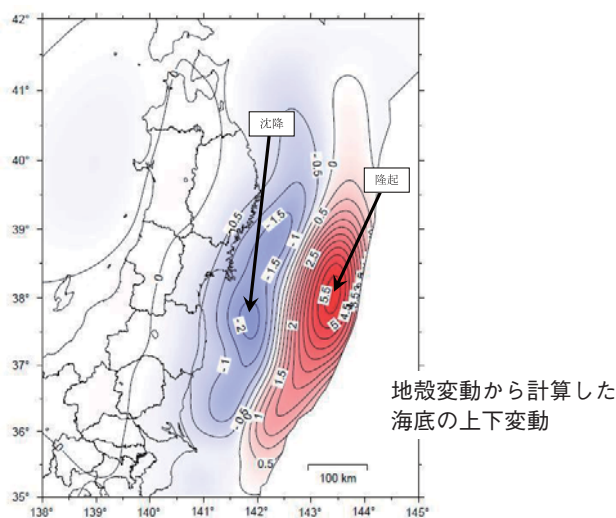


### 巻頭言

- 1 広い視野を持った若者の原子力人材育成を！ 中込良廣

### 東日本の巨大地震に学ぶ(4)

- 14 2011年東北地方太平洋沖地震  
東日本大震災を引き起こした地震のエネルギーは、1923年の関東地震の約45倍、1995年兵庫県南部地震の約350倍という見積りになる。  
尾池和夫



### 論点 「原子力」を考える

- 17 エネルギー安全保障と今後の原子力—脱原発の影響を考える  
脱原子力を進めることは、再生可能エネルギー発電や火力発電による代替がもたらすエネルギー安全保障上の損失を考えると、極めて厳しい。  
山名 元
- 22 リアルな原発のたたみ方  
原発のシェアはどこまで減らすことができるか。それは再生エネルギーの技術革新と節電、石炭のCO<sub>2</sub>削減技術の進展、つまり、それらによる「引き算」によって決まる。  
橋川武郎

### 時論

- 2 「安全神話」「安全・安心」とリスクコミュニケーションを考える  
専門家の理解と一般の人々との理解の間には大きなギャップがある。どう乗り越えるか。  
大西有三
- 4 福島第一原子力発電所事故後への諸外国の反応  
事故の教訓を深く考え、事故の知見と併せて伝え、世界の原子力の安全確保に貢献する義務がある。  
尾本 彰
- 6 今後の原子力教育に夢を  
「日本の原子力」だけでなく、「世界の原子力」を視野に入れよう。  
竹田敏一

### 解説

- 27 全電源喪失について  
原子力発電所の安全を担保する思想は深層防護である。全交流電源喪失だけでなく、母線や直流を含む全電源喪失等についても発生確率とリスクに応じた対策が重要である。  
岡本孝司
- 32 原子力発電所の全交流電源喪失規制はなぜ遅れたか  
フランスのルブレイ発電所では1999年に川の増水でポンプなどが水につかり、冷却システムが停止して緊急事態に陥った。このような過去の教訓をなぜ、福島では活用できなかったのか。  
宮坂靖彦
- 36 チェルノブイリ原発事故：初期の混乱から国際機関のまとめの報告まで—WHO, IAEAなどの10年、20年のまとめ、および25年目のUNSCEAR 2008  
災害時に流言蜚語はつきものである。チェルノブイリ事故が起きた後も、それは例外ではなかった。  
長瀧重信
- 41 チェルノブイリ新シェルター建設の現状  
チェルノブイリでは、世界各国の資金援助によって進められてきた新シェルター建設プロジェクトが最終段階を迎え、巨大な石棺を覆う新シェルターの建設工事が開始された。  
武田充司



新シェルターの組み立て現場の想定図

表紙の絵(洋画) 「雪のあと」 製作者 武石絹枝

【製作者より】 秋の収穫のあと、大子の里にはわらを積み上げた「わらぼっち」が見られる。谷津田にひっそりと立つその風景の奥に、農民の暮らしがある。昨夜の雪も止んで、木々の梢の霧氷が旭にきらきら輝く。陽が高くなる頃には霧氷も雪も融けてゆく。この様な里山の静けさと空気を描きました。

## 解説

### 45 原子炉施設の確率論的リスク評価の動向と今後への期待 —第1回「確率論的リスク評価手法の特徴と課題」

原子炉施設の安全確保において、重要な役割を担っている確率論的リスク評価(PRA)。ここでは3回にわたって、PRA手法の特徴と取り組むべき課題、日本原子力学会におけるPRA実施基準の整備状況およびPRA活用への期待を述べる。

山下正弘

### 51 核不拡散から見たウラン濃縮および使用済燃料取扱いに関する最近の注目すべき国際動向

今年6月に原子力供給国グループで濃縮・再処理の輸出に係る新基準が合意された。また、IAEAでは濃縮ウランの供給保証システムが具体的に歩みはじめた。これら歴史的イベントに注目し、最近の核不拡散—平和利用の国際動向を解説する。

久野祐輔, 山村 司

### 55 クリーンアップ分科会の活動

学会のクリーンアップ分科会は、「除染方法のカタログ」の作成や「除染モデル検証」などの活動を行っている。

井上 正, 藤田玲子



水田の代かきによる除染効果の確認試験

## 解説シリーズ 第2回 ヒューリスティックな最適化手法とモデリング

### 57 古典的手法と Particle Swarm Optimization

近年、注目を集めている Particle Swarm Optimizationの原理的な特徴を、古典的な最適化手法と対比させながら解説する。

相吉英太郎, 岡本 卓, 小林容子

## 連載講座 第6回 材料が支える原子力システム

### 61 機能性材料

核分裂システムに使用される機能性材料の問題を、電気計装用に用いられるMIケーブルと温度計測用に用いられるシース型熱電対を例に紹介する。

四竈樹男

## 8 NEWS

- 学会、福島事故後をめぐり国際シンポ
- エネ調基本問題委が来夏エネ政策策定
- 核燃料サイクル小委が事故コスト試算
- 安全庁設置へ顧問会、座長に松浦氏
- 政府の東電経営・財務調査委が報告
- IAEA調査団が除染や被ばく低減で助言
- 安全委WGが防災範囲を検討
- 環境相が中間貯蔵工程表提示
- 中長期措置検討部会「廃炉に30年以上」
- 海外ニュース

## ATOMOS Special 世界の原子力事情(20) 東欧編(最終回)

### 66 ポーランド —新原子力発電所建設に不確定要素

杉本 純

## 談話室

### 68 若手の想い:原子力技術者の若手として、今、何を実施すべきか?

中里 道, 谷中 裕

## ジャーナリストの視点

### 70 われわれは裁判官ではない

福田 悟

- 26 From Editors
- 65 書評 『Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow, 2nd Ed.』 波津久 達也
- 72 会報 原子力関係会議案内、主催・共催行事、人事公募、英文論文誌(Vol.49, No.1)目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

## WEB WEBアンケート

11月号のアンケート結果をお知らせします。(p.71)  
学会誌記事の評価をお願いします。

<http://atomos.aesj.or.jp/enq>

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

# 広い視野を持った若者の原子力人材育成を！



原子力安全基盤機構 理事長

**中込 良廣** (なかごめ・よしひろ)

東北大学大学院原子核理学専攻修士課程修了。京都大学原子炉実験所教授、原子力安全基盤機構理事を経て、平成23年から現職。

筆者が原子力に関係することになった昭和43年頃、「原子力学」は当時の最先端科学・時代の花形産業であり、世間的にチャホヤされた時代、いわゆる原子力の黎明期であった。しかし、その後の米国スリーマイル島発電所や旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所の事故、さらには、平成23年3月11日に発生した東京電力(株)福島第一原子力発電所事故の影響を受けて、原子力に対する見方は一変した。これに呼応するかのようには、日本の原子力ではその対応に変化が生じてきているように思える。福島第一事故においては、確かに福島県民、特に直接放射能の被害を受けた近隣市町村の住民の方々には、今においても大変なご苦労をお掛けしていることは、原子力関係者としてその苦労を察するに余りある。原子力の安全確保は最優先課題であることに間違いはない。が、「原子力は難しい。安全性は専門家に任して下さい！」といった当時の政界や原子力関係者の態度や、現在、我々日本人にとって、原子力に対する正しい理解をすることが必要になっているときに、“教えてあげる”といった上目線の姿勢が原子力関係者の体質として反省を求められていることに、まず気付くべきである。小難しい論理を使って話しをすることが聴衆に尊敬される、といった考えを改めるべきではないだろうか。やさしく話すために、“たとえ話”を導入したら、かえって分からなくなる場合があることに気付かない方々。話し手にとって「本当に内容を理解していないと、やさしく話せない」ことを知るべきである。

昨今、太陽光発電や風力発電といった自然エネルギーを利用する議論が声高に叫ばれているが、将来の我が国のエネルギー政策を考えるに、バランス感覚を持った政策を考えることが重要である。エネルギー源としての原子力を考えるに、ウランという限られた量の地下資源を利用することになるが、人間の持つ知識を最大限利用して考えた“再生プルトニウムの利用”でエネルギー源を確保する施策は、人類に与えられた大きな“力”であると思っている。知恵を活かした科学技術を捨ててはならないのである。この技術の伝承とともに、原子力を目指す人材を確保することがエネルギー政策の長期政策と考えている。単に費用だけの問題で議論してはならないのがエネルギー政策である。

上述のように、原子力は素晴らしい一面を持つエネルギー源と認識しているが、国内では福島事故の影響を受けて、現時点では“悪の元締め”的扱いを受けている。この影響により原子力産業が疲弊し、直接現場経験を持たない若者が増えることを恐れている。すなわち「マイプラント意識」を持った原子力関係者が少なくなることを憂えている。若者という“ひよこ”を育てるのは大学等であり、これらの人材育成を実施しても、国内外での就職先がないと勉強してきた価値を活かせないことを忘れてはならないのである。技術の継承・伝承も使命感だけでは達成できないのである。

今後の原子力人材育成において、安全性そのものだけでなく、核不拡散といったソフト面についても教育することが大切である。我々日本人は、研究者は核兵器の開発研究のために核燃料物質を使用せず、また周りの住民(日本人)もそのようなことはしていないであろうと疑っていない(事実その通りである)。しかし外国から見ると、「日本(人)は、いざとなったら何をやらすか分からない！」と見ていることを知るべきであろう。この視点において、我が国の原子力関係者は、「安全」さえ研究しておれば誰でも認めてくれる、または分かってくれると勘違いしているのではないだろうか。残念ながら、そう思っているのは日本人だけと思う必要がある。もっと広い視野に立った教育を行い、広い見識を持った人々の出現(特に若い人)に期待したい。そして原子力産業に、活力を！

(2011年 10月22日 記)



## 「安全神話」「安全・安心」とリスク コミュニケーションを考える



大西 有三(おおにし・ゆうぞう)

京都大学理事・副学長  
京都大学工学部卒業、カリフォルニア大学  
バークレー校工学研究科博士課程修了。  
京都大学工学部教授などを経て2008年から  
現職。専門領域は地盤工学、岩盤工学、  
地下空間学、地下水工学。

2011年3月11日の東日本大震災は、未曾有の被害を我が国にもたらしたが、中でも津波の破壊力にはすさまじいものがあった。土木工学を専門とするものにとって、今回の地震・津波の後のさまざまな構造物の惨状を目にして、強いショックとともに被害が大きかったことに心痛むばかりである。一方、引き続いて起こった福島第一原子力発電所の全電源喪失から爆発に至る事故は、これまで日本が経験してきた大規模自然災害とは全く異なる様相を呈することになり、日常では無縁とされていた放射能問題を全国民に知らしめることとなった。「安全神話」が崩れたと大騒ぎになり、その後の何とも言いえない国内の混乱が、エネルギー安全保障、日本と地域の復旧・復興に大きな影を落としたことは記憶に新しいところである。

思い起こすに、阪神大震災の時に高速道路などのインフラ構造物が甚大な被害を受け、「安全神話」が崩壊したとしてマスコミなどにおいて大きな批判を浴びた。それ以前の外国での地震時建物崩壊についてのコメントで、ある研究者が「日本ではこのような事態には至らない」と述べたことが「安全神話」として世の中に定着してしまったのである。しかし、専門家の間では、かなりの構造物が破壊や崩壊したことに対しては、設計地震動を超えた外力が加わったので、破壊するのは予想通りであるという見解が一般的であった(こうした発言は、不謹慎ということでもマスコミには取り上げられなかった)。根本的な問題は、設計外力を含めた設計条件をどの大きさ(あるいは範囲)に設定するかであり、そこには行政や施主の判断も入ってくる。

今回の震災では、「想定外」という文言が多く使われ、後で責任逃れとして批判されることになったが、どの場面で「想定外」という言葉を適用するかで、意味するところは変わってくる。調査や研究を行うためには、相当広い範囲で事象を想定し、さまざまな検討を行う。ただし、その範囲は我々の過去の経験やそれを拡張した実験・解析などによって想定されており、それに経済的な判断が加わって、最終的な設計条件が決められることになる。

その線引きを誰がやるかについては、残念ながら明確な答えは出ていない。

ここで考えなければならないことは、専門家の理解と一般の人々との理解の大きなギャップである。市民の代表とされるマスコミ(市民の定義は常に曖昧であるが)は、専門家、特に科学者への信頼が損なわれ、不信感が増幅したと伝えているが、一面正しくもあり、一面正しくない。前者については、専門家の一般への日頃の説明が不足していることもある。科学者の側で、どうせ言っても分からないだろうという姿勢は改められるべきであり、いわゆるサイエンス・コミュニケータやサイエンス・ライター養成には今後意識して取り組むべきであろう。マスコミとの対話不足も解消に向けての努力が必要である。後者については、一般の人々の科学リテラシーの不十分さが感じられる。初等教育期からの理科離れが言われて久しいが、諸外国に比べて基礎的な科学知識とその応用についての教養が低く放置されているのは問題である。

原子力に関しても事情は同じである。「安全神話」崩壊に関しては、原子力の方がもっと深刻であると思われる。我々専門外の工学者に対してさえも、原子力発電所は“絶対”安全であると説明をされてきたという経緯がある。政策的にそのような表現が一般的に使われて来たことはやむを得ないが、こうした事故が起きたときの反発はすさまじいことになることが、残念ながら今回の事故で実証されてしまった。

研究者・技術者が「安全神話」に安住し、リスクが存在すること、事故が起こるといふことの想定を一般の人々に説明し続ける勇気がなかったこと、もっと分かりやすく放射線やその被害の内容を、また原子力技術の未熟な点を十分説明してこなかったことが、世間から乖離していると非難される基になっていると思う。我が国の原子力技術の欠点については、日本原子力学会誌2011.10号の巻頭言に矢川元基先生が、我が国の原子力開発は、欧米の認識科学から設計科学への道の逆を辿り、建前から本音へのコースを取ったために、まだ借り物技術のひ弱

さが見られなくもないと指摘されている。

原子力も土木も従来の枠組みからの脱出が求められている。最近では、文理融合という言葉がよく使われているが、分野横断を更に広げた「トランスサイエンス」という概念も登場している。これは「科学に問うことは出来るが、科学では答えを出せない問題群」を扱う領域とされており、3.11以後の原子力の話題は、正にこのトランスサイエンス的問題に移ったように思われる。この問題の判断は、しばしば「工学的判断」や「エキスパート・ジャッジメント」に基づいて行われることが多いが、今回の原子力発電所事故を契機に、極端な科学者不信、科学不信が広がっていて、抜本的な体制の立て直しが迫られている。特に、この中では、科学に基づいて「確率」、「不確実性」を取り扱うことになるので、この説明をどのように行うのか、あらゆるリスクを想定しリスクコミュニケーションを十分考慮した真摯な対応とダイナミックな行動が求められる。残念ながら原子力も土木も“ムラ”意識が強く、外とのコミュニケーションが十分に取られてきたとは言い難い面があったので、軌道修正が必要だろう。一方通行で説明するのではなく、市民からの質問にも答え、互いが理解できるまで努力することが必要である。100%の安全はあり得ない、条件設定やある確率で起きる事故にこう対応をするということまで、技術内容をかみ砕いて、理解してもらうよう努力しなければならない。

このコンテキストの延長線上に、「安全・安心」をめぐる議論がある。我が国では、“国民の「安全・安心」のために”、“住民の「安全・安心」を確保するために”という言葉が金科玉条のように、使われている。東日本大震災以後、その出現頻度は激しい。しかし、危機管理の観点から、この文言に違和感を覚えるのは私だけであろうか。個々の言葉には問題はない。科学的に定義をしたら、「安全」は何らかの形で数値化できるが、「安心」は何を指すのか課題である。「安心」は、すなわち心の安らぎである。人々の心の安らぎをどのように担保しようとするのか。

我々日本人の心の中には、常に不安が宿っているようである。不安感を抱えているために、非科学・反科学的論議にすぐ飛びついてしまう。付和雷同型で、ある方向に集団的に流されやすく、賛成か、反対かで世界を二分化する。公共事業を主体とする土木構造物に対する対応

でも二分化が起こったが、原子力に関する事柄では、特にその傾向が顕著であり、いま起きている事態への不安や恐怖が先走って、議論が感情的になる傾向にある。「安全・安心」を安易に使って、それらを確保しろ、その方向で努力しますと会話を交わす。しかし、専門家の「現状では、それほど不安感を持つ必要はない」といった発言に対して、専門知識の乏しい一般の人たちは、理解するより先に、「知らないと思って、うまくごまかされたのではないかと不安感を高めてしまうということが起きていることは残念である。

こうしたことは、なぜ起こるのか。リスクのない世界はないと科学的に考えてみると、「安全・安心」を保証することは、リスクをゼロ近くまでなくすると言っているようなものであるが、一般にその認識は薄い。一方、日本人には、「お上意識」がまだ強く残っていて、何かあると「お上」や「当局」を批判するか、「お上」にすがる。いわゆる父権主義が意識に残っており、自立して何とかやっていく姿勢が育っていない。現在は不安感がそれを一層増幅し、強い科学への不信・疑念を生じさせているといえる。

こうした問題を解決するには、科学コミュニケーションとリテラシーの普及が不可欠であることは、前に述べた。科学の中では、失敗は当然あるものと見込まれており、失敗を乗り越えてこそ、成功に至ると考えられる。結局、多様な選択肢を用意して、予想を超えたことに対処できるようにしておくことである。阪神大震災の後、教訓として、「予想外」が起こったときに、それにいかに柔軟に、臨機応変に対処できるかを考えておくことが重要であると語られている。

日本人は、リスクに向かい合うことを大変苦手としているのかもしれない。留学生の混じった大学の授業で、成功の確率が20-30%程度の大きな利益が得られる案件でリスクを取るかどうかを質問すると、大半の日本人学生はリスクを取らない、一方、大半の留学生はリスクを取ると答えると聞いている。こういう状況だからこそ、リスクというものは、確率的に必ずあるから、常にそれに対してアンテナを張っていることが大事だと声高く言い続けることが、科学者・工学者の使命ではないかと思う。いま改めて「禍転為福」を目指そう。

(2011年11月24日 記)



## 福島第一原子力発電所事故への諸外国の反応



尾本 彰(おもと・あきら)

東京大学原子力 GCOE 特任教授、  
原子力委員  
原子力工学を専攻し、東京電力、IAEA を  
経て現職。博士(工学)

東電福島第一原子力発電所事故以降、事故状況、収束状況、教訓、今後の安全確保の在り方等について話をしてくれとの依頼に応え、幾つかの国の原子力関係の国際会議やIAEA 総会などで大学人あるいは委員として話をした。原子力委員出張報告は定例会(16回, 25回, 35回)資料を参照頂きたい。この経験や関連情報の収集を基に、原子力関係者という限られた範囲ではあるが、世界が何に関心を持ち、事故をどう見て、今後原子力にどう取り組もうとしているかを紹介する。世界の関心は、当初の「何がなぜ起きたのか」から「教訓」へ、そして今後の安全確保にむけ「何を為すべきか」「原子力政策への反映」に向かっている。以下、項目に分け、議論を進めたい。

### 1. 日本固有の問題という理解のあること

当時、西側の多くの国がチェルノブイリ事故を欧米型とは違う設計と文化故との区別をしたように、「地震・津波という日本の特殊事情によるもの」、「危機管理の不備により拡大防止に失敗」、「日本のシビアアクシデントマネジメントの不十分さ」との指摘をし、自国は違うとする反応が見られる。前 NRC 委員長は「米国に当てはまる教訓は驚くほど少ない」と述べている<sup>1)</sup>。

なお、地震が炉心損傷に果たした役割について欧州で継続的に疑問が提示されている。4号機使用済燃料プールに亀裂が入って空焚きになったのではという事故当初からの「誤解」に留まらず、事故時の圧力容器・格納容器の圧力変化を地震による損傷で説明できるとするなど。これらの幾つかは、現時点では実際に検査・検証できないものもあり、完全な反証は難しいようだ。

### 2. 危機管理

米国人から who is in charge という質問をたびたび受けるほか、非常用発電機等を大型ヘリで運ぶなど、なぜ自衛隊を早期にうまく使わなかったのかという質問がロシア、東欧及び韓国の専門家に見られるのはお国振りを反映か。危機管理とは言えないが、IAEA のチェルノブイリ環境影響報告<sup>2)</sup>を読むと、環境除染に軍が果たした役割がうかがえる。米国人には、TMI 事故時、かつて原潜乗りの原子力技術者だったカーター大統領が夫人を

伴い過度な不安を抱かぬよう<sup>3)</sup>現地を訪れたことを記憶しているという人が多く、日本での指揮命令と危機管理の在り方が妥当だったのかと疑問を投げかける。

また、交流電源がなくても原子炉に水を送れる原子炉隔離時冷却(RCIC)系の動いていた3日間(2号機の例)にもっとできることがあったのではとの質問もよく聞かれた。筆者のBWRの知識では、30分間の全交流電源喪失仮定という規制指針が設計を支配しているわけではない。30分を超えてもバッテリー容量(8h)の限り、またそれを超えても自己蒸気を飲込み RCIC タービンはかなり長い間動き続ける故、これにより炉心冷却を続け、その間に原子炉系を減圧し様々な低压系の注水を促す一方、格納容器ベントで格納容器の健全性を長時間維持可能である。問題はその間の減圧と低压注水が動力のない条件下では困難であったということだが。テロ攻撃を想定した、いわゆる B5b 相当の安全対策が日本にはなかったことは米国の指摘するところ。将来のシビアアクシデントマネジメント(SAM)には、内因事象/外因事象/テロ攻撃によりもたらされる条件を考慮した包括的なものにすべきという指摘<sup>4)</sup>はもっともである。

### 3. 原子力の今後

国際会議では、日本の原子力政策はどうなってゆくのか、どのような長期展望で決めてゆくのか、資源の少ない故に原子力を志向した日本が原子力を捨て去ることは一体可能なのか、という問いかけがよくある。

世界中で国民の原子力に対する信頼が揺いだのは間違いないが、47カ国での Gallup 調査<sup>5)</sup>(事故以前の57%-32%という原子力発電への賛否が49%-43%へと変化)を引用し、影響の度合いはチェルノブイリ事故に比し限定的との見方が WNA(World Nuclear Association) シンポジウムで紹介された。それは地震・津波という事故原因にあるのではとの見方があり1.に関係するところであろう。

世論調査を国別にレビューした結果<sup>6)</sup>を見ると、国ごとの差異と調査主体による差異が大きいのも分かる。IAEA は、事故にもかかわらず2030年時点での原子力発電容量は増加(2030年までに90~350基増)で、背景は低炭素電源とエネルギーセキュリティ上の位置づけとの見

方をしている<sup>7)</sup>。事故が個別の国の原子力政策にどのような影響を及ぼしたかは、村上氏の資料<sup>8)</sup>に詳しく述べられている。新興国の中には原子力導入の検討を中止の国もあるが、成長点である東南アジア諸国を見ると、事故後に既存建設中の炉の再評価で安全を確認した中国を含め基本姿勢に変化は見られない。新興国の安全基盤形成への国際協力の必要性の再認識は言うまでもない。

ドイツでは10年後をめどに原子力発電の廃止を決めたが、首相への倫理委員会の報告<sup>9)</sup>にて持続的発展の観点から原子力発電を論じている。英国では事故による原子力計画への影響が余り見られない。英国は、2008年の気候変動法で、2009年ラクイアサミット合意事項の「2050年までに先進国は温暖化ガス放出80%削減」を法制化しており、これを達成する上で原子力発電は不可欠と考えている。英国は Sizewell-B 建設以降、原子力は漸減だったが、7月に新規建設に向けエネルギーインフラの整備に関する National Policy Statement (NPS) を公表した<sup>10)</sup>。2050年までのパスを6つのシナリオにわたって分析した長期分析<sup>11)</sup>は非常に興味深い分析であるが、近未来については原子力新規建設に向け NPS で立地/許認可の新たな仕組みを作った。欧州レベルでは、低炭素化/エネルギー供給セキュリティ確保/競争力確保を目指した EC「エネルギーロードマップ2050」がポスト福島をにらんで完成されようとしている。需要側に省エネルギーを期待し、再生可能エネルギーと CCS (Carbon Capture and Storage) との関係で原子力シェアが論議されているようだ。フランスでは原子力シェアを減らすオプションも含めた「エネルギー2050」報告が2012年早々に出る。欧州全体として目指すものが各国個別の政策の上によろしく成立するのか興味深い。

#### 4. 今後の安全確保

IAEA は事故後、日本に調査団を派遣し、その報告<sup>12)</sup>を含め6月に大臣級会合を開催した。それを踏まえた IAEA 安全基準のレビュー、IAEA によるレビューミッションなどからなる12項目の行動計画<sup>13)</sup>が総会で了承され、国際的にこれを軸にした安全強化が進められるが、議論の過程では、IAEA のもつ強制力強化の声の一方、国の主権重視と、国により意見の相違が見られた。IAEA 調査団報告は、事故に際して発電所は良い対応をしたが津波に対する防御と SAM は不十分だった、全ての教訓は安全基本原則でカバーされるとしている。事故の教訓を生かし不断の安全性向上に役立てるとの決意は各国とも共通である。欧州とロシアはストレステストによる評価で、自然災害対策、冷却確保による炉心損傷防止、環境放出防止など、設計と運用の継続的な改善を図る方針である。事故の教訓を米国 NRC 報告<sup>14)</sup>、英国 HSE 報告<sup>15)</sup>が論じ、設計基準事象を超える事象への対応能力の深みを増すための方策を提言している。確率論的評価の知見

を生かしつつ、決定論的な考え方の重視と深層防護の厚みを増すとの見方を聞く。

東南アジア諸国の会議では、専門家不足に悩む中、規制体制の将来(安全/セキュリティ/セーフガードの一体化、独立性)を検討している。重要なのは規制者の技術能力だというのは、ROSATOM という巨大国家組織の一部として規制をもつロシアの反応だがもっともと思う。国際会議では、なぜ原子炉事故と津波や化石燃料利用と比較し死者数を話さないのかの批判的な質問もある。私は、その数値は皆さんがよくご存知だし、その指標だけで見るのは適切でない、避難者数/環境汚染/事故コストなど多数の指標で見ると返している。環境除染への取り組みを評価しつつも IAEA は最適化の必要性を指摘している。

わが国が今後、原子力依存度を減らしても、世界が同様に動くわけではない。例えば、隣の中国は現在27基の商業炉を建設中で、後10年で日本を上回る原子力発電容量を持つと推定されている。わが国は事故の教訓を深く考え、事故の知見と併せて伝え、増加するであろう世界の原子力発電の安全確保に貢献の義務がある。事故を起こした国として、(1)確率論的な考えと決定論的な考えをどう併用すべき、(2)深層防護をどう改善、(3)安全文化教育はどう変わるべき、といった問いに答えを発信する必要がある。不確かなことへの謙虚さと柔軟な対応能力の改善、深層防護の深みを増す中で炉心損傷が起きても重大な環境汚染に至らないよう方策など、幾つかの点で安全理念を考え直すことも必要と思っている。

(2011年 11月 3日 記)

#### —参考文献—

- 1) Ripon Forum, Summer 2011.
- 2) IAEA, “Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation”, 2006.
- 3) “A Presidential Tour to Calm Fears”, Washington Post “Crisis at the TMI—20 years later”, 1999.
- 4) NEI/INPO/EPRI, “The way forward”, June 2011.
- 5) WIN-Gallup International poll, 19 April 2011.
- 6) 大磯, 「福島第一発電所事故後の原子力発電に対する海外世論の動向」, INSS Journal Vol.18, 2011.
- 7) IAEA General Conference, September 2011.
- 8) 村上朋子, 「福島第一原子力発電所事故による諸外国の原子力開発政策への影響」, July 2011.
- 9) Ethics Commission for a Safe Energy Supply, German’s Energy Transition, May 2011.
- 10) National Policy Statement for Energy Structure, DECC, July 2011.
- 11) 2050 Pathway Analysis, DECC, July 2010.
- 12) IAEA Expert Mission Report, June 2011.
- 13) IAEA, GOV/2011/59-GC(55)/14, “Draft IAEA Action Plan on Nuclear Safety”, September 2011.
- 14) USNRC, “NRC Recommendations for Enhancing Reactor Safety in the 21 st Century”, July 2011.
- 15) UK-HSE, “Final report on the Japanese earthquake and tsunami”, September 2011.



## 今後の原子力教育に夢を



竹田 敏一(たけだ・としかず)

福井大学附属国際原子力工学研究所  
所長・特任教授

大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻  
博士課程修了。工学博士。専門は原子炉物  
理学。日立製作所原子力研究所研究員，大  
阪大学大学院工学研究科助教授，同教授を  
経て，2009年4月より現職。大阪大学名誉  
教授。

2011年3月11日の東日本大震災による福島第一原子力発電所の重大事故(国際原子力機関が定める原子力事象評価尺度で最悪のレベル7)を受け，原子力界の将来が危惧されている。放射線量の測定，医学的影響，放出された放射性物質の除染，安定した炉心冷却，除染水の処理が当面重要な課題であり，有効な手段による事故の収束が望まれる。収束には，このほか，炉心溶融による燃料デブリの除去も課題として残されている。

このように，事故を収束させるためにも，数十年の期間にわたり，放射性物質の除染，原子力プラントの廃止措置を継続して実施していかねばならず，そのために若手技術者の育成が必要であり，それには，原子力教育の継続・充実が不可欠である。

しかし，学生にとって将来の仕事が放射性物質の除染，プラントの廃止措置しかない場合に，原子力を自分でやってみようとする積極性のある優秀な学生が，大学の原子力関連の学部・専攻に入ってくれるであろうか？半年前までの原子力カルネッサンスと称される時代には，世界で原子力に対する夢があった。第4世代原子力プラント(GEN-IV)が国際的に議論され，将来原子力プラントとしては持続可能性，経済性，安全性・信頼性，核拡散抵抗性を有するプラントが選ばれ，国際協力の下，研究開発が行われてきた。国内においても，ABWR，APWRプラントの建設が本格的に始まろうとしており，GEN-IVの最有望株であった高速増殖炉も，原型炉「もんじゅ」を有効活用しながら2025年までに実証炉，2050年には実用炉の運転を開始する計画であった。現在，これらの夢は凍結状態にされている。事故前に決められたこれらの夢は，安全性を中心にして再検討すべきであるのは当然であるが，将来の原子力ロードマップについて，原子力委員会等が腰を落ち着け，しっかりと夢のある計画を作成してくれることを期待する。しかし，その間も，原子力に対する「夢」を新入生に与えつつ，原子力の教育・研究開発を続けたいものである。「夢」とは何であろうか？

GEN-IV原子力プラントで要求されている項目の「持続可能性」には，Pu等の有効利用による長期にわたるエ

ネルギー確保，温暖化ガス放出の少ないクリーンエネルギーによる環境保護のほか，放射性廃棄物の最小化も謳われている。高速炉を用いると，放射性廃棄物のうち，長半減期核であるNp，Am等の，いわゆるマイナーアクチニド核種を燃やし，核変換することができる。アクチニドバーナー炉等も考えられており，どのような設計が放射性廃棄物の削減に有効か，非常に興味のある課題である。さらに，「安全性・信頼性」に関しては，AP-1000のような静的安全性を重視したプラント，さらにはオフサイト緊急体制が不要となる超安全な原子力プラントの設計も，安全性重視という点では興味あるテーマである。

このような夢が，原子力にはある。しかし，日本国内だけで「原子力開発」と言っても，事故の影響でそう簡単に実行できるものではない。一方，フランス，米国，中国，インド，韓国，東南アジア諸国では，原子力安全性を慎重に考慮することは言われていても，原子力から脱却する方向ではない。日本としては，諸外国との国際協力の下，原子力研究開発を進めればよい。原子力教育に関しても，この国際協力を考慮に入れて実施すればよい。こう考えると，世界の原子力の「夢」を日本にも取り入れられれば，やる気満々の優秀な若手学生が原子力に入ってくれることを期待できる。

原子力教育で大切なことは，学生の基礎力の充実である。原子炉安全に必要な，①止める，②冷やす，③閉じ込める，の原理をしっかりと教えることである。①の「止める」に関しては，炉物理学で，「臨界」という概念が「実効増倍率(中性子増倍係数)」を用いて表現され，輸送方程式(拡散方程式)の固有値として導入されたことを示す。②の「冷やす」に関しては，燃料棒と冷却材の間のエネルギーバランス，冷却材流れの支配原理を教え，冷却材流量，圧力と温度の関係を基礎から理解してもらう。③の「閉じ込める」に関しては，放射線・放射性物質の挙動に対する基礎知識，それを閉じ込める原子炉容器等の材料強度についての基礎を知ってもらう。このためには，原子力の基礎・基盤となる原子核物理学，原子炉物理学，原子炉熱流動工学，放射線計測学，核燃料・材料



学, 原子炉制御学, 原子炉工学, 核燃料サイクル工学等のカリキュラムを体系的に教え, 学生が自ら体験できる原子力実験・実習を必須科目とする。これにより, 学生に原子力を実感してもらう教育システムを構築し, 学生に原子力への興味を持ってもらうことが必要である。また, 大学院の博士前期・後期課程では, 各分野の専門性を深く追求し, 独創性のある研究をやるのもよいし, 前述のカリキュラムの総合力を活かし, 将来の安全な原子力プラント, 核燃料サイクルを設計するのもよい。

個々の基礎分野研究開発も重要である。原子力プラントの安全性は, 最新の知見, データに基づいて評価することが安全審査の指針に明記されている。過度の安全裕度を持った簡易モデルが従前しばしば使用されているが, 原子炉核熱水力の物理現象を正しく把握できていない場合がある。例えば, 原子炉物理学におけるドップラー反応度係数の計算で言えば, 数 eV のエネルギー領域において, U-238 による上方散乱の効果が無視されてきた。上方散乱により, 一つの共鳴エネルギー領域の高い方のエネルギーの中性子スペクトルが増加する。その結果, U-238 による共鳴吸収が増加し, ドップラー反応度係数の絶対値も増加することが, モンテカルロ計算により発見された。この効果を取り入れない場合, ドップラー反応度の絶対値は約 10% 程度過小評価されるので, 従前手法は一般的に安全側であったのだが, 上方散乱の物理現象が見過ごされていたことになる。

核設計分野では, 炉物理計算手法と共に用いる核データの精度評価も重要となる。本年, 日本原子力研究開発機構より新しい核データ JENDL-4.0 が公開されて核計算に広く用いられることが期待されている。JENDL-3.3 に比べ, 核特性の精度向上が確認されているが, 今後どのようにアップデートすべきかについても, 一つの課題である。さらに, 計算法としても従前は決定論的手法が広く用いられてきたが, 燃料棒ごとの非均質性をそのまま取り扱うモンテカルロ法が, 2018 年頃には設計計算に用いられる期待がある。

熱水力分野においては, 古くより統計手法を取り入れてきたが, そこで取り扱われる不確定性は主に通常時の計測・制御誤差に限定した控えめなものであった。安全解析で想定されるような条件下での冷却挙動に関する不確定性は, その解析目的に照らして依然, 保守的に取り扱われてきたが, これらはともすれば, 現象の本質的な理解や解明の妨げともなってきた。近年では, これらの分野についても最適手法の開発及び不確かさ評価が活発に実施されている。炉心部では 3 次元の核・熱水力評価を動的に結合させた最適評価技術により, 事故時の現実的な炉心挙動が評価可能となっている。これらは, PWR のような開水路型の炉心も含め, 実際の制御棒動作やボイド発生による局所的な反応度効果を考慮しながら, 1 点近似動特性では追うことのできない現実的な炉心の出

力分布挙動を評価するものである。また, LOCA を含めた事故時のプラント全体の二相流挙動に関しても, 最適評価モデルの開発は目覚ましく, 一方で CSAU (Code Scaling, Applicability and Uncertainty) に代表される不確かさ評価手法の確立を受けて, これらの最適評価手法を安全解析に生かしていく取り組みも国外では既に実用化され, 国内でも準備が整いつつある。

核・熱水力以外の分野での最適手法の開発, 不確かさ評価はこれからである。原子力材料及び核燃料の安全性は核燃料の燃焼に伴う物性変化測定手法の開発や, 高経年化による原子力構造材料劣化を予測する手法や検査技術の開発など実験的研究とともに, 放射線による材料劣化を予測するためのマイクロ・マクロ相関則を統合したマルチスケールシミュレーションモデルの開発が進められている。各スケールにおける放射線による材料劣化の解析には, 放射線による格子欠陥, 空孔の挙動を分子動力学(MD)に基づき計算するミクロ領域解析, 転位や欠陥集合体の組織発達をモンテカルロ計算モデルや速度論モデルに基づき計算するメゾ領域解析, さらに材料物理を機構論的立場から研究するマクロ領域の解析がある。この 3 領域を結び付ける境界条件については, 研究も充分ではなくマルチスケールシミュレーションモデル構築への課題は多い。大学院学生に 3 領域を理解してもらうことにより, 学生の研究分野が広げられ, 非常に有益と考える。

また, 福島事故を踏まえ, 静的安全性を有する原子力プラント, 全交流電源喪失が生じない原子力プラント, シビアアクシデントが発生しにくい原子力プラント等の設計研究もまた, 今後の日本の原子力界を支える上で大学院生に研究してもらいたいテーマである。独創的な発想により, 全世界の原子力プラントの安全性向上を目指してもらいたい。これらの学生の成果が, 今後の日本, 世界の原子力界の将来に反映されるような体制を構築することにより, 優秀な学生が育つようにすべきである。

最後に, 国際協力について述べる。原子力教育の効果を上げるには, 教育体制の国際化が不可欠となる。日本国内でも教育の連携ネットワークが進められているが, 国際ネットワークも並列して進めるべきである。原子力教育にとって不可欠となる教育用(研究用)原子炉, 臨界集合体等の大型実験施設の維持・管理・さらには廃止措置については, 一大学だけで対処するには問題が大きすぎる。また, 施設の高経年化の問題も生じてくる。このような環境下, 学生に実験を続けてもらい, 実のある原子力教育を維持するには, 国際協力により世界の大型施設を有効に活用することを考える必要がある。原子力のソフト・ハード面の教育をより充実させ, 「原子力をやりたい」と思う学生を増やしたいものである。

(2011年10月31日 記)



このコーナーは各機関および会員からの情報をもとに編集しています。お近くの編集委員(目次欄掲載)または編集委員会 hensyu@aesj.or.jp まで情報をお寄せ下さい。資料提供元の記載のない記事は、編集委員会がまとめたものです。

## 原子力学会、福島事故後をめぐり国際シンポジウム

日本原子力学会は10月31日、11月1日の2日間、都内で原子力安全国際シンポジウムを開いた。基調テーマは「福島第一原子力発電所事故の教訓と将来に向けて」で、報道関係者18人を含む300人が参加した。

会合には OECD/NEA や WANO など海外からの講演者5人が登壇。世界各国の趨勢としては、福島事故を経て世界の原子力開発はいくらかスローダウンするものの、全般的には原子力推進の姿勢は維持されとの見通しが示された。

ここでは、福島事故後の世界各国の動向を紹介したその5人の講演と、会合の締めくくりに発表された学会長声明を紹介する。



海外からの講演者として最初に登壇したのが、OECD/NEA のテューリー・ドゥジャルダン氏。同氏は「福島事故後の世界の原子力動向」というテーマで、世界各国がこの事故をどう受け止めたかということから、説明を始めた。

「この事故が起きた直後、海外諸国は、日本の原子力発電所の事故が制御できなかったことに驚き、事故の情報が十分に公開されなかったと感じた。また日本政府は何千人もの人々に対し避難措置をとったが、その措置は迅速であり正しかった。なお、この事故をうけて各国は、安全確保の向上に向けて、ストレステストなどを行うなど迅速に対応した」。

一方で同氏は、福島でのこの事故にもかかわらず、原子力を進める世界の趨勢に変わりはないと断言。「世界では30ヶ国が、440基の原発を運転している。設備容量は375GWeで、その90%が軽水炉だ。世界各国の総発電量に占める原発のシェアは、フランスの70%超を筆頭に、15ヶ国が15%を超えている。世界で建設されている原発は現時点で65基あり、2010年だけで16基が着工した。事故にもかかわらず、原子力は今後も伸びていく」と述べた。

同氏はその理由について、「世界的に経済成長が続いており、エネルギー需要が増加している。さらに化石燃料のコストが上昇しており、温暖化対応に迫られている。これらの話は、福島事故の影響をうけない」と説明。「とはいえ、世界の一部の世論は事故の影響をうけており、ドイツやスイス、イタリアは、脱原発へと舵を切った。世界の中には今後、原子力の導入ペースを落とす国

もあるだろう。しかしながら大半の国においては、原子力の推進に変わりはない」と続けた。

さらに同氏は「温暖化ガスが増え続けており、今日の世界は安全ではない。それを解決するために、未来は高いコストを支払わなければならないことを予感させる。原子力は、それを解決する手段の一つであり、再生可能エネルギーに過度な期待をしてはならない。日本の今後の動向には、世界が注目している」と述べた。

