスを積んだタンカーが数珠つなぎになっています。中近東の政情不安を考えれば、原発ゼロなどとは簡単に言えないはずです。

澤田 集中立地が問題視されています。

品田 原発が1基から2基になれば、リスクが倍になるのかどうか。それについてはぜひとも専門家の分かりやすい解説が欲しい。複数基であれば、科学的な見地から、それに見合うコストをかけて必要な安全を確保すればいい。地元では、集中立地に対して不安はそれほどありません。私は、この地域に増設は“あり”だと思っています。原発を一定程度導入しておかなければ、この国は立ち行かないでしょう。リプレース・新增設は、喫緊の課題として声をあげていかなければならない。そのためにはまず、原子力や諸工学の専門家がそのことをきちんと言わなければならない。

澤田 東電や原子力学会に向けてメッセージを。

品田 東電には自分たちのサイトをしっかり守ってくれることを期待します。科学者は国民に対し、リスクのことをしっかり、かつ分かりやすく提示して欲しい。社会に伝わらない言葉は無効です。一方で政治には違うやり方があります。私たちは目の前の現実を見据えて、かつ臨機応変に対応していかなければならないと思っています。(聞き手：澤田哲生、2017年10月26日実施)



品田宏夫氏(しなだ・ひろお)駒沢大経済学部卒  
刈羽村議、村議長を経て2000年から現職



## 太陽光発電の電気を揚水発電で貯蔵しなければ ならない愚(問題提起)



小野 章昌 (おの・あきまさ)

エネルギーコンサルタント

1962年東京大学工学部鉱山学科卒、同年三井物産(株)入社、コロラド鉱山大学修士課程に短期留学。三井物産では銅・鉛・亜鉛などの資源開発とウラン開発を始めとする原子燃料サイクル事業を担務。退職後から現職。

2017年10月14日付け朝日新聞は「揚水発電、水くみ上げ昼夜逆転 太陽光普及で思わぬ現象」と題して次のように報じた。

夜の間に余った電気で水をくみ上げ、電力需要の多い昼間に山から落として電気を作る揚水発電。九州で最近、その役割が変わりつつある。太陽光発電の普及で余った電力を消化するため、昼間のくみ上げが大幅に増えた。全国の電力会社でも珍しいという。

2014年ごろから昼間のくみ上げ回数が急増し、15年に昼夜が逆転。16年度は昼間のくみ上げ回数が7割近くを占めた。太陽光発電の急速な普及が要因だ。今年5月のピーク時は、電力需要の7割をまかなうまでになった。

太陽光発電設備は今後も増え、一方で節電の定着や人口減で電力需要は減っている。昼間の電力がより余り、出力制御が常態化していく可能性もある。九州電力の難しい調整が続くそう。

この記事から読み取れることは、九州地区では太陽光発電設備が電力系統の受け入れ能力を上回るまでに増えすぎたのではないかとということである。具体的に検討してみよう。

- (1) 離島を除く九州本土の太陽光発電設備は、電力系統に接続済みのものが747万kWあり、加えて接続承諾済み(418万kW)、接続契約申し込み済み(282万kW)、接続検討を依頼されているもの(247万kW)があって、新たに合計で947万kWの設備が固定価格買取制度(FIT)の下で追加される可能性がある(九州電力ホームページ)。
- (2) 一方需要の少ない春季の休日に当たる今年4月23日(日)には、時間帯によって太陽光の最大発電量が600万kWhを示し、需要量の75.4%を占めるまでになった(10月11日電気新聞記事)。
- (3) 九州電力には宮崎県の小丸川(おまるがわ)発電所を始めとして3つの揚水発電所で合計発電能力230万

kWを所有している(朝日新聞記事)。4月23日当日は200万kWhを揚水発電の水くみ上げで消費して、太陽光発電による余剰発電量を吸収した(電気新聞記事)。このようにして九州電力は揚水発電による電力貯蔵を目一杯行い、太陽光発電に対して運転停止命令を出すことを避けることができたわけである。

- (4) しかしその昼間の時間も、バックアップ役を務める火力発電は夕方の需要増に備えて一定程度の出力で運転を継続する必要がある。4月23日は火力発電が引き下げ限度ぎりぎりまで運転出力を下げていたことが想像される。

以上の実態から次の結論が得られるであろう。

- ・この現象は明らかに九州電力系統で太陽光発電の設備量が過剰になっており、バックアップ役を務める火力発電は急速な出力の増減や、一日のうちに複数回の起動・停止を行うなど運転上での大きな犠牲を強いられているものと考えられる。
- ・揚水発電は、夜間の安い電力(例：原子力発電)を使って水をくみ上げ、昼間の高い価格の時に売って利益を上げるとともに、ピーク用電源(石油火力、ガスタービン火力)の設備量を極力減らすことに意義があるわけだが、昼間の高い価格の電気を使って水をくみ上げ、安い価格の夜間や朝夕に売るのは本末転倒となろう。
- ・揚水発電所までの送電ロス、揚水時のポンプに伴うエネルギー・ロス、消費者に届けるまでの送電ロスを考えるとおよそ3割近いエネルギーが失われることになる。賦課金という多額の国民負担の下で買入れられた高い価格の電気がさらに3割も高くなるという愚を犯しているのである。苦役を強いられる電力会社もたまったものではないであろう。
- ・これは九州電力だけに留まらず、同じように休日の太陽光発電の割合が高い四国電力、中国電力などにもいづれ現れる現象であろう。行く行くは日本全国の電力

会社が苦しむ現象かもしれない。

- ・エネルギーの質の問題として、自然エネルギー(太陽光・風力)は同じ時間帯に同じような発電を行うことになり、自然は需要のことを一切考えてくれないので、設備が増えすぎると、今回のようにどうしても過剰な発電を生む時間帯が生じる結果になる。それは「共食い効果」と呼ばれるもので、お互いがお互いの足を引っ張り合い、どれかを止めなければならなくなる。太陽光・風力発電には避けられない現象である。このように自ずと導入量に限度が生じるのである。ドイツやスペインの先行国の例を見ると、発電量(kWh)の割合で太陽光・風力が全体の20%に近づくとこの共食い効果が顕著になり、太陽光・風力の導入量には限度が現れてくるのが分かる。九州電力の場合には電力系統が欧州諸国に比べてはるかに小さな規模であり、限度はもっと早く現れていると思われる。
- ・前記(1)のように、九州電力では認定済みで接続を希望している太陽光発電設備がさらに947万kWあるという。今でも目一杯と考えられるので、今後は止めるために作るようなものである。太陽光発電事業者にとっても、受け入れる電力会社にとっても、良いことは1つもないであろう。自然エネルギーを至上のものと考え、優先受入れ、優先買取を義務付ける固定価格買取制度(FIT)がもたらしている矛盾であり、国民負担を増やす一方のFIT制度は一刻も早く停止する必要がある。少なくとも太陽光発電については既に十分な社会実験が行われたと考えられるからである。

九州電力が経験している上記のような現象から見て、太陽光・風力発電が基幹電源となり得ないことは明白であると言えよう。しかし、太陽光・風力至上主義は我が国でも欧州諸国でも依然として根強いものがある。つまり自然エネルギー(太陽光・風力)はクリーンで、無限にあり、安価であるので中心的役割を果たすことができ、周りはそれを助けるべきとの「自然エネルギー天動説」が出回っている。しかし、本当に天動説は正しいのであろうか？ 次に例を挙げよう。

- ・「太陽光・風力は限界コストが低いので、最初に電力系統に入れられるべき」と自然エネルギー学者はいう。これはおかしな考えである。燃料コストがゼロだから限界コストが安いという考えであるが、太陽光・風力は設備投資の資本コストが大きく、電力系統に受け入

れる時には資本コストと運転(燃料)コストを合わせた形でキロワット時の価格が考えられるべきである。FITによって資本コストが自動的に回収できていることを無視して、限界コストが安いというのは詭弁である。

- ・「太陽光・風力を増やして行けば、ガス火力のバックアップを得てベースロード電源の役割を果たすことができ、既存のベースロード電源の役割は徐々になくなる」という主張もされている。これもおかしい。既存の原子力や石炭火力は「資本コスト+燃料コスト」が安いので年間を通して稼働させているわけで、太陽光発電設備+ガス火力設備の二重投資が優れているはずがない。ガスの値段が上がったら目も当てられないであろう。
- ・国際エネルギー機関(IEA)レポート「世界エネルギー見通し2016」の太陽光・風力特集では、コンピューター・シミュレーションによる2°Cシナリオにおいて、欧州や日本の2040年電源構成において過大な太陽光・風力発電設備が想定されており、全体で平均電力需要(kW)の3.4倍の発電設備量(kW)を持つ姿になっている。太陽光・風力を中心に置き、周りの電源がこれを助ける天動説は、コンピューター上では可能なのであろうが、実業の世界では需要の3.4倍の生産設備を持つような業界はそのままでは生き残って行けない。設備の淘汰が必然的になるが、淘汰の最初の候補は、需要に基づく発電指令に応じることができない太陽光・風力となろう。
- ・同じIEAシナリオで、IEAは2040年になってもFITやFIP(フィード・イン・プレミアム)などによる巨額の制度的援助を自然エネルギーに対して行う前提を設けている。そうでなければ太陽光・風力などが順調に伸びないという考えであろうが、これはおかしい。揺籃期にある技術を伸ばすために行うのがFIT制度の目的であったはずだが、いつの間にかFITそのものが目的化している。自由市場と全く相容れない制度であり、消費者の負担を考えると実現してはいけないうのがIEAの2°Cシナリオであろう。

このように欧州先行国の自然エネルギー天動説に唯々諾々と従う必要はない。我が国は冷静な科学的、経済的判断のもとに国情に適したエネルギー政策を打ち立てるべきであろう。これが今回の問題提起である。

(2017年10月20日記)



## いま改めて湯浅年子を語る



千野 境子 (ちの・けいこ)

産経新聞客員論説委員

早稲田大学卒。1967年産経新聞社に入り、マニラ特派員、ニューヨーク支局長、外信部長、シンガポール支局長、論説委員長などを経て現職。東南アジア報道で98年、ボーン・上田国際記者賞を受賞。著書に『日本はASEANとどう付き合うか』（草思社）など多数。

日本で最初の国際的女性物理学者と言われる湯浅年子(1909~1980)の名前を知ったのは、まだ駆け出し記者時代に手に取った著書『パリ随想』を通してだった。日本にもこんな女性がいるのだと羨望にも近い気持ちを抱いたが、その後記憶から消え去ったのは、理系苦手の私にはやはり縁遠い存在だったのかもしれない。

その湯浅年子がいま、思わぬ形で私たちの前に姿を見せてくれた。パリ郊外にある OECD/NEA が刊行する機関紙 NEA News によると、新しいオフィスの会議室の名称に、彼女をはじめとして原子力の分野で卓越する活躍をした女性科学者7人の名前が採用されたのだ。

残る6部屋はカナダ初の女性物理学者ハリエット・ブルックス(1876~1933)、ノルウェーの放射化学研究のパイオニア、エレン・グレディシュ(1879~1968)、核分裂を発見したオーストリアのリーゼ・マイトナー(1878~1968)、アメリカの物理学者で核医学の創始者の1人、エディス・キムビー(1891~1982)、アメリカで成果を上げた中国出身の物理学者ウー・チェン・シュン(呉健雄, 1912~1997)、そして米マンハッタン計画に参加したが戦後、核爆弾に異を唱えたキャサリン・ウエイ(1902~1995)の名前である。

Toshiko Yuasa の部屋は広さ 15 平方メートルほど。テーブルに椅子が6脚、TV 会議用のモニター、PC などが備えられ、壁には研究機器の傍らに立つ白衣姿の湯浅年子の写真と略歴や業績を記したパネル。そこには専門の科学だけでなく、多くの著作やエッセイを遺し、フランスの科学や文化を日本に紹介したことなども丁寧に言及され、部屋に一步入れば、誰もが年子の眼差しを意識するに違いない。

他の6部屋も彼女たちの業績、人生が感じられることだろう。今も少数派と言ってよい女性科学者と卵たちへの励まし、男性研究者に伍する業績を上げながら脚光を浴びること少なかった女性研究者への顕彰…素晴らしい取り組みだ。しかも世界で僅か7人の中に日本女性が入ったことは嬉しいし、少し誇らしくもある。

湯浅年子の横顔を改めて紹介しよう。エンジニアの父と歌人の系譜をひく母の間に東京上野で生まれ、ノーベ

ル物理学賞を受賞した理論物理学者、湯川秀樹(1907~1981)と同世代だ。弟(後に東京大学で原子工学の教授)とともに早くから理系に目覚め、進学した東京女子高等師範学校(現お茶の水女子大)では恩師で女性初の理学博士、保井コノに生涯にわたって薫陶を受けた。

その後東京文理科大学(現筑波大学)物理学科へ女子学生第1号で入学、卒業後も大学に残り研究を続けたが、研究の行き詰まりや人生の悩みにも直面したようである。しかし悩みの時は飛躍の時でもあった。大学の図書室で読んだイレヌ・キュリーと夫フレデリック・ジョリオ・キュリーの論文に深い感銘を受けた年子は、夫妻の下で研究したいと一念発起、研究の傍らフランス語を学び、仏留学を実現させたのだった。

振り返って、留学、ジョリオ・キュリー夫妻との出会い、そしてコレジュ・ド・フランス原子核化学研究所でジョリオ教授に師事しての研究生生活こそ、彼女を大成させた。イレヌはノーベル賞を受けたマリー・キュリー夫妻の長女で、ジョリオとイレヌも人工放射能の発見でノーベル賞を受賞し、親子2代続けてカップルでの受賞はノーベル賞 116 年の歴史でも彼らしかいない。しかも夫妻は人間的にも素晴らしい人たちだった。

年子は日本にいても物理学者として成功を収めただろうが、才能がフランスで一層開花したのは間違いない。留学した年子は水を得た魚のようだった。

《パリに来て、日本にいた頃よりも物質生活の無意味さ、価値なきことを悟った。研究するものは王者に等しい。ここではどんなに偉大な科学者も、貴重な文献も、道を知ろうとして来る人のためにはつねに開放されていた》<sup>1)</sup>と意気軒高、高揚感が漲っている。

大戦勃発にも渡仏を諦めなかった決意の固さや背中を押した父の存在とともに、研究者には師や同僚、そして施設など研究環境がいかに大切かを痛感させられる。

私は先に湯浅年子は思わぬ形で姿を現したと書いたが、それは日本から見た場合であって、フランスで研究に邁進し業績を確立した彼女は、選ばれるべくして選ばれたのだ。日本で必ずしも知名度が高いとは言えないのも、フランスで活躍したことの裏返しである。近代日本

の知識人に共通する悩みとも言える国際的であることと母国との距離や落差の問題は、年子も例外ではなかった。これについては改めて後述したい。

第2次世界大戦下の1943年6月、年子は「人工放射性元素から放出されたベータ線連続スペクトルの研究」で国家理学博士となった。ナチス・ドイツ占領下、「爆弾の下に死ぬとも悔いませぬ」とジョリオ夫妻を説き伏せ研究を続けた賜物だった。この頃、ドイツはすでに劣勢となり、母国日本も同様だった。緒戦こそ次々と勝利を取めたが、同年2月のガダルカナル島の敗退を境に、戦況は坂道を転がり落ちるように悪化して行った。

年子は避難先のベルリンでも研究を続けた。毎日、廃墟と化したような研究所に通い、ベータ線崩壊の理論の研究や測定用機器の作成に取り組み、世界初の二重焦点型ベータ線分光器も作り上げている。

そんな年子にとって、終戦直前の45年6月に帰国し翌月には母を失う失意の中でも、終戦による研究再開の可能性は明日への希望だった。もともと年子は戦争に反対だった。ベルリンでドイツの無条件降伏を目にした年子が、母国武官らに向けた批判の筆は実に厳しい。

《私は、日本をこの窮地に陥れたものは、まさに怠惰にして、情勢を研究し、将来を見通し得なかった在外諸官吏の罪であると思う。日本においてはアメリカ、ソ連の実力は実感をもって把握できない。それがもし、外国にあって心を虚しくして凝視するとき、そのあまりに無謀なること、及びそれがいかに日本の民をいたずらに死なしめることになるかが分かるのである。それを何故外交官、陸海軍武官は日本へ向け実例をもって示さなかったのか?》。彼らこそ国賊とも年子は書いた<sup>2)</sup>。

年子は原爆投下についても「ヒロシマは無用だった」と後年、仏紙に語るなど批判している。戦後、母校・東京女高師での物理の最初の授業は「ウラン235の原爆の構造」、つまり広島、長崎型原爆を取り上げた。科学者の役割は結果がどうあれ真実を発見することにあると、年子は生徒たちに事実を知らしめたのだ。

一方で学問を離れると生徒たちに優しく、親身に相談にも乗った。部屋のパネルにも「若い女性たちが科学のキャリアをものにしよう教え、励ました」とある。

とはいえ研究こそ、年子のもっともやりたいことであり、本領だった。占領下で専門の原子力の研究が適わず、悩む年子に手を差し伸べたのは、ここでもジョリオ・キュリー夫妻だった。「研究を再開しましょう」とのジョリオ教授からの電報に年子は49年2月、勇躍パリに戻った。初めは出張抜いで、次いで休職、休職期間も過ぎて帰国可否かを迫られると母校を退職、57年に仏国立中央科学研究所(CNRS)の研究員となった。

研究に専念できる喜びの半面、年子に日本への心残りがなかったわけではない。母校も年子の力を求めている。

た。揺れる気持ちは尊敬する恩師、保井との書簡に伺える。

それはつまるところ《私には今の日本の雰囲気の中へ帰って、自分も損なわず人も損なわず研究がして行けるという見込みがどうしてもたてられないので、これはお茶の水大の物理教室だけを指すのではなく、日本全体の物理研究者の人達の気分、どうしても私には同和出来ないものが感じられるのでございます》<sup>2)</sup>という文言に凝縮されていると見てよいのではないか。

そして大学の現状、物理教室の実態、研究の在り方、人間関係、さらに女性科学者の置かれた立場などを考えた時、年子は保井の配慮を多としながらも「今は帰れない」と結論づけたのである。

半世紀以上が経った今日、年子が直面したこれらの悩みや課題は、果たして過去になっているであろうか。

一般に日本では海外生活が長くなると、母国が遠くなると考えられがちだ。確かにそれもあるが、それだけではないし、むしろ逆の場合も少なくない。実際の日本より美化したり、自分の知る、時がそこで止まった日本であったりもする。さらにどんなにグローバル化が進んでも、東は東、西は西である。こうした意識は他国と比べ日本人により強いようであり、そこに前段にも述べた近代日本の知識人たちの悩みも生まれる。

年子も『パリ随想』でフランスに長く暮らしながら本当には同化できない、“異邦人”であることの落莫さを吐露している。しかしただ慨嘆するのではなく年子は日本人の非同化性を徹底的に掘り下げた。日本への苦言も散見されるが、それもまた愛する母国を案ずるゆえだっただろう。そんな年子の想いの一端を引用し結びとしたい。

《フランス人も日本人も感受性が鋭いという共通点があるが、日本人はそこから狂信的になる傾向があるのに対して、フランス人には理性のブレーキが危いところでこれをとめる傾向がある。この理性は、フランス人本来のものであると同時に、他国に囲まれ、革命を経て来た国民たちのたえず油断のない自己練磨によってかち得ているものなので、フランスといえども僅かでも油断をすればたちまち抑えがきかなくなる体のものである。これはそのまま個人についてもいえることであろう。現代はまことに油断のゆるされない時代なので、少しの油断はすぐ国家でも個人でも破滅に導くであろう》<sup>3)</sup>

(2017年11月28日記)

#### — 引用・参考文献 —

- 1) 『パリに生きた科学者 湯浅年子』(岩波書店)。
- 2) 『湯浅年子の肖像』(梧桐書院)。
- 3) 『パリ随想 湯浅年子』(みすず書房)。
- 4) 『拓く—日本の女性科学者の軌跡—』(ドメス出版)。

## 嵐の中の軍艦島

作家 川口マーン 恵美

10月、長崎の軍艦島に行った。強風の中、甲板の手すりにつかまりながら島を眺める。本当に軍艦が浮かんでいるようだ。軍艦島は1974年より無人島。2009年、「明治日本の産業革命遺産」として世界遺産の候補になった。重なるように立ち並ぶ廃墟が目の前に迫る。しかし、波が高くて上陸できない…。

明治維新の後、日本は近代化に突入した。殖産興業の基盤は石炭と鉄。長崎の近海には良質な石炭が眠っていた。そこで1890年、採掘の拠点として軍艦島の華々しい発展が始まる。ちっぽけな岩礁に過ぎなかった島はどんどん拡張され、強靱な防波堤に囲まれた海の砦となった。八幡製鉄所の鉄鋼は軍艦島の石炭で作られた。

こうして瞬く間に近代化を果たした日本は、日清、日露、第一次世界大戦を勝ち抜き、1941年、石油の8割を依存していた米国との戦争を始めた。奇しくも軍艦島の石炭の生産高が最高潮に達した年だ。しかし、石炭では飛行機は飛ばせない。日本の敗戦はすでに決まっていた。

戦後、軍艦島の石炭は、もう一度日本の復興を力強く支えた。最重要課題は電力の安定供給。それを肝に命じていた日本政府は、次第に石炭から石油、そして原子力へとエネルギーの転換を図った。日本は豊かになった。

なのに今、私たちはそれらの教訓を忘れてしまったようだ。エネルギーの外国依存は戦前よりさらに高いが、警鐘を鳴らす政治家もいない。私たちは、他国民の善意と良識を信じて暮らしていけばよいらしい。かつて日本を支えた軍艦島と、そこで頑張った人たちの生き生きした写真を見ながら、何だか悲しくなった。今、日本占領に武器は要らない。荒波は怒っていたのだろうか？

## Column

### 「良い加減」の安全対策とは

国際環境経済研究所 竹内 純子

エアバッグは自動車の利用に伴うリスクを低減する設備だ。もちろん万能ではなく、シートベルトと併用しなければかえって危険な場合もある。昨年4月には路上の落石に衝突した衝撃でエアバッグが開いて運転手は前方が見えなくなり、車が崖から転落するという痛ましい事故も起きた。エアバッグがなければ失われずに済んだ命と言えるだろう。しかし現状ではエアバッグが救う命の方が多いと判断されるので、社会はエアバッグを求めるのである。では今後、自動運転技術などが発達し、自動車の衝突事故が減ることが確実になっても、エアバッグは装備すべきなのだろうか？エアバッグによって低減されるリスクと、装備に必要なコストあるいは設備があることでかえって増えるリスクがないか、リスク評価に知恵を絞ることが必要になるだろう。

私たち消費者は、安全対策は「足し算」であり、足せば足すほど安全性は高まると理解しがちである。コストという課題はあるが、「とりあえず」「念のため」「海外では」で足し算は正当化されやすい。対して引き算は、コストダウンのための「方便」なのか、専門の見地からの最適な対策の「選択」なのか消費者には判断がつかない。しかし無限の足し算の先にあるのは、究極の安全ではなく、むしろ、安全を求めすぎたが故の滑稽とでもいうべき状態かもしれない。

いい加減は簡単だが、良い加減は難しい。手抜きの引き算を許さず、過度な足し算も無い、「良い加減」の安全対策を実現するには、まず社会全体で「良い加減」の領域を定めるための議論が必要となろう。その議論を喚起し、適切なコミュニケーションをリードすることが関係者には求められる。



## 政府、2018年度予算案を決定

政府は2017年12月22日の閣議で、来年度当初予算案を決定した。

エネルギー関連では燃料安定供給やエネルギー需給高度化をめざすエネルギー需給勘定が7,536億円(前年度当初予算比209億円減)、電源立地や原子力安全規制対策を行う電源開発促進勘定が3,390億円(同64億円減)。このうち電源立地の促進を図る地域対策交付金は822億円(同1億円減)、原子力発電施設等立地地域基盤整備支援事業は56億円(同10億円増)が計上された。「もんじゅ」廃止措置は179億円で前年と同額で、仏との

ASTRID 協力をめざす高速炉の国際協力に関する技術開発委託費は51億円(同1億円減)となっている。原子力損害賠償・廃炉等支援機構交付金は470億円と横ばい。

また、帰還困難区域の入域管理・被ばく管理は56億円(同4億円減)、福島イノベーション・コースト構想推進施設整備等補助金は122億円(同27億円増)、福島で再生可能エネルギーの導入促進をめざす支援補助金は75億円(同50億円増)となった。

(原子力学会誌編集委員会)

## 広島高裁、伊方3号機の運転を差し止める仮処分を決定

広島高裁は2017年12月13日に、四国電力の伊方原子力発電所3号機の運転停止を求める仮処分を決定した。広島地裁では2017年3月に、松山市と広島市に住む住民が求めている同機の運転差し止め申請を却下していたが、高裁では原子力規制委員会が定めている火山ガ

イドに沿えば、同機の立地は不適となると判断して地裁決定を取り消し、運転停止を認めた。

一方、この決定を不服として四国電力は2017年12月21日、仮処分の執行停止と保全異議の申し立てを行った。(同)

## 原子力再稼働で温室効果ガス排出量が減少

環境省は2017年12月12日、2016年度の温室効果ガス排出量(速報値)が2015年度比300万トン(0.2%)減の13億2,200万トン(CO<sub>2</sub>換算)となったことを発表した。前年度からの減少要因には、再生可能エネルギーの導入

拡大や原子力発電所の再稼働などによるエネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量が減少したことなどをあげている。なお、確報値は今年4月に公表予定。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

## 第2回廃炉創造ロボコン、16チームがしのぎを削る

全国の高等専門学校(高専)の学生を対象とした「第2回廃炉創造ロボコン」が2017年12月16日、福島県の日本原子力研究開発機構楡葉遠隔技術開発センターで開催され、参加学生、関係者、報道関係者などを含め約300人が来場した。同ロボコンには全国から25チームの応募があり、書類選考で残った15校16チームが、競技課題のクリアに向けて様々な趣向を凝らしたロボットを披露した。

前年の第1回ロボコン同様、競技は照明がなく暗闇であることを想定しており、遠隔で操作するロボット本体を直視することはできない。またコンクリートの厚い壁があるため電波は届かず、放射線の影響によりカメラや

半導体機器の動作には制限時間が設けられている。こうした厳しい環境下で、階段を上り5kgの荷物を置いて元の場所に戻ることや、フィールド内の不特定の場所に置かれたものが何であるか調べることなどのミッションを選択し、前日に行われたプレゼン内容も含めて審査が行われた。

文部科学大臣賞(最優秀賞)に輝いた奈良高専「奈良廃炉ロボコン友の会」は、前年度の同高専先輩チーム同様にクローラ(キャタピラ式走行装置)機構とエアシリンダー(空気圧エネルギー変換装置)機構を搭載したロボットで勝負に挑んだ。リーダーの安川昂佑氏は「突起の引っ掛かりをきちんと計算し、走行部分に重心を置いて

強度の高いロボットにした」と製作のポイントを語った。チームメイトの竹村元気氏は「今回のロボコンは、福島第一原子力発電所の様子を学ぶ良い機会となった」と参加の意義を語った。

そのほかドローン、ローバー、ベースロボットの3台のロボットを連携させた一関高専「機械技術部 Enter」が福島県知事賞(優秀賞)を、6本の脚を回転させながら生

き物のように力強くロボットを前進させた熊本高専「NITK - K Robocon Team」が高専機構理事長賞(アイデア賞)を、クローラの工夫で階段にスムーズに進入でき滑り落ちにくいロボットを実現した小山高専「小山高専ロボット製作チーム 2017」が原子力機構理事長賞(技術賞)を受賞した。

## 海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

### 【米国】

## NASA、火星での有人探査用電源として小型炉の実験開始

原子炉の核分裂エネルギーを、火星など地球外惑星における探査活動の主要エネルギー源に活用する試みが実験段階に入っている。米航空宇宙局(NASA)は2017年11月14日、最大出力10kWという小型炉を使って、火星の居住環境にエネルギー供給するとともに、火星の資源を酸素や水、燃料などに変換する機器の動力とすることが可能か、今年初頭まで米エネルギー省(DOE)のネバダ核実験場で実験評価することになったと発表した。

従来のエネルギー源とは異なり、原子炉技術は太陽光が得られる条件や位置とは無関係に、火星のような極端に厳しい環境下でも10年以上稼働可能な、エネルギー密度の高い電源となる可能性があるとしてNASAは明言。火星での有人ミッションを含め、同技術が多様なミッションに必要な電力を安定的に供給できることを実証し、真に意欲的で活力に満ちた宇宙探査に向けた新しいパラダイム創出の第一歩にしたいと強調している。

この実験プログラムは「Kilopower プロジェクト」と呼称される計画の一部で、NASAの宇宙技術ミッション本部(STMD)が複数年分の予算を充当。航空用エンジンの研究所として知られるグレン研究センターが機器類の設計から製造まで、同プロジェクトの全段階を管理しており、DOE/国家核安全保障局(NNSA)のインフラ設備や専門的知見、ロスアラモス国立研究所に所属するエンジニアの能力などを最大限、活用している。

NASAは過去50年以上にわたる様々な宇宙開発ミッションにおいて、放射性同位元素熱発電機(RTG)を電源として使用してきた。火星では2機の「バイキング」探査機や探査ローバーの「キュリオシティ」に搭載したほか、アポロ月面探査機や「ボイジャー」無人宇宙探査機でも利用。放射性同位体の崩壊熱を利用して発電する仕組

みだが、200~300ワット程度の電力しか得られないため、NASAではRTGを超える発電オプションの適用可能性を探っていた。

同プロジェクトで使用する小型炉は、地球外惑星の地表や宇宙で、太陽光に依存せずに電力供給を長期間続けることが前提であるため、NASAは開発アプローチにおいて小さくてシンプルなるものを想定した。試作品の発電システムに使用する炉心の大きさはペーパー・タオルのロールほどで、ウラン235を燃料とする頑丈な鋳造炉心。発生した熱は、高効率のスターリング・エンジンで電力に転換する。太陽光が減少する砂嵐の中でも、昼夜を問わず長時間発電できることから、火星のどの地点においてもコンスタントに電力供給するという課題が解決できるとNASAは強調。氷が存在するかもしれない北部の高緯度地域にも探査地点を拡大できるため、核分裂エネルギーを使った電源は、火星探査において画期的存在になり得るとしている。

## エネ省、先進的原子力技術の開発に3千万ドルを投資

エネルギー省(DOE)のR.ペリー長官は2017年12月7日、先進的な原子力技術の開発支援金として3,000万ドルを投資すると発表した。

産業界の主導で進められている革新的な原子炉設計および関連技術の中でも、原子力発電の将来的な経済見通し全体を改善する可能性のあるものについて、官民が費用分担で連携するプロジェクトの募集提案を同日に発出。国内原子力産業の競争力強化と技術革新の促進支援を目的に、2017年10月から始まった2018会計年度の連邦予算から議会の承認状況に応じて3,000万~6,000万ドルを拠出し、新型原子炉設計の初号機の実証準備プロジェクトや新型原子炉の開発プロジェクトを進めるとしている。支援希望者の申請は年間を通じて受け付ける計画で、DOEの投資総額は5年計画で約4億ドルに達す

る見通し。支援対象プロジェクトは四半期毎に選定する予定で、2018年1月9日に詳細に関するオンライン・セミナーを開催した後、同月末に初回の申請受付を締め切るとしている。

### 【英国】

## 政府、SMR など次世代原子力技術開発を包括的に支援

英ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)は2017年12月7日、小型モジュール炉(SMR)など次世代の新型原子炉プログラム開発で英国が世界のリーダー的地位を獲得するため、原子力産業界に対する包括的な支援方策を公表した。

今後3年間に革新的な新型モジュール式原子炉(AMR)の研究開発や実行可能性調査、有望設計の開発促進などで最大5,600万ポンド(約85億4,382万円)を拠出するほか、最大8,600万ポンド(約131億3,489万円)を充当して、オックスフォード近郊のカラム研究所における核融合研究を加速。また、2016年に開始した「原子力技術革新プログラム」を次の段階に進め、最大800万ポンド(約12億2,185万円)の予算で原子力安全・セキュリティの手法を向上させるとともに、新型核燃料の開発等を促進するとしている。

