

座談会

1 「想定外」にどう対応するか —福島原発事故と、その後を考える

畑村洋太郎, 田中 知, 北村正晴, 滝 順一
(司会)佐田 務

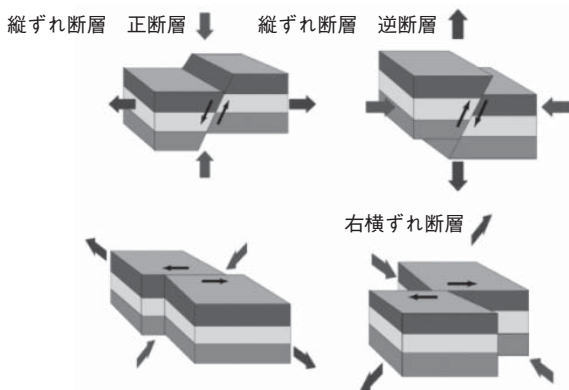
複数の過酷事故を起こし、今もなお10万人以上が避難生活を余儀なくされている事態を引き起こした福島第一原子力発電所事故。3年が経過した今、有識者4人がこれから解決していかなければならない課題について論じた。



解説

19 活断層と地震の科学 —活断層の長期評価と今後の課題

ここでは断層や活断層などの言葉の定義について解説する。その上で活断層のリスクの評価や、今後の課題について述べる。 **重松紀生**



断層のずれのタイプ (文部科学省自身調査研究推進本部より)

時論

10 「反原発でサルになる」考

故・吉本隆明氏が残したこの言葉の意味を、私なりに考えてみた。 **最首公司**

12 放射性セシウムのゆくえ

東京大学農学部は福島県で、放射能汚染についての調査研究を進めてきた。 **中西友子**

解説シリーズ

レジリエンスエンジニアリングの動向 (2)

35 組織安全とレジリエンス

組織が「強く」あるためにレジリエンスは必須である。そのための条件と、組織がなすべき管理について紹介する。 **小松原明哲**

解説

25 福島原子力発電所の事故対応および 廃炉のための遠隔操作・ロボット技術

福島第一原子力発電所では、高放射線環境下でロボットや遠隔操作機器が活用されている。その現状と技術開発の取り組み、そして今後の備えについて述べる。 **浅間 一**

30 「原子カムラ」の境界を越えるための コミュニケーション(2)—「フォーラム」と いう取り組み

福島事故後によく聞かれるようになった「原子カムラ」。この言葉の背景には市民と専門家の認識のギャップがある。私たちはそれを乗り越えるための試みを始めた。 **木村 浩**



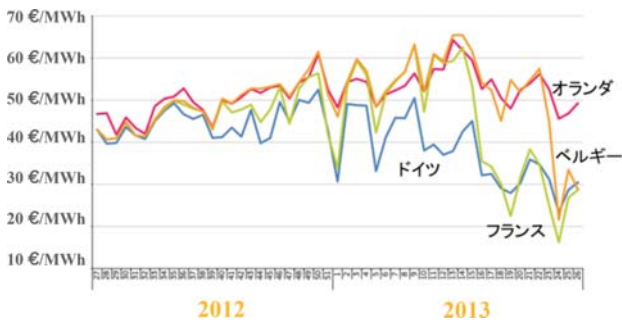
フォーラムのもよう (イメージ)

解説シリーズ

出力が変動する再生可能エネルギー発電の大量導入と電力システムの進化（3）最終回

40 運用ルール、市場設計と最適な設備形成

出力が変動する再生可能エネルギー電源を導入する場合には、電力システムにおける需給調整の課題が立ち上がる。それを解決する技術と制度、そして最適な設備形成について解説する。 荻本和彦



ドイツ、ベルギー、フランス、オランダの週間の卸電力市場価格の推移

解説シリーズ

核燃料サイクルフロンティア（3）

46 海外ウラン資源開発株式会社によるウラン資源開発と最近の開発動向

海外ウラン資源開発株式会社はアークタ鉱山などで生産したウラン精鉱取引分を日本の電力会社に販売し、福島原発事故前は日本で必要なウラン燃料の10～15%を安定して供給していた。 浜井富生



カナダ・マックリーレンレイク鉱山のスー地区露天掘りピット

14 NEWS

- 原子力学会が春の年会を開催
- 放射線リスクコミで施策パッケージ
- 原発運転停止で75%の企業が売上減少
- 海外ニュース

解説シリーズ

世界の原子力事情（6）

52 内外に積極的に原子力展開するロシア

ロシアの原子力開発は、旧ソ連時代のチェルノブイリ事故とソ連崩壊後のしばらくの間は停滞した。しかし21世紀に入ると、原子力における存在感を急速に高めている。 小林雅治



建造中の海上浮揚型原子力プラント

報告

57 CPD ノススメ(3)最終回 日本原子力学会 CPD 制度の目指す姿 —検討状況と課題

伊藤晴夫

- 51 From Editors
- 60 新刊紹介「放射線計測ハンドブック 第4版」
伊藤晴夫
- 短信 熱流動部会が交流フォーラム開催
- 61 会報 原子力関係会議案内、主催行事、人事公募、意見受付公告、新入会一覧、英文論文誌 (Vol.51, No.5) 目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会ホームページの「目安箱」
(<http://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>) にお寄せください。

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



想定外にどう対応するか 「福島原発事故とその後」を考える

元 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会委員長 畑村 洋太郎

日本原子力学会 東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会委員長 田中 知

東北大学名誉教授 北村 正晴

日本経済新聞社論説委員 滝 順一

司会 佐田 務（本誌）

「全体的で統合的な視点に欠如があったことと、考え落としが残ることを前提にした発想がなかった」――。元政府事故調査委員会委員長の畑村洋太郎氏は福島原発事故について、こう指摘しました。複数の過酷事故を起こし、今もなお10万人以上が避難生活を余儀なくされている事態を引き起こした福島第一原子力発電所事故。3年が経過した今、有識者4人にこれから解決していかなければならない課題について論じていただきました。

想定外はなくせない むしろ、それを前提に考える

佐田 東京電力福島第一原子力発電所事故から3年がたち、本誌では、事故の中間的な総括となる特集記事を3月号に掲載しました。今日は、福島原発の現状や学会誌特集記事から抽出された論点や、現在までの状況の進展などをもとに、今後の課題を考えます。まず畑村先生から、これから取り組むべき課題、調査報告書に書き込めなかった重要な知見などをお願いします。

畑村 政府事故調では事故発生から1週間ぐらいまでのことしか取り上げていません。その間に起きたことは

もちろん、重要です。けれども福島原発の事故の本質は、それ以降に起こったことと、発電所の外側で起こったことではないかと思います。政府事故調の報告書ではその点を扱っておらず、事故の全体像をとらえるには至っていません。なお学会誌3月号に掲載された32本の記事を、ていねいに読みました。これらの記事も同様に、今申し上げたような視点がないままのものが多くを占めています。

ここでは発電所内と所外で起こったことに分けて述べます。

発電所内で起こったことのうち最も大きなことが、配電盤の水没です。それで燃料の溶融などの一連のことが

らが起こりました。電源喪失が起こったから事故が起きたと説明されるケースが多い。外から電源を持ってきてつなげば事故は防ぐことができたのに、つなぐことができなかつたから事故が起きたと多くの人は理解しています。そこに、誤解があります。

一方、発電所の外では放射能汚染が広がって避難をせざるを得なくなり、さらには除染と帰還が大きな問題となりました。原発を利用するのであるならば、事故は当然起こるものとして、防災だけでなく減災も考えるという視点をもたなければなりません。