続いて登壇したのは、WANO のジョージ・フェルゲート氏。「福島第一原子力発電所事故後の WANO および原子力産業界の活動強化」と題して講演を始めた同氏は、WANO が世界各国の運転経験やそれから得られた教訓の共有、ピアレビュー、専門家や技術者の育成、技術支援や交換を行っていることを説明した。さらに TMI、チェルノブイリ、福島で起きた炉心損傷事故を比較し、「TMI とチェルノブイリは割に新しく、事故を起こした福島の原子炉は長く運転してきた炉だった。事故の発端は TMI とチェルノブイリはヒューマンエラーだったが、福島は外部事象によって引き起こされた。根本原因は TMI が訓練不足、チェルノブイリが安全文化の欠如であり、福島は不明である」と述べた。

また日本の安全文化については、「長所と課題がある。課題は、市民に悪い情報が届くことが、発電所職員にプレッシャーになる。だから、あまり情報を出したくないという傾向がある。疑問をもつ態度が、文化として必ずしも受け入れられていない。後輩が先輩に反論や質問をしにくい場合がある」と批判。さらに各国の原子力産業界については、「福島の教訓は重要だが、TMI やチェルノブイリも忘れてはいけない。ヒューマンエラーは今もなお、炉心損傷を引き起こす可能性がある最大の要因である。原子力産業界はこれまで、事故の防止には重点を置いてきたが、事故後の影響緩和にも重点を置く必要がある」と述べた。

続いて米国の INPO のリー・ガード氏が登壇し、「INPO のミッションは、商用原子力発電所の運転における最高レベルの安全性と信頼性を推進することにある。安全の世界標準を定め、それを他者にも期待することにある。この目的に沿って、ピアレビューや分析・情報交換、支援、訓練・認証を行っている。INPO の現在

のメンバーは、米国内が26社で、対象となる原子炉が104基。このほか米国外の23社、サプライヤ24社が参加している。職員は350名で、予算は1.1億ドル」と説明した。

また INPO は3.11後、「産業界における活動の調整や東電に対する支援、ステークホルダーに対するタイムリーな情報提供、事象シークエンスと原因の把握、米国プラントに必要となる活動の作成支援を実施。米国全体では、既存の産業界緊急時対応計画を利用して、緊急時対応センターを立ち上げた」と説明。日本に対しては「海軍やNRCからなるチームが訪日して支援を行うとともに、INPOのリードにより東電に対する産業界ベースでの支援チームを創設した。日本語で対応できるこのチームのメンバーは約10人からなり、専門的な知識をもとに、東電本店内で今も支援を行っている。費用はボランティアで、支援が必要とされた分野は炉心への注水経路、系統のリスク解説、窒素注入、再臨界リスク、ロードマップのレビュー、冷温停止の定義、TMIの経験、安全文化など多岐にわたる」と述べた。

世界最大の原子力シェアを誇るフランスからは、フランス電力公社のジルベール・モリッツ氏が、「フランス電力の原子力発電所における福島第一原子力発電所事故後の追加的安全評価」というテーマで講演。同国では福島事故後、首相がASNにフランス国内の発電所について、洪水、地震、給水喪失、電源喪失、事故マネジメントの5分野の検査を行うよう要請したと述べた。

またASNはEDFに、原子力施設の追加的安全評価を行うよう要求。これを受けてEDFはASNに、計7千ページからなる報告書をまとめた。そこでの評価では、すべての発電所の安全性が現状は良好であるものの、設計基準より過酷な状況の可能性まで考慮して、建屋の水密化、堤防のかさ上げ、電気設備の頑健性向上、水源の追加、格納容器の強化、コアキャッチャーの設置などの追加措置をとるよう求めている。また緊急時対応の高度化のために、原子力迅速対応部隊FARNが設置され、事故が起きると24時間以内に当直チームを支援するために介入を始めることとなった。

さらにEDFでは10年ごとに評価を行っており、その際に世界の運転経験や科学技術の進歩、環境の変化などの知を統合しており、これに沿って必要に応じ、大規模な改造を行っていることも紹介した。

海外からの講演者として最後に登壇したのが、ロシア・ロスエネルゴアトムのオレーグ・チェルニコフ氏。「ロシアにおけるチェルノブイリ事故後の安全確保の取り組みと福島第一原子力発電所事故を踏まえた対策」とい

うテーマで講演を始めた同氏は、チェルノブイリ事故後、VVERとRBMK炉の安全審査と評価を国際的な専門家の支援を得て実施していること、主要な安全問題を摘出し、その問題を解決してきたことを紹介した。また福島事故後、全発電所で非常用電源、水素爆発防止、耐震、構築物、非常用炉心冷却、放射線モニタリング、事故マネジメントの自己評価と、非常事態における安全性解析を実施。その結果、まず緊急時演習を行うこと、1年以内に熱除去に用いる追加的水源の特定、地震の影響の解析、事故マネジメントの解析を実施し、2年以内に追加設備の設置、緊急時手順書の調整を行い、5年以内に追加の設計解決策をフルスコープで導入すると説明した。

◇ ◇

この会合では最後に、日本原子力学会の田中 知会長と日本保全学会の宮 健三会長は「原子力安全の確保に向け最大限の貢献」と題する共同宣言を発表した。その内容は以下の通りである。

2011年3月11日は、原子力発電の歴史において忘れてはいけぬ日になった。

我々は、本国際シンポジウムに参加いただいた学協会および世界の諸機関のご指摘とアドバイスを基に、明らかになった事実を尊重し、高い倫理観のもとで、公平・公正かつ透明な議論を行い、社会に対して信頼できる正確な情報の発信と、具体的活動に自ら取り組む。

我々は、二度とこのような事故を起こさないために、学術的専門家集団として、東京電力福島第一原子力発電所の事故を真摯に反省して教訓を抽出し、これからの原子力安全の確保に最大限貢献することこそ重要な役割であると認識する。

我々は、事故から得られた知見の整理・分析を通じて、導き出された教訓を基に、各機関や行政組織の施策に適切に反映すべく提言や学術的、技術的な支援を積極的にを行い、世界で運転されている多くの原子力発電所の安全性をより確実なものとすることに貢献する。

我々は地域社会や日本の復興に向けた技術的なサポートを継続し、信頼回復に努める。

我々は、真理を探究する学術的な立場に立脚しつつ、より高い安全性を目指した原子力安全基準の策定や安全研究など国際的な原子力安全に向けての諸活動に積極的に参画し、世界の原子力発電所が科学的・合理的な管理のもとで安全性を確保することに貢献する。

我々は、以上の活動により、原子力発電に対する安全を追求し、地球環境保全と人類のエネルギーの確保に貢献することを、ここに宣言する。

(日本原子力学会)

## エネ調・基本問題委が慎重派含めエネ政策策定へ

福島原子力事故発生後のエネルギー政策見直しを行う経済産業省の総合資源エネルギー調査会・基本問題委員会(委員長＝三村明夫・新日本製鉄会長)の初会合が10月3日に開かれ、原子力への依存度や電力改革などを焦点に、中長期的なエネルギー・ベストミックスのシナリオを描く議論が始まった。委員は電力関係を除く企業トップ、有識者のほか、原子力推進に慎重な立場をとる消費者団体、労働者団体からも招き入れたメンバー構成となっている。

現行のエネルギー基本計画は、10年6月に「エネルギー自給率の大幅な向上とエネルギー起源CO<sub>2</sub>の削減」を掲げて策定され、30年度に原子力では、発電量全体のシェア53%、新增設14基以上といった姿を想定している。今後、同委員会では政府のエネルギー・環境会議とも連携の上、福島事故の検証、規制改革、原子力政策大綱見直しなども見据えながら、来夏をめどに、新しいエネルギー

基本政策の策定を目指す。

また「エネルギー・環境会議」が10月3日に設置を決めた「コスト等検証委員会」(委員長＝石田勝之・内閣府副大臣・国家戦略担当)の第1回会議が7日に開かれ、各種のエネルギー・コスト試算を行うことを決めた。10月から年末までに計8回程度開催し、年末に試算結果を取りまとめ、同会議に報告する予定。

コスト等検証委員会では同日付で原子力委員会に対して、原子力の専門性を考慮して同委員会・技術等検討小委員会での検討結果を、11月上旬までには報告するよう要請した。年明けから総合資源エネルギー調査会の基本問題委員会と原子力委員会がコスト試算結果を基礎にして、エネルギーのベストミックス、原子力政策を検討する。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下の記事も同)

## 核燃料サイクル等検討小委が事故コストを試算

原子力委員会は10月25日に原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会を開き、核燃料サイクル・コストと事故が起きた場合の原子力発電コストについて議論した。

使用済み核燃料の処理に伴う費用はすべてを再処理した場合、1kWhあたり1.98円であるのに対し、直接処分する場合は1.00～1.02円と試算された。一部を再処理して残りを中間貯蔵する現状のままだと1.39円となる。

事故が起きた際の追加コストについては、これまでの稼働状況と事故を踏まえて日本の原子力発電所事故の確率を500年に1回と仮定した場合、1kWhあたり最大

1.2円程度とする試算結果を発表した。しかし今回の試算には広範囲の除染費用などが含まれていないとの指摘もあり、別の試算結果も併記した。

同小委員会座長の鈴木達治郎・原子力委員長代理は今回の結果について、議論の前提や内容を理解した上で参考にしてほしいとし、あくまで現時点での報告だとした。再処理工場の事故影響は勘案していない。

同小委員会は11月8日に再度議論を行った上で、同月中旬開催予定のエネルギー・環境会議コスト等検証委員会で報告する。

## 安全庁設置へ顧問会、座長に松浦元安全委員長

細野豪志・原発担当大臣のもとに進められている原子力安全規制組織改革の具体化を検討する「原子力事故再発防止顧問会議」の初会合が10月4日開かれた。規制改革の方向性については8月、原子力安全・保安院を経済産業省から分離し、その役割を担う「原子力安全庁」を環境省の外局として、12年4月に設置することを1つの柱とした基本方針が閣議決定されている。

顧問会議の座長に選任された松浦祥次郎氏(元原子力安全委員長)は、審議開始に先立ち、これまで一貫して原子力安全確保に関わってきた自身の経歴を紹介した上で、今回の福島事故については「忸怩たる思い」と述べ、強力な新組織作りに向け、有意義な議論がなされるよう各委員らに期待した。

委員からの発言では「原子カムラ」の組織文化に批判的考えを示す飯田哲也・環境エネルギー政策研究所所長が、「市民社会に軸足を置いた」実質的な安全規制体制を求めたほか、「コンセンサス会議」を提唱する北村正晴・東北大学名誉教授も、市民への説明責任の重要性を強調した。

立地地域からは川勝平太・静岡県知事が、東海地震の脅威、原子力事故時の新幹線や高速道路への影響にも触れながら、新組織における現場対応力の構築を強く訴えた。環境省審議会に携わる鈴木基之・東大名誉教授は新組織が行政体制にうまく溶け込めるよう、人材確保も含めた長期的なグランドデザインを描いていく必要を求めた。

## 政府の東電経営・財務調査委が報告

政府の「東京電力に関する経営・財務調査委員会」(委員長＝下河辺和彦弁護士)は10月3日、福島事故後の東京電力の経営・財務状況を調査した最終報告書を野田佳彦首相に提出した。

東京電力が5月20日に報告していた合理化計画規模より約2倍以上となるもので、今年度からの10年間で2兆5,455億円のコスト削減を求める厳しい内容となった。

今後の国民負担の最小化と電力の安定供給を確保するとの観点から、当面10年間の東京電力の事業計画を検討してきたもの。財務内容を大きく左右するのが、柏崎刈羽原子力発電所の再稼働ができるかどうかということ、どこまで電気料金の値上げを認めるかという点。

原子力発電所の再稼働については3ケースに分けて試算し、メインケースとして柏崎刈羽原子力発電所が来年度から26年度にかけて順次稼働するケースから、一番厳

しい柏崎刈羽の全機、福島第一・第二の全機、東電・東通1号機、大間原子力発電所からの受電を織り込まないケースまでを想定した。

同報告書では積み残された課題の例として、(1)政府と電力事業者との関係の見直し、(2)総括原価方式に代表される電力事業に係る各種制度・政策の再検討、(3)地域独占を前提とした電力事業構造のあり方、(4)発送電分離の検討、(5)原子力事業の運営主体やリスク負担の見直し、(6)原子力発電のバックエンド費用、(7)天然ガスなどのより効率的な調達仕組み——を挙げている。

料金制度などは他の電力会社も含めて制度全体の見直しを進めるべきとも指摘している。

今後、原子力損害賠償支援機構と当社が10月中にも策定する特別事業計画で、具体的にどう盛り込まれるかが焦点になる。

## IAEA 訪日調査団が除染や被ばく低減で助言

IAEAの除染に関する訪日ミッション(団長＝J・C・レンティッホ・スペイン原子力安全委員会放射線防護部長)が10月14日、訪日日程を終え、福島原子力災害に伴う日本の除染プログラムについて、9の確認事項と12の助言からなる予備調査報告を細野豪志環境相に手渡した。

今回ミッションの予備調査報告書によると、日本の除染プログラムについて、原子力事故被災者に安心をもたらすべく、「非常に迅速に、法的、経済的、技術的に必要な資源を配分しながら進んでいる」とし、特に被災地域学校でのPTAボランティアによる活動など、県・地域レベルでの取組みを高く評価しているほか、国がモデル事業を通じて継続的に提供する除染に必要な技術情報「除染技術カタログ」についても、実務的な努力を認めている。

一方、助言としては被ばく線量の低減確保のため、「除染措置の純益に影響を及ぼす諸要素を慎重にバランスさ

せることが奨励される」などと述べ、放射線防護の専門家の関与が除染戦略に必要と政策決定者に対して求め、IAEAとして適切な基準検討を支援する姿勢を示している。除染活動に伴い発生する廃棄物については、クリアランスレベルの再検討、既存の産業廃棄物インフラの活用なども求めた。また、今後、課題となると思われる森林地域の除染に関しては、物的人的資源を多く投資する前に実証試験の結果を活用した安全評価がなされるべきとしている。

報告書提出後、記者会見に臨んだレンティッホ団長らは、政府が8月に取りまとめた除染に関する緊急実施基本方針に示す「推定年間被ばく線量1ミリSv以下」の目標を、「非常にチャレンジング」とし、今後の中間貯蔵の検討に際しても、チェルノブイリ事故の経験を活かした多くの選択肢があることに触れた上で、天野事務局長の「決して独りではない」とのメッセージも述べながら、IAEAとして技術的支援を惜しまない考えを強調した。

## 安全委WGが防災範囲を検討、段階的な広範囲を指定

原子力安全委員会の防災指針検討ワーキンググループ(主査＝本間俊克・日本原子力研究開発機構安全研究センター副センター長)は10月20日の会合で、原子力災害発生時に防災対策を重点的に図る地域について、見直しの考え方をおおむね取りまとめた。準備する対策の違いにより3種類の区域が設定され、防災対策の範囲は最大で施設から50kmの区域となる。

安全委員会では福島原子力災害を踏まえ、今夏より

同委の定める「原子力施設等の防災対策について」(防災指針)の見直しを検討してきた。現行の指針では、「防災対策を重点的に充実すべき地域の範囲」(EPZ)を、原子力発電所で約8～10kmとしているところ、今般の福島第一原子力事故に伴い、避難区域が全方向半径20km、計画的避難区域が北西方向50kmにまで及んでいることから、特にEPZの見直しに向け、先行して検討を進めてきた。

今回のWGによる取りまとめでは事故発生の初期段階で、施設からの距離、周辺地形、気象、人口分布等を勘案した区域に応じて、適切な防護対策を事前に準備しておくことが必要との考えから、新たに、「予防的防護措置を準備する区域」(PAZ)と「緊急防護措置を準備する区域」(UPZ)を設けた。PAZでは、事故が発生したら、直ちに避難を開始するなど、主としてブルーム(放射性物質を含んだ空気の一団)の放出前の予防的防護措置を施すこととし、目安範囲を施設から「おおむね5km」と

した。UPZでは、予測的な手法ではなく、モニタリング等の計測データに基づき、避難・屋内退避の準備を行うこととし、目安範囲は「おおむね30km」としている。また、IAEAの安全基準文書による指標改定に伴い、ブルーム通過時の放射性ヨウ素による甲状腺被ばくを避けるための屋内退避や、安定ヨウ素剤服用等の対策を準備する区域(PPZ)を定め、範囲を参考値「おおむね50km」と設定した。

## 環境相、10月末までに中間貯蔵工程表を提示

細野豪志環境相は10月21日の閣議後会見で、除染で出た土壌などの仮置き場や中間貯蔵施設のあり方をまとめる工程表について、環境省で10月末までに責任を持った考え方を提示する方針を明らかにした。

また、環境省の11年度第3次補正予算案の追加計上総

額は8,074億円と発表した。このうち、放射性物質の除去等の円滑な推進として2,459億円を計上。内訳は、放射性物質汚染廃棄物処理事業に451億円、放射性物質に汚染された土壌等の除染実施に1,997億円、中間貯蔵施設検討・整備事業に11億円。

## 中長期措置検討専門部会、福島原発の廃炉で今後30年を見通し

原子力委員会は10月28日に第5回中長期措置検討専門部会を開き、これまでの議論をもとに福島第一原子力発電所の廃炉作業の見通しを示す報告書案を提示した。作業には今後30年以上を要するとしている。

年内に事故収束の工程表ステップ2を終えた後、3年以内を目標として使用済み燃料プールからの燃料取出し

作業に着手する。溶融燃料については、格納容器破損部を修理して冠水し、10年以内を目標に取出し作業を開始する。

部会長の山名 元・京都大学教授は、実際に原子炉の中を調査しないと正確な見通しは立たないため、工程達成の確約はできないとした。

### 海外情報

(情報提供：日本原子力産業協会)

#### [米国]

### NRC、福島事故勧告の一部を早期実施

米原子力規制委員会(NRC)は10月20日、福島事故の情報と教訓から米国内の原子力発電所の安全性強化に役立てるため「短期のタスク・フォース(NTTF)」が7月に提案した12の包括的勧告のうち、7項目を直ちに実行に移すようNRCスタッフに指示した。

具体的には「発電所における全交流電源の喪失」や「地震や洪水による災害の再評価」、「緊急時の機器、スタッフの訓練に関する審査」など。優先順位の高い「全電源喪失」に対しては特に、新たな勧告に対応する規則策定手続きを2014年4月までに完了するという目標を設定している。

新たな手順を要するため複雑な作業になるとしながらもNRCのG.ヤツコ委員長は「目標の達成は可能だ」と強調。NTTFの安全勧告実施に向けて、すでに十分厳格

な安全基準を今後5年以内に一層強化できるとの見通しを示した。

#### [英国]

### 福島事故評価で「原子力縮小の必要なし」

英エネルギー気候変動省(DECC)のC.ヒューン大臣は10月11日、福島事故における想定外事象の影響と英国の原子力発電部門が安全強化上学ぶべき教訓に関して、英国原子力規制機関(ONR)のM.ウェイトマン長官がまとめた最終報告書を議会で公表した。

同最終報告は9月末日にウェイトマン長官がDECCに提出。5月に公表した中間報告書の内容を再確認する結論となっており、「英国の原子力発電所の操業を縮小しなければならないような理由はなく、原子力規制体制や安全評価原則にも根本的な弱点は見当たらない」と明言。同事故の教訓は十分取り入れつつ、政府が2008年から開始した原子力新設計画を、今後ともためらうことなく

自信を持って進められるよう後押しする内容となっている。

ウェイトマン長官は国際原子力機関(IAEA)による事故調査専門家チームの団長として福島を訪れており、ヒューン DECC 大臣は福島事故直後の3月14日に今回の評価報告書の取りまとめを要請していた。

最終報告書によると、中間報告以降に追加で得られた情報により、中間報告で指摘した事項の正当性が改めて裏付けられたという。具体的には以下の点を挙げている。

- (1) 事業者は絶え間なく改善を追求するという創始原則を継続すべきだが、英国の原子力発電サイトにおいて操業を縮小しなければならないような理由はない。
- (2) 英国の原子力許認可体制や安全評価原則に根本的な弱点は見当たらず、ONR を法的な機関として設置することは原子力規制体制への信頼を一層高めることになるだろう。
- (3) 「原子力に関する国家政策声明書」が基盤としている規制当局の戦略的助言を改訂する理由はなく、新規原子炉の現在の立地戦略についても変更する必要はない。
- (4) 英国の原発における定期安全審査は、技術と基準の進歩に合わせて継続的な改善を保証していく堅固な手段となる。
- (5) 福島事故は、閉鎖した原子力サイトで最大限の決意と意欲を持って廃止措置を講じる必要性を強調した。
- (6) 規制当局は、中間報告を受けて政府と原子力産業界が策定した計画や対応策に満足している。

ヒューン DECC 大臣は「綿密で詳細かつ信頼できる報告書がまとめられた」としてウェイトマン長官に最高の賛辞を表明。英国の原子力安全体制は世界でもトップレベルであり、今後も原子力で英国の家庭や産業に電力を供給し、雇用を支援していけることが明確になったとしている。

## 原子力意識調査では事故後に支持派が増加

英国科学協会が実施した英国国民の原子力に対する意識調査で、福島事故後に支持派の割合が増加するなど、原子力のリスクよりも恩恵の方が一層重要とする見解が多数派を占めていることが明らかになった。また、原子力を容認する男性の数が女性の2倍以上に上るなど、性別

による技術に対する意見の相違が浮き彫りになっている。

この調査は同協会の委託で世論調査会社のポピュラス社が実施したもの。8月26日から29日までにネットワーク上で無作為に抽出した2,050名の成人を対象にインタビュー形式で行ったとしている。

それによると、原子力利用の恩恵はリスクを上回ると答えた人の割合は、「かなり上回る(20%)」と「少し上回る(21%)」の合計で全体の41%だったのに対し、リスクの方が勝るとした割合は全体の28%に留まった。ポピュラス社によると、2010年の調査で原子力利用の恩恵に重きを置く回答者の割合が38%だったことから、支持派の割合は明らかに増加したことになると指摘した。

また、「エネルギー供給保証の問題が改善されるとしたら新規の原子炉建設に賛成しますか」との問いには、回答者の61%が同意。反対意見の20%を大幅に上回る結果となっており、福島事故の放射能汚染により、8万人もの人々が今もなお避難を余儀なくされているという事実を知った後でさえ、英国国民にとっては将来のエネルギー供給保証が非常に重要な課題として捕らえられていることが明確になった。

英国では現在、19基の原子炉が稼働中だが、運開後40年を超えるオールドベリー原発を含め、ほとんどが20年以上前に建設されたガス炉。政府は今後10年間に原子力と火力で1,000億ポンドの投資が必要との予想のもと、2025年までに複数の原子炉を新設する計画を進めている。

こうした背景から、ポピュラス社では英国における原子力利用そのものについても意見を聴取した。その結果、「既存炉を継続利用すべきであり、炉寿命を迎えたものは新たな原子炉でリプレースすべきだ」とする回答が31%で最も多かったほか、「原子炉の数を増やすべきだ」との意見が23%でこれに続いた。片や、「既存炉の運転は継続するが、リプレースはしない」とする慎重論は21%に留まっており、「すべての原子炉を直ちに閉鎖し、リプレースもしない」という脱原子力派は11%に過ぎなかった。

同調査ではこのほか、福島事故後に脱原子力政策に逆戻りしたドイツの例についても、そうした判断を適切と考えるか否かを問う設問を設けた。すると、全体の49%が「適切な反応」とした一方、51%は「適切ではない」と回答。さらに、「ドイツが2022年までにすべての原子炉を閉鎖する方針を決めた」という事実を認識している対象者に限った場合、「適切ではない」とする回答率は60%まで跳ね上がっている。

## 2011年東北地方太平洋沖地震

(財)国際高等研究所 尾池 和夫

### I. 地震と震災の名称

巨大地震の始まりは、2011年3月11日、日本時刻14時46分18.1秒であった。仙台の沖の海底から震源断層面の破壊が始まり、北と南にその破壊面が拡大して、マグニチュード(M)9.0という巨大地震が起こった。このM9.0の地震が、一連の大規模な地震活動の中心となる本震である。この本震で日本列島の半分が揺れるというような、日本の地震観測の歴史上、最大規模と言える地震が起こった。

この巨大な地震が発生した日、気象庁はこの地震を「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」と命名した。本稿では、以後この地震を、略して「今回の本震」と呼ぶ。英文では、気象庁は、The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake と名付けた。首相官邸から出された文書などには他の名もある。

今回の本震によって引き起こされた震災は、本震の翌日の夜、持ち回り閣議で激甚災害に指定することが決まり、3月13日未明に発表された。さらに4月1日の持ち回り閣議で、震災の名称を「東日本大震災」とすることを了解し、以後、この名称が使われている。

### II. 巨大地震の発生と強震動

地震は地下の岩盤にずれ破壊が発生して破壊面が拡がり、その面から地震波が地球の中を伝わって地表を揺するという現象である。その現象が今回の本震でどのように起こったかを、具体的に概観する。

震源断層面の破壊は、牡鹿半島の東南東、約130 kmの海底下、深さ約24 kmの点から始まった。この破壊の開始点が「震源」として気象庁から発表される。震源断層面は、震源から2 km/秒ほどの速さで、太平洋プレートの上表面と、東北地方の陸地のある北アメリカプレートとの境界面がずれるように拡がった。結果的に、東北地方から関東地方にかけての太平洋沖の地下で、東西方向に約200 km、南北方向に約500 kmにわたっての広範囲にずれ破壊が発生した。破壊面は日本海溝から東北地方の沿岸の地下に向かって傾斜しており、潜り込む太平洋プレートの上表面に沿って、陸側の岩盤が東へのし上がるようにずれた。

震源断層面がどのように発生したかは、地球上に広く分布する地震計の記録した地震波の波形から、あるいは

後に述べるGPSによる地殻変動の分布から、また津波の記録からなど、さまざまな手法で計算されており、今後もさらに世界の研究者によって分析が進むと思われる。今のところ、震源断層面上のずれの量は最大25 mに達したと考えられている。

本震発生の3分後に気象庁はM7.9と発表し、16時にM8.4と修正、さらに17時30分にM8.8、13日になってM9.0と発表し、その後は改訂していない。USGS(米国地質調査所)では、11日15時20分(日本時刻)にM8.9、20時過ぎにM9.0と修正した。

このMに相当する地震のエネルギーは、1923年の関東地震の約45倍、1995年兵庫県南部地震の約350倍という見積もりになる。

本震による各地の震度は、第1図のように分布した。最大震度は宮城県栗原市で震度7であり、宮城県、福島県、茨城県、栃木県で震度6強など広い範囲で強い揺れを観測した。

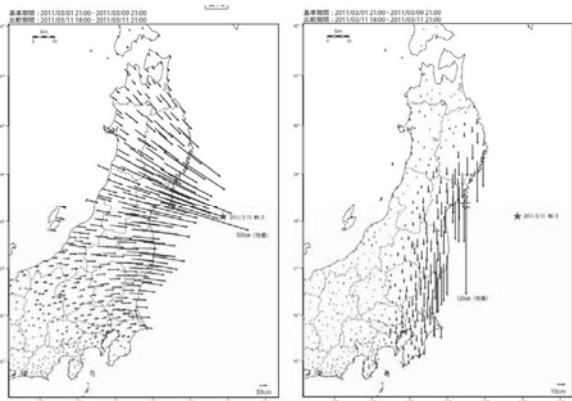
この震度7は日本の歴史上3回目の震度7であった。震度7の1回目は、1995年兵庫県南部地震の時であった。阪神・淡路大震災では、震度7の発表が遅れ、災害対策の役に立たなかったという反省から、計測震度が導入され、自動的に発表されることになって、歴史上2回目の震度7が、2004年の中越地震のとき、川口町(現長岡市)で観測されたが、地震発生直後の停電で通信端末が停止して情報が遅れた。今回の巨大地震では、震度7



第1図 2011年東北地方太平洋地震による震度分布(気象庁による)

枠は震源断層面、+は福島第二及び第一原子力発電所。





第2図 GPS測定による地殻変動  
左：水平方向の変動，右：鉛直方向の変動(国土地理院による)

がすぐ発表されたことに加えて，広い範囲に震度6弱以上が分布したことから，国の震災対策の早期の立ち上げに役立ったと言える。

### Ⅲ. 大地の変動

今回の巨大地震で，本州の東半分が数m水平に動いて，東日本の全体がほぼ東西方向に大きく伸び，同時に東北地方の太平洋岸で大きく沈降した(第2図)。伸びたというよりも，長い期間に縮んでいた東北日本の大地が，一挙に元に戻ったという方が，実際の自然現象を正しく表現する。

地震という現象は，過去に蓄積されたストレスが解放されるという現象であり，今回の巨大地震による変位量の分布から，たいへんなストレスが広く蓄積されていたことがわかる。

土地が沈降した範囲は広く，沈降した状態はしばらくそのまま残るので，生活に直接大きく影響する。志津川で75 cm，牡鹿が最大で120 cmなどの沈降が観測された。このため，破壊されずに残った防波堤も低くなっている。東京でも東へ20 cm水平移動するとともに約5 cm沈下した。

海上保安庁は，海底基準点の測定を行っており，牡鹿半島の東南東約120 km，水深約1,700 mにある海底基準点で，東南東方向に約24 m水平移動し，かつ約3 m上方に移動していることを確認した。

海溝の巨大地震で地殻変動の分布が精密に観測されたのは世界で初めてであり，さらに，海洋研究開発機構(JAMSTEC)が深海調査研究船によって，1999年の調査データと比較して40 kmほどの海底の移動を確認するなど，多数の強震動の地震計記録などとともに，世界の研究者に精度の高いデータを提供することになった。このことは日本の最大の国際貢献といえることができる。

### Ⅳ. 津波の発生と伝播

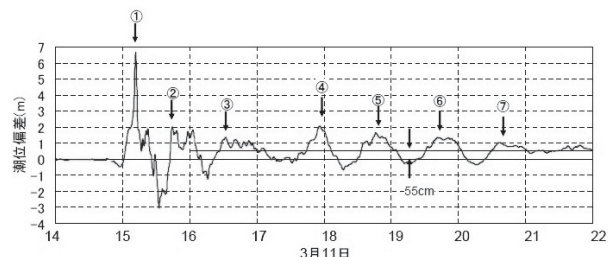
海底が大きく変動して大津波を起こした。津波は東北

地方の沿岸から始まり，日本列島の広い範囲の沿岸に押し寄せると同時に，太平洋に広く伝わった。東北地方の太平洋沿岸では特に甚大な被害が発生した。

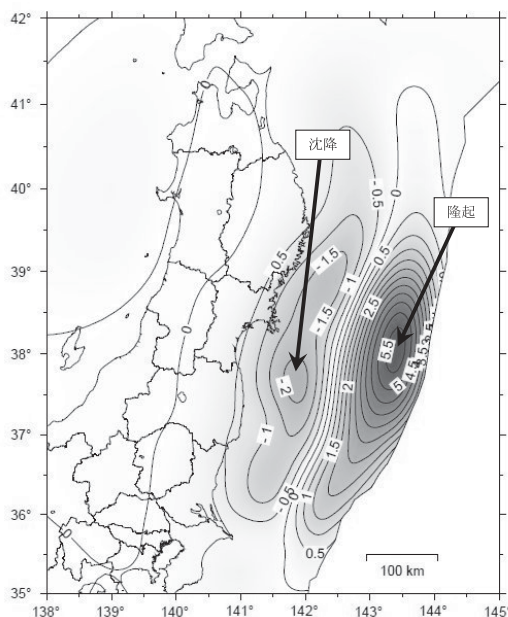
国土交通省港湾局のGPS波浪計が沖合の水深100 m～400 mに設置されており，それらのデータが気象庁に送られている。この波浪計の記録では，地震発生後15分から約6分間で2 m上昇し，続く約4分間でさらに4 m以上急上昇した。津波が岸に到達する約10分前，高さ6.7 mの津波を観測した。この高さの津波であると，水深15 mの沿岸では約13 mに増幅することになる(第3図)。

第4図に国土地理院が，第2図のGPSによる地殻変動分布から計算した海底の上下変動を示す。第3図の，最初のやや長周期の波は，沿岸に近い部分から発生した津波で，プレート境界型地震によって発生したものであり，その後の短周期で大振幅の津波が，日本海溝の海溝軸付近の動きで励起された波と考えられる。このことは，今回の巨大地震がプレート境界型の地震と，海溝軸付近の大地震の連動型であったということを意味している。

東北地方沿岸部で記録された津波の波高は，岩手県宮古で8.5 m以上，大船渡で8.0 m以上，福島県相馬で9.3 m以上などの値が記録されたが，計測器の多くが壊れて目視の記録しか得られていない。



第3図 岩手南部沖のGPS波浪計の記録



第4図 地殻変動から計算した海底の上下変動

気象庁は本震の揺れが続いている最中、14時49分、岩手県、宮城県、福島県の沿岸に大津波警報を、その他の太平洋沿岸などに津波警報や津波注意報を発令した。予想される津波の高さについては、宮城県で6m、岩手県と福島県で3mという発表であった。その後、15時14分に内容を拡大し、15時30分にまた拡大し、岩手県から千葉県九十九里、外房までの範囲に、10m以上の津波を予想した。

今回初めて、日本沿岸の全部に大津波警報など何らかの情報が発表されたことになり、すべてが解除されたのは、本震から2日以上経過してからであった。

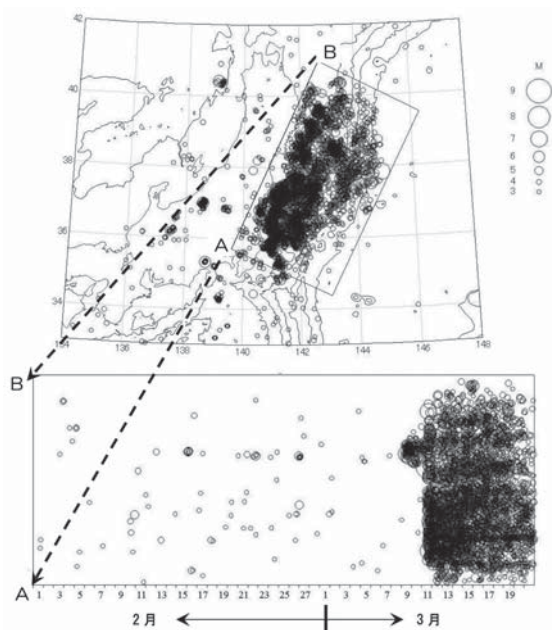
## V. 前震と余震

今回の本震の顕著な前兆現象は、本震の震源断層面の破壊が始まった位置、つまり震源に近い宮城県沖の海底の大地震の発生であった。本震の2日前、3月9日のM7.3の地震から始まった前震群は、大粒の地震が多く含まれており、この地域のそれまでの地震活動とは性質の異なる、明らかな前震型の地震活動であった。

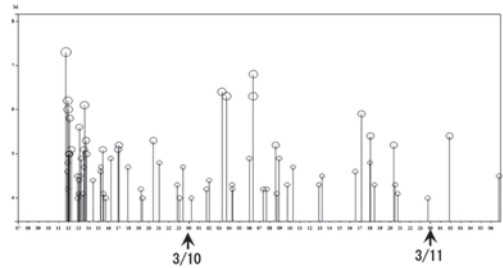
直接の前震群の少し前の状態から地震活動の状況を第5図に示す。これらは、M4.0以上で、深さ100kmより浅い地震の分布を示している。

2011年2月9日までは、東北地方の太平洋沖の各地で小さい地震が起こっていた。2月10日から、牡鹿半島東方沖約100kmで集中的にM4クラスの地震が起こり始め、2月28日から約8日間、地震活動が静穏化し、3月9日から大きな地震が続いた(第6図)。

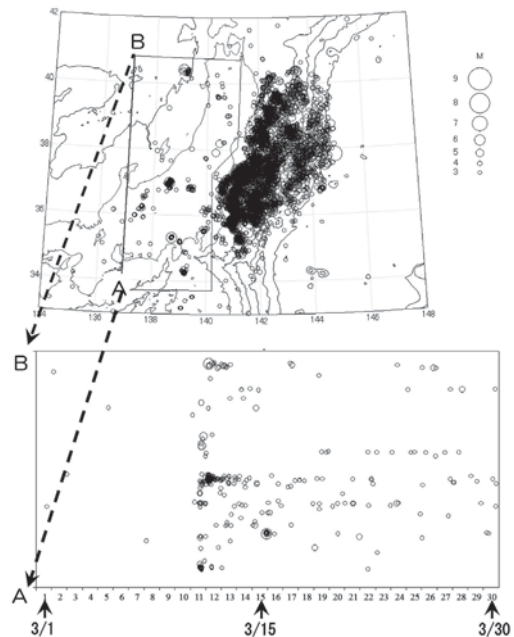
本震が起こった直後、多くの余震が起こり、その分布が本震の震源断層面の範囲を示している。それと同時に



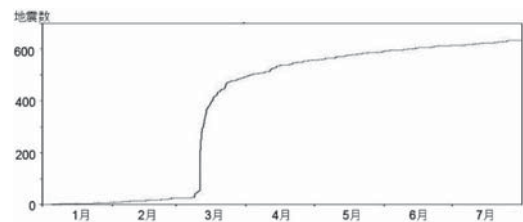
第5図 今回の本震前後の地震の分布(上)と長方形の枠内(ABが対応)の地震の時系列(2月1日～3月21日)(下)



第6図 3月9日7時～11日7時の前震群の時系列



第7図 本震直後に周辺に発生した広い意味の余震(上の枠内、ABが対応)とその時系列(3月1～30日)(下)



第8図 M5以上の地震の積算数(横軸は2011年1～7月)

直接関連する陸のプレート境界などに、広い意味の余震が発生した。3月15日には、プレート境界を越えて、富士山の地震活動が誘発された。第7図はそのような周辺部の地震の発生状況を示す。

第8図にM5以上の余震の数を積算して示す。余震活動は今後も長い期間続き、ときには大規模な余震が起こることもあるから、さらに緊張して監視していかなければならない。(2011年10月15日 記)

## 著者紹介

尾池和夫(おいけ・かずお)

本誌, 53[10], 675(2011)参照。

# エネルギー安全保障と今後の原子力 脱原発の影響を考える

京都大学 原子炉実験所 山名 元

福島第一原子力発電所の事故以降の“脱原子力指向”の動きに対して、国のエネルギー安全保障の視点からの原子力発電の重要性を解説する。脱原子力を進めることは、再生可能エネルギー発電や火力発電による代替がもたらすエネルギー安全保障上の損失を考えると、極めて厳しい。また、現状において、原子力の国際対応が重要であることを解説する。

## I. 緒言

東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故は、軽水炉の事故としては世界最悪のものとなった。幸いなことに、環境中に放出された放射エネルギー、汚染区域の面積、住民への健康影響等の観点で、チェルノブイリ原子力発電所4号機の事故よりは数段低いものの、極めて大きなインパクトを与えた。原子力発電は、我が国のエネルギー安全保障の強化を目的として採択されてきたエネルギー源であるが、種々の機微な国際関係の上に成立している特殊な技術であり、福島第一原子力発電所の事故は、我が国のエネルギー戦略と国際関係に大きな影響を与えることは必至である。

事故の印象が非常に鮮烈であったためか、国内世論は、脱原子力の姿勢に大きく傾いている。海外でも、ドイツ、スイス、イタリアが、脱原子力の姿勢を鮮明にしており、国内の世論にも強く影響を与えている。国民の、安全・安心への期待はよく理解できるものの、本来、多面的な要因分析の判断に基づいて戦略的に選択されているエネルギー政策が、安心願望に基づく感情だけで判断されることには、強い危惧を感じる。自国産エネルギーを4%しか持たない経済大国である我が国における原子力発電は、①エネルギー源の長期安定的確保、②同じく短期安定供給確保、③経済性、④成長戦略、⑤国際的協調関係の維持、等の様々な視点から判断された戦略的解であった。これらの因子は全て「エネルギー安全保障」に集約され、原子力利用の目的は、エネルギー安全保障を介しての「我が国の安全保障」であり、原子力の選択は、資源確保を巡る国際的な混乱や外圧から日本を守るための間接的な「国防」の一つであるといっても過言ではない。

*Energy Security and Nuclear Power for the Future of Japan* : Hajimu YAMANA.