今回の支援方策は、BEISが2017年11月末に英国経済を発展させる長期ビジョンとして設定した「産業戦略白書」に続く措置。同白書の中で原子力は、英国全体の成長を促すとともに、生産性を向上させる不可欠の部門とされており、BEISのR.ハリントン・エネルギー担当相は、「将来にわたって低炭素な電力を供給できる原子力は、英国のエネルギー・ミックスにおける重要な一部分だ」と指摘。そのため、新たな支援方策によって原子力分野の技術革新を促進し、将来計画を一層明確なものにしたいと述べた。

BEISのG.クラーク大臣も、英国の民生用原子力部門が2016年のGDPに対して64億ポンド(約9,774億円)の貢献を果たしたとする最新の民間調査結果に言及。今回の発表は、産業界が主導する技術革新の重要性を認めた上で、同部門が国内のみならず、世界的にも高いレベルの競争力を持ち続けられるよう、政府が下支えしていくことを意図したものだとして説明した。

また、同白書で政府は、技術革新が進みつつある複数の産業部門と、戦略的かつ長期のパートナーシップとなる「部門別協定」を締結していくと明言。原子力部門に関しては、政府と原子力産業界の協議の場として昨年2月に再編成された原子力産業協議会(NIC)が同年12月7日、産業界としての「部門別協定案」を提示したことを明

らかにしている。

### 【トルコ】

## アックユ原子力発電所建設計画、部分的建設許可に基づき着工

トルコ初の原子力発電設備としてアックユ発電所(120万kW級のロシア型PWR×4基)の建設を請け負ったロシアの原子力総合企業ロスアトム社は2017年12月10日、地中海沿岸メルシン地区の建設サイトで部分的建設許可(LCP)に基づく建設工事を開始したと発表した。

昨年10月に発給されたLCPの下では、原子炉系統の安全性に関わる箇所を除くすべての部分で、建設工事と組立作業が可能。ロスアトム社傘下のプロジェクト企業であるアックユ原子力発電会社(ANPP)は、12月2日までに初号機の原子炉建屋部分で、基礎の地盤を整えるなどの準備作業が完了したことを明らかにした。全面的な建設許可については、2018年3月にトルコ原子力庁(TAEK)から取得し、それに基づき原子炉建屋で最初のコンクリート打設を行う計画。それをもって、同発電所は正式に本格着工したことになることを説明している。

### 【エジプト】

## 初の原子力発電所建設でロシアとの契約に調印

エジプトの原子力導入計画に協力しているロシアの原子力総合企業ロスアトム社は2017年12月11日、エジプト北部のエル・ダバで4基の120万kW級ロシア型PWR(VVER)を建設するための契約書に両国政府が調印したと発表した。建設工事の開始に必要な一連の契約書のうち、最終文書となる「通知条項」への署名を、エジプト電力・再生可能エネルギー省のM.シャーキル大臣とロスアトム社のA.リハチョフ総裁が終えたもので、建設計画は2026年の初号機起動に向けて大きく動き出した。

通知条項への署名は、ロシアのV.プーチン大統領がカイロで同国のA. F. シシ大統領と会談したのに合わせ、両大統領立ち会いの下で行われた。現地報道によると、署名式典の様子はエジプト国営テレビが生放送で国民に伝えたという。

両国が締結した複数契約の内容についてロスアトム社は、原子炉4基の建設に加えて、発電所が稼働する全期間を通じて同社が原子燃料を供給する予定だと説明。これにより、エジプトでは60年にわたって競争力のある電力価格の維持が可能になるとした。同社はまた、エジプト側の人材育成も実施する方針で、同発電所の運転開

始後 10 年間は運転・保守に関する支援を提供。ロシアとエジプトの両国内で発電所従業員の訓練が行われるほか、今後数年間に数百名のエジプト学生がロシアで原子力関係の学科を学ぶことになる。さらに、もう一つの契約の一部として、ロシアは使用済燃料の専用貯蔵施設をエジプト国内で建設する計画。併せて貯蔵用コンテナも供給する考えを明らかにしている。

同社はこのほか、同建設計画ではロシア企業が数多くの契約を受注予定であるものの、エジプトにおける原子力インフラ開発と国産化率の拡大にも協力する方針であることを強調した。同建設計画はエジプト産業界が一層発展する要因となり、実際に数十社が同計画に関わることになるとロシア側は予測。初号機の建設における国産化率は少なくとも 20% で、後続の原子炉についてはさらに上昇するとの見方を示している。

エジプト政府は 2015 年 11 月、同建設計画に関する 2 国間協力協定(IGA)をロシアと締結しており、2016 年 5 月には、ロシア政府から最大 250 億ドルの融資を年 3% の低金利で受ける内容の大統領令を公布した。これにより、建設工事と関連サービスおよび機器の輸送など、同計画に必要な資金の 85% をカバーする。残りの 15% をエジプト側が調達する予定だが、エジプト政府は約 35 年間で受けた融資を完済する計画。これには民間からの投資や、完成した原子炉からの売電収入を充てると見られている。

なお、ロシアでは 2017 年 12 月 8 日、同建設計画のレファレンス・プラントとなるレニングラード原子力発電所 II 期工事 1 号機(PWR, 117 万 kW)で、最初の臨界条件達成に向けたプロセスが開始された。同炉では近代的な第 3 世代+の設計を採用しており、ロシア側は福島第一原子力発電所事故後に国際原子力機関(IAEA)が示した要件をすべて満たすと強調している。

### 【サウジアラビア】

## 大型炉建設計画で WH 社含む原子力企業 5 社と協議

サウジアラビアで原子力発電設備の導入計画を担当する「アブドラ国王原子力・再生可能エネルギー都市公団(K. A. CARE)」はこのほど、大型原子炉 2 基の建設計画で入札を実施するのに先立ち、米国など原子力開発利用先進国の大手原子力企業 5 社と、情報提供依頼書(RFI)に関する協議を実施したことを明らかにした。RFI は、入札条件等の決定に必要な情報を候補企業から集めるためのもので、契約にともなうリスクを最小限に抑えつつ、サウジ側の要件等を発電所の標準設計に反映させることを目的としている。

米エネルギー省(DOE)の発表では、R. ペリー長官が 2017 年 12 月 4 日に同国の首都リヤドを訪問し、クリーン化石燃料や CO<sub>2</sub>管理などエネルギー分野の協力強化に向けた覚書を H. アル・ファリハ・エネルギー産業鉱物資源相と締結。原子力分野の協力については何も触れていないが、ロイター通信によると、アル・ファリハ大臣は「K. A. CARE と米国企業との間で、商業的および技術的な協議がまとまることを希望する」と明言。規制面と政策面の課題について米国サイドと交渉中であるものの、米国企業による入札への参加を促した模様で、2018 年中に発注先が決定する見通しであることを伝えている。

同国では原油資源を温存しつつ国内の電力需要に対処するため、2040 年までに 1,200 万~1,800 万 kW の原子力発電設備開発を計画。昨年 7 月に内閣は出力 120 万~160 万 kW の大型炉 2 基に加えて、小型炉の建設も視野に入れた「国家原子力プロジェクト」の起ち上げを承認した。

K. A. CARE は昨年 10 月、大型炉建設計画の RFI を候補企業 5 社に発出したのに続き、11 月 14 日から 20 日までの期間、ロシアの原子力総合企業ロスアトム社傘下の国際展開促進・マーケティング会社「ルスアトム・オーバーシーズ社」、韓国電力公社(KEPCO)、中国核工業集团公司(CNNC)、東芝傘下で米国籍のウェスチングハウス(WH)社、フランス電力(EDF)のそれぞれと協議。サウジアラビアの国家原子力プロジェクトと RFI の詳細を明示するとともに、公共調達手法の 1 つである「競争的対話方式(CD)」プロセスの手順と目的について説明した。また、各社が抱えている懸念や質問に答える一方で、各社の原子力技術や発電所建設の最新例、蓄積してきた経験等に関する理解を深めたとしている。

サウジアラビア政府は大型炉をベースロード用電源として使用するほか、一体型小型炉を複数、建設して脱塩や遠隔地域での発電に利用することを計画。このため K. A. CARE は 2015 年 3 月、韓国原子力研究所(KAERI)製のモジュール式小型炉「SMART」を 2 基以上、建設する可能性を探るため、了解覚書を締結している。また、昨年 10 月には、小型炉や中型炉の開発を含めた重要分野でロシアとの協力を加速するため、ルスアトム・オーバーシーズ社との協力プログラムに調印している。

### 【ヨルダン】

## 米 X-エナジー社製・小型高温ガス炉の建設可能性を検討

米メリーランド州を本拠地とする革新的原子炉設計の

開発企業、X-エナジー社は2017年11月28日、同社が開発している小型のペブルベッド型高温ガス炉「Xe-100」(熱出力20万kW、電力出力7.6万kW)をヨルダン国内で建設する可能性を検討するため、ヨルダン原子力委員会(JAEC)が同社との了解覚書に調印したと発表した。

ヨルダンは、2基の100万kW級ロシア型PWR(VVER)を首都アンマンの東70kmのアムラで建設するため、2015年3月にロシアと政府間包括協定(IGA)を結ぶ一方、海水脱塩や地域熱供給にも利用可能な小型モジュール炉(SMR)の導入も積極的に推進中。2016年12月に運転員の教育訓練用を兼ねる多目的の韓国製「ヨルダン研究訓練炉(JRTR)(熱出力0.5万kW)」が、同国初の原子力発電設備としてヨルダン科学技術大学で完成したほか、2017年11月上旬には、英ロールス・ロイス社製SMRを建設する技術的実行可能性調査(FS)の実施に向け、JAECが同社と了解覚書を締結している。

### 【バングラデシュ】

## ロシア製の導入初号機が本格着工

バングラデシュが長年の悲願としていた原子力発電所導入の初号機が、2017年11月30日に首都ダッカの北西160km、パプナ県のルプールで本格着工した。建設工事を請け負ったロシアの原子力総合企業ロスアトム社が同日、明らかにした。バングラデシュ規制当局による建設許可発給にともない、同社傘下の建設企業アトムストロイエクスポルト(ASE)社はルプール原子力発電所1号機の原子炉建屋部分に最初のコンクリートを打設。120万kWのロシア型PWR(VVER)となる同炉、および同型設計で建設予定の2号機はそれぞれ、2023年と2024年に完成する見通しだ。

電力不足に悩むバングラデシュでは、パキスタンから独立する以前の1960年代に、早くもルプールで原子力発電所の建設プロジェクト(RNPP)が立ち上がった。しかし、独立戦争や資金調達失敗等により同プロジェクトをはじめ、何度か浮上した建設計画はことごとく頓挫している。2003年に同国の原子力委員会は国際原子力機関(IAEA)の勧告により、RNPPのサイト安全性報告書を改定し、入札書類の準備に着手。建設費をBOO(建設・運転・所有)/BOT(建設・運転・移転)方式で手当てする計画を立てていた。

ロシアは2009年に同国に原子力発電所の建設協力を提案しており、2010年に両国政府は原子力の平和利用に関する2国間協力協定を締結した。2011年11月にASE社が建設計画の主契約者に選定され、2013年1月に両国政府は環境影響調査等の準備作業にロシアから5

億ドルを融資することで政府間協定を締結。ASE社は2015年12月、ルプールに第3世代プラスの120万kW級VVER「AES-2006」を2基建設するターンキー・ベースの一括請負契約をバングラデシュ原子力委員会と締結した。

2基分の総工費は126億5,000万ドルと伝えられており、バングラデシュ内閣は2016年6月、このうち113億8,000万ドルをロシア政府から信用取引の形で受け取るための政府間協定案を承認した模様。ロスアトム社も同年7月25日、翌週の同協定への調印に先立ち、バングラデシュの財務大臣や科学技術大臣を含む代表団が訪日したことを明らかにしていた。

### 【フィリピン】

## 原子力開発プログラムの復活に向けロシアと協力覚書

約30年前に原子力導入初号機の運転開始を見送ったフィリピンのエネルギー省(DOE)は2017年11月15日、小型モジュール炉(SMR)建設に関する実行可能性調査も含め、安全・確実な原子力開発プログラムにつながる国家政策の策定に向け、ロシア国営の原子力総合企業ロスアトム社と協力覚書を締結したと発表した。

アジアの中でも比較的早く原子力の導入を決めた同国では、1976年に米国企業との協力により、同国初の原子力発電所(60万kW級PWR)がバターン半島で着工。1985年に90%まで完成したものの、チェルノブイリ事故の発生を受けて、当時のアキノ政権はその安全性と経済性を疑問視し、運転認可を発給しなかった。その後の政権は、国産エネルギー開発や輸入エネルギーで国内の急速なエネルギー需要増が賄えなくなった場合に備え、1995年にDOE長官を委員長とする原子力発電運営委員会を設置。2000年代に入ってから、韓国企業がバターン原子力発電所の修復・再開について事業化の予備調査を実施したが、福島第一原子力発電所事故の影響もあり、原子力開発プログラムの復活には至っていない。

今回の覚書は、東南アジア諸国連合(ASEAN)関連の首脳会議がマニラで開催されたのに併せ、13日にDOE長官とロスアトム社の副総裁が調印。フィリピンのR. ドゥテルテ大統領とロシアのD. メドベージェフ首相が立ち会った。ロシアとの協力を通じて、フィリピン政府は国家政策の範囲内で原子力エネルギーの様々な利用方法を模索していくが、「発電」は特に重要視しているとDOEは指摘。覚書に基づいて、ロシアがこれまでに蓄積してきた原子力関連の膨大な経験や、平和利用関連の安全・確実な新技術が活用可能になるとした。

## 【オーストラリア】

### 企業が2030年以降のSMR導入を 政府委に提案

世界最大のウラン埋蔵量にも関わらず商業用原子力発電所の建設が禁止されているオーストラリア(豪州)では近年、この禁止条項の撤廃を求める動きが頻繁に見受けられている。豪州唯一の日刊全国紙である「オーストラリアン」は2017年11月28日、電力市場改革の調整作業を担当する全豪政府間協議会(COAG)のエネルギー・セキュリティ委員会(ESB)に対し、SMRニュークリア・テクノロジー(SMR-NT)社が提出した小型モジュール炉(SMR)の導入提案を大きく取り上げた。

SMR-NT社は独立の立場の専門家によるコンサルティング企業で、原子力発電技術の中でも特に、SMRの立地と建設・運転の促進に関する助言を専門としている。ESBへの勧告の中で同社は、「信頼性が高く価格も適正な低炭素電力の供給という点で、原子力は世界31か国・地域の発電システムに多大な貢献をしている」と明言。豪州における将来のエネルギーにも、原子力は大きく寄与するとの認識を示した。

また、発電システムを設計・企画する上で画期的存在となったSMRを、豪州のエネルギー供給保証計画の中で考慮に入れないのは無分別なことだと指摘。2030年以降、負荷追従運転が可能な原子力発電を豪州の電源ミックスに含めるなど、ESBは豪州の利益に資する短期的および中・長期的計画を、信頼性や価格、CO<sub>2</sub>の排出抑制などの面で配慮し、策定しなくてはならないと訴えている。

## 【国際】

### ITER機構、2025年のファースト・ プラズマ達成スケジュールを再確認

フランス南部で国際熱核融合実験炉(ITER)を建設中のITER機構は2017年11月16日、引き続き良好な作業の積み重ねにより、一年前の理事会で再設定された「2025年にファースト・プラズマの達成」という目標に向けて、プロジェクトが順調に進展中であることを第21回理事会で確認した。

2017年版の詳細な管理評価報告書や技術実績の指標等をプロジェクトに参加する7か国・地域の代表者とともにレビューした結果、明らかにしたものの。要求度の極めて高い建設工事と機器製造スケジュール、主要装置と支援システムにおける技術要件の厳しさにも関わらず、ファースト・プラズマ達成(運転開始)までに必要な機器・システムの製造は61%、建設工事全体では49%の作業が完了したとしている。

ITER計画では、核融合エネルギーが科学技術的に実行可能であることの実証を目標としており、日本と欧州連合(EU)、ロシア、米国、韓国、中国、インドが参加している。2005年に建設サイトをサン・ポール・レ・デュランス(呼称を「カダラッシュ」から行政住所に変更)に決定した後、2013年10月に本格着工。42ヘクタールの敷地内に、トカマク型実験炉の格納建屋と診断棟、およびトリチウム棟の3建屋等で構成されるトカマク複合施設を建設するため、ベースマット部分へのコンクリート打設が開始された。

同機構は当初、2020年頃のファースト・プラズマ達成を予定していたが、主要機器の一部で製造に遅れが生じたため、2015年3月に機構長に就任したB.ピゴ氏は建設スケジュールとコストの見直しに着手。同年11月の理事会において、ファースト・プラズマの達成を2025年12月とし、機器の組立経費の増額分を約44億ユーロ(約約5,800億円)とする見直し案が提示された。しかし、参加国から承認が得られず、外部の専門家グループが独自にこれらの提案内容をレビュー。その後の議論を経て、2016年11月の第19回理事会で、(1)ファースト・プラズマ達成を2025年12月、本格的な運転開始を2035年12月とすることを最終決定した。また、(2)建設段階のコストを2035年までで約52億ユーロ(約6,850億円)増額すること——については、各国の国内調整が完了前であることを考慮し、暫定的に承認された。

今回の理事会では2016年1月以降、実施予定だった26件の作業がすべて完了するなど、厳しいスケジュールに沿って作業が進展中である点が報告された。また、新しい測定基準を採用したことにより、建設工事や機器の製造、組立・据付の進捗状況を物理的に評価することが可能になり、主要な建屋やシステム、製造中の機器についても個別に進捗率を計算できるとした。

## 新規制基準と運転延長への対応 1

日本原子力学会の原子力発電部会は 2017 年秋の大会で「国内原子力発電所における新規制基準，運転期間延長等への対応」をテーマに企画セッションを開催した。本稿はその内容をもとに，登壇者に改めて執筆をお願いしたものである。

# 福島事故の教訓と新規制基準を踏まえた 柏崎刈羽原子力発電所の安全性向上について

東京電力ホールディングス 川村 慎一

福島事故の主要な教訓として，外的事象に対する防護，共通要因故障防止，設計を超える事態における事故進展防止，放射性物質放出による影響の緩和，設計を超える事態に対応できる緊急時能力の課題をとりあげ，柏崎刈羽原子力発電所を例として安全性向上の取り組みについて論じる。これを含む安全性向上策の柏崎刈羽原子力発電所 6，7 号機への適用については，新規制基準への適合性の観点から審査が進められている。

**KEYWORDS:** *Fukushima Accident, Resilience, Alternate Cooling, Filtered Containment Venting, Incident Command System*

## I. 緒言

福島事故の教訓を踏まえ，東京電力ホールディングスでは原子力発電所の安全性向上の取り組みを進めている。本稿では事故の教訓のうち主要なものとして，①外的事象に対して，発電所の防護手段が不十分だったこと，②共通要因で安全機能が広範囲に喪失したこと，③設計を超える事態において，事故進展を防止する備えが不十分だったこと，④放射性物質の地表沈着により，長期の住民避難や経済活動の停止など，甚大な社会的影響をもたらしたこと，⑤設計の想定を超える事態に，緊急時組織が十分に対応できなかったことをとりあげ，これらを踏まえた柏崎刈羽原子力発電所（以下，柏崎刈羽）の改善状況を述べる。これらの教訓への対応を含む同発電所 6，7 号機の安全性向上策については，新規制基準への適合性審査が進められているところである。

## II. 外的事象に対する発電所の防護

福島事故の直接的な原因は，地震による外部電源の喪失と，津波による重要な安全設備の機能喪失である。このことから，外的事象の影響を再評価して，発電所の防護を強化した。この検討にあたっては，外的事象を網羅的に評価する観点から，IAEA SSG-3<sup>1)</sup>，

*Safety Improvements at Kashiwazaki Kariwa Nuclear Power Station based on the Lessons learned from the Fukushima Accident and New Regulatory Requirements* : Shinichi Kawamura.

(2017 年 10 月 17 日 受理)

NUREG/CR-2300<sup>2)</sup>等から事象を収集し，自然現象として 40 事象，人為事象として 20 事象を取り上げて再評価した。

また，従来から考慮していた地震と津波に対しても，最新の知見を反映して再評価を行い，断層連動の可能性等をより保守的に考慮するなどして，設計基準とする条件を見直した。

## III. 安全機能の共通要因故障防止

福島事故では，津波という共通要因で重要な安全機能が広範囲に失われた。津波対策では設計基準とする条件を見直し，浸水防止の再評価や引き波時に取水を確保する堰の設置を行ったが，津波以外にも火災や内部溢水のように，共通要因故障を引き起こす可能性のある事象が考えられる。

共通要因故障の可能性を低減するためには，多重化された設備間の物理的および電氣的な分離を徹底することや，対策を多様化することが有効である。図 1 に内部溢水への対策例を示す。安全上重要な設備が設置されている区画への浸水を防止するために，水密扉や浸水防止ダンパ等の設置や，壁貫通部の水密処理等が行われている。

火災についても，事故以前の防護策から対策を強化している。難燃ケーブルの使用等によって火災の発生を防止するとともに，複数の異なる原理の感知器を設けて速やかに火災を感知し，消火できるようにしている。また，異なる区分の安全設備の間には延焼を防止する壁等を設け，火災の影響を軽減している。柏崎刈羽では原則

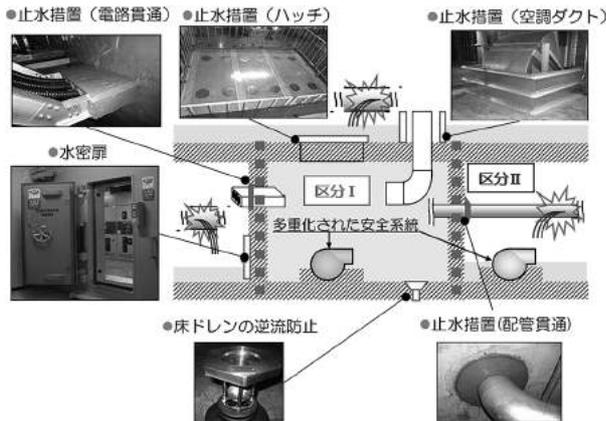


図1 内部溢水対策の例

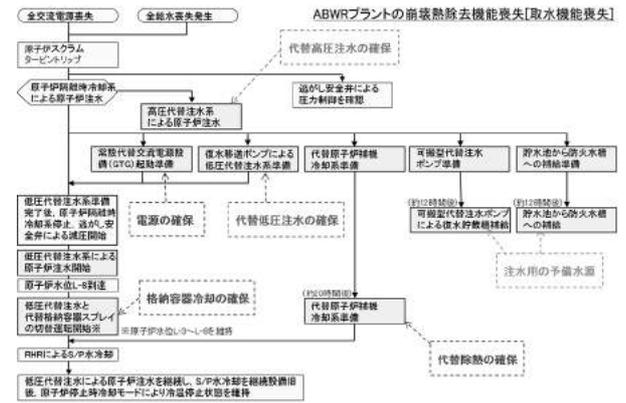


図3 重大事故における対応の検討例

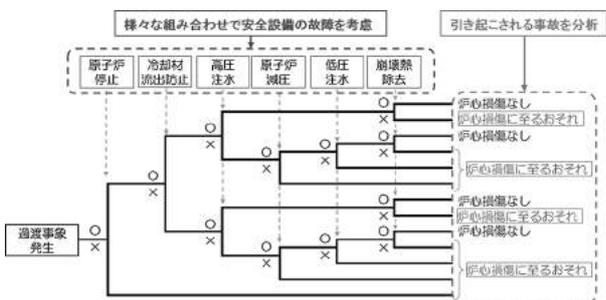


図2 事故シーケンスの検討概念

として、これに3時間の耐火性能を持たせることとした。さらに、壁を貫通する配管等を通じて熱が伝わることで悪影響が生じないように、必要な措置を講じている。

IV. 設計を超える事態における事故進展防止

決定論的アプローチで保守的に設定する設計基準事故時の条件を超える事態を検討するために、確率論的リスク評価の手法を用いて、様々な事故進展の可能性と、その安全上の重要度を検討し、代表的な事故シーケンスを選定した。その検討概念を図2に示す。

そのうえで、設計基準事故に対処する安全設備とは独立で、可能な限り多様な対策を検討し、事故収束における人的活動の成立性(人数、時間、環境条件等)を確認した。図3に重大事故における対応の検討例を示す。事故発生から、時間経過に沿ってどんな認知と判断が可能であるか考え、とるべき対応措置を順次検討する。このようにして、どのような対応が有効か評価される。

こうして検討された事故進展防止の設備の例を、図4に示す。この例では、原子炉が高圧の状態から安定冷却を継続できるまで、設計基準事故に対処する安全設備とは独立の多種、多様な手段を用いて連続的に注水と除熱ができるようになっている。

なお、消火系を用いた原子炉への代替注水は、平成6年3月に設置方針を決定して整備が進められ、新潟県中

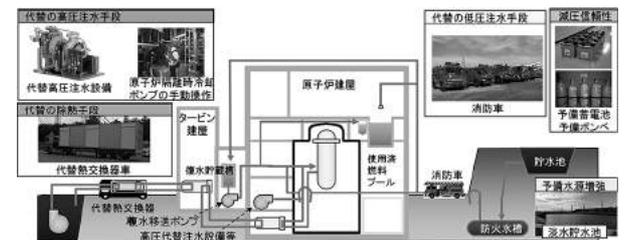


図4 重大事故時の多種、多様な注水、除熱手段例

越沖地震後には消防車を接続できる送水口も各発電所に設けられていた。しかしながら、福島事故ではこの代替注水系統による注水の一部が、原子炉ではなくタービン設備側にバイパスしていたことが事故後に判り、中央制御室から容易にバイパスルートを隔離できるように改善を加えた。

V. 放射性物質放出による影響の緩和

上述の対策によっても炉心損傷が防げない場合には、原子炉格納容器(以下、格納容器)によって周辺環境への影響を緩和しつつ、復旧による安全機能の回復(レジリエンス)につなぐ。

福島事故では2号機から放出された放射性物質が、周辺環境へ最も大きな影響を与えたとされているが<sup>3)</sup>、その原因は格納容器ベントができず、高温蒸気環境下で格納容器上蓋フランジのシール材の復元力特性が劣化することで、格納容器内圧の上昇によるフランジ面の変形にシールが追従できなかったと推定されている<sup>4)</sup>。これを受けて格納容器に用いられているシール材の耐熱、耐蒸気、耐放射線性等を再評価し、改良型 EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer)等の材料を従来のシリコン系材料に代わって導入した。

また、重大事故時に代替手段で格納容器を冷却できるようにする目的で、代替循環冷却系を開発して柏崎刈羽6、7号機に導入した。図5にその概要を示すが、海水と熱交換できるシステムを搭載したトレーラをプラントに接続することで、サプレッションプール水を冷却してか

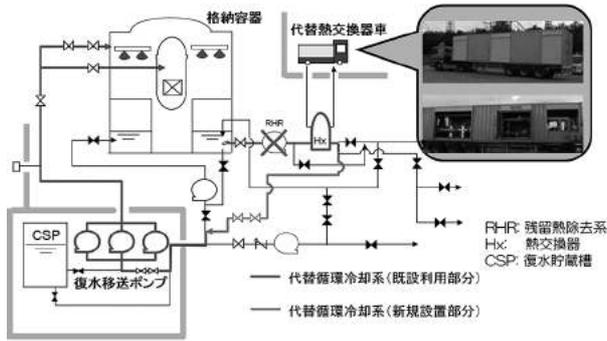


図5 代替循環冷却系の系統構成

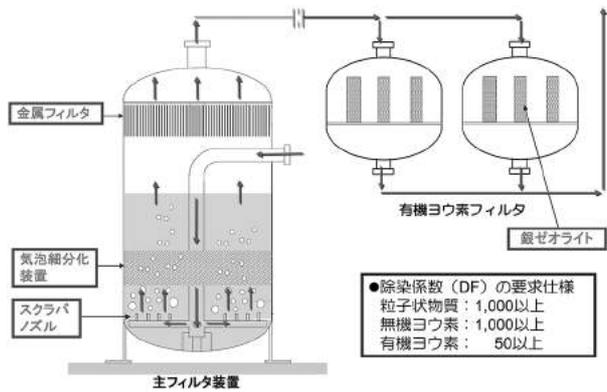


図6 フィルタベント設備の構成

ら、代替注水ポンプ(復水移送ポンプ)で格納容器内にスプレイすることができる。これによって、重大事故時に格納容器の温度、圧力の上昇を抑制することが可能である。

仮に代替循環冷却系が使えない場合には、格納容器のフィルタベントを行う。このシステムは川村ら<sup>5,6)</sup>によって開発され、図6に示す設備構成で、柏崎刈羽6, 7号機に導入されている。

フィルタの除染係数の要求仕様は、粒子状物質と無機ヨウ素に対してそれぞれ1,000以上、有機ヨウ素に対して50以上であるが、性能試験結果から、実力として粒子状物質に対しては10,000以上、有機ヨウ素に対してはベント開始時の過渡的状況で50を下回ることなく、開始直後を除く定常的な流動条件では1,000以上であることが確認されている。

また、重大事故時にアルカリ薬液を格納容器に注入し、内部の水をアルカリ性に保つことで気体状ヨウ素の生成を抑制することができる<sup>7,8)</sup>。そのための設備として格納容器 pH 制御システムを開発し、新規規制基準の要求以上の自主対策設備として柏崎刈羽6, 7号機に設置した。

## VI. 設計を超える事態に対応できる緊急時能力

IAEA による深層防護の第4層は、Design Basis を超える過酷なプラント状態をコントロールすることが目的

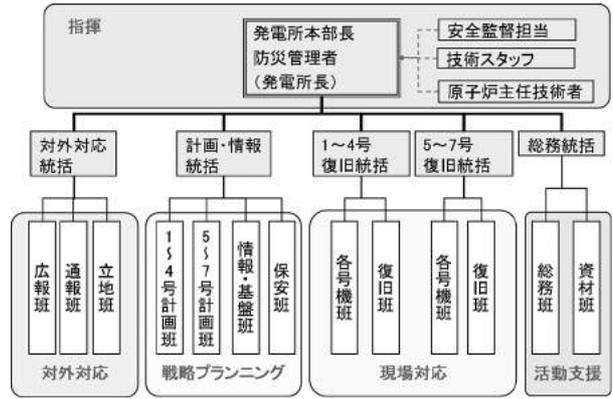


図7 ICSを応用した発電所緊急時組織の体制

とされている<sup>9)</sup>。この状態では、設計基準事故に対応する安全機能が喪失もしくは性能低下していることが想定され、安全機能を必要なレベルまで、必要なタイミングまでに回復すること、すなわちレジリエンスが重要な役割を果たすと考えられる。

この観点で福島事故を考えると、代替手段による安全機能の回復を図ったものの、炉心の溶融や格納容器バウンダリの機能喪失などの重大な不可逆の状態に至る前に、必要な回復ができなかったと捉えられる。

東京電力における事故当時の緊急時組織では、発電所本部長以下に、12の機能班がフラットに配置されていた。事故を想定して定めた手順に従って対応できる場合には、各班が同時進行で迅速に活動を展開することができる体制だが、想定を超える事態においては、本部長が有効に管理できるスパンを超えてしまい、各班の活動の統制が難しくなる弱点があった。そこで、Incident Command System(以下、ICS)<sup>10)</sup>を原子力に初めて応用し、緊急時の主要機能を集約して階層化するとともに、管理スパンの適正化と指揮命令系統の明確化を図る改善を行った。ICSは米国で自然災害対応の分野で発達してきた緊急時対応システムであり、想定を超えて事態の拡大が予測できない場合においても柔軟に対応する仕組みが備えられている。