そのためにはまず、被害拡大防止策を事前に策定する。計画の妥当性も確認しておかなければなりません。そこでは住民への十分な周知と住民の理解が必要です。このようなことができるようにするためにも危険なものを危険なものとして議論できる文化の醸成が必要なのですが、実際にはそれを見据えた方向には今も進んでいません。

学会誌3月号の特集記事で決定的に欠落しているのが「気がつかないこと、考え落としが残る」ということをまず認めなければいけないということ。私たちの「知」は、「気づいて備えている領域」と「気がついていないので備えていない領域」があります。気がつかずに備えていない領域が最後まで残り続ける。それを前提に対応することを考えなければなりません。

確率論も、気がついているところを評価するには有効です。けれども、みんなが気がついていないことがらは、その対象から漏れる。それをみんなは意識していない。まじめに考えれば、考え尽くすことができると考え



私たちの「知」には、「気がついていないので備えていない領域」が最後まで残り続ける。だから、それを前提に対応する必要がある。

はたむら・ようたろう／東京大学大学院機械工学科修士課程修了。東大教授、工学院大学教授などを経て畑村創造工学研究所長、消費者安全調査委員長、東大名誉教授。専門は、失敗学、想像的設計論、ナノ・マイクロ加工学、知能化加工学。

ること自身が間違いなんです。

事故や災害を考える時に意識しなければならないキーワードが、「全体像」と「共有」です。全員が共有すべきものとしては情報や知識、使命、意図・目的などがあります。そして十分な情報が得られていない状態では最悪を想定すること、平時と有事を切りかえること、経験や過去の事例を十分に学び想定に生かすこと、さらにそれを今後の状況変化の予測に生かすこと、さらには複合災害という見方が必要です。

一方で学会誌3月号には、大切なことが書いてある記事がありました。英国では原子力に関わる全体像を理解する人間を作っていたということが、それです。英国主席科学顧問のベディントン卿が福島事故直後に、実に的確な判断をして情報を発信しました。英国では狂牛病対策をめぐる政府の失敗を教訓にして、全体を把握して情報発信する機関と人間を育成しています。それが今回の場合、きちんと機能しました。さらにこの人は、事故直後にわずかししか情報がないうちで、事故の規模はチェルノブイリ事故より小さくて、30キロ圏外は健康の影響を心配しないでいいと断言しています。こんな大事な判断や情報発信が、日本ではできませんでした。

全体像を理解し、把握する。そこではマイクロとマクロの両方のメカニズムも考える。定性的、定量的に考える。時間軸を入れて考える。経験や他分野から学んだ知識から全体シナリオを想起する。起こり得る事故とその推移をあらかじめ考える。これが重要です。

原子力というのはまだ、未熟な技術です。原子力を進める人たちはそうは思っていないかもしれないけれども、他産業に比べたら幼稚な部分がたくさんあります。一般的に一つの産業はだいたい200年ぐらいでほぼ成熟飽和するのですが、原子力はまだ50～60年しかたっていない。だから、今のままだとこれから140年間に、さらにいろんな失敗をやる可能性があると思っています。今回の福島事故で終わるわけではない。

次が避難と除染の問題。除染ができなければ帰還できないけれども、年間1ミリシーベルトという目標の見直しは絶対にやらなければいけません。それをもっと声高に叫ばなければならない。さらに除染は集めない、運ばない、積み上げないというこの三つが大原則なのに、政府がやっていることは集めて運んで積み上げること。この方式はいずれ、破綻すると思います。私が提唱しているのは、「その場処理の深穴埋め」という方式です。この方式では、その場に穴を掘って、ただ埋める、それだけです。私達は私的に飯館村で実際に、この方式の実験をすでに行いました。一度土壌に固着したセシウムが再び水に溶けだすことはほとんどないと言われていますが、この実験でも、セシウムは全然出てきません。

一方で震災関連で亡くなっている人がどんどん増えています。福島県だけで一日に一人から二人ぐらいのペー

スで亡くなっている。避難と除染の考えを見直さない限り関連死はますます増えると思います。

佐田 田中様は3月8日に、学会事故調の最終報告をまとめられました。今後、私たちが取り組むべき課題についてお話しを。

田中 学会事故調は原子力の専門家で構成されている学会の責務として、事故とそれに伴う災害の実態を科学的、専門的な視点から分析して、その背景と根本原因を明らかにするというを目的として発足したものです。報告書をまとめた後もフォローアップする専門委員会をつくって、事故の進展や原因、放射性物質の放出の状況や、デブリや汚染水への対応、リスクコミュニケーションなどの問題を、しっかりと検討して発信していきます。

なお学会には、原子力安全や再処理・リサイクル、社会・環境などのさまざまな部会、連絡会があります。学会事故調は、その部会等の代表の人で組織しました。事故の技術的な側面だけではなく、原子力安全の基本的な考え方や、防災・減災、環境修復、放射線影響などさまざまな観点、あるいは総合的な視点から検討しました。さらに専門家は自らの役割ということをいつも自問しなければならぬということを申し上げてきました。長い時間をかけて議論していく中で、技術者や専門家としての使命や役割がしだいに共有されてきたと思います。

ベディントン卿は私も存じており、本当によく勉強されています。総合的にシステムとして見る検討が大事だということ、自らが体現しています。実は、先進国で科学顧問を置くようなシステムがないのは日本だけです。総合的、システム的に考えるという視点は重要であり、学会事故調でもこの点は注意したところです。

学会事故調の報告では「安全上、重要な主要機器は地震では損傷していない」と評価しました。また、事故の直接要因は外的事象、特に津波対策と、過酷事故対策が不十分であり、緊急時対策や事故後の対策、種々の緩和回復策が不十分であったことだと指摘しました。その直接要因をもたらした背後要因として、五つ指摘しています。専門家の自らの役割に関して認識の不足、事業者の安全意識と安全に関する取組みの不足、規制当局の安全に対する認識の不足、国際的な取組みや共同作業から謙虚に学ぼうとする取組みの不足、安全を確保するための俯瞰的な視点をもつ人材や組織運営基盤が形成されていなかったことです。

これを踏まえ、5分野にわたる提言をまとめました。一つ目が原子力安全の基本的な事項に関わるもので、原子力安全の目標の明確化と規制基準の体系化や、深層防護の理解の深化と適用の強化。二つ目が直接要因に関する事項で、外的事象や過酷事故対策の強化、緊急事態への準備と対応体制の強化、これには防災や減災も含まれます。さらに原子力安全評価技術の高度化も求めまし

た。三つ目が組織的なものに関する事項で、専門家集団である学会や学術界、あるいは産業界、安全規制機関の取組みはどうあるべきかということについて書きました。四つ目は共通的な事項として原子力安全研究基盤の充実強化、安全研究をもっとしっかりしなければならないということ。五つ目は今後の復興に関しては、除染をどのように進めていくべきか等。これらについて網羅的、俯瞰的、システム的に見る視点で提言をまとめました。これらの提言によって具体的にどう変わるのか、安全文化が現実的にどう向上していくかということが、大事なところだと思います。

さらに報告書では、「これらの提言を自らへの問いかけととらえ、真剣に取り組むことができない組織と専門家は、原子力に携わる資格がないと、自覚しなければならない」と記載しています。

北村 原子力安全の専門家はそれだけを研究していると、視野狭窄になるおそれがあります。例えば医療安全や航空安全に携わっている世界の指導的研究者の多くは、領域横断的に安全問題に関わっています。日本だけが領域ごとに独立して縦に、深掘りしています。これに横串を通していかないといけません。そのことが、広い視野を持ったゼネラリスト的な学者の存在にもつながります。他分野との交流を真剣にやるべきではないでしょうか。学会誌3月号に掲載された32本の記事も、執筆者がそれぞれの立場から言っているにすぎません。全体を見るとという視点のものはごく少数です。