(2011年 10月12日 受理)

「原子力安全」は、この目的を果たす上で原子力技術に求められる“必要条件”であり、目的ではない。今後の原子力に関して重要な判断は、「原子力安全を強化することにより、原子力の持つ安全保障機能への依存を継続するか」どうかの判断であり、国の安全保障確保のための手法論に対する冷静な判断である。この判断には、時間的な側面も必要で、短期・中期的・長期的それぞれの視点から、現実的な政策が問われる必要がある。原子力の代替方策の現実性や脱原子力による安全保障上のリスク増大の可能性が問われるとともに、原子力安全の強化を制度的に技術的に達成できることが求められる。

## II. 原子力政策の背景と事故の影響

我が国の原子力政策は、脱石油とエネルギー海外依存度の低下を目標として取られてきた代替エネルギー方策の一つである。原子力発電は、①地政学的リスクの低さによるウラン資源の供給安定性、②高いエネルギー密度による備蓄効果の高さ、③発電コストの低さ、④運転時における二酸化炭素の排出が少ないこと、⑤ウラン資源量の豊富さによる地質学的リスクの低さ、に他にはない優位性を持っており、安価かつ安定な大規模電源として利用されてきた。

一般的に、国のエネルギー安全保障のために取られる具体的施策は、①エネルギー源の多様化、②地政学的リスクの分散、③備蓄強化、④代替資源の探求、⑤国内安定供給、等であるが、原子力はこれらの全てに適合するオプションであった。原子力は、偏在性の低い鉱物資源(ウラン)を燃料とするエネルギー源であり、偏在性の高い化石資源への過度な依存による脆弱な体質を改善するものとして、化石資源との併用を通じて、我が国の安定な経済活動を支えてきたといえる。しかしながら、原子力の利用には、信頼における技術的基盤が必要であり、また、国際政治的な条件に沿うことが求められるため、我が国は、民間事業としての原子力発電事業を定着させ

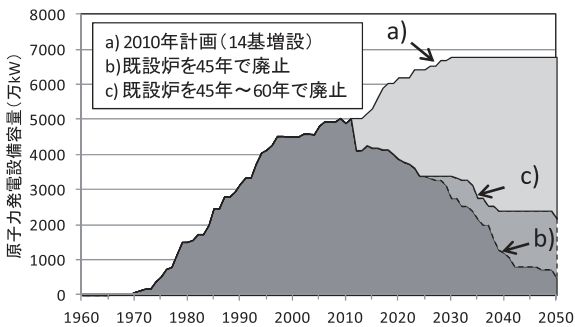
るために、技術的、制度的、外交的な面での国策としての多くの政策対応をとってきた。

福島第一原子力発電所の事故では、原子力安全に関して、本来の基盤であったはずの安全文化や原子力技術の信頼性までが問われる結果となり、最も重要な条件の一つである「社会受容性」を失う結果となった。また、この事故は、今後の戦略的国際対応にも大きな影響を与える可能性がある。

### Ⅲ. 原子力発電廃止の量的評価

脱原子力政策の影響度を知るために、「仮定的な原子力フェイズアウト路線」での量的な影響を見てみる。2010年6月に策定されたエネルギー基本計画の電源計画を出発点として、稼働中の原子炉を一定の寿命で廃止するという悲観的な想定において、電力量や発電設備容量の減少傾向を、簡易な計算によって調べた。傾向把握に限定するため、2030年における電力需要については、エネルギー基本計画による想定(10,200億 kWh)を変えないこととする。

第1図において、曲線 a)は、2010年エネルギー基本計画が前提とした原子力発電設備容量の増加を示す(14基の原子炉の新設)。2030年時点における総発電容量6,800万 kW が期待されていた。曲線 b)は、福島第一、

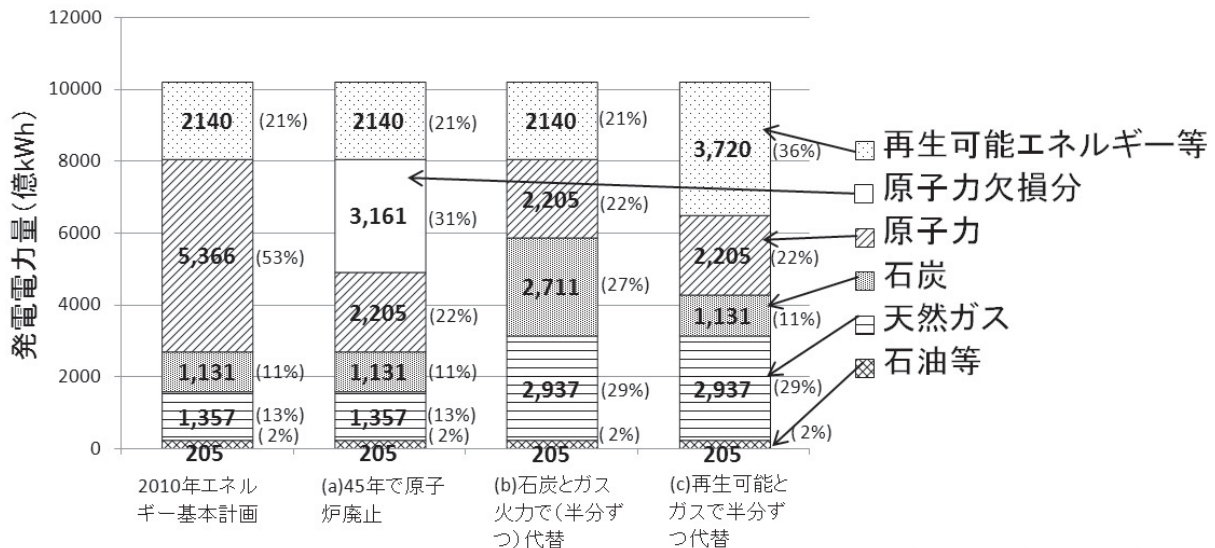


第1図 今後の原子力発電規模試算

第二原子力発電所を廃止した上で、建設中の2基を除いて新增設は行わず、稼働中の原子炉をすべて45年の寿命で退役させる想定での発電設備容量の減衰を示す(45年寿命シナリオ)。曲線 c)は、1980年以前に運開した炉の寿命を45年、1980年代に運開の炉を50年、1990年以降に運開の炉を60年とした場合の、発電設備容量の減衰を示す(45~60年寿命シナリオ)。基本計画で設定した発電設備容量からの欠損分は、2030年時点において、45年寿命シナリオで4,009万 kW、45~60年寿命シナリオで3,382万 kW に上る。

基本計画では、2030年時点での総発電電力量の53%を原子力が供給すると期待されていたが、45年シナリオでは、総発電電力量(10,200億 kWh)の31%を失うことになる。45~60年寿命シナリオでは、同じく26%を失うことになる。第2図では、45年寿命シナリオにおいて、欠損電力量の半分ずつを石炭火力と天然ガス火力で代替する場合と、欠損電力量の半分を再生可能エネルギー等で、残りの半分を天然ガス火力で代替するケースでの電源構成を示した。原子力の欠損分を火力発電で代替する場合、2030年における石炭火力と天然ガス火力による発電量が、2007年の実績よりも増え、2030年のCO<sub>2</sub>排出量は、基本計画で期待したよりも1.9億トン増加する。欠損分の半分を天然ガスで、残りの半分を再生可能エネルギー発電によって賄うとすると、2030年のCO<sub>2</sub>排出量は0.63億トン増に留まるが、再生可能エネルギー等による電力量は、3,720億 kWh(全電力量の36%)に増加する。いずれのケースでも、2010年エネルギー基本計画での目標とした「2030年におけるゼロエミッション電源比率70%」は達成されない。

火力発電で代替するケースでは、火力の電力量は予定の倍以上に増えるが、想定した火力発電の設備容量を増加させる必要はない。これは、基本計画ではそれらの設備利用率が30%台に低く設定されているのに対して、こ



第2図 2030年での発電電力量への影響評価

これを50～70%以上に高めることで対応できるからである。これに対して、再生可能エネルギーによる発電量を増加させるケースでは、原子力欠損分の半分である1,300～1,600億 kWh の発電量を増やすため、太陽光発電と風力発電の設備を大幅に増強することが必要である。増加分を太陽光発電と風力発電で半分ずつ供給し、設備利用率を12%および25%と想定すると、両者の合計として、基本計画で想定された2030年における12,050万 kW の再生可能等発電設備に加えて、10,987万 kW (45年寿命シナリオ)の追加が必要となる。このうち、水力や地熱等の安定な発電源約5,000万 kW 程度を差し引くと、残りの約17,000万 kW が太陽光や風力等の不安定電源となる。

これだけ大量の不安定電源の電力系統への接続は、①供給量の予測が困難であること、②これらの出力変動を補償するための火力発電の調整能力に限界があること、③落雷等の送電系異常による影響が広域甚大になること、等の観点から、現実的に不可能である。一般的に、不安定な電源の設備容量がこれほど大きくなると、①送配電系統の安定化措置(蓄電池や周波数調整用他電源の維持)、②新規送配電線の設置、③好天候かつ低需要時の余剰電力対策(蓄電池や揚水発電設備)、④悪天候時のバックアップ電源確保、⑤周波数変換装置の増設、等の問題が深刻となり、非常に大きな設備投資が必要になると考えられている。

再生可能エネルギー発電に大きく依存する場合、悪天候等によって、その出力が極端に低くなった時のピーク需要に対応できない可能性が生じる。過剰な蓄電池への投資を避けるとすると、3,600～4,200万 kW 程度の火力バックアップ電源を設置することが必要になると考えられる。なお、太陽光や風力発電は、制度的な導入施策によって、ある程度の規模にまで増えることは期待されるものの、許容可能なコスト範囲内で利用できるポテンシャルの限界や地理的な制約等を考えると、2030年において最大17,000万 kW もの導入が可能であるか、現時点では懐疑的である。

原子力フェイズアウトによって生じる CO<sub>2</sub> の排出量増加の問題は深刻である。2010年エネルギー基本計画では、2030年までに5億トン(1990年比30%以上)の削減という目標を設定したが、この目標は達成できず、2009年のコペンハーゲン合意(COP 15)において国際公約した「2020年において、1990年比25%減」の目標達成すら達成不可能となる。現実策として、海外からの排出権の買い取りを期待せざるを得ないが(京都メカニズムが継承されることが条件)、この費用として、兆円単位の資金が海外に流出することになる。なお、省エネルギーが予定より進み電力需要が低下すると、上記の新たな負担はその程度に比例して低減されるが、現状で、大規模な節電の実現を想定することには無理がある。

以上のように、省エネルギーに限界があると想定した上で、原子力を廃止する場合、再生可能エネルギー等の増強を期待するとしても、①石炭火力の継続的な利用と利用率の拡大、②天然ガス火力設備の拡大と利用率の拡大の両者が不可欠になるとみられる。石炭については、燃料確保のリスクは低いため、クリーンコール技術の導入を前提に一定の規模での利用が見込まれるものの、石炭は、CO<sub>2</sub>排出量が多く、限界があると考えられる。天然ガスは、CO<sub>2</sub>排出量が石炭よりは低いものの、エネルギー安全保障の基本事項である、①地政学的リスクの分散、②長期の資源確保、③備蓄強化、④国内安定供給インフラ確保、等の面において脆弱な点が否めない。これは、世界的なガスシフトの傾向が拡大すると見られる中で、価格上昇や入手先リスクの問題が予見されることや、液化天然ガスとして輸入するしかない我が国の特殊性において、備蓄性に限界があること、輸送ルートリスク(チョークポイントリスク)等の問題があるからである。

#### IV. 各国のエネルギー戦略

ドイツやスイスにおける脱原子力と、我が国における脱原子力の可能性を単純に比較することは、資源確保の状況、経済状況、政治状況、国民感情等が異なるので、不適切である。原子力が発電電力量の約4割を占め、エネルギーの海外依存度の比較的高いスイスでは、原子力推進と廃止の方針が、入れ替わって選択されてきた(1990年の国民投票で新規原子力発電所のモラトリアムの決定、2003年の国民投票により脱原子力イニシャチブ否決)。今回再び事実上のフェイズアウト政策が決定された。ドイツも2001年の政策合意により、原子力撤退を一度は決めており、このような国内事情が背景にあったことが大きく影響している。各国の事情をよく分析するという視点から、ドイツとフランスを選び、これらの国と我が国のエネルギー情勢に関わる諸量の比較を、2008年の実績により対比する(第1表<sup>1,2)</sup>)。

ドイツで、国内に石炭(褐炭)を産出し、発電の45%を

第1表 日仏独のエネルギー事情比較(2008年)

2008年の諸量	日本	ドイツ	フランス
国内総生産(GDP)(10億ドル)	4.892	3.635	2.854
人口(百万人)	128	82	64
一人当たり国内総生産(GDP)(ドル)	38,313	44,259	44,499
GDP当たりの二酸化炭素排出量(10万トン/億ドル)	0.24	0.22	0.13
一次エネルギー供給(百万トンの原油換算)	495.8	335.3	266.5
エネルギー自給率(%)	5	32	15
エネルギー自給率(原子力含)(%)	18	40	51
電力総消費(GWh)	1,030,700	587,010	493,950
発電量合計(GWh)	1,082,014	637,232	574,868
石炭	26.6%	45.6%	4.7%
石油	12.9%	1.5%	1.0%
天然ガス	26.2%	13.8%	3.8%
原子力	23.9%	23.3%	76.4%
水力	7.7%	4.2%	11.9%
廃棄物とバイオマス	2.1%	4.6%	1.0%
太陽光と太陽熱	0.2%	0.7%	0.0%
風力	0.2%	6.4%	1.0%
その他	0.3%	0.0%	0.1%
輸入電力量(GWh)	0	41,670	10,683
輸出電力量(GWh)	0	61,770	58,689

石炭火力で担っており、エネルギー自給率が最も高い。フランスは、本来の自給率が15%と低いが、原子力を大量導入することによって、名目上の自給率を51%まで高めている。フランスでは、発電の76.4%が原子力、11.9%が水力であり、発電でのゼロエミッション割合が90%を越えており、フランスのGDP当たりのCO<sub>2</sub>排出量は、我が国やドイツの半分に近い。欧州の送電網に繋がっているドイツとフランスは、電力の輸出入を行っている。フランスでは輸出量が輸入量を大幅に上回っており、原子力を中心として生産した電力を、他国に融通(輸出)していることがわかる。ドイツの場合には、電力の輸出入によって、国内の電力の需給調整が行われていることがわかる。

ドイツは、自然電源による出力の変動の調整や、電力需給のバランス調整を、欧州の広域の送電網によって行っており、電源系統が孤立している日本とは全く事情が異なる。ドイツ、フランスとも、発電における天然ガスへの依存が日本よりも低い。ドイツのエネルギー安定確保の政策は、ロシア等資源国との戦略的な関係の構築、供給源を中東や北アフリカおよびカスピ海に拡大、等であるが、これらの前提として、基幹エネルギーとしての国内産褐炭の利用がある。また、再生可能エネルギーの導入拡大は、このような石炭による基幹電源と電力需給調整機能の存在の下で可能になっているといえる。再生可能エネルギーを増強しているドイツは、温室効果対策の進んだ国と捉えられることが多いが、ドイツのGDP当たりのCO<sub>2</sub>排出量は我が国とほとんど同じであり、発電量当たりのCO<sub>2</sub>排出量は我が国よりもドイツの方が2割程度多いのが実情である。フランスは、原子力発電によって、ゼロエミッション電源比率を90%まで高め、CO<sub>2</sub>排出量を日独の半分程度に抑えたとともに、エネルギー自給率を50%以上に高め、エネルギー自立性の高い国になってきた。

我が国は、エネルギー自給率が世界の最低レベルである上、電力輸出入による電力バランス調整機能がなく、ドイツ、フランスと比べて大きなハンディキャップを負っているといえる。我が国は、石油、石炭、天然ガス等の全てのエネルギー資源を、海上輸送によって確保しており、海上輸送に伴うリスクを負っていることも、ドイツやフランスと比べてのハンディキャップである。

## V. 天然ガスへの依存性

我が国が原子力発電を廃止する場合、天然ガス火力への依存度が高まる可能性が高いとみられるので、天然ガスへの依存状況について振り返る。第2表<sup>2)</sup>に、ドイツと日本の天然ガス輸入の実態を対比して示す。ドイツは、天然ガスをすべてパイプラインで輸入しており、輸入先は、ロシア(44.3%)、ノルウェー(29.9%)、オランダ(21.7%)の3国に限られる。ノルウェーとオランダは

第2表 日独の天然ガス依存の比較(2008年)

輸入先国	カントリーリスク指標 <sup>2)</sup>	2009年確認埋蔵量 billion m <sup>3</sup>	輸入割合(2008)	
			日本	ドイツ
Russian Federation	6.1	44.38		44.3%
Norway	9.8	2.05	0.1%	29.9%
Netherlands	9.7	1.09		21.7%
Indonesia	5.4	3.18	20.5%	
Malaysia	7.7	2.38	19.6%	
Australia	9.9	3.08	17.9%	
Qatar	7.8	25.37	11.9%	
Brunei	7.4	0.35	9.0%	
United Arab Emirates	7.8	6.43	8.1%	
Oman	7.3	0.98	4.5%	
Nigeria	3.8	5.25	2.7%	
Egypt	6.2	2.19	1.9%	
US	9.7	6.93	1.0%	
Algeria	5.8	4.50	0.7%	
Trinidad & Tobago	5.7	0.44	0.5%	
Other Countries	-	69.20		
合計輸入量(Million m <sup>3</sup> )			95,391	91,991
輸送手段			液化天然ガス	パイプライン
総発電量に占めるガス火力発電の割合(2008)(%)			26.2	13.8

1) BP Statistics 2010

2) R&I Country Risk Survey 2007 Autumn Edition

安定した国であるが、ロシアについてはカントリーリスクが相対的に高く、ロシアへのガス依存度の高さが、ドイツのエネルギー安全保障にとっては最大の懸念になっている。日本の場合は、東南アジアとオセアニアからの輸入が現在の主流であり、その他をカントリーリスクの高い中東やアフリカ諸国からの輸入に頼っている。現状の依存状況は、埋蔵量が限定的であることや、世界的なガス需要の増大などによって、将来的に悲観的で、カタールやUAEへのシフトに頼らざるを得ず、ガスが第2の石油になる恐れも否定できない。

米国におけるシェールガスの開発等、需給に関する動きもあるが、中国をはじめとする世界的な天然ガス需要は増大傾向にあり、世界的な需給バランスが厳しい方向に向くと見る向きが多い。天然ガスの価格も、1998年以降、急激な上昇傾向にある。今後、我が国による天然ガスの入手はますます厳しくなると見られる。

## VI. 国際問題への影響

我が国の原子力利用に対する国際的な要請は、①NPT体制の枠組みにおいて保障措置協定および追加議定書に沿った保障措置の徹底、②原子力技術の拡散を抑制するための核物質や技術の輸出管理(NSG)、③原子力安全に関わる国際的協力体制へ参加、④原子力防護(核セキュリティ)の国際的取組みへの参加、等である。この中で、我が国が保有する原子力技術と関連する科学技術を海外に輸出し移転する国際的な原子力産業・事業の展開が、最近積極的に模索されてきた。国際関係における我が国の基本姿勢は、核不拡散への貢献をはじめとして国際社会の信頼を構築し、エネルギー安全保障の要としての原子力発電活動を自主的に進める権利を堅持することにあつたといえる。自らの高い技術力の存在と平和利用に限定する国是を前提として、国際関係の中での良好な立場を築き、自らの長期的原子力利用の権益とステータ

スを確保してきたといつてよい。

今回の事故は、自然災害起因の炉の運営上の問題であり、核物質の管理に関する瑕疵はなかったことから、保障措置や核不拡散に関わる我が国のステータスへの影響は限定的であるが、事故の当事者国として、世界的な原子力の不安定化を避けることの責任は非常に大きい。世界では、資源価格の乱高下、資源ナショナリズムの台頭など、エネルギー資源獲得に関わる不安定な状況が続いていた。仮に、原子力放棄の動きが世界的に拡大すれば、世界での石油や天然ガス市場に大きな混乱が生じ、我が国のエネルギー安全保障をも脅かすと考えられる。現在のところ、原子力規模として95%を占める国が原子力の重要性への認識を堅持し、原子力新興国も同様であり、世界への影響は限定的に終わっていると理解してよいであろう。今後は、この状態を維持し、世界の原子力利用の安定状態を確立することが重要である。我が国としては、福島での事故の内容を検証した上でその結果を国際社会に提示し、国際的な原子力安全の強化に貢献することで、世界の原子力利用の安定化を図ることが重要である。

我が国として取るべき方策は、(1)福島事故情報の国際的共有、(2)我が国の原子力技術に対する国際的な信頼の維持、(3)国内原子力技術の国際的優位性の維持、(4)核セキュリティへの貢献、等であろう。(1)については、IAEAを中心として、我が国からの情報公開と提供を怠らないことが必要である。(2)については、今回の事故が、過大な自然災害に対する備えの不備から生じたことを共通認識することであり、世界中の原子力発電所に対して従来以上のリスク対策強化を求めることである。今回の事故の原因が、初期の発電所の設計や自然災害の問題にあり、日本の最新の原子炉の設計に品質上の問題がなく、追加的なシビアアクシデント対応措置が加えられれば、福島のような事態に至る可能性を非常に低く抑え得ることを世界に示す必要がある。この姿勢は、我が国の高品質の原子力技術の持つ優位性を維持し、原子力技術の輸出による国際的な立場の維持を図るために必要である。我が国の原子力技術の優位性を持って海外の新規プラントを受注することは、国内の技術力を維持することに繋がる。今回の事故によって、ブランド力を失わないための努力が必要である。

今回の事故によって、電源喪失に対する脆弱性や、事故に対する危機管理能力の不足が示された。このことは、今後、核セキュリティの強化面からも検証されなければならない。核セキュリティ対策の重要性は、2007

年の「核によるテロリズムの行為の防止に関する国際条約(核テロ防止条約)」の成立や、2006年の米口首脳会談での「核テロリズムに対抗するためのグローバル・イニシアティブ」の提唱などにより、国際的な機運が高まってきた。福島第一原子力発電所の事故により、今後の核セキュリティ活動を、従来以上に強化していく必要が示唆されたと見るべきである。今後、原子力発電所の核セキュリティの強化について、ハード面とソフト面の両面で、国際的な取組みが進められることが期待される。

## Ⅶ. 結論

エネルギー安全保障は国の安全保障そのものであり、エネルギーの供給計画は、①エネルギー源の長期安定的確保、②同じく短期安定供給確保、③経済性、④成長戦略、⑤国際的協調関係の維持、等の様々な視点から戦略的に判断されるべきである。原子力フェイズアウト路線を選択すると、非常に大きな発電容量の欠損が生じることになり、再生可能エネルギーによる発電設備を大幅に増強したとしても、天然ガス火力を主体とした火力発電に大きく依存した電源構成を取らざるを得ない。この場合、CO<sub>2</sub>排出削減に問題を生じ、天然ガスに大きく依存することにより、エネルギー安全保障上の脆弱性を抱えることになる。我が国のエネルギー資源事情は、エネルギー自給率が高く、欧州の送電網による電力調整能力を利用して脱原子力の路線を敷いているドイツとは大きく異なるものであり、ドイツと同じ脱原子力路線を我が国が取るとは、極めて難しいと考えられる。原子力特有の国際的な関係の中で、原子力安全や核不拡散に関わる我が国の責任を果たし、世界的な原子力利用を早く安定化させることが重要であり、これは、我が国のエネルギー安全保障にも通じる。

### —参考文献—

- 1) "International Energy Agency/Statistics and balance", <http://www.iea.org/stats/index.asp>
- 2) *BP Statistical Review of World Energy, June 2009*, IEA, (2009).

### 著者紹介



山名 元(やまな はじめ)  
京都大学 原子炉実験所  
(専門分野/関心分野)アクチニド化学,  
再処理工学

## リアルな原発のたたみ方

一橋大学 橘川 武郎

東京電力・福島第一原子力発電所の事故を契機にして、日本では、エネルギー政策の根本的見直しが進められている。電源構成の見直しに当たっては、①再生可能エネルギー利用発電の拡充、②節電による電力使用量の削減、③技術革新による石炭火力発電のゼロ・エミッション化、の3要素を独立変数とし、原子力発電のウエートは、これら3要素の進展具合によって、「引き算」で決まると考えるべきである。それでも、2030年時点では、原子力発電のウエートが20%程度残ると考えられるが、バックエンド問題の解決の困難さから見て、原子力発電は、長期的には停止されることになると思込まれる。

## 「みんなのエネルギー・環境会議」の発足

2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う東京電力・福島第一原子力発電所の事故を契機にして、日本では、エネルギー政策の根本的見直しが進められている。福島第一原発の事故によって、2020年までに9基、2030年までに14基の原子力発電設備を新增設するとして現行の「エネルギー基本計画」(2010年閣議決定)が破綻したことは、誰の目にも明らかである。

エネルギー問題に対する国民的関心が高まるなかで、2011年7月、10人の発起人([付記]参照)の呼びかけで、「みんなのエネルギー・環境会議」(MEEC)が発足した。MEECの「設立趣旨」には、『「みんなのエネルギー・環境会議」は、原発推進/反原発・脱原発、自然エネルギーの今後等について、『こうあるべき』という特定のスタンスを打ち出すためのものではありません。それぞれの観点についての賛成・反対を含め、さまざまな立場や考え方の人々がオープンに日本の産業や暮らしを支えるエネルギーの今後について、考え、語り、議論し、対話する場を作っていくことをめざします』と書かれている。

2011年9月10日、気候ネットワークの主催、MEECの共催で、京都市において、「みんなのエネルギー・環境会議 京都」が開催された。筆者(橘川)は、その会合で、「リアルな原発のたたみ方」と題して、話題提供を行った。本稿は、その内容を敷衍したものである。

## なぜ原発を「たたむ」ことを前提にするのか

「リアルな原発のたたみ方」という表現は、すぐにはなくとも長期的には原子力発電をやめることを意味す

*A Realistic Way for Graduating from Nuclear Power Generation: Takeo KIKKAWA.*

(2011年 9月19日 受理)

る。なぜ原発停止を前提とするのか。それは、筆者が、使用済み核燃料の処理問題、いわゆる「バックエンド問題」を根本的に解決するのは困難だと考えるからである。

バックエンド問題に対処するためには、リサイクル方式をとるにしろ、ワンスルー方式をとるにせよ、最終処分場の立地が避けて通ることのできない課題となる。この立地を実現することは、きわめて難しい。

リサイクル方式をとれば最終処分量は減るかもしれないが、使用済み核燃料の再処理技術それ自体がなかなか確立されない現実がある。また、プルトニウムを取り扱うことから、核兵器への転用をどのように阻止するのかという、難題も残る。

筆者は、原発が20世紀後半から21世紀前半にかけての人類の進歩に貢献した(する)ことを、高く評価する。しかし、バックエンド問題を解決できない限り、原発は、人類の歴史の一時期に役割を果たした(す)過渡的エネルギー源に過ぎないのである。

## なぜ「リアルさ」にこだわるのか

原発の今後のあり方を論じる際に最も重要な点は、「反対」、「推進」という原理的な2項対立から脱却し、危険性と必要性の両面を冷静に直視して、現実的な解を導くことである。日本におけるこれまでの原発論議では、2項対立の構図のなかで、反対派と推進派が互いにネガティブ・キャンペーンを繰り返してきた感が強い。もはや、そのような時代は終わった。相手を批判するときには、必ずリアルでポジティブな対案を示すべきである。

リアルな議論を展開しなかったからこそ、原発推進派は、エネルギー自給率4%という資源小国でありながら、これまで原発への風当たりを弱めることができなかった。ポジティブな対案を示さなかったからこそ、原



発反対派は、被爆国でありながら、これまでドイツの緑の党のような有力な政治勢力を育てることができなかった。原発のたたみ方を論じるのであれば、それはリアルでポジティブなものでなければならない。筆者が、「リアルな原発のたたみ方」という表現をとるのは、このためである。

### 「エネルギー基本計画」見直しにおける 3つの独立変数

それでは、リアルな原発のたたみ方は、どのようなものとなるだろうか。

福島第一原発事故によって、わが国のエネルギー政策はゼロベースで見直されることになったが、見直しに当たっては、政策立案に影響を与える不確実性が高い要素が3つある。それは、(1)太陽光、風力など再生可能エネルギーを利用する発電の普及につながる技術革新がどこまで進むか(とくに出力が不安定である太陽光発電、風力発電の弱点を補う蓄電池の技術革新がどこまで進むか)、(2)民生用を中心に省エネルギーによる節電が行われ電力使用量がどの程度減少するか、および(3)石炭火力発電のゼロ・エミッション化につながるIGCC(石炭ガス化複合発電)、CCS(二酸化炭素回収貯留)などの実用化がどれほど進展するか、という3要素である。

端的に言えば、今後の電源構成を決める独立変数は、(1)~(3)の要素にある。原子力発電のウエートは、(1)~(3)の進展度合いによって、別言すれば「引き算」によって決まるのであり、原子力発電そのものが独立変数になるわけではないのである。

### 再生可能エネルギーの拡充へ向けて

今後のエネルギー政策において、再生可能エネルギーをこれまで以上に重視すべきであることについては、国民的合意が存在する。ただし、太陽光発電、風力発電には、稼働率が低い、出力が不安定である、コストが高いなどの問題点がある。上記の(1)の要素、つまり「太陽光、風力など再生可能エネルギーを利用する発電の普及につながる技術革新がどこまで進むか」が見通しにくいのは、このためである。

もちろん、様々な問題点を抱える現在の状況下でも、太陽光発電、風力発電の活用をさらに拡充する方法は存在する。それは、ガスタービン火力などのバックアップ電源と連系させて、分散型電源網を構築し、スマート・コミュニティを形成するという方法である。その分散型電源網については、震災等の非常時には、電力系統から切り離して独立運転ができるようにする。これまでスマート・グリッドは、主として地球環境保全(Environment)の観点から意味づけられてきたが、今後は、エネルギー安定供給(Energy Security)の視点からも再評価される必要があるだろう(ただし、太陽光発電、

風力発電を組み込んだスマート・コミュニティができあがったとしても、蓄電池の技術革新が進まず、火力発電によるバックアップに依存している間は、再生可能エネルギー発電の電源構成比率はそれほど上昇しない)。

ところで、再生可能エネルギー電源のなかには、太陽光発電や風力発電とは異なり、稼働率が低い、出力が不安定である、などの弱点をもたないものもある。地熱発電や小水力発電、バイオマス発電がそれである。

地熱発電や小水力発電の拡充を進めるうえで重要な点は、規制緩和を進めることである。火山国の日本では、地熱発電のポテンシャルは高いが、適地の多くが国立公園、国定公園などのなかにあり、実際に開発しようとすると自然公園法等に抵触することになりがちである(また、地熱発電所の建設には温泉地との利害調整も大きな課題となる)。小水力発電については、電気事業者による開発はほぼ一巡しており、水道事業者、農業関係者などが新たな担い手となる。これらの担い手が発電事業に携わるには、法制度上の制約を緩和することが必要である。

バイオマス発電については、物流コストの高さが普及を妨げる障害となっている。バイオマス混焼が可能な火力発電所をリストアップし、それらを徹底的に活用することが、バイオマス発電の拡充にとっては不可欠である。

### 火力シフトとその問題点の解決

原子力発電の規模が縮小に向かい、再生可能エネルギー発電の拡充に時間がかかるのだとすれば、電力を安定的に供給するために、しばらくの間、火力発電へのシフトが生じるのは、当然のことである。ただし、この火力シフトには、

- ① 燃料をいかに確保するか、
- ② 地球温暖化対策をどのように進めるか、

という、2つの問題がつきまとう。①の問題は、中東の政治不安が高まり、原油価格が再び高騰しつつある状況下で、その深刻度を増しつつある。②の問題は、火力発電が、原子力発電や再生可能エネルギー発電と異なり、ゼロ・エミッション電源でない点から生じるものである。

①の火力発電用燃料の確保にとって、現在、最も大切な点は、LNG(液化天然ガス)調達において購買力(buying power)を発動できる仕組みを構築することである。LNGに注目するのは、化石燃料のなかでは、比較的CO<sub>2</sub>(二酸化炭素)排出量が少ないからだけではない。米国で進行したシェールガス革命の影響で、同国のLNG輸入量が見込まれた規模より大きく減少したため、国際的にLNG市場が軟化し、長い間続いてきたLNG価格の原油価格リンクがはずれる方向にあるからである。つまり、LNGの買い手がbuying powerを発揮する

仕組みを作り上げさえすれば、LNGを相対的に廉価で調達することが可能になりつつあると言える。

この点で、きわめて示唆的なのは、韓国が輸入するLNGの調達を韓国ガスに一本化し、韓国電力の必要分まで韓国ガスが購入する仕組みを作り上げたことである。この結果、東京電力に代わって韓国ガスが、世界最大のLNG輸入主体となるにいたった。日本の場合も、LNG輸入に関して、電力会社とガス会社が協力し、このようなbuying powerを強める仕組みを作り上げなければならない。

## 石炭火力技術の海外移転によるCO<sub>2</sub>排出量の削減

火力シフトに伴うもう1つの問題は、②の「地球温暖化対策をどのように進めるか」である。

この点では、まず、原子力発電の新增設が困難になった以上、2020年までに温室効果ガス排出量を国内において1990年比で25%削減するという、鳩山由紀夫元首相が掲げた、いわゆる「鳩山イニシアチブ」が、事実上不可能になったことを確認する必要がある。ただし、このことは、わが国が「地球温暖化防止」の旗を降ろすことを意味しない。CO<sub>2</sub>排出量を、原子力発電を使って国内で減らす代わりに、石炭火力技術の海外移転を通じて国外で減らせばよいからである。

1990年の日本の温室効果ガス排出量は、12億6,100万トン(CO<sub>2</sub>換算)であったから、その25%は3億1,525万トンであり、鳩山イニシアチブの方針は、大まかに言えば、2020年までにCO<sub>2</sub>排出量を3.2億トン減らそうとするものだけである。ここで求められるのは、最も多くCO<sub>2</sub>を排出する石炭火力発電所の効率を改善することができれば、CO<sub>2</sub>排出量を最も多く減らすことができるという、柔軟な「逆転の発想」である。2006年の発電電力量に占める石炭火力のウエートを国別に見ると、日本が27%であるのに対して、米国は50%、中国は80%、インドは68%に達する。世界の発電の主流を占めるのはあくまで石炭火力なのであり、当面、その状況が変わることはない(2006年における世界の電源別発電電力量の構成比は、石炭が41.0%、天然ガスが20.1%、水力が16.0%、原子力が14.8%、石油が5.8%、その他が2.3%である)。

国際的にみて中心的な電源である石炭火力発電の熱効率に関して、日本は世界トップクラスの実績をあげている。したがって、日本の石炭火力発電所でのベストプラクティス(最も効率的な発電方式)を諸外国に普及すれば、それだけで、世界のCO<sub>2</sub>排出量は大幅に減少することになる。IEA(国際エネルギー機関)が2006年に発表したデータに基づく経済産業省の試算によれば、中国・米国・インドの3国に日本の石炭火力発電のベストプラクティスを普及するだけで、CO<sub>2</sub>排出量は年間13億4,700

万トンも削減される。この削減量は、1990年の日本の温室効果ガス排出量の106.8%に相当する。日本の石炭火力のベストプラクティスを中米印3国に普及しさえすれば、鳩山元首相が掲げた25%(3.2億トン)削減目標の4倍以上の温室効果ガス排出量削減効果を、2020年を待たずして、すぐにも実現できる。これは、先述したIGCCやCCSなどの実用化の不確実性(③の不確実性)とは無関係に、実現可能な方策なのである。

我々が直面しているのは、「日本環境問題」ではなく「地球環境問題」であるから、石炭火力技術の海外移転でCO<sub>2</sub>排出量を削減するという方法は有効である。その際、CO<sub>2</sub>排出量削減分を、2国間クレジットの方式によって、日本と技術輸入国との間で分けあうことになる。つまり、わが国の地球温暖化防止策の軸足は、原子力発電を使った国内でのCO<sub>2</sub>排出量削減から、石炭火力技術移転と2国間クレジットを用いた国外でのCO<sub>2</sub>排出量削減へ、移行するわけである。

## 節電の「第4の電源」としての「見える」化

日本の将来における電源構成を考察する際には、再生可能エネルギー利用発電および火力発電のほかにも、もう一つ重要な論点が残されている。それは、省エネルギーと節電に取り組み、電力の使用量そのものを減らす取組みをいかに進めるかという論点である。

1973年から2008年の間に、日本のGDP(国内総生産)は、2.3倍に増加した。その間にわが国の最終エネルギー消費量は、民生部門では2.5倍、運輸部門では1.9倍、産業部門では0.9倍、全体では1.3倍になった。総じて、1973年の石油危機以降、日本では省エネルギーが進展したとすることができるが、それでも民生部門や運輸部門では、省エネの余地がまだまだ残されている。

電気自動車の普及に示されるように、低炭素社会は一面では電化社会であるから、日本における今後の省エネルギーを通じた節電には、おのずと限界がある。ただし、民生部門や運輸部門でさらなる省エネに取り組みれば、ある程度の節電は可能だと言える。将来の電源構成を見通す際には、省エネルギーによる節電を(つまり、節電による電力使用量の減少分を)、原子力発電、再生可能エネルギー利用発電、火力発電に並ぶ「第4の電源」として「見える」化することが有意義である。

## 2030年の電源構成の見通し

リアルな原発のたたみ方に関するここまでの記述をまとめる意味で、2010年策定の「エネルギー基本計画」と同様に2030年を対象にして、発電電力量ベースでの日本の電源構成の見通しを考えることにしよう。その際、重要な点は、原子力発電のウエートを独立変数として示すのではなく、従属変数として導くことである。

上記の(1)~(3)の独立変数は、いずれも不確実性が高

く、2030年時点での見通しを得ることが難しい。明確な根拠はないが、(1)の再生可能エネルギー利用発電と(2)の省エネルギーによる節電については、最大限の数値をめざすことにして、2030年における発電電力量ベースでのウェートを、それぞれ30%、10%と設定することにした(発電電力量ベースでの再生可能エネルギー等の比率は、2007年度実績で9%であった。2011年5月にフランスのドービルで開催されたG8サミットに出席した菅直人首相(当時)は、2020年代のなるべく早い時期までに再生可能エネルギー利用発電のウェートを20%に高める方針を打ち出した。ここで、2030年における再生可能エネルギー利用発電のウェートを30%に設定したのは、2007年度9%、2020年20%という上昇趨勢を踏まえたものである)。(3)の独立変数にかかわる火力発電のウェートについては、30~40%と想定した。これらの仮定を念頭において、2030年における発電電力量ベースでの日本の電源構成を見通すために作成したのが、第1表である。

第1表中のAの原発依存シナリオは、2010年に策定された現行の「エネルギー基本計画」の内容を示したものである。このシナリオが福島第一原発事故によって実現不可能になったことは、すでに指摘したとおりである。

Bの現状維持シナリオは、火力発電のウェートを30%としたケースである。このシナリオでは、2030年における原子力発電のウェートは、現状と同じ30%となる。

Cの脱原発依存シナリオは、火力発電のウェートを40%としたケースである。このシナリオでは、2030年における原子力発電のウェートは、現状を約10%下回る20%となる。

Dは、原子力発電のウェートを0%とする脱原発シナリオである。このシナリオでは、火力発電のウェートが60%になってしまい、燃料コストの大きさを考慮に入れると、シナリオとしての現実性は低いと言わざるをえない。

問題は、BとCのシナリオのどちらが高い蓋然性をもつかという点に絞られるが、筆者は、今のところ、Cの脱原発依存シナリオになる確率が高いと考える。それは、高経年化した原子炉の廃止などを視野に入れば、日本における原子力発電のウェートは縮小してゆくと考えられるからである。

第1表 2030年における発電電力量ベースでの日本の電源構成(単位:%)

シナリオ	再生可能 エネルギー	節電	火力	原子力
A 原発依存	21	0	26	53
B 現状維持	30	10	30	30
C 脱原発依存	30	10	40	20
D 脱原発	30	10	60	0

## 当面する原発再稼働の要件

2030年の日本の電源構成が第1表のCのシナリオになるとすれば、それは、脱原発依存の方向へ転換することを意味するものの、一方では、原発依存度が現状より10%程度しか減らないことも指し示す。つまり、原発の必要性は、縮小しながらも、まだ残るわけである。

ただし、ここではっきりさせなければならない点は、福島第一原発事故後の日本では、必要性があるというだけでは、原発を動かすことはできないことである。必要性だけでなく、危険性も直視し、危険性を最小化するきちんとした手立てを打たない限り、原発を動かすことは不可能なのである。

現在の日本では定期検査あけの原発の再稼働が大きな社会問題となっているが、再稼働のために必要な「危険性を最小化するきちんとした手立て」とは、何だろうか。それは、菅前首相が2011年7月に突然持ち出したストレステストではない。ストレステスト自体は、非常事態に対する余裕度を測るものであり、原発の安全性の向上に役立つものである。ただし、ここでは、ストレステストが原発の運転の前提条件にはならない点を、見落としてはいけない。その点は、6月にストレステストを開始したヨーロッパ諸国が、原子力発電所を稼働させながら、コンピュータを使ってストレステストを実施していることから明らかである。そもそも、ストレステストをしなければ原発を運転することができないのだとすれば、なぜ菅前首相は、7月の時点で稼働中であった19基の原発の運転を止めて、ストレステストを行わなかったのだろうか。筋が通らない。

定期検査あけ原発の運転再開の前提条件とすべきなのは、ストレステストではなく、福島第一原発事故の教訓を盛り込んだ新しい安全基準である。原発の地元の住民や首長が安心できるような厳格でわかりやすい安全基準であり、その内容は、有史以来最大の地震・津波にも耐えうるよう想定を設定する「最大限基準」と、新たに見つかった地震・津波に関する知見を想定に反映させる「更新基準」との、組合せにすべきである。日本で最も多くの原発が立地する福井県は、すでに事故直後の2011年4月に、新しい安全基準に関する具体案を示している。エネルギー政策面で野田佳彦新政権に求められる当面の最大の課題は、この福井県の場合などを参考にして新しい安全基準を提示し、地元住民や首長の同意を取り付けて、定期検査あけ原発の運転再開へ道を作り、電力供給不安を取り除いて、産業空洞化に歯止めをかけることである。その際、福島第一原発で最初に水素爆発を起こした1号機が運転開始後約40年を経た高経年炉であったことを考え合わせれば、少なくとも、事故調査・検証委員会の精査が終わるまでは、他の高経年炉の運転も見合す措置をあわせてとるべきであろう。

[付記] 「みんなのエネルギー・環境会議」の発起人一覧  
(五十音順)

氏名	所属
飯田哲也	環境エネルギー政策研究所
枝廣淳子	幸せ経済社会研究所
岡田武史	日本サッカー協会
橘川武郎	一橋大学
小林武史	APバンク
澤 昭裕	国際環境経済研究所
澤田哲生	東京工業大学原子炉工学研究所
茅野 實	長野県環境保全協会
吉岡達也	ピースボート
吉岡 斉	九州大学

—参考資料—

- 1) 橘川武郎, 日本電力業発展のダイナミズム, 名古屋大学出版会, (2004).
- 2) 橘川武郎, 原子力発電をどうするか, 名古屋大学出版会, (2011).
- 3) 橘川武郎, 東京電力—失敗の本質, 東洋経済新報社, (2011).