ICSを応用した発電所の緊急時組織体制を図7に示す。この体制では、情報の収集・分析を行って、対応戦略を立案する機能が明確になっている。事前の想定を超える事態においては、限られた情報をもとに緊急時対応を開始し、対応を継続する中で得られた情報に基づいて随時戦略を改定し続けること、すなわち予め定めた対応戦略ではなく、戦略プランニングを継続する機能そのものが重要である。このことは、東日本大震災における福島第二原子力発電所(以下、福島第二)の緊急事態において、情報収集を継続して状況認知を高めつつ、対応の優先順位を明確にして事態を收拾した経験が示している<sup>11)</sup>。

また、対応戦略の立案にあたっては、フェーズドアプ

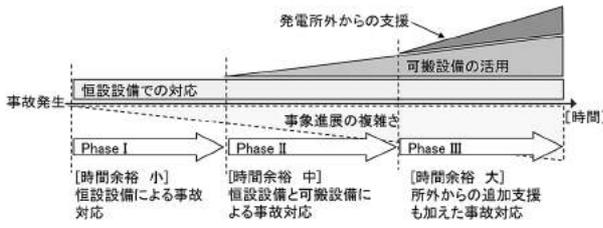


図8 フェーズドアプローチによる事故対応

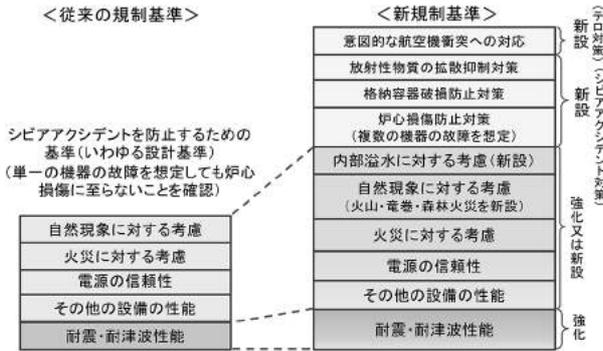


図9 従来の規制基準と新規規制基準との比較<sup>12)</sup>

ローチを取っている。これは、福島事故でも福島第二の緊急事態でも、発災直後には対応リソースに制約があったことや、安全確保の観点から現場活動に制約を生じたことを教訓とし、対応初期には恒設設備で対応しつつ、時間の経過とともに、可搬設備他の代替手段の導入や、発電所外からの支援を順次加えて対応の厚みを増す戦略である。図8にフェーズドアプローチの概念を示す。このように、現実的な制約条件を考慮して、事故対応が成立するように資材、要員、手順を時間とともに展開するのが、このアプローチの特徴である。

さらに、運転と復旧という従来は個別に分かれていた機能も、現場対応のオペレーション機能として統合された。これには、可搬設備の運用における運転と復旧の連携、レジリエンスに向けた復旧活動と当面の緩和オペレーションの連携などを改善する狙いがある。

## VII. 新規規制基準への適合性審査

福島事故後に強化された規制要件は、図9のとおりである<sup>12)</sup>。上述の検討を踏まえた安全性向上策は、新規規制基準の主要事項に対応する。これ以外の要件に対する諸対策も含め、柏崎刈羽原子力発電所6、7号機の安全性向上策は設置変更許可申請書に反映され、新規規制基準への適合性が審査されている(著者注：2017年秋の大会以降の進捗として、新規規制基準への適合性が認められるとする審査書案が、平成29年10月4日に原子力規制委員会にて取りまとめられ、本原稿執筆時点でこれに対する意見募集が行われている)。

## VIII. 結言

東京電力ホールディングスでは、福島事故の教訓を踏まえた対策を検討し、柏崎刈羽原子力発電所への適用を進めている。また、それを含む同発電所6、7号機の安全性向上策について、新規規制基準への適合性審査を受けているところである。引き続き、訓練および各種の評価を通じて安全性向上の有効性を高め、継続的な改善に取り組む方針である。

## － 参考文献 －

- 1) IAEA, "Development and application of level 1 probabilistic safety assessment for nuclear power plants", Specific Safety Guide SSG-3, 2010.
- 2) Nuclear Regulatory Commission, "A guide to the performance of probabilistic risk assessments for nuclear power plants", NUREG/CR-2300, 2016.
- 3) 東京電力株式会社, "福島原子力事故調査報告書", 2012.
- 4) 川村慎一, 大木俊, 奈良林直, "福島第一原子力発電所2号機の原子炉格納容器漏えいを踏まえた格納容器の事故時耐性強化と格納容器ベントの運用について", 日本原子力学会和文論文誌, Vol.15, No.2, 2016, pp.53-65.
- 5) 川村慎一, 木村剛生, 大森修一, 奈良林直, "原子炉格納容器フィルタベントシステムの開発", 日本原子力学会和文論文誌, Vol.15, No.1, 2016, pp.12-20.
- 6) 川村慎一, 木村剛生, 渡邊史紀, 平尾和紀, 奈良林直, "原子炉格納容器フィルタベント用の有機ヨウ素フィルタの開発", 日本原子力学会和文論文誌, Vol.15, No.4, 2016, pp.192-209.
- 7) L. Soffer, S. Burson, C. Ferrell, R. Lee, J. Ridgely, "Accident source terms for light-water nuclear power plants", NUREG-1465, 1995.
- 8) E. Beahm, C. Weber, T. Kress, G. Parker, "Iodine chemical forms in LWR severe accidents", NUREG/CR-5732, 1992.
- 9) IAEA, "Defence in depth in nuclear safety", INSAG-10, 1996.
- 10) Federal Emergency Management Agency, "Introduction to the incident command system", ICS 100, 2010.
- 11) 川村慎一, 奈良林直, "東日本大震災における福島第二原子力発電所の緊急時対応の教訓を反映した原子力緊急時マネジメントシステムの改善", 日本原子力学会和文論文誌, Vol.15, No.2, 2016, pp.84-96.
- 12) 原子力規制委員会, "実用発電用原子炉に係る新規規制基準について－概要－", 原子力規制委員会 Web Site, <https://www.nsr.go.jp/data/000070101.pdf>, 2013.

## 著者紹介



川村慎一 (かわむら・しんいち)

東京電力ホールディングス

原子力技術統括

(専門分野/関心分野)

原子炉工学, 安全システム工学, 保全工学, エアロゾル工学

# 原子力発電所の長期運転(運転期間延長)への対応について

関西電力 南 安彦

原子力発電所の運転期間延長認可制度(平成 25 年 7 月施行)は、40 年の運転期間について、認可を得れば 1 回に限り最大 20 年を加えた時期まで延長できるものである。高浜 1, 2 号機及び美浜 3 号機については、新規制基準適合のための安全性向上対策の実施を計画するとともに、原子炉容器等に対する特別点検を実施して異常のないこと、及び安全上重要な設備等に対する劣化状況評価を行い 60 年の運転に対しても十分健全性を維持確保できることを確認したことから、運転期間延長認可申請を行い、原子力規制委員会の審査を経て、それぞれ平成 28 年 6 月と 11 月に運転期間延長の認可を得た。原子力発電所の今後の安定した長期運転のためには、安全性・信頼性の維持向上のためのきめ細かい保守管理活動を継続していくことが重要であるが、さらに、国内外の運転経験や高経年化に係る研究を含む最新技術知見に基づいて評価の充実や予防保全の観点を含む改善活動に努めていくことが重要である。

**KEYWORDS:** long term operation, extension of operating period

## I. はじめに

原子力発電所では、プラントの安全性・信頼性の維持向上のために、保全計画に基づく設備の点検や評価、必要な補修などの保守管理活動を継続的に実施しており、国内外のトラブル事例や最新知見を踏まえた機器の取替などを含む予防保全対策にも計画的に取り組んできている。その上で、高経年化対策制度に基づき、設備に想定される劣化事象に対する高経年化技術評価を実施し、60 年の運転期間を想定した設備の健全性を確認するとともに、評価結果に基づく長期保守管理方針を策定するなどして、長期の運転への対応を図ってきた。

本稿では、PWR プラントの高浜 1, 2 号機及び美浜 3 号機を具体例として、これまで実施してきた長期運転に対応する設備対策、運転期間延長のための特別点検及び設備の劣化評価の概要、新規制基準への適合に係る安全性向上対策、さらには今後の長期運転に向けた取り組み等について紹介する。

## II. これまでの高経年化への対応

原子力発電所では、機器・構造物の経年劣化が徐々に進行して故障等に至ることがないように巡視点検や状態監視技術などによる診断、ポンプなどの起動試験等の日々の点検活動により異常の早期発見に努めるとともに、定期事業者検査での詳細な非破壊検査や機器を分解した部

品レベルの点検、必要な補修等を行う保守管理活動を品質保証体制の下で継続的に実施してきている。この中では、国内外の原子力発電所で発生したトラブルの知見や、長期運転を想定した劣化評価等に基づき、故障に至る前に補修・取替等の予防保全対策活動も実施してきている。具体例として、高浜 1, 2 号機では、これまで蒸気発生器や原子炉容器上蓋、燃料取替用水タンク、タービン、発電機や熱交換器等の大型機器や多くの配管等の取替を実施してきており、さらには、600 系ニッケル基合金に対する応力腐食割れへの対策として、原子炉容器等の管台溶接部への 690 系ニッケル基合金溶接やウォータージェットピーニングによる応力改善を行うなど劣化事象に対する予防保全対策を実施してきている。

図 1 に、高浜 1, 2 号機及び美浜 3 号機で実施した代表的な大型機器取替例を示す。

原子力発電所の機器等設備の高経年化に対しては、設計時の余裕に加え、上記のような供用期間中の適切な保守管理活動の継続により 40 年を超える運転が十分に可

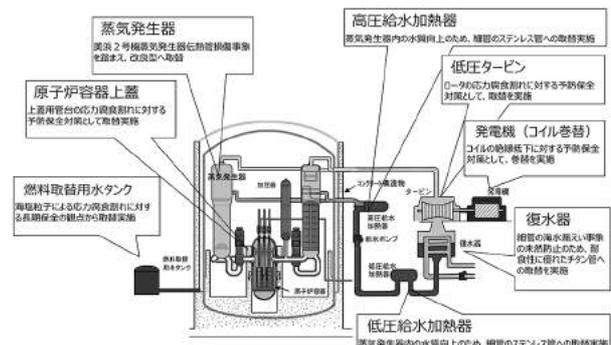


図 1 大型機器の取替実績

*The Activities for Long Term Operation of Nuclear Power Plants* : Yasuhiko Minami.

(2017 年 10 月 4 日 受理)

能との認識の下、平成8年に通商産業省(現：経済産業省)資源エネルギー庁が「高経年化に関する基本的な考え方」をまとめ、基本方針を示して以降、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」に基づく高経年化対策制度が整備されてきた。具体的には、運転年数が30年を迎える時点から10年ごとに、安全機能を有する設備に対して60年の運転を想定した劣化事象に対する高経年化技術評価を実施し、評価結果に基づき現状の保全項目に追加すべき新たな保全策を長期保守管理方針として策定(保安規定に明記)し、実施管理するようしてきた。

高経年化技術評価は、日本原子力学会「原子力発電所の高経年化対策実施基準」と機器部品ごとに想定される経年劣化事象を整理した同基準の附属書“経年劣化メカニズムまとめ表”に基づき実施している。

### Ⅲ. 運転期間延長への対応

運転期間延長認可制度は、原子力発電プラントの運転期間を運転開始から40年とし、その満了までに原子力規制委員会の認可を受ければ、1回に限り最大20年まで延長できるとするものである。運転期間延長認可申請のためには、原子炉容器などに対する特別点検を実施し、それらの結果も踏まえた設備に対する60年を想定した劣化状況評価、長期の保守管理方針の策定が必要となり、運転期間延長認可のためには、劣化状況評価の結果等が審査基準に適合するもの(60年の劣化を考慮しても技術基準に適合するもの)である必要があり、規制基準への適合のための安全性向上対策などに係る工事計画の認可を得ている必要がある。図2に運転期間延長認可申請において実施する内容を示す。

以下では、高浜1,2号機、美浜3号機の運転期間延長への具体的な対応内容を述べる。

#### 1. 特別点検

特別点検は、原子炉容器、原子炉格納容器及びコンクリート構造物を対象に実施している。

原子炉容器に対しては、日本機械学会発電用原子力設

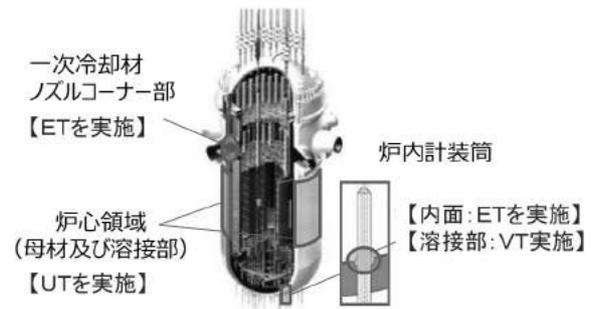


図3 原子炉容器に対する特別点検の概要

備規格「維持規格」に基づき定期的に各部の供用期間中検査を実施してきているが、運転期間延長のための特別点検として、運転開始以降初めて胴部炉心領域の母材部を含む全域に対して超音波探傷試験(UT)を実施するとともに、冷却材出入口ノズルの内面コーナ部(クラッド部)に対する渦流探傷試験(ET)、炉内計装筒管台部のET及び目視試験(VT)を実施し、欠陥などの異常がないことを確認した。

原子炉格納容器に対しては、視認性を確保した条件で、直接または遠隔による目視点検により、格納容器鋼板の内外面に施している塗装の状況に異常のないことを確認した。

コンクリート構造物については、原子炉格納施設、原子炉補助建屋、タービン建屋、取水構造物などからコンクリートコアサンプルを採取し、各種試験を行い、熱、放射線照射、中性化や塩分浸透などによるコンクリートの強度低下等が生じていないことなどを確認した。

図3に原子炉容器に対する特別点検の概要を示す。

#### 2. 劣化状況評価及び長期保守管理方針

劣化状況評価では、安全機能を有する設備を対象に、各設備を部品レベルまで展開、使用材料や環境条件などから想定される経年劣化事象を抽出整理して、60年運転を想定した劣化に対する評価を実施、現状の保全方法の妥当性についても評価を行い、設備の健全性が維持確保されることを確認している。運転期間延長認可申請においては、安全上重要な機器配管等に対する低サイクル疲労、原子炉容器の中性子照射脆化、炉内構造物に対する照射誘起型応力腐食割れ、2相ステンレス鋼の熱時効、電気計装設備の絶縁低下及びコンクリート構造物の強度低下などの劣化事象に対する60年までの運転を想定した劣化状況評価を行い、十分に健全性が維持確保されることを確認しており、原子力規制委員会の定める基準へ適合するものであることが審査において確認されている。

例えば、安全上重要な機器の疲労評価では、これまでの運転で受けた起動・停止などの各過渡事象の実績回数に、今後の60年までの運転期間で想定する各過渡事象

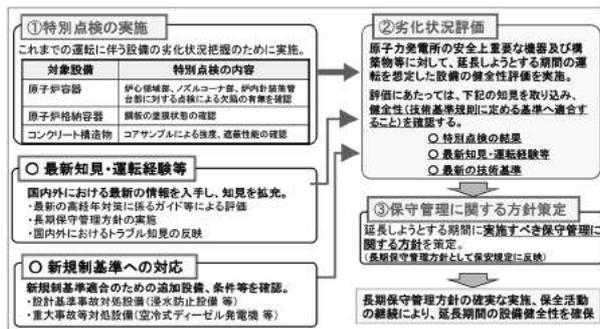


図2 運転期間延長認可申請の実施内容

の発生想定回数を保守的に見込んだ評価を行い疲労累積係数が1を超えないことを確認している。原子炉容器胴部の中性子照射脆化に対しては、過去4回の監視試験結果を踏まえた関連温度移行量の予測を踏まえ、60年運転時点の胴部材料の破壊靱性  $K_{IC}$  を評価し、事故時の加圧熱衝撃事象発生を想定した場合にも、原子炉容器の構造健全性が十分維持されること(原子炉容器内側に仮定したき裂における事故時の応力拡大係数  $K_I$  が  $K_{IC}$  を超えないこと)を確認している。

これらの劣化状況評価では、事故時の温度等の環境条件や事故時荷重を考慮するとともに、経年劣化を考慮した耐震/耐津波安全性評価についても実施している。

さらに、劣化状況評価の結果から、今後の運転期間において実施する必要のある長期保守管理方針を策定し、保安規定に明記している。具体例として、高浜1号機では、原子炉容器の監視試験の5回目の実施、運転過渡回数の継続の確認、原子炉格納容器内の一部ケーブルの取替、2次系配管のサポート強化を計画している。

### 3. 新規制基準への適合のための安全性向上対策及び自主的な最新技術導入対策

40年を超える運転期間延長プラントについても、最新プラントと同様の規制基準への適合のための安全性向上対策が必要であり、地震、津波、竜巻、外部/内部火災などへの対策、重大事故等対処への対策を実施することとしている。特に、建設当時の設備設計対応の違いから、高浜1、2号機、美浜3号機特有の追加対策(非難燃ケーブルへの火災防護対策、高浜1、2号機原子炉格納容器上部への遮蔽設置など)の実施を計画している。また、美浜3号機では、耐震性の向上と経年劣化への予防保全の観点から炉内構造物の一式取替を実施する。

さらに、高浜1、2号機、美浜3号機においては、最新技術を適用した自主的な対策として、保守性向上などの観点から、中央制御盤を最新のデジタル方式のものへ一式取替を行う。

## IV. 今後の長期運転への取り組み

原子力発電所の長期運転のためには、保全活動のPDCAを確実に実施していくことが何より重要であるが、今後は人材の育成を含む技術の維持継承や長期運転を支える技術基盤情報の整備も重要な課題と考えられ

る。IAEA(国際原子力機関)や米国など海外では、今後の40年を超える、さらには60年を超える長期運転への対応整備が進められており、我が国としても海外の取り組みに学び、各機関と協調して今後の高経年化へのさらなる対応を図っていくことも有効であり重要と考える。

具体的には、設備の劣化評価や検査などの技術面では、国内外のトラブル事例や、IAEAが各国の経年劣化に関する知見・経験をまとめているI-GALLの活動などの最新知見を反映し、あるいは、各研究機関の実施する国際的な経年劣化に関する研究プロジェクト活動とも協調して、劣化評価手法のさらなる高度化、技術基盤の整備等に取り組んでいく必要がある。また、今後の材料の劣化研究については、廃止措置プラントからの実機材料を活用した有効な調査研究についても検討していく必要がある。

また、長期運転を支える運用管理の面からは、IAEAが積極的に活動を展開している各国の長期運転をサポートするためのマネジメントシステム等を含むピアレビュー(SALTO)の知見や、国内外事業者との情報交換を通じた良好事例に学び、運用管理の改善を図っていくことも必要と考えられる。

さらに、40年を超える運転に対しては、地元や関係自治体の皆様をはじめ広くご理解を得ながら進めていくことが大切であり、今後も継続的なコミュニケーション活動などを通じて、事業者の取り組みをわかりやすく丁寧に説明していくことに努めていく必要がある。

### — 参考文献 —

- 1) 高浜発電所(1・2号発電用原子炉施設)の運転期間延長の認可申請書 添付書類(特別点検結果報告書、劣化状況評価書、保守管理に関する方針書)。
- 2) 美浜発電所(3号発電用原子炉施設)の運転期間延長の認可申請書 添付書類(特別点検結果報告書、劣化状況評価書、保守管理に関する方針書)。
- 3) IAEA SRS No. 82, Ageing Management for Nuclear Power Plants: IGALL, 2015.

### 著者紹介

南 安彦 (みなみ・やすひこ)  
関西電力  
原子力事業本部



# 川内原子力発電所の安全性向上評価について

九州電力 江藤 和敏

いわゆる「新規制基準への適合性審査」に合格、再稼働した原子力発電所は、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第四十三条の三の二十九に基づき、安全性向上評価、原子力規制委員会への届出、評価結果の公表を実施しなければならない。当社は、国内で初めて、川内原子力発電所第1号機の安全性向上評価を平成29年7月6日に、第2号機に関しては平成29年9月25日に原子力規制委員会へ届け出た。

本稿では、これらの概要について述べる。

**KEYWORDS:** Safety improvement, Safety analysis report, Periodic safety review, Probabilistic risk assessment, Stress test, Global assessment

## I. はじめに

川内原子力発電所第1号機は、「新規制基準への適合性審査」に国内で初めて合格、平成27年9月10日に通常運転に復帰、その後、約13ヶ月間、安全・安定運転を続けた。平成28年10月6日から施設定期検査を開始し、平成29年1月6日に終了、通常運転に復帰した。

再稼働した原子炉施設は、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第四十三条の三の二十九に基づき、施設定期検査終了毎に、施設定期検査終了時点の状態を対象とし、当該検査終了後6ヶ月以内に安全性向上評価を実施し、その後、原子力規制委員会に遅滞なく届け出ることとされており、国内で初めて平成29年7月6日に川内1号機の初回届出を行い、この結果を公表した。

1号機に引き続き、川内2号機が再稼働し、その後の施設定期検査を平成29年3月24日に終了したことから、同様に、安全性向上評価を平成29年9月25日に届出、公表した。

## II. 安全性向上評価の概要

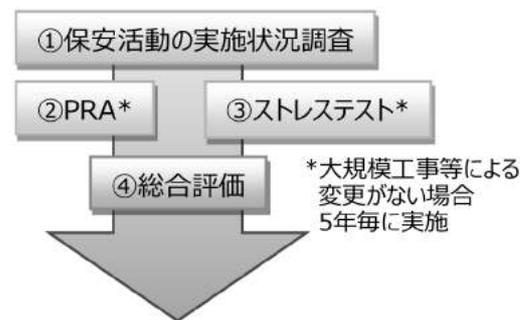
簡素化した安全性向上評価のフローを図1に示す。

まず、①保安活動の実施状況調査を実施し、施設定期検査終了時点の発電所の状態(設備、運用)を調査する。

この調査結果に基づき、②確率論的リスク評価(PRA)、③安全裕度評価(いわゆる、ストレステスト)等により保安活動の効果を評価するとともに、安全性向上対策を抽出する。

*Safety Improvement Assessment on Sendai Nuclear Power Station* : Kazutoshi Eto.

(2017年11月13日 受理)



《更なる安全性向上対策の抽出・実施》

- 安全性向上に資する設備対策
- 安全性向上に資する運用面の対策

図1 安全性向上評価フロー

これらを踏まえ、④総合評価を実施し、安全性向上計画を策定する。

なお、PRA、ストレステストは、大規模工事等による変更がない場合、5年ごとに実施する。

図2に安全性向上評価による継続的な安全性向上の仕組みを示す。安全性向上評価を施設定期検査毎に実施し、継続的に原子炉施設の安全性を向上させる。

## III. 安全性向上評価届出書の内容

安全性向上評価届出書記載事項は、原子力規制委員会が決定した「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド(平成29年3月29日付け原規規発第17032914号)」に定められており、4章構成となっている。この構成に沿って、以下に届出書の主な内容について述べる。

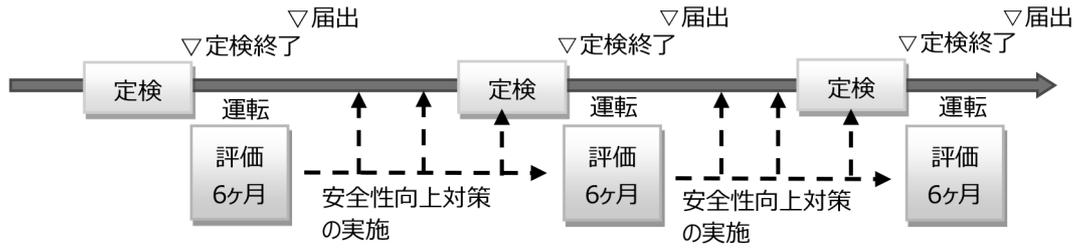


図2 安全性向上評価による継続的な安全性向上

表1 保安活動から抽出した主な安全性向上対策

	主な安全性向上対策	概要
保守管理	メタクラ <sup>1</sup> 保護継電器のデジタル化 <sup>2</sup>	長期保守信頼性
	原子炉容器出口管台保全工事 <sup>2</sup>	国内運転経験の予防処置
緊急時措置	特別高圧開閉所 <sup>3</sup> の更新	回線数増強, 高台移設による信頼性向上
	運転シミュレータ <sup>3</sup> への重大事故解析コード導入	運転員の知識・技能向上
外部要請	敷地周辺地震観測装置 <sup>3</sup> の追加	地震動評価に関する信頼性向上

<sup>1</sup> メタルクラッドスイッチギアの略で、高圧電源スイッチのこと

<sup>2</sup> 1, 2号機共に抽出された措置

<sup>3</sup> 1, 2号機共用設備

1. 安全規制によって法令への適合性が確認された範囲

建設から施設定期検査終了時点までの設置許可, 工事計画, 保安規定の変更履歴を調査し, 最新の許認可の状態を以下の構成でとりまとめた。

- (1) 発電用原子炉施設概要
- (2) 敷地特性
- (3) 構築物, 系統及び機器
- (4) 保安のための管理体制及び管理事項
- (5) 法令への適合性確認のための安全性評価結果

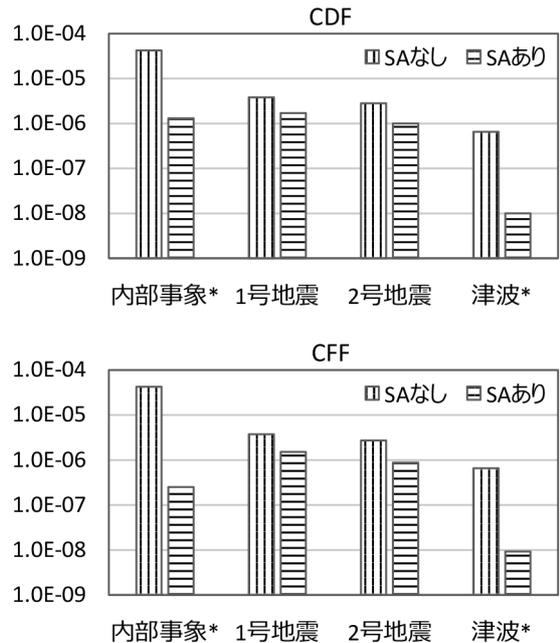
2. 安全性の向上のため自主的に講じた措置

前回の定期安全レビュー (Periodic Safety Review; PSR) の評価対象期間が平成 23 年 3 月までだったことを考慮し, 平成 23 年 3 月の福島第一原子力発電所事故以降の保安活動の実績, 最新の科学的・技術的知見の反映状況を調査し, 保安活動が適切かつ有効であることを確認した。

また, 保安活動の結果として, 安全性向上対策を抽出した。主なものを表 1 に示す。

3. 安全性の向上のため自主的に講じた措置の調査及び分析

1 項で調査した発電所の最新の状態に基づき, 確率論的リスク評価, 安全裕度評価等を実施し, これらの評価結果から, 安全性向上対策を抽出した。



\*1, 2号共に同じ値

図3 CDF, CFF の比較

(1) 確率論的リスク評価

炉心損傷頻度 (Core Damage Frequency; CDF), 格納容器機能喪失頻度 (Containment Failure Frequency; CFF) 等を評価した。また, リスク重要度を活用し, 安全性向上対策を抽出した。

a) 炉心損傷頻度, 格納容器機能喪失頻度の評価

施設定期検査終了時点での発電所の構築物, 系統及び機器の状態に基づき CDF, CFF を評価した結果, 図 3 に示すとおり, 従来から自主的に取り組んできた重大事故 (SA) 対策及び新規制基準への適合のための重大事故対策によるリスク低減効果が確認できた。

b) <sup>137</sup>Cs の放出量が 100TBq を超えるような事故の発生頻度

格納容器が機能喪失する場合には, <sup>137</sup>Cs の放出量は 100TBq を超えると定性的に判断し, <sup>137</sup>Cs の放出量が 100TBq を超えるような事故の発生頻度は, CFF と同じとした。

c) 敷地境界における実効線量

炉心損傷後に格納容器の機能が維持されている場合の 7 日間の敷地境界における実効線量を評価した。

表2 PRA から抽出した安全性向上策

主な安全性向上対策	期待される効果
重要シナリオに対する教育・訓練の強化	事故時の重要シナリオに対する運転員の意識を高め、事故対応能力を向上できる。
メタクラ保護継電器のデジタル化	耐震信頼性向上により、地震時のCDFを $1.7 \times 10^{-6}$ ( $1.5 \times 10^{-6}$ ) <sup>*</sup> から $8.5 \times 10^{-7}$ ( $6.6 \times 10^{-7}$ ) <sup>*</sup> へ、CFFを $1.5 \times 10^{-6}$ ( $8.7 \times 10^{-7}$ ) <sup>*</sup> から $6.3 \times 10^{-7}$ ( $5.1 \times 10^{-7}$ ) <sup>*</sup> へ低減できる。

\* ( )内の数値は2号の評価結果

表3 安全裕度評価結果

事象	クリフエッジ事象	クリフエッジ	クリフエッジに到達した際の対応
地震	タービン動補助給水ポンプから蒸気発生器への給水不能 <sup>1</sup>	1029Gal (1026Gal) <sup>2</sup>	駆動蒸気入口弁を手動で開弁し、タービン動補助給水ポンプによる蒸気発生器への給水を再開
津波	タービン動補助給水ポンプ故障による蒸気発生器への給水不能	15m	可搬型ディーゼル注入ポンプによる蒸気発生器又は炉心への注水

<sup>1</sup> 804Gal (882Gal)<sup>2</sup>の地震でメタクラ保護継電器が故障し、非常用所内電源が喪失、冷却手段がなくなり炉心損傷に至るが、故障した保護継電器の除外処置により非常用所内電源を復旧させることができることから、このクリフエッジは回避できるとした。

<sup>2</sup> ( )の数値は2号の評価結果

この条件下で大気中に放出される最大の放射線量は約3.2TBqとなり、これを基に敷地内で観測した1年間の気象データを使用した年間の種々の気象条件を網羅するような気象シーケンスで敷地境界における7日間の実効線量を評価した。これらの結果から、全気象シーケンスの評価結果の平均値は約43mSvとなった。

#### d) 安全性向上対策の抽出

リスク重要度分析結果から抽出した安全性向上対策を表2に示す。

#### (2) 安全裕度評価

設計基準を超える地震、津波に対して、発電所がどこまで頑健性を確保できるかを確認するとともに、クリフエッジに到達した際の対応を検討した。また、これらの結果を踏まえ、安全性向上対策を抽出した。

##### a) 評価結果

地震、津波に対する出力時炉心の安全裕度評価結果を表3に示す。

##### b) 号機間相互影響評価

###### ■ 耐性を考慮した相互影響評価

耐性(クリフエッジ地震加速度、津波高さ)が異なることにより、片ユニットの炉心や使用済燃料ピットの燃料が先に損傷し、発電所内の放射線量が上昇した場合でも、他ユニットのクリフエッジ評価結果に影響しないことを確認した。

###### ■ 事象進展過程を考慮した相互影響評価

両ユニットが同時に発災した場合においても、現在の重大事故等に対応する体制で対応可能であること、発電所内の資源(燃料、水、電力)は7日間連続で供給可能であることを確認した。

###### ■ 停止中ユニットから運転中ユニットへの影響評価

片ユニットが停止中(モード外)で、他ユニットが運転中である場合を考える。停止中ユニットは機器搬入口が開放されており、津波高さが13.3mを超えた場合、当該ユニットの格納容器内に浸水する。加えて、エアロックが開放されていることから、当該ユニットの補助建屋に浸水し、更に、連絡している運転中の他ユニットの補助建屋に浸水することにより、運転中ユニットの安全機能を喪失させる。この概念図を図4に示す。