さらに、言葉としての提言は山ほど出てきます。大事なのはその先で、提言をどのようにして実践に結びつけるか。そのつなぎの部分の提示することが、我々研究者



東海第二や女川では適切な判断があった。サクセスパスを学ぶことも重要。

たなか・さとる／東京大学大学院工学研究科博士課程修了。東大大学院教授。専門は、核融合工学、放射性廃棄物管理、核燃料サイクル、原子力と社会。

の責務ではないか。現場で泥や汗にまみれて活躍している方々が、それを実践できるような具体的な方法を提示することが重要だと思います。

滝 編集委員会がまとめた資料の中で、私の思いと一致したのが、「専門家による知の追求への最善の努力」という言葉です。一般の人々が専門家や科学者に期待するのは、それぞれの分野で、その人が持っている知の力を最も有効に生かして原子力の安全、あるいは日本のために使っていただきたいということ。これを過去と未来に分けて述べます。

事故はどうやって起きたか。あるいは日本の安全規制はどこがまずかったのか。どうして過酷事故対策やPRAを重視しなかったのか。どうして海外の知見に学ぶことができなかったのか。これらについて研究者も改めて検証していただき、今後の規制のあり方や安全文化の構築に対して建設的な提言をしていただきたいと思えます。

さらに事故直後のベディントン卿のように、日本では専門家がその時の状況を、俯瞰的に見て国民や海外に適切な情報を発信できませんでした。また、かつて吉川弘之氏が学術会議の場でユニークボイスをつくらうという発言をされたけれども、その後はどうなったのか。原子力学会にとどまらず、広い意味での科学者の発信力はそのあり方が問われたままで、放置されたままではないか。

未来の話ですが、原子力委員会の使命が縮小されます。けれども長期的に見た原子力の研究や技術開発のあ



提言を言うだけでなく、現場がそれを実践できるような具体策を提示することが、専門家には求められている。

きたむら・まさはる／東北大学大学院工学研究科博士課程修了。東北大学教授を経て(株)テムス研究所所長。専門は、原子力安全工学、リスク評価・管理学。原子力に関する市民対話実践研究やレジリエンスエンジニアリングに基づく安全高度化研究を推進。

り方は一体、誰が決めていくのか。ミニマムな原子力委員会と縦割りの官庁では、何の舵取りがないままに、その時のムードやメディアの論調によって左右されながらやっていくことにならないか。例えば「もんじゅ」は、そういう状態で揺れています。推進、反対に関わりなく、長期的な視点は必要であり、これは学会が考えるべきことではないでしょうか。

佐田 原子力をめぐる政策を誰がどうやって決めるのか、理論知をどのように実践知へと結びつけるのかという指摘をいただきました。また政府事故調は「深刻なシビアアクシデントは起こり得ないという安全神話に捉われていたがゆえに、危機を身近で起こり得る現実のものとして捉えられなくなっていたことに根源的な問題がある」と指摘しています。この想定外については、畑村先生が指摘された「科学の限界」と、滝様が指摘された「知の追及への最善の努力」をしたかどうかという話に関わります。これらは同じ対象のことを論じていると思えます。

なお、編集委員会では特集記事の論点をまとめました。そこでは「専門家が知の追求に最善の努力をしたかどうか」を分析した要素として6点を抽出しています。1番目が専門家には意図と能力が備わっていたか。2番目が専門家はそのことを本当に重要だと認識していたかどうか。3番目が実現可能性の認識。そして4番目が組織規範やタスク認識。これは国会事故調で指摘されましたが、組織成員は自分が所属する組織の利益に反することは自分の意識から除外してしまうようなことがなかったか。5番目が当事者の役割と権限、そして、6番目が誠実さと真摯さ。これらの問題の多くは今も、全く解決されないままに残されているのではないかと。

■ 専門家が自らの局所的な仕事に甘んじ 全体を俯瞰する努力をしていない

北村 そういう言葉や提言が現場にどうして定着していかないのでしょうか。それは、ベディントン卿のようなゼネラリストの不在ということとも絡んでいます。みんな、ローカルな問題解決は一生懸命やっています。怠慢ではなくて目先の問題に集中して、ほかには目を向けない部分があります。そういう意味からいうと、君はこれもやらなければいけないよという俯瞰的な視座に立てる人を、日本の社会が生みだすことができるかどうか。また、理念を現実ちゃんとブレイクダウンして、関係する人たちに実行させることができるかどうか。畑村先生が指摘された問題点について危惧すべきポイントは、大多数の人がそれは自分の仕事ではないと思っている、まさにそのことです。

畑村 それを自分の仕事だと思う人が日本のどこにもいないままで、全部がきちんと動いているはずと思っ

て、自分が局所的にやっていることを正当化します。全体を見るということを、誰もやっていません。福島事故後も、さまざまな対策を省庁は縦割りで扱おうとしています。このような大きな問題は、縦割りで扱えるようなものではありません。原子力の場合、例えば行政組織のあり方や考え方自体が変わらないと、きちんと対応できない。実は分割して考えてはいけないものもあります。日本で統合、総合、俯瞰などという物の見方ができるようになるには、これから300年かかるかもしれません。

田中 まさしくそうだと思います。ベディントン卿は、これは誰に聞けばいいかという、すごいネットワークを持っています。その人たちが本気になって考えて教えてくれる。これは英国の長い歴史の中でできてきたのだと思います。日本は縦割りで、何かあっても自分の責任ではない、そんな言い訳ばかり。この問題の本質的なところは、日本の文化に関わるかもしれないけれども、そこに踏み込まないと変わらないかもしれません。

全体的には変わるのは大変ですが、原子力をこれからどうするのか、廃炉や除染をどうするのか。目の前にたくさん課題があります。問題の本質を見据えて、可能な限り俯瞰的、総合的、システム的にやっていかないとはいけません。原子力学会は「知」の本当の限界を見据えてそこを凌駕し、何とか止揚して次のところに具体的にいかないと、世間の人からは信用されません。

佐田 原子力学会の中でさえ、原子力安全について本格的に横断的に議論したのは、学会事故調が初めての機会だったと思います。各部会はそれなりのセクショナリズムを持っています。さらにそれぞれの分野だけでなく、各分野の縦の各層においても、コミュニケーション不全があります。原子力に関わる主体のうち頂点にあるのが省庁で、電気事業者、主要メーカー、協力会社という上下関係があります。下は上に向かって物が言えない構造が部分的にあります。そんな中で全体性、知の統合性などというのは、絵空事だという感じがします。

滝 英国の科学諮問委員には良識や高い倫理意識と、専門的知識を備えたゼネラリストであることが求められます。日本ではそれが可能でしょうか。また、どんなに考えても我々には見落としがあるという感覚が、逆に一般の人にはあると思います。だから、専門家や科学者が「これで万全です。これで100万年に1回ぐらいのレベルまでリスクは下げられました」といっても、どこか見落としがあるのではないかと心配します。専門家が自分には見落としがあるということを理解しないと、一般の人々は安心できません。

北村 私は反対派や懸念する人たちと何度も議論してきました。このような場では、専門家が考え落としがちなことについて、さまざまな問いかけを受けます。時には意地悪く。けれどもそのことによって、専門家がこれまで考えたことがないようなことに対して、それでいい