—著者紹介—

橘川武郎(きっかわ・たけお)  
一橋大学  
(専門分野/関心分野)経営史・エネルギー産業論



## From Editors 編集委員会からのお知らせ

○学会誌記事執筆者のための

テンプレートを用意しました  
執筆要領と合わせてご利用下さい



<http://www.aesj.or.jp/atomos/atomos.html>

○「投稿の手引」「和文論文テンプレート」を  
改定しました。

<http://www.aesj.or.jp/publication/ronbunshi.htm>

—最近の編集委員会の話題より—  
(12月2日第6回編集幹事会)

### 【論文誌関係】

- ・原発事故関連論文の受理・審査・掲載状況が報告された。
- ・編集委員会の来年度予算案を提出した。学会の財政状況悪化のため、極めて厳しい状況にあることが説明された。
- ・英文論文誌の新出版社移行の進捗状況が報告された。来年から表紙を決定した。現在1月号掲載論文の著者校正中。審査システムは作成中。編集委員の英文名称と国際顧問委員会を設置することが認められた。

- ・審査区分の再編についての調整がほぼ終了した。
- ・投稿論文審査関係と前回幹事会以降の懸案論文の対処について報告された。

### 【学会誌関係】

- ・同じテーマについての賛否両論を同時に掲載する新記事企画の「論点」を1月号, 2月号に掲載する。
- ・今後の記事企画の方向について検討した。「減原発と原子燃料サイクル」, 「放射線の医学への応用」, 「20~30年後の原子力界を担う若手の意見」, 「一般人の疑問に答える」等の記事案が出された。
- ・4月号からの表紙案について報告があった。日展シリーズは大変好評であり, 次年度も引き続き掲載していくこととなった。
- ・11月の幹事会で企画提案のあった「放射線のDNAへの影響等, 放射線のファンダメンタルな生物学的影響, 低放射線の影響」等の取り上げるテーマについて説明があった。
- ・図書寄贈の報告があった。新刊紹介として取り上げるごととし, 編集委員から評者を選出した。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

# 全電源喪失について

東京大学 岡本 孝司

原子力発電所の安全を担保する思想は深層防護である。東日本大震災による発電所への影響を深層防護に従い検討を行うと、いかなる場合においても、電源を供給できるようにすることが必須であることが見えてくる。全交流電源喪失、全交流電源系統喪失、全電源喪失など、発生確率とリスクに応じて、電源に対する対策を考えていくことが重要である。わずかな電源容量であっても、ある程度の時間は稼ぐことができる。事象を整理し、俯瞰的に評価することで、プラント全体のリスクを低減していくことが重要である。

## I. はじめに

原子力発電所では、核分裂によって大量のエネルギーを発生することができるが、その代償として、大量の放射性物質も発生する。これは、ウラン原子核が分裂した後の原子核であり、極短時間に安定な状態に落ち着くものもあるが、安定になるまでに、30年やさらに長期の期間かかる物質もある。この間、ガンマ線などの有害な放射線を放出するとともに、発熱を続ける。

原子力安全は、これらの有害な放射線から、「人」と「環境」を守ることがその基本的な目的である<sup>1)</sup>。この目的を達成するための思想として、深層防護(Defense-in-Depth)が導入されている。深層防護は、多重防護とも呼ばれ、IAEA NS-R-1によれば、次の5層からなる<sup>2)</sup>。

- (1) 異常を起こさないこと
- (2) 異常が起きた場合でも、異常を拡大しないこと
- (3) 異常が拡大した場合でも、影響を緩和し過酷事故にしない
- (4) 過酷事故が起きた場合でも、過酷事故に対応できるようにすること
- (5) 過酷事故に対応できなくても、人を守ること

深層防護思想は、前段否定の考え方にのっとり、人を守ることを提唱している。例えば、2層は1層が失敗した場合にも異常を拡大しないように対策をとることであり、3層は2層が失敗しても、その影響を緩和しようとするものである。4層は、過酷事故が起きた場合であっても、その過酷事故を拡大させず、また過酷事故の影響を緩和するための対策をあらかじめ考えておくことであり、さらに5層は、過酷事故により放射性物質の放出に至った場合でも、人を守るものである。

東日本大震災では、太平洋岸に立地している14基の原子炉が影響を受けた。女川発電所(3基)、福島第一発電

所(6基)、福島第二発電所(4基)、東海第二発電所(1基)である。M9という大きな地震と、その後に襲った津波により、東京電力㈱福島第一原子力発電所では、深層防護が突破され、大量の放射性物質放出につながった。

今回の事故においては、特に電源の重要性がより強くあぶりだされた<sup>3,4)</sup>。本稿では、電源喪失について、深層防護との関係も含め、考察を行う。

## II. 深層防護と全電源喪失

### 1. 第1層 異常の発生防止

14基の原子炉は、定期検査中の福島第一4, 5, 6号機を除いて運転中であった。女川2号機は、地震直前に起動操作に入っていたが、地震によって自動停止し、すぐに冷温停止状態となった。残る10基は100%出力で運転中であったが、自動的に制御棒が挿入され、核分裂反応は停止した。

地震によって、外部電源の多くが利用できなくなった。これは、地震の揺れによって碍子等が損傷したことが主な原因である。各発電所には複数の外部電源系が用意されているが、福島第一と東海第二は、外部電源喪失となり、非常用ディーゼル発電機により電源供給が行われた。なお、残りの女川と福島第二では、やはりいくつかの系統が損傷したが、それぞれ1系統の外部電源系が利用できた。

なお、一般に外部電源系の信頼性は比較的低い。例えば、今年9月8日にはカリフォルニア州で大規模な停電があり、サンオノフレ原子力発電所でも外部電源喪失を経験している。過去にも、ニューヨーク大停電があったように、外部電源が喪失することは、あらかじめ設計で織り込まれており、非常用発電機が自動的に起動し、電気を供給し始めた。

これらの電力によって、原子炉で発熱している崩壊熱をポンプを動かして除去し、海に熱を逃すことが行われ

た。福島第一2, 3号機では、隔離時冷却系と呼ばれる冷却システムが動いて熱を除去していた。これは、原子炉で発生した蒸気でタービンを回し、その力で水を原子炉に供給する仕組みである。最終的には熱交換器と海水ポンプによって、熱を海に放熱する。この状態は、中越沖地震の柏崎刈羽発電所での経験と同じ状態であり、おそらく、運転員はこのまま冷却ができ、異常状態は安全に収束すると考えていたであろう。

福島第一1号機では、隔離時復水器とよばれる仕組みで、原子炉内で崩壊熱によって発生する蒸気を自然循環によって冷却し、その蒸気を大気中に放熱することで、崩壊熱を除去していた。

#### 課題：電源系の信頼性確保

原子力発電所では、冷却のために大型のポンプを動かす必要がある。複数の外部電源と複数の非常用発電機によって、これらのポンプ動力を供給する設計となっており、いずれかが稼働すれば、電源は確保される。電源系の信頼性を確保する意味では、非常用発電機は全て正常に起動している。外部電源系は、非常時に期待することはできないものとして評価をすべきであろう。今回の場合は、外部電源系も2系統は確保されていたことがリスクを低減している。

なお、4月7日の余震によって、東通発電所では外部電源系の喪失に加えて、非常用発電機が停止したことによって、全交流電源喪失(SBO)となった。外部電源系の信頼性を高めることもある程度は必要であるが、非常用発電機を含めた電源系全体の信頼性を高めることが重要である。

## 2. 第2層 異常の拡大防止

女川発電所1号機では、地震の揺れによって電源盤が損傷し、火災が起きた。安全上重要でない常用の電源盤ではあったが、火災によって建屋内に入城が困難な状態となった。消火活動によって火災を鎮火するとともに、対応がとられた。非常用電源盤は損傷しておらず、安全上の問題はなかった。

なお、中越沖地震時の柏崎刈羽原子力発電所でも、地震により変圧器から火災を起こした。安全上は全く問題がなかったが、火災が大きく報道されたことで、風評被害につながった。

#### 課題：地震起因の電源系火災防止

異常の拡大防止の意味では、地震によって発生する火災に対するリスクを、適切に考慮していくことが今後の教訓としてあげられる。安全上重要でない機器であっても、火災は対応を妨げる結果となる。特に電源系については、地震による火災発生を防ぐ対策を取ることが有効であろう

## 3. 第3層 異常の影響緩和

地震から約1時間後に、巨大な津波が4つの原子力発電所を襲った。女川発電所で13m、福島第一発電所で14m、福島第二発電所で7m(遡上高さ14m)、東海第二発電所で6mといずれも、設計で考慮していた津波の大きさを超える高さの津波であった。この津波により、それぞれの発電所で様々な異常事態を生じた。

第1～3表に、津波による電源系の影響をまとめる。外部電源、非常用電源、電源盤(M/C, P/C)、直流電源それぞれに対して、全て利用可能を○、全て利用不可を×で表し、利用不可が混在する場合は、分母に基数を、分子に利用可能な基数を示した。

女川発電所は、地震に伴う地盤沈下により1m下がっ

第1表 津波直後の福島第一原子力発電所の状況

	#1	#2	#3	#4	#5	#6
外部電源	×	×	×	×	×	×
非常用D/G A/C: 空冷 *: 冷却ポンプ損傷	×	×	×	×	×	×
M/C (非常用)	×	×	×	×	×	3/3
M/C (常用)	×	×	×	×	×	×
P/C (非常用)	×	2/3	×	2/3	×	3/3
P/C (常用)	×	2/4	×	2/2	2/4	×
直流電源	×	×	○	×	○	○
海水冷却ポンプ	×	×	×	×	×	×

第2表 津波直後の福島第二原子力発電所の状況

	#1	#2	#3	#4
外部電源	○	○	○	○
非常用D/G A/C: Air-cooled *: cooling pump flooding	×	×	×	×
M/C (非常用)	1/3	○	○	○
M/C (常用)	○	○	○	○
P/C (非常用)	1/3	2/3	2/3	2/3
P/C (常用)	6/7	4/5	7/7	4/5
直流電源	○	○	○	○
海水冷却ポンプ	×	×	1/2	×

第3表 津波直後の女川及び東海第二原子力発電所の状況

	女川			東海第二
	#1	#2	#3	
外部電源	○	○	○	×
非常用D/G A/C: Air-cooled *: cooling pump flooding	○	×	○	○
M/C (非常用)	○	○	○	○
M/C (常用)	×	○	○	○
P/C (非常用)	○	○	○	○
P/C (常用)	○	○	○	○
直流電源	○	○	○	○
海水冷却ポンプ	○	○	○	○

たが、津波よりも約1m高かったため、津波による直接的な影響はほぼなかった。漏水対策が不十分であり、トレンチ等を経由して、2号機の非常用発電機2台が使用不能となったが、大きな異常にはつながらなかった。

東海第二発電所では、やはり漏水対策が不十分であり、海水ポンプのうち、非常用発電機冷却用のポンプ1台が利用不能となった。このため、外部電源に加えて、1台の非常用発電機が利用不能となったが、残りの2台の非常用発電機が利用できたことと、電源盤など電気系統が利用できたこと、海水ポンプは機能していたことから、安全に冷却を継続することができた。

#### 課題：電源系の水密対策

電気系統は水との相性が良くないため、電源盤や非常用発電機への水の漏洩経路をなくすことが教訓としてあげられる。また十分な水密性をもって海水ポンプを守ることが必要であり、さらに、海水ポンプが故障することを前提とした、空冷式非常用発電機準備などの対策が考えられる。

### 4. 第4層 過酷事故の対応

異常が緩和できない場合、過酷事故(シビアアクシデント)につながるようになる。これは、設計で考慮すべき第3層までの対策が破られたときに、発電所で利用できる全ての資源を応用して、シビアアクシデントの発生防止を行うことと、シビアアクシデントが発生した場合にも、その影響を緩和することが必要となる。これらを総称してアクシデントマネジメント(AM)と呼ぶ。

なお、本稿では全交流電源喪失について、現行の設計指針に従い、短時間のSBOは第3層(設計基準事象, Design Basis)と考え、長時間のSBOは第4層(超過設計事象, Beyond Design Basis)と考えることとする。

#### (1) 電源がある条件下の全冷却系喪失

なお、SBOにはなっていないが、SBOと深い関連があるため、第4層であるLUHS(全冷却系喪失, Loss of Ultimate Heat Sink)についてまとめる。福島第二発電所では、津波によって冷却用の海水ポンプが損傷した。3号機崩壊熱除去系の海水ポンプ1台と、3,4号機の非常用発電機冷却系ポンプの一部は利用することができた。また、1号機の電源盤の一部は津波によって損傷したが、1～4号機共に電源盤を利用することができた。外部電源系が使えたこと、3,4号機の非常用発電機が使えたこと、全号機の電源盤が使えたことから、電源系が通常通りに利用できた。

また、福島第一6号機は、停止中であったが、海水ポンプが損傷し、全冷却系喪失になった。しかし、高所に設置されていた空冷の非常用発電機が利用できたことと、非常用電源盤が原子炉建屋内にあり、いずれも損傷しなかったことから、電源系が利用できた。

つまり、福島第二発電所と福島第一6号機は、全交流

電源喪失には至っていない。冷却系が喪失していたが、電源があることから炉内の状況を正確に把握することができた。また、あらかじめ考えられていた原子炉の減圧や代替注水、また、格納容器への代替注水を行うことで時間を稼ぎ、運転中であった福島第二でも3日後に冷却系を復旧することで、安全に停止することができた。電源があれば、3日程度の時間的余裕があることを示している。

#### (2) 全交流電源喪失(SBO)

過去に世界では全交流電源喪失を経験している。この中で、2001年台湾の馬鞍山発電所で経験したSBOについてまとめる<sup>5)</sup>。2001年3月17日、海水からの塩分を含む濃霧によって1号機は運転を停止し、ホットスタンバイ状態にあった。停止約1日後の18日午前0時35分に、やはり海霧の海塩飛来で絶縁劣化して2回線ある外部電源が停止した。自動的に2系統の非常用ディーゼル発電機が立ち上がる設計であったが、A系統は、分電盤の地絡により電源母線が損傷したため、電気を供給できなくなり、B系統は、非常用ディーゼル発電機の起動失敗によって、やはり電気を供給できなかった。この時点で、全交流電源喪失(SBO)となった。炉心は補助給水系などによって冷却が開始された。

台湾の原子力発電所は、元々外部電源系の信頼性が高くないため、電源供給の信頼性を高めるために、予備の非常用ディーゼル発電機(Swing DG)が用意されていた。これは2基で共有されており第5DGとも呼ばれている。午前2時47分に、この第5DGを、電気供給が可能なB系統に接続し、SBOは解消した。この間約2時間にわたってSBOが継続した。また、炉停止後1日経っていたことや2時間で復旧したため、SBOに伴う一時的な最終ヒートシンクの喪失は重大な問題にはつながらなかった。

この事故の教訓として、(1)発電機や外部電源系が正常であっても、母線や電源盤の損傷によってSBOになりうることを示している。(2)予備の発電機によって、つまり発電機の多重性によって電源系の信頼性を高めることができることも確認できる。(3)直流電源系が利用できたため、計測制御系が正常に働いており、補助給水系などによる炉心の冷却も可能であった。直流電源系が重要であることを示している。

#### (3) 全交流電源喪失(SBO)+電源盤喪失

福島第一5号機は、地震による外部電源喪失と、津波による非常用発電機喪失により、SBOに至った。さらに、非常用電源盤が2系統ともに津波により損傷している。しかし、直流電源系は利用できたため、計測制御系は正常に働いていた。ただし、蓄電池の容量は、負荷の切り落としをしても8時間程度である。6号機の非常用発電機1台と非常用電源盤は損傷を受けておらず、あらかじめAM対策としてとられていた、5,6号機間電源

盤の接続を行い、5号機の蓄電池への充電が、12日には実施されている。5号機の電源盤は、ほとんどが損傷していたが、わずかに利用できた電源盤を使い充電を実施した。さらに、13日には、非常用ガス処理系や補給水系への電源供給が、6号機の電源盤より仮設ケーブルを引き回すことで実施された。また、18日には海水ポンプへ電源車から電源を直接供給するとともに、6号機より崩壊熱除去系ポンプに仮設ケーブルで電源を供給して冷却が実施された。これらのAM対策が功を奏し、また、炉も停止中であり、崩壊熱があまり大きくなかったことも幸いして安全に冷温停止に至っている。

課題：電源母線、電源盤が損傷しないようにすること

交流電源の多重性、独立性が重要である

直流電源への充電が重要である

一方、福島第一3号機では、福島第一5号機と同様に、SBOに加えて電源盤が全て損傷した。直流電源だけは使えたため、一部の計測制御系は正常に働いていたと考えられる。5号機と異なるのは、蓄電池への充電ができなかったこと、さらに炉停止がSBOの1時間前であり、崩壊熱が大きかったことである。このため、蓄電池の容量が尽きた時点で、直流電源も喪失し、計測制御系が利用できなくなった。この後、炉心損傷となり、さらには水素爆発を伴い環境中に放射性物質を大量放出した。

#### (4) 全交流電源喪失(SBO)+電源盤喪失+直流電源喪失

福島第一1号機及び2号機では、SBOと電源盤喪失に加えて、津波によって直流電源(125V)も喪失した。なお、250Vと24Vの直流電源については、まだ明らかになっていないが、同様に利用できなくなったと考えられる。完全に全ての電源が利用できない、全電源喪失となっている。この後、いずれも炉心損傷となり、さらには水素爆発などを伴い環境中に放射性物質を大量放出した。

電源喪失によって、冷却系が制御できなくなることで、計測系が使えなくなり炉内の情報が全く得られなくなることの2点が最も課題である。冷却系が制御できれば、炉心損傷までの時間を稼ぐことが可能になる。計測系が使えれば、炉内の情報を正確に把握することで、正しい対策が立てられる。これらに必要な電力は、さほど大きくはない。どのような状態であっても、重要な計測系、制御系への電源を供給できることが必須であろう。

課題：直流電源は最後の砦である

直流電源がなくなると、炉心損傷、さらには放射性物質の大量放出につながる可能性が非常に高くなる。

### Ⅲ. 全電源喪失への対策

上記に見てきたように、一口でSBOといっても様々なレベルがあることがわかる。また、崩壊熱の大きさ、つまり炉停止後どのくらいの時間後にSBOになるかに

よって、その後の事象進展速度が大きく異なる。本章では、SBOについての考え方を整理する。

#### 1. 全交流電源喪失

外部電源、非常用発電機などの電源(電源発生装置)が喪失することで、非常用機器に電気が供給できなくなる状態である。非常用電源系統は、信頼性を高めるため、独立な複数系統(一般には2系統)が用意されており、1系統以上の電源盤や母線が利用できる場合とする。SBOとしては、濃霧などの外部要因を含め、最も発生確率が高いと考えられる。このため、リスク低減のためにも、あらかじめ確実な対策をとっておくことが必要となる。

この場合には、例えば、馬鞍山のように、電源を準備することで復旧が可能となる。電源発生装置を復旧するオプションとしては、外部電源復帰、非常用発電機復帰、代替非常用発電機接続、電源車接続など様々なオプションが考えられる。いずれも、電源発生装置の信頼性を高めることにつながる。崩壊熱の大きさによっては、時間的余裕があまりないことから、あらかじめ代替電源発生装置を準備しておくことで、信頼性を高めることが可能になると考えられる。

#### 2. 全交流電源系統喪失

複数系統ある非常用電源系の電源母線もしくは電源盤(M/C, P/C)が全系統喪失し、非常用機器に電気が供給できなくなる状態とする。系統が喪失しているため、外部電源や非常用発電機が利用できたとしても、電気は供給できないため、電源発生装置の有無は問わない。また、電源盤についても上流側の電源盤(M/C)が利用できなくなれば、下流側の電源盤(P/C等)が利用できたとしても電源供給はできなくなる。複数系統の同時損傷であるため、共通要因によって引き起こされる状態であり、一般的にはその発生確率は、あまり高くない。このため、恒久設備対応を行うことは合理的ではなく、AMとしての対応をあらかじめ準備しておくことが必要である。また、共通要因故障を排除するために、独立性、多様性を高めることも重要な設計対応である。なお、共通要因としては、地震、津波などの自然災害や、テロなどが考えられる。

この場合には、代替非常用発電機などは、接続先である電源母線が損傷しているため期待できない。代替非常用発電機用の独立母線や電源盤などを準備することで信頼性を高めることも可能と考えられるが、共通要因を排除するためには、様々な起因事象を考慮する必要がある、現実的ではないとも考えられる。

AM対策としては、直流電源を利用して、崩壊熱の冷却を行うとともに、直流電源への充電を行うことが必須となる。代替非常用発電機や電源車などからの直流電源充電器へのケーブルをあらかじめ準備しておき、非常時



に確実に充電できるようにしておくことで、時間を稼ぐことが可能となる。また、必要な仮設ケーブルを準備するとともに、教育訓練を定期的実施することも重要な視点である。なお、この場合の冷却可能時間を評価し、電源系統復旧までの時間よりも長いことを示す必要がある。

### 3. 全電源喪失

全交流電源系統喪失に加えて、直流電源が利用できない場合であり、津波直後の福島第一1, 2号機、または蓄電池枯渇後の3号機に対応する。全交流電源系統喪失と同様に、共通要因故障により発生する。発生確率は全交流電源系統喪失よりも若干小さいと考えられるが、AM対策をとることが必要である。

設備対応としては、直流電源についての信頼性を高めることであり、多重性、多様性を高めることなどの対応が考えられる。これには、代替直流電源を準備することや、専用の充電設備を用意することなどが考えられる。また、計測制御系やベント系など、過酷事故時に必須の電源を後備として準備しておくことなども考えられる。

### 4. 組み合わせ

全交流電源喪失、全交流電源系統喪失や全電源喪失は、上記のような単純な場合だけではなく、様々な状態が考えられる。例えば、全交流電源喪失時に代替交流電源の起動失敗などであるが、これらは、発生確率とリスクを適切に評価して対応をしていくことが必要である。一般には、これらの事象は、全電源喪失で包絡できると考えられるが、今後より詳細な評価が必要と考えている。

## IV. まとめ

原子力発電所の安全を担保する思想は深層防護であり、さらに、「止める」「冷やす」「閉じ込める」を達成することが重要である。「止める」や「閉じ込める」はフェール

セーフ設計によって、電源がなくてもある程度は達成が可能であるが、「冷やす」に対しては電源は必須である。いかなる場合においても、電源を供給できるようにすることが必須である。わずかな電源容量であっても、ある程度の時間は稼ぐことができる。発生確率とリスクに応じて、段階的に対策を考えていくことが重要である。これには、事象を可能な限り整理し、俯瞰的に評価することで、プラント全体のリスクを低減していくことが重要である。糞に懲りて膾を吹くことは、ある程度は仕方ないかもしれないが、膾を凍らせてしまっただけでは、かえって怪我をする。今こそ、冷静に、かつ、総合的に評価を行うことが求められている。

#### —参考資料—

- 1) IAEA Safety Fundamentals(SF-1), [www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub\\_1273\\_web.pdf](http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub_1273_web.pdf)
- 2) IAEA Safety of Nuclear Power Plants: Design Safety Requirements(NS-R-1), [www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub\\_1099\\_scr.pdf](http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub_1099_scr.pdf)
- 3) 東京電力福島原子力発電所における事故の概況について, [icanps.go.jp/2011/07/13/0708\\_touden-4.pdf](http://icanps.go.jp/2011/07/13/0708_touden-4.pdf)
- 4) 国際原子力機関に対する日本国政府の追加報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について(第2報), [www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/backdrop/20110911.html](http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/backdrop/20110911.html)
- 5) The Station Blackout Incident of the Maanshan NPP unit 1, [www.aec.gov.tw/upload/1032313985318\\_Eng.pdf](http://www.aec.gov.tw/upload/1032313985318_Eng.pdf)

#### 著者紹介



岡本孝司(おかもと・こうじ)  
東京大学  
(専門分野/関心分野)原子力安全工学, 原子炉熱工学, 可視化学など

# 原子力発電所の全交流電源喪失規制はなぜ遅れたか 大津波の可能性の知見がなぜ福島第一発電所に活かせなかったか

元日本原子力研究所 宮坂 靖彦

東京電力福島第一発電所のシビアアクシデントについて、事故時の対応、規制等の観点から十分に調査・検証する必要がある。それにしても原子力発電所の全交流電源喪失(SBO: Station Blackout)規制はなぜ遅れたのか。また、地震・津波の発生の可能性は、専門家から知らされていたのになぜ耐震規制に反映できなかつたか。日本の原子力施設の耐震対策は、1995年兵庫県南部地震から数年後に本格検討が始まり、大幅改訂の耐震設計審査指針が公表されたのが2006年9月である。この間に新潟地震があったといえ、あまりに遅く残念である。改めて、安全研究の重要性と適切な規制体系の再構築が必要である。独立した規制機関の再構築が検討されているが、その第一歩はこれまでの対応を解明することである。

本報では、洪水による外部電源喪失事象、津波による冷却ポンプ機能喪失など教訓とすべき事象、米国及びフランスのシビアアクシデント規制の状況、わが国の規制取り組み等に関する提言を含め解説する。

## I. 教訓とすべき事象

フランスのルブレイエ発電所(Le Blayais: PWR型, 90万kWe×4基)では、1999年12月27日午後7時30分、225kV外部電源を喪失して4基の原子炉が停止した。2号機及び4号機では、400kV電源ラインも喪失したが、この間、非常用ディーゼルにより電源が供給された。しかし、1号機及び2号機では、高潮を伴う暴風雨でジロンド河が増水して設計防水堤水位5mを大きく超え、浸水し、ポンプや配電設備などが水につかり安全系喪失事故事象を起こし、冷却システムが停止して発電所内緊急事態に陥った。この事象発生後、幸い、蒸気発生器によって炉心冷却することができたこと、基本サービス給水系(ESWS)が12月30日午後回復し、さらに温帯停止状態に置いてあった4号機が30日未明に再起動に成功して、電源が確保され緊急事態を脱出している。なお、3号機は、燃料交換の終了直後で、準備を終え、再起動を試みたがトラブルで運転できなかった<sup>1,2)</sup>。

また、マドラス原子力発電所2号機(PHWR型, 20万kWe)では、2004年12月26日のスマトラ島沖地震(M9.1)による津波がインドに到達し、ポンプ室の必須プロセスポンプのモーターが水没して原子炉が停止した外部溢水事象を起こしている<sup>3)</sup>。

これらの情報は、どれだけ真剣に調査・検討された

か、学会誌、報告書等を調べても極めて少なく、疑問である。実証試験できない事象だけに実プラントでの前兆SBO事象を学ぶことは、現場技術者にとって極めて重要である。また、規制当局及び事業者には本当に重要な情報であると見抜く能力・対応力が求められる。

## II. 米国及びフランスのシビアアクシデント規制と対策

米国では、1979年4月のTMI-2事故以来、第1表に示すように、1984年から1990年の間に4件の短時間のSBO事象<sup>4)</sup>を起こし、また規制ガイドラインNUREG-1776(2003年)<sup>5)</sup>によると1998年までにハリケーン、竜巻等による4件の前兆SBO事象(Near SBO Event)を経験した。

これらのことからSBO規制は、緊急の課題として検討が進められ、2003年頃までにはほぼ完了している。SBO規制では、長時間SBOを含む耐久能力や外部電源の復旧まで要求している。

NUREG-0661「安全性評価報告書、MARK-I型格納容器長期プログラム」(1980年7月)による耐圧強化ベントの設置の要請に始まり、NRC規則10 CFR 50.63「全交流電源喪失(Loss of all alternating current power)」(1988年7月)、規制ガイドRG 1.155(Station Blackout)(1988年8月)を定めている。また、同年には電力とプラントメーカー共同の民間規格NUMARC-8700(RG 1.155より詳細な評価方法等)を定め、NRCがこの規格を了解している。

*Why was Introduction of Station Blackout Regulation Late ?*: Yasuhiko MIYASAKA.

(2011年10月28日受理)

第1表 米国における1990年代までのSBO事象及び前兆SBO事象例<sup>4,5)</sup>

発生年月日	プラント名	SBO事象及び前兆SBO事象の概況
1984/7/26	サスケハナ2号機 (BWR, 114万kWe)	短時間のSBO事象：出力30%で外部電源喪失試験運転中、4基の非常用のディーゼル発電機(EDG)が17分間起動せず。原因：運転員の操作ミス。
1985/11/20	サンオノフレ1号機 (PWR, 45万kWe)	短時間のSBO事象：復水器海水漏洩のため修理中で、出力60%で運転中、外部電源に接続補助変圧器から供給されている安全関連母線の地絡警報、原因調査のためいろいろな手順操作後に、母線からの供給喪失、短時間のSBOとなった。最終的に外部電源復活にリセットボタン押し忘れて4回失敗したが4分後に回復。
1990/2/20	アルビンW.ボーグル1号機 (PWR, 115万kWe)	短時間のSBO事象：原子炉停止中に開閉所付近で燃料油搬送トラックが230kV送電線の支柱に衝突、送電線地絡、EDG点検中。残りのEDG1A起動後にトリップ、3度目に稼働。36分間SBO。1次系36℃から60℃に上昇。「サイト緊急事態」宣言。原因：EDG起動失敗は温度センサーの不具合。
1991/3/21	ザイオン2号機 (PWR, 104万kWe)	前兆SBO事象：運転中、火災水システムのサーベランステスト中に不注意により一斉解放弁が開き、水が大量にスプレイ、発電機がトリップした。また、1台のEDGは保守サービスのため利用できなかった。オフサイト電源により60分後に回復。
1992/8/24	ターキーポイント3～4号機 (PWR, 70万kWe)	前兆SBO事象：6.5日間に及ぶハリケーンに遭遇し、5台の非常用のEDGは、EDGと安全系をつなぐスイッチギヤが湿気のため故障し、利用できなかった。その後、SBO規則に基づき改修された。
1996/2/6	カトーバ2号機 (PWR, 113万kWe)	前兆SBO事象：330分間絶縁不良でループ停止。2台EDGうち1台、バッテリー充電器を修理して運転可能に、不適切な手順のため回復が遅れた。
1998/6/2	デービスベッセ (PWR, 91万kWe)	前兆SBO事象：竜巻で電源設備損傷、1台のEDG故障。

また、長時間のSBOによるシビアアクシデント事象進展(NUREG/CR-5850(1994年5月))について、解析コード(MELCOR)によるMARK-I解析結果を報告している。その条件は、ピーチボトム2号機(MARK-I型、約3,300MWt)をモデルに炉停止後の6時間のみバッテリーによる電源確保することで冷却し、その後SBOに陥り非常用冷却システムが機能しない場合である。解析結果は、約15時間から16,7時間に炉心水位が燃料領域上部まで水位が下がり、その約120分後に炉心溶融が始まり、さらに炉心破壊(core collapse)、原子炉圧力容器破損へと進む<sup>6)</sup>。

フランスでは、1977年「許容できない影響を与える事象の発生確率を $10^{-6}$ /年以下に抑える」方針に対して、この目標が達成できないとの判断からSBO規制が強化された。規制当局(SCSIN)は1978年、リスク低減のための設備変更とシビアアクシデント対応の手順書の整備を要請した。さらに、1985年安全基本規則改訂及び1983年の指針書を引用してSBO対策を要求した<sup>4)</sup>。その後、1989年までに全発電所へのサンドフィルタを用いた格納容器ベント系の設置を完了している。さらに、フランス電力公社(EDF)は、先に述べたルプレイエ発電所の洪水による安全系喪失事故を契機に全電源損失事象の継続時間(シナリオ)を1日から3日間へ変更・再評価し、浸水防護策(防潮堤や各種機器等)を強化した<sup>2)</sup>。

米国及びフランスの規制当局は、SBO対策に「長時間」

の電源喪失を要求し、多くの知見に基づきシビアアクシデント対策に努力していることがうかがえる。

### Ⅲ. 日本のシビアアクシデント規制

日本のシビアアクシデント研究は、1979年4月のTMI-2事故後、1984年に旧原研で炉心損傷研究室が設けられ研究が開始されたが、早くも2001年に研究室が廃止された。

また、シビアアクシデント対策は、TMI-2事故後の約8年遅れの1987年から原子力安全委員会、原子炉安全基準専門委員会に共通問題懇談会で検討が開始された。

その後、1977年の旧指針である安全設計審査指針が1991年8月に改定された。その中に指針27「電源喪失に対する設計上の考慮」を定め、「原子炉施設は、短時間の全交流動力電源喪失に対して、原子炉を安全に停止し、かつ停止後の冷却を確保できる設計であること」を要求している。この指針27は、旧指針9を踏襲したもので、見直されていない。指針27の解説に「長期間にわたる全交流動力電源喪失は、送電線の復旧又は非常用交流電源設備の修復が期待できるので考慮する必要がない。非常用交流電源設備の信頼性が、系統構成又は運用(常に稼働状態にしておくことなど)により、十分高い場合においては、設計上全交流動力電源喪失を想定しなくてもよい。」とある。現在、検討されている安全設計審査指針検討小委員会の指針27の見直し検討資料によると、当

時、「短時間」(最低30分間)のSBOに対して、原子炉を安全に停止し、かつ、停止後の冷却を確保できる設計であることを求め、「長期間」を考慮する必要ないと解されていた。

上記の共通問題懇談会は、「発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネジメントについて」でシビアアクシデントの発生防止及び影響緩和のためのシビアアクシデント対策の整備を、1992年5月に勧告している。原子炉設置者に対して、自主的にシビアアクシデント対策を整備することを強く奨励した。

原子力安全委員会では、原子力施設事故・故障分析評価検討会・全交流電源喪失事象検討ワーキング・グループを設け、「原子力発電所における全交流電源喪失事象について」(1993年6月11日)<sup>4)</sup>を報告している。この報告書では、米国等の短時間のSBO事象等の情報を提供するとともに、わが国のプラントは、電源系統の信頼性が高く、SBOの発生確率は小さいと評価している。また、万一のSBOに対しても短期間で外部電源等の復旧が期待できるので重大な事態に至る可能性は低いと考えられる。その一方、次のような重要な指摘、知見等を述べている。

- ・米国、フランスでは、長時間のSBO対策を規制で要求を行っている。
- ・SBOに対する安全性を更に向上していくため、運転員が手順書に十分習熟した状態を維持するための訓練。
- ・今後、新たな知見による適切な設計・運転・保守管理、手順書への反映。
- ・個別プラントの確率論的安全評価(PSA)によりSBOによる炉心損傷頻度の検討、アクシデントマネジメント整備の努力が重要。

上記の指摘等は忘れ去られ、今回の福島第一の事故に活かされなかった。

その後、1994年10月にシビアアクシデント対策についての行政庁の検討結果が原子力安全委員会に報告された。原子力安全委員会では、新たに設置した原子炉安全総合検討会において、これらシビアアクシデント対策の妥当性について検討を重ね、1995年12月にその妥当性を確認し、結果を公表した。(平成7年原子力安全白書より)

我が国での1995年以降のシビアアクシデントに関する研究者のレポートはいくつかあるに違いないが、規制との関連での報告書は見当たらない。

米国、フランスの規制整備・知見は、我が国の規制に反映されておらず、また、研究者等から明確な「シビアアクシデント規制」の必要性を提言されていただけに極めて残念である。

上記のような調査報告書のフォローがなく情報が眠っ

ていれば、何の意味もない。厳選して規制に活かせる規制システムの構築を痛感する。

#### IV. 東京電力の耐震評価「中間報告」で議論された大津波の知見がなぜ活かされなかったか

平成23年4月号の日経ビジネスの記事から大津波の可能性の知見があったことを知り、驚き、どうして活かされなかったか疑問になり、調査した。

原子力安全委員会の大幅改訂された(新)耐震設計審査指針(2006年9月19日)の決定については、先に述べたが、その後の状況を紹介する。

原子力発電事業者に対して、原子力安全・保安院は文書(平成18・09・19原院第6号)により耐震安全性評価の検討評価(津波対策を含む)を要請している。そして、東京電力は2009年3月、原子力安全・保安院に下記の間接報告書を提出している。

- ・「耐震設計審査指針の改訂に伴う東京電力株式会社福島第一原子力発電所5号機耐震安全性に係る中間報告の評価について」合同W32-2-1
- ・「耐震設計審査指針の改訂に伴う東京電力株式会社福島第二原子力発電所4号機耐震安全性に係る中間報告の評価について」合同W32-2-2

上記「中間報告」に対し、2009年6月24日に総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会、耐震・構造設計小委員会、地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ(WG)において、次のような注目すべき議論がされたことである。

専門委員から「869年の貞観津波という非常にでかいものが来ている。調査結果が出ているのに、全く触れられていないのはどういうことか」との意見が出された。

東電側から「被害がそれほど見当たらない」、「研究課題として捉えるが、耐震設計上考慮する地震としては塩崎沖地震(1938年、M7.5、想定高さ:5.7m)で代表できる」と回答。これに対し、産総研のモデルでM8.5前後が想定され、貞観の津波では、1,000人以上の死者、歴史書『日本三大実録』の記述がある。内陸まで運ばれた砂などの堆積物の分析から時期を特定するこの手法は、政府の中央防災会議で取り入れられている。保安院の事務局からは、津波について産総研及び東北大の知見があるので「最終報告書では貞観津波を考慮する」とその場をとりなした。(委員会議事録等より要約)

この貞観津波について、「M8.4以上と推定され、2011年3月の東北地方太平洋沖地震による津波浸水域と貞観津波の津波堆積物の分布域とほぼ同じであった。今後、詳細調査結果を報告する予定である。」と学会会報で説明されている<sup>7)</sup>。

上記の意見は、「中間報告」に反映されず、先送りされ、2009年7月21日に原子力安全・保安院の委員会では、上

記「中間報告」が妥当と判断された。また、原子力安全委員会でも「中間報告」の見解を妥当と判断している。このような論点について、原子力安全委員会でのどのように議論されたのか見当たらない。

また、2011年8月25日の朝日新聞記事を要約すると、「東京電力は、2002年の政府の地震調査研究推進本部の評価に基づき、房総沖地震のどこかでM8.3を仮定すると、5～6号機：10.2m、1～4号機：8.4から9.3mと試算し、この結果を2008年6月に経営陣に報告済みで、2009年9月に東電から口頭で保安院担当職員に6mを超える津波の可能性を伝えたが、保安院から特別な指示がなかった。さらに、震災4日前に東京電力、原子力安全・保安院へ10mを超える可能性を文書で伝えた。」などと報道されている。このことは、10月3日、NHKニュースで資料を入手したと伝え、さらに原子力安全基盤機構(JNES)の試算解析で津波リスクが高いとの知見があったと伝えられ、非常に残念なことである。このような情報が保安院から原子力安全委員会に本当に伝えられ、ダブルチェック機能が活かされたか、検証されるべきである。JNESの知見等が規制行政執行担当である保安院との意思疎通の悪さもすでに指摘されている。

また、米国には原子力発電プラントの溢水防護指針(RG 1.102)及び溢水防護設計指針(RG 1.59)があるのに、わが国の海岸立地を考慮すると津波等防護指針がなくてよいのか疑問である。

## V. おわりに

後から言っても仕方ないことであるが、原子力界から地震・津波情報を遅くとも2009年時点で広く議論し、伝えられていれば、岩手、宮城、福島、茨城等の津波対策等に有益な情報として提供できたと思う。

シビアアクシデント対策には、現状の事業者の自主保安から、明確な規制要求に切り替え、特に、SBO及び前兆SBO事象等を真摯に学び、訓練に結びつけることを義務付け、世界のSBO事象等の研究成果、原子炉安全システム、地震、津波、構造及び規制など掌握し、全体を見渡せる人材の養成が急務である。

原子力発電事業者には、基本に立ち戻っての技術の見直し、自ら積極的に安全に係る技術開発に取り組み、一層の現場の管理能力を高め、現場から透明で適切な情報が発信できる組織体になることを要望したい。

現行の規制体制では、不十分であるとして、現在、原子力安全・保安院と原子力安全委員会を統合する原子力安全庁構想が報道されている。現行の規制では、あまりにささいなことにこだわり、「リスク規制」に転換でき

ず、諸外国の規制動向や事故・トラブルから学び、規制への反映が不十分であり、また「構造強度検査」中心から「システム機能検査」重点への転換、原子炉等規制法と電気事業法との統一化等<sup>8)</sup>や2008年のIAEA規制レビュー(IRRS)<sup>9)</sup>の指摘も十分に反映されていない。

これらの反省の上に、柔軟に最新の知見を取り入れ、活発に議論できる場を提供し、かつ透明性のある規制体系を作り上げることを検討すべきである。

最後に、茨城県原子力安全対策課が津波防災マップの溢水レベルが東海第二発電所の設計想定レベルより高いことに気が付き、関係者に連絡・検討された。その結果、津波防災マップ情報が活かされて対策が取られ、東海第二発電所の冷却ポンプの稼働の確保につながった貴重な経験があったことを追記する。

### — 参考資料 —

- 1) (仏)ルプレイエ原発、洪水によるバックアップ安全系が故障、ニュークレオニクス・ウィーク日本語版2000.1.6.
- 2) Generic Results and Conclusions of Re-evaluating the Flooding in French and German Nuclear Power Plants, J. M. Mattei, E. Vial, V. Rebour, H. Liemersdorf, M. Turschmann, Eurosafe Forum 2001, published 2001.
- 3) インド、ポンプ建家への海水侵入による Kalpakkam-2 号機の安全停止、INES 事例整理番号：0802-00.
- 4) 原子力発電所における全交流電源喪失事象について、原子力施設事故・故障分析評価検討会 全交流電源喪失事象検討ワーキング・グループ、平成5年6月11日(1993).
- 5) *Regulatory Effectiveness of the Station Blackout Rule*, NUREG-1776, August 2003.
- 6) *Analysis of Long-Term Station Blackout Automatic Depressurization at Peach Bottom Using MELCOR (Version 1.8)*, NUREG/CR-5850, May 1994.
- 7) 岡村信行, “巨大地震と巨大津波の予測”, 学協会会報 No 890(2011-V).
- 8) 西脇由宏, “原子力発電所に対する規制の課題と考察”, 日本原子力学会誌, 51〔8〕, 616(2009).
- 9) IAEA, Integrated Regulatory Review Service (IRRS) to Japan, (6/2008).