しかし、停止中ユニットのエアロックを閉止することにより、補助建屋への浸水を防ぐことができることから、運転中の他ユニットへの影響は生じないことを確認した。

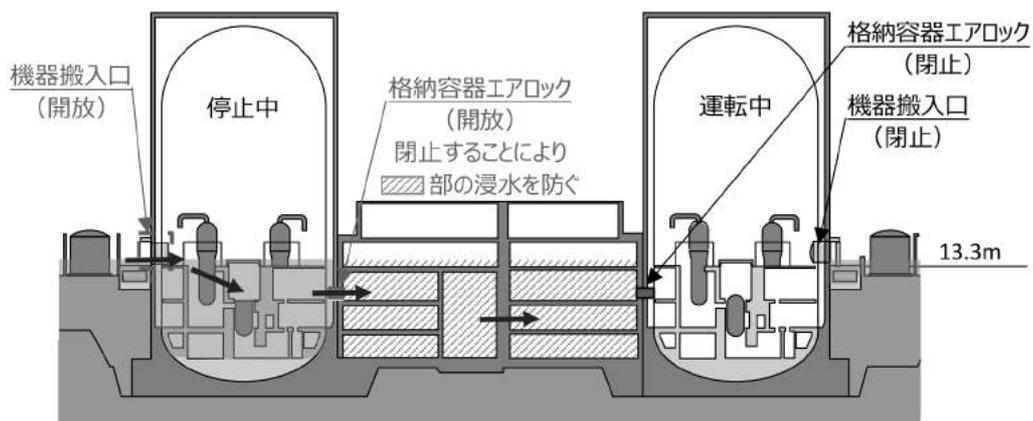


図4 停止中ユニットから運転中ユニットへの浸水の概念図

表4 安全裕度評価から抽出した安全性向上対策

主な安全性向上対策	期待される効果
クリフエッジ到達後の措置を含む安全裕度評価結果の発電所員への教育・訓練	設計を超える自然現象に対する緊急時対策要員の対応能力を向上できる。
メタクラ保護継電器のデジタル化	地震によって故障する保護継電器の除外処置が不要となる。
大津波警報時の停止中ユニットのエアロック閉止	運転中の他ユニットへの浸水を防ぐ。

表5 主な安全性向上対策と実施計画

主な安全性向上対策	実施時期	
	1号	2号
メタクラ保護継電器のデジタル化	第23(次回)～26回定検	第22(次回)～25回定検
原子炉容器出口管台保全工事	第23回定検	第23回定検
特別高圧開閉所の更新	2023年7月	
運転シミュレータへの重大事故解析コード導入	2018年7月	
敷地周辺地震観測装置の追加	今年度中	
重要シナリオ(再循環切替)に対する教育・訓練の強化	適宜	適宜
クリフエッジ到達後の措置を含む安全裕度評価結果の発電所員への教育・訓練	適宜	適宜
大津波警報時の停止中ユニットのエアロック閉止	対応済み	

## c) 安全性向上対策の抽出

安全裕度評価から抽出した主な安全性向上対策を表4に示す。

## 4. 総合的な評定

保安活動の実施状況調査、確率論的リスク評価、安全裕度評価等の結果を踏まえ、総合評定を実施し、安全性向上計画を策定した。

## (1) 総合評定

- 川内1号機は、高い運転実績を残しており、これは運転開始以降、当社が保安活動を確実に実施していることによると考えられる。
- 今後実施すべき安全性向上対策が抽出されたが、いずれも保安活動の欠陥によるものではなく、プラントの安全性をさらに向上させるためのものである。
- 今後も、保安活動の確実な実施を基本に、リスク情報を活用しつつ、原子力発電所のリスクを合理的に実行できる限り低減させていく。

## (2) 安全性向上計画

抽出した主な安全性向上対策の実施計画を表5に示す。

## IV. 結言

現在、原子力規制委員会の「実用発電用原子炉の安全性向上評価の継続的な改善に係る会合」において後続プラントへの反映も念頭においた今後の安全性向上評価の継続的な改善に向けた議論等が行われている。

本会合での議論に真摯に対応し、安全性向上評価についても継続的に改善する。

## 著者紹介



江藤和敏 (えとう・かずとし)  
九州電力株式会社 原子力発電本部  
(専門分野/関心分野)原子力安全

## 特集 社会との対話と専門知 1

日本原子力学会の社会環境部会と若手連絡会は2017年秋の大会で社会環境部会受賞記念講演を企画し、「社会との対話と専門知」をテーマに受賞者に講演いただいた。本稿はその内容をもとに、登壇者に改めて執筆をお願いしたものである。

# 再稼働する原子力発電所の安全性 —新規制基準と安全目標の関係—

パブリックアウトリーチ 諸葛 宗男

原子力に対する社会的理解が厳しいことが、「唯一の被爆国」のせいだと主張する人がいるが、事実はそのようではない。過去の世論調査データに拠れば戦後の世論は原子力発電に好意的だったが、原発が不祥事やトラブルを重ねるにつれて厳しい意見が増えてきたことが明確に表れている。つまり、多くの原子力専門家は厳しい意見の原因を自分たちと関係ない所に求めようとしているが、そうではなくて、原子力専門家自身の発言や行動の結果が厳しい世論になって跳ね返ってきている可能性が高いのである。もちろん、特定の組織や企業に原因を求めることは適切ではない。様々なことの積み重ねである。原子力に対する世論は、当然ながら福一事故後はさらに厳しくなっている。情報量が多く内容が難し過ぎるのも原因の一つだろう。社会・環境部会は日本原子力学会の情報発信も厳しい世論の原因の一端だったと反省している。その観点で学会からの情報発信をできるだけ判り易くすることも必要ではないかと考えている。本稿もその観点で市民の関心が高い規制基準の問題を取り上げている。

**KEYWORDS:** *New Safety Standards, Safety Goal, TEPCO IF Accident, Pass the NRA inspection, How safe is the NPP after fitting the new safety standards., Fitting Cost, Probabilistic Risk Assessment, Tsunami*

## I. はじめに

原子力規制委員会の審査が進み、ようやく5基の原子力発電所が再稼働した。国は原子力発電所を一刻も早く再稼働させるため合格した原子力発電所がどれだけ安全になったのかの説明が必ずしも十分とは言えない。合格したことを説明した時にも規制委はどれだけ安全になったのかを説明せずに「基準に適合した」としか言わなかった。違和感を抱いた市民も少なからずいたものと思われる。本稿は規制基準に適合した原子力発電所が安全になったのか、特に安全目標を満たしているのかどうかについて述べる。

## II. 規制基準とは何か

東京電力福島第一原子力発電所事故(以下「福一事故」と略す。)後、法律が改正され設置許可の基準が変更になった。事故前は核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(以下「炉規法」と略す。)第24条に設置許可の基準が簡単に定められていた。その第4項に「災

*Safety of the Restart Nuclear Power Plant; The relation between the new safety standard and the safety goal* : Muneo Morokuzu.

(2017年10月27日 受理)

害の防止上支障のない物であること」と書かれている。もし事故が起きることを肯定すると「災害防止上支障があったのになぜ許可したのか」と反対派に追及されるため、事故が起きる可能性を否定することが多くなってしまったのである。これが事故が起きることを否定した「安全神話」の原因だとされた。福一事故の後、法律が改正され、この条文が大幅に変更された。場所が第43条の3の6(正確には「炉規法43条の3の6」だが、以下では43条の3は省略し便宜的に「炉規法6」と略す)に移った。その第1項(「炉規法6第1項」)で許可禁止事項を、そして新設された第3項(「炉規法6第3項」)に、これまで法律に規定していなかったシビアアクシデント対策を規定している。そして同条第4項(「炉規法6第4項」)に「発電用原子炉施設の位置、構造及び設備が核燃料物質若しくは核燃料物質によって汚染された物又は発電用原子炉による災害の防止上支障がないものとして原子力規制委員会規則で定める基準に適合するものであること。」とされた。そして炉規法14にいわゆる「維持基準」が新しく制定された。国が施設の運転を認めた後に出来る技術基準はそれ以前に許可した施設には適用しないのが普通であるが、新しい法律では新しく出来る技術基準を既設発電所にも遡って適用することとしたのである。法律には「発電用原子炉設置者は、発電用原子炉施設を原子

力規制委員会規則で定める技術上の基準に適合するように維持しなければならない。」と明記されたのである。

今回の原子力規制委員会による“適合性審査”は炉規法6第4項が新設されたために行われる本邦初の審査である。上述した“維持基準”規定に沿って、新たに法制化した基準が全て既設の原子力発電所に遡及適用(“バックフィット”)されることになったのである。法手続き上は炉規法5の「設置許可」の変更手続きになる。そして様々な追加機器があるため、炉規法9の設計及び工事の認可、炉規法11の使用前検査、炉規法24の保安規定の手続き等が実施される。したがって、名称は適合性審査であるが、法的には炉規法8の設置許可の変更手続き、すなわち設置変更許可手続きなのである。

### Ⅲ. 規制基準を満たすと安全目標をクリアするのか

適合性審査が始まる前の2013年6月21日の衆議院原子力調査特別委員会で、宮下一郎委員が誰もが抱いていた疑問を次の通り質問した。「この新規制基準を満たせば安全目標を達成することになるのか。」これに対して田中俊一原子力規制委員長はこう答えた。「総合的に対処することによって、百万年に一回という目標が達成できる。」そして電力会社には「施設定期検査が終了した日以降6ヶ月以内に評価が実施され、その後遅滞なく、当該評価の結果等について届出を行う」よう求めた。この発言に沿って、九州電力は届出を行っている。九州電力はこれに先立って2014年の広報資料で確率論的リスク評価(PRA)結果による100万炉年に1回起きる事故で放出される放射エネルギーは1週間で5.6テラベクレルだったと説明している<sup>1)</sup>。福一事故で放出された放射エネルギー約10,000テラベクレルの1,800分の1、安全目標100テラベクレルの18分の1である。

### Ⅳ. 安全目標とは何か

ところで安全目標とは何かについて触れておこう。安全目標について最も多い誤解は、事業者が目指すべき目標だと思われていることである。これは全くの思い違いである。事業者は規制基準に定められた安全対策を実施すれば良いのである。この規制基準には安全目標は一切書かれていない。安全目標は規制者が規制基準を決めるための目安なのであって事業者が守るべき目標ではない。政府の規制当局(原子力規制委員会)は安全目標を満たすだろうとの推測の元で、規制基準を定めるが、事業者が実際に実施する安全対策次第では安全性が異なることもある。このため炉規法29に「発電用原子炉施設の安全性の向上のための評価」が定められ、これに従って実際の安全性評価結果(PRA評価結果)を届け出ることが求められている。これを受けて規制委は規制基準見直し

表1 適合性審査中原発11基の炉心損傷頻度平均値

	安全対策前の PRA	規制基準による 安全性向上効果	感度解析後の PRA (30を超える事故事象の うち1つのみを考慮)
設置変更許可済み及び 適合性審査中の11 基の原発の平均 (泊3、美浜3、高浜1 ～4、伊方3、川内1・ 2、玄海3・4)	$1.9 \times 10^{-4}$ (約5,200分の1)	→ 約2.4分の1 に低下	$8.3 \times 10^{-5}$ (約12,100分の1)

の必要性を検討することとされている。このことは2013年4月10日に原子力規制委員会が決定した「安全目標に関し前回委員会(平成25年4月3日)までに議論された主な事項」の④項にこれまで確認された事項の一つとして次の通り明記されている<sup>2)</sup>。

「④安全目標は、原子力規制委員会が原子力施設の規制を進めていく上で達成を目指す目標であること。」

### Ⅴ. 規制基準を満たすとどれだけ安全になるのか

規制基準をクリアするとどれだけ安全になるのだろうか? 適合性審査に合格した原子力発電所が規制基準をクリアしていることは間違いない。そうでなければ国から許可が下りないからだ。実際の原子力発電所の安全性は規制基準に定められた安全対策を実施した後で、電力会社が実施する確率論的リスク評価(PRA)の評価結果を見ないと判らない。そのため各電力会社は安全対策の計画段階でPRA評価結果の予測値を提出しているが、重要な個所が黒塗りされていて(昔はマジックインキかなにかで黒く塗ってコピーしたので、そう呼ばれているが、今は電子ファイルで削除するので該当箇所は空欄になっている。したがって「白抜き」というの方が実態に近い。)我々一般市民は残念ながら検証できない。しかし、幸いなことに経済産業省・資源エネルギー庁が黒塗りされていない資料を入手して評価を実施しているのでその結果を引用する。発電コスト等の検証WGでその結果が表1のとおり示されている<sup>3)</sup>。設置変更許可済みの炉及び適合性審査中の炉で炉心損傷リスクの感度解析を行った結果である。

表1の数値は既に設置変更許可を得た川内原発1・2号機、高浜原発3・4号機等、現在審査中の原発11基の安全対策実施前後のPRAの結果比較である。ただし、安全対策実施後の感度解析は、30を超える事故事象に対応して実施した対策のうちの1つだけを考慮しただけであり改善効果は部分的にしか反映されていない。30を超える全ての事故事象を考慮した場合の感度解析は、評価結果の更なる低下が見込まれる(エネ庁の脚注にそう書かれている)。

この評価結果は上記11基のPRAの平均値であり、炉心損傷リスクは対策実施前より56%低下すると評価されている。規制基準をクリアしたことによりどれだけ安全性が高まったのかを示す一つのデータである。

## VI. 規制基準を満たすのにどれだけ費用が掛かっているのか

規制基準に対応するための費用については2つの資料がある。一つは前項で引用した発電コスト等の検証WGのデータである。2015年5月26日の資料「長期エネルギー需給見直し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告」のp.58に「追加的安全対策費の最新の見直し(計11項目)を聴き取りした結果、約1,000億円/基程度と見込まれる」と示されている<sup>3)</sup>ので規制基準に対応するための費用は約1,000億円ということになる。

なお、上記の追加的安全対策費の対象は表2の通りである。なお、資料作成時点までに規制委は川内1,2号機と高浜3,4号機については表2の右側の38項目の詳細計画を聴き取り済みで、残り24基については表2の左側11項目の概要説明を聴き取り済みのようである。

もうひとつは報道資料である。各社の対策費用に関する報道資料は核燃料サイクル施設に関する日本原燃の

表3 報道による追加費用の一覧表(原発は平均約1,250億円)

	事業者	対象となる原子力発電所等	規制基準+αの費用(億円)
①	北海道電力	泊1,2,3号	2,500
②	電源開発	大間	1,300
③	東北電力	女川2号機、東通	3,100
④	東京電力	柏崎刈羽6,7号機	4,700
⑤	中部電力	浜岡3,4号機	3,500
⑥	北陸電力	志賀2号機	2,000
⑦	日本原電	東海第二、敦賀2号機	830
⑧	関西電力	美浜3号機、大飯3,4号機、高浜1,2,3,4号機	5,279
⑨	中国電力	島根2号機	4,000
⑩	四国電力	伊方3号機	1,700
⑪	九州電力	玄海3,4号機、川内1,2号機	4,100
⑫	日本原電	再処理、ウラン濃縮	7,500
	合計		40,869(33,109)

7500億円を含めると合計約4兆円となっている。原子力発電所に関する費用は26基分併せて3兆2,500億円で、1基当たり約1,250億円ということになる<sup>4)</sup>。

報道は各社の言い値そのままであるから、両者の評価はほぼ一致しているものと思われる。

## VII. 昔の安全目標案はどうなったのか

旧原子力安全委員会が2003年に示した安全目標案は定性的目標と定量的目標があった。前者は「原子力利用活動に伴って放射線の放射や放射性物質の放散により公衆の健康被害が発生する可能性は、公衆の日常生活に伴う健康リスクを有意には増加させない水準に抑制されるべきである。」とされ、後者は「原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによる、施設の敷地境界付近の公衆の個人の平均急性死亡リスクは、年あたり百万分の1程度を超えないように抑制されるべきである。」とされていた。前出の2013年4月10日の規制委決定文書<sup>2)</sup>では①の中に「この検討結果は原子力規制委員会が安全目標を議論する上で十分に議論の基礎となるものと考えられること。」と書かれているが、この日の記者会見で田中委員長は「旧安全委員会の死亡リスク目標は採用しない」と言明している<sup>5)</sup>。したがって各原子力発電所のPRAでは安全目標は「放出される放射能が100テラベクレルを超える事故の発生頻度が100万炉年に1回を超えない」ことだけとし、昔の安全目標案はこれに包含されるものとしているようである。

## VIII. まとめ

安全目標は事業者の目標ではなく、規制側の目標である。事業者が算出するのは、単に安全対策のハードウェアを事業者が選定しているからである。また、新規規制基準を適用すると原子力発電所がどれだけ安全になるのかということもおおよそご理解いただけたものと思う。

表2 追加的安全対策費の内訳(新規規制基準対応費用)

評価項目	11項目	38項目
	概要聴取	詳細聴取
シビアアクシデント対策	①意図的な航空機衝突への対応	①-1特定重大重大事故対処施設の設置
		①-2屋外放水設備の設置
	②放射性物質の拡散抑制対策	②-1屋外放水設備の設置
		②-2敷地外への放射性物質拡散抑制対策
		②-3使用済燃料プール冷却手段の多様化対策等
	③格納容器破損防止対策	③-1フィルタベントの設置(BWRのみ)
		③-2水素爆発防止対策
		③-3格納容器冷却手段の多様化対策
	④炉心損傷防止対策	④-1可搬式代替低圧注入ポンプ配備
		④-2可搬式代替電源車配備
		④-3大容量ポンプ車配備
④-4加圧器逃がし弁制御用空気代替供給ライン設置		
④-5その他		
④-6事故時監視計器設置		
④-7恒設代替低圧注入ポンプ設置		
④-8低圧注入用配管設置		
④-9恒設代替電源設置		
④-10充てん高圧注入ポンプ自己冷却設備設置		
⑤その他	⑤-1可搬式モニタリングポスト設置	
	⑤-2安全系蓄電池増強(既設容量変更)	
	⑤-3号機間融通電源ケーブル設置	
	⑤-4免震事務棟の設置	
	⑤-5その他	
	⑤-6緊急時対策関係機器設置	
設計基準	⑥内部溢水に対する考慮	⑥-1配管漏えい検知
		⑥-2拡大防止装置(堰など)の設置
		⑥-3扉の水密化
	⑦自然事象に対する考慮(火山、竜巻、森林火災)	⑦-1防火帯の設置(森林火災対策)
		⑦-2竜巻飛来物対策、飛散防止対策
		⑦-3火山対策
	⑧火災に対する考慮	⑧-1異なる種類の感知器設置
		⑧-2消火設備の設置
		⑧-3系統分離のための耐火増強対策
		⑧-4その他
	⑨電源の信頼性	⑨-1非常用ディーゼル発電機燃料油貯蔵タンク増設
⑩耐震対応	⑩-1耐震裕度向上工事	
	⑩-2周辺斜面安定化対策	
⑪耐津波対応	⑪-1防潮堤の設置(津波対策)	

－ 参 考 文 献 －

- 1) 九州電力「九州電力データブック 2014 別冊」, 2014.9 [http://www.kyuden.co.jp/library/pdf/company/data\\_book/data\\_book\\_b\\_all.pdf](http://www.kyuden.co.jp/library/pdf/company/data_book/data_book_b_all.pdf)
- 2) 原子力規制委員会「安全目標に関し前回委員会(平成 25 年 4 月 3 日)までに議論された主な事項, 2013.4.10, <http://www.nsr.go.jp/data/000047444.pdf>
- 3) 資源エネルギー庁発電コスト検証ワーキンググループ「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告」2015.5.26, [http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/mitoshi/cost\\_wg/pdf/cost\\_wg\\_01.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_01.pdf)
- 4) キヤノングローバル戦略研究所「原子力のリスクと対策の考え方」-社会との対話のために-, 日本原子力学会 2016 年年会,

- 2016.3.26, [http://www.canon-igs.org/event/report/160326\\_ujita\\_summary2.pdf](http://www.canon-igs.org/event/report/160326_ujita_summary2.pdf)
- 5) 原子力規制委員会「原子力規制委員会記者会見録」2013 年 4 月 10 日, <http://www.nsr.go.jp/data/000068602.pdf>

著 者 紹 介

諸葛宗男(もろくず・むねお)  
パブリック・アウトリーチ  
前東京大学公共政策大学院



日本原子力学会誌「ATOMOS」アンケートのご案内

日本原子力学会  
編集委員会

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

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

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

## 市民との対話—我が国における活動事例—

NPO 法人放射線線量解析ネットワーク 山野 直樹

2011年3月の福島第一原子力発電所事故の社会的影響は、原子力・放射線に対する不安、嫌悪、忌避など、現在でも人々の意識下に沈着している。この傾向が今後も続くことは、原子力のみならず、医療を含む放射線利用や環境・エネルギー問題の合意形成にも大きな影響を与える。ここでは、消費者庁や学協会などの従来型、参加型のリスクコミュニケーションや筆者の地域参画型リスクコミュニケーションの実践経験を通して、市民との対話はいかにあるべきかを考える。

**KEYWORDS:** *Risk Communication, Public Participation, Consensus Building, Dialogue, Fukushima, Low-Dose Radiation, Nuclear, Community-Based, Co-Evolution*

### I. はじめに

現在、原子力規制委員会が策定した新規制基準による適合性審査を通過した7基の原子力発電所のうち5基が稼働中であるが、6年前の福島第一原子力発電所事故(以下、福島事故と記す)の社会的影響は、原子力・放射線に対する不安、嫌悪、忌避など、現在でも人々の意識下に沈着している。食品の放射線安全に関する消費者庁の意識調査結果<sup>1)</sup>(第10回:2017年10月11日)を見ても、福島産の食品を避ける割合は低下傾向にあるが、約13%の人は購入をためらうと回答している。放射線の基礎知識の理解の減少が横ばいの傾向になっているとは言え、約48%の人は確かな知識を持っていないことが分かる。

このような傾向が続くことは、原子力のみならず、医療を含む放射線利用や環境・エネルギー問題に対する合意形成にも大きな影響を与える。ここでは、消費者庁などのリスクコミュニケーション(以下、リスクコミと記す)や筆者の実践経験等の例示を通して、市民との対話はいかにあるべきかを考える。

### II. 従来型のリスクコミュニケーション活動

福島事故後、行政機関をはじめとして多くの学協会が放射線に対するリスクコミを実施した。消費者庁は食品安全の観点から早期にリスクコミを開始し5年を超える活動を継続している。その活動実績は食品に関するリスクコミ研究会報告書<sup>2)</sup>にまとめられているが、2011-2017年度の間、①510回を超える意見交換会(うち3回は20名程度の車座形式)、②「食品と放射能 Q&A」の発行、③地

方公共団体や関連団体と協力した約3,400名のリスクコミュニケーション養成、④風評被害に関する消費者意識の実態調査(2013年2月から2017年10月まで延べ10回)などを実施している。消費者庁は、『国が意見交換を実施する際には、多数の参加者に等しく情報提供し、多様な参加者の意見聴取が可能なことを理由に、大会場でのシンポジウム形式を中心に今後も実施する』としている。他方、『多様な意見交換等については、その目的や参加者の属性に応じて、車座を含めた多様な形式を検討することが望ましい』としている。

学協会の活動事例の一つとして、日本放射線影響学会福島原発事故対応 Q&A グループが2011年9月~2016年12月までの間に171回実施した「放射線影響解説セミナー」<sup>3)</sup>にも注目したい。このグループが実施した開催形式は、数百名の講演会から30~40名の小集団を対象とした膝詰め講演会まで多様である。活動記録<sup>4)</sup>では、『大規模な講演会で、限られた質問時間では、生じた疑問の多くを解消できず、かえって不安が増す傾向があり、効果が少ない』ことを示唆している。また、『インターネット時代を反映して放射線の健康影響に関する情報が氾濫したことによって、かえって情報の真偽が判断できず、人々の間に不安が根強く蔓延していることを感じる』と述べている。不安の原因は様々ではあるが、『(1)政府および地方自治体が発する情報に納得いく説明がほとんどないこと、(2)科学者の判断が一人一人全く違うこと、(3)そのために全てを信頼できないという一種の社会崩壊状況に陥っていること、などが引き金となっている』と分析している。

### III. 参加型リスクコミュニケーション

従来型のリスクコミの問題点を解決する手法としては参

*Dialogue with the Public; Cases in Japan* : Naoki Yamano.

(2017年10月25日 受理)

加型リスク手法がある。その一つとして、推進側と反対側の専門家によるディベート集会<sup>5)</sup>が挙げられる。この討論会形式は、課題・論点の可視化と対立点を明確にできる利点がある。しかしながら、限られた時間では対立するエビデンスを整理する程度の成果しか得られない場合や二項対立を助長する傾向があるなどの理由で必ずしも効果的ではない場合がある。

少人数の参加型対話は前掲の「放射線影響解説セミナー」が採用しており、消費者庁も「車座集会」と称して数回採用している。最近では、高レベル放射性廃棄物の地層処分をテーマとして「科学的特性マップに関する意見交換会」<sup>6)</sup>にも取り入れられている。この方法は、参加者が少人数であり、参加者の理解が深まる、質疑・意見交換の内容が個別かつ個人の身近な話題となりやすいといった特徴がある。しかし、その多くが1回限りの参加であり、1~2回程度の対話では本音の意見が出ない、井戸端会議(後の記憶に残らない)になりやすい。さらに、意見交換をした結果がどのように反映されるか分からない無力感が生じやすい、関心・興味のない人はそもそも参加しないという本質的な課題がある。

#### IV. 地域参画型リスクコミュニケーション

筆者らは、上記の参加型リスクの問題点や課題を解決する手法として、新たな「地域参画型リスク手法」<sup>7)</sup>を構築した。この手法は地域コミュニティメンバーによる参画型の少人数のワークショップ(勉強会)形式を採用する。地域参画型の特徴は、図1に示すように、従来型では主催者・専門家が情報の受け手に対して情報発信を行うのに対し、地域参画型は地域コミュニティメンバーが主体となって情報発信するところにある。

従来の参加型リスクのように1~2回程度の勉強会では有効性に疑問があるため、5回以上の繰り返しの勉強会を行う。そのためには、繰り返し参加する参加者の参加意欲を高める必要があり、人々の「知る権利」だけでなく「自己決定権」<sup>8)</sup>に強く働きかけるこ

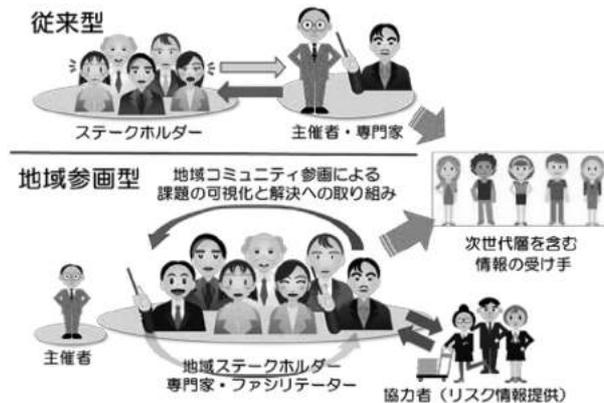


図1 従来型と地域参画型コミュニケーションの違い



(a)女性市民グループ (b)健康管理センターグループ  
図2 勉強会の風景(第1回目)



(a)女性市民グループ 2015年2月20日 (b)健康管理センターグループ 2015年3月12日  
図3 説明練習会の風景



(a)公開フォーラム(敦賀) 2013年12月9日 (b)公開フォーラム(東京) 2014年1月28日  
図4 公開フォーラムの風景

とで、モチベーションを維持できるように配慮する。さらに、参加して議論した結果が具体的に反映される目標を設定し、参加者意見の取り入れ(ステークホルダー入力)のプロセスを確実にすることが特徴である。

2013~2015年に福井県敦賀市において、2つの地域コミュニティメンバーの少人数グループ(各12名)を作り(図2)、低線量放射線の健康影響に対する勉強会を2年間にわたり各グループ10回実施した。Aグループは地域で原子力の勉強会を開催している女性市民12名、Bグループは敦賀市健康管理センター勤務の保健師・助産師・管理栄養士の女性12名である。勉強会の中では、最初に専門家で作成した「低線量の放射線健康影響ガイドブック」のドラフトを勉強会テキストとして用い、市民自身が得心できるもの、他の人々への説明に使えるガイドブックを自分達で作りに上げることを目標とした。そのため、単に「知識」だけではなく「考え方」を伝える、「価値」への質問に答えるなどの工夫をすることによって、比較的早い時期にグループ内の相互信頼感を高める配慮を行った。

2年間の活動で、「低線量の放射線健康影響ガイドブック(初級編)」を完成し、Webページで公開した<sup>9)</sup>。

さらに、この勉強会に参加した地域コミュニティメンバーが、情報の受け手である一般市民向けに説明できることが重要である。そのため、理解度の確認を兼ねて説明練習会も行った。当初は一般の敦賀市民を聴衆とすることを考えたが、勉強会メンバーの多くがうまく説明する自信がないと難色を示したため、福井大学の学生数名に市民役として協力してもらい、一般市民向けを想定した説明練習会を3回実施した。

両グループとも会話劇の様式を採用し、2~3の項目に絞った説明が行われた。会話劇による説明は筆者にとって新鮮な驚きであった。一般市民役の福井大学の学生からの質問に対する回答を通して、自分達が本当に理解できたこと、そうでないことがはっきり認識できたことは大きな成果であった。近い将来、この勉強会グループメンバーが主体的に活動を継続して一般市民に情報発信することが期待される。

勉強会メンバーのみならず、一般市民並びに関連研究者にも本研究活動を広く知ってもらうことも大切であるため、公開フォーラムを敦賀市と首都圏でそれぞれ毎年1回、計6回開催し、参加者からの意見を聴取するとともに議論を行うことで研究活動に役立つ知見を得ることができた。

地域参画型リスク活動を実施して痛感したことは、リスク用の良い説明資料が存在しても、参加者がそれを単に読むだけ、または1~2回の説明を受けるだけではよく理解できないことであった。リスクは効果的な実践方法を用いることによってその有効性が高まる。そのため、地域参画型リスク手法を具体的に実践するための「社会実装ガイダンス」とその要約版「実践の手引き」を合わせて作成し、Webページで公開した<sup>9)</sup>。

### V. 地域参画型リスクコミュニケーションの評価

地域参画型リスク手法の効果を評価するため、2013年9月に実施した一般の敦賀市民を対象とした「放射線とリスクに関する意識調査」<sup>10)</sup>と同一質問内容を勉強会メンバー24名にも回答を求めた。この調査は勉強会の開始時(2013年11月)と終了時(2015年11月)の2回実施し、2年間の勉強会前後の知識の理解度と意識の変化を調べた。また、一般的な敦賀市民が持つ知識や意識との違いについても比較した。質問項目は多数あるため紙面の都合上、主な比較結果だけを紹介する。

図5は低線量放射線に対する知識の変化を示したものである。勉強会メンバーは、「ウイルスのように伝染する」への回答のように、一般の敦賀市民と比べて低線量放射線に対する知識はある程度持っていたと考えられる。勉強会前後での変化はそれほど大きくはないが、「子孫に遺伝する」などの情報を明らかに否定する回答が増加した。

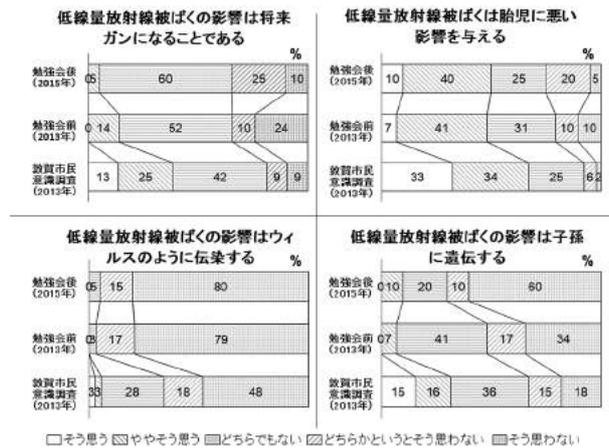


図5 低線量放射線に対する知識の変化

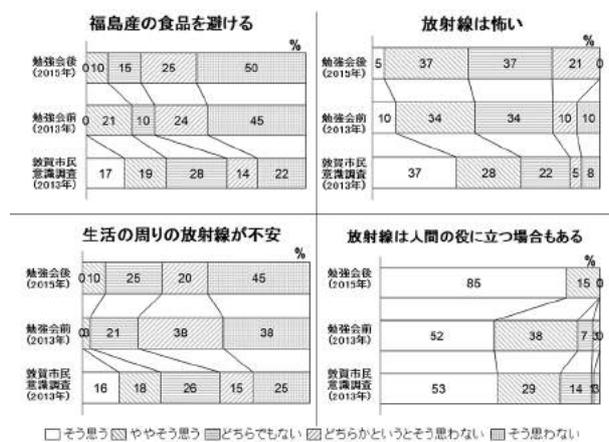


図6 低線量放射線に対する意識の変化

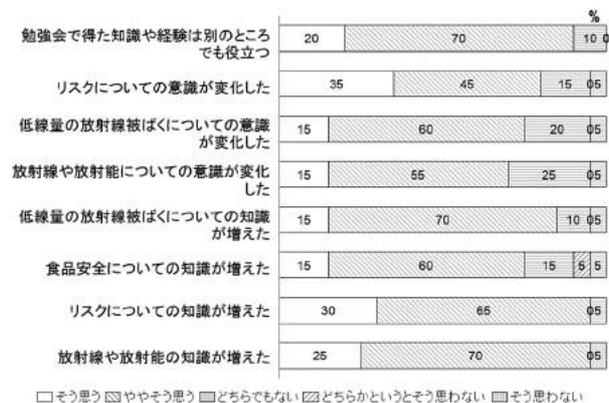


図7 勉強会後の知識・意識変化についての回答結果

図6は低線量放射線に対する意識の変化を示す。勉強会後は放射線に対する恐怖感、不安感や忌避感が減少していることが分かる。特に「福島県産の食品を避ける」と回答した敦賀市民は17%であるが、勉強会メンバーは0%であり、また50%は明確に否定している。放射線の有用性に対する肯定傾向は明らかに増加した。