のかという問いを、実は投げかけてくれてきました。それは「市民から学ぶ」ということにほかなりません。市民と専門家のコラボレーションが必要だと思います。

田中 専門家というのは、ある領域の中の狭い範囲での専門でしかありません。逆に言うと、自分の専門的知識の限界をわからなければいけない。さらに全体を見ようとするならば、さらにどの部分を勉強しないといけないことがわかり、同時に畑村先生が言われたようにどこが抜けているかわかります。その上で、さらに抜けがあることを想定しなければならない。

佐田 全体性を見据えた知見をどうやって獲得するか。ベディントン卿のような個人を育てるという選択肢もありますが、それが無理なら制度としてベディントン卿に匹敵するものをつくる。見落としを拾うための方策として、北村様は「反対派のような多様な視点にこそ想定外の宝庫がある」ことを指摘されました。また田中様は、専門家自らが限界を知り、抜けがあることを常に意識しておくことを指摘されました。

田中 同時に、専門家はいつも自分の知識を伸ばす努力が必要です。

懸念する人たちの意見は、想定外の宝庫

畑村 事故が起こる前になぜ、さまざまな問題に気づけなかったのか。少なくともきちんと物を見て考えていれば、危なさやおかしな点には必ず気がついたはずで。自分たちの見ている範囲はこんなに狭い、自分らは学ばなければいけないことがたくさん残っている。全体



科学者の発信力は事故後にそのあり方が問われたが、今も放置されたままではないか。

たき・じゅんいち／早稲田大学政経学部卒。日経新聞編集委員、論説委員。科学技術政策、原子力、宇宙開発、医学などを担当。

としては大きな抜けがまだたくさんある可能性があることを前提にした対応をするというのが、大事です。

そういう認識に立った時に、原子力を反対している人も賛成している人も、同じ土俵に立てるのではないかと。反対している人のほうがむしろ、的確な指摘をしていたのではないかと。常に考え続けていかなければいけないのに、考えることをやめて現状を正当化してしまう。相手がうんと言わないのは、相手に問題があるというような言い方でやっていた部分がありました。しかし、実はその相手の言い分が、正しかったのかもしれない。

北村 今度の事故が教えてくれた最大の教訓は、それは起こらないと行ってすそ切りしてはいけないということ。だから今後は、荒唐無稽に聞こえる質問にも、専門家は明快に答える責任があります。あるいは何か対策を講じなければいけません。

もう一つは畑村先生が指摘された、事故が起こり、今ごろになって気づいた人がいます。後知恵で気づくというのは誰でもできること。けれどもなぜ、自分が事前に気づけなかったかを考える必要があります。そうすれば、専門家も弱点に自覚的であり得ます。

滝 専門家としての意図と能力があったかどうか、組織内の規範による自己抑制がなかったか、自分が言ったとしても状況は変わらないという諦めの気持ちがあったか、これらは今も解決していません。再稼働のプロセスが今、進んでいます。取材に対し電力会社の方々は、想定していることはすべて対応し、安全だと自信満々に言われます。そこには見落としがあるのではないかと。今、それを聞いたなら再稼働が遠のく可能性があります。だから、今はこれで大丈夫だから動かししようという話になっています。TMIやチェルノブイリで事故が起きました。当時は、訴訟対応を考えなければなりません。過酷事故を想定した安全研究や安全対策を追加することによって、過去の審査や対策が不十分であったことが明らかになることは避けたい。だから、対策が十分にできなかった。そのこと自体を話題にできなかったというスキームは、今も本質的に変わらないのではないのでしょうか。

北村 そこには二者の関係性の問題があります。規制が電力会社に対し、無謬でなければならぬ、完璧でなければいけないと言ったら、今の滝さんの提案のようなことは怖くて言えません。もちろん、電力会社は今も相



専門家は知の追求とその反映に、最善の努力を果たしてきたか。そして今はどうか。

さた・つとむ／本誌 編集長

当、謙虚になっています。自信満々で大丈夫だと言っている人もいるけれども、見落としがあるかもしれないという考え方で学んでいる人も、間違いなくいます。

田中 事業者も大丈夫だと言いながらも、もし、どこかに何かがあったらどうなるかというシミュレーションとその対応の想定は、やっているはずですよ。

佐田 全体性の中での欠落を埋めるためには、関係者がまずは十分に、「耳を澄ます」ことだと思います。具体的には謙虚さであり、自己研鑽を絶やさぬこと、多様な意見に耳を傾けるコミュニケーションに意を尽くすことで、それである程度は解決できると思います。けれども耳を澄ませて、こうすべきだということがわかったとしても、それを本当に実現できるかという問題があります。仮に福島事故を予言できた人がいたとして、千億円かけた安全対策をやれば事故は防げたと言っても、そんなことは実現できませんでした。仮にそれを実行したとすれば、電力会社の経営層は株主訴訟で訴えられてしまう。

私たちは、いったん起きれば大きな被害をもたらす低確率事象にどう対応し、それをどう実行するかという制度はおろか、それを検討する場さえ持っていません。そこにはトランスサイエンスの問題があります。

北村 畑村先生は、事故の本質は配電盤の水没にあると指摘されました。だから言い換えれば、津波が来ることを想定したとしても、数千億円かけて防潮堤をつくる必要は必ずしもありません。もともと起こる確率が低いけれども仮に起こったらということを考えて、配電盤を水没しないように高い場所に置いておく、重要機器がある建屋の水密性を高めておく、だから実際のところ大丈夫だという答え方でない現実性を持ちません。本質をつかんで、その中で費用対効果が高い対策を選ぶことはできないといけません。

田中 配電盤とD/Gを高いところに上げて、いざという時には空冷するなどの手段があります。そういうことを事前に想定して対応しておくのが、本当の会社の経営だと思います。社長はもちろん、技術者や安全管理者のトップがわかっていないといけません。さらには、それがうまく上に声が上がる仕組みも必要です。

北村 事故前に、多額の費用がかかる防潮堤を作れということであれば、その提案を決断することは難しかったかもしれません。けれどもそれより何桁も少ない経費ですむ電源の移動ということであれば、経営層まで提案が上がって決断できたかもしれません。それもまた、技術的な課題の解決をめざす実践知です。

失敗から学ぶだけでなく 成功からも学ぶ

田中 だから、東海第二や女川はどうしてうまく対応

できたのか。それらは偶然というより、事故前や事故直後にいろんな適切な判断がありました。それは、言ってみれば自分の知を超えたものが働いたんだと思います。

北村 畑村先生が原子力学会誌の昨年1月号にサクセスパスの話を書いておられます。失敗の道だけをたどって、それを潰していけば安全になるのではなく、逆に成功の道もたどって対応しなければならない。その通りだと思います。今、進められている対策は、全体を俯瞰する知が欠けているという問題はあっても、ある意味ではかなり謙虚にいろんな対応をしていることも事実です。サクセスへ到達できる道は、昔よりは格段に多くなっていると思います。それでも私たちが考えていないことはあるだろうし、起こると考えないといけない。しかしそのようなことが起こったとしても、考えつくことができる事象を対象にしてサクセスに到達できる道筋を増やしておけば、対処の手段が増すので安全性が高まることは間違いありません。

畑村 僕は去年の秋に、汚染水の現場を見学に行きました。その直前に台風が来て、100ミリ以上の大雨が降りました。現場の敷地は300万平方メートルなので、一晚で30万トンの雨が降った計算になる。1日の汚染水の流量が300トンだとすると、1日で発生する汚染水の千倍の雨が降ったこととなります。

けれども、それを何ら防ぐことをしないままに、30万トンの水が表面を流れたり、地下水になったりして、それが汚染水になっています。その対策の前に、縦の断面から全体を把握しなければなりません。だから、敷地に全面舗装を施して雨水が地下にしみないようにする。それができないならビニールシートを敷くだけでも効果があると提案すると、敷いた後の雨水を海にまで流す水路がちゃんとできていないと言う。こんな対応で、本当に大丈夫なのかと思います。