### 著者紹介



宮坂靖彦(みやさか・やすひこ)

元日本原子力研究所  
(専門分野/関心分野)原子力施設の廃止措置、低レベル廃棄物の処理処分/原子炉の安全管理、規制

# チェルノブイリ原発事故：初期の混乱から 国際機関のまとめの報告まで

## WHO, IAEA などの10年, 20年のまとめ, および25年目の UNSCEAR 2008

長崎大学 長瀧 重信

災害時に流言蜚語はつきものである。原子力災害も例外ではない。筆者は事故4年後の1990年にソ連邦が外国との交流を開始したときに現地を訪れ、事故後10年目までは、多くの研究プロジェクトに参加し数え切れないほど現地に赴き、10年目、20年目の国際機関のまとめのコンファランスまで出席することができた。健康影響に対して科学的な調査が可能になり、様々な調査の結果が発表されるようになると、それぞれの発表、論文の科学的な信憑性を検討することが大きな仕事になり、自分の主力は国際的な科学的な合意形成に移行した印象がある。初期の流言蜚語の時代からまとめの発表にいたるまでの経験を具体的に紹介し、原子力災害の対応の問題点などを示したい。

### I. チェルノブイリ原発事故との出会い

#### 1. 日本核医学会学術総会 長崎(1987)

1986年に事故が起こり、翌年の87年に筆者は日本核医学会の会長に指名され、長崎市で学術総会を開催することになった。被爆地ではじめての放射性物質を積極的に利用する核医学会なので、原爆被爆、放射線の影響を避けるべきではないと決心し、理事会に不安の声もあったが自分の専門も考え「放射線と甲状腺」"Radiation and the Thyroid"という国際シンポジウムを企画した<sup>1)</sup>。

チェルノブイリ事故に関しては、招待講演者のIAEAにも関係しているヨーロッパの甲状腺専門家 Dr. Gosling は、4月26日の事故発生から5月15日までのヨーロッパに降下したヨウ素-131の量を発表し、このヨウ素-131の降下量から推定するとソ連も含めヨーロッパ全土で成人の甲状腺癌患者が50人増加するが、疫学的に見つけることは不可能であると発表された。当時は子供の甲状腺癌が増加するとは思ってもいなかったので、子供の推定はしていない。

#### 2. 国際的医学学術誌を通じての急性影響の情報 (1986~1990)

原発職員、消防夫、警察官など原発内で大量に被曝し

た急性放射線症の患者についての医学的な正確な報告は、New England J. of Med. などの一流誌を通じて1986年から報告され、1990年までには28名が死亡したことも、その医学的な詳細も発表されていた。アメリカの医師団が共同して治療に当たったことも関連があると推定される。

#### 3. 日本の新聞等による情報(1990)

1990年の夏、日本の報道陣が正式に入国を許可され、チェルノブイリ原発の内部まで見学を許可された。チェルノブイリ原発に関して、日本の報道陣が直接見聞きした情報が洪水のように日本で発表され始めたのがその頃である。健康に関する部分のまとめだけ紹介すると、

- チェルノブイリ事故は世界最大の事故で、数日間にわたって燃え続け、大気中に原爆の何千倍もの放射性物質が放出された。
- 放出された放射性物質はチェルノブイリ周辺のみならず、ヨーロッパ全体、北半球全体を汚染した。食物の輸入制限を厳格にすべきである。
- 事故により原発内で数千人が亡くなり、放出された放射性物質により数万人が亡くなっている。
- 放射性物質のために、白血病が増加したくさんの子供の亡骸が運ばれている、奇形の子供が増加し、人だけではなく動物、植物にも奇形が広がっている。

この当時の情報は、地域の人の経験、印象、例えば自分の身の回り、自分の診療所などの変化と、現地の取材で情報を得た外部の人達の印象が情報の中心となってい

*Accident of Chernobyl Nuclear Power Plant : From Rumors to the Reports of International Organizations* : Shigenobu NAGATAKI.

(2011年 9月31日 受理)

る。災害の情報はこのような状態から始まるのである。

## II. 日ソ二国間での支援協定開始 (1990～1991)

### 1. 流言蜚語の中での支援の模索<sup>1)</sup>

「ソ連チェルノブイリ原子力発電所事故の被害住民への医療協力」を目的としたチェルノブイリ原発事故医療協力調査団(笹川チェルノブイリプロジェクト<sup>2)</sup>)として放射線影響研究所、広島大学、長崎大学、放射線医学総合研究所、東京大学など7名の専門家を含む日本人の一行は、最初にモスクワで90年8月9日にゴルバチョフ時代の大統領府の要人、10日にソ連共産党の要人に歓迎され、ソ連政府としての問題の説明をうけた。

- 急性被曝者は原発職員、消防夫など直接大量の被曝を受けた方々で、急性放射線障害の症状が認められたのは200名程度で、28名が3ヶ月以内に死亡した。この全員の記録は政府として保管し、被曝者は第6病院を中心に経過を観察中である。
- 事故後、原発の清掃から石棺の作成まで働いた在郷軍人を中心とする事故処理作業者は数十万人で、この人たちの被曝線量はかなり高い可能性があり、白血病などの発生が心配である。
- さらに大きな問題は汚染された土地に住む数百万人の住民の健康である。地上に残っている放射性セシウムで調べると、汚染はロシア、ベラルーシ、ウクライナ共和国全体に広がり、特に子供の甲状腺疾患、白血病、遺伝に対する影響を心配している。具体的な対策は、強く汚染された地域の子供たちを交代で汚染されていない地域の保養所に転地療養させている。

政府として真剣で詳細な説明であり、原爆を経験した日本の学者の協力を得たいという強い気持ちが感じられた。

次に高度の汚染地として知られているゴメリ市に冷房の故障している夜行列車で移動し、保健大臣、汚染地の中心にある病院の院長、職員、患者、さらに市内の方達の直接の声を聴くことができた。住民の声は、

- 今までソ連政府が350ミリシーベルトまでは安全であるという言葉信じてきた。
- ところが、最近外国の人たちがきて、我々の自宅の庭まで入り込み、線量計で放射能を計って、ここは危険だから避難しなければいけないという。しかし我々には行くところはない。
- 子供達は、生きていけるのか、いつ白血病になるのか、癌になるのか。子供の将来を考えると心配で気が狂いそうである。
- 我々は何を信じてよいのか分からない。でも原爆の経験のある専門家がきてくれた。自分達を助けてほしい。

というものである。

### 2. 初期の支援 「何をすべきか、何ができるか」

大変な事態であると強く主張し、住民が種々の支援や補償を得ることに協力することは確かに大切である。しかし、大変な事態であると主張するだけでは住民の不安は解消しないし、むしろ不安を助長する。支援として医薬品、生活用品を送っても、親善の人物交流をしても不安はなくなる。 「何をすべきか」については先ほど述べた現地での経験から、医療協力としてはなによりも住民のパニックとも言うべき不安状態に対応することが最重要であると考えた。そのために「何ができるか」としての調査団の結論は、親の前で子供を診察し、少なくとも現在心配すべき病気はないと親に告げることが一番早くこの極端な不安を取り去る方法であると考えた。

そして支援の具体策として、

- 10歳以下の子供を10万人検診する。
  - 内容は、質問表による居住地域などの被曝線量の記録・登録、ホールボディカウンターによる体内被曝線量測定、甲状腺の超音波検査による癌の診断、血液検査による白血病の診断。
  - 必要な機材はすべて巡回バスに積み込み、汚染地域を回ってできるだけ多数の子供を診察する。
- という計画である。

現実には、6か月以内の1991年4月に5台の巡回バスをソ連政府に寄贈し、検診が開始された。

## III. 国際機関の医療協力事業の開始 (1990～1991)

### 1. IAEAの国際諮問委員会(1990～1991)

この国際諮問委員会は、ソ連のゴルバチョフ大統領が正式に国際機関に調査を要請したこと、国際的に最初に結論を含めた報告書を発表した委員会として重要である。また委員会が最初の会合を始めたのが1990年の2月で、IAEAからTechnical Report(報告書)として出版したのが1991年5月であるから、調査自体は長くても1年であるということも特徴である。報告書は600頁で、世界各機関から参加した人の名簿は40頁以上に及ぶ。この委員会のChairmanは放射線影響研究所の重松逸造理事長で、日本からは放射線影響研究所が中心となり、広島大学、長崎大学も参加した。筆者の教室からも参加した。

報告書の健康影響部分を非常に簡単に要約すると、被曝者は、第一に事故当時に被曝し、急性放射線障害の症状を示した数百名の集団、第2に事故処理に従事した数十万人の事故処理作業員、第3に汚染地域に住む数百万の住民に分けられ、それぞれについて調査が必要である。今回の調査では放射線の健康影響は急性放射線障害以外には認められなかった。しかし推定できる被曝線量から考えて、将来健康に影響が出る可能性があるため、十分な追跡調査が必要であるというものである。

チェルノブイリ事故に関する最初の系統的な科学的報

告書であり、現地のパニックを抑えるためにもっとも有効な報告書であった。

## 2. 報告書に対する日本の報道機関の反応

当時の日本の報道機関は報告書に対して、事故の影響を過小評価している、ソ連政府の要請があったのではないか、このような報告書が出ると支援する側の意欲をそいで支援が少なくなることを恐れるという報道に溢れ、報告書を作成したIAEAよりは、重松委員長個人を執拗に非難するテレビの報道、新聞の記事も少なくなかった。支援する側の論理、感情、場合によっては自己満足と、被害者・被曝者の真に求める支援との関係、そして科学的な調査結果との関係は、常に深刻な問題である。

## 3. その他の国際機関

### (1) WHO(世界保健機関)(1991~1996)

調査開始時のプログラム IPHECA (International Programme on the Health Effects of the Chernobyl Accident) の予算の90%は日本政府の出資であり、日本政府の代表はこのプログラムには全く出席されなかったため、日本人の筆者は相当に自由に企画に注文ができ、全体として初期に考えた「何をすべきか」に従い、WHOでも子供を中心に、甲状腺、白血病など原爆で認められた疾患の調査を行うことを企画した。

### (2) ヨーロッパ連合(EU, 1990~1995)

IAEA, WHO また EU にしても専門家は共通している人物が多く、情報は比較的良好に交換されていた。EU の場合は EU として共通した部分もあるが、欧州はソ連と地続きで、フランスは列車を研究室に改造してソ連邦に運び込む、ドイツも陸路で支援物資と支援の人材を運び込む、またロシア語に堪能な人材も豊富で、日本やアメリカの支援とは様相が異なっている。したがって EU の場合は、個別の研究に対して EU として資金援助をしているという印象であった。

## IV. 科学的に正しい調査報告を求めて (1991~1996)

1991年までには国際機関、また2国間のほとんどの医療協力計画が明らかにされ、一斉に調査がスタートした。この時期はそれぞれの立場から様々な調査結果が発表された時代である。したがって、大切なことは様々な発表の科学的な信憑性をいかに証明するかということになる。一斉にスタートした多くの調査計画はそれぞれに定期的に発表会があり、膨大な発表がある。筆者は前述の調査事業の多くの発表会に出席し、多くの調査事業に関与している国際的な専門家と一緒に各発表に対して科学的信憑性の評価についての質問を続け、質問を続ける責任も自覚していたと記憶している。筆者も含めて多くの専門家は、多数の論文を国際的な学術誌に発表し、ま

た査読、編集の経験のある方々で、議論は学術誌の論文採択に似た雰囲気で行われた。

各発表の信憑性に関する議論をすべて紹介する紙数はない。ここでは、自分も関与した小児甲状腺癌を取り上げ、科学的な信憑性について世界の専門家集団が議論し、同意したところ、同意できなかったところ、そして科学的調査結果が社会に発表されるまでの経過を紹介したい。

### 1. 小児甲状腺癌の増加が国際的に認められるまでの経過

#### (1) チェルノブイリ前の経験

前述の1987年の長崎での国際シンポジウムの中でも取り上げたが、マーシャル諸島における原水爆実験、特にビキニ実験では第5福竜丸が被曝したように、避難しないで残っていた島民の多くが放射性降下物を大量に浴び、急性放射線障害を示した島民も少なくない。その放射性物質の種類も原発とは異なり物凄く多様である。この島民の子供に甲状腺癌が多発したことは報告されていたが、原因は外部被曝か、内部被曝か、内部としてもどの放射性物質によるのかは不明である。また小児期に外部被曝としてX線治療を行った子供に甲状腺癌が発生することも報告されていた。

#### (2) 1991年の日ソ専門家会議

この長崎における会議で、ベラルーシ、ミンスク市のデミチック教授が、ソ連以外で初めて小児甲状腺癌が増加していると報告された。ちょうどIAEAの放射線の影響は認められないという報告書がまとまりつつあったこと、多くのチェルノブイリ事故の放射線の影響に関する報告の信憑性が疑われていたこと、癌の組織像が日本の典型的な形と違っていたことなどから、会議として記録が残っているが、大きな話題にはならなかった。

#### (3) 1992年9月のNature誌での論文発表

長崎で発表された内容がさらに積み重ねられ、同じ著者によりNature誌に発表された。支持者はヨーロッパWHO、ケンブリッジ大学教授、ピサ大学教授である。この論文に対する反論は、日本、シカゴ、オックスフォードなどからも投稿され、世界の大きな関心をひいた。

#### (4) 1992年10月のミンスクの甲状腺腫瘍研究所における症例検討会

Nature誌への論文発表の直後にEUとして現地に症例を確認するためのミッションを派遣したいが、メンバーになるように依頼があり、筆者は喜んで参加した。同じ日にアメリカのミッションもミンスクに到着し、EUとアメリカのミッション約20名と一緒に参加した会合となった。アメリカのミッションも甲状腺、また原爆の調査・研究で顔見知りの方ばかりで、EUも同様で本当に自由に科学者として専門家として討論することができた。国際甲状腺学会、核医学会と同じような討論の雰囲気



気は読者にぜひご理解いただきたいところである。

会合はデミチック教授の症例提示から始まった。患者の詳細な病歴、検査成績の紹介、そして患者さんの診察である。多くの症例が手術をされているので摘出した甲状腺の病理標本もある。小児の甲状腺癌は非常に珍しい疾患で、欧米でも日本でも100万人の子供から一年間で一人発症するとされているので、あとからあとから提示される症例は、おそらくミッションの誰もが経験した症例よりも多く、また癌の病理のタイプは遠方に転移しないとされている乳頭癌でありながら、症例の多くで肺に転移があるなど、まさに驚くべき症例提示であった。

この論文発表1ヶ月後の症例提示の会合で、小児甲状腺癌が信じられないほど多数存在することは国際的に確認された。問題は患者が増加したのか、増加の原因がチェルノブイリ原発事故か、放射線の影響かについての意見の一致は得られなかったことである。しかし、十分に意見の交換はでき、今後の研究を目指して帰国した。

#### (5) その後の甲状腺癌調査結果の変遷(1992~1995)

その後の3年間、毎年数回は世界各地で国際機関主催、現地、協力諸機関の主催で小児甲状腺癌の会合が開催された。ある病院(ミンスク、キエフなどの特定病院)で増加したというだけでは疫学ではない、調査した分母が必要である、真剣に調査を始めたから増加したのではないことを示す必要がある、との問題提起に対しては、ベラルーシおよびウクライナでは、全国民の小児の数を分母にして、手術して確認した症例数を分子にして表現し、さらに各年度ごとに症例数を示すことで、調査方法の影響を排除した。その結果、両国では、1990年ごろから急激に増加が始まったことが確認されたが、ロシア共和国では、同じ汚染地域でも甲状腺癌の増加は認められず、その後の議論は、ロシアの結果が中心の話題となった。

1995年12月に10周年目の国際コンファランスをWHOが口火を切って始めたときの打ち合わせで、ロシア共和国は汚染地域で小児甲状腺癌が増加したとはじめて認め、WHOのコンファランスで甲状腺癌に関するKey Note Speakerであった筆者は、小児甲状腺癌は、1990年から、ベラルーシ、ウクライナ、ロシア共和国の汚染地域で増加しており、チェルノブイリ事故が小児甲状腺癌の原因であるというchronological, geographicalなstrong circumstantial evidence(継時的、地域的に強い状況証拠)があると発表した次第である。

## V. 国際機関のまとめ

### 1. 10周年目のまとめ

10周年目には前述の1995年11月のジュネーブのWHOの会議を皮切りに、96年3月にはミンスクでEUの会議、最後に96年4月にウィーンでIAEAの会議が開催された。最後のIAEAの会議は、WHO、EUと共催に

なっているので、ウィーンの会議を中心に述べる。10周年目はまだ意見の集約はできておらず、コンファランスの打ち合わせ、あるいは発表中に様々な意見の出る感じもあった。しかし、甲状腺に関しては、同じメンバーが3回もあっているのに、壇上には、EU(ケンブリッジ大学教授)、アメリカ(コーネル大学教授)、日本(筆者)、ロシア(放射線研究所長)、ベラルーシ(Natureの著者)が並んで、Circumstantial evidenceがあるとして、小児甲状腺癌の増加を発表した。議論の内容も含めてコンファランスのまとめは翌年IAEAから出版された<sup>3)</sup>。

全体のまとめは各論に分けて議論されているので、筆者が関連したところをまとめると、

- 被曝者は、前回のIAEAの報告と同じく、事故当時の原発内の被曝者、清掃作業従事者、周辺住民に分けられる。
- 急性影響としては134名が急性放射線症を示し、そのうち38名が死亡した。
- 周辺住民の影響としては、800人の小児甲状腺癌が認められているが、そのほかには健康影響は認められないというものである。

すでに述べた甲状腺癌の増加の確認と同じように、様々な部門での専門家の真剣な議論は行われたと信じているが、それにも関わらず、甲状腺疾患以外には有意な疾患の増加は認められなかったことは十分に認識すべきことである。

### 2. 20年目のまとめ

10年目と大きく異なるところは、個人ごとの発表ではなく、すでに発表された論文の評価とまとめであることである。100名を越す各国からの委員が一緒に作成した報告書(Chernobyl Forum<sup>4)</sup>)が健康影響に関してはWHOの160頁のまとめとして事前に意見を求めて各国に配布され、数回にわたる訂正を経て2005年のウィーンの会議となった。会議は出版記念会のような印象で、2名の発表者が、癌疾患と非癌疾患をまとめて発表した。さらに、本当の20周年の2006年4月26日をはさむキエフの会議では、開会式の場所でIAEAの一人の演者によって発表され、その後の発表は記念式典としての挨拶が主なものであった。そして開会式の最後は、大統領夫人の肝いりのオペラのアラカルト的な素晴らしい紹介で終了した。

10年目に比べて報告に加わったのは

- 被曝者の人数と推定被曝線量が発表された。あくまで推定の目安ではあるが、原発内は前回同様、清掃作業者は24万人で100 mSv、住民は11.6万人の33 mSv被曝の強制疎開者、27万人の50 mSv被曝の高度汚染地の住民、500万人の10~20 mSv被曝の低汚染地域の住民に分類された。
- 甲状腺癌が4,000人以上に増加した以外に疾患の増

加はないと改めて報告された。その後の症例の動きから、現在は小児甲状腺癌の発症は増加していない。チェルノブイリ事故前と同じである。すなわち、事故後に生まれた子供には甲状腺癌の増加はない。事故当時の子供は現在では子供ではない。

- 数百万人の精神的影響のため自立できない人がいることは、公衆衛生上のもっとも大きな問題である。
- 今後、チェルノブイリ事故のため癌で死亡するのは4,000人である。

### 3. 25年目の UNSCEAR のまとめ<sup>5)</sup>

20周年と違うところを示す。

- まとめから人数と被曝線量がきえた(各論には記載してある)
- 甲状腺癌は汚染された牛乳を制限なく飲用した子供に認められ、6,000人が手術され、15人が亡くなっている。
- しかし、清掃作業従事者、住民ともに、甲状腺癌以外に健康影響を示すエビデンスはない。
- 精神的影響は、放射線の影響ではないとまとめからは外されている。
- 今後の癌死亡の予測の4,000人という数の根拠は、ICRPの指摘のように疫学的に正しいとは言えないと結論し、まとめからは削除されている。

## VI. チェルノブイリの教訓

最初に数千人が原発内で亡くなり、周辺の住民では数万人が亡くなったという新聞記事に比べて、国際機関によるまとめの報告では被害は大きく異なっている。しかしながら、健康障害は最初に心配したよりははるかに少ないとはいえ、政治的にはソ連邦は崩壊して消滅し、経済的な破滅により住民は塗炭の苦しみを味わった。しかも精神的影響のため、自立できずに補償に頼って生きている方達の精神的トラウマは、それぞれの「個人の被曝したという体験」であると報告されている。原子力災害は対応の仕方によっては、まさに国を滅ぼすものであるとの教訓は忘れてはならないことである。

## VII. まとめ

流言蜚語の時代から科学的な健康影響の調査を模索し、発表された調査結果の信憑性を議論したうえで、国際機関による科学的に認められた事実のまとめを社会に

報告する経過を述べた。災害の混乱の中から適切に災害に対応するために、この報告書は重要な役割を果たすことが期待される。しかしながら科学的に認められない範囲で忘れてならないのは、人間の知恵である。人間の持つ政治、社会、経済、倫理、心理的な判断力を駆使し、とくに被爆者、被害者の放射線の影響と、放射線を防護するための影響のバランスを考慮し、心身ともに健全な生活を維持するように支援することが対応の中心となるべきである。

一方、科学者としては、国際的な同意は現在の科学的知識の要約に過ぎないことを自覚し、不確実、不明の部分を実確な科学的知識にするための努力を忘れてはならない。原爆の研究、チェルノブイリの研究はまだ終わっていない、福島は今から研究が始まるのである。

### — 参考資料 —

- 1) Radiation and the Thyroid. Proceedings of the 7th Annual Meeting of the Japanese Nuclear Medicine Society, Nagasaki, Japan, 1987; S. Nagasaki ed., *Excerpta Medica*, Amsterdam-Princeton-Hong-Kong-Tokyo-Sydney, (1989).
- 2) チェルノブイリ原発事故医療協力調査団報告書, 1990年8月, チェルノブイリ原発事故医療協力調査団編修, (財) 笹川記念保健協力財団発行, (財) 日本船舶振興会協力.
- 3) International Atomic Energy Agency, One decade after Chernobyl : Summing up the consequences of the accident. International Conference in Vienna, 8-12, April 1996.
- 4) B. Bennett, M. Repacholi, Z. Carr (eds), *Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes*, Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Health", WHO, Geneva, (2006).
- 5) UNSCEAR 2008 Report Vol. II Effects of Ionizing Radiation, Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident.

### 著者紹介



長瀧重信(ながたき・しげのぶ)

長崎大学

(専門分野)内科, 内分泌, 甲状腺, 糖尿病, 核医学, リウマチ, 被曝医療

# チェルノブイリ新シェルター建設の現状

原子力安全研究協会 武田 充司

今年「チェルノブイリ事故から25年」ということで、地元ウクライナだけでなく世界各地で、あらためてこの事故を振り返り、その教訓を風化させまいと、様々な企画が考えられているが、その矢先の3月11日に、我々は未曾有の巨大な地震とそれに伴う津波に見舞われ、それによって福島第一原子力発電所の事故が起り、にわかにチェルノブイリ事故のその後への関心が高まった。一方、チェルノブイリでは、世界各国の資金援助によって進められてきた新シェルター建設プロジェクトが、いよいよ最終段階を迎え、巨大な石棺を覆う新シェルターの建設工事が開始されたので、その建設状況を紹介します。

## I. 概要

筆者は既に本誌の2008年2月号において、「チェルノブイリ新シェルター・プロジェクトの概要」と題して、本プロジェクトの歴史と概要を紹介したが<sup>1)</sup>、本稿では、その続編として、その後の新シェルター・プロジェクトの進展状況を紹介しますが、説明の重複を避けるので、必要に応じて上記の解説を参照してもらいたい。

石棺を覆う新シェルターの詳細設計と建設工事は一体として、2007年9月、フランスの企業を中心とする共同企業体 NOVARKA に発注された。NOVARKA によって進められた詳細設計は、いくつかのパッケージ (package) に分けられ、工程管理上重要なパッケージから順次完成して、PMU (Project Management Unit) の評価にまわされている。PMU は、内容を精査して必要があれば NOVARKA に修正を求めるなどの調整を行ったあと、ウクライナの規制当局に提出して許認可の審査を受けている。建設工事を進める上で、早期に必要なもの、例えば、新シェルター (NSC) を構成する鋼材の発注は早期になさなければならないため、それを確定するために必要な NSC の詳細設計のパッケージは早い段階で規制当局に提出され、認可を得ている。現段階で、重要なパッケージの詳細設計のほとんどは完成し、ウクライナの規制当局から許認可を得ているが、一部は、いまだ規制当局との議論が続いている。

新シェルター (NSC) 建設に必要な鋼材は約29,000トンで、本年 (2011年) 4月に発注され、今秋から鋼材の加工が開始されて、来春には加工された鋼材の第一陣がサイトに到着してアーチの組立てが開始される。

筆者は本年7月に、キエフで IAG (International

*Construction of New Safe Confinement in Chernobyl*:  
Atsushi TAKEDA.

(2011年 9月28日 受理)

Advisory Group) 会合が開かれた機会に、石棺の西側空地に準備されている新シェルター組立て用サイトの状況を見ることができた。石棺の南北両側に新シェルターを保持するレールが敷かれ、新シェルターはそのレールの西側延長上の空地で組み立てられ、完成後にレール上を東に移動して石棺を覆う位置に固定されることになる。現時点では、完成した新シェルターを組立て位置から所定の位置に移動するのは2015年夏とされている。NSC は高さ110 m、長さ164 m、幅257 mの蒲葺型の鉄骨アーチ構造物である (第1図)。ここで示した数値や工程の年月は、文献1) および今年9月の学会の予稿<sup>2)</sup> に示した値と少し違っているが、上記の値は最新の資料<sup>3)</sup> からとった。

## II. 最終段階を迎えたプロジェクト

シェルター実施計画 (SIP: Shelter Implementation Plan) は1997年12月に開始されたが、その時に設定された「必要とされる予算額」は約\$760 M (M=10<sup>6</sup>以下同じ) とされ、プロジェクト開始から終了までの期間は約8年



第1図 NSCの組立て現場の想定図

半と想定されていた<sup>4)</sup>。その後、著しい工程の遅延と費用の増加があったが、プロジェクトの途中では、将来の見通しが不確実であったことから、最終的な費用総額を推定することが困難であった。しかし、最近になって、ようやくプロジェクト完了の見通しがついたことから、最終的に必要な費用の総額が詳細に算定できるようになった。その結果、昨年秋の抛出国総会で、SIP完了までに必要な総額が欧州復興開発銀行(EBRD)から提示された。正確な金額は公表されていないが、筆者の推測では、約€1,500 Mを少し越える額となったようだ。プロジェクトが発足した当時と現在の為替レートの違いがあるため、正確な評価はできないが、当初850億円程度と見積もられた費用総額は、最終的に、2倍近くになったと考えてよいだろう。この金額は、石棺の安定化工事などを含めたSIPの総額であって、新シェルター(NSC)本体の建設費は全体の40%以下と思われる。また、プロジェクト完了は2015年10月とされているので、1997年12月から起算して、ほぼ18年を費やし、本プロジェクトは当初予定の2倍以上の期間を要したことになる。

チェルノブイリ事故から25年の節目にあたる今年の4月、ウクライナの首都キエフにおいて資金抛出国総会が開かれ、プロジェクト完了までに必要な経費の不足分の抛出について議論され、基本的な合意が得られた。これによって新シェルター建設工事は、ひとまず、資金の枯渇による工事の中断という最悪の事態を回避して、完成へ向けて着実な歩みを進めることが可能になった。

### Ⅲ. 詳細設計における諸問題

新シェルターの詳細設計を進めていくなかで様々な技術的問題に遭遇しているが、重要と思われる幾つかの問題を取りあげて以下に説明してみたい。

#### 1. アニュラス部の空調

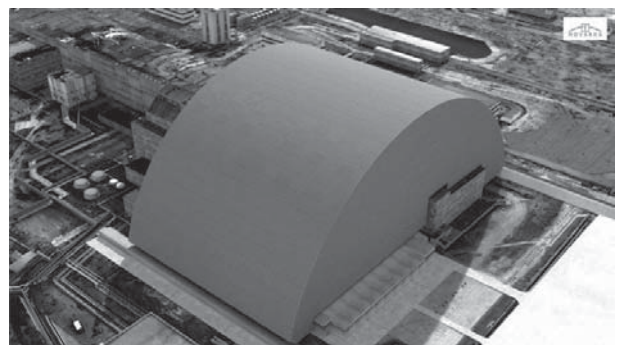
新シェルター(NSC)は鉄骨構造アーチ部分の外側と内側にそれぞれ外皮と内張りを施し、その間にできるアニュラス(annulus)部分を僅かに加圧してアーチ内の汚染した空気が外部環境へ漏れるのを防ぐ設計になっている。ここでまず問題となったのが、外皮と内張りの材料である。十分な耐火性があるが、しかも、100年間の使用に耐えられる軽量な外装材(クラディング)を探すことであった。しかし、最も重要な問題はアニュラス空間における結露の防止である。新シェルターの寿命100年を実現するためには、鉄骨が結露によって腐食することを避けなければならない。巨大なアニュラス部は南側と北側では季節や気象条件によって、大きな温度差が生じるだろうから、全空間で常に結露を避けるようにすることは容易ではない。空調と湿分制御の組合せのほかに、鉄骨にコーティングすることも含めて、総合的な対策が検討されている。

#### 2. アーチ両端の構造

新シェルターの東端は3号機との境界までであるから、アーチの東端は切欠きのある垂直の壁で、切欠き部分から3号機側の既存構造物が突出することになる。また、西側も4号機の原子炉建屋から大きく西にはみ出しているタービン建屋の一部が切欠き部分から西に突出する。したがって、東西両端ともに、新シェルターの垂直壁は切欠き部分において既存の構造物と接して、その接続部は気密性が保たなければならない。新シェルターは石棺に負荷をかけない設計を基本としているので、東西両端の壁の切欠き部分に対応して、既存構造物の強固な部分から新たな壁を立ち上げ、新シェルターの上から垂れてくる垂直壁と接合させる構造がとられている。こうすることによって、新シェルター両端の垂直壁は上下でしっかりと固定され、しかも、石棺にはほとんど荷重がかからないようにすることができる(第2図)。

しかし、下から立ち上がっている構造壁と上から垂れている新シェルターの鉄骨の壁の相対変位を許容するために、接合部分には大きなギャップを設け、そのギャップをフレキシブルなコルゲート・タイプの2重の膜によって接合する。そこで問題となるのは、この膜の強度や寿命である。新シェルターにかかる最も過酷な荷重は竜巻によるものであるが、その場合にも膜の気密性が維持される必要がある。当初、こうした過酷な災害時には、膜の気密性が損なわれることを想定し、その場合の外部環境への放射性物質の流出を評価することを試みた。しかし、適切な膜材料の選択と大きな相対変位を吸収できるような接合部の構造を工夫することによって、竜巻襲来時にも機密性が保持されるようにした。

一方、新たに下から立ち上げる壁の構築は、厳しい放射線下での作業となるため、建設工事費の最小化ばかりにとらわれているわけには行かず、マン・シーベルトの評価と合わせた費用の最小化をはかる必要があり、どこにどのような壁を立ち上げるかが大きな問題となった。こうした場合にも、チェルノブイリの現場では、石棺内部の線量や構造物の状態などのデータが詳細に集められているので、そうしたデータの蓄積が幾つかの設計オプションの定量的な比較評価を可能にしている。



第2図 完成したNSCに覆われた石棺の想定図

### 3. 石棺の部分的解体と廃棄物処理施設

新シェルター完成後には、可及的速やかに石棺の不安定部分を解体撤去することになっている。撤去の対象として検討されている部分は、破壊された原子炉建屋の上部を覆う屋根とそれを支持している鋼製ビームなどである。この部分は石棺の屋根の一部を形成しているが、事故後、残存した両側の壁を利用して、長い鋼製ビームを2本渡し、その2本のビームの間に鋼製のパイプを隙間なく並べ、さらにその上に薄い鋼板を置いて屋根としたものである。こうした部分は、事故後、原子炉建屋の周囲に配置された大型クレーンを用いて部材を所定の位置に置くという方法で作られたもので、本誌の2008年2月号に筆者が書いた解説記事<sup>1)</sup>に述べたように、それぞれの部材は固定されていない。2本のビームを支える両端の壁も事故時に損傷しているため、経年劣化によって、ビームの支持が不安定になり、その上に乗っているパイプを並べた屋根にも隙間が生じ、雨漏りが激しくなっていた。こうした状況を考慮して、新シェルター建設工事に先立って、ビームを支持している端部の補強工事など、幾つかの安定化工事が行われた。しかし、これらの安定化工事は、新シェルター完成までに部分崩壊などの事故が起きないように、15年程度の短寿命を想定して実施されたものである。したがって、新シェルター完成後には、安定化工事で寿命延長した不安定部分は早急に解体撤去することが望ましい。

現在、どの部分をどのようにして撤去するかの手順が検討されているが、撤去作業には、新シェルター内に設置された大小2組の天井走行クレーンが利用される。撤去される部材の中には長尺のものもあるので、新シェルターの外に搬出する前に、適当な長さに切断するなどの簡単な事後処理も必要となる。こうした作業も考慮して、新シェルター内部には適当な広さの床面と空間が存在するように設計されている。撤去作業から出てきた大きな鋼材片などの放射性廃棄物を直ちに新シェルター外へ搬出して処理処分するためには、外部にそうした放射性廃棄物処分施設が必要となるのだが、そうした施設をこの時点で用意することは現実的でないため、新シェルター内で一時保管することが検討されている。

その一方で、新シェルター組立て場として使用されている石棺西側の土地は、新シェルター完成後は空地となるので、将来の石棺完全解体撤去時に搬出される膨大な放射性廃棄物の処理を行う廃棄物処理施設がそこに建設されることになっていて、基本構想は既に示されている。しかし、こうした施設が必要となるのはだいぶ先のことであるから、建設を急がず十分に時間をかけて準備することになっている。

そこで問題となったのは、不安定部分の撤去から出てくる鋼材などの廃棄物すべてを新シェルター内部に一時保管するだけの十分なスペース確保の問題であった。さ

らには、保管スペースが確保されたとしても、そうした廃棄物が新シェルター内に長期にわたって置かれていることが、新シェルターの運用にどのような影響を与えるか検討されるべきだとの意見もあった。しかし、もともと新シェルター内にあった部分を解体撤去して同じ新シェルター内の別の場所に保管することがそれほど問題となるとは考えにくい。それによって新シェルター内の作業環境や作業空間が部分的に損なわれる可能性がある。そこで、撤去される不安定部分は、炉心のデブリ(debris)などに比べて汚染が軽微であるから、簡易な除染施設を建設して、新シェルター外に搬出したかどうかという中間案が浮上した。しかし、これは将来の本格的な廃棄物処理施設の建設を考えると、二重投資になる危険があり、総費用は増加する可能性がある。現在、こうした様々な観点から、不安定部分の早期撤去と廃棄物処理施設との関係をどう調整するか、検討が進められている。

なお、新シェルターが完成して、石棺が完全に外界から隔離されると、石棺は現在よりずっと乾燥してダストが立ち易くなることが懸念される。そうしたときに不安定部分の撤去作業が行われれば、たとえダスト・サプレッション剤を活用するにしても、作業環境が一時的に悪化する恐れがある。新シェルターの内部空間の空調や排気ファンの容量と排気フィルタの設計は、こうした点も考慮しなければならない。しかし、そうした設備に過大な要求をすれば建設費の増大につながるため、作業環境が悪化した場合は作業の中止や作業員の退避などといった管理面を含めた総合的対策が検討されている。

## IV. 建設現場の状況

今年7月、ウクライナのキエフにおいてIAG会合が開かれたが、そのとき、参加したIAGメンバー全員がチェルノブイリの新シェルター建設現場を視察した。筆者もIAGメンバーのひとりとして現場を見ることができたので、建設現場の現状について簡単に説明する。

新シェルター組立て現場は石棺西側の空地である。石棺から最も遠い地域が新シェルターのアーチ組立て場として使われ、セグメントに分割して組み立てられたアーチは、東側のエリアのレール上で順次接続される。したがって、アーチの組立て場と石棺の間には、完成した新シェルターが入るだけの空間が残されている。完成した新シェルターは、その位置からレール上を東に移動して石棺を覆う位置で固定されることになる。

準備工事は土地の除染と整地から始められた。そのあと、昨年(2010年)9月から、作業に必要なクレーンの設置などが開始され、引き続いて、石棺の南北両側において、新シェルターを乗せるレールの基礎工事が始められた。汚染土の排出をできるだけ少なくするため、および、事故後の作業で土中に汚染物質が埋設されたこともある



第3図 NSC支持レールの基礎工事(2011年7月12日撮影)

ので、深く掘削してそうした物質を掘り当てる危険も考慮して、基礎工事の掘削土量を最小限度に抑える設計が採用されている。基礎工事は、まず、所定の位置に約400本の鋼管パイルを打ち込み、そのパイル上にレールを載せる鉄筋コンクリート製の基礎を構築するという段取りになっている(第3図)。

工事現場は、コンクリート壁とその上に張られた有刺鉄線で囲まれ、途中に大物搬入口として大きな扉が設けられている。我々は、まずホールボディ・カウンタにかかり、そのあと完全に着替えて、二重に手袋をし、防塵マスクを装着して構内に入った。アーチ組立て場付近のレール基礎エリアで、鋼管パイルの打込みが盛んに行われていたが、既に全体の3分の1以上の鋼管パイルの打込みが終了していた。土埃が立つのを抑えるためか、所々に散水したあとが見られた。現場から退去すると、入構時とは逆の順序で脱衣し、シャワーを浴び、最後に再びホールボディ・カウンタにかかった。当然のことながら、この程度の立ち入りでは、汚染や被ばくの心配は全くなかった。

## V. 補足

このプロジェクトに当初から関与している筆者が、その間に感じたこと学んだことを書いてみたい。

最も顕著な問題は、西側のやり方で進められてきたプロジェクトとウクライナの規制当局の許認可ルールとの摩擦であった。この問題は当初から十分に認識されていたから、ウクライナ規制当局との調整は頻繁に行われてきたが、それでも多くの問題が深刻化し、設計の見直しとそれによる工程の遅延、費用の増加などが繰り返されてきた。プロジェクトが進んで、双方が苦い経験を蓄積するにつれて、次第に事態は改善され、近時はほとんど問題がなくなっている。このプロジェクトが当初の予想

より、費用の面でも工期の面でも、2倍あるいはそれ以上になっているのは、ほとんどこうした困難に由来している。もちろん、技術的にみて、誰も経験したことのない問題を扱っているのも、多くの手戻りや追加工事などがあったことは認めざるを得ない。しかし、本プロジェクトの予想外の費用増加や工程の遅延を、そのままこうした仕事に付きまとう不確実さだと考えることは間違っている。

本プロジェクトの上記のような特殊性は別にして、筆者は多くの有益な教訓を得た。そのひとつが、石棺内部に張り巡らされたモニタリング・システムである。それによって、石棺内部のほとんどの箇所の状態変化が監視され、長年にわたってデータが蓄積されてきた。それらのデータを活用して必要な解析などが行われたため、石棺の安定化工事が効率的に実施されたのだと思う。新シェルターが完成しても、こうしたモニタリング・システムは生かされ、いっそう充実した監視とデータ蓄積がされていく。

石棺の老朽化によって多くの隙間が生じ、そこから石棺内部への雨水の流入が続いているが、石棺の底(原子炉建屋の地下室)に溜まる水は漏洩して地下水脈に流れ込む恐れがあるため、石棺内部の水量バランスには常に注意が払われてきた。この問題に対しても、石棺内部から蒸発や空気の呼吸によって外部へ排出される水量の解析などを通して、石棺内部に溜まっている水量を評価するなど、データの収集と解析とを織り交ぜた方法によって、実態把握に懸命な努力がなされている。

本プロジェクトから多くの教訓を得たが、心配なことは、国際支援で実施されているSIPはここで終了し、石棺の完全撤去は次の世代へ残されることである。

### —参考資料—

- 1) 武田充司, “チェルノブイリ新シェルター・プロジェクトの概要”, 日本原子力学会誌, 50〔2〕, 87(2008).
- 2) 武田充司, 日本原子力学会「2011年秋の大会」予稿集 (ISBN 978-4-89047-152-2), TN 14.
- 3) EBRD 発行, “Chernobyl 25 years on”, 2011年4月.
- 4) EBRD 発行, “Shelter Implementation Plan”, 2000年2月.