2年間の勉強会後の知識や意識の変化については、どのように感じているかを別途回答してもらった。その結果を図7に示す。放射線・放射能、食品安全やリスクに

についての知識は、75%以上の参加者が、「増えた」または「やや増えた」と回答している。放射線・放射能やリスクについて自分自身の意識が変化したと回答した方は70%以上に上っている。また、勉強会で得た知識や経験は別のところでも役立つと答えた方は90%であり、地域参画型リスクミ手法は有効であると評価できる。

## VI. 市民との対話の重要性

福島事故後の国内におけるリスクミ活動について、従来型と参加型について典型的な事例を紹介するとともに、筆者らが実践した地域参画型リスクミ手法について述べた。

地域コミュニティによる地域参画型リスクミは、地域の課題を「共に考えて」解決するためのよりよい方法となる。この手法は、参加者数が限定されるため、発展性がないと誤解されることがあるが、この手法を他の地域コミュニティにも数多く適用することによって多くの知見が得られると考えられる。

また、従来の大規模な説明会や市民集会に比べて効果的・効率的ではないと考える人もいる。しかし、多くの人々を動員して集めた説明会で、本音の意見・考えを聴けるかどうかは疑問である。

地球温暖化やエネルギー問題などのグローバルな課題に対しては、まず地域メンバーによる地域コミュニティへの影響を考えることで問題点を可視化する。その後、地域を限定しない複数の地域・多数のコミュニティに範囲を広げることによって、グローバル化することが可能である。

## VII. おわりに

人々は「説得」や「上から目線」を嫌う。リスクミの実践においては、エビデンスにもとづく説明を行い、「説明することで、ご理解をいただく」ことは行わない。むしろ、問題点や課題について誠実に対話し、建設的な解決策に対する意見を伺う態度を常に心がけ、議論の方向を決して誘導しないことが大切である。選択肢のある方策はその説明を省略しない。

「安全」を強調すると、逆に疑いを持たれることもある。ましてや「安心」は人々の独自の価値判断に関わるものであり、事業関係者は言わないことが望ましい。また、「事業に貢献いただく地域に対する敬意や感謝の念」を事業関係者が持つことは大切ではあるが、地域の人々にとっては「敬意や感謝の念」より「誇りに思う、自慢できる」ものを目指すことがもっと重要である。

国際的なリスクの最新の定義は「目的に対する不確かさの影響」であり、不確かさの影響は、好ましくない方向と好ましい方向の両方があることを伝える必要がある。

リスクミの最終的な目標は、参加者の信頼関係を構築することであり、リスクミの実践において最も重要であることは言うまでもない。

最近のインターネット経由のtwitterによるFake Newsや個人攻撃の拡散など、何が信頼できる確かな情報が判断しにくい状況が続くと思われる。原子力や放射線に関する市民との対話は継続が肝要であり、今後の原子炉廃止措置や地層処分などの難問の解決に向けた更なる参加型リスクミの取組みが必要である。

最後に、住民意識調査にご協力いただいた敦賀市民の皆様、勉強会に快くご協力いただいた女性市民グループの方々、敦賀市健康管理センター職員の皆様、敦賀記者クラブの皆様へ深く感謝いたします。また、公開フォーラム及び研究フォーラムにご協力いただいた研究分担者、連携研究者、研究協力者の諸氏に厚く感謝します。

### — 参考文献 —

- 1) 消費者庁, 風評被害に関する消費者意識の実態調査(第10回)(平成29年10月11日), [http://www.caa.go.jp/earthquake/understanding\\_food\\_and\\_radiation/pdf/understanding\\_food\\_and\\_radiation\\_171011\\_0001.pdf](http://www.caa.go.jp/earthquake/understanding_food_and_radiation/pdf/understanding_food_and_radiation_171011_0001.pdf)
- 2) 消費者庁, 食品に関するリスクコミュニケーション研究会報告書(平成29年2月21日), [http://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer\\_safety/food\\_safety/pdf/risk\\_commu\\_workshop\\_170221\\_0003.pdf](http://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_safety/food_safety/pdf/risk_commu_workshop_170221_0003.pdf)
- 3) 日本放射線影響学会, 放射線健康影響説明Q & A講演会, <https://www.jrrs.org/faqpage/seminar/>
- 4) 渡邊正己, 福島原発事故対応グループ, 放射線生物研究者がおこなった放射線健康影響に関する理解促進支援活動の記録, <http://rbnet.jp/shiryo/170331fukushima.pdf>
- 5) 八木絵香, 高橋信, 北村正晴, 日本原子力学会和文論文誌, 6[2]; 2007, 126-140.
- 6) 原子力発電環境整備機構, 科学的特性マップに関する意見交換会, <http://www.chisou-sympo.jp/iken2017/>
- 7) Yamano N., A Community-based Risk Communication Approach on Low-Dose Radiation Effect, Chapter 13, Earthquakes, Tsunamis and Nuclear Risks: Prediction and Assessment Beyond the Fukushima Accident, Springer Japan (2016). ISBN978-4-431-55820-0.
- 8) Bandura A., Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change, Psychological Review, 84(2); 1977, 191-215.
- 9) 低線量の放射線健康影響のリスクについて知って・考えるサイト, <https://www.cbriskcommunication.org/>
- 10) 篠田佳彦, 山野直樹, 日本原子力学会和文論文誌, 14[2]; 2015, 95-112.

### 著者紹介



山野直樹 (やまの・なおき)

NPO 法人放射線線量解析ネットワーク (RADONet)  
(専門分野/関心領域) リスクコミュニケーション, 原子核データ評価, 放射線遮蔽工学

# ステークホルダーとの対話 —海外の事例と日本への展開—

日本エネルギー経済研究所 村上 朋子

原子力問題に限らないが、賛否両論がある事項、あるいはベネフィットとリスクとをはかりにかけて判断しなければならない問題の議論にあたっては、誰が「関係者(=ステークホルダー)」なのか、何のために議論をするのか、といった、いわばステークホルダーの定義とコミュニケーションの目的を明確化することは必須である。事業者や政府は、「国民全体」を対象とした画一的なアプローチに偏っている我が国の広報のあり方を見直し、例えば類似傾向を持つステークホルダー毎の対話の機会を増やす等の改善に取り組むことが望まれるとともに、特定の事業やプロジェクトの推進が目的である場合は、そのことを明言するべきであろう。

**KEYWORDS:** *stakeholder involvement, public debate committee, nuclear policy*

## I. ステークホルダーとの対話の目的と対象

ステークホルダー(Stakeholder, 意識=利害関係者)とは誰なのかという点、実は意識せずに漠然と「一般市民」「国民」と思う方が多いのではないかと、しかし、それは議論の混乱の元である。

2017年1月17-19日、パリでOECD原子力機関(OECD/NEA)の主催する国際会議「原子力の意思決定に関するステークホルダーとの関わり(Stakeholder Involvement in Nuclear Decision Making)」が開催された。その会議では、有用な示唆が以下の通り示された。

- ・ステークホルダーが誰(何)かは場合により違うので、その定義から明確にせねばならない。
- ・ステークホルダーとの議論を何のためにするのか、その目的を明確に持つことが必須である。目的が明確であれば、おのずとステークホルダーの定義も明確になる。

普段原子力事業とは無関係の仕事に従事している市民への原子力の重要性の理解浸透を促し、原子力が社会から支援されるエネルギーとなるための一助とすることが目的であれば、ステークホルダーは立地地域住民に限らない市民である。事業者が自らの活動を認めてもらい、事業を拡大発展していくためであれば、ステークホルダーは規制機関を含む電気事業管轄の官庁や取引先や顧客となるであろう。このように場合により様々な解釈はあるものの、OECD/NEAによれば、ステークホルダーの定義は「関心を有する組織関係者・団体や、社会的な意思決定プロセスにおいて役割を担うことに関心を持つ集

*Stakeholder Involvement ; Application of lessons learned from overseas to projects in Japan* : Tomoko Murakami.

(2017年10月26日 受理)

団または個人」とされている。

そのようなステークホルダーとの関わりを考える上での定義から想起されるのは、一部の人々がしばしば使う「国民」の定義である。

「国民」ひとりひとりの価値観や信条は様々であり、知識水準も社会的立場も千差万別であるから、「国民全体で議論」ということは実際にはあり得ない。ステークホルダーの定義及びステークホルダーとの関わりの目的を明確にしなければならない、というのは、このような暴論がまかり通らないようにするための重要な指摘である。

エネルギー政策や原子力の問題におけるステークホルダーとの対話において、完ぺきな成功事例というものはない。最終決定に至ったという意味でスウェーデンやフィンランドにおける最終処分場決定プロセスは成功事例と言えるかもしれないが、それでも問題が無かったわけではない。次節では隣国の韓国における最近の事例を取り上げ、ステークホルダーとの対話が成り立つ要件について考察する。

## II. 韓国「公論化委員会」での議論事例

### 1. 経緯

2017年10月24日、韓国・文在寅大統領は、3カ月以上準備工事を中断していた新古里5/6号機について、建設再開することを閣議決定した。これに至るまでには大韓民国始まって以来の「国民“的”議論」があった(注:国民全体による議論ではない)。

選挙期間中から脱原子力政策を公約に掲げていた文大統領が、表立って「脱原子力への取り組み」を表明したのは6月19日、古里1号機の永久停止式典の場であった。

大統領府はこの問題について、関心を寄せる人々で議論する「討論型世論調査」形式を進めることを決め、7月24日、新古里5/6号機の建設再開是非を議論する目的で、弁護士など9名の委員で構成される「公論化委員会」が設置された。公論化委員会が討論型世論調査を進め、結論が出るまでの約3カ月間、政府は一切の干渉をせず、中立的な立場を貫くこと、公論化委員会の勧告はそのまま受け入れることも併せて表明した。

8月25日より、まず電話調査によるインタビューが開始された。調査を実施したのは公論化委員会から委託を受けた韓国リサーチ、電話調査の対象は無作為抽出された市民である。9月9日までに20,006人から回答が得られ、このうち有意な意見を述べた500人から参加を表明した「市民陪審員(jury)」478人が討論に臨むこととなった。

9月16日、478人の市民陪審員に対して公論化委員会によるオリエンテーションが行われ、原子力推進・反対それぞれの意見を持つ専門家集団より、判断の参考となる各種資料が送られている(ただし反対派が期日までに資料を提出しなかったため、後日郵送された模様)。なお、公論化委員会の討論期間中は、KHNP(韓国水力・原子力公社)等の原子力事業者による原子力広報が政府により禁止されたため、ソウル国立大学等の学識経験者が中心となって韓国にとっての原子力の必要性や、脱原子力政策が取られた場合の経済等への悪影響について情報提供がなされた。6月の討論型世論調査実施の決定以来、韓国メディアは数回にわたり、推進派・反対派双方の有識者の意見を併記し、TVやインターネットにおいても討論イベントを行ってきた。実質3カ月に満たない短期間ではあったが、討論に参加する市民陪審員はもとより、関心を持って情報を得ている市民にはある程度の情報提供がなされたと考えることができよう。

10月13日から15日の3日間、賛成派・反対派双方の専門家によるプレゼン、グループディスカッションを含むワークショップがソウルで開催され、478人のうち471人の市民陪審員が参加した。討論会最終日の10月15日にこの471人による下記2テーマに関する「投票」が行われ、その結果を踏まえて10月20日、公論化委員

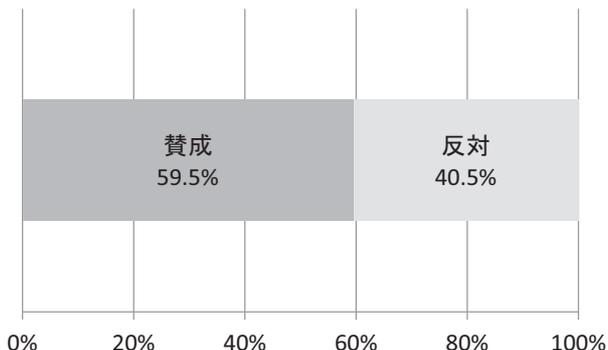


図1 新古里5/6号機建設再開に関する市民陪審員の投票結果

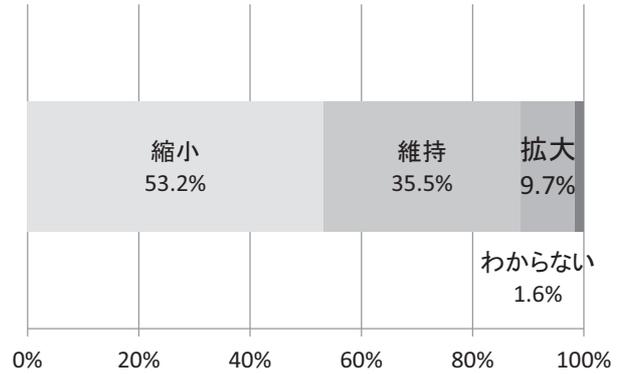


図2 将来的な原子力規模に関する市民陪審員の投票結果

会による勧告が発表された。結果は図1に示す通り、新古里5/6号の建設再開賛成が59.5%、反対が40.5%となった。併せて行われた将来の原子力規模に関する質問では、図2に示す通り「将来的に原子力規模を縮小すべき」とする意見が53.2%となり、「現状維持すべき」の35.5%、「拡大すべき」の9.7%を上回った。

10月22日、韓国大統領府はこの勧告を受け、新古里5/6号の準備工事再開を決定する旨の文大統領の見解を発表し、24日の閣議で正式に同趣旨は決定した。

韓国における原子力規模の議論はこれで終わりではない。文大統領は、市民陪審員による「将来の原子力規模の縮小」支持が50%を超えたことを受け、原子力依存度低下に向けた取り組みに前向きな姿勢を示した。新古里5/6号の建設再開を決定した閣議の場で、同時に新ハムル1/2号機など6基の新規設計計画を白紙に戻すこと、2038年までに寿命を迎える既設炉14基については設計寿命を延長しての稼働を禁止すること、中でも既設炉の中で2番目に古い月城1号機は寿命より早期に廃炉にすることを併せて打ち出した。

更に、脱原子力による立地地域の産業への影響も考慮し、原子力に代わる別の産業の育成や代替エネルギー開発、廃炉技術開発などにも注力する考えも示している。

## 2. 討論型世論調査の是非に係る考察

これまで一貫して原子力利用を推進してきた韓国において、原子力の将来をどうするか、エネルギー構成をどうするか等の議論が、短期間とはいえ数百人規模の市民により行われたことの意義は大きい。

公論化委員会設置の直後は、特に原子力推進派の学識経験者を中心に「原子力やエネルギーの知識のない市民に3カ月弱で判断をしろというのは無理」「そもそも市民に政策の行方をゆだねる手続き自体が違法である」といった批判がなされていた。それに対して「知識のない市民であっても、正しい情報を提供されれば自らの判断が可能である」「新古里サイト周辺に住む300万人以上の財産と健康がかかる問題なのだから、市民に決める権利がある」という反論が、主として原子力反対派の有識者

からなされていた。重要なことは、このような有識者同士の活発な討論が数回以上にわたり広い地域で実施され、その内容が The Korea Times や朝鮮日報や聯合ニュース (Yonhap News) 等、韓国国民の多くが読む主要紙で詳細に報道された事実である。これにより、市民陪審員はどの有識者がどのような根拠に基づいて推進または反対の意見を述べているのかを知ることが出来たし、ひとりひとりの価値観に基づく判断も出来たといえよう。

建国大学校 (Konkuk University) 法学部の Han Sang-hee 教授は、今回の市民陪審員による議論の過程を「憲法で規定された正式な法的手続きではないが、市民も政策議論に参加できる道筋をつけたことに大きな意義がある」と高く評価している。これまで韓国において、政治家でも事業者でも有識者でもない、前項の「ステークホルダー」定義で言えば、「関心を持つ組織関係者」ではなく「社会的な意思決定プロセスにおいて役割を担うことに関心を持つ集団または個人」である市民が政策決定プロセスに直接関わることができた意義は確かに大きいといえるであろう。

「参加者が自分の意見を他人に伝えるだけでなく、他人の異なる意見にも耳を傾け、尊重し、そのようにして意見交換した結果がたとえ期待通りでなくてもそれを受け入れることを、多くの人が体験したことが有意義」とも Han 教授は述べている。

結論を導く前に討論への参加も出来たとはいえ、今回の市民陪審員の「任期」は実質1カ月もない。将来的な原子力規模については過半数の陪審員が「縮小」を支持したとはいえ、いつ頃までにどの程度縮小するか、原子力比率と電気料金との関係はどうなっているのか、韓国における代替エネルギーの可能性はどうか等、新古里 5/6 号建設再開以外のエネルギー政策に広く関わる事項で十分な情報の吟味と議論をする時間は、今回は無かったと考えられる。

政府は新規建設計画の凍結や寿命に達した原子炉を運転延長しない方針を表明したが、この方針に対して原子力推進派の有識者からは早くも「有力な代替案もなく原子力依存度を低減することは韓国のエネルギー安全保障にとって脅威となる」「欧米先進国では 40 年を超えて運転を続けるプラントも多くある中、合理的な理由なく一律に運転延長禁止と決めることはおかしい」等の反論がなされている。

今後、40 年超運転の是非や将来の原子力依存度目標を決定していく際にも今回と同様の市民陪審員による討論型世論調査方式の議論が行われるかどうかは定かではない。しかしながら少なくとも今回議論に参加した市民陪審員には当然、「自分も関わって決定された政策の方向性はどうなるのか、電力不足や産業競争力の低下は起きるのか」といった結果への責任意識がこれまでにない

ほど生じているであろう。ただ「リスクがあるから原子力をやめるべき」と叫ぶだけでその後のビジョンを描いていない反対派とは思考の深度が異なる。日本の政策議論及び意思決定のプロセス上、学ぶべき点は多いように思われる。

### Ⅲ. 日本への示唆

前述の OECD/NEA のステークホルダーとの対話会議では、以下のような示唆も出されている。

- ・参加者の属性が多岐にわたる方がより広く意見が集まり、結果として議論も深みが出ることが多いが、論点を絞り、何を得たかったのかを明確にするべきである。
- ・人は聞きたいことを聞くものであり、関心も持っていないことについて理解を得ることは困難である。信頼構築には時間はかかるが、直接対話を粘り強く続けるのが最短。ステークホルダーとの対話はそれ自体が究極の目標であり、終わりは無い (Never ends)。

この示唆から、前述の韓国の討論型世論調査における政策決定をどう評価するか。更には日本におけるステークホルダーとの対話はどうあるべき、と言えるであろうか。

まず、ステークホルダーの定義とコミュニケーションの目的を明確化することは必須である。韓国の今般の公論化委員会による「ステークホルダー」の抽出は、年代や性別等を無差別に分散させた無作為抽出方法による電話インタビューにより直接意見を聴取し、その結果に基づいて参加者を選定しているの、限られた時間の中で実施された方法としては極めて合理的といえる。議論の目的も「文大統領が提起した問題に対し回答を得るため」と明確であった。

問題はこのような政策決定プロセスには「時間がかかる」ことである。韓国の公論化委員会は3カ月で勧告を出したが、それは既に着手していたプラントの準備工事中断という事情があったからであり、本来、長期的な目標に向けた論点の議論に3カ月が十分か否かは結果を見ただけでは分からない。今後も続くであろう韓国の原子力政策議論における多くの課題を考えれば、可能ならば3カ月よりは長い時間をかけて議論したほうが望ましかったであろう。

もうひとつの指摘である「参加者の属性が多岐にわたるほうが議論に深みが出る」ことは何を意味するのであるか。仮に(あり得ないが)471 人の市民陪審員全員が原子力事業関係者だったとしたら、新古里 5/6 号建設是非については 100% の賛成結果となったであろうし、今後の原子力依存度についても「増加」が多数となったであろう。しかしその場合は反対意見がほとんど出ない中、

「韓国にとって原子力はエネルギー安全保障や安い電力コストや温暖化ガス排出量削減などの理由から、必要。以上」で議論らしい議論も成立せず終わってしまうであろう。そうではなく、推進派が気付かないか、気づいても見過ごしそうな課題を指摘する意味で、反対派との議論は時に大変重要な役割を果たすことがある。

韓国の脱原子力派のオピニオンリーダー的な存在であり、前述のメディア等における推進派と反対派との議論にも頻りに登壇している有識者がいる。ソウル国立大学環境学大学院教授の Yun Sun-jin 氏である。Yun 教授は、韓国が脱原子力すべき理由として「原子力の安全性への懸念、放射性廃棄物を次世代まで残すことの倫理上の問題、代替エネルギーが既にあること、原子力の経済性への疑問」と並んで「最初に韓国が原子力導入を決めた際、ステークホルダーである国民に何の情報提供もされなかった」すなわち非民主的なプロセスであったことを挙げている。電気を使用するステークホルダーに対し、原子力発電事業から必然的に発生する廃棄物や廃止措置など長期にわたる課題を説明することなく、安価な電力を大量に使うことばかりに注力してきた結果、廃棄物処分や廃止措置に係るコストが正しく反映されない歪んだ電気料金体系となっている、と指摘している。もとよりその安価な電力がこれまで韓国のエネルギー安定供給や国際的な競争力に貢献してきたことは理解しているが、その上で、正しいコストを積んだ電気料金体系への改革が必要なことをステークホルダーに説明すべきだ、と述べている。Yun 教授の指摘は過去の政策決定過程や現制度の欠陥への批判にとどまらない。正しくコストを積んだ電気料金体系への変革の具体的な例として、電力インフラファンドのようなものを設置し、そのファンドに電力会社だけでなく地域住民が投資をしてプロジェクトの利益の一部を住民が得るというベネフィット・シェアリング・システムを提案している。

筆者はここで韓国が脱原子力すべきかどうかについて意見を述べるつもりはない。ここで述べたいのは、原子力を使う生活を続けるべきか否かという選択の陰に、エネルギーの生産・消費に留まらない、生き方や価値観にまで及ぶ実に幅広い論点があり、その幅広い論点は時として正反対の意見の持ち主によって提起される傾向にある、ということである。Yun 教授の「脱原子力に向かうべき」という意見自体への賛否は置いておいても、これまでの政策決定プロセスが民主的なものではなかったこと、積むべきコストが反映されていない電気料金体系が

廃棄物等の問題先送りにつながりかねない懸念などは、原子力を推進していく場合でも真摯に受け止めねばならない視点である。安全性の論点も同様であり、脱原子力の立場からの原子力安全性に関する厳しい指摘は時に安全の専門家からみても妥当なこともある。「参加者の属性が多岐にわたる」ことによる「議論の深み」とは、論点の深掘りと、より良い将来像への終わらない取り組みが誘起されることに他ならない。

なお、多様な価値観を意思決定に活用し議論を深めるアプローチは、スウェーデンにおける高レベル放射性廃棄物最終処分場決定のプロセスでも採られた。スウェーデン政府は最終処分事業者である SKB が発電事業者から集めた廃棄物基金の一部を環境団体等、脱原子力を目指す活動をしている組織にも配分し、廃棄物処分を巡る議論への参加資金として活用することを認めた。その結果、廃棄物処分場を巡るステークホルダーとの議論では、短期的・中長期的な環境への影響評価について実に多様な議論がたたかわされ、全て公開文書として保存されて、最後の議論から 10 年近くを経過した現在でも世界中の誰もが閲覧できるデータベースとして保存されている。これも多様な価値観を排除しない議論の良好事例といえるであろう。

日本の事業者や政府には、対象を特定しない画一的なアプローチに偏っている我が国の広報のあり方を見直し、議論の目的を明確にした上で、例えば異論を持つステークホルダー同士の対話の機会を増やす、事業に損害が生じる等の支障が無い限り時間をかけた議論を繰り返す、といった取り組みを進めていくことが期待されよう。

#### — 参考文献 —

- 1) 韓国大統領府公式サイト <http://www.president.go.kr/>
- 2) The Korea Times, Chosun Online (朝鮮日報), Yonhap News, 中央日報など韓国主要各紙。
- 3) "Stakeholder Involvement in Nuclear Decision Making", January 17-19, Paris France. <https://www.oecd-nea.org/civil/workshops/stakeholder-involve2017/>

#### 著者紹介

村上朋子(むらかみ・ともこ)  
日本エネルギー経済研究所



## 核データ研究の最前線

～たゆまざる真値の追及,そして新たなニーズへ応える為に～

## 第5回 IAEAの核データ事業

国際原子力機関 大塚 直彦,  
 ロスアラモス国立研究所 河野 俊彦,  
 日本原子力研究開発機構 国枝 賢,  
 元近畿大学 大澤 孝明

IAEA 核データセクション(NDS)は、核データの収集・整備・配布・教育を通じて、原子力・非原子力分野における核物理の成果の平和利用を半世紀以上にわたり支援している。これらはいずれも国際協力事業であり、核データの先進国である我が国の大学・研究機関の核データ研究者が長年にわたって貢献している。本稿ではセクションの概要と実施事業を紹介する。

KEYWORDS: IAEA, Nuclear Data Section, Data Centre, EXFOR, CRP, Data Dissemination

## I. 歴史と概要

IAEA 核データセクション(NDS)は、IAEAの原子核科学・応用局理化学部(NAPC)に設置された4つのセクション(課)の1つである。1964年に研究・アイソトープ局の物理セクションに設置された核データユニット(NDU)をその起源としており、2014年には設立50周年記念式典が行われた。核データセクションは課長室と3つのユニット(核データサービス・核データ開発・原子分子データ)で構成されており、2017年現在、ここに13人の専門職員と4人の一般職員が配置されている。本稿ではこのうち核データ関連の2ユニットの活動を紹介する。原子分子データユニットについては、その包括的な邦文による紹介である文献<sup>1)</sup>を掲げておく。

1953年国連総会でのアイゼンハワー大統領による“Atoms for Peace”演説を受けて、国連は1955年に第一回原子力平和利用国際会議(ジュネーブ会議)を開催した。それまで機密扱いとされていた原子力に関する研究成果の公開をこの会議が促したことはよく知られている。その事情は核データ分野でも同じである。1953年に創刊されたJournal of Nuclear Energy誌(現Annals of Nuclear Energy誌)を日本物理学会誌にて紹介するな

*Cutting-edge studies on Nuclear Data for Continuous and Emerging Need(5) ; IAEA Nuclear Data Programs : Naohiko Otuka, Toshihiko Kawano, Satoshi Kunieda, Takaaki Ohsawa.*  
 (2017年12月4日 受理)

■前回タイトル

第4回 核図表～壮大なる原子核の地形図～

かで、大塚益比古氏は「創刊号筆頭の論文はノルウェーからのもので、U235核分裂断面積の(低エネルギー領域の)エネルギー変化の測定であり、例のジュネーブ会議の1年前とて各国とも秘密裡にあつた当時のことだから、読んだわれわれは何ともいえぬ清々しい明るい気分を感じたものだつた。」と述懐している。このジュネーブ会議以降の流れのなかで、核データをIAEA加盟国間で共有することの重要性が認識され、その実現が核データユニット発足にあたっての主要課題となった。東西間で規格の異なるパンチカード(図1)を変換するプログラムの開発などを経て、IAEAは「東西陣営間での数値デー

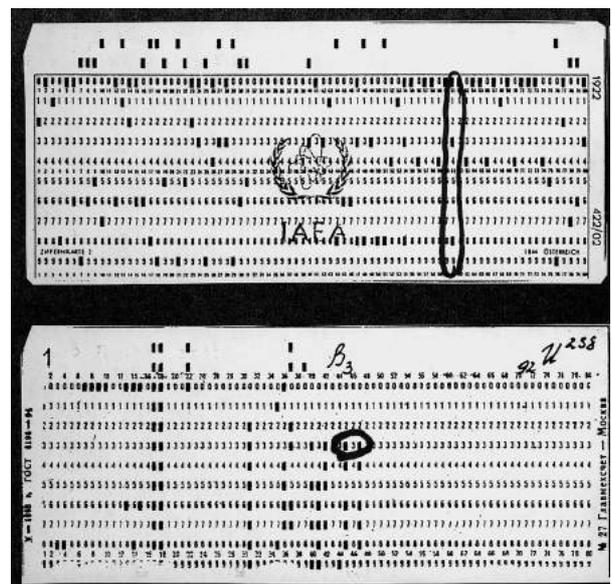


図1 西側(上)と東側(下)のパンチカード。同一サイズながらパンチ方式が異なる。Hans Lemmel氏提供。

タ交換」という当時としては画期的な事業を開始した。また収集された測定データに基づく $^{233,235}\text{U}$ ,  $^{239,241}\text{Pu}$ の4核種の熱中性子断面積の推奨値(評価値)の決定も初代ユニットヘッド Carl H. Westcott が主導した課題である。

核データの測定結果の加盟国間の交換とその測定成果に基づく核データ評価の推進は現在も核データセクションの主要事業であり、その成果の普及を通じて加盟国における原子核に関する科学・技術の推進を支援している。その事業内容を隔年毎に検討するのは国際核データ委員会(International Nuclear Data Committee; INDC)であり、局長が任命した委員が隔年ごとにIAEA本部にて事業成果と将来計画の議論を行い、局長への勧告を実施する。またこの委員会とは独立に、1995年には有馬朗人氏を委員長とする評価委員会(いわゆる「有馬パネル」)を事務局長室が主催し、その報告書は「国連のいかなる他事業とも直交している」などの表現でIAEAが核データ事業を継続・発展させることの重要性を極めて明確に指摘した。

本稿ではIAEAにおける核データ収集・評価・配布・教育の各事業の一部を紹介する。

## II. 実験核データ収集事業(EXFOR)

IAEAの核データ収集事業で最も長い歴史を有する事業は原子力応用で重要となる低エネルギー中性子入射核反応の測定データの収集である。すでに存在した米(Brookhaven), 仏(Saclay), 旧ソ連(Obninsk)の3収集拠点(データセンター)が収集対象としていなかったアジア・オセアニア・南米での測定データが核データユニット発足当初の収集対象とされ、その実施のために数値ファイル(DASTAR)とその索引ファイル(CINDU)からなるシステムが開発された。続いて1967年には上記4センターが収集データの交換に合意した。各センターが独自の書式を採用していることによる不便を解消するために策定された共通書式がEXFOR(EXchange FORmat)であり、1970年からこのEXFORを通じたデータ交換が4センター間で開始された。更に、1976年からは荷電粒子ならびに光入射反応の測定データを収集するデータセンターが合流し、国際核反応データセンター網(International Network of Nuclear Reaction Data Centres; NRDC)が発足した。

現在、表1に示す13のデータセンターが測定施設の所在地や入射粒子の種類に応じて収集を分担している。測定成果が図でのみ示されている論文については、その数値データ入手のための著者とのやりとりが欠かせない。そのため、地域ごとにデータセンターを設置し、そのセンターが測定拠点との協力体制を維持することが測定データ収集事業においては必須である。