そもそも、汚染水対策全体を考える人が必要でした。それは今でもいません。地下の汚染水を凍らせた堰で食い止める前に、敷地に降る雨水を海に流す水路を最初に作ってやれば、問題は相当解決されたと思います。土木屋の中には、こうした問題を予測できた人がたくさんいました。そんな人に提案するように勧めると、そんなことを言っても聞いてくれないと言います。様々な分野の考え方を結集して事故の収束に向けて努力すべきところを、相変わらず縦割りの考え方で動こうとしています。

田中 汚染水対策の問題を本当に総合的、俯瞰的に見て、総合的なリスクをどう下げればいいのかという観点は少ない。その日の対応で終わってしまっているきらいもあります。総合的なことは大事だと言いながら、それが実際の具体的な対応に反映されていません。それがなされないままに、日々同じことが繰り返されるようになることを恐れています。東電はこれから廃炉分社をつくります。そこで大事なことは、総合的なリスクをどうすれば

低減できるのかということ。そのことを、現場をよく知っている人がどんどん発信していくべきなのに、それができないとすれば、事故が起こった前と状況が変わっていないのではないかと懸念されます。

北村 関係者には一生懸命、まじめに考える秀才が多いから、与えられた問題のフレームだけで考えてしまっています。だから、地下を流れていく水を止めると言われたら、それだけを考える。そうではなくて、もっと大きくモノを考えるというのは、平時と有事というセンスの違いだと思います。有事には多少の細かいことにかまわず、大局的にものを見なければなりません。

福島原発の現場では今も有事というべき状況が続いており、それに見合う対応をしなければならない。

私が手がけているレジリエンスエンジニアリングの分野では、"Be prepared to be unprepared"という指針があります。すべてを考えることはできない。しかし、広大な敷地に満杯になっているタンクがひしめくあの発電所で、ここで何が起こったら一番嫌かなど考えたら、それは豪雨だろうというセンスがほしい。

畑村 攻撃するなら、どこから攻撃するのが一番効果的かと考えるという考え方ですね。

田中 高濃度のストロンチウムが入ったタンクが、例えばバッキンがへたばったりして同時にいくつものタンクから漏れ出したら、対応がとても難しい。

滝 弱点を見つけて指摘する、建設的な意地悪な人が必要です。学会が、それになれないのですか。

田中 もちろん、できることは何でもします。かつて、米国でB.5.b.の提案が各国になされたのだけれども、その内容は日本だと政府どまりで、原発の現場には届きませんでした。また、核セキュリティとの関連や、燃料デブリをどう計量管理していくかは、世界が注目しているところです。それらもしっかりやっていないといけない。

■ 危急時にしぶとく対応できる ヒトと技術をつくる

畑村 これまでの対応は、その時々で起きたことから学んでいくことに終始しています。TMIやチェルノブイリ、阪神大震災を踏まえた地震対策もそうです。けれども本当に重要なのはレジリエンス、技術そのものをもっとしぶとくしていくには何を考えなければいけないか。準備ができていない時に、大きな悪しきことが起こった時にどう対応するか。そこにある有限のものを使いながら、最適で実現可能なことを瞬時に組み立てていく頭が必要です。そんな危急時にしぶとく対応できる人間をつくるための訓練をする。これはすごく安くできる方策です。

田中 私の出身地は大阪の岸和田です。祭りで有名な

ところ。あの祭りの時には、いかにして事故を少なくするかということが、責任者には問われる。そういう意識が薄い者は、責任者にはなれない。今の原発でもテロの影響はどうかなどだけではなく、我々の技術がどの水準にあるのか、何がわかり何がわからないのか。そういうことがらを、日頃の訓練の中で常に意識させなければならぬ。タンクの問題も配電盤の問題も、本当は日ごろの訓練や演習の中で、現場から提案として出てくるべき話ではなかったのではないのでしょうか。

畑村 訓練は、誰かが決めて与えられたものに応じるという形でやってもほとんど意味がありません。本当に必要な訓練は、危急時にあなたならここでどうしますか、自分で考えて、どう動くかというもの。そういうことが求められています。だから、与えられたものを確実にやるという考え方ではありません。個人が自分で判断して全体像を想像し、最適な対応をするにはどうすればいいかということ、それぞれが能動的に考える。それを日ごろから、常に意識して実践しているような状態がつかれるようになったときに、すごくしぶとい本当の技術体系になるのだらうと思っています。また、そういう人たちが原子力をきちんと扱うようになれば、原子力は生まれ変わります。

滝 例えば航空機のパイロットや救急救命の医師は、少ない材料で、しかも時間的な余裕がない中で最善の選択をしなければならない。そういう人の訓練の仕方からは学べないのですか。

北村 消防の机上演習では、ビルで火事が起きた際にお前はどのように対処するかというシミュレーションをさせます。その際に、例えば寝たきり老人がいたらどうするのか。飛び火がいきなり来たらどうするのかと意地悪く質問する。こんな訓練はお金がかかりません。けれども、それですごく力がつくということです。

畑村 消防での実地訓練では、現場に着いてからは指示がありません。現場で判断することの方が優先するというふうに切り替えています。指揮命令系統が、現場では変わるのです。だから、本番でも消防士はきちんと動けます。動けるから、場合によっては死ぬことをいとわず働く人もいます。消防士の使命感はとても高い。

田中 原子力政策や研究開発をどうするのか、どういうふうにして人を育てていくのか。学会はそういうところまで踏み込んだ形で提案し、実行していかないといけません。大きなシミュレーション装置を使ってやったらうまくいったということではなくて、現場の人と議論していく中で人材が育ち、あるいは基準づくりが進んでいく。そういうことができるような仕組みをどうやって作っていくのか、その主体は原子力委員会なのか、あるいは学会や学術会議なのか。もっと大きなところから議論していかないと、縦割りの問題がさらに拡大するだけではよくない。

北村 英国の話に戻ります。英国は狂牛病対策では大失敗しています。そういう負の経験をしたのは遠い昔ではありません。それにもかかわらず、今回は適切な判断をしました。何でそのように成長できたか。国としては、そこは学ぶに足ることがあります。

田中 近く IAEA の事故調査委員会や米国のナショナルアカデミーサイエンス (NAS) が、報告をまとめます。これらの報告が出てくる中で、日本としてはこれらの報告にどこがしっかりと責任を持って対応するか。また、いろいろな学会と事故調がどう連携し、サポートするか。その大きな仕組みが必要なのでは。

畑村 IAEA は今秋にも報告書を出すと聞いています。その議論には私も参加しました。結局、人と組織の問題が一番大きい。提言の確認やフォローはとても大事です。もう一つ大事なことは、避難した人たちへの調査の継続。震災関連死のような統計的な数字だけではなく、それらの人たちのそれぞれの理由や、そこには避難がどれほど影響しているのかということを調べる。1日に一人以上のペースで亡くなっているのに、国民全体がそのことに関心を持っていません。一方で原子力分野では今でも、まだサイトの中では一人も死亡していないというようなことを言う人がいます。よくそんなことが言えるなと思います。避難者に対する本質的な調査を継続的に行い、その結果をオープンにして、今後を検討しなければなりません。例えば学会のようなところが、それをできればよいのですが。

田中 考えます。その点は、地元の方も気にされています。病院などのインフラが今も、解決されていません。除染の問題もあります。それらをしっかりと調べて記録し、さらに改善へ向けた提案をしていかなければならない。