### 著者紹介



武田充司(たけだ・あつし)  
原子力安全研究協会。欧州復興開発銀行  
チェルノブイリ新シェルター・プロジェクト  
国際顧問団メンバー

## 解説

# 原子炉施設の確率論的リスク評価の動向と今後への期待

## 1. 確率論的リスク評価手法の特徴と課題

原子力安全基盤機構 山下 正弘

原子炉施設の安全確保において確率論的リスク評価(PRA)が重要な役割を担っている。しかし、PRAは、これまで必ずしも効果的な活用がなされてきておらず、このことは福島第一原子力発電所の事故に対する日本国政府報告書においても指摘されている。日本原子力学会標準委員会リスク専門部会においては、PRA手法を中心とした標準(実施基準)の整備を行うとともに、PRAの活用の基本的考え方の検討を進めている。同専門部会の活動を踏まえて、本稿を含めて3回の連載を通して原子炉施設のPRAの動向と今後への期待を述べる。第1回はPRAの活用と関連付けてPRA手法の特徴と課題をとりあげ、これらを受けて、第2回はPRAの品質(技術的妥当性)を確保する上で重要な役割を果たすPRA実施基準の整備動向を紹介し、最終の第3回にPRAの積極的かつ迅速な活用を目指した今後への期待を述べる。

### I. PRA手法の開発と活用

#### 1. 原子炉施設の安全確保とPRAの役割

原子炉施設の安全を確保するためには、内部に存在する放射性物質による潜在的リスクを顕在化させないことが必要である。このため、原子炉施設においては、まず、異常の発生を防止する対策を講じる。その上であえて異常の発生を想定して異常の拡大を防止する対策を講じる。その上であえて異常の拡大を想定し、その影響を低減する対策を講じる。このように、安全確保策を講じるに際して、幾重にも前段否定を繰り返して、安全確保に高度の信頼性ないし確実性を確保することを深層防護という(第1図)。

深層防護の概念が原子炉施設の安全確保に適切に適用されていることを確認するために、例えば、設計基準事象として、想定される数多くの異常・事象の進展性を考慮して、公衆に対する影響が最も厳しくなると考えられる少数の代表シーケンスを選定し、保守的仮定を用いて評価を行い、十分な安全余裕をもって判断基準に適合していることを確認する。

こうしたアプローチにおいては、原子炉施設のリスクがどの程度まで抑制されているのか、安全上の重要度に

焦点を当てた改善策が適切に選択されているか、安全確保への影響度合に応じた不確かさへの対応がなされているかなど、科学的合理的な判断を行うための定量的情報が極めて重要である。

原子炉施設のPRAにおいては、ランダム故障、運転員の誤操作などの内的事象および地震、津波などの外的事象を引き金として、緩和系統の多重故障が重畳することで炉心損傷および格納容器破損に至る可能性がある事故シーケンスを体系的・網羅的に抽出して、それらの発生頻度を評価し、さらに周辺公衆が受ける健康影響、環境影響などのリスクを評価する。ここで、リスクとは、「望ましくない事象の発生確率とその事象による被害の大きさとの積和」と定義される。PRAでは、発生しうる様々な事故シナリオ、それらの発生頻度および被害の大きさから構成される3重項群を評価する。

このため、PRAからは、原子炉施設によるリスクの大きさ、系統・機器などのリスクへの寄与、リスクの不

	運転状態	深層防護レベル	目的	必須手段
事故発生防止	通常運転	第1層	異常運転および故障の防止	保守的設計および建設・運転における高い品質
	予期される運転時の事象	第2層	異常運転の制御および故障の検出	制御、制限および防護系、ならびにその他のサーベランス特性
	設計基準事故および複合した運転時の事象	第3層	設計基準内への事故の制御	工学的安全施設および事故時手順
事故影響緩和	シビアアクシデント	第4層	事故の進展防止およびシビアアクシデントの影響緩和	補完的手段および格納容器の防護を含めたアクシデントマネジメント
	シビアアクシデント後の状況	第5層	放射性物質の放出による放射線影響の緩和	サイト外の緊急時対応

第1図 深層防護の各層の目的と必須手段<sup>1)</sup>

*Current Status and Future Expectation concerning Probabilistic Risk Assessment of NPPs; 1. Features and Issues of Probabilistic Risk Assessment Methodology: Masahiro YAMASHITA.*

(2011年 11月21日 受理)

確実さの大きさとその要因などの様々な定量的情報が得られる。これらの定量的情報を活用することによって、原子炉施設の安全確保水準の確認、安全確保への影響度合に応じた不確実さへの対応、実効的な設計・運転管理の改善策の策定、シビアアクシデント(SA)対策の策定などが可能になる。

福島第一原子力発電所の事故(以下、「福島事故」という)に対する6月の日本国政府報告書においては、「原子力発電施設のリスク低減の取組みを体系的に検討する上で、これまで確率論的安全評価(PSA)が必ずしも効果的に活用されてこなかった。」とし、大規模な津波のような稀有な事象の定量的リスク評価手法が確立されておらず、より大きな不確実さを伴うが、そのような不確実さを明示することで信頼性を高める努力が不十分であったことを指摘した<sup>2)</sup>。現在、規制行政庁はPRAの活用を前提に法令、基準等の改正案の検討に着手しており、日本原子力学会は津波PRAの実施基準の作成を進めている。さらに、PRAを活用したSA対策を含む安全向上策を構築する計画である<sup>3,4)</sup>。

原子炉施設の安全確保策を効果的かつ効率的なものとする上で、PRAに期待される役割は大きいといえる。

## 2. PRA手法の開発と活用の経緯

米国において、1960年代から、原子炉施設を対象としたPRA手法の開発が進められ、1975年10月に公表された「原子炉安全研究(WASH-1400)」において、その骨格がほぼ確立された<sup>5)</sup>。原子炉安全研究において、TMI事故(1979年3月)の類似事象が取り扱われていたことから、PRAが注目され、多くの国々においてPRAが原子炉施設の安全性を総合的に評価する手段として多用されることとなった。

1990年代初頭に米国原子力規制委員会(NRC)は、「シビアアクシデントのリスク：米国の原子力発電所5基の評価(NUREG-1150)」を公表した<sup>6)</sup>。この研究はリスクの概念を安全管理に使用するという点で著しい転換をもたらすとともに、ここで開発された方法はその後のPRA技術の貴重な基礎となっている。当初、PRAの活用の多くは、原子炉施設の脆弱性の抽出にあったが、この時期には、原子力産業界は、安全上重要なリスク低減活動に重点的に資源を配分すべきとして、定量的リスクに基づく規制を導入すべきであるとの提言を行っている。

1995年、米国NRCは、原子力規制におけるPRA活用に関する政策声明書<sup>7)</sup>とそれを実現するためのPRA実施計画を公表した。引き続いて、PRA活用の試験的適用研究として、保守規則、技術仕様書の変更、供用期間中検査の見直しなどの個別課題の検討を進め、それらの経験を踏まえて、PRA活用の際の規制指針(例、レギュラトリーガイド1.174~1.178)の作成を行い、リスク情報を活用した規制の枠組みを整えた。

一方、チェルノブイリ事故を経験した欧州諸国は、

IAEA, OECD/NEAなどの場を通じて、SAの発生防止・影響緩和のために、設備改造、事故時の運転手順の整備などの対策を、最新のPRA技術を共有して実施するようになった。IAEAおよびOECD/NEAもPRAの実施とその活用に熱心であり、特に、IAEAは定量的な安全目標および性能目標の設定を図るとともに、国際安全基準においてはPRAに基づくSA対策を求めている<sup>8,9)</sup>。

我が国においては、1980~1990年代にかけて、代表炉のPRAの実施を含めて、事故シーケンス解析手法、PRAに用いるデータベース、SA現象解析コードなどの整備が進められた。1992年には、原子力安全委員会が、電気事業者に対して、個別炉のPRAの実施とそれに基づくアクシデントマネジメント(AM)の整備を強く推奨したことから、PRAの実適用が推進されることとなった<sup>10)</sup>。

2003年、原子力安全委員会はリスク情報を活用した原子力安全規制の導入の基本方針を発行した。これを受けて、2005年、原子力安全・保安院は原子力安全規制へのリスク情報活用の基本的考え方と当面の実実施計画を策定して、PRAを段階的に活用していく旨を公表した<sup>11,12)</sup>。2006年には、原子炉施設の安全規制へのリスク情報活用の基本ガイドライン(試行版)とPRAの技術的妥当性を定めた品質ガイドライン(試行版)を公表した<sup>13,14)</sup>。この間、原子力安全委員会によって、安全目標案(2003年)およびこれに対応する原子炉施設の性能目標案(2006年)が発行されている。

個別分野においてもPRAが徐々に活用され、耐震設計審査指針の改定に伴う残余のリスクの評価への地震PRAの活用、新検査制度における保全プログラムや安全重要度評価へのPRAの活用などが進められた<sup>15)</sup>。これらに連動して日本原子力学会を初めとした学協会によって、PRA実施基準の整備が進められてきた<sup>16)</sup>。

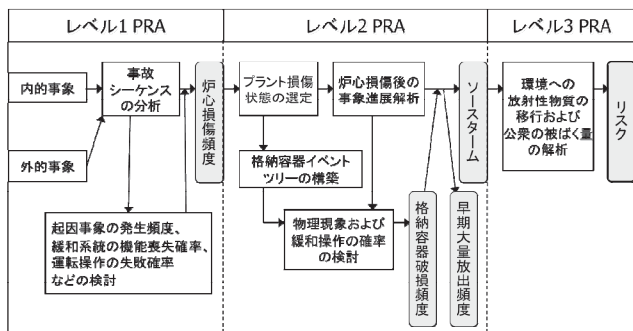
2011年10月、原子力安全委員会は、福島事故を受けて、地震、津波などの外的要因を含めたSA対策を図ること、その安全評価ではPRAと決定論的評価を併用することなど、SA対策の新たな枠組みを示している<sup>1)</sup>。

## II. PRA手法の概要とその特徴

### 1. PRA手法の概要

原子炉施設のPRAは、評価対象とするリスク指標に応じて、レベル1~3PRAに分類される。レベル1PRAでは、炉心損傷に至る事故シーケンスを定量化することによって炉心損傷頻度を評価する。レベル2PRAでは、格納容器機能喪失に伴う放射性物質の環境への放出頻度とソースターム(環境に放出される放射性物質の種類、性状、放出量、放出時期、放出期間および放出エネルギー)を評価する。レベル3PRAでは、ソースタームに基づいて、健康影響リスクを含めた敷地外への影響を評価す





第2図 原子炉施設のPRAの評価対象による分類

る(第2図)。なお、格納容器機能喪失頻度を評価するまでをレベル1.5 PRAと呼ぶこともある。

一方、事故シーケンスの引き金となる事象は、原子炉施設の内部で発生する原因による場合と外部で発生する原因による場合があり、どちらを取り扱うかに応じて、内的事象 PRA と外的事象 PRA に分類される。また、評価対象とする原子炉施設の状態に応じて、出力運転時 PRA と停止時 PRA に分類される。低出力運転時は出力運転時に含めて評価することが多いが、低出力運転時と停止時を一括して取り扱うこともある。

内的事象 PRA では、機器のランダム故障、人的過誤などの内的事象を原因として、過渡変化、原子炉冷却材喪失事故(LOCA)などの起因事象が発生した後に、炉心損傷の防止機能(原子炉の停止機能、炉心の冷却機能および格納容器除熱機能)を有する緩和系統が機能喪失して炉心損傷に至る事故シーケンスを抽出する。事故シーケンスを体系的かつ網羅的に抽出するために、通常、イベントツリーを用いる(第3図)。

事故シーケンスは、起因事象と緩和系統の機能喪失の組合せから構成される。したがって、起因事象の発生頻度、機器故障確率、人的過誤確率、緩和系統の機能喪失確率などを用いて、炉心損傷に至る事故シーケンスの発生頻度を定量化する。起因事象の発生頻度、機器のランダム故障確率などには実績値を使用する。緩和系統を構成する設備・機器の故障、人的過誤などをフォールトツリーにモデル化して定量化することで、緩和系統の機能

喪失確率を評価する。その際に、系統間従属性、機器間従属性(共通原因故障)、事故前・事故後の人的過誤などを組み込む。

外的事象 PRA では、地震、津波、火災などの外的事象を対象にして、事象の大きさと発生頻度の関係を定量的に評価する。例えば、地震事象を対象とする場合には、サイトの解放基盤における地震動加速度と年超過確率の関係を定量的に評価する。次に、外的事象によって発生する過渡変化、LOCA などの起因事象を特定して、起因事象が発生する条件付確率を定量的に評価する。起因事象に対して、炉心損傷の防止機能を有する緩和系統を構成する設備・機器などの損傷確率を評価する。これらをフォールトツリーおよびイベントツリーに組み込んで定量化することによって、炉心損傷に至る事故シーケンスの発生頻度を評価する。例えば、地震 PRA では、サイトの解放基盤における地震動加速度に対して、設備・機器などの設置位置での加速度とそれによる損傷確率を評価して、これらをフォールトツリーおよびイベントツリーに組み込んで炉心損傷に至る事故シーケンスの発生頻度を評価する。

炉心損傷以降の段階に対しては、格納容器内物理現象の解析、格納容器破損頻度の評価、ソースタームの評価および環境への影響の評価を行うが、これらの多くは、内的事象 PRA と外的事象 PRA とで共通して適用できる。ただし、例えば、地震、津波などの影響による AM 対応の困難さ、複数基立地サイトにおけるユニット間の従属性など、外的事象に固有の側面には十分留意する必要がある。

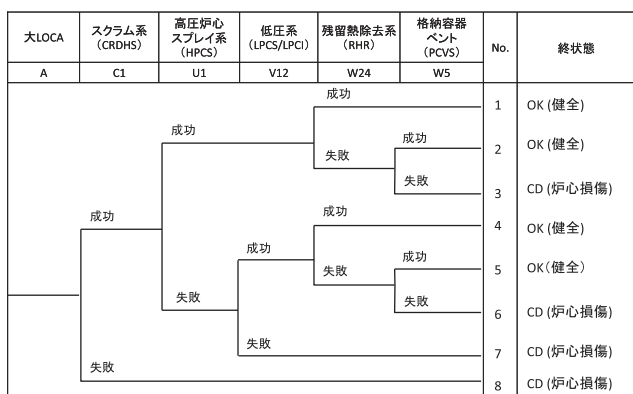
2. PRA 手法の特徴

本節では、PRA 手法の特徴を明らかにするとともに、PRA 手法における課題を明確にするために、得られる情報の特長を活かした PRA 活用の方向性についても概括する。なお、PRA 活用の方向性は第3部に詳述される予定である。

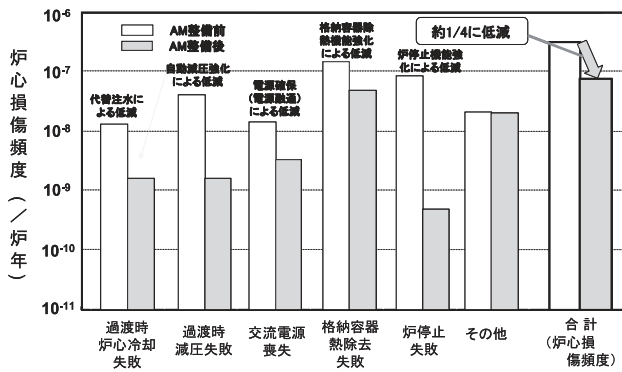
(1) リスクの体系的・網羅的な把握

PRA は、理論的に考え得るすべての事故シーケンスを対象として、起因事象の発生頻度、発生した事象の拡大を防止し影響を緩和する系統、機器などの機能喪失確率、事象の進展とその影響を定量的に分析・評価することによって、事故シーケンスの発生頻度と影響の大きさ、それらの積和(リスク)を評価する。このため、PRA によって、深層防護に基づく多段的な安全確保策を有する原子炉施設が、内的事象および外的事象を含めた広範なハザードに対して、どの程度の安全性を有しているかを総合的に判断することができる。

特に、PRA は事象の進展が広範・多岐にわたる SA の発生防止・影響緩和の諸対策の効果を総合的に評価する上で有効である。1992年、原子力安全委員会が SA 対策としての AM 策の自主的整備を強く奨励したことを



第3図 イベントツリーの概念図



第4図 AM策の有効性評価(沸騰水型軽水炉の例)

受け、電気事業者は、既設52基の原子炉施設を対象に、出力運転時内的事象PRAを用いてAM策の整備と有効性確認を実施した。PRAの結果によれば、AM策によって、内的事象に起因する炉心損傷頻度および格納容器破損頻度が低減していることが分かる(第4図)。

2006年9月改訂の耐震設計審査指針においては、基準地震動Ssを上回る強さの地震動が生起する可能性は否定できないとし、基本設計段階のみならず、それ以降の段階も含めて、残余のリスクの存在を十分認識しつつ、それを合理的に実行可能な限り小さくするための努力が払われるべきであるとされた。

ここで、残余のリスクとは「策定された地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぶことにより、施設に重大な損傷事象が発生すること、施設から大量の放射性物質が放散される事象が発生すること、あるいはそれらの結果として周辺公衆に対して放射線被ばくによる災害を及ぼすことのリスク」をいう。

耐震設計審査指針の改定を受けて、原子力安全・保安院は、全国の原子力施設に対して残余のリスクの評価を行うことを事業者に求めている。残余のリスクの評価手法としてはPRAが実効的である。

また、原子力安全委員会によるSA対策の新たな枠組みによれば、特に、設計上の想定を超える外的要因(巨大な地震、津波など)に対して、全交流電源喪失、最終ヒートシンク喪失などを含めて、SAの発生防止および影響緩和のための安全確保策が強化される。この中には、自然現象の発生確率など、不確かさが大きい領域、発生確率はごく低いが発生した場合の影響が大きい事象などが含まれるが、専門家による工学的判断も用いて確率論的および決定論的評価から得られる情報をリスクの低減に活用する必要があるとしている<sup>4)</sup>。

地震、津波、これらの複合事象などの外的事象PRAを実施することによって、安全目標(案)への適合を確認するとともに、リスクに支配的な寄与因子、事故シーケンスなどを把握できるため、効果的な設備改善、事故時手順の整備などが可能となる。

(2) グレーディッドアプローチの支援

PRAにおいては、安全確保策を構成する設備・機器

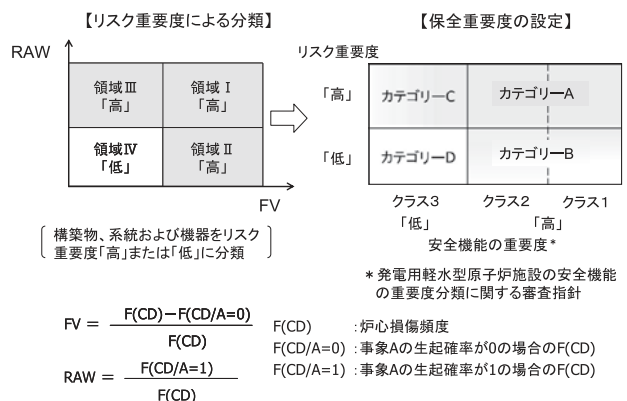
の機能喪失確率、人的操作の過誤の可能性などをモデルに組み込んで、原子炉施設のリスクを定量的に評価するため、個々の設備・機器、人的操作などのリスク重要度を評価することができる。リスク重要度指標としては、リスク増加価値(RAW), リスク低減価値(RRW), ファッセルベズリー指標(FV)などがある。RAWは、設備・機器などが故障状態にある場合に、リスクがどの程度増加するかを定量的に表す。RRWは、設備・機器などが故障することがないとした場合に、リスクがどの程度低減するかを定量的に表す。また、FVは、設備・機器の故障がリスクにどの程度寄与しているかを表す指標であり、 $FV=1-1/RRW$  の関係にある。

これらのリスク重要度は、例えば、リスク指標に炉心損傷頻度を用いる場合には、事故シーケンスを構成する緩和系統、設備・機器などの故障確率を0または1と変更した場合に、事故シーケンスの発生頻度の総和(炉心損傷頻度)が受ける変化分から評価できる。

リスク重要度指標を用いることによって、原子炉施設の安全上重要な設備・機器、人的操作などを特定して優先順位を付けることができる。このため、安全上の重要度に応じて要求を厳格にするグレーディッドアプローチに定量的根拠が与えられる。

2009年1月に施行された新検査制度においては、原子炉施設ごとの保守管理活動を保全計画の策定などを通じて充実強化させるとともに、原子炉施設ごとの特性に応じたきめ細かい検査に移行していくことを旨としている。このため、保全計画の策定に用いる系統、機器などの保全重要度を設定する際に、例えば、安全機能の重要度が低い場合にもリスク重要度が高い場合には保全重要度を高く設定するなど、PRAの結果が活用されている(第5図)。さらに、検査結果の安全重要度評価においては、検査時指摘事項等がリスクに及ぼす影響が加味されている。

ちなみに、原子力安全委員会の重要度分類審査指針の解説においては、「運転管理段階において、各構築物、系統および機器に係る保全・運転管理の具体的な対策や要件などを決める際には、本指針に示された安全機能の



第5図 リスク重要度を加味した保全重要度の設定

重要度を維持しつつ、運転経験や確率論的安全評価(PSA)の結果などのリスク情報を活用することが適切である。」としている。

### (3) 実効的な安全向上策の特定

PRAにおいては、設備・機器、人的操作などがフォールトツリーおよびイベントツリーに明示的にモデル化されているため、設備・機器の構成の変更、保安規定に定める許容待機除外時間などの変更、人的操作の変更などを行った場合に、原子炉施設のリスクがどのように変化するかを感度解析によって定量的に評価することができる。

例えば、設備、機器などの許容待機除外時間(AOT)を変更した場合のリスクへの影響を定量的に評価できるため、AOTをどの程度の期間とすべきかの判断材料を与えることができる。このほか、大破断LOCA時に配管から剥離した保温材により非常用炉心冷却系のストレーナが閉塞する可能性があるという懸念に対して、電気事業者の恒久対策実施までの暫定対策の妥当性を検討する際に、PRAを用いてリスクへの影響を評価して判断材料の1つとした事例もある。

### (4) 不確かさの影響の定量的な把握

PRAにおいては、不確かさを偶然的な不確かさと認識論的不確かさに分類し、認識論的不確かさをパラメータの不確かさ、モデルの不確かさおよび完全性の不確かさに分類する。偶然的な不確かさは、物理現象や機器の性能、人間の能力などに伴うばらつきに由来するもので、リスクの由来そのものであって、不確かさをそれ以上減じることにはできない。完全性の不確かさには、認識できるものと認識できないものがある。

不確かさの要因のほとんどはPRA独自のものではなく、決定論的手法においては保守的な条件を課すことなどによって対処してきた。PRAにおいては、不確かさに対して、不確かさ要因を特定して、結果に及ぼす影響を体系的かつ定量的に評価できるので、こうした定量的情報を用いて不確かさを考慮した意思決定を行うことができる。

起回事象の発生頻度、機器故障率/損傷確率、人的過誤確率、共通原因故障確率などのパラメータは不確かさを有するため、これらを確率分布で表し、モンテカルロ法により、これらの不確かさがPRAの結果に与える影響を体系的・定量的に評価することができる。モデルの不確かさに対して、意思決定とPRAモデルの関係を理解した上で、主要なモデルの不確かさの原因と仮定を整理して、代替モデルなどを用いた感度解析を行うことで、PRAの結果に与える不確かさ要因の重要性を把握することができる。完全性の不確かさに対しては、例えば、保守的解析(バウンディング解析)により、その影響の上限を定量的に把握することができる。

## Ⅲ. PRA手法における課題

### 1. PRAの評価対象範囲の拡大

原子炉施設のリスクを体系的・網羅的に評価するためには、リスクへの影響が有意である内的事象および外的事象のすべてに対して、出力運転時および停止時のPRA手法が整備されていることが重要である。考えられるすべてのハザードに対して、リスクへの影響を定性的・定量的に考察して、今後整備すべきPRA手法を特定して、それらの開発を進めていく必要がある。

現在、内的事象出力運転時および停止時PRA、地震PRA、PRA用パラメータ推定などの手法が整備されており、津波PRAおよび溢水PRAの手法の整備がPRA実施基準の策定に並行して進められている。これらの整備を促進するとともに、火災PRA手法の整備や、複合事象(地震と津波の複合、地震と溢水の複合など)、火山活動などの自然現象のPRA手法の整備など、PRAの評価対象範囲の拡大を目指した取組みが必要である。

### 2. PRA手法の高度化

策定済みのPRA手法に対して、最新の技術的知見を反映させるべく、継続的に改善する活動が必要である。

工学的判断値に代わるモデルの開発(起回事象のモデル化など)、知識レベルに係る依存性(SOKC: State Of Knowledge Correlation)の考慮、地震、津波などのPRAモデルにおける複数ユニット間の従属性の取扱い、高度の信頼性を有する受動型機器の取扱い、設備・機器の故障/損傷における経年変化の考慮、保守管理などの取扱いの変更による機器の信頼性への影響などがある。デジタル機器の信頼性評価では、機器故障率データベース、ソフトウェア信頼性解析モデルなどの開発がある。

経年変化が設備・機器の故障/損傷確率に及ぼす影響を考慮したモデルの開発は、テーマとして取り上げられてはいるが、十分な取組みがなされていない。例えば、設備・機器の信頼性の時間依存性の解析モデルへの取込みは比較的容易であるが、データベースの策定が困難であることが原因の1つである。これらについては、予防保全による構成部品の交換、余裕を持った設計などによる対策がとられていることを考慮した上で、当面は、PRAの結果に伴う不確かさを評価する中で考慮する仕組みが必要である。

PRA用パラメータ推定の実施基準の策定を踏まえて、機器故障率の整備など、データベースの整備が進められている。今後、共通原因故障確率、デジタル機器の故障率、供用除外時間などのパラメータに加えて、地震、津波、火災などの外的事象PRAに用いる設備・機器の耐力などについてもデータベースを充実させていく必要がある。

### 3. PRAの品質の確保

PRAを活用する場合に、PRA手法、パラメータなど

の技術的妥当性(PRAの品質)を確保するために、PRAの品質に要求される事項を明確化する必要がある。なお、これらは第2部で詳述される予定である。

これまでに、PRAの品質ガイドライン(試行版)が策定され、これを踏まえて、日本原子力学会において内的事象PRA、地震PRAなどのPRA実施基準が整備されてきた。津波PRAおよび溢水PRAの実施基準が策定中であり、火災PRA実施基準の策定など、PRA実施基準の対象範囲を拡大していくとともに、PRA実施基準の技術評価・是認(エンドース)に向けた取組みを進めていく必要がある。

実機的设计・運転管理へのモデルの忠実性など、PRA実施基準に準拠してPRAの品質を確保する上で、該当する専門家によるピアレビューが重要である。これについて、日本原子力技術協会が「PSAピアレビューガイドライン」を策定済みであり、日本原子力学会において、実施基準の策定を含めて、ピアレビューの位置づけを明確にしていく必要がある。

#### 4. 不確かさの取扱い

不確かさがPRAの結果に及ぼす影響を定量的に把握できるというPRAの特徴を実効的にするための方法やガイドラインの策定が必要である。PRAからは、最終的なリスクの評価値、系統・機器などのリスクへの寄与に関する情報に加えて、それらの不確かさに関する情報が得られる。これらを分析して、リスクに関する知見を高めて、意思決定に活用する方法論が必要である。ちなみに、米国NRCは、PRAにおける不確かさの特定と定義、PRAの結果に与える不確かさを理解するための不確かさ解析、不確かさ解析結果の意思決定への取込みなどのガイドラインを充実させている<sup>17)</sup>。

#### 5. 定量的な判断基準

事故によるリスクの抑制水準である安全目標(案)「施設敷地境界付近の公衆個人の平均急性死亡リスクが $10^{-6}$ /年・サイト程度、施設からある範囲の距離にある公衆個人の平均がん死亡リスクが $10^{-6}$ /年・サイト程度」が策定されている。さらに、安全目標(案)を満足するための原子炉施設を対象とした性能目標(案)「炉心損傷頻度： $10^{-4}$ /年程度、格納容器機能喪失頻度： $10^{-5}$ /年程度(両方が同時に満足されること)」が策定されている。安全目標や性能目標は、(案)の段階であるが、健康影響に加えて環境影響を指標に組み込むかを含めて検討した上で確定することが望まれる。

#### —参考資料—

- 1) INSAG-10, Defence in Depth in Nuclear Safety, IAEA, 1996.
- 2) 原子力災害対策本部, 原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力

発電所の事故について, Ⅷ章, 平成23年6月.

- 3) 原子力災害対策本部, 国際原子力機関に対する日本国政府の追加報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について(第2報), Ⅵ章, 平成23年9月.
- 4) 原子力安全委員会, 発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策について, 平成23年10月20日.
- 5) USNRC, Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, NUREG-75/014(WASH-1400), Oct. 1975.
- 6) USNRC, Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants—Final Summary Report, NUREG-1150, Dec. 1990/Jan. 1991.
- 7) 60 FR 42622, Use of Probabilistic Risk Assessment Methods in Nuclear Activities: Final Policy Statement, Washington, DC, Aug. 1995.
- 8) INSAG-12, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, 75-INSAG-3Rev. 1, IAEA, 1999.
- 9) DS 414, Draft Safety Requirements: Safety of Nuclear Power Plants: Design, Revision of NS-R-1, 10 Aug. 2011.
- 10) 原子力安全委員会, 発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネジメントについて, 平成4年5月28日.
- 11) 原子力安全・保安院, 原子力安全規制への「リスク情報」活用の基本的考え方, 平成17年5月31日.
- 12) 原子力安全・保安院/原子力安全基盤機構, 原子力安全規制への「リスク情報」活用の当面の実施計画, 平成17年5月31日.
- 13) 原子力安全・保安院, 原子力発電所の安全規制における「リスク情報」活用の基本ガイドライン(試行版), 平成18年4月.
- 14) 原子力安全・保安院/原子力安全基盤機構, 原子力発電所における確率論的安全評価(PSA)の品質ガイドライン(試行版), 平成18年4月.
- 15) 原子力安全・保安院, 保全プログラムを基礎とする検査の導入について, 平成20年8月.
- 16) 日本原子力学会標準委員会リスク専門部会の活動  
<http://www.aesj.or.jp/sc/committees.html>
- 17) USNRC, Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision Making—Main Report, NUREG-1855, Vol.1, Mar. 2009.

#### 著者紹介



山下正弘(やました・まさひろ)  
原子力安全基盤機構  
(専門分野)原子炉施設の安全、確率論的リスク評価

## 解説

## 核不拡散から見たウラン濃縮および使用済燃料取扱いに関する最近の注目すべき国際動向

日本原子力研究開発機構<sup>1)</sup> 久野 祐輔<sup>1)2)</sup>, 山村 司<sup>1)</sup>  
東京大学<sup>2)</sup>

福島第一原子力発電所の事故により原子力発電利用の国際動向には不透明さが見受けられるものの、今後、安全性強化により、これまでの原子力利用政策を維持しようとする国、そして新たに原子力発電を導入しようとする国は、依然多数に上るものと思われる。このような中、平和利用における核不拡散への取り組みとして、ウラン濃縮、再処理といった機微技術の拡散を防止するために様々な取り組みが行われてきた。これらには、濃縮ウラン燃料の供給を保証するなど受領国側のニーズを満たすことにより、機微技術の取得のインセンティブを減らすようなアプローチ、供給国側から供給に際し不拡散の条件付けを行うというアプローチがある。本稿では、両者のアプローチに関する、最近の注目すべき動きについて解説するとともに、今後期待される展開について考察する。なお、福島原発事故で顕在化した使用済燃料貯蔵の問題に関する国際的な対応について併せて議論する。

## I. はじめに

福島第一原子力発電所事故(以下、「福島原発事故」)以来、原子力災害は、天災だけでなく、テロ行為によっても起り得るとの懸念から、原子力の安全と共に核セキュリティの強化の重要性がクローズアップされている<sup>1)</sup>。世界的に共通の課題である使用済燃料の取扱いについても、安全・核セキュリティ両面から、その貯蔵のあり方について改めて議論を呼ぶ状況にある。一方で、福島原発事故にかかわらず、アラブ首長国連邦(UAE)、ヨルダン、ベトナムなどに見られるように、近い将来、原子力発電を導入する国は増加することも十分予測される。したがって、新興国による原子力導入に際しての安全・核セキュリティの担保とともに、原子力発電の拡大が濃縮、再処理という核不拡散上、機微な技術の無用な拡散につながらないようにすることが今後の課題となる。

後者に関し、これまでは、国際原子力エネルギー・パートナーシップ(GNEP)に見られたように、現状で機微技術を保有しない国が将来にわたっても持たないことを担保する枠組み作りが主流であった。しかし、こうした構想は、核兵器不拡散条約(NPT)第4条で認められた「原子力平和利用の権利」を侵害するものであるとの非同盟運動諸国(NAM)等の反発を呼ぶことになり、最近では

むしろ、濃縮、再処理を追求するインセンティブを少なくしようとするアプローチや、濃縮・再処理の移転(輸出)に関し、未保有国への移転を一律に制限するのではなく、ある基準(クライテリア)を設定することで対処しようとするアプローチなど、受領国による自律的な意思決定や透明性、客観性、平等性を重視した核拡散防止策に移行する傾向にある。

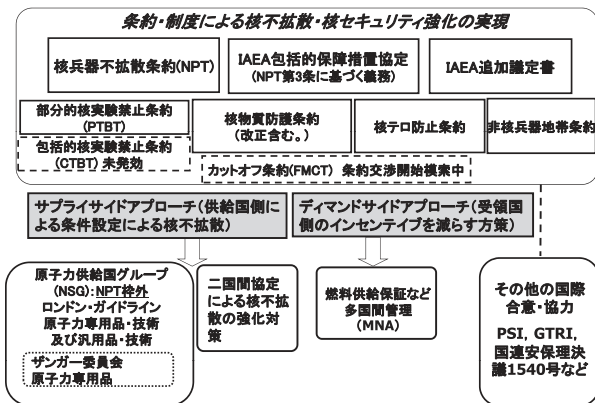
本稿では、この6月に合意された原子力供給国グループ(NSG)での濃縮・再処理の輸出に係る新基準、および最近IAEAにおいて加盟国により合意された、濃縮ウランの供給保証システムの構築といった、2つの歴史的なイベントに注目し、受領国側のインセンティブを減ずるという面からのアプローチ(「ダイヤモンドサイドアプローチ」と呼ぶ)と、供給国側による規制強化のアプローチ(「サプライサイドアプローチ」と呼ぶ)の両者の視点から、機微技術の取扱いにおける最近の国際動向について解説する。また、使用済燃料の貯蔵問題も含め、今後のダイヤモンド側のニーズに対し、原子力先進国を中心とした供給国はどのように具体的に対応していくべきかについて考察する。第1図に上記アプローチを含む、国際的な核不拡散アプローチの概要を示す。

## II. ディアモンドサイドアプローチ

新たな国による原子力発電の導入の動きが濃縮、再処理技術の拡散につながりかねないという懸念を背景に、2003年頃から、燃料供給保証や核燃料サイクルの多国間管理に関し、各国やシンクタンク等から多くの提案がな

Recent Notable Progresses on Nuclear Non-proliferation about Uranium Enrichment and Spent Fuel Treatment : Yusuke KUNO, Tsukasa YAMAMURA.

(2011年 8月24日 受理)



第1図 核不拡散に係る国際的な取組み

されてきた。燃料供給保証とは、政治的な理由により核燃料供給の途絶が起き、通常の核燃料市場の機能では対応できないような場合に備え、代替の燃料供給が受け入れられるシステムを事前に整備しておくことで、原子力発電を実施する国が、エネルギー安全保障の観点から自前の濃縮、再処理を追求する要因をなくすことを意図したものである。

当初、供給国は、米国のブッシュ政権が提唱した GNEP のように、燃料供給保証メカニズムを通じた供給を受けることができる要件として、受領国が濃縮、再処理を放棄することを求めるというアプローチをとっていた。しかしながら、こうしたアプローチが受領国側の激しい反発を招いたことから、燃料供給保証メカニズムを整備しておくことにより、燃料供給途絶に対する受領国の懸念を緩和し、その結果、受領国が自発的に濃縮、再処理を行わないことを期待するというアプローチに変わった。

新燃料の供給というフロントエンドだけでなく、使用済燃料の管理や処理処分というバックエンドについても供給国が受領国以外でのサービスを提供するという構想も検討されているが、実現には至っていない。

2009年来、本燃料供給保証については、以下の1～2節のケースの運用で国際的な合意に至ったことは特記すべきことと考える。以下、これら及びバックエンドの多国間管理構想についての最近の動向について述べる。

### 1. ロシア・アンガルスクにおける低濃縮ウランの備蓄

2009年11月のIAEA理事会において、ロシア・アンガルスクの国際ウラン濃縮センター(IUEC)に120トンの低濃縮ウラン備蓄を創設するためのロシアとIAEAの協定案および燃料供給途絶が起こった場合にIAEAと受領国との間で締結されることになる燃料供給のための協定のモデルとなる協定案が承認された。2010年12月1日、ロシアは低濃縮ウランの備蓄が完了したことを発表し、12月17日には、IAEAによる最初の査察および開所式が行われた。これにより、最初の燃料バンクの運用が

開始されたことになる。

### 2. IAEA 燃料バンク

上記ロシアのケースとは別に、2010年12月、IAEA理事会は、IAEAが低濃縮ウランの備蓄(1,000 MWのPWR 1炉心分に相当する低濃縮ウラン)を構築することを認める決議を採択した。IAEAによる燃料バンクの構想は、2006年に米国のシンクタンクである核脅威イニシアティブ(NTI)が提案したことに端を発するものであり、(1)IAEAが2006年9月から2年以内に備蓄創設に必要な行動をとること(その後、2011年9月まで1年ずつ延長)、(2)他の加盟国等から1億ドル、あるいは1億ドル相当の濃縮ウランの拠出があることを条件に、NTIが5,000万ドルを拠出することを約束したものである。(2)については、これまでに米国、ノルウェー、UAE、欧州連合、クウェートが拠出を表明したことで、2009年3月に満たされ、上記IAEA決議により(1)も満たされたことになる。本年5月、IAEA理事会は燃料バンクのホスト国の募集を開始したが、カザフスタンがホスト国となることに関心を示している。

### 3. バックエンドに関する構想

燃料供給保証メカニズムの発動を必要とする燃料供給の途絶は、実際に起こり得るとしても稀であると考えられることから、こうした燃料供給保証のメカニズムが、濃縮の拡散防止にどれだけ実効性を有するかは疑問であるとの見方がある。

これに対し、バックエンドにおける多国間管理構想が実現すれば、以下に述べるように、原子力発電国が再処理を追求しないことを促す、より強力なインセンティブとして働く可能性がある。使用済燃料の貯蔵・処理・処分をいかに進めるかは原子力発電国全てが直面する課題であるが、スウェーデン、フィンランドを除いて自国での使用済燃料の対処策は決っていない。我が国では、全国の原子炉内の貯蔵プールの7割がすでに使用済燃料で埋まっているが、同様の傾向は、韓国や台湾なども含め、他の原子力発電国にも見られる。この問題への対応策として、供給国による使用済燃料の引取り、あるいは、国際的、地域的な使用済燃料貯蔵施設の設置という構想が実現すれば、原子炉内での使用済燃料の蓄積の懸念を取り除くという点において原子力発電の推進に寄与するとともに、それぞれの発電国による再処理のリスクをなくす(使用済燃料を送り出すことで再処理しようとするインセンティブをなくす)点で核不拡散上のメリットも大きいと考えられる。ヤッカマウンテン処分場に代わる米国のバックエンド政策を検討中の「米国の原子力の将来に関する専門委員会(Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future)<sup>2)</sup>」が2011年7月に発表した中間報告では、国内における最終処分施設の立地プロセ

スを進めつつ、当面の方策としての中間貯蔵を限定された施設で集中的に実施することの重要性が強調されているが、国際的な側面に関しては、長期的な方策として、米国自身による使用済燃料の引取りの可能性や多国間の産業規模での核燃料サイクル施設への支援など、米国が国際的核不拡散取組みに指導的役割を果たすべきとの趣旨が述べられている。ただし、自国の使用済燃料処分場の立地が進んでいない状況の中で、供給国による他の国の使用済燃料の引取りの実現には、国内世論の反対という高いハードルをクリアする必要があると思われる。

使用済燃料の国際貯蔵については、過去にも構想の検討が行われたが<sup>3)</sup>、実現には至っていない。福島原発事故により使用済燃料プールにおける貯蔵が安全、核セキュリティ上の課題として指摘されていることから<sup>4)</sup>、今後、現状の湿式貯蔵から原子炉サイトでの乾式貯蔵、そしてオフサイトでの集中貯蔵への移行が加速していくことが考えられるが、いくつかの小国の国情を考えれば、さらに進んで、個々の国における貯蔵から、地域的な中間貯蔵の議論へと発展していく可能性も無視できない。

### Ⅲ. サプライサイドアプローチ

供給国側(サプライサイド)による核不拡散に係るアプローチについても、最近、注目すべき動きが見られる。以下、関連する国際動向について述べる。

#### 1. 米国とアラブ首長国連邦(UAE)との間の原子力協力協定

2009年5月21日、米国とUAEは二国間原子力協力協定に署名し、同協定は同年12月17日に発効した。米国がこれまで他の非核兵器国と締結してきた原子力協力協定とは異なり、UAEは国内に機微な原子力施設(濃縮、再処理、重水製造、プルトニウムを含む燃料製造)を保有せず、当該活動を行わないことを法的拘束力のある誓約として規定している点に最大の特徴がある。オバマ政権の一部や米国議会には、このUAEとの協定を「ゴールドスタンダード」と位置付け、他の国との協定にも同様の条項を含めるよう求めるべきとの考え方があるが、政権内でコンセンサスを得るに至っていない。

UAEは濃縮、再処理を行わない旨を国内法で規定している点以外の非核兵器国とは異なる。濃縮、再処理をオプションとして残しておきたいと考える国が、それらを放棄する内容を含む協定を締結することは考えにくく、この点において米UAE原子力協力協定のアプローチの他の国への適用(普遍化)には限界があるのではないかと考える。