表1 国際核反応データセンター網加盟センター一覧  
(詳細については <http://www-nds.iaea.org/nrdc/>を参照)

国	機関(センター略称)
アメリカ	ブルックヘブン国立研究所(NNDC)
インド	バーバ原子力研究センター(NDPCI)
ウクライナ	原子核研究所(UkrNDC)
韓国	韓国原子力研究所(KNDC)
中国	中国原子能科学研究院(CNDC)
日本	北海道大学(JCPRG) 日本原子力研究開発機構(JAEA)
ハンガリー	原子核研究所(ATOMKI)
ロシア	物理動力工学研究所(CJD) モスクワ大学(CDFE) 全連邦実験物理研究所(CNPD)
国際機関	国際原子力機関(NDS) 経済協力開発機構原子力機関(NEA DB)

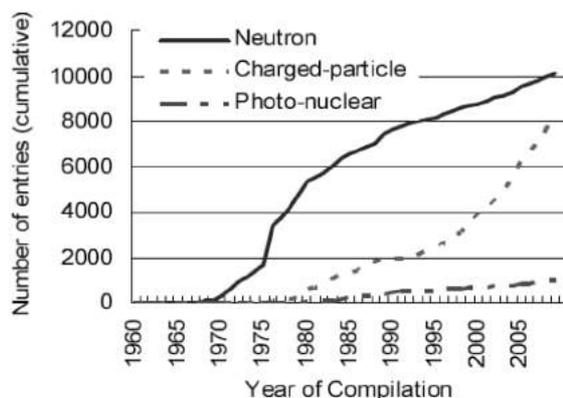


図2 EXFORに格納された入射粒子別の測定件数の推移

図2にEXFORに格納された測定件数(累積)の推移を示す。1970年のEXFORによるデータ交換開始時からしばらくは中性子入射反応データが収集対象の中心であったが、医療用核種生成など非原子力分野での核データの利用の増加を反映して、収集対象の中心が1990年代から荷電粒子入射データに転じていることがわかる。EXFORライブラリに蓄積されたデータはセクションのウェブ検索作図システム(<http://www-nds.iaea.org/exfor/>)にて公開されている。

## III. 評価済核データ整備事業(CRP)

前章で紹介した収集事業で得られた測定データはそのままでも他の測定・理論データとの比較に有用である。しかし、核データの他分野への応用には、測定データをもとに決定された推奨データ(評価済データ)を用いるのが一般的である。日本のJENDLやアメリカのENDFは評価済核反応データをまとめた代表的なライブラリである。これら汎用ライブラリを補完する特定用途のためのライブラリ(特殊目的ライブラリ)の開発・検証を国際協力活動として組織化することも核データセクションの主要事業の一つである。その実施のために、核データの

表2 核データ関連の最近のIAEA CRPの一覧  
 (「アクチノイド」は英語原文では“actinide”である)

プロジェクト名(邦訳)	実施期間
中性子入射標準反応断面積	2002-2006
トリウム・ウラン燃料サイクルのための核データ	2002-2007
治療用放射性核種生成のための核データ	2003-2007
反応計算パラメータライブラリ(RIPL-3)	2003-2008
アクチノイド崩壊データの更新	2005-2010
イオンビーム分析参照データベース	2005-2010
中性子放射化分析参照データベース	2005-2010
放射線治療重粒子相互作用データ	2007-2010
核融合核データライブラリ(FENDL-3)	2007-2011
マイナーアクチノイドの核反応データ	2007-2011
アクチノイドの即発核分裂中性子スペクトル	2009-2015
粒子線励起 $\gamma$ 線放出分析(PIGE)参照データベース	2011-2015
荷電粒子入射モニター反応と医療用核種生成のための核データ	2012-2017
国際原子炉・核融合ドシメトリデータファイル(IRDF)の検証と改善	2013-2018
一次放射線損傷断面積	2013-2018
$\beta$ 遅発中性子放出の参照データベース	2013-2018
光核データライブラリ更新と光子強度関数の参照データベース	2016-2020
核分裂断面積計算パラメータライブラリ	2016-2021

評価者・測定者、更には利用者を招いて共同研究プロジェクト(Coordinated Research Project; CRP)を組織することが多い。表2に核データセクションが組織した最近のCRPの一覧を掲げる。これらの一部についてはCRP終了後も関係者がデータベースの更新を継続しており、これをデータ開発プロジェクト(Data Development Project; DDP)と呼んでいる。以下では、読者に関心があると考えられる3つのCRPを紹介する。

### 1. トリウム・ウラン燃料サイクルのための核データ

$^{235}\text{U}$ や $^{239}\text{Pu}$ のような主要重核のデータは各核データライブラリの中心に位置づけられるものであるが、准主要核種とも言えるウラン同位体やトリウム・アメリシウムのようなマイナーアクチノイドの核データ整備であれば、目的を特化した国際協力プロジェクトとして成立させやすい。「トリウム・ウラン燃料サイクルのための核データ」はまさにそのようなプロジェクトであり、主要核データライブラリプロジェクトがさほど注力してこなかったトリウム炉開発用の高信頼度核データファイルが、各国から招かれた測定・理論・評価の専門家の国際協力により作成された。トリウム燃料サイクルでは、天然に多く存在する $^{232}\text{Th}$ を中性子捕獲によって $^{233}\text{U}$ に変換し、それを核燃料として利用する。中心となるのは $^{232}\text{Th}$ と $^{233}\text{U}$ 、さらにその燃焼過程で生成するプロトアクチニウムとウランの同位体の核データである。

このような国際協力プロジェクトでは、既存の核データライブラリの比較・検討を通じ、出来合いのデータ

ファイルを推奨するにとどまることがある。国際プロジェクトの成果として自国の核データライブラリの一部が採用されることは、限定的とはいえ国際的な承認が得られることであり、その獲得にはある種の駆け引きと力学がはたらく。しかしながら本CRPで作成された $^{232}\text{Th}$ の評価済データファイルでは、最新の測定に基づく共鳴パラメータをとりこみ、統計モデル計算を全面的に採用し、さらに共分散データを整備することにより、重核データ評価の新しい手法の開発にまで踏み込んだ検討が実施された。実際このプロジェクトでのデータファイル作成法は、現在の核データライブラリの標準的手法となっている。

FENDLのように核融合炉開発に特化した核データライブラリは例外として、IAEAのCRPで作成されるのは格納核種が限定された特殊目的核データライブラリであることが多い。本プロジェクトの最終成果物として得られた $^{232}\text{Th}$ の評価済データファイルはENDF/B-VIIに採用され、トリウム・ウラン燃料サイクルに対する炉物理計算データとして利用者に提供されている。加えて $^{231,233}\text{Pa}$ の評価済データファイルがENDF/B-VIIに採用されている他、 $^{232,233,234,236}\text{U}$ の評価済データが核データセクションのウェブサイトよりダウンロードできる。

### 2. 核融合核データライブラリ(FENDL-3)

世界各国における核融合炉に関する研究の多くは、国際熱核融合実験炉(ITER)の開発が柱となっている。核反応データは無論、核融合炉開発における必須の基礎データである。しかし今日においても、核データライブラリ開発は各国(米国、日本、EU諸国、ロシア、中国等)で独自に進められており、ある程度のデータ相互利用や知見の共有が行われつつも、実際には異なる評価済データを収録しているのが現状である。これは、参照している断面積の測定値や測定値の内外挿に用いる核反応モデルおよびモデルパラメータが異なるためである。当然、各国のライブラリを利用した種々のシミュレーション結果は完全には一致しない。ITERの開発は国際プロジェクトであるため、用いる核データを統一しないと各国の解析結果に齟齬が生じ、果てには各国の信頼関係を損ねる問題に発展しかねない。

FENDL(Fusion Evaluated Nuclear Data Library)は、各国が核融合炉開発で利用する核データの統一のためにIAEAが整備・公開している核データライブラリであり、ITERが参照ライブラリ(reference library)として採用している。その整備にあたっての主な方針は以下の通りである：

1) 核種毎あるいはエネルギー領域毎に、各国のライブラリから最も妥当なデータを抽出し収録する。すなわち、新規のデータ評価は行わない。

- 2) データの妥当性の検証のために、最新の断面積測定値との比較のみならず、有限体系における中性子透過等のシミュレーション結果と実測値との比較(核データベンチマーク解析)を行う。
- 3) 一般的な核データ格納書式(ENDF-6 書式)のみならず、炉設計や材料開発のシミュレーション現場でただちに利用できる書式(ACE 書式など)でライブラリを提供する。

すなわち、この事業は各国が採用している評価済データに対する国際的な評価・判断を仰ぐ公平な機会となり、またそこでは、核融合炉に関する体系計算の予測精度が判断基準となる。(ただし、核融合分野で最適な核データが核分裂炉に関わる種々のシミュレーションにおいて最適とはならないことは多々ある。)

さて、ライブラリの第一版である FENDL-1 が整備されたのは 1990 年代半ばである。途中 FENDL-2 を経て近年、FENDL-3 を公開するに至った。ITER 開発の現場からの要望により、前バージョンに比べて核種数が倍以上に引き上げられ、FENDL-3 は約 180 核種をも網羅するライブラリとなった。また、国際核融合材料照射施設(IFMIF)の建設が視野に入り、入射中性子エネルギーの上限がこれまでの 20 MeV から 150 MeV へ拡張されるとともに、中性子に加えて陽子や重陽子が入射粒子に加わった。あわせて格納対象が共分散や放射化断面積に拡充されたのは、ライブラリ全体の完備性が重視されたためである。中性子および陽子入射反応に関して、収録核種の実に 4 割近くで国産核データライブラリ JENDL-4.0 および JENDL 高エネルギーファイルが採用されたことは特筆に値する。また、ベンチマーク解析においては、原子力機構 FNS 等のデータが多く参照されるなど、評価された核データの検証においても、わが国は米国や欧州諸国に勝るとも劣らぬ大きな国際貢献を果たしている。

### 3. アクチノイドの即発核分裂中性子スペクトル

即発核分裂中性子スペクトル(以下 PFNS)はいつの時代にも「古くて新しい問題」であった。核データ国際会議では毎回 PFNS のセッションが開かれ、IAEA では、筆者(大澤)が出席しただけでも 1980 年代から数次にわたって CRP が開催された。最近では 2008~2014 年の CRP において議論が重ねられ、その成果は IAEA の Roberto Capote 氏の尽力で 106 ページにおよぶ論文<sup>2)</sup>にまとめられた。

PFNS が常に「新しい問題」であり続けたことには、それなりの背景がある。応用面からみると、炉物理計算の精密化に伴うデータ精度の高度化の要求、核変換の研究に伴う対象核種の拡大(主要 5 核種からマイナーアクチノイドを含む領域へ)、加速器駆動炉(ADS)の研究のための高エネルギー核分裂、材料損傷の研究で重要な

PFNS の MeV 領域成分の強度などがある。一方、素過程である核分裂物理と即発中性子放出メカニズムの研究が進み、それを計算・評価に取り入れる必要がでてきたということもある。以下では主な論点を簡単に要約する。

- ・測定データの信頼度：PFNS の値と形状は中性子検出器の検出効率のエネルギー依存性や散乱二次中性子の混入に影響される。1 MeV 以下の低エネルギー領域ではシンチレータの効率が大きく変化するため、この効果が現れやすい。MeV 領域では計数率が keV 領域に比べて数桁小さいため、統計的不確かさが大きくなりがちである。また、PFNS の測定は、スペクトル形状の相対測定または<sup>252</sup>Cf などの標準スペクトルに対する相対比から求められるので、異なるエネルギー間の相関は評価の方法や参考にした標準スペクトルに応じて複雑に変化する。
- ・即発中性子放出メカニズム：当初は励起核分裂片からの蒸発モデルで考えられていたが、これは正確には様々な励起エネルギーを持つ分裂片からの中性子の連続放出と考えなければならない。そこで、Madland らは中性子を放出しながら順次温度を下げる核分裂片という描像を定式化した。筆者(大澤)はこれに、核分裂過程のマルチモード性を考えあわせる方法を提案した。近年、LANL では崩壊過程を Hauser-Feshbach モデルで扱い、モンテカルロ法で追跡する方法論を探求している。

なお、核分裂の断裂点(scission point)では、大変形核のネック部分で核ポテンシャルが急激に変化することから、この瞬間に動力学的に放出される「断裂中性子(scission neutron)」が存在するのでは、という説が昔からあった。それが全 PFN 数の 30% にも達すると主張する人もいたが、現在では多くとも数%以下と考えられている。さらに、従来、即発中性子は核分裂片のクーロン加速の後に起こると考えられてきたが、即発中性子放出は  $10^{-20} \sim 10^{-18}$  秒程度の短時間で起こるため、核分裂片のクーロン加速との競合(加速途中での中性子放出)が起こりうる、と考えられる。筆者(大澤)らのモンテカルロシミュレーション<sup>3)</sup>では、核分裂片の運動エネルギーが最終値の 90% に加速される以前に放出される中性子数が 10~15% 程度存在し、PFNS の低エネルギー成分に影響するという結果が得られた。

以上のほか、関連する多くの問題があるが、Capote の労作<sup>2)</sup>に浩瀚な文献とともにまとめられているので参照していただきたい。

## IV. 核データ配布・教育事業

核データファイルは計算コードによって処理されることを前提に設計されたテキストファイルであり、利用者



図3 Isotope Browser と開発者 Marco Verpelli 氏

が直接その内容を閲覧するには必ずしも使い勝手がよくない。そこで、データファイル群を一旦リレーショナルデータベースシステムに格納した上で、それを検索・作図するためのインターフェースを提供することが重要となる。IAEA で最初に電子メールやウェブを取り入れるなど、核データセクションではデータサービスの近代化に早くから努めてきた。読者にはぜひセクションのホームページ(<http://www-nds.iaea.org/>)を訪れていただきたい。Google Analytics によれば、IAEA の全ウェブコンテンツの閲覧数の実に約 8 割を当サイトが占めている。最近では IAEA 初のモバイルアプリ “Isotope Browser” を公開し、実験室など現場での核データ利用環境の改善を図っている。これは Android や iPhone 等で 4,000 以上の核種の基本データを閲覧する無料アプリであり、日本語を含む様々な言語のバージョンを App Store や Google Play から提供している。

核データセクションはワークショップの主催・共催を通じた核データの利用や研究開発の促進にも力を入れている。その主要なものとしてトリエステの国際理論物理センター (ICTP) において実施するワークショップが挙げられる。最近実施されたトリエステワークショップのテーマには、「先進炉技術のための核反応データ」、「中性子ドシメトリと中性子放射化分析のための核データ」、「医学利用のための核データ」などがある。各分野を代表する研究者が実施する講義と演習は大学院生・若手研究者にとって核データを学ぶ絶好の機会となっている。ICTP で開催するワークショップでは旅費・滞在費の補助対象が途上国出身の参加者のみとなっており、このこともあってか邦人参加者が極めて少ない現状が惜しまれる。

核データに関心のある若手のインターンとしての受け入れも実施しており、日本からはここ数年で北海道大・早稲田大、東京大の大学院生を受け入れた。

## V. 終わりに

本稿では IAEA 核データセクションの歴史・概要に引き続き、実験核データ収集、評価済核データ整備、核データ配布・教育のそれぞれの事業を紹介した。核データ評価に関しては、原子力のための評価事業の紹介にとどまったが、表 2 が示すように、分析・医療など非原子力のための評価事業も実施することで先進国・途上国双方の新たなニーズに応えようとしている。情報技術の更なる発展が見込まれるなか、整備された核データを加盟国の誰もが簡単に使える形で提供することも引き続き大きな課題になるであろう。このような事業体制の維持とその発展のために、IAEA 核データセクションの課員は一丸となって日々努力している。

### — 参考資料 —

- 1) B. J. Braams 他, 「小特集 IAEA における原子分子データ」プラズマ・核融合学会誌 89(9), p579-614, 2013.
- 2) R. Capote *et al.*, Nucl. Data Sheets 131, 1(2016).
- 3) A. Matsumoto *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. 49, 782(2012).

### 著者紹介



大塚直彦 (おおつか・なおひこ)  
国際原子力機関 原子核科学・応用局理化学部核データ課  
(専門分野/関心分野) 原子核物理, 核反応理論・実験, 核データ



河野俊彦 (かわの・としひこ)  
ロスアラモス国立研究所 理論部門  
(専門分野/関心分野) 核物理, 核反応理論, 核データ

国枝 賢 (くにえだ・さとし)

本誌, 59[10], P.48(2017)参照.



大澤孝明 (おおさわ・たかあき)  
元近畿大学 理工学部  
(専門分野/関心分野) 原子核物理, 核データ評価

## 材料挙動と計算機シミュレーションの接点

## 第4回 第一原理計算によるタングステン中の水素の研究

九州大学 大澤 一人

核融合炉材料として利用が予定されているタングステンと水素および水素同位体との相互作用を第一原理計算によって研究した。核融合炉にタングステンを使う理由の1つは水素を全く固溶しない金属という点が期待されたからである。ところが、実験では表面近傍に相当量の水素が残留し、計算でも空孔に多くの水素が捕獲されることがわかった。さらに、空孔中の水素は特異な配置をするなどの結果が得られた。本稿では、このような他の金属にないタングステンの特異性も述べる。また、熱力学的モデルにより有限温度の状態も解析した。

**KEYWORDS:** fusion reactor, tungsten, hydrogen, hydrogen isotope, vacancy, first-principle calculation, thermodynamic model

## I. はじめに

核融合炉では設計上、ダイバーターと呼ばれる部位が強い照射に晒される。そこで、タングステンを使ってダイバーターの表面を覆い保護することが計画されている。タングステンを核融合炉で使う理由は、(1)融点が高い(2)水素溶解度が低い(3)熱伝導度が高い(4)耐摩耗性に優れ(5)誘導放射化が少ない、などの特徴があるからである。特に、核融合反応は $D+T \rightarrow n+{}^4\text{He}$ であるから、燃料に放射性の三重水素が使われる。そこで炉材料が大量の三重水素に汚染されないためにも(2)の水素溶解度が低い条件は重要、ということが本研究を始める動機である。しかし、照射環境下で発生した空孔や不純物などの格子欠陥に水素が捕獲される可能性があり、実際に照射されたタングステン表面近傍に相当量の重水素の残留が観察されている<sup>1)</sup>。その他、核融合炉関連以外にもタングステンに見られる特異性が明らかになったので本稿で紹介しようと思う。これを機会に金属水素系の研究に興味を持ってもらえるなら幸いに思う。

## 1. BCC 金属中の水素に関する定説

BCC(体心立方格子)金属には図1(a)で示したように主な格子間原子のサイトはT-siteとO-siteの二種類がある。水素のような小さな侵入型元素はT-siteが安定であるが、炭素のように大きな元素はO-siteに入る方

*Computational modeling of the behavior of nuclear materials (4); Study of hydrogen in tungsten by first-principle calculation: Kazuhito Ohsawa.*

(2017年9月29日 受理)

■前回タイトル

第3回 粒界破壊における破壊力学試験と第一原理計算

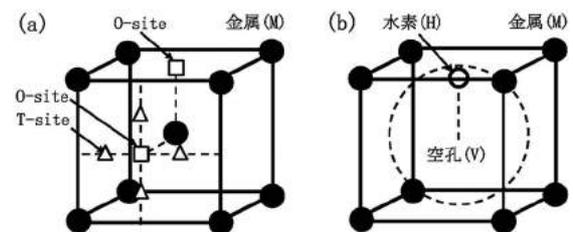


図1 BCC 金属中の主な格子間原子サイトと空孔  
(a)△ T-site, □ O-site, (b)空孔中の水素の構造

が安定である。また、空孔は強い水素の捕獲サイトである。空孔内に水素が1つだけ捕獲される場合は図1(b)のようにO-site近傍が安定である(正確にはO-siteよりも空孔中心に近い位置)。水素に関するこのような安定構造はBCC構造をとる遷移金属に共通した特徴である。また、従来から多くの第一原理計算やチャネリング実験によっても確認されており正しいと考えられる。さて、空孔には複数個の水素の捕獲が可能であり、その際の結合エネルギーや安定構造、さらに何個まで捕獲可能かという問題を本稿ではまず述べてゆくことにする。

## II. BCC 金属空孔中の水素の安定構造

## 1. 計算方法

BCC 金属空孔中の水素の安定構造は密度汎関数法に基づく第一原理計算によって計算した。局所的に水素密度が高い状態も扱うので、第一原理計算が最も信頼できる。核融合炉材料のタングステンと対比するために他の6種類のBCC金属についても同様の計算を行った<sup>2,3)</sup>。

計算に使ったのは第一原理計算の汎用コードであるVASPである。計算ではBCC格子の $3 \times 3 \times 3$ から $6 \times 6 \times 6$ まで様々な大きさのスーパーセルで計算し、大きさと計算結果の依存性を吟味した。収束条件としては

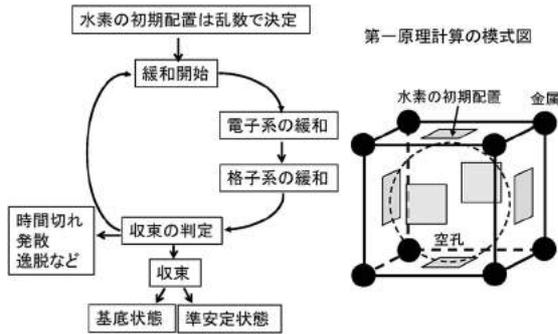


図2 第一原理計算の手順と乱数で与えられる水素の初期配置の分布

個々の原子に働く力の成分の大きさが  $2 \times 10^{-3} \text{eV}/\text{\AA}$  になるまで格子緩和を繰り返した。スーパーセルの大きさや収束条件は計算結果にある程度影響するが大きな問題ではない。

第一原理計算は図2のような手順で行った。まず、原子の初期配置として適当なものを選び、電子系の緩和、格子系の緩和、収束条件の判定を行う。収束条件に当てはまらない場合は原子の位置を少し動かして同様の計算を繰り返す。やがて安定構造に到達するまで待つ。従って、初期配置が真の安定構造に近いほど早く収束条件を満足する。また、一般的に対称性の高い構造の方が計算は早く収束する。

BCC 金属の空孔では水素は図1(b)のように O-site 近傍が安定である。しかし、本研究では他の安定構造をとる可能性も考慮し、図2のように水素の初期配置は乱数を使ってある程度ランダムに分布するようにした。複数個の水素が捕獲される場合はお互いに遠くなる配置が安定である。そこで、水素が2個以上の場合はお互いに遠くの O-site に割り当てた。この方法で水素が6個までの安定構造が計算できる。水素が7個以上の場合は1つの O-site 近傍に2個の水素を割り当てる。ただし、水素の初期配置をランダムにすると困った問題が起こる。まず、対称的な構造でなくなるので計算の収束には時間がかかる。さらに、制限時間内に収束しない、あるいは準安定状態に到達する。しかし、いくつかの構造の中から本当に安定な構造(基底状態)を選ぶことができ、結果的に正確な情報が得られるという利点がある。

2. 空孔内の水素の安定構造

BCC 構造を持つ遷移金属はV族のV, Nb, Ta, VI族のCr, Mo, W, VIII族のFeの7種類である。空孔中の水素の安定構造は大きく二通りに分類できる。

まず、V, Nb, Ta, Cr, およびFe空孔中の水素の構造を図3に示す。この時の安定構造は水素がO-siteの近傍にある。また、O-siteは6個存在するので空孔に水素は最高で6個まで捕獲される。これは従来の第一原理計算とよく一致していた<sup>4-6)</sup>。ただし、水素が空孔に4

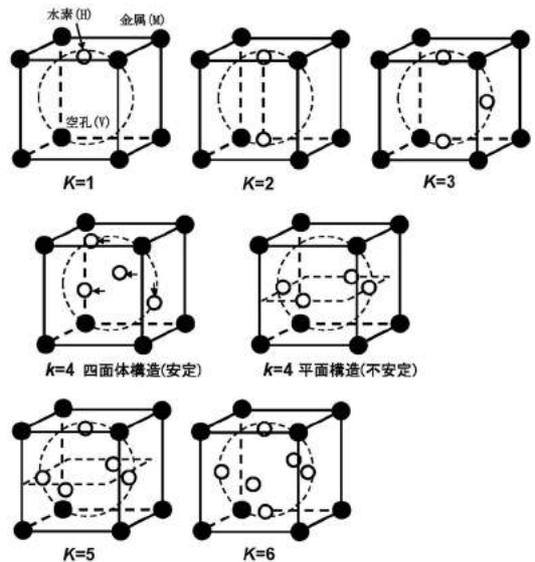


図3 BCC 金属(V, Nb, Ta, Cr, Fe)空孔中の水素の安定構造の模式図

kは空孔中の水素の個数。水素が4個の場合は平面構造より四面体構造が安定である。

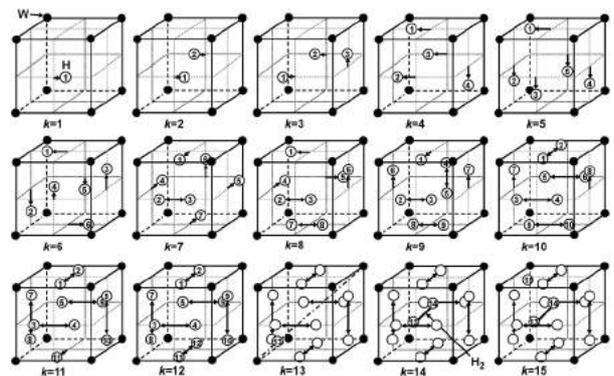


図4 W および Mo 空孔中の k 個の水素の安定構造

個捕獲された場合の安定構造に関しては過去の論文には誤りがある。多くの論文では平面的構造が安定とされているが、7種類のBCC金属空孔に共通して言えることは、図3のように4個の水素が立体的な四面体構造をとる方が安定である(水素間の斥力でO-siteより矢印の方向に少し動く)。正確な安定構造計算が重要であることは言うまでもないが、水素や水素同位体の場合は零点振動エネルギーを計算する時にこの正しい位置情報は特に重要になる。

WとMo空孔中の水素の構造は図4のように複雑である。捕獲される水素の個数が少ない時は、他のBCC金属と同様にO-site近傍が安定である。しかし、水素の個数が増えるとT-siteの方向にずれていく。そうするとO-site近傍には大きな隙間ができるので6個以上の水素の捕獲も可能になる。結局最高で12個までの水素が捕獲される。12個の水素の安定位置はタングステンではほぼT-siteであるが、モリブデンではそうとも言えない。幾何学的にT-siteに特別な意味があるわけ

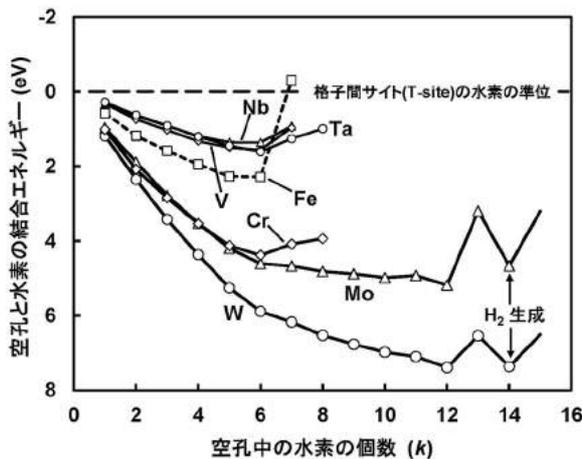


図5 BCC金属空孔と水素の結合エネルギー  
ただし、この図では水素の零点振動エネルギーの影響は含まれていない。

ではなく、水素に働く力の均衡がその場所で偶然とれただけと考えられる。WとMo空孔に多くの水素が捕獲される理由は後の考察で議論する。

### 3. 空孔と水素の結合エネルギー

空孔と水素の結合エネルギーを示す。BCC金属の格子間に固溶した水素が空孔に捕獲される前後のエネルギー差を結合エネルギーとして定義する。計算式は  $E = E[M_{n-1}Vac] - E[M_{n-1}VacH_k] + k\{E[M_nH^I] - E[M_n]\}$  である。ここで、M, Vac, Hは金属元素、空孔、水素を表す(バナジウムと混同しないように空孔をVacとした)。Eはスーパーセルの凝集エネルギー、H<sup>I</sup>は格子間サイトの水素を表す。例えば、右辺第二項の  $M_{n-1}VacH_k$  は  $n-1$  個の金属と1個の空孔と  $k$  個の水素で構成されたスーパーセルを表す。M<sub>n</sub>は金属元素  $n$  個でできた結晶を表す。また、ここまでの計算は水素の零点振動は考慮していない。

図3と図4で示したように水素が最も安定な構造をとる時の空孔と水素の結合エネルギーを図5に示す。この図からもV, Nb, Ta, Cr, Feの空孔には最高で6個、WとMoの空孔には12個まで水素が捕獲できることがわかる。特に、タングステン空孔と水素の結合は強く、水素を6個以上捕獲しても結合エネルギーは少しずつ増加する。空孔中に水素分子(H<sub>2</sub>)が生成されないかも検討したが、水素分子は解離して空孔内表面に付着する。ただし、WとMo空孔では水素が14個( $k=14$ )の時に空孔の中心に水素分子の形成がみられる。2個以上の水素分子は形成されない。

## III. 熱力学的モデル

第一原理計算で得られる情報は絶対零度における系の状態である。そこで熱平衡状態を仮定した熱力学的モデ

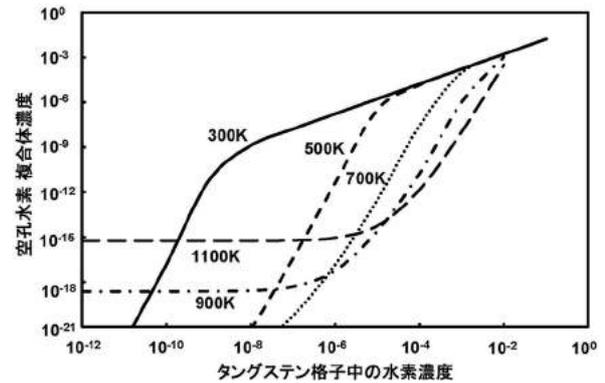


図6 空孔の個数が可変のAモデルで計算した水素濃度や温度と空孔(空孔水素複合体)濃度の関係

ルを使い有限温度でのタングステン-水素系の状態を解析した<sup>7)</sup>。空孔の扱い方の違いで2つのモデルを設定した。金属中の空孔は水素の存在で生成エネルギーが大幅に小さくなり、自発的に大量の空孔(空孔水素複合体)が生成される場合もある。いわゆる空孔の超多量生成が起こる。そこで1つ目のモデルはタングステン空孔の個数を可変とし新しい空孔の生成を許すAモデル。2つ目は照射環境下で空孔の超多量生成は実験的に観察されることがないから空孔の個数を一定に固定したBモデル。この場合、空孔は照射による弾き出しなどによって導入されることを想定した。二原子空孔など大きな空孔クラスターは単純化のために考慮しない。以上の2つのモデルによってタングステン-水素系を解析する。Aモデルの空孔の個数が可変の場合は自由エネルギー

$$F = U - TS$$

を極小にする状態が実現する。Uは内部エネルギーで、空孔の生成エネルギーや空孔と水素の結合エネルギーなどから構成される。Tは温度、Sはエントロピーで空孔や水素などを格子中のどこに置くかに関する配置のエントロピーと格子振動のエントロピーから構成されている。一方、Bモデルの空孔の個数が一定の場合は

$$F = U - TS - \lambda N$$

を極小にする状態が実現する。ここでNは空孔の個数でλはラグランジュの未定乗数である。

Aモデルでは図6のように空孔水素複合体濃度の水素濃度および温度との依存性が得られる。タングステン格子中の水素濃度が低い極限で、空孔濃度は熱平衡空孔濃度になる。しかし、水素濃度が高くなると空孔の超多量生成が始まり空孔濃度は急に大きくなる。また、条件が揃えば十分多くの空孔が生成するので、タングステンに固溶したほぼ全ての水素が空孔に捕獲される。温度が低い方が計算上は空孔の超多量生成が起き易い。しかし、実際は表面からの空孔の拡散が必要なので、ある程度高温で起きる現象である。