佐田 学会誌特集記事から編集委が抽出した今後の課題や論点について、ここで紹介します。

論点1がリスクガバナンスの話で、いったん起きれば大きな被害をもたらす低確率事象については、誰がどうやって何を決めるか。社会的な政策決定のしくみが不十分だということ。論点2が低確率事象や「想定外事象」に対する感度の向上。論点3が、「知の追求に向けて当事者は最善の努力を払っているかどうか」という問題。論点4が、規制機関は外部のアクターと必要かつ十分なコミュニケーションをとっているかという問題。これは解決されてはいないものの、すでに社会的なアジェンダとして成立しています。論点5がさまざまな事故調で指摘されている社会的アクター間、ステークホルダー間のコミュニケーションの悪さです。一つは原子力の推進派と地元自治体との関係、二つ目が推進派と反対派の敵対的な社会的分業の関係、三つ目が推進派と一部のメディアとの関係、四つ目が原子力のコミュニティ内における風通しの悪さ。これらの問題は今も、全く解決されていま

せん。ここでは問題提起にとどめます。

理論ではなく 実践と行動が求められている

滝 新潟県には「柏崎刈羽原発の透明性を確保する地域の会」があります。この試みは、こういう二項対立を超える端緒として注目されました。会合では25人の地元の委員が、ばらばらなことを言う。推進派も反対派もいる。そんな人たちが10年間も同じテーブルで議論している。議論が収束して最後に合意に至るということはない。けれども、そこで出たいろんな意見を、東京電力や規制庁や自治体が聞いている。そういったステークホルダーミーティングが基盤になれば、ボトムアップには結びつかない。ベディントン卿の話がトップダウンからの話だとすると、下からのそういう努力や試みが不可欠です。

北村 学会誌3月号の特集記事32編を読むと、かなりの方がコミュニケーションや対話が大事だと言っています。けれども実践知と言う観点に立てば、原子力に反対の人と胸襟を開いて語るというのは大変だし、相当なストレスです。もちろん、そんなことを言ってもらえないのですが、実践のための現場的知識を持たずに取り組めるような問題ではありません。

私自身、高レベル放射性廃棄物の最終処分場に関して、反対派の人とも一緒にオーガナイザーをやっています。反対・賛成派が語り合って決着をつけるというのではなくて、意見の違う同士が相談して会議の場を設定し、いろんな人に来てもらって、対話を繰り返しています。コミュニケーションが大事だと思う方にはぜひ、これまでに蓄積されている実践知を学んだ上で半歩でも踏み出すことをやってほしい。意見が異なる人びとが集まって討論している新潟県の「地域の会」の開催回数は100回を超えました。けれども、原子力関係者の方々はそういうものにあまり関心を持たないように見えます。また、政府事故調報告では、保安院長だった寺坂さんが、地元に対しては、シビアアクシデント対策について説明はなかなかできなかったと言っています。安全委員会の久住委員は保安院の広瀬さんに、防災指針の変更について寝た子を起こすなど怒られたと。これらは、いかに語ることが難しいかのサンプルです。けれども、新潟県の例や我々の試行と同じようなことがいろんなところで起こることを期待したい。遠回りですが、それは間違いなく踏まなければいけない手順だと思っています。

田中 学会事故調ではいろいろな提言をしています。その中には、自分たちに向けたものもあります。それらを一步でも我々がまず解決していくという努力を示して、少しでも変わったということを示さないといけない。原子力学会は原子力推進のためにあるのではないかというコメントが、学会内外からもまだありますが、そうではなくて、原子力を利用していく時のいろんな問題点を解決することを大きな使命としてやっていきたい。

畑村 一番大事なことは、気がつかないことと考え落としが残っていることを認めるということ。ここから始められればと思っています。そうすれば考える範囲も、考え方も変わります。それより、それによって、当事者は世の中からはじめて信用されるようになります。

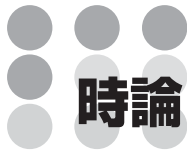
もう一つは避難と除染と帰還の問題です。避難してから3年も経ってしまった現在、全員が帰還することを前提にするのは無理です。一方で実際の除染は進めなければならない。その方法は、「その場処理の深穴埋め」が最適だと思います。今の方式だと、いずれフレコンバッグ(フレキシブルコンテナバッグ)が風化・腐食して、袋の中の土に固着していたセシウム137を化学的に土の粒子から分離させてしまうことになりかねません。あの方式は、早く見直した方がいい。中間貯蔵施設なんてやらないのが一番いい。

田中 飯館村では、田の表土をはぎとって除染していません。天地返しだと下にセシウムが残るから、それは嫌だということで、村議会でこの方式を決めました。除染にはどんな方法が効果的か、どうしたらリスクを下げられるかということ、さらに検討していかなければなりません。また、中間貯蔵施設まで運ばなくてもいいのもたくさんあります。トータルシステム的に議論して検討することが重要です。廃炉や汚染水の問題も、それに近い。原子力の顕在化された本当のリスクはどこにあるのか、どこに抜けがあるのかということをおわかってやらないと本当はいけないのに、それを見据えずに、目先のことを解決するために同じことを繰り返してはいけません。

北村 それこそが、今日の議題の結びではないでしょうか。事故から学んだはずなのに、そこしか学ばないでそれをゼネライズすることを一切やっていません。

佐田 私たちに今も突きつけられた課題は、大変重いと感じます。専門家として真剣に、誠実に取り組まなければならないということは、実は私たち自身こそ言及される話だと思います。そのことを見据えながら、学会誌としても今後、取り組んでいきたいと思っています。

(編集協力：近藤吉明、齋藤 隆)



「反原発でサルになる」考



最首 公司 (さいしゅ・こうじ)

エネルギージャーナリスト

1934年東京生まれ、上智大学卒業後、東京新聞社入社。1973年中東親善訪問団随行者として参加。その後、イスラム経済研究会を組織し、エネルギー資源国を現地調査。1995年最首事務所開設。主な著書は「ソ連崩壊—どうなる石油戦略」「インビジブル・エネルギー・クライシス」など。

思想家吉本隆明氏は、福島原発事故のあと、澎湃と沸き起こる「反原発」「原発ノー」の中で、「反原発で(ヒトは)サルになる」と、暗示めいた言葉を残して2012年3月16日、世を去った。氏の言葉の意味を私なりに考えてみた。(注 吉本氏発言の要旨は別項週刊新潮記事参照)

ヒトはなぜ「火」を求めたか

2足歩行の「猿人」から分かれた私たちの祖先は、「火」を手に入れることで、サルの仲間から完全に離脱して「ヒト」になった。その「火」を敢えて手に入れようとした動機はなにか？

1962年冬、私は在籍していた東京新聞社から派遣されてインド学術探査隊に加わり、インド中部、ダンダカラニア高原の先住民アデバシー族の、そのまた“先輩部族”を訪ね、暮らしたことがある。この人たちはアーリア民族が侵入する以前から、インドに住み着いていたので、アーリア民族がもたらした古代インドの伝承医療術「アユルベーダ」よりも古い医療情報をもっているかも知れない、というのがこの集落を訪ねる動機だった。

夜明けとともに雇用した2人の若者が私たちのキャンプにやってくる。2人にマッチを渡し、洗面や炊事用の湯を沸かしてもらおう。初め若者たちはマッチで火がつくことにびっくりし、飛び退いた。「もっと面白いものを見せてあげる」と、サービス精神旺盛な隊員がライターでタバコに火をつけると、悲鳴をあげて逃げ出した。当時のライターは2、3度カチカチやらないと着火しなかったが、それでも片手で火がつけられるライターは、彼らにとって悪魔の化身であったのだろう。