#### 2. NSGにおける濃縮、再処理技術の移転に関する条件についての合意

2011年6月23、24日にオランダのノールドヴェイク

にて開催された原子力供給国グループ(NSG)の総会において、濃縮・再処理のための施設、設備、技術の移転に関する規制の強化、明確化を目的とするガイドラインの改正が合意された<sup>5)</sup>。これらの品目の移転の規制強化については2004年以来、NSGで議論が行われてきたが、7年かけて合意に達したことになる。改正前のガイドラインにおいては、機微な施設、技術、資材の移転については「自制」すること、これらを移転する場合には、当該施設や受入れ先の施設を多国間管理の下に置くことが望ましいとの考え方が示されるにとどまっておき、米国のブッシュ大統領は2004年に、濃縮、再処理施設を既に保有する国以外の国へのこれら設備、技術の移転を禁止することを提案した。このブッシュ大統領の提案は他のほとんどのNSG参加国の支持を得ることができず、2008年になって、米国は、フランス等が主張した、ガイドラインで定められたクライテリアを満たした国に対してのみ、濃縮・再処理品目の移転を認める、いわゆるクライテリアベーストアプローチを容認する方向で妥協した。その後のNSGでの議論は、個々のクライテリア(当時クリーンテキストと呼ばれた)の中身の議論に移ったが、NPT第4条の原子力平和利用の権利に含まれる濃縮、再処理に関する技術の移転を受けるのに追加的な要件を課せられることなどによる反発から合意を得るのに時間を要した。

今回の合意は、個々のクライテリアの内容も含めてNSG参加国のコンセンサスが得られたことを意味する。これにより、NSGガイドラインには、すべての原子力資機材、技術の移転にあたって受領国に求められる要件と、濃縮・再処理品目の移転にあたって受領国に求められるクライテリアの両方が含まれることになり、後者の移転にあたっては、原子炉等、一般の原子力資機材、技術の移転に較べて厳しいクライテリアが課されることとなる。

本クライテリアには、NPTへの加盟、保障措置協定に対する違反がないこと、国連安保理決議第1540号の要求通りの輸出管理を実施していることなど、核不拡散上の要件のほかに、原子力安全およびセキュリティ上の要件(国際安全基準を遵守、最新の国際指針に基づく物理的防護基準を適用)も含まれている。保障措置に関して、追加議定書の発効がクライテリアの一つとして要求されるか否かが焦点となったが、結果的に、追加議定書を発効させていない国に対しても移転を許容する余地を残すものとなった。また、既存の技術による濃縮施設、設備の移転は、受領国が濃縮技術にアクセスすることを認めない、いわゆるブラックボックス方式で行うべきことが記載された。

今回の合意は、濃縮、再処理関連機材、技術の移転に関して、原子炉等、一般の原子力資機材、技術の移転に較べて高いハードルを設定する点において、核不拡散を

強化する措置である。ただ、見方を変えれば、次のように捉えることもできる。これまで「自制」という曖昧な文言により、ガイドライン上は、機微技術移転に関する否定的な見解を示しつつも、移転を行うか否かの判断は各供給国の裁量に委ねられてきた。これに較べ、今回の改定では、濃縮、再処理の実施に際し要求される事項を、初めて国際社会(供給国グループ)が、クライテリアとして具体的に示した点において、NPT 第4条の権利を認めることも含め、機微技術の移転にあたっての透明性、客観性をより高める措置であるともいえよう。また、当初のブッシュ大統領の提案のように未保有国への移転を一律に否定するのではなく、クライテリアを満たせば、機微技術の移転を受けられる可能性を示す点において、平等性を有する措置であるとも言える。

#### IV. 今後期待される展開

ダイヤモンドサイドアプローチでは、上述のようにIAEAのリードによる国際供給保証が現実化しつつあるが、現状の比較的安定した濃縮ウラン市場からみれば、今回合意された供給保証システムによる効果が見られるまでには時間を要する。むしろ、問題視される使用済燃料の取扱いについて、原子力発電を実施する国すべてが個別に処理をする必要性をなくす方策について、国際的に議論することが重要ではないかと考える。MIT報告<sup>6)</sup>に示されるように、現在、再処理のニーズは、我が国を含む一部の国を除いて、世界的にはあまり高くない。使用済燃料の取扱いについては、上述のように、当面、集中貯蔵という管理オプションに重きを置くという方向性<sup>3)</sup>が目を引くが、この場合、今後発生する使用済燃料の量、小国における貯蔵の困難さ、本稿で述べたような核不拡散・核セキュリティ上の理由など考慮すれば、核兵器国等供給国による引き取りが難航するなか、国際的な対応、すなわち地域的な枠組み等による国際貯蔵管理などを考える時期に至っているのではないと思われる。同時に、次世代に大きな廃棄物負荷を残さないためにも、国際貯蔵と並行して、枠組み内で、環境負荷低減の点でもメリットを有する確かな再処理の実現を目指し、国際プロジェクトなどとして取り組んでいくべきと思われる。

サプライサイドアプローチは核不拡散上重要な手段ではあるが、米-UAE二国間協定の例に示されるような核不拡散措置は、特定の国に対して有効に働くものの、権利の放棄を求めるようなアプローチの普遍化は非常に困難であることはこれまでの歴史が物語っている。一方、今回のNSGのアプローチでは、透明性、客観性、

平等性を有する形でのウラン濃縮や再処理に係る核不拡散提案を示した。

今後、原子力先進国を中心とした供給国としては、上述の濃縮ウラン供給保証や使用済燃料の貯蔵・処理・処分などダイヤモンド側のニーズに対し、平等性を原点に、多国間管理等、有効な方法の具体的な実現に向け、積極的議論を進めていくことが期待される。さらに、福島原発事故を契機に、原子力利用における安全や核セキュリティへの一層の配慮が、先進国のみならず新興国共通の課題とされるなか、上述の核不拡散から発する多国間アプローチという概念を、安全、核セキュリティに係る基準などの共有化にも拡張できれば、原子力における3S(核不拡散/保障措置、原子力安全、核セキュリティ)の一層の強化にも繋がるものと期待する。

#### — 参考資料 —

- 1) Mostly getting nuclear safety at the IAEA—but missing nuclear security, Matthew Bunn, June 21, 2011.  
<http://www.powerandpolicy.com/2011/06/21/mostly-getting-nuclear-safety-at-the-iaea-%E2%80%93-but-missing-nuclear-security/>
- 2) Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future Draft Report to the Secretary of Energy, July 29, 2011.
- 3) Interim Storage of Spent Nuclear Fuel, A Safe, Flexible and Cost-Effective Near-Term Approach to Spent Fuel Management, M. Bunn *et al.*, June 2001  
<http://belfercenter.ksg.harvard.edu/files/spentfuel.pdf>
- 4) Nuclear Governance after Fukushima, Sharon Squassoni, June 2011.  
[http://csis.org/files/publication/110610\\_Squassoni\\_GlobalForecast2011.pdf](http://csis.org/files/publication/110610_Squassoni_GlobalForecast2011.pdf)
- 5) INFCIRC/254/Rev.10/Part 1 a, 26 July 2011.
- 6) MIT Study on the future of the nuclear fuel cycle, May 2011.

#### 著者紹介



久野 祐輔(くの・ゆうすけ)  
日本原子力研究開発機構、東京大学  
(専門分野/関心分野)核不拡散、核拡散抵抗性保障措置、保障措置分析透明性



山村 司(やまむら・つかさ)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)核不拡散政策



## 報告

## クリーンアップ分科会の活動

「原子力安全」調査専門委員会  
クリーンアップ分科会 井上 正, 藤田玲子

9月19日に北九州国際会議場で開催された日本原子力学会「2011年秋の大会」の「原子力安全」調査専門委員会—福島事故特別シンポジウム—で報告した福島環境修復のために実施しているクリーンアップ分科会の活動を「土壌・家屋などの除染方法のカタログ」を中心にまとめた。

## I. はじめに

日本原子力学会「原子力安全」調査専門委員会クリーンアップ分科会では、避難されている住民の方々が少しでも早く自宅に戻れるように、次のような活動を行っている。

- ・福島第一原子力発電所の事故に起因する環境回復に関する提言(6月8日)
- ・「環境修復センターの設置」および除染モデル事業による速やかな実証に関する提言(7月29日)
- ・「EURANOS 除染技術データシートのご紹介, 翻訳版」をHPにアップ(8月12日)
- ・除染技術カタログの作成と「環境修復技術説明資料」(カタログ)の公表(9月9日)
- ・現地における荒搔き試験による「除染モデル検証の実施およびデータの取得」(8月8, 9日, 9月16日)

実際に福島県に出向き、福島県庁やJA訪問、福島大学や会津大学を訪問し、地元自治体や組織の意見を拝聴し(5月19, 27日, 6月11日, 7月12日, 9月6, 13日)、除染活動に統一的な専門的な見解を示すべく情報を入手した。

また、福島県南相馬市において荒搔きの現地試験を行い(8月8, 9日, 9月16日)、海外の知見の乏しい水田の除染技術に対する正しい情報を入手することにより、提案されている環境修復技術や除染技術に公正な評価を行えるようにすると共に、現地の方々とのコミュニケーションの向上を図っている。さらに、農研機構が実施した試験に立会い(8月19, 24, 30日)、正確な実態情報の把握に努めた。

## II. 具体的な活動

## 1. 「環境修復センターの設置」への提言

発電所敷地外の住民の生活環境の修復事業を統括して実行する運営を主体的に行う組織として「環境修復センター」の設置を提言し、プレリリースした(平成23年7月29日)。合わせて「除染モデル検証」プログラムの実施に

ついて提言した。提言の中では「環境修復廃棄物管理制度」についても環境修復の結果として出てくる廃棄物の管理方策を早急に定めるよう述べている。

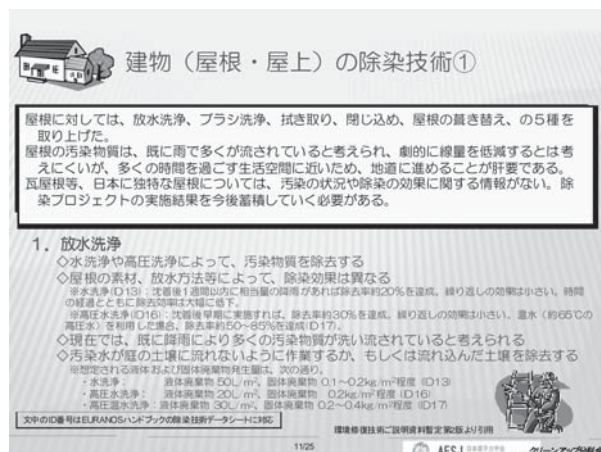
## 2. EURANOS データベースの作成

チェルノブイリ事故後に旧ソ連隣国のヨーロッパで同様の緊急事態に備えるために、2002~2006年に欧州委員会のもとに実施されたEURANOSプロジェクトが4つのハンドブックをまとめた。その1つである住居エリア管理のための包括ハンドブックに着目し、その中に含まれる除染技術データシート59件を仮訳した。この翻訳版をクリーンアップ分科会のホームページに掲載した(平成23年8月12日, <http://www.aesj.or.jp/information/Fnpp201103/chousasenshomonikikai.html>)。

## 3. 除染カタログの作成

前述したEURANOSデータシート翻訳版および日本への適用性や学会の見解を含めた「修復技術カタログ」をまとめている。修復技術は並列的に取り上げられており、費用対効果などの面から技術を選定することができる。

自治体・住民の方々が技術の選定を行うにあたって除染技術をわかりやすく解説した「環境修復技術ご説明資料」暫定第2版(除染技術カタログ)(第1図)をホームページに掲載すると共にプレリリースした(平成23年9月9日, <http://www.aesj.or.jp/information/fnpp>)



第1図 「環境修復技術のご説明資料」の一例

Activity of Clean up Subcommittee, Committee for Investigation of Nuclear Safety, AESJ: Tadashi INOUE, Reiko FUJITA.

(2011年10月31日 受理)

201103/chousacom/cu/cucom\_kankyoshufuku  
20110905.pdf)。

4. 「除染モデル検証」の実施によるデータの取得  
クリーンアップ分科会では水田や畑の除染技術の客観的評価に役立てるデータを取得する目的で「水田における耕起, 荒掻き試験」を実施した。

#### (1) 水田における耕起, 荒掻き地試験

“環境修復センター”の事業への協力の一環として, 8月～9日および9月16日にJA そうまの支援のもと, 汚染された水田の代掻き(荒掻き)による除染効果の確認試験を実施した(第2図)。

試験実施日: 2011年8月8～9日および9月16日

試験場所: 福島県南相馬市原町馬場地区広畑

参加者: 井上主査ほか, 分科会委員 総勢11名

まずは, 試験を行う水田の現場の空間線量率を測定した。試験水田の草刈りをした後, 土壌・草・根サンプリングを採取し, 放射エネルギーを測定した(0.6～0.9  $\mu\text{Sv/h}$ , NaI 検出器(3.5 cm 鉛遮蔽つき))。また, 耕起, 耕起後の空間線量率を測定した(0.4～0.6  $\mu\text{Sv/h}$ , 同上)。その後, 畦板により水田を仕切り(約7 m×22 m), 水張りを行った。さらに, 代掻き(荒掻き)を約10分行い, 経時的に排水, 濁水サンプリングし, 線量率の測定を行った(0.2～0.3  $\mu\text{Sv/h}$ , 同上)。

その後, 採取した土壌などの試料の種々の分析(核種分析, 粒度分布測定, 鉍物分析など)を行い, 調査結果の取りまとめ作業を行った。その他, 別途サンプリングした, ジャガイモ畑, ひまわり畑などの試料についても, 合わせて分析した。

#### (2) 相馬市原町馬場地区の方々との情報交換会

日時 2011年8月9日(火)午前

場所 福島県南相馬市原町馬場地区馬場公会堂

講演 “福島第1原子力発電所の事故と放射線影響”  
“放射線測定結果の概要”

上記テーマで約30分の講演を行った後, 地元の方との意見交換会をJA そうまの協力で馬場公会堂にて開催した。定常的に放射性物質の測定ができるようにしてほしいとの要望が大きかった(この後, 既にJA そうまは簡



第2図 代掻き(荒掻き)試験



第3図 情報交換会の会場

易な測定装置を購入)。「土壌を含めた家屋や公共施設の除染の国や県の対応が遅いので早く実施するように働きかけてほしい」(既に福島除染アドバイザー会議で要望した)。「来年の作付けの判断をするために土壌の線量測定を実施してほしい」, 「地元で栽培している農作物の放射能測定をしてほしい」との要望があり実施した(後述)(第3図)。

#### (3) 放射性物質の測定

意見交換会の後, 簡易型 NaI 分析装置を現場に持ち込み, 野菜などの簡易分析を実施した。意見交換会出席者から, ジャガイモ, きゅうりなどの野菜が多く持ち込まれ, 放射性得物質の測定を行った。地元で栽培している野菜からは基本的に汚染は出ず, 出席者からは安心して自家栽培の野菜が食べられるようになったとの感謝の言葉が多く聞かれた。

### Ⅲ. 今後の活動

内閣府原子力防災対策本部が8月26日に公表した「除染ガイドライン」に従い, 公表した「除染技術カタログ」を用い, 市町村が作成する除染計画に協力(共同作業)している。除染計画の策定に当たっては専門家の協力が不可欠であることから, クリーンアップ分科会メンバーがシニアと組んで共同作業を実施している。また, 除染計画の作成のために市町村に出向き, 説明会や勉強会を11月27日に開始した。

#### 著者紹介



井上 正(いのうえ・ただし)

(財)電力中央研究所

(関心/専門分野)放射性廃棄物処理, 燃料サイクル



藤田 玲子(ふじた・れいこ)

(株)東芝 電力システム社

(関心/専門分野)放射性廃棄物の処理・処分, 再処理

## 解説シリーズ

# ヒューリスティックな最適化手法とモデリング

## 第2回 古典的手法と Particle Swarm Optimization

慶應義塾大学 相吉 英太郎,

千葉大学 岡本 卓, (株)テプコシステムズ 小林 容子

第2回は、ヒューリスティックな最適化手法の中でも注目を集めている Particle Swarm Optimization の原理的な特徴を、古典的な最適化手法と対比させながら解説する。とくに第1回で例題としてあげた2変数の例題での探索点の動きを視覚的に捉えることにより、Particle Swarm Optimization によって大域的最適解が求まる仕組みを理解する。

### I. はじめに

もっとも代表的かつ古典的な最適化手法は、最急降下法であり、それを改良した手法が共役勾配法である。最適化問題が最小化問題の場合、前者は、目的関数の勾配と逆方向に探索点を移動させる方法であり、後者は、最急降下方向に、それまでの移動方向への、いわば勢いを加味して探索点を移動させる方法で、探索の効率化を図った手法であり、いわば慣性付降下法といえることができる。これらは、目的関数の微分可能性を仮定した下で、関数の局所的情報である勾配を用いるため、解析的手法とよばれる手法の代表例である。

これに対して、鳥の群れが餌を探すモデルにヒントを得て開発された Particle Swarm Optimization<sup>1)</sup>(以降 PSO と略記する)は、複数の探索点をそれらの干渉作用により連動させて、大域的最適解を探索するヒューリスティックな手法である。その更新式は、目的関数の勾配を用いないものの、慣性系と解釈することができる。そこで、本解説では、古典的な手法の特性の理解の上に立って、PSO の探索点の挙動特性を説明する。

ところで、古典的な最適化手法の中でも、もっとも汎用的なソルバとして用いられているものに準ニュートン法があるが、これは勾配をゼロとおいた方程式をニュートン法で解く手法の発展形であるため、本解説ではあえて言及しないことにする。なお、準ニュートン法の詳細については、文献2)を参照されたい。

### II. 古典的最適化手法

#### 1. 最急降下法

制約条件がない最適化問題

$$\min_x f(x) \quad (1)$$

を考える。関数  $f$  が微分可能な場合には、勾配  $\nabla f(x)$  が存在するため、これを用いて第  $k$  イテレーションでの探索点の位置  $x(k)$  を、

$$x(k+1) = x(k) - c \nabla f(x(k))^T \quad (2)$$

と更新する手法が最急降下法である。ただし、 $c$  は比較的小さな正数である。この更新式の右辺第2項の変位方向

$$v(k) = -\nabla f(x(k))^T \quad (3)$$

に対して、 $\nabla f(x(k)) = \mathbf{0}$  でなければ、

$$\nabla f(x(k)) v(k) = -\|\nabla f(x(k))\|^2 < 0 \quad (4)$$

が成り立つ(勾配ベクトルとの内積が負である)ため、 $v(k)$  は、 $f(x(k))$  を局所的に減少させる降下方向である。また、更新式(2)の平衡点は、

$$\nabla f(x) = \mathbf{0} \quad (5)$$

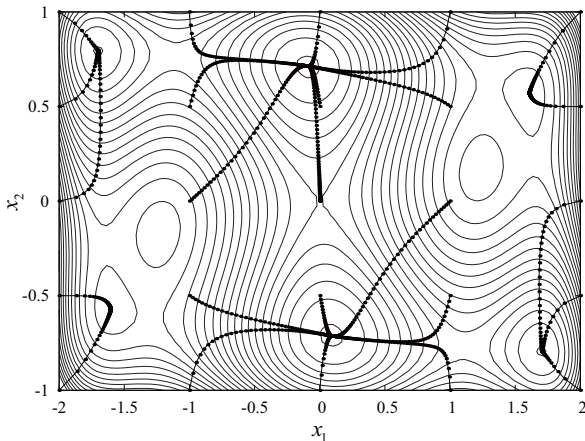
をみたすような局所最適解である。係数  $c$  については、イテレーションの更新とともに係数  $c$  を小さくするか、イテレーションごとに、 $x(k)$  を基点とする  $v(k)$  方向の直線探索により、最良のステップ幅

$$\bar{c}(k) = \arg \min \{f(x(k) + cv(k)) \mid c > 0\} \quad (6)$$

を求めて  $c = \bar{c}(k)$  とし、 $k = 1, 2, \dots$  について、これを繰り返す手法が用いられる。なお、(6)式を具体的に計算する直線探索法については、本稿では省略する(詳細は、文献2)を参照されたい)。

最急降下法を第1回の解説の例題4((22)式で与えられる Six-Hump Camelback 関数最小化問題)に適用したときの探索点の軌道を第1図に示す。第1図では、初期点として25通りの点を取ったため、25種類の探索軌道が

Heuristic Optimization and Modeling (2): Classical Optimization Method and Particle Swarm Optimization: Eitaro AIYOSHI, Takashi OKAMOTO, Yoko KOBAYASHI. (2011年 7月15日 受理)

第1図 更新式(2)による最急降下法( $c=0.01$ )

描かれている。なお、係数  $c$  は  $c=0.01$  とした。第1図から、25通りの初期点からの軌道が、6個の局所的最適解のいずれかに引き込まれていることが見てとれる。また、等高線に垂直でかつ関数を減少する方向に遷移して局所的最適解に収束する軌道が確認され、この探索法が最急降下法といわれることが理解できる。ある探索法の軌道において、特定の局所的最適解に引き込まれる初期点の集合を、その局所的最適解の引き込み領域という。

## 2. 慣性付降下法

最急降下法に対して、

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + c\mathbf{v}(k) \quad (7a)$$

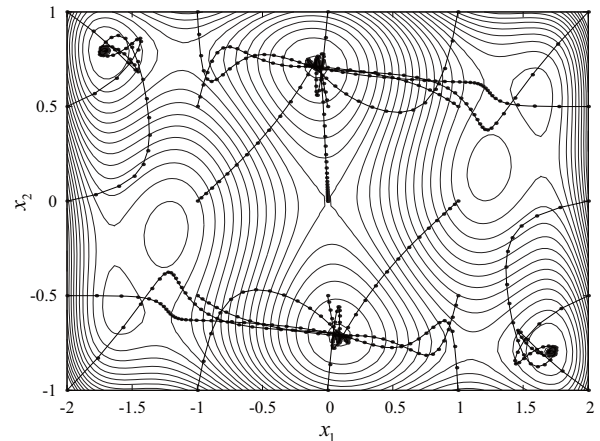
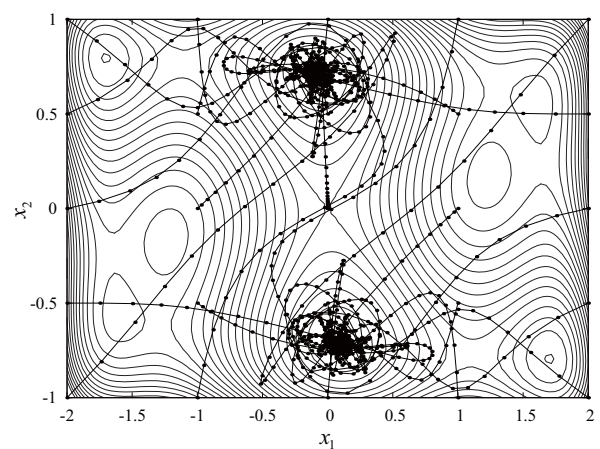
$$\mathbf{v}(k) = \lambda\mathbf{v}(k-1) - \nabla f(\mathbf{x}(k))^T \quad (7b)$$

として、変位方向  $\mathbf{v}(k)$  に前のイテレーションの変位方向  $\mathbf{v}(k-1)$  の影響を残す手法が、慣性付降下法とよべる手法である。この手法では、あるイテレーション  $k$  において、 $\nabla f(\mathbf{x}(k)) = \mathbf{0}$  であっても、 $\mathbf{v}(k-1) \neq \mathbf{0}$  であれば、局所的最適解である  $\mathbf{x}(k)$  に停留せずにいったん通過してから、それに戻ろうとするため、探索点を振動させながら局所的最適解に漸近させることができる。なお、 $c$  は、一般に、(6)式の直線探索を利用して決定する。また、慣性係数  $\lambda$  を探索点  $\mathbf{x}(k)$  に依存して変動するものとし、たとえば

$$\lambda(\mathbf{x}(k)) = \frac{\|\nabla f(\mathbf{x}(k))\|^2}{\|\nabla f(\mathbf{x}(k-1))\|^2} \quad (8)$$

として、イテレーションごとの勾配のノルムの2乗の変動比率にとった手法が、共役勾配法であり、関数  $f$  が凸関数のときには、振動要素は含みながらも無駄な振動を抑制しつつ、局所的最適解へ探索点を効率よくかつ安定的に収束させることができる。

慣性付降下法を、最急降下法と同じ25通りの初期点を用い、同じ例題に適用した結果を第2図に示す。まず、 $c=0.01$  とした更新式(7)において、 $\lambda=0.7$  とした場合の軌道を第2図(a)に、 $\lambda=0.9$  とした場合の軌道を第2図(b)に示す。慣性係数  $\lambda$  を大きくすると、振動が強くなり軌道が不安定化し、局所的最適解の周囲を徘徊し続

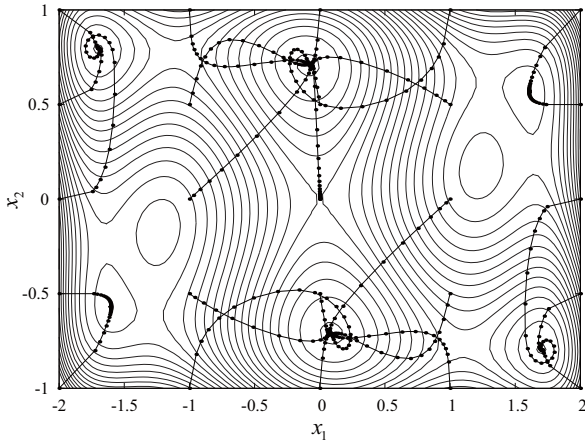
第2図(a) 更新式(7)による慣性付降下法( $c=0.01, \lambda=0.7$ )第2図(b) 更新式(7)による慣性付降下法( $c=0.01, \lambda=0.9$ )

ける傾向が強くなるが見てとれる。とくに、慣性係数を大きくした(b)の場合、探索の初期段階においては、慣性の影響によって、初期点に近い引き込み領域の狭い谷には引き込まれずそこを脱出し、別の引き込み領域の広い谷に引き込まれている様子が確認される。したがって、もし、引き込み領域の広い谷がもっとも深い谷である場合、慣性係数を大きくすると、大域的最適解の引き込み領域が拡大し、大域的な探索能力がある程度高まる可能性があることがわかる。なお、 $\lambda > 1$  とすると軌道が発散することが確認される。また、慣性係数を調整する手法として、(8)式を用いる共役勾配法の軌道を第3図に示す。共役勾配法では、振動していても第2図(a)より安定的な軌道が生成されていることが確認される。

## III. Particle Swarm Optimization の原理と計算性能

### 1. 計算手順の原理

最急降下法や慣性付降下法は、いずれも、勾配  $\nabla f(\mathbf{x})$  を探索点の移動のための駆動力とし、これらの更新則の安定平衡点である局所的最適解に、探索点  $\mathbf{x}(k)$  を漸近させる手法である。とくに、慣性付降下法では、慣性係



第3図 更新式(7),(8)による共役勾配法(c=0.01)

数λの調整により、振動を抑制したり不安定化したりすることが可能であり、場合によっては、局所的最適解への停留を回避して大域的な探索を実行させることも可能な手法である。

一方、勾配∇f(x)を探索点移動の駆動力にすることは、関数fの数式表現が可能で微分可能であることを前提としている。しかし、現実にはあらゆる最適化問題の目的関数が数式表現されとは限らないし、微分可能な関数である保証も一般的にはない。さらに、たとえ数式表現され、かつ微分可能な目的関数であっても、勾配∇f(x)を探索点移動の駆動力にすることは、局所的最適解への引き込みやそこでの停留をひきおこすため、大域的最適解を得るための障害にすらなることがある。数式表現がされておらず、必ずしも微分可能とは限らない場合、目的関数値のみの情報を用いて大域的最適解を探索する手法の研究開発が、この分野の近年の課題となっており、その中でも有力手法として話題になった手法がParticle Swarm Optimization(以下、PSOと略記する)である。本章では、このPSOの原理について解説する。

まず、第kイテレーションまでの過去の探索履歴中で目的関数値を最良にした点

$$\mathbf{x}^{\text{best}}(k) = \arg \min_{\mathbf{x}(i)} \{f(\mathbf{x}(i)) | i=0, \dots, k\} \quad (9)$$

を記録しておき、この点への方向(𝑥<sup>best</sup>(k)−𝑥(k))を慣性付降下法の更新式の負勾配−∇f(x)の代わりに用いるとすると、

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (10 a)$$

$$\mathbf{v}(k) = \lambda \mathbf{v}(k-1) + r_1(\mathbf{x}^{\text{best}}(k) - \mathbf{x}(k)) \quad (10 b)$$

といった慣性付の更新則が得られる。PSOは、このような探索点を複数個用意し、各探索点の探索履歴中の最良点方向だけでなく、全探索点の探索履歴中の最良点、すなわち探索点の群れの過去の履歴も含めた最良点の方向にも駆動させる項を付加した手法で、その更新則は、

$$\mathbf{x}^p(k+1) = \mathbf{x}^p(k) + \mathbf{v}^p(k) \quad (11 a)$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_n^p(k) = & \lambda \bar{v}_n^p(k-1) + r_{1n}^p(k) (\mathbf{x}_n^{p-\text{best}}(k) - \mathbf{x}_n^p(k)) \\ & + r_{2n}^p(k) (\mathbf{x}_n^{g-\text{best}}(k) - \mathbf{x}_n^p(k)) \end{aligned} \quad (11 b)$$

$$\mathbf{v}^p(k) = \begin{cases} \mathbf{v}_n^{\text{max}}, & \bar{v}_n^p(k) > \mathbf{v}_n^{\text{max}} \\ -\mathbf{v}_n^{\text{max}}, & \bar{v}_n^p(k) < -\mathbf{v}_n^{\text{max}} \\ \bar{v}_n^p(k), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11 c)$$

$$n = 1, \dots, N, p = 1, \dots, P$$

と表される。ここで、(11 a)式は、探索点の移動を表す更新式で、𝑥<sup>p</sup>(k)と𝑣<sup>p</sup>(k)は、それぞれ、第kイテレーションにおける第p探索点の位置と変位で、上付き添字pは探索点の番号を表す。(11 c)式は、(11 a)式の更新によって探索点が発散してしまうことを防ぐための式で、(11 b)式により成分ごとにいったん $\bar{v}_n^p(k)$ を計算して、 $|\bar{v}_n^p(k)| > \mathbf{v}_n^{\text{max}}$ であれば、移動量 $\mathbf{v}^p(k)$ の成分ごとに、移動幅を上限値 $\mathbf{v}_n^{\text{max}}$ 以内に抑制する。(11 b)式における $\mathbf{x}^{p-\text{best}}(k)$ は、第p探索点第kイテレーションまでの過去の探索履歴中で目的関数値を最良にした点で、

$$\mathbf{x}^{p-\text{best}}(k) = \arg \min_{\mathbf{x}^p(i)} \{f(\mathbf{x}^p(i)) | i=0, \dots, k\} \quad (12)$$

と定義され、p-best(personal best)と称されている。さらに、 $\mathbf{x}^{g-\text{best}}(k)$ は、全探索点の探索履歴中の最良点であり、すべてのp-bestの中での最良点と言い換えることができ、

$$\mathbf{x}^{g-\text{best}}(k) = \arg \min_{\mathbf{x}^{p-\text{best}}(k)} \{f(\mathbf{x}^{p-\text{best}}(k)) | p=1, \dots, P\} \quad (13)$$

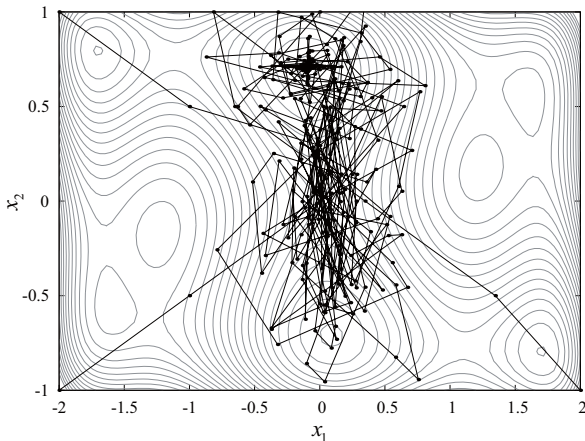
と定義され、g-best(global best)と称される。また、 $r_{1n}^p(k)$ 、 $r_{2n}^p(k)$ は、それぞれ閉区間[0, R<sub>1</sub>]、[0, R<sub>2</sub>]上の一様乱数で、イテレーションごとに各探索点各成分で異なることを示している。ただし、R<sub>1</sub>とR<sub>2</sub>は、いずれも乱数の幅を決める正の実数である。

以上の更新則のPSOでは、過去の探索履歴中の探索点ごとの最良点や探索点群全体の最良点方向に対して、それらの近傍には、さらに良い解が存在することを期待して、それら最良点方向に一様乱数を乗じることで揺動を与えることで、変位を決めている。この更新則のPSOは、とくに単純PSOとよばれ、もっとも基本的な更新則である。そして、実際に許される最大イテレーション回数分この更新則を反復させ、このときのg-bestをもって問題(1)の大域的最適解とみなす手法である。

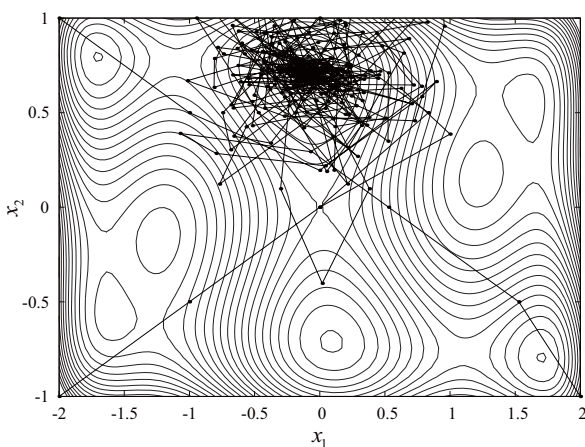
これ以外に、(11 b)式の慣性係数λを、最大イテレーションk<sub>max</sub>まで、イテレーションの経過とともに、大きな値から小さな値へ

$$\lambda(k) = \lambda_{\text{max}} - \frac{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}}{k_{\text{max}}} \times k \quad (14)$$

と一定の割合で減少させて、探索序盤では大域的探索が期待できる不安定な探索を実行し、探索終盤にかけて局所的探索が期待できる安定な探索の実行へと遷移させる手法(Inertia Weight Approach : IWA)が考えられており、IWAを用いたPSOとよばれている<sup>3)</sup>。この手法は、まず探索の初期段階で慣性係数を大きくし、それによる不安定化した軌道をもつ複数の探索点の多様な探索により、g-bestが大域的最適解の引き込み領域に位置する可能性を増やしている。そして、探索の経過に伴う慣性係数の減少による軌道の安定化によるg-best付近への



第4図(a) 更新式(11)による PSO の軌道  
( $\lambda = 0.7, R_1 = R_2 = 1.5$ )



第4図(b) 更新式(11), (14)による PSO の軌道  
( $\lambda_{\max} = 0.9, \lambda_{\min} = 0.5, R_1 = R_2 = 1.5$ )

複数探索点の集中化により、大域的最適解を精度よく発見することを期待する手法である。

## 2. 計算性能

PSO を最急降下法と慣性付降下法と同じ例題に適用した結果を第4図(a), (b)に示す。標準的な PSO の更新式である(11)式において、 $\lambda = 0.7, R_1 = R_2 = 1.5$ とした場合の軌道を第4図(a)に、(14)式を用いて慣性係数  $\lambda$  を調整する方法について、 $\lambda_{\max} = 0.9, \lambda_{\min} = 0.5, R_1 = R_2 = 1.5$ とした場合の軌道を第4図(b)に示す。探索点数は  $P = 25$  とし、その初期配置は最急降下法や慣性付降下法の初期点の位置と同じにした。なお、第4図(a), (b)では、見やすさを考慮して、25通りの軌道のうち、5通りの軌道を示している。PSO では、これら25個の探索点が相互干渉して、不規則な振動を伴う離散軌道が発生し、大域的最適解  $(-0.0898, 0.7127)$  付近を集中的に

探索するように、複数の探索点が収斂していることが確認される。とくに、(b)の IWA を用いた PSO では、探索の経過に伴う慣性係数の減少による軌道の安定化により、大域的最適解付近へ複数の点が集中し、(a)と比べて精度のよい探索が実現していることがわかる。本解説で用いた例題では、違いがみられないが、決定変数の数が多く難しい問題では、IWA を用いた PSO の方が精度よく探索を行うことができることが知られている<sup>3)</sup>。また、問題ごとに、慣性係数をはじめとするパラメータを適切な値に調整する必要があるが、この方法についても力学としての解釈に基づいた研究が進んでいる<sup>3,4)</sup>。

## IV. おわりに

大域的最適解は、目的関数の勾配などの解析的性質を用いて定義することは不可能である。一方で、PSO のように複数の探索点を用いて探索する場合、関数値の評価に基づいた探索履歴中の最良点を、その時点での大域的最適解とみなすことは妥当であり、さらに、この情報を取り入れて、その周辺を集中的に探索するような更新式を考えることも単純かつ合理的な発想といえる。以上のように、PSO はその探索点の挙動を力学的な知識で解釈することができるヒューリスティック手法であるが、今回は生物の進化に擬えて解釈される「交叉演算」を含む、いわゆる進化型手法の一つである Differential Evolution 法について解説する。

### — 参考資料 —

- 1) J. Kennedy, R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks*, Perth, WA, Australia, Nov. 27-Dec. 1, 1995, p.1942-1948 (1995).
- 2) 玉置久編, システム最適化, オーム社, (2005).
- 3) 相吉英太郎, 安田恵一郎編, メタヒューリスティクスと応用, 電気学会, (2007)
- 4) 小熊祐司, 相吉英太郎, 電気学会論文論 C, **131**, 1020 (2011).

### 著者紹介

相吉英太郎(あいよし・えいたろう)

本誌, 53[11], p.781 (2011)参照.

岡本 卓(おかもと・たかし)

本誌, 53[11], p.781 (2011)参照.

小林容子(こばやし・ようこ)

本誌, 53[11], p.781 (2011)参照.

連載  
講座材料が支える原子力システム  
より高い信頼性のために

## 第6回 機能性材料

東北大学 金属材料研究所 四竈 樹男

核分裂システムに使用される機能性材料の問題を、電気計装用に用いられる MI ケーブルと温度計測用に用いられるシース型熱電対を例に議論した。核分裂システムの健全性向上のためには隙間材料的な機能性材料研究の見直しが不可欠であることを強調したい。

## I. はじめに

原子力機器では、炉容器や炉内構造物などの大型、小型の機器のほかにも、原子炉の状態を把握し、運転を行うために必要な情報を得るために、各種の計測機器が設置されている。米国アイダホ国立研究所の研究炉、ATR (Advanced Test Reactor) の J.L. Rempe らは現在、研究炉を中心に行われている計測の種類として以下のものを挙げている。(例えば、参考資料1)の招待講演11参照)

- ・ 温度
- ・ 熱伝導度
- ・ 中性子フラックス、フルエンス
- ・ ガンマ線加熱率
- ・ 寸法(歪みを含む)
- ・ 核分裂ガス(量と化学組成)
- ・ 試験ループ圧力、流量
- ・ ループ水化学
- ・ 腐食生成物(Crud Deposition)
- ・ 亀裂進展速度

これらの計測機器等は高温で強い放射線の影響を受けることから、原子力用として様々な工夫が行われてきている。また、これらの計測機器から得られた情報を取り出し、原子炉の制御を行うために必要なケーブルも原子炉の運転に不可欠なものであり、安定した原子炉の運転にはこれらの材料の信頼性が求められる。

今回は、原子力分野で用いられている機能性材料として、炉心計装に用いられている電気ケーブルと温度計測に用いられている熱電対について、それらを構成する材

*Materials for Nuclear Energy Systems—Towards High Reliability*(6); *Functional Materials*: Tatsuo SHIKAMA.