タングステン空孔には12個まで水素が捕獲されることが可能であるが、Aモデルで計算した場合は広い温度

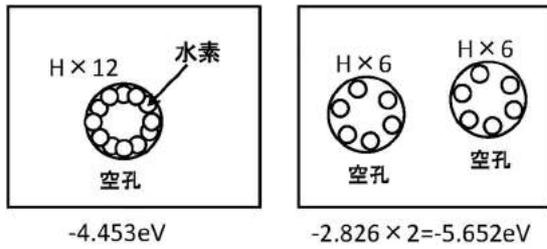


図7 空孔水素複合体 VacH<sub>12</sub>と VacH<sub>6</sub> 2個の模式図とその生成エネルギー

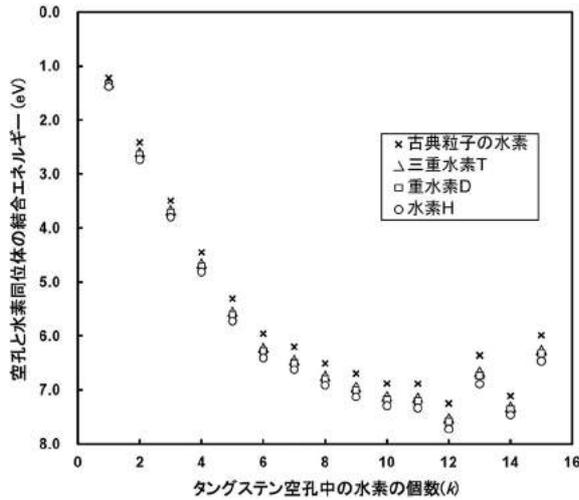


図8 W空孔と水素同位体の結合エネルギー

と水素濃度領域で水素を6個捕獲した空孔水素複合体が圧倒的に多くなる。それは図7で示すように1つの空孔に水素を12個詰め込むよりも空孔を2個生成して水素を6個ずつ詰め込む方がエネルギー的に得だからである。その上、エントロピー的にも点欠陥が2つの方が得である。

Bモデルで得られる結果はAモデルとはだいぶ異なる条件によっては空孔に7個以上の水素が捕獲されることもある。ただ紙面の関係で詳しく述べるのは控える。

#### IV. 水素同位体の影響

核融合炉では二種類の水素同位体DとTを使う。そこで水素同位体が共存する系の問題について考えてみよう。これまでの計算では水素を零点振動のない古典粒子として扱ってきたが、異なる質量を持つ水素同位体では零点振動エネルギーの違いが結合エネルギーに影響する。図8で示すように軽い水素同位体の方が空孔との結合エネルギーは大きい。核融合炉では放射性Tの炉壁材料での残留が問題になっているが、空孔との結合力が最も小さいのもTである。その性質を利用しDの存在がTの残留を阻害する効果があると考え、現在計算が進行中である。

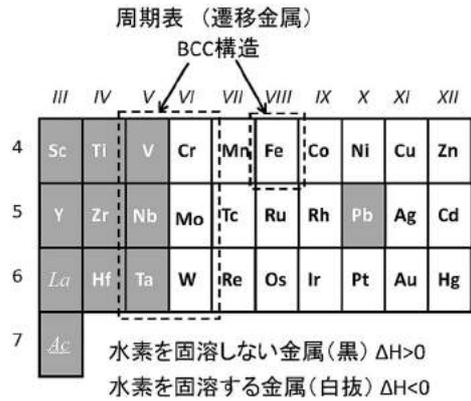


図9 遷移金属の水素溶解性と単体での構造を示した周期表

#### V. タングステンにみられる特異性

タングステンが核融合炉で使用されることが決まり本格的に水素との相互作用の研究が始まったものと思われる。ところが、始めてみると図4で示したように空孔中の水素の安定構造など多くの特異性を持つので、その点をまとめることにする。本稿ではタングステンの特異性として(1)融点が最も高い(2)水素溶解度が最も低い(3)空孔中の水素の安定構造、について述べてきた。

図9の周期表を見ると遷移金属と水素溶解度との関係がわかる。V族とVI族を境目に左側が水素を固溶する金属、右側はパラジウムを除いて水素を固溶しない金属に分かれている。タングステンは水素を最も固溶しない金属であるが、周期表では境目のVI族に属している。しかもV族とVI族の遷移金属は両方ともBCC構造である。鉄はVIII族でBCC構造をしているが、常磁性ではFCC構造になることが第一原理計算から示されており、本来はFCC構造である。従って、水素溶解度とBCC構造の間には何らかの相関性があると思われるが満足な説明は見ることがない。

タングステンは他にも変わった性質がある。第一原理計算によると通常の金属は空孔(単空孔)より二原子空孔が安定である。しかし、タングステンは(4)二原子空孔の方が不安定である<sup>8)</sup>。そこで、図10で示すように計算上は単空孔が結合することはない。また、弾性定数から異方性因子を計算すると  $1.0 \approx 2C_{44}/(C_{11}-C_{12})$  より(5)タングステンは唯一の等方弾性体であることが知られている。特に照射環境下で使用する場合は(4)の二原子空孔の不安定性は照射組織の形成に影響することが予想される。

#### VI. まとめと考察

本稿では核融合炉の炉材料として利用される予定のタングステンと水素との相互作用について、第一原理計算

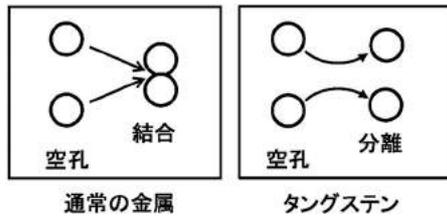


図10 二原子空孔の生成を示す模式図

と熱力学的モデルから得られた結果を述べてきた。またタングステンには他の金属にない特異性を持つことも紹介してきた。

タングステン空孔に水素が12個も捕獲されることは、その低い水素溶解度から説明することができる。図11はBCC遷移金属中の水素原子1個のエネルギー準位を表している。Cr, Mo, W, Fe中の格子間サイトの水素は真空の水素分子よりもエネルギー準位が高い。これらの金属は水素を固溶し難いことを示している。特に、タングステンに水素が固溶する現象は大きな吸熱反応である。また、その格子間サイトの水素は空孔に移動して捕獲されたら約1.2eVも安定になることが図11からわかる。そこでタングステンの場合は無理をしてでも空孔に多くの水素を詰めた方が安定なことが予想される。これが空孔中に多数の水素が捕獲される原因であると考えられる。

図8で示したように、一般に軽い水素同位体の方が空孔との結合エネルギーは大きいことを図12で説明する。結晶中の格子間サイトは狭いため水素の振動数は大きくなる。タングステンの場合、格子間サイトの水素原子Hの零点振動エネルギー $E_H$ は0.26eVである。一方、空孔は広い空間なのでその中のHの振動数は小さくなる。タングステン空孔中のHでは0.10eVになる。水素同位体の零点振動エネルギーはその質量数で決まり、軽い水素同位体の方が零点振動エネルギーは大きい。それで格子間サイトから水素同位体が移動し空孔に捕獲された場合は、図12で示すように軽い水素同位体ほどエネルギー準位の差が大きく、結合エネルギーも大きくなる。

古い論文では、タングステン空孔中の水素はO-site近傍が安定で最高で6個まで捕獲されるという間違った記述が見られる<sup>4,5)</sup>。同様にFCC金属のAl空孔に捕獲された水素が研究されたことがあった。こちらの安定構造も誤りが多く見られる<sup>9)</sup>。WもAlも水素を固溶し難い金属であること、さらにAl表面では水素分子は例外的に解離しないことが誤った原因の1つと思われる。いずれにしても、水素のような何とでも反応する元素の計算には細心の注意を払う必要がある。

最後に、本稿で述べたことをまとめる。

(1) タングステン空孔中の水素の構造は特異で空孔には水素は最高で12個も捕獲される。

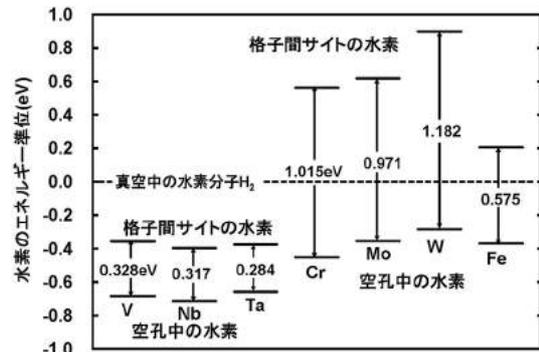


図11 BCC金属中の水素のエネルギー準位

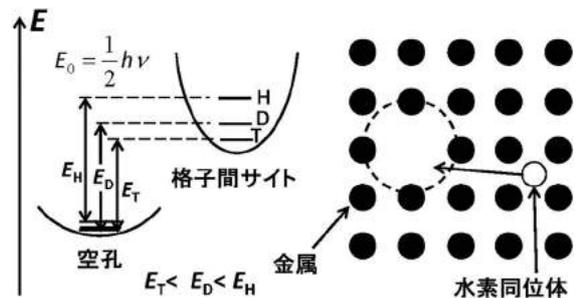


図12 格子間サイトと空孔に捕獲された水素同位体のエネルギー準位の模式図

- (2) しかし、空孔の超多量生成が起きるAモデルでは水素が6個の空孔水素複合体が圧倒的に多い。
- (3) 空孔の個数が一定のBモデルでは空孔に7個以上の水素が捕獲されることもあり得る。
- (4) 軽い水素同位体の方が空孔との結合エネルギーが大きくDの存在がTの残留を減らす作用がある。
- (5) タングステンの二原子空孔は不安定であり、それが照射組織の形成に影響する可能性がある。
- (6) タングステンは金属では唯一の等方弾性体である。

#### — 参考資料 —

- 1) V. Alimov *et al.*, J. Nucl. Mater., 375, 192, 2008.
- 2) K. Ohsawa *et al.*, Phys. Rev. B 82, 184117, 2010.
- 3) K. Ohsawa *et al.*, Phys. Rev. B 85, 094102, 2012.
- 4) Y. Liu *et al.*, Phys. Rev. B 79, 172103, 2009.
- 5) K. Heinola *et al.* Phys. Rev. B 82, 094102, 2010.
- 6) Y. Tateyama *et al.* Phys. Rev. B 67, 174105, 2003.
- 7) K. Ohsawa *et al.*, J. Nucl. Mater., 458, 187, 2015.
- 8) L. Ventelon *et al.* J. Nucl. Mater., 425, 16, 2012.
- 9) G. Lu *et al.* Phys. Rev. Lett. 94, 155501, 2005.

#### 著者紹介



大澤一人 (おおさわ・かずひと)

九州大学応用力学研究所

(専門分野/関心分野) 格子欠陥, 金属, 計算機シミュレーション

## 福島環境回復に向けた取り組み

## 第10回(最終回) 線量評価とリスクコミュニケーション

日本原子力研究開発機構 齋藤 公明, 高原 省五, 植頭 康裕

日本原子力研究開発機構では、1F事故により放出された放射性物質に起因する外部被ばく線量、内部被ばく線量を評価するとともに、リスクコミュニケーション活動を継続して実施してきた。外部被ばくに関しては、統計的に被ばく線量分布を評価する手法、詳細な空間線量率の測定により個人線量を現実的に推定する手法をそれぞれ開発し評価を行った。内部被ばくに関しては、県民健康調査の中でWBCによる多数の住民を対象にした測定と線量評価を実施した。約250回におよぶ「放射線に関するご質問に答える会」を開催し、住民の不安に対応する活動を行った。

**KEYWORDS:** dose evaluation, external exposure, internal exposure, statistical analysis, air dose rate, WBC, risk communication

## I. はじめに

2011年3月11日に発生した東京電力福島第一原子力発電所(以下、1F)事故の人間への長期的な影響や防護対策を考えるには、事故により放出された放射性核種による被ばく線量が基礎情報となる。事故後様々な被ばく線量測定・評価が実施され、重要な情報を提供してきた<sup>1)</sup>。さらに、放射線の影響を住民に正しく理解してもらうことは、今後の復興において基本的な事項である。本稿では、事故後に日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)が中心になり実施してきた外部被ばくおよび内部被ばく線量評価の事例、さらにはリスクコミュニケーションの事例を紹介する。

## II. 線量評価

## 1. 外部被ばく線量分布と確率論的評価

汚染地域において放射線防護に関連した方針を決定するために国際放射線防護委員会は「代表的個人」という考え方を提案している<sup>2)</sup>。「代表的個人」の線量は、地域や集団内での個人の被ばく線量の分布のうち、比較的高く被ばくを受ける可能性のある人々の線量として定義されるもので、これを評価するためには、まず、対象となる

地域や集団内での被ばく線量の分布を評価しなければならない。

高原他<sup>3,4)</sup>は、2012年2月以降、福島市を中心に県内で延べ約500名以上の協力を得て、生活習慣データを調査するとともに、自宅家屋内外の空間線量率を測定した。また、個人線量計を配布して個人線量の測定を同時に行った。これらの結果をもとに、住民の外部被ばく線量を確率論的に取り扱い、集団内での線量分布を評価する方法を開発した<sup>4,5)</sup>。

福島市内の4つの職業(福島市役所職員、福島市老人クラブ、福島県建設業協会、JA新ふくしま)について、開発した確率論的方法で線量分布を評価した結果と個人線量計で実測した結果とを比較して、図1に示す。実測値は2012年2月の一ヶ月間での値を1日当たりに換算した値である。市役所およびJAの協力者については、防護の判断に用いられる「代表的個人」の線量(すなわち、線量分布の95%値)を保守的に評価していること、算術平均(AM)のずれが測定誤差として想定される10%程度の範囲に収まっていることから、防護の判断に用いる線量を適切に評価できた。

一方、建設業協会および老人クラブの協力者については実測値と評価値との間に違いが見られた。老人クラブの協力者については、実際に聞き取りをしてみると、農作業を行うなど土壌表面で作業をしている場合が多く、これらの作業による被ばくを考慮していないため低めの評価になったと考えられる。そこで、老人クラブの協力者が屋外で滞在している場合には、土壌表面上での滞在を仮定して再計算を行ったところ、評価精度を向上することができ、実測値の分布を再現することができた。

建設業協会の協力者については、実測値と評価値との

*Challenges for enhancing Fukushima environmental resilience (10); Dose evaluation and risk communication* : Kimiaki Saito, Syogo Takahara, Yasuhiro Uezu.

(2017年10月30日受理)

■前回タイトル

第9回 農畜産物の放射性物質対策

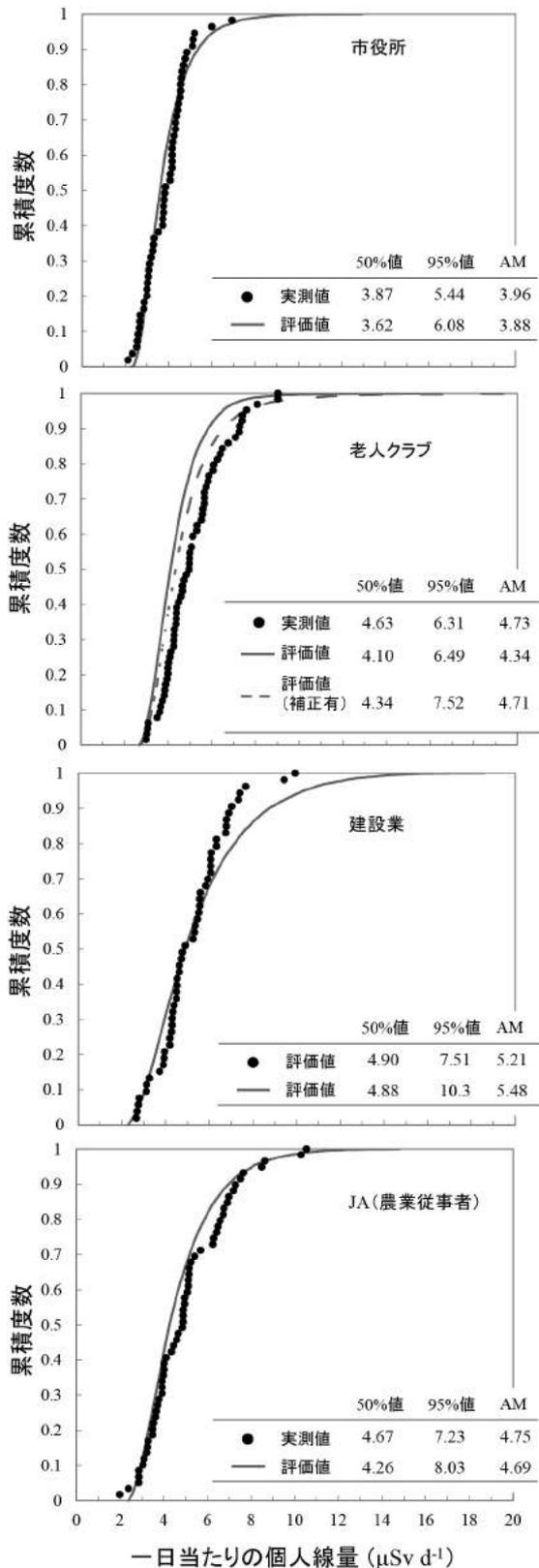


図1 福島市内における確率論的線量評価の結果

分布形の違いが見られ、集団の線量を適切に評価することができなかった。建設業協会の協力者については、例えば、重機の運転や高所での作業などの被ばく低減効果の生ずる作業や、トラック等による運搬で汚染の低い場所を移動していた可能性があり、これらの影響を

評価に取り入れなければならない可能性が高い。今後、建設業協会の協力者については、作業の内容に応じて被ばく低減効果を評価し、その結果をもとにサブグループを設けるなどして追加の検討が必要である。

このように、職業によっては評価の精度に限界があるものの、屋内作業や自宅滞在者、農業従事者のような屋外作業員に対しては、確率論的評価方法を用いることで集団内の線量分布を評価することが可能である。今後は、この方法を避難指示解除区域等に適用することで、住民が帰還していなくとも、自宅内外の空間線量率を測定し、他の自治体と同様の生活パターンを仮定できるものとして確率論的評価を行えば、帰還後の線量分布を予測することが可能であり、住民帰還に向けた自治体や住民の取り組みに有用な知見を提供することが可能である。

## 2. 個々の帰還住民を対象とした線量推定

前項で述べた手法により帰還住民の統計的な線量分布を推定することが可能である一方、帰還を希望する個々の住民にとっては全体の線量分布ではなく自分や家族に対する個別の被ばく線量が重要な情報となる。個人線量を評価する方法として個人線量計を用いた測定による方法が広く用いられてきたが、これから住民が帰還する予定の地域については個人線量計を用いた線量測定は行うことが難しい。原子力機構では、帰還住民を対象に行動パターンと経路の聞き取り調査を行い、生活経路に沿った詳細な空間線量率測定を行うことで帰還後の現実的な外部被ばく線量を推定する手法を考案した。

本手法では、帰還を予定している住民を対象に対して帰還後どのような生活を営む予定か具体的な聞き取り調査を行う。屋外、屋内といった曖昧な聞き方ではなく、どの家のどの場所で睡眠し食事をし、どの道を通って勤務場所へ移動し、どの場所で勤務するのか、それぞれの場所に何時間滞在するのかといった具体的な調査を行う。1人の住民に対して休日と平日を分ける等、最大3パターンの生活行動パターンを考えることとした。聞き取り調査によってわかった個人の生活行動経路に沿って、KURAMA-IIシステムを用いた歩行サーベイを実施する。測定した空間線量率にその場所の滞在時間を乗じて積算し、さらに線量換算係数を掛けることで1日の被ばく線量を推定する。各生活行動パターンにより生活する年間の日数を考慮して積算することで、年間被ばく線量を推定することができる。

本手法の特徴として、場所毎の被ばく線量の情報が得られるため被ばく低減の検討が行えること、個人線量計に比べて高感度のKURAMA-IIを使用することにより短時間で統計精度の高い線量データが得られること、スペクトルを利用することにより自然ガンマ線の線量寄与を場所毎に評価して差し引くことが可能であること等が

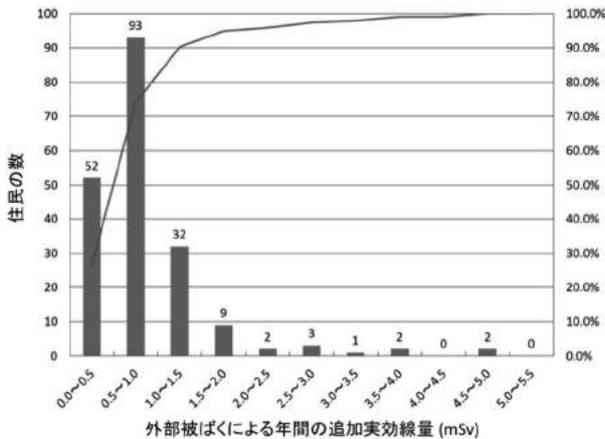


図2 推定した年間追加被ばく線量の分布

あげられる。

本手法を用いた線量評価は2014年に原子力規制庁からの分布状況調査の中で開始され<sup>6)</sup>、2015年からは原子力規制庁の別事業として日立ソリューションズ東日本が中心になり原子力機構が技術指導する形で実施されてきた<sup>7)</sup>。2014年は檜葉町を、2015年は川俣町、葛尾村、富岡町を、2016年は檜葉町、大熊町、富岡町、川俣町、浪江町をそれぞれ対象にして、延べ211名の住民に対する線量推定を実施した。

2014年から2016年までの3年間の調査による推定被ばく線量全体の頻度分布を図2に示す。自然ガンマ線の寄与を除いた放射性セシウムによる追加被ばくに対する実効線量を表している。平均線量が0.8mSv、最大線量が4.9mSvで、2mSv以下の線量が全体の93%を占めた。避難指示の解除は年間被ばく線量が20mSv以下という基準に基づいて行われるが、実際の帰還住民の被ばく線量は長期目標である1mSvに全体的にかなり近いことが推定された。

避難指示に関する区域で分類して比較を行った結果、帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域、避難指示区域外の順番で被ばく線量が高いことがわかった。また、職業に関しては農業等屋外で働く住民の被ばく線量は全体的に高く、屋内労働者や学生、児童、幼稚園児等の被ばく線量は低めであった。

航空機モニタリングで測定した空間線量率、対象者が住む家の周囲の空間線量率、家の中の空間線量率と推定した実効線量との相関を調べた結果、家の中の空間線量率との相関が他に比べて明確に高いことが確認された。家屋内の空間線量率を正確に測定することが被ばく線量の精度を上げるために重要であることが確認された。

測定の詳細な結果は地方自治体の職員へまとめて説明するとともに要望に応じて住民への説明も行い、帰還のための基礎情報として役立てていただいている。本調査は、2017年度も実施されており、継続して被ばく線量の情報を提供していく予定である。

### 3. 県民健康調査における内部被ばく線量評価

1F事故により放出された放射性セシウム等を対象に、原子力機構では、福島県民健康調査のうち内部被ばく評価について、方法、結果の評価等の提案を行っている。

原子力機構では、2011年7月11日から浪江町、飯館村、川俣町山木屋地区の住民約2,800名に対して、東海研究開発センター原子力科学研究所および核燃料サイクル工学研究所の個人内部被ばくモニタリング設備(ホールボディカウンタ。以下、WBC)を用いて体内の<sup>137</sup>Cs等による内部摂取の状況を測定した。

評価については、2011年3月12日に1回吸入したと仮定した急性摂取シナリオを用いた。この評価では3月12日時点の年齢を線量評価モデル(MONDAL3)に当てはめ、8歳以上を対象とした。また、4歳以上8歳未満の小児については、避難等の事故後初期の行動が概ね同一と考えられる母親等の家族(以下、家族等)の測定結果を参考として判断した。このため、8歳未満の子供の測定を行う場合には、家族等の測定も同時に実施した<sup>8)</sup>。

1. 家族等の急性摂取に係る線量が1mSv未満の場合  
子供の急性摂取に係る線量を1mSv未満とした。子供自身の有意な検出の有無にかかわらず急性摂取シナリオの評価結果欄には「-」と記載することとした。
2. 家族等の急性摂取に係る線量が1mSv以上の場合  
(1)子供の測定結果が検出限界以上の際は、急性摂取の可能性を考慮し、子供自身の測定結果から従前と同様の手順で急性摂取シナリオに基づく線量評価を行い記録した。  
(2)子供の測定結果が検出限界未満の際は、子供の生物学的半減期は短く、初期の吸入摂取はあってもすでに減衰・排泄されてしまったものと考え、家族等の線量を子供の線量とした。
3. 測定当日に家族等が同行していない場合  
子どもの測定結果が検出限界以上の場合は、上記2. (1)と同様とした。

検出限界未満の場合は、予め求めておいた検出限界値に相当する線量(End)を用い、「End mSv 未満」と記載する。なおEndは記録レベルとは別のものである。

同年10月1日から、対象年齢を4歳以上とした。

また、1Fから放射性物質の放出が始まった3月12日からの時間経過に伴い、残留放射能が最も高くなる放出初日に摂取した場合でも、体内に残留している量が減少するため検出できないレベルになってきており、2012年2月1日からは食品の取り込みによる日常的な摂取シナリオを採用することとした。このシナリオでは、これまで同様MONDAL3コードを用いた。また、線量評価モデルを適用する年齢は測定日の年齢とした。なお、測定対象年齢は従前のおり原則として4歳以上とした。また、2011年3月12日から摂取した食品については、追

跡調査が不可能なことから、連続的かつ均等な経口摂取による線量の評価とした。記録レベルは急性摂取と同様に1mSvとした。評価方法は1Bq/日摂取したモデルを作り、経過日数から得られる体内残留放射エネルギーを求め、WBCの結果と比較して1日当たりの摂取量を求め、年間摂取量を決定して、預託実効線量係数を乗ずることによって求めた。しかし、説明の方法を考慮して、測定日当日に1mSvに相当する量を予め求めておき、この何分の1になるかを評価できるようにした。

住民の方々から4歳未満の小児に対する内部被ばく検査の需要が大きかったため、2013年8月1日からは、評価対象を背が伸びた状態で2分間一人座りができる小児も加えた。体内残留放射能を求めるための校正用の標準ファントム(米国規格 ANSI N13.35)が4歳児以上であり乳児に対しては校正定数が高めとなること、また、測定補助者(親等)が有する放射性セシウムやカリウム-40からのガンマ線を検出してしまうことを考慮し、実際の体内残留量よりも5割程保守的(高い)結果となる可能性を含む測定として実施している<sup>9)</sup>。

福島県から委託を受けて内部被ばく評価を実施している業者から冬季において、セシウム-134のみが検出されるケースがあるとの相談を受け、原子力機構では実験室内で再現試験を実施したところ、湿度が下がってくるとラドンの壊変生成物であるビスマス-214(609keV)がWBC測定においても検出され、セシウム-134(605keV)に近い疑似ピークとして検出されることが判明した。そのため、2014年4月1日から、測定室内の湿度を60%以上に保つことと、セシウム-134と137の放射能比により、疑似ピークを除外するシステムを構築し、現在も福島県民の内部被ばく評価に用いている<sup>10)</sup>

### Ⅲ. リスクコミュニケーション

#### 1. リスクコミュニケーション活動

今回の1F事故によって、放射性セシウム等が環境中に放出されたが、これらに対して、専門家と称される方々が放射線の状況や健康被害等について、それぞれの立場に応じて様々な意見を発していたために、それらの情報により住民は混乱をきたした。

健康影響については、国連科学委員会に代表されるように、広島、長崎での被ばくの状況から影響度合いについて「科学」という立場で話をする専門家、また、「科学」をベースに国際放射線防護委員会に代表されるように「ポリシー」(対処の考え方)という立場で話をする専門家がいた<sup>11)</sup>。そのため、同じ被ばく線量でも捉え方の違いが、それぞれの専門家の発言の主旨に微妙に変化を生じ、「科学」と「ポリシー」があたかも「安全」と「危険」の対立軸になることさえあった。

これらの状況から、原子力機構では、リスクアセスメ



図3 答える会の様子

ントのひとつの手段として、住民の方々が放射線に対して、日頃不安に思っていることを事前に準備頂いて、それらに専門家が答える形を取ることにし、「放射線に関するご質問に答える会」と命名して活動を行ってきた。その際の回答についても、「科学」を説明し、理解を得た上で放射線防護としての「ポリシー」を説明している。

「放射線に関するご質問に答える会」(以下、「答える会」)は、福島県内の園児、児童の放射線による人体への影響を心配する声が高まっていることを踏まえ、学校の先生、保護者等に対して、原子力機構の全ての研究開発拠点の協力を得て2011年7月に開始した<sup>12)</sup>。図3にその様子を示す。答える会は、2016年3月末で258回となっている。

答える会の年度別の実施回数は、2011年度169回、2012年度51回、2013年度12回、2014年度2回、2015年度1回と減少してきているが、避難区域の解除、帰還に向けて住民の方々が抱く不安や心配も個別・具体化する傾向があり、今後とも、低線量長期間被ばく等に対する不安を抱く福島県民の心情を理解し、住民から問われる放射線に関する様々な疑問などに対して一層適切かつ丁寧に応えることが求められる<sup>13)</sup>。

#### 2. 人材育成

福島環境回復、廃炉に関しては、長い時間を必要とすることから、これらの事業に携わる技術者等の人材育成も重要な事項である。

原子力機構では、長岡技術科学大学、郡山女子大学、福島高等工業専門学校の学園祭を利用し、WBCを用いた内部被ばく評価を来場者に対して実施し、結果を説明することとしている。

学園祭を前にして、放射線の基礎、内部被ばくの評価方法、機器の操作方法、結果の評価方法、結果の説明方法、質問への回答方法、測定の流れ等について、座学講座および実習を受講し、学生自らが測定員を経験することを目的として実施している。

本人材育成事業の特徴は、学生自らが高額な測定機器を機構職員のサポートのもと、操作し、それらの結果を一般の来場者に対して自らの言葉で説明していくところにある。図4に内部被ばく評価結果の説明状況を示す。説明にあたっては、来場者から日頃思っている放射線に



図4 学生による来場者への被ばく評価結果説明

関する様々な質問が出されるため、自ら勉強した内容をもとに説明することになる。

これらの人材育成事業は、2014年から実施してきており、本実習の経験者が原子力機構をはじめ、電力会社等に就職し環境回復や廃炉の事業に取り組んでいる。

## VI. 終わりに

現在、避難指示区域の解除が順次進み避難指示区域へ住民が徐々に戻りつつある。一方、帰還困難区域の解除にはまだ相当の時間を要することが予想される。すでに帰還した住民、これから帰還しようとする住民、そのための行政判断を行う担当者にとって、住民の被ばく線量は今後の計画を立てる上での基礎情報であり、正確かつ適切な線量情報を継続して提供していくことは重要である。また、これらの結果や放射線の影響について住民にわかりやすく伝えることにより、不必要な不安を払拭することも重要である。原子力機構では、これまでに行ってきた線量評価やリスクコミュニケーションの活動を継続し、今後も福島復興に貢献していく意向である。

本原稿には、原子力規制庁からの委託により実施した事業の成果を含む。

### — 参考資料 —

- 1) 齋藤公明, 栗原治, 松田規宏, 高原省五, 佐藤哲郎, RADIOISOTOPES, 65, 93-112 (2016).
- 2) International Commission on Radiation Protection, Annals of the ICRP, 36(3), (2006).
- 3) 高原省五, 飯島正史, 嶋田和真, 串田輝雄, 白鳥芳武,

JAEA-Research 2014-024, (2014).