この一帯は深い密林と猛獣、毒蛇に阻まれ、長い間文明に接することがなかった。住民も「鉄を知らない民」といわれ、最下層のカーストにも入れてもらえない存在だった。インド政府が東パキスタン(現バングラデシュ)から大量避難してきたヒンズー教徒を移住させようと、荒地を切り開いていて発見されたもので、私たちもここに着くまでに野生のトラに3度出会った。

集落は茨と土塼で囲まれ、害獣が入らないように防護

されていたが、3か所だけ開けられて、住民の出入口になっている。夜になるとここで火が焚かれ、害獣の侵入を防いでいた。

このときの経験から、私は人類が火を手に入れたのは「自らの身を守るため」と考えた。ヒトに最も近いチンパンジーやゴリラさえ火を恐れる。その「火」を身の安全に採用したのは、鋭い牙も強い爪も持たず、代わりに「考える脳」を得たヒトの知恵だったのだろう。その「火」を暖房や炊事に使うようになったのは、そのあとの話……というのが、私の仮説である。

エネルギー源の分子構造と人口増加

サルからヒトに分かれたのは1,000万年前だという。そのヒトが「火」を使うようになったのはいつだろう。最近の研究では100万年前の遺跡から痕跡が見つかったという。だとすると、サルから分かれた私たちの祖先が時には火傷を負い、住居や山林に飛び火するなど散々目にあいながら火を利用するまでに900万年もの時間をかけたことになる。

その火の原料だが、長いこと薪か木炭だった。「薪炭」に代わって「石炭」が登場するのは、18世紀である。1765年ジェームス・ワットが蒸気機関を改良して、工業の規模と物資の輸送力が飛躍的に高まり、西欧は産業革命を迎える。

20世紀初頭、1901年に米国テキサス州で大油田が発見された。以後、内燃機関の発達と相まって石油がエネルギー源の主役に躍り出た。

ここで視点を変えてエネルギー源の分子構造と人口増加の関係を調べたのが拙著『人と火』(2003年エネルギーフォーラム社刊)の主要部分である。

イエス・キリストが活躍していた西暦1世紀の世界人口は、凡そ2億5,000万人と推定されている。これが倍の5億人に達したのは西暦1600年ごろだ。当時のエネルギー源は薪か木炭である。両者とも分子構造は水素原子(H)1個に対して炭素原子(C)が10個ついている。この薪炭時代の人口倍増には1600年以上かかった、とい

うことになる。

では、石炭はどうか？ その分子構造はH1+C2で、Cの比率は5分の1に減っている。西暦1600年の5億人が10億人に倍増するのは1830年ごろだから、230年で倍増したことになる。この時代のエネルギー源は薪炭と石炭である。

次の倍増の20億人になるのは、1930年ごろだからちょうど100年だ。この時代の主たるエネルギー源は石炭である。薪炭時代は人口倍増に1600年以上、薪炭・石炭混合時代は230年かかったのが、石炭時代では100年に短縮された。

次は石油だ。石油の分子構造はH2+C1で、石炭のHとCの比率が逆転して、Hの方が多し。1930年代以降は文字通り「石油の時代」である。

人口はどうか？ 1930年の20億人が40億人になるのは1980年、つまり石油時代は人口倍増が50年で達成された、ということだ。化石燃料でHの比率が最も多いのは天然ガス(H4C1)で、これ以上、Hが多い化石燃料はない。したがって、天然ガスはCの少ない究極の化石燃料といえる

1980年以降、先進国は原発を採用した。原発は発電時のCゼロのエネルギー源である。天然ガスと原発が混在した1980年代以降の人口増加率をみると、2000年の人口60億人が20年で5割増、2010年に70億人だから30年で8割増ということになる。

次は水素と核エネルギーの時代

ここまでの経過でいえることは、火を手に入れたヒトは、火の原料のCが少なくなるエネルギー源を次々と獲得することで、人口を増やし、生活水準を引き上げてきた。Cの少ない究極のエネルギー源は水素であり、核エネルギーということになる。

この仮説の下に、私はアイスランドやカナダ取材して「水素の時代」「水素社旗宣言」を書いた。アイスランドは水力と地熱発電の夜間電力を利用して水素をつくり、「水素社会」を目指していた。カナダは2010年のバンクーバー冬季五輪には、メイン会場のバンクーバーとジャンプ競技場のウィスラーを結ぶ幹線道路に燃料電池車用の水素スタンドを作る、という現場を訪ねた。

だが、その後アイスランドは財政危機に瀕して水素社会どころではなく、バンクーバー五輪でも「水素街道」は現れなかった。その1年後の2011年3月、東電福島第一原発の惨憺たる事故である。「原発ノー」の合唱が日本中を覆った。無理もない。「安心・安全」という原発神話が瓦解したのだから。

これではヒトはサルになる！

「原発ノー」の津波に対して、吉本隆明氏は「反原発で(ヒトは)サルになる」と立ちのぼった。氏は「原発の防

御策は技術の問題だが、放射能に対する恐怖心がそれを妨げている」という。

福島事故のあと、日本の原発は全て運転を止めた。“恐怖心”を抑えるには止むを得ない措置だろう。だが、そこで私たちは冷静に原発有りとならぬ生活様式のことなどを、そして国際的に、かつ核兵器廃絶を含めて考えるべきだった。例えば、解体核の核爆薬は希釈して原発燃料とすることが、最も合理的な処理方法と考えられている。

私自身の行動はきわめて短絡的で、発電の3分の1を占める原発が止まったのだから、1日1食減らせばバランスがとれると、昼食を抜くことだった。お蔭でスリムになり、腰痛も消えた。40年前のオイルショックではローマクラブの「成長の限界」やシューマッハの「Small is Beautiful」が読まれ、国民的レベル省エネ、節電が実行されたが、今回は電力会社任せだった。原発を止めながら、便利で快適な生活を追うようでは、やがて化石燃料や薪炭を取り尽くし、「ヒトはサルになる」だろう。

福島事故の少し前、私はフィンランドの使用済み核燃料保管施設「オンカロ」取材した。この問題が解決しない限り、原発推進は難しいと考えていたからだ。フィンランド滞在中にスウェーデンも最終処分場を決めた、というのでそちらにも回った。

両国に共通しているのは、処分場に挙手した自治体が複数あり、誘致合戦をしたこと。日本では忌避される処分場が、ここではなぜ歓迎されるのか？

取材を進めるうちに、住民、自治体、政府、電力会社の相互信頼の強さにあり、それは長年にわたる情報公開で培われたものだ、と知った。

吉本氏のいう「核への恐怖心」は、情報を持つ者への不信感から生まれる。「知らしむべからず 寄らしむべし」という、封建時代を思わせるこの度の特定秘密保護法などは、住民の不信感を一層煽ることだろう。これもまた、ヒトがサルに戻る道である。

◎吉本隆明氏発言の要旨(週刊新潮から)

- 原発は人類が積み上げてきた科学の成果である。自動車でも事故があったからといって無くしてはいない。
- 太陽の光熱は核融合によってできたもので、元をただせばこの世のエネルギーは原子や核の力なのに、それを異常に恐れるのはおかしい。
- 文明の発達には常に危険との共存だった。科学技術は失敗と挑戦、改善の繰り返しだ。われわれがいまなすべきことは、原発を止めることではなく、完璧に近いほどの放射線防御策を講じることだ。
- 原発を論議するのを妨げているのは、恐怖心だが、経済的な利益から原発を推進する考えには与しない。

(2014年1月14日記)



放射性セシウムのゆくえ

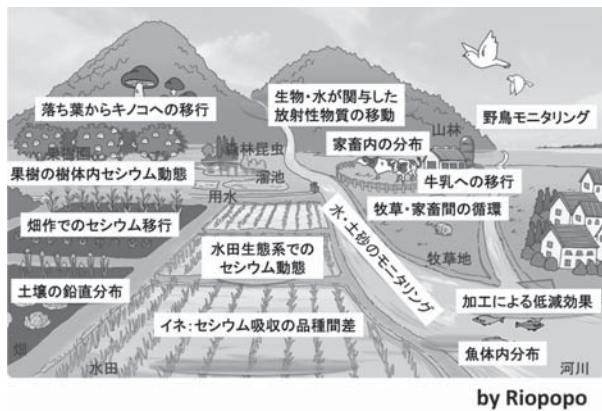


中西 友子 (なかにし・ともこ)

東京大学大学院農学生命科学研究科 教授
1978年東京大学大学院理学系研究科博士課程
修了。理学博士。財団法人や企業勤務、米国
ローレンスバークレー研究所博士研究員を
経て1962年東京大学農学部助手。助教授を
経て現職。第20期日本学会議会員。平成12
年第20回猿橋賞受賞。平成22年日本放射
化学会賞受賞。

東京大学大学院農学生命科学研究科では、福島第一原発事故直後から、現場の放射能汚染についての調査研究を教員40～50名のボランティアベースの活動により開始した。放射能汚染地域は森林を含めほとんどが農学関連であり、かつ研究対象は、作物、畜産物、魚介類、森林など非常に広い。そこで、各専攻と圃場、牧場、演習林など各種の附属施設の教員が共同し、いわば串刺しにしたような形でいくつかのグループが作られ、これまで馴染が薄かった異分野の研究者が一緒になって復興支援のための研究が始められた。

東大農学部で進行中のプロジェクト



私は農学部におけるこれらのプロジェクトのまとめ役を仰せつかってきたが、ここでは、このプロジェクトでこれまで判ってきたことの一部を紹介させていただきたい。

1. 降ってきた放射性核種

まず判ったことは、2011年に降ってきた放射性核種は、まずそのほとんどが事故当時に空気中にさらされていた面に落ちてその場に付着したことである。土壌では土壌表面に、また森林では葉、幹、落ち葉などに降ってきて付着した。その特徴としては、スポット状にくっついたことと、土壌への吸着の強さが時間の経過と共に次第に強くなっていったことが挙げられる。

農学部の塩沢教授は、福島の農業現場に筒を埋め込み、その筒の中を自作のコリメータを付けたサーベイメータを下方へ動かし、深度別の放射能を事故直後から

測定し続けている。その結果、土壌中の放射性物質の下方への移動距離は時間と共に大幅に減少し、現在では年1～2ミリ程である。また、塩沢教授は河川からの水が入り込む溜池をいくつか選んで、その湖底の土壌表面の放射能を測り続けた。その結果、土壌の放射能値は減少傾向を示したが、河川の上流近くに市街地がある場合には減少しなかった。これは市街地での除染活動により放射性物質が川の水により溜池に運ばれたためであると考えられる。

土壌に降ってきた放射性核種は土壌に含まれる微細な粘土、ならびに分解が不完全な有機物に吸着しており、礫や砂など大きな土壌構成成分にはほとんど吸着していないことが判った。そして山から流れ出てくる河川の、「水そのもの」には放射能はほとんど検出されないが、細かい粘土などが巻き上げられた際、水と一緒に流れて動くことが判った。水文学を専門とする大手准教授は、伊達市に広がる山林を詳しく調べたところ、山に降った放射性物質の流出量は、年間に降ってきた放射能値の数千分の1のオーダーであることが判った。つまり降ってきた放射能の大部分はほとんど動かず、森林から放射性物質はほとんど流れ出ていないのである。

2. 汚染米

根本教授を中心に福島県で最初に汚染米が産出された場所を調べたところ、周りは森林に囲まれた谷地田と呼ばれる段々畑状の水田であった。その水田土壌の放射能値は5,000 Bq/kgよりも低い値であり、汚染米を産出する土壌とは考えにくかった。ただ、その場所では水は周囲の森林から引かれており、水田土壌には粘土含量が少なく、またカリウム濃度も低かった。森林からの水は、ミネラル分は多いもののカリウム量は少ないからである。カリウムは、窒素、リンと並んで肥料の3大要素のひとつなので不足するとコメの品質について気になる場所であるが、農家の人によると森林からの水を引いても美味しいコメができるということであった。しかし水については、引かれた水からもまた土壌に圧力をかけて出した水からも放射能は検出されなかった。

一方、汚染米を産出したイネ体内の放射性セシウムの分布は、他の地域で調べられたような古い葉ほど多く蓄積する傾向とは逆の傾向が見られることが判った。また穂と穂に近い組織に放射性セシウムは多く分布していた。ということは穂が成熟する少し前から何らかの原因で根が放射性セシウムを吸収したことになる。では、イネが吸収した放射性セシウムはどこからきたのだろうか。

原因としては二つ考えられた。一つは何らかの原因で山から引いた水が夏場だけ放射能が高くなったこと、またもう一つは穂ができる前のイネの根は水平方向に生えるので、土壌表面の汚染土から放射性核種を吸収した可能性である。イネの収穫直前のデータは年1回しか取れないが、その穂ができる直前の水田を何箇所か調べたところ、イネが吸収可能なセシウムの懸濁液が生成されることが判った。よってイネはこの懸濁液に存在するセシウムを吸収したものと考えられる。

ただ、これは極めて特殊な例であり、現在、福島産で流通している玄米は全て基準値以下である。特に水田にカリウムを十分施肥することでイネのセシウム吸収量はかなり抑えられ、汚染米はほとんど産出されなくなった。ちなみに福島県では生産される玄米について全袋検査を行っており、年間1千万袋以上の玄米袋を全て測定するシステムが動いている。

実験室では、イネは、水耕栽培つまり放射性セシウムが溶液中にイオンとして溶解している場合には、濃度が非常に低くても、放射性セシウムを多量に吸収・蓄積する傾向があることが示された。ところがこの水耕液の中に土壌が存在すると、放射性セシウムは土壌に吸着されてしまい、植物は吸収することができない。つまり、水田でイネが放射性セシウムを吸収する場合については現場で調べなければ正確な情報は得られない。

3. 動物の汚染

茨城県の附属牧場では、汚染した牧草を用いて飼料を調製して牛に与え、どのようにミルクに放射性セシウムが出てくるかを調べた。放射性セシウムの含まれたヘイレージ(牧草を消化しやすいように発酵させたもの)を与えたところ、直後からミルク中の放射性セシウム量は増加しはじめた。そして2週間後にほぼ一定値に達した。そこで飼料を放射性セシウムを含まないものに変えたところ、ミルク中の放射能値は減少をたどり、やはり約2週間で検出されなくなった。このことは、放射性セシウムを含むミルクが生産されても、牛に放射性セシウムを含まない飼料を与え続けられればミルクの汚染は減少し非汚染飲料になるということである。

事故後、ヤギや豚などの家畜が野山で野生化している。農学部では、捕獲された野生化した動物の放射能測定にも協力してきている。この中のヤギの場合、放射線量率が非常に高いところで活動していたにもかかわらず、体内の放射能濃度は非常に低かった。その理由は、

植物は汚染土壌からほとんど放射性セシウムを吸収できないので、ヤギが食してきた事故後に生育した植物は、放射能濃度が非常に低かったためだと予想された。

現地では現在、野生のイノシシと