(2011年 10月1日 受理)

第1回 軽水炉用ステンレス鋼

第2回 高速炉炉心用改良ステンレス鋼

第3回 Ni 基合金

第4回 低合金鋼

第5回 軽水炉燃料部材に用いられるジルコニウム合金

料を中心に取り上げることとしたい。

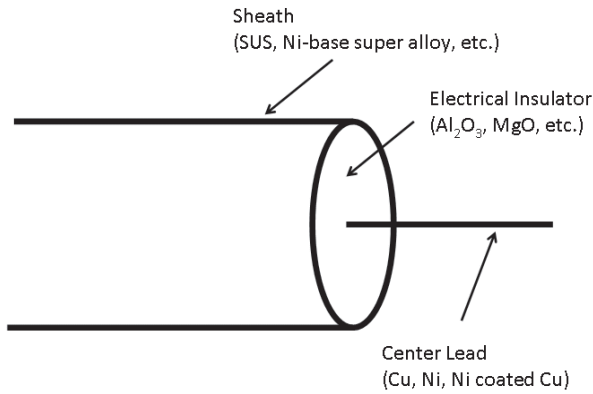
## II. 炉心計装に不可欠な電気ケーブルとその材料

原子炉炉心の中で電氣的な計測を行うことは第一印象よりはるかに困難である。これはマンハッタン計画を始めとした原子力開発初期に、関係国が最初に直面した課題であると推測される。計測用ケーブルは、耐熱、耐環境特性を持ち、かつ高い放射線場における長期間使用に耐える必要がある。原子炉用として開発されたケーブルは、耐熱金属シースに絶縁材料粉末を充填し、その中心に電気伝導体の細線を通した、いわゆる MI (Mineral Insulating: 無機絶縁) ケーブルであり、これは、身近で使われるシース型熱電対とほぼ同じ構造である。シースの材料としてはステンレス鋼やニッケル基超耐熱合金 (super alloy) などが、伝導心線としては銅やニッケル、また、絶縁材粉末としてはアルミナ ( $Al_2O_3$ ) やマグネシア (MgO) などが使用されている。

MI ケーブルの製造方法は製造メーカにより多少のバリエーションがあるが、基本的には、大きな母材を成型した後に、引き抜きや鍛造などの工程を経て細線に引き延ばすことが行われている。MI ケーブルの模式図を第1図に示すが、製造上の要点としては以下のような点が挙げられる。

- (1) 伝導心線を1~100 kmにも及ぶケーブル線の中でなるべく中心に位置させる。
- (2) ケーブルの引き延ばし工程で伝導心線に損傷を与えず、所定の電気伝導特性を満足させる。
- (3) 酸化物粉末の充填率を確保して、電気絶縁を適切に確保する。
- (4) 長いケーブルの特性の均一性を確保する。

伝導心線の材料に関しては、銅はニッケルより電気伝導度が高く、電氣的には望ましい材料である。しかし、銅の場合、柔らかいために製造過程において絶縁材粉末



第1図 MIケーブルの概略

外部被覆に相当するシース、絶縁層(通常は粉末絶縁酸化物)、電気伝導心線より構成される。

との相互作用によって形状などが劣化し、使用時に破断しやすいという欠点があることに加え、耐熱性の点からもニッケルより劣る。一方、ニッケルは電気伝導率が低く、典型的なMIケーブル10mあたりで10~100オーム程度の電気抵抗を持つこともしばしば見受けられる。そのため、電気抵抗を重視する場合には、折衷案としてニッケル被覆した銅を用いる場合もある。伝導心線に関して見過ごされがちな問題として、MIケーブルの製造過程から分かるように、心線は非常に大きな加工が施されていることが挙げられる。当然、加工に伴う電気伝導度の初期の低下、その後の高温使用下での熱回復による電気伝導度の増大は、高精度の計測を行う場合には気をつけなければいけない問題である。また、銅心線には無酸素銅が使用されるが、加工過程で絶縁酸化物との相互作用による酸素汚染は避けられないことにも留意すべきである。ケーブルによっては製作後に焼鈍処理がなされるものがあるが、この場合、むしろ心線は熱的な損傷を受けて断線しやすくなる場合もある。

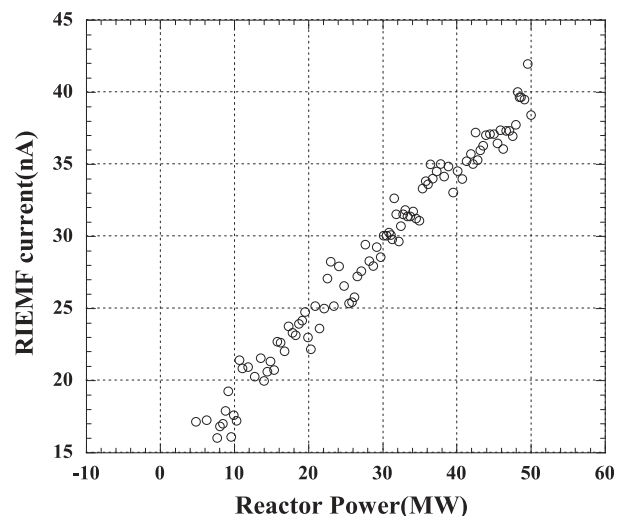
絶縁粉末としてのマグネシアは、セラミックスとしては例外的に優れた加工性があり、加工中に心線を損傷する割合が低いという長所がある。また、結晶構造が等方的(塩化ナトリウム構造)であることも有利な特徴であるが、一方で、マグネシアには潮解性があり、環境中の水分を吸収して絶縁低下を引き起こす。これに対して、アルミナは電気絶縁材料として最も工業基盤が確立した標準材料であるが、硬度が高く、製造過程で心線やシースを傷つけるため、ケーブル内部に傷ついた心線やシースから生じた微細な金属粉末を内包することにより、絶縁低下を引き起こすことがあり、マグネシア、アルミナそれぞれ一長一短がある。また、その他の絶縁粉末として、多元系酸化物、窒化物、炭化物など様々な絶縁材料が提案されているが、なかなかアルミナ、マグネシアに対抗できるまでにはいたっていないのが現状である。

MIケーブルは原子力開発の初期の段階から、高出力密度のパルス現象が発生するシステムを始め、ほとんど

すべてのシステムで使用されており、システムの動特性、挙動評価にとって欠くことのできないコンポーネントである。例えば、磁場発生、磁場評価用、そして変位測定のための作動トランスのコイルはその典型である。

このような実測定に際して問題となるMIケーブルのもう一つの重要な課題として、シースと心線の間に寄生起電力(Parasitic Electromotive Force)が発生し、計測に支障を来すということが挙げられる。この現象は放射線計測の分野では古くから知られており、一つの対策として補償ケーブルを用いて、寄生起電力をキャンセルする対策がとられている。しかし、詳細を検討すると、寄生起電力はケーブルごとに異なり、使用環境に依存して大きく変化することが分かっている。そのため補償ケーブルによる対策は限定的で、極力この寄生起電力を小さくする必要がある。1960年代にカナダのチョークリバー研究所を中心として、寄生起電力に関する系統的な研究が行われ、MIケーブルの幾何形状の最適化が行われた。その結果、シースの質量が一つのパラメータであることが分かり、MIケーブルの外径として1.3mm付近が最も望ましいとの結論となった。現在の原子力システムではこの外径を持つものが標準的に使用されている。

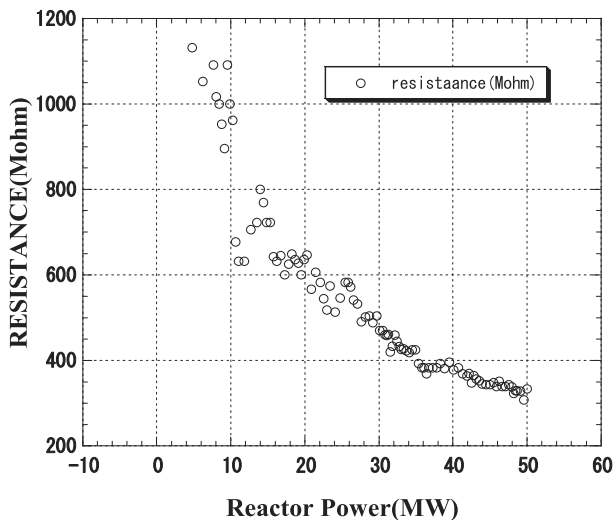
寄生起電力の原因としては、放射線に誘起されるもの(照射誘起起電力(RIEMF: Radiation Induced EMF)と熱起電力からの寄与(TIEMF: Thermally Induced EMF))があることが知られており、熱起電力の低減には品質管理が重要なことが分かっている。一方、照射誘起起電力は、構成材料の電子放射能や幾何形状に依存することが知られており、なかなか制御することは困難である。第2図に日本原子力研究開発機構の材料試験炉(JMTR)で測定されたRIEMF電流の例を示す。この場合は、電流駆動型の高内部インピーダンス起電力であり、数10nA程度の微弱電流であるが、第3図に示すよ



第2図 照射誘起起電力(RIEMF)により心線とシースの間に誘起される微弱電流

ほぼ、原子炉出力に比例した電流が誘起される。





第3図 照射誘起電気伝導度(RIC)により変動する絶縁層の電気抵抗

ほぼ放射線強度(正確には電子励起密度)に比例して伝導度が増大(抵抗が減少)する。

うに、炉停止時には内部インピーダンスが増大するため、キロボルトを越すような高い電圧が計測されることとなる。これはケーブルがつながれた装置の内部インピーダンスや接地状況によっては装置に損傷を引き起こす可能性があることを示している。

もう一つの重要な現象は、放射線の存在下で電気絶縁が低下する減少である。第3図に上記JMTR内でのMIケーブルのシースと心線間の絶縁抵抗変化の一例を示すが、ほぼ原子炉出力に1次的に依存して絶縁抵抗が減少する。出力が数MWの時に1ギガオームを超えていた絶縁抵抗が50MWでは数100メガオームまで低下する。これは照射誘起電気伝導度(RIC: Radiation Induced Electrical Conductivity)と呼ばれる現象で、放射線の発見と同時に見いだされた古くから知られる現象である。この現象はマリー・キュリーが放射線の定量に用いた手法として広く知られているが、現在は工学の分野で忘れ去られているようである。20年ほど前に学会で報告した時に、産業界の重鎮から、「そんな現象は発電炉では全く観測されていない」とお叱りを受けたほどである。これは放射線場で電気機器を用いるときに絶対避けて通れない現象であり、高電圧をかけるMIケーブルでは、これに対応するためになるべく太く、絶縁層の厚いものを使用することが行われている。しかし、MIケーブルの構造、及び製造法から推測できるように、太くすることが得策であることは必ずしもなく、むしろ、細いものの方が特性としては優れることがしばしばである。特に、高圧をかける機器の絶縁破壊は、後述のように、接続部分で起きることがほとんどであり、むしろ1.3~1.5mmの外径のものが最適である場合がしばしば見いだされる。

最後に、現在も深刻な課題として残されているのが、

MIケーブルの端末処理の問題である。第1図に示すように、MIケーブルと機器を接続する場合にはMIケーブルの端末から心線を引き出す必要がある。この場合、MIケーブルの端は開放端となり、環境にもよるが、多くの場合はこの開放端から絶縁粉末充填層に外部環境、すなわち、水や気体が入り、電気絶縁を著しく劣化させる。特に一般的に使用されるマグネシア絶縁MIケーブルではこれが顕著である。放射線環境でない場合には、ガラス封入など様々な端末処理手法が確立されているが、高温放射線環境で完全に外部環境影響を排除できるような形状を持った端末処理手法は見いだされていないのが現状である。最近の軽水炉では、マイクロ・フィッションチャンバ、自己出力ガンマ線、中性子検出器、応力腐食割れ計測装置などの新しい計測装置が開発・設置されてきているが、いずれもMIケーブルとの接続が不可欠で、これらの装置を設置する際にもこれらの端末処理の問題は全く解決されていない。

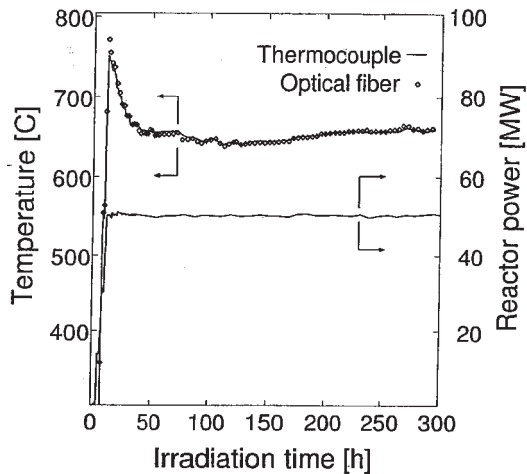
### Ⅲ. 温度計測用材料

前章で示したMIケーブルを考へても、原子力システムにおける機能性材料、また、それを用いたコンポーネント開発には難しさがあることが分かる。福島原発の事故では、最も基本的な計測情報である水位計測、温度測定ですらかなりの不確実性を持ってしか行えないことが示された。

原子力システムにおける温度計測は主にシース型熱電対を用いて行われているが、シース型熱電対には、MIケーブルにおいて示した課題に加えて、原子炉環境で用いる場合に起こる熱起電力低下の問題もある。これは主に、

- (1) 放射線に促進されたシース内の酸化物と残留酸素との相互作用による熱電対合金の選択酸化、
- (2) 核変換による熱電対合金の組成変化、
- (3) 熱的劣化の放射線による促進(接続部での拡散促進など)、

によるものである。これらの問題に対しては通常、1,000℃まで測定可能なK(クロメル-アルメル)型熱電対に対して、選択酸化を避けたN(ナイクロシル-ナイシル)型熱電対が開発されている。しかし、それよりも高温で用いることのできる熱電対、あるいは長期使用に耐える熱電対の開発は国内では行われていないのが現状である。最近、次世代原子炉開発に関連して米国で新たな熱電対開発が進められており、さすがに原子力先進国だと感心している。これは上記の(1)~(3)の課題を念頭に新たな合金設計から始めているもので、特に高温で作動する原子力システムを念頭に長期的視野に立ったモリブデン合金/ニオブ合金熱電対(HTIR-TC: High Temperature Irradiation Resistant Thermocouple)開発がアイダホ国



第4図 サファイアの熱発光強度測定による温度計測の例  
JMTR 炉心領域でほぼ2サイクルに渡り実施し光  
温度計装が炉心において可能であることを示した。

立研究所を中心に進められている<sup>1)</sup>。

しかし、一般的にシース型熱電対は対象物との間の熱接触に課題があり、過渡現象下での早い温度変動計測には適さない。また、長期間にわたる安定な高温計測で金属熱電対を利用して上記(1)~(3)の課題を克服することはなかなか困難であり、私どもは光ファイバを用いた温度計測を提案している。第4図に JMTR 炉心領域で光ファイバを用いて高温温度計測を実施した例を示す。これは、原子力機構が開発している高温ガス炉(HTTR: High Temperature Engineering Test Reactor)での計装を目指したものである。この温度計測システムは、サファイア(単結晶透明アルミナ)に直径2mmの耐照射高純度熔融シリカファイバを挿入し、800nm以上のサファイアの熱発光強度を計測することにより構成されている。第4図からK型熱電対による温度計測と光計測がよい一致を見ることが分かる。むしろ、原子炉立ち上げ時の応答を見ると、応答特性は光計測の方がよい結果となっている。これは、熱電対では、熱伝導の悪いマグネシア絶縁層、及びシース層を通しての温度計測になること、シースと温度測定対象の熱接触が必ずしも理想的ではないことなどに起因していると推測される。一方、時間経過とともに、熱電対から評価される温度は光計測のそれより低くなる傾向が明瞭に見られる。これは、光計測の立場からは熱発光強度が増大することを示唆するが、照射により光ファイバの光伝送特性は劣化する(光を通りにくくする)ことはあっても、増大することはない。むしろ、熱電対の熱起電力が低下していることを示唆していると推定される。長期間の熱起電力のドリフトはアイダホ国立研究所でも報告されており、ドリフトは100°Cにも及ぶ。原子炉運転中の熱電対の起電力校正は非常に難しい課題であり、放射線の中で熱起電力がどのように変化するかを評価することは困難であるのが実情であり、熱電対以外の温度評価手法の開発は今後重要な課題である。

## Ⅳ. おわりに

ほとんど系統的な知識とりまとめが出来ていない核分裂炉心システムの機能性材料に関して、MIケーブルと熱電対を例に、放射線下の挙動を中心に概述した。これらは、炉心計装に不可欠なものであり、特に、マイクロ・フィッションチャンバを始めとした炉心計装機器のほとんどはMIケーブルを基本要素として構成されているといっても過言ではない。

炉心計装システムの重要性は、次世代原子炉開発、及び核融合炉開発で再認識されてきている。特に高出力密度を追求した場合には、強い放射線場での計装が不可欠となるが、現状の技術では毎秒10kGyを超える核加熱条件での計測は不可能に近いのが現状であり、この課題克服に向けた努力が欧米を中心に行われつつある。一つの例が、2009年より開始された国際会議、ANIMMA (Advancement in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Application)<sup>1)</sup>である。ここでは、次世代原子炉システム、及び現在の軽水炉の高度化に向けた加速試験の場として開発が進む新しい試験研究炉、JHR 炉(Joule Horowitz Reactor)を成功させるには、炉の出力に整合した計装システムの開発が不可欠であるとの認識が背景にある。

一方、現在の原子力システムを顧みると、今回の福島での原子力事故は、現在の軽水炉システムが持つ課題を改めて明示したといえる。核分裂システムの教科書をひもとくと、材料では当然ながら構造材料、そして、炉心を構成する核燃料関係の材料に関する記述がほぼすべてを占め、機能性材料の出番は炉心計装に関してもほとんど出てこない。当然ながら、国内での研究は、ほぼ構造材料と核燃料関連材料に集中している。材料部会の担当の折に、核燃料部会から「核燃料関係は炉心構成要素を含めてすべて核燃料部会の管轄とする」との提案を受け、「それでは材料部会は压力容器と配管材料しかなくなる」と強く抗議した経緯があるが、このことは、図らずも筆者自身が機能性材料に対してその程度の認識しかなかったことを露呈しており、これら主要材料以外にも原子炉の安全性に対して大きな役割をもつ材料は多く存在する。例えば、軽水炉の炉心計装がもう少し頑強なもので、かつ、多彩なものであったなら、今回の事故はかなり低減されるか、もしくは避けられた可能性すらあるのではないかと反省している。

核分裂システムが詳細に理解され、システムとしての特性が適切に把握されていたのは、定常状態、及びそこから予測しうる範囲での過渡状態であって、今回の事象の場合の炉心挙動(水位や局所的な温度)の適切な把握は考えには入っていなかったのではないかと推測される。これに対する反論は想像に難くなく、今回の事象もシ

ミュレーションを含めて想定範囲であり、炉心挙動は、時間遅れはあっても、ある程度適切な把握範囲にあった、というのは事実であると思う。ただし、それはあくまでも炉心をマクロに捉えての話で、実は大きなトラブルは局所的な揺動が引き金になって起きることから、後付けはできても、時々刻々変化する状況を把握し、迅速に最善の対策をとることからはほど遠い状態にあったことは否定できないのではないかと思います。

システムの破綻は実は気がつかない最弱の部分、つまり皆が重要でないと思っているところから起きることは衆知であり、今回も正にそのような経緯をたどったのではないかと推測する。これは人間のシステムでは避けて通れないことであり、このような事態に対応するためには、いかにシステムの想定外の挙動を把握し、適切な応答時間の内に対処する手立てを探せるか、しかも、柔軟で既成概念に捕らわれない対応ができるかということであり、その点から考えて、炉心計装が本当に適切であったか、それに対して適正な注意が払われていたかを検討することが、原子力の再生には不可欠であると考えます。原子力は現在、極めて厳しい岐路に差しかかっている

が、ぜひバランスが取れ、総合的視野に立った研究開発が進められることを祈念している。原子力システムにおける機能性材料研究開発がその触媒となれば幸いです。

—参考資料—

- 1) ANIMMA (Advancement in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Application) International Conference, 1st Conference in 7-10, June, 2009, in Marseille; 2nd Conference in 6-10, June, 2011, in Ghent.
- 2) F. Jensen, T. Kakuta, T. Shikama, T. Sagawa, M. Narui, M. Nakazawa, *Fusion Eng. Des.*, **42 C**, 449 (1998).

著者紹介



四竈樹男(しかま・たつお)  
東北大学  
(専門分野)原子炉材料, 照射損傷

書評

Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow, 2nd Ed.

Mamoru Ishii, Takashi Hibiki 著, 518 p. (2010.12), Springer 社.  
(定価129,95€) ISBN 1441979840

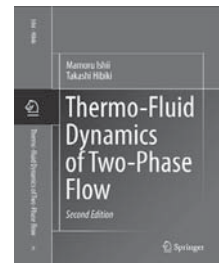
本書は、2005年に米国 Purdue 大学の石井 護先生と京都大学の日引 俊先生(現 Purdue 大学教授)によって著された原子炉熱流動解析の標準的教科書『Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow』の改訂版である。第2版では、第1版で詳述されている原子炉熱流動解析の基礎となるドリフトフラックスモデル、二流体モデルを含む二相流方程式の厳密な数学的定式化や、最新の研究成果である界面積濃度輸送方程式を含む二相流方程式を閉じるために必要な構成方程式に加え、以下の内容が新たに加筆されている。

1. 蒸気発生器、炉心内熱流動解析における有力な解析手法である検査体積中に構造物を含む体系における二流体モデルの定式化(Chapter 16),

2. サブクール沸騰流における1次元界面積濃度輸送方程式の定式化(Chapter 17)
3. 沸騰核密度、気泡離脱径、気泡離脱頻度に関する構成方程式(Chapter 11)
4. 凝縮による界面積濃度消滅項モデル(Chapter 11)
5. バセット力、リフト力、乱流拡散力モデル(Chapter 12)
6. ロッドバンドル体系におけるドリフトフラックスモデル構成方程式(Chapter 14)

本書は、様々な工学分野における混相流問題を解くための基礎から応用までの理論的アプローチをわかりやすくまとめており、原子炉熱流動解析のみならず、各種動力エネルギーシステム、化学反応プロセス等の工学資料や教科書として最適である。また近年、発展のめざましいCFD(Computational Fluid Dynamics)解析に従事する研究者、技術者に対して混相流理解のバックボーンを与えるものと考えられる。

(東京海洋大学・波津久達也)



# ATOMOS Special

東欧編(最終回)

世界の原子力事情 第20回

## ポーランド—新原子力発電所建設に不確定要素

京都大学 杉本 純

中欧最大にして、独、仏、英、伊、スペインに続く EU 6 番目の面積のポーランドは、我が国の約 5 分の 4 の大きさであり、人口は約 3,800 万人、首都ワルシャワの人口は約 170 万人である。第二次大戦後はソ連圏に組み込まれたが、1980 年代の「連帯」に象徴される自由化運動が活発で、国内のみならず、東欧諸国の民主化運動をリードした。そして、89 年 9 月、旧ソ連圏で最初の非社会主義政権が発足することとなった。欧州への回帰を目標に 99 年 3 月に NATO、2004 年 5 月には他の東欧諸国とともに EU に加盟している。ここ数年の経済成長も好調であり、2008 年以降は世界金融・経済危機の影響を受けたものの、2009 年には欧州全体がマイナス成長にある中、唯一プラス成長であった。2010 年にはさらに 3.8% まで回復した。

ポーランドでは原子力発電は長いこと先送りにされてきた。EU 最大の石炭埋蔵量を誇り、電力に占める石炭火力の割合は約 94%、チェコ、スロバキアなどにも電気を輸出している。このように、国内にエネルギー資源が豊富にあったこと、さらに旧ソ連の原子力技術の安全性への懸念から、なかなか原子力発電の導入に踏み切れなかったのである。しかし、石炭の燃焼による大気汚染がひどくなり、ついに政府は 80 年代初期にグダンスク市の北西約 55 km に位置するジャルノビェツ原子力発電所の建設に踏み切った。ところが、86 年のチェルノブイリ事故後、旧ソ連型炉の安全性への不安や資金問題、住民の反対運動などを理由に 90 年に建設を中止してしまう。しかし、エネルギー確保と EU の二酸化炭素放出基準への適合から、2005 年に政府は再度、原子力発電所の建設計画を発表した。2006 年には発電所建設候補地として 27 地点を発表した。いずれも IAEA の指針に基づき安全性と地質特性等を考慮してランク付けがされており、旧ソ連型炉の建設を断念したジャルノビェツが最有力候補に挙げられている。

モスクワに本部のある国際科学技術センターのポーランド出身の前事務次長とはここ数年親しくしているが、彼によればトウスク現首相の出身地がジャルノビェツだからとか。2009 年 1 月に政府は 4 段階のロードマップを採択し運転開始目標を 2022 年とした。

原子力発電プロジェクトの実施主体であるポーランド・エネルギーグループによれば、2 サイトに 1,500 MW 級の原子炉をそれぞれ 2～3 基ずつ建設する計画で、2 号機以降は徐々に国産化を進めるとしている。採用炉型に関しては、2009 年 11 月にフランス電力、2010 年 3 月に米 GE 日立ニュークリア・エナジー社、同 4 月には米ウエスチングハウス・エレクトリック社とそれぞれ原子力協力に関する覚書に署名している。また、原子力安全と規制に関する協定を 2010 年 3 月には日本、7 月には米国と締結した。20 年前のジャルノビェツ発電所の建設中断により、多くの人材をフィンランド、フランス、カナダなどに流出させた苦い過去から、原子力発電導入は、国の近代化を賭けたプロジェクトとしている。

新規原子力発電所導入については世論調査が継続的に実施されている。チェルノブイリ事故直後の 1987 年には、導入賛成が 30%、反対が 39%、態度未定が 31% であり、89 年には各 20%、46%、34% と反対割合が増加し



第 1 図 ジャルノビェツ湖 ©Rzymkowski



第 2 図 建設中止したジャルノビェツ原子力発電所 ©Rzymkowski

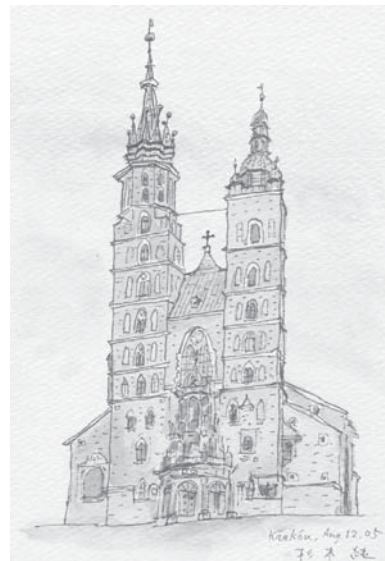
*Poland—Nuclear Power Plant Project with Some Uncertainties* : Jun SUGIMOTO.

(2011 年 11 月 22 日 受理)

た。しかし、21世紀に入り天然ガスへの依存軽減と二酸化炭素放出削減への理解が進み、2008年の調査では、賛成38%、反対45%、態度未定17%と賛成割合が増加し、2009年には各50%、40%、10%と初めて賛成が反対を上回った。2010年9月の調査でも各46%、39%、15%と同様の傾向を示した。しかし、福島事故後の2011年4月に実施された世論調査では、賛成40%、反対53%、態度未定7%と再び反対が賛成を上回った。これと同時に「日本の事故は原子力発電に対する信頼を損なった」という文言に賛成か反対か」という設問に対しては、強く賛成が54%、どちらかと言えば賛成が29%、どちらかと言えば反対が8%、強く反対が3%、態度未定が6%であり、福島事故により国民レベルの信頼が損なわれたことが分かる。

一方、政府レベルでは、2011年5月にトゥスク首相が「原子力は他のエネルギー源の良き代替エネルギーであって、ドイツの脱原発決定はポーランドの決定には何の影響もない」と明言するとともに、7月には原子力の新規導入のための法案を国会で採択するなど、原子力新規導入を着々と進めている。予定では11月中にも入札が開始され、2012年1月末が入札締切、2013年に落札者が決まるスケジュールとなっている。ただし、国民投票を行うべきとの議論もあり不確定な要素もある。

今回もIAEAに勤務する日本人職員を通じて、元IAEA職員であり、現ポーランド原子力環境保護者協会の事務局長を紹介してもらい、世論調査を含むポーランドの原子力状況を教えてもらうとともに、写真も送って頂いた。11月17日に開催された経済省主催のエネルギー・ミックスに関する会議に出席したところ、2030年までに原子力発電割合を15%にすることに出席者はしばしば言及しており、遅くとも2022年には最初の原子力発電が運転開始するはずだ、というのが彼の意見である。



第3図 クラクフ中央市場にある聖マリア教会

余談であるが、ウィーン勤務時代の夏休みに、中欧では最も歴史ある都市の一つ、ポーランドの古都クラクフを訪れたことがある。寝台列車で明け方に着き、中央広場のベンチに家内と座って目の前の聖マリア教会をスケッチしている間、後ろの方で女学生らしき人がバイオリンをずっと弾いていた。ショパンを生んだ国であるが、曲はチャイコフスキーの「くるみ割り人形」だった。人もまばらな早朝の静寂な空間に音楽と絵で至福の時を過ごしたのを覚えている。素人絵で恐縮であるが、その雰囲気は少しでも伝わればと思い、拙い絵も最後に掲載させていただく。

参考：World Nuclear Association Web.

#### 著者紹介

杉本 純(すぎもと・じゅん)

本誌, 53〔8〕, 589 (2011)参照.



# 談話室

## 若手の想い：原子力技術者の若手として、 今、何を実施すべきか？

三菱重工(株) 中里 道, 日本原子力研究開発機構 谷中 裕

2011年度炉物理夏期セミナー(2011年8月3～5日、松島)の若手研究会(8月4日、2時間)では、50名以上の若手が集い、「原子力技術者の若手として、今、何を実施すべきか？」について議論を行った。今後、炉物理部会やYGN等で意見を集約し、有志による活動を開始していきたい。

### 若手研究会とは？

炉物理部会の若手研究会とは、炉物理夏期セミナーにおいて毎年、実施している若手のみでの研究会(35歳以下が一つの目安だが個人の判断を優先)であり、若手の懇親と情報共有を目的としている。これまで学生の研究発表を主に実施してきたが、3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による福島第一発電所の事故が社会に与えた影響の大きさを鑑み、今年度の炉物理夏期セミナーでは題記のディスカッションを実施することとした。これに加えて、筆者を含めた何人かの若手技術者が、今回の大事故を受けながら社会に対し具体的な行動を起こすことができている現状に対する“もどかしさ”や世論の動きに対する“危機感”を感じており、これに対する若手技術者の率直な意見を聞いてみたかったことも実施理由のひとつである。

### 若手研究会での実施概要

今年の若手研究会では、幹事から事故の概要説明とこれに対する個人的な見解を述べた後、全体ディスカッション(15分程度)、グループ・ディスカッション(6グループ)(1時間)、全体発表(30分)を行い、できるだけ多くの人の意見を聞けるようにした。

図に、若手幹事(報告者)からの説明の様子を示す。若



若手幹事からの全体概要説明

手幹事からは、まず、事故の概要・現在の状況を説明した後、参加者が積極的に発言できるように事故以降の個人の正直な意見として、下記を参加者に説明した。

- (1) 原子力技術者の一員として感じたこと(謝罪とこれまでの反省点)
- (2) 今後の原子力の必要性(持続的発展・地球温暖化対策・わが国のエネルギーセキュリティ・経済性の観点から)と可能性(設計対応による安全性向上)
- (3) 世論の現状と自身の考えとの乖離
- (4) そのために何を実施すべきか?(技術者として、定性的でなく定量的な意見の発信と顔の見える対話が重要)
- (5) 若手の特徴(専門家と国民の橋渡しの役割が可能。今後の日本の将来を背負う人であり、積極的な意見の発信も重要)

その後の全体/グループ・ディスカッションの様子は、ここに示すように、非常に多くの若手が集まっていたこと、また、その全員が、長時間のフリーディスカッションに関わらず、議論が途切れることなしに、時間を惜しんで熱心に議論していたことが印象的であった。なお、この若手研究会の後も、多くの参加者がいくつかの部屋に集まり、深夜まで様々な議論を行っていたことも追記しておく。

### 若手の想い

全体/グループ・ディスカッションでの主な議題とそれに対する若手の想いを次に記す。

- ・事故を受けて感じたこと。今後の原子力のあるべき姿は？
- 原子力はいまだ確立された技術でないことを実感。



全体/グループ・ディスカッションの様子

ただし、これに目を背けてはいけないと思う。これまでのエネルギー源(木→石炭→石油)でも様々な困難に直面したが、克服してきたはず。今後、原子力の代替エネルギーが実用化されれば当然それを使用すべきであるが、現状、そういうものはない。ただ、原子力が最高の技術とも思っておらず、現在、難しい立場にいると感じることもある。

- 国益(日本人全員がご飯を食べられること)が最終目的であるが、そのためにはエネルギーが非常に重要である(この不足が過去の戦争という悲劇にもつながった)。このエネルギーの安定供給に最適な電源として原子力があると考えている。
- 非常に長期間エネルギーを供給でき、かつ、数十年間の実績もある原子力を捨てることは未来の子供達のためにならないのでは？ 将来のためにも、原子力の炎は灯し続けるべきと思う。
- 必要性のみではなく、メリット/デメリット双方を天秤にかけた議論、また、定量的な説明が重要。
- 不幸な形からではあるが、今回、国民全体でエネルギー問題について議論できる状況になったことは非常に貴重な機会と感じる。ただ、どうやったら国民全体で議論ができ、将来を見据えた正しい判断が導けるかについて、プロセスを十分検討する必要がある。なお、一部の人の思い付きが、議論されずに政策に反映されることは絶対に避けるべき。
- 原子力について“よくわからないから怖いもの(原子力=原爆)”と捉えている人もいるが、これは情報発信の不足が原因であると感じる。今後は、顔が見え、また、非難も全て受け止める形で正確な情報を発信するヒト、また、場の提供が必要と感じる。
- “見たくないものは見ないようにする”という人間の心理もあるので、数十年間の原子力の安全実績の下、安全に対してどこまで厳格に接することができていたかの検証が、まず必要(元々あったはずの原子力に対する恐れは今もあるか？どこかに落とし穴があるはずだという追及を継続してきたか？)。一方、原子力は過度に特別視されており、簡単な設計変更も実施しづらい状況もあった。このようなことが更なる安全の追及の足かせになっていた可能性もある。今後は、工学の分野に合わせて、技術を日々改善していけるような体系にもっていくことも重要。
- ・原子力技術者の若手として、今、何を実施すべきか？
  - 今後、何を実施するにしても、若手が絶対にしなくてはいけないことは“勉強すること”である。
  - 原子力に関して、今、自分が実施していることを今後も責任を持って持続していくことが重要。
  - 信頼を得るには時間が必要。再度、原子力が受け入

れてもらえるまで、地道な努力と絶え間ない教育を継続する必要がある。

- 若手の草の根運動による情報発信(中学への出張授業等)を実施していきたい。
- 原子力と他電源のメリット・デメリットを定量的に記した資料の作成と情報の発信が必要。特に、相手に判断を委ねる形での情報発信が重要と感じる。
- 顔が見える形で情報を発信することが必要と感じる。実際に、原子力技術者と接することの多い立地地域の人たちは原子力に対する反対意見が少ない。

#### 若手研究会を実施して

今回の議論では、グループ・ディスカッションを中心としたため、具体的なアクションプランの作成まで実施することはできなかったが、若手の多様な意見を聞いたこと、特に参加者全員の問題意識と危機感、また、社会に対して何らかを実施していくべきとの想いを感じられた点で意味のあるものであったと感じる。また、原子力発電所は「巨大システム」であるため、様々な部会・機関・活動団体との提携も視野に入れ、国民全体で議論を行うためにも炉物理部会員(特に若手)は積極的に活動基盤を広げていく必要があると感じた。一方、若手幹事としては、今後、学会での炉物理部会セッション・YGN等で意見を集約し、有志による活動を開始していきたい。

今回の事故や本企画を踏まえ、これまでの自身の視野の狭さ・行動力のなさ・経験不足を強く感じた。

若手研究会の最後にベテラン技術者の方から次のアドバイ스가あった。“今回のことを機に、若手の方には、まず、できるだけ多くの身近な人に、原子力について説明してもらいたい。そうして経験を積み、周りの人が何を望んでいるか、何を実施すべきかのバランス感覚をしっかりと身につけ、将来、大きな舞台で正しいことを実施できるようにして頂きたい。”

実際、今回の企画では責任を持って事前準備等を行う必要があったが、これにより自身が大きく成長したと感じていたため、この言葉は非常に身に染みた。これらを踏まえ、個人的に考える“今後、原子力技術者の若手として実施すべきこと”は、“定量的で正しい知識を身につけるため、日々、研鑽すること”、また、“社会との関わりを念頭に、多くのことを自身の問題として捉え、自身が正しいと考えることを自身のできる範囲で実践し、これに絶えず責任を持つこと”と感じる。

今回の事故を受け、一人一人が悩み感じたこと、新たな決意を今後も忘れずに実践していくことが必要不可欠である。本記事がその一助になれば幸甚に存じます。

(2011年 9月29日 記)

## ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

### われわれは裁判官ではない

東奥日報 福田 悟

福島第1原発事故は私にとっても大きな衝撃だった。学生時代に原子力問題に興味を持ったのはチェルノブイリ原発事故がきっかけ。まさか同原発事故と同じレベル7 (INES) の事故が国内で起きるとは…。

7月から連載企画「フクシマの教訓」を始めた。青森も全国有数の原子力立地県。福島悲劇を繰り返してはならない—との思いからだ。連載第2部は「東電元幹部らの悔恨」と題し、豊田正敏、竹内哲夫、二見常夫の東京電力元幹部3氏へのインタビューを中心に記事をまとめた。3氏の証言は驚きの連続だった。

「耐震設計から言うと、非常用電源は原子炉建屋に置くべきだった。(工事の)最初の段階でGEから設計図面は来たが、私を含め、その図面は見えていないし(タービン建屋地下にあるのに)気付かなかった」

「(非常用電源の設置場所を)思い切っってこういう風に変えよう—ということになると、実績がないこともあり、モチベーション(動機付け)が働かなかった。原子力は実績主義だから」

「まったく資格・能力がない人(原子力安全・保安院職員)が施設に検査に来る。ひどかった。本当に形式だけの検査だった。それでずっとやってきた」

東電元幹部たちはいわば「被告人」の立場。大手週刊誌は「東京電力の大罪」と銘打った特別号まで刊行した。元幹部の1人は「雑誌記者に追いかけ回され、参った」とこぼしていた。そんな状況の中、取材に応じてくれたことには感謝している。学者らに批判的なことを語らせるのは簡単だ。しかし、私は(かつての)当事者から反省点や教訓を引き出したかった。それが最もリアリティがあり、説得力があると思ったからだ。

元幹部3人に掲載紙を郵送したところ、1人から電子メールが届いた。「東電という巨大組織の中で、勇気をもって提言し、大きな声で社内議論を巻き起こすことをせず、いい子になってしまいがちだったことに、自分の至らなさを感じる次第です。木川田さん(東電元社長)、平岩さん(同)等が持っていた電力会社創業の気骨が次第に失われていたと思います」

文面には現役時代を振り返っての、こんな悔恨がうつられていた。会社の成長や時間の経過とともに社員は当初の事業目的を忘れ、地域住民より社内上層部の目を気にするようになったのか。大勢順応、保身、驕り…。これらは何も東電だけでなく、どの組織も陥る可能性がある「落とし穴」(劣化)ではないかと感じた。

事故後、全国的に脱原発・反原発の機運が盛り上がっている。9月の東京・明治公園での脱原発集会には6万人が集まったという。あれだけの事故の影響の広がりを見せつけられては、当然のことかも知れない。

ただ、最近の原発報道には違和感を覚える。世論を誘導しているかのような報道も見受けられる。脱原発が「正義」で、原発は「悪」とでもいわんばかりだ。

しかし、われわれジャーナリストは科学の専門家ではないし、ましてや検察官や裁判官でもない。物事には必ずメリットとデメリットがある。今後も一定割合の電力を原発に頼るのか、あるいは脱原発を目指すのか、決めるのはマスコミではなく、あくまで国民だ。多様な情報を読者に提供して判断材料にしてもらうのが、われわれマスコミの役割ではないのか。

連載の中で「津波に耐えた原発」として女川原発、東海第2発電所を取り上げたのも、さまざまな判断材料を読者に提供したいとの思いからだ。何より、これらの原発と福島第1原発との明暗を分けたのは何だったのか、個人的にも知りたいと思った。

地方紙記者の視点から、原発の安全性向上策を1つ。ごく簡単なことだ。原発で働く電力社員はもちろん、その家族も原発立地自治体に住むことだ。自分の家族が原発周辺に住んでいれば、社員たちも施設の安全性向上に本気で取り組むのではないか。住民の安全を守る=家族の安全を守る—ということなのだから。

青森県内の原子力施設で働く社員も単身赴任が多く、週末ごとに自宅のある仙台、東京方面に帰ってしまう。家族同伴の場合も、立地自治体ではなく、近隣の都市部に住んでいる。恐らく、福島でも似たような状況だったのではないか。会社の経営を支えている(危険)施設を受け入れてくれた自治体に感謝しているのであれば、そこに家族で住み、原子力施設の安全性向上にたゆみなく取り組んでもらいたい。

以上、学会誌には似つかわしくない非科学的な提言でした。

(2011年11月7日 記)

福田 悟(ふくだ・さとる)

東奥日報 報道部次長

1965年生まれ。88年弘前大学卒業。東奥日報社入社。政経部、むつ支局、三沢支局などを経て現職。下北半島の原子力施設・計画を約15年にわたって取材。





# 幅広い内容の記事を望む声が多く

社会とリスクを共有する必要性も

(11月号の Web アンケート結果)

「原子力学会誌」11月号に対して寄せられた Web アンケートの結果をご紹介します。今回は75名の方から、回答がありました。

## 1. 高く評価された記事

Web アンケートでは、各記事の内容および書き方について、それぞれ5段階で評価していただいています。11月号で高く評価された記事について、「内容」、「書き方」に分けてそれぞれ上位4件をご紹介します。

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	解説	シビアアクシデント対策整備の経緯と「残余のリスク」	4.35
2	解説	日本人の食物摂取による実効線量の評価	4.18
3	解説	海洋における人工放射線核種の動態	4.13
4	連載	東日本の巨大地震に学ぶ(2) 世界の変動帯と安定大陸	4.06
4	解説 シリーズ	ヒューリスティックな最適化手法とモデリング(1) 最適化問題とは	4.06

第2表 「書き方」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (書き方)
1	時論	ヤッカマウンテン処分場計画の終焉と今後	3.94
2	時論	台湾の原子力動向と日本	3.81
2	ATOMOS Special	世界の原子力事情(18) 東欧編 ハンガリー	3.81
4	連載	東日本の巨大地震に学ぶ(2) 世界の変動帯と安定大陸	3.76

今月号は、「内容」と「書き方」で上位記事が分かれた。

## 2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 今月号の内容は、原子力学会誌のレベルアップが顕著である。
- (2) 今後掲載を希望する記事として、わかりやすいものから専門的な内容に至るまで幅広く記事を掲載してほしい。
- (3) 「掲示板」に書かれるまでもなく、学会員すべての真摯な対応が求められていることは当然である。学会員の共通な認識になっていないとしたら、学会として何らかの対応が必要である。

## 3. 編集委員会からの回答

- ・(2)については、編集委員会も同じ認識で編集企画・活動をしています。
- ・原子力学会誌「ATOMOS」が、池袋のジュンク堂書店本店と内幸町プレスセンター店で一般販売されることになりました。一般の人が読む機会が増えることを期待します。

学会誌ではこれからも、会員の皆様により質の高い情報を送りたいと考えております。記事に対する評価はもとより、さまざまな提案もぜひ、Web アンケートでお寄せ下さるようお願いいたします。