- 4) S. Takahara, T. Abe, M. Iijima, K. Shimada, Y. Shiratori: Health Phys. 107(4), 326-335(2014).
- 5) S. Takahara, M. Iijima, M. Yoneda, Y. Shimada: Risk Analysis, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/risa.12900/full> (in press)
- 6) 日本原子力研究開発機構: 平成26年度原子力規制庁委託事業「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約および以降モデルの開発事業」成果報告書(2015), <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/pdf08/Part2.pdf>
- 7) 日立ソリューションズ東日本: 平成27年, 28年度原子力規制庁委託事業「生活行動パターンを模擬した連続的な空間線量率の測定事業」(2016, 2017). <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/565/list-1.html>
- 8) 栗原治, JAEAにおける福島県民調査の現状, 第1回福島WBC学実会議(2012).
- 9) 中川貴博他, 立位型全身カウンタによる4歳未満児の測定方法の検討, 保健物理学会(2014).
- 10) 寺門義則他, WBC測定における天然放射性核種の影響, 保健物理学会(2014).
- 11) 首相官邸, サイエンスとポリシーの区別, [http://www.kantei.go.jp/saigai/senmonka\\_g16.html](http://www.kantei.go.jp/saigai/senmonka_g16.html)(2011).
- 12) 日本原子力研究開発機構, コミュニケーション活動, <https://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat02/>(2014).
- 13) K. Itabashi et al. COMMUNICATION ACTIVITY FOR RESIDENTS TO UNDERSTAND RADIATION AFTER THE ACCIDENT OF FUKUSHIMA DAIICHI NUCLEAR POWER STATION, ICONE23(2015).

### 著者紹介



齋藤公明 (さいとう・きみあき)

日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野) 環境放射線測定/線量評価



高原省五 (たかはら・しょうご)

日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野) 放射線防護/線量評価



植頭康裕 (うえず・やすひろ)

日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野) 放射線影響評価, 分析技術の高度化/原子力における社会受容性

## 水化学部会の将来構想に係る取組み

原子力安全システム研究所 寺地 巧,  
 東北大学 渡邊 豊,  
 日本原子力発電 久宗 健志

水化学は原子力安全に直接関与する重要な技術分野である。しかし、震災以降プラントが長期停止した状況に陥り、技術伝承や将来に関して不安視する声が聞かれるようになった。そこで、水化学部会では人材育成・将来構想をテーマにパネル討論を行い、更に若手と年長者22名を集めて10時間に及ぶ議論を行った。世代や立場により様々な意見はあったが、被ばく低減や腐食問題の解決に対して果たすべき役割は大きく、またそのポテンシャルを秘めた技術分野であることを再認識するに至った。今後は水化学ハンドブックや水化学ロードマップの改訂作業により次世代を育成しつつ、世界水準をリードすることが部会に課された使命と考えられる。

**KEYWORDS:** *water chemistry, future concept, human resource*

### I. はじめに

国内の優れた水化学管理技術は、燃料や構造材料の信頼性維持を支え、原子力プラントの安全性に対し重要な役割を果たしてきた。しかし、震災以降プラントが長期停止した状態が続き、技術伝承や人材育成に対する課題が浮き彫りとなり、日本が主導してきた水化学分野の継続した発展が困難となりつつある。技術伝承や人材育成は水化学関係者のみならず、多くの原子力技術者に対しての共通課題であり早急な対応が必要である。

そこで水化学部会では、部会が運営する定例研究会とサマーセミナーの場でパネル討論を行い、人材育成・将来構想について意見を交わした。参加者により水化学部会に求めているものは異なり、将来に対する意識についても様々な違いが認められた。部会ではそれらの意見を活かすために、若手と年長者を集め将来構想検討会を組織し、アンケート調査と10時間に及ぶ意見交換を行った。

議論により抽出された30年先の目標を表1に示す。水化学技術は原子力プラントの様々な問題を解決するポテンシャルを秘めており、高温水中での材料の腐食挙動やその抑制に関する技術などは海外でも活発な研究が進められている。本分野には多くの開発課題が残されており、その達成には産・学・官の連携による技術開発が不可欠と言える。本稿では、これらの目標設定に至った議論の経緯や、将来構想について水化学部会員が本音で意

*Approach on future concept of water chemistry division :*  
 Takumi Terachi, Yutaka Watanabe, Kenji Hisamune.

(2017年11月6日 受理)

表1 水化学に関する30年先の目標

被ばく低減	: 水化学の寄与により、一桁以上の低減を達成する。
腐食問題の解決	: 長期材料健全性に有効な水化学条件の明確化。プラント各部位の材料選定にも水化学関係者が関与し問題を未然に防止する。
国際展開	: 原子力技術海外展開の技術パッケージにおける重要項目として成立させる。
経済性への貢献	: 伝熱管の性能維持・向上や廃棄物量低減など、低廉で安定な電力供給の達成に貢献する。

見交換した内容を述べる。

### II. 水化学部会での議論

#### 1. パネル討論

水化学部会は年3回定例研究会を開催し、部会関係者に共通する話題を議論している。定例研究会は5件程度の講演と質疑で構成され、毎回50~70名程度の部会員が集まる。原子力発電所のデータが紹介されるなど貴重な情報提供の場として活かされ、多くの参加者が魅力を感じ継続的に参加している。また、水化学部会では技術者・研究者を対象としたサマーセミナーを隔年で開催している。水化学の基礎から原子力発電所の状況を学ぶ機会や技術交流の場として有効に機能している。これらの活動を利用し、2016年3月の定例研究会では「人材育成・情報整備」をテーマとし、また2016年7月のサマーセミナーでは「人材育成・将来構想」を取り上げてパネル討論を行った。

パネル討論では、情報共有や将来構想も取り扱ったが、人材育成を重視する意見が多かった。そもそも分野の発展には人が不可欠であり、優秀な人材を育てることが全てにおいて優先されるという考えだ。また、「人材は魅力的なミッションがあれば自然と育つ」と言う発言も聞かれた。原子力の創成期には様々な課題があり、関係者が情報と知恵を出し合い技術力の向上が図られてきた。現在も福島第一原子力発電所事故への対応は精力的に取り組まれているが、軽水炉に対しては成熟期に入ったと考える人もいる。そのため、人材を育てるためのインセンティブの提供も部会の役割と思われた。

パネル討論では今後部会が目指すべき方向性について、以下の5項目が重要であるとの見解に至った。

- 1) 学术界と産業界で議論し研究を活性化させ、ロードマップを機能させる。
- 2) 国内外を問わず過去のトラブルを資料として残し、技術伝承に活用する。
- 3) 自発的に情報を共有し、部会参加者が有効活用する仕組みを形成する。
- 4) 海外からの情報入手を積極的に行い、世界最高水準の技術力を維持する。
- 5) 設備部門とベクトルを共有し、水化学の課題を精査・整理する。

### Ⅲ. 将来構想検討会の立ち上げ

#### 1. 第1回将来構想検討会：反省点・課題

パネル討論では具体的な部会の将来について議論するだけの時間的余裕は無かった。そこで、2016年10月26日に第1回の将来構想検討会を開催し意見交換を始めた。本検討会は各機関から若手と年長者の2名が参加し、執筆者3名の他、室屋裕佐氏、長谷川英規氏、田川篤志氏、赤峰浩司氏、中野信夫氏、中野佑介氏、浦田英浩氏、柴崎理氏、長瀬誠氏、清水亮介氏、莊田泰彦氏、前田哲宏氏、大橋伸一氏、笹島康宏氏、河村浩孝氏、藤原和俊氏、埜悟史氏、佐藤智徳氏、高木純一氏の計22名で開始した。

議論の取り掛かりとして、これまでの部会運営の反省点について意見交換を行った。指摘された批判的な意見の一部を表2に示す。

批判的意見の多くは、学会への参加意義そのものに疑問を呈するものであった。その背景として、原子力産業の将来見通しが立たない中で目先の対応に追われ、長期的な開発意欲が湧き難いという若手の意見も垣間見られた。

しかし議論を進めた結果、このような状況下でこそ立場の異なる関係者が集い長期的な夢やビジョンを共有することが、自分たちの役割を理解し、正しい取り組みを進める上で重要であるとの認識に至った。

水化学は材料と環境の相互作用を支配する因子であり、被ばくと腐食の問題を解決する可能性をもつ技術分

表2 水化学部会への批判的な意見

- ・水化学部会の活動は負担が大きい割に自社にフィードバックできる情報が多くない。
- ・合理的に情報を共有し、学会の知を効果的に活用する仕組みが形成されていない。
- ・水化学関係者は放射線管理に所属している人が多く、設備部門との情報共有が充分ではない。
- ・水化学データを社外に提供することの直接的なメリットが見え難い。

野だ。即ち、高度化・開発を進め材料が腐食しない条件を確立することができれば、燃料表面での放射化生成物は発生せず、応力腐食割れ等の腐食劣化問題も生じない。水化学は被ばくを限りなくゼロに抑え、材料・燃料の健全性を格段に向上させるポテンシャルを持った技術分野といえる。長期的な視点で夢を共有することは、若手の成長意欲を刺激する効果も期待され、学会が果たすべき役割の一つと思われた。

### Ⅳ. 理想的な部会とは

#### 1. アンケート調査の実施

参加者が求める理想的な部会を考えるうえで、将来構想検討会メンバーに対し①水化学部会の役割、②活動テーマ、③新しい取組み・意見、④自発的にデータを共有する仕組みの4項目に対してアンケート調査を行った。本項目では、主にアンケートに寄せられた意見について、第2回の将来構想検討会(2016年12月22日開催)で議論した内容を紹介する。

##### (1) 参加者が水化学部会に期待するもの

水化学部会に期待する役割は、表3に示した4項目に大別された。大きな方向性は従来からの取組み内容に即しているが、十分に期待に込められていない部分もあり、活動の活性化が必要という認識に至った。

##### (2) 理想的な水化学部会とは

理想像に関する質問には、表4の意見が寄せられた。抽象的だが参加者の意識に関係した内容が多く、水化学部会特有の問題が潜んでいる様に見える。水化学部会は産業界からの参加割合が高く、所属組織の一員として部会に関与される方が多い。業務の一環として学会に関わっている方の割合が高くなれば、ボランティアな情報共有が進み難くなる可能性がある。水化学のプロとしての成長を目指し、個人として部会に係わる意識を持つ仲間を増やすことが、理想像を実現するために重要と思われた。

##### (3) より良い部会とするためのアイデア

効果的に水化学部会を変えていくためには何をすれば良いのか。本件に関して、参加者から寄せられた主な意見を表5に示す。若手の積極活用など、水化学部会の運営方法として心に留めておくことで改善に繋がるものや、Web上に学習ページを作成するなど達成には関係者の多大な労力が必要な提案など様々な意見が寄せられ

表3 水化学部会への期待

情報の共有と把握	実機の水質データ・ニーズ・不具合・SA対策・廃炉等の情報、他機関の活動状況、最新研究の動向、将来の見通しやその他情報の共有と把握。
協業による効率化	研究開発成果の活用と普及の促進。スムーズな事業展開に係る調整・環境整備。他プラント事象の水平展開。協業による投資の効率化。関係機関のパイプ役。
学術基盤・高度化・組織	国内外の知見・経験の集約。技術向上の主導。国際会議の開催・調査・調整の母体。大規模な研究の調整。共有課題に対する議論・利害を超えた議論の場の提供。ロードマップの作成。
人材育成	次世代の研究者・技術者の育成・支援。技術の継承。他機関の水化学に係る人材、他部会との交流。プラント停止中の勉強機会の提供。自社のみでは困難な技術の伝承。

表4 水化学部会の理想像について

<ul style="list-style-type: none"> <li>・相互のメリットに繋がる情報を共有し、課題解決を図る場。</li> <li>・上下関係が無く、純粋に技術力向上を目指す集まり。</li> <li>・技術力の蓄積と標準化を進め、技術項目をオーソライズする役割。</li> <li>・困難だが魅力ある課題に挑戦し、同じ志を持つものが集う場。</li> </ul>
---

表5 より良い部会とするためのアイデア

<ul style="list-style-type: none"> <li>・若手参加の環境づくり、定例研究会の部会員以外への解放</li> <li>・学習ページ(ウェブ上)の作成(ATOMICAのようなもの)</li> <li>・運営小委員会以外の参加者からの発表勧誘</li> <li>・パネルディスカッション等、聴衆参加型の議論機会の増加</li> <li>・年会・大会参加者の部会への寄与増加</li> <li>・材料や火力など他分野との技術共有</li> <li>・活動範囲の拡大(事故時他)による活性化</li> <li>・保全担当者が参加するセミナーの企画(あるいは保全側から水化学に求めるニーズの発掘)</li> <li>・若手が議論する機会の創出(定例研究会)</li> <li>・若手技術者の積極活用(ベテラン技術者のバックアップ)</li> <li>・規制側に対する情報発信、再稼働への働きかけ。</li> <li>・魅力的なテーマ設定(ビジネスでの設定は困難、学術的に)</li> <li>・30-40年先の原子力の姿を設定し、原子力水化学の夢を語る。</li> <li>・IoT普及を見据え、データ収集・蓄積を検討。</li> <li>・定例研究会を、組織利益に繋がる共同研究、共同開発の可能性、新技術の議論の場とする。</li> <li>・定例研究会における大学の先生の講演を増やす。</li> <li>・セミナー等への参加者増、相互の連携強化による部会の活性化</li> </ul>
---

た。これらの意見は今後の水化学部会運営に係るヒントとしての活用が期待される。

#### (4) 取り上げてほしい個別テーマ

部会にて取り上げてほしいテーマとして挙げられた項目を表6に示す。水化学は多くのデータを取り扱うため、ビックデータやAI、IoTなどの新しい技術分野と親和性が高い。新技術を含め、多くの検討項目に対して、

表6 水化学部会で取り上げてほしい個別テーマ

<ul style="list-style-type: none"> <li>・技術力向上のための施策</li> <li>・原子力以外の学生の取込方法検討</li> <li>・事故時・SA時の水化学</li> <li>・廃炉に関する水化学</li> <li>・品質管理の指針</li> <li>・水化学の重要性周知</li> <li>・最新の国内外の知見・技術、技術伝承・人材育成</li> <li>・参加者の技術力向上</li> <li>・ハンドブックの改訂</li> <li>・日本発の水化学技術を実用化するシステム</li> <li>・保全の合理化に繋がる知見拡充</li> <li>・プラントデータ・トラブル事例の共有促進</li> <li>・水質評価方法のベンチマーク</li> <li>・水化学指針の基準値根拠の継承・理解の促進</li> <li>・補機冷却水の管理(亜硝酸系防錆剤の導入経緯・他の防錆剤の適用可能性)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・過去のトラブル情報の共有</li> <li>・海外実態の調査</li> <li>・次世代炉に向けた水化学</li> <li>・新規制基準対応、安全研究へのかかわり方、規制の動向を見据えた水化学の可能性の検討</li> <li>・廃炉材の活用研究</li> <li>・高温熱力学パラメータ等の高温物性値</li> <li>・超臨界水の物性</li> <li>・ラジオリシス(<math>\alpha</math>のG値)</li> <li>・オンライン計測技術</li> <li>・国際規制化学物質の使用制限に対する技術開発・関連研究</li> <li>・再稼働プラントに対する技術支援</li> <li>・廃炉プラント冷却水系統の管理簡略化</li> <li>・新たな課題の掘り下げ・対応</li> <li>・環境負荷軽減</li> </ul>
--	--

高度化のポテンシャルを持つという共通認識に至った。

## V. 目標設定および今後の取組み

2017年3月17日に開催した第3回の将来構想検討会では、水化学部会で取り組むべき具体的な項目について議論した。ここでは、30年先の目標設定と部会活動の改善・今後の取組みについて述べる。

### 1. 30年先の目標設定

人材育成の議論の中で、特に若手が水化学に対して魅力を感じるためには、長期的なビジョンが必要という意見があった。これから水化学に従事する人が、将来達成したい目標を認識するためにも重要な項目といえる。その観点で30年後に達成できる可能性がある将来について意見交換した。30年先の目標として抽出された項目は、既に表1に示した通りである。

新設される原子力発電所の場合、材料や設計変更が被ばくや腐食問題の解決に効果を発揮するが、現在運転している既設炉に関しては水化学技術の向上がプラント性能を大きく左右する。長期的な水化学の目標には被ばくの一桁以上の低減など、魅力的な項目も存在している。水化学への投資の有効性を関係者が理解できるよう、学会がビジョンを示すことも重要な役割と思われた。

### 2. 部会活動の改善・今後の取組み

#### (1) 定例研究会の改善

定例研究会に対する改善意見を表7に示す。従来から定例研究会は技術交流の場として機能しているが、若手

表7 水化学部会定例研究会への改善意見

- ・発表件数を減らし、総合討論・パネルディスカッション等の聴衆参加型での議論を増やす。
- ・基礎的分野と実践的分野の2部構成とする。
- ・原則、各発電所からの情報提供を必須とし、活発な意見交換を目指す。
- ・部会員の同伴があれば、部会員以外の参加も認める。
- ・興味がある関連分野の専門家の話を聞く機会として活用。(水の物性、自然循環系での水、地殻深部での水など。)

表8 水化学に関する技術伝承

- ・水化学ハンドブックを改定し、重要な項目が確実に次世代に残るようにする。pdf化が理想。
- ・ハンドブックの製作はシニアと若手のコラボレーションで実施。(その過程も技術伝承の機会)
- ・ニューシア登録情報は失敗学にもなり有益。水化学関係を抽出し、アクセスできるよう整備することがよい。
- ・レジリエンスの議論は成功を検討すること。夏期セミナー等で、成功体験を共有する機会を設ける。

表9 水化学に関する情報共有・技術開発・高度化の取組み

- ・特定の技術開発課題に関心を持つメンバーが集まり、意見交換するアドホックな会議体を積極的に設置し、国プロ提案書の作成も視野に活動。
- ・水化学指針の制定による標準化を進め、データの比較検討が可能となる基盤を整備。
- ・水化学ロードマップの改訂と着実なフォローアップ。

が質疑に加わり難いという指摘や、基礎と実践分野のバランスについて課題が見つかった。改善意見には、聴衆参加型の議論を増やす取組みが挙がり、早速2017年10月に開催された定例研究会では若手を中心とした総合討論が行われ好評を博した。

### (2) 技術伝承の推進

技術伝承に係る具体的な取組みとしては、表8に示した項目が挙げられた。最も効果が期待されるのは、共有の知識基盤として作成された原子炉水化学ハンドブックの改訂作業である。原子炉水化学ハンドブックとは2段組み300頁に亘り水化学に関する広域な知見を盛り込んだ書籍であり、2000年にコロナ社から発行されて以降、水化学関係者のバイブルとして重用されている。改訂に際して、若手が編集に直接加わることで、ハンドブック製作過程そのものが重要な技術伝承として機能することが期待される。他に関係者の意見として多かったのは、過去のトラブル事例をいかに伝承するかという課題に対応するものであった。

### (3) 情報共有・技術開発・高度化の取組み

表9に水化学に関する情報共有・技術開発・高度化の取組みに関する意見を示す。本項目に強く関連する資料と

しては、水化学ロードマップ2009が存在する。水化学ロードマップは震災後の状況に合わせた改訂作業に着手したところであり、深層防護とのかかわりを含め、安全性向上と水化学の関係についての議論が進められている。

水化学部会は他の部会と比べて産業界からの参加比率が高く、電力会社やプラントメーカーの寄与が大きい。そのため、水化学部会の活動は直接的に実機プラントの技術力向上に寄与するものが多い。関係者が運転経験の知見を持ち寄り、一丸となって技術革新を図ることは、プラントの安全性向上にも貢献することに繋がると期待される。

## VI. まとめ

水化学部会の人材育成および将来構想に関して、2度のパネル討論と3回の将来構想検討会により意見交換を行った。水化学部会に「期待する役割」や「理想的な姿」についての意見交換では、人材育成への貢献や情報共有の場としての機能が求められていることが分かった。また、水化学に関しては今後も引続き高度化を図るべきテーマが数多くあり、更なる技術革新を推進することが関係者の利益に繋がるとの認識に至った。

水化学高度化を進めるには、次世代を担う人材を育成することが必須であり、具体的対応として原子炉水化学ハンドブックの改訂や定例研究会の仕組みを改善することが有効と思われた。具体的な高度化に関しては、今後水化学ロードマップの改訂作業の中で取り組む項目を精査し、世界水準をリードするための検討が行われる。

### 著者紹介



寺地 巧 (てらち・たくみ)

原子力安全システム研究所  
(専門分野/関心分野) 軽水炉構造部材の応力腐食割れ, 原子炉水化学



渡邊 豊 (わたなべ・ゆたか)

東北大学  
(専門分野/関心分野) リスク・ベース保全, 軽水炉構造部材の経年劣化機構, 局部腐食発生・進展性評価, 超臨界水環境での腐食評価



久宗健志 (ひさむね・けんじ)

日本原子力発電  
(専門分野/関心分野) 軽水炉の水化学管理, 腐食環境緩和対策, 線源強度低減対策

## 原子力学会からの情報発信 ～広報情報委員会を通じた情報発信の課題と今後～

広報情報委員会 委員長 布目 礼子

広報情報委員会は、2017年9月14日の北海道大学での秋の大会において、「企画セッション」を設けて、委員会の活動を紹介し、原子力学会としての情報発信はどうあるべきか意見交換した。

このセッションで出された意見などを今後の活動に反映し、学会としてより良い情報発信ができればと考えている。

現在、原子力分野に対して、正確で公正な情報をできるだけ早期に提供し、社会との共有を図ることが求められている。一方、提供する側は、原子力学会をはじめ多くの関連組織が存在し、その性格や立場などにより情報提供の内容、方法、目的などに違いが生ずることはやむを得ないと考える。このような状況において、本会としての情報提供、発信はどうあるべきだろうか。

本会は、学会内部の情報伝達および社会への情報発信を適切に行うために、「広報、情報伝達に関する規定」を下記のように定めている。

- 第1条 目的
- 第2条 基本方針
- 第3条 少数意見の尊重
- 第4条 本会内の情報伝達
- 第5条 社会への情報発信
- 第6条 社会への直接的情報発信
- 第7条 緊急時や異常事象発生時の情報発信
- 第8条 社会への情報発信体制

基本方針では、「学会は、会員に対して、より正確なデータと情報をできるだけ速やかに伝達するサービスを行う義務がある」とするとともに、「社会に対しては、さまざまな局面において専門家個人または専門家集団として正しい情報を発信する社会的責任を有する」としている。

実際に社会に対して情報発信をする場合には、第8条において、発信元を明確にすることを定めている。本会としての発信に際しては、理事会や関係する部会による確認を求め、最終判断は会長、副会長が行うとしている。また、部会や連絡会、委員会等として発信する場合にも必要に応じて理事会に付議することとしている。一方、個人や有志が発信する場合には、例えば本会の役職名の使

用を控えるなどにより一般の方々の誤解を招かないよう留意するとしている。また、少数意見の尊重もうたわれており、討論の場の提供が肝要であるとしている。

広報情報委員会では、これらを踏まえて、学会員への情報伝達および社会への情報発信を適切に行うことを目的にさまざまな取り組みを実施している。

前述の規定では、会長記者会見、プレスリリース、ポジションステートメント(以下PS)等を通じた社会への直接的情報発信を積極的に行うとされており、目的や内容に合わせた取り組みを行っている。これらの具体的な活動について紹介する。

会長記者会見は、主に本会の活動状況の報告などを定期的に行っているもので、「会長記者会見実施要領」に基づき行うことが定められている。開催時期や報告内容などの実施原案を当委員会で作成し、理事会の承認を経た上で開催している。

プレスリリースは、当会主催のイベント(年会・大会、シンポジウム等)開催案内や本会の活動紹介(委員会等の設立、報告書の公表等)、声明・提言・見解などをマスメディアに発表するもので、「プレスリリース実施要領」に従い実施している。プレスリリースの実施対象については、本会として正式に情報・コメントを発信できる活動等であることを前提としており、声明・提言・見解については、発信元組織名を十分協議して決定することとしている。

PSについては、社会が関心をもつ原子力の平和利用に関する重要事項に対し、本会の見解・提言・解説・その他というカテゴリーで発信している。PS発信の目的は、①学会としての見解等をわかりやすく説明し、原子力技術への社会の理解向上に寄与する②学会員が平易に説明するためのツールを提供する③学会のホームページ(以下HP)に掲載、公開し、学会活動の透明性を高め、社会に対するオピニオンリーダーとしての責任を果たすこ

とであり、当委員会の下に設置されているPSワーキンググループにおいて、各部会からの提案を「PS作成要領」に沿って作成している。作成にあたっては、原案を学会員へ供覧するとともに、倫理委員会の確認を受けるなど幅広い意見を取り入れ、最終的には理事会の承認を経てHPへ掲載する。

本会内の情報伝達は、学会誌、HP等により、できるだけ速やかに、また、双方向でなされるよう工夫して行うとされている。

当委員会では、今年度、会員サービス委員会とともに新たにHP運営ワーキンググループを当委員会の下に設置し、HPを通じたより良い情報伝達に取り組んでいる。

本会からの情報発信にあたっては、その活動が円滑に進められるように取り組むとともに、社会から誤解を受けることのないよう適宜対応していくことが必要である。そのため、当委員会では、「広報、情報伝達に関する規定」を見直し、その原案を、2015年、2016年の秋の大会の企画セッションにおいて紹介し、意見交換を行った。会員からは、「発信元の表記については議論が必要」「少数意見の扱いに関する議論が必要」「プレスリリースの発信は、学術的なものにすべきで、政治的内容を含むものはマイナス面が大きいのではないか」「社会の誤解を解くようなメッセージの発信も必要」などの意見があり、これらを反映した改定を行った。主な改定点は、社会への情報発信に際して、発信元の明記や必要な手続きを踏むことなどを加え、また、会長記者会見について、実施要領を定め、実施にあたっては要領に基づき行うことを追加した。

当委員会は、前述のように会員の意見も反映した規定に沿って情報発信活動に取り組んでおり、本会としての声明や提言、見解のプレスリリースの例としては、「北朝鮮の核実験に対する抗議」「除染・帰還・復興に関する見解」「高速増殖炉もんじゅの有効な活用について(見解)」などがある。これらについては、理事会において発信内容等を十分検討した上で、審議し、承認を経て公表してきているが、「発信内容に偏りがある」「情報発信のルールはどのようになっているのか」など、さまざまな意見が寄せられることがある。そこで、2017年秋の大会の企画セッションにおいては、当委員会を通じた情報発信の課題を紹介し、情報発信の方法やプロセス、発信する情報の透明性、公正性、妥当性はどうあるべきかなどについて意見交換した。

当委員会による情報発信の課題としては、本会としての考え方を発信する際、発信元組織名をどうするか、学

会員の意見をどう反映するか、また、発信のタイミングと方法をどうバランスするかなどがある。特に、プレスリリースについての課題は、当委員会の活動にも影響があることから、当委員会でも議論を重ね、「実施要領」の見直しを行っており、改定案を紹介した。

改定のポイントは、

- ・プレスリリースは、案件の担当部会や委員会等からの依頼により実施するが、声明、提言、見解の場合については、内容を十分協議したうえで、発信元組織名を決定するとしていたが、さらに、原則として声明、提言、見解を正式なプロセスで承認した組織の名称とすること。
  - ・本会として声明、提言、見解を発信する場合には、学会員へ理事会からその必要性を説明すること。
  - ・発信前に会員との双方向の意見交換が必要と判断され、時間的な猶予があると考えられる場合には、短期間であっても意見を求めるプロセスを経ること。
- などである。

これらの改定を行った上で、「広報、情報伝達に関する規定」第8条(社会への情報発信体制)に、プレスリリースの実施は「実施要領」にもとづくことを追加する、規定の改定も行いたいことを説明した。

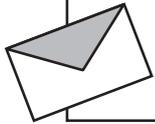
これらについての具体的なコメントはなかったが、「情報発信に当たっては、受け取る側が何を求めているかが重要である」「学会の情報発信はマスメディアへの影響を期待しているのであろうが、SNSを通じた直接的発信も検討してはどうか」などの意見があった。今後は、「規定」「実施要領」の見直し案を精査し、改定を行っていきたいと考えている。

会長記者会見を始めた当初は、会見当日にひとりの記者も参加しないという情けない状況もあったが、継続的に実施しているという実績から、最近では10数名の参加を得、記事も掲載されるようになった。また、学会活動をプレスリリースすることにより、ほとんどの学会主催のシンポジウム等に取材が入るようにもなり、マスメディアを通じて社会への情報発信が実現していると考えられる。また、今回の企画セッションで出された一般の方々への直接的な発信については、今後の取り組み課題のひとつとして検討したい。

広報情報委員会は、今後も、情報伝達の発信ツールを有効に活用し、積極的な情報発信を行い、社会とのコミュニケーションを深めていきたいと考えている。

(2017年11月13日記)

## 理事会だより



### 誕生日の問題と稀有事象

「誕生日の問題」をご存知だろうか。一つの部屋に誕生日が同じ2人がいる可能性が、いない可能性より高くなるには、その部屋に何人いればよいかという問題である。同じ部屋に同じ誕生日の人がいるというのは稀で驚くべきことだと直感し、運命のようなものを感じるかもしれない。うるう年はかんがえないとして、誕生日は365通りあるので正解は23人となる。意外と少ない。

実際に計算してみる。ある人の誕生日が自分の誕生日と違う確率は $364/365$ である。部屋にいる23人の誕生日が全て自分の誕生日と違う確率は、 $364/365$ を22回かけた数字で0.94になる。部屋の中の誰かが自分と同じ誕生日である確率は $1-0.94=0.06$ である。なるほど、小さい確率である。23人の部屋では100回に6回ぐらいしか経験しない。しかし、この計算は正しくない。0.06は、自分と同じ誕生日の人がいる確率である。部屋には23人もいるので、誕生日が同じとなる人の組み合わせの数はずっと多い。「誕生日の問題」は誰かが同じ誕生日である確率なので、ここでは組み合わせの数を考慮しなければならない。全ての人の誕生日が違う確率は $364/365 \times 363/365 \times \dots \times 343/365=0.49$ である。したがって部屋の誰か(三人以上でも二組み以上でもよい)の誕生日が同じである確率は $1-0.49=0.51$ である。50%以上の確率でこのような状況は発生する。

自分だけに注目していると誕生日が同じ人がいる確率は6%にすぎず稀有なことにように思えても、客観的に部屋全体を見渡せば51%の確率で誰か同じ誕生日の組み合わせがある。多くの組み合わせの数があるからであり、よってこのような経験は驚くにあたらない。スポーツで珍プレー好プレーの特集が組めるのは、たくさんプレーヤーが膨大な数のプレーをするからであり、その中には必ずと言っていいほど珍プレー好プレーが生まれる。珍プレーがあったとしてもそれはそのスポーツのレベルが低いからではない。多くのプレーヤー何度もプレーをするので、その中にはあっと驚くようなことも起こるわけ

である。膨大な数のプレーからそのようなものを抽出すれば、日常的なことをとても印象的に演出してみせることができる。

原子力安全の分野では予兆事象分析という手法が使われる。原子力施設で実際に起きたトラブルや事故事象を仮定して条件付きの炉心損傷確率などを計算、その事象の安全重要度を評価する方法である。例えば、フランスのルブライエ原子力発電所の1999年の洪水は、条件付き炉心損傷確率は3%程度であった。そこから学ぶことは、単なる数字だけではない。洪水によってどのようなことが起こるのか、その安全性への影響はどのようなものであるか、有効な対策は何か、どんなマニュアルを用意し訓練をしておけば良いのか、規制基準に反映すべきことはないか。世界中でおよそ440基の原子力発電所が運転している。そのいずれかでトラブルや事故事象がある頻度で発生することは、部屋の中に同じ誕生日の人がいることと同じように驚くべき稀なことではない。現状から改善すべき点はないか、いつも考えていること、これらの得られた経験から貴重な知見を学び取り、それを教訓として取り込む準備が常にできていることこそが重要である。

原子力学会の理事会は20名の理事と監事で構成されている。それに事務局長と事務局2名が出席している。合計は23名、「誕生日の問題」の答えの魔法の数ではないか。そうすると、筆者と同じ誕生日の人がいる確率は6%、誰か誕生日が同じペアがひと組み以上いる確率は51%である。同じ誕生日の人がいること、全ての人の誕生日が違うことのオッズはほとんどイーブン(51%対49%)と拮抗している。さて、こうなると、理事と監事と事務局、全員の誕生日を調べてみたくなる。

(理事 山口 彰)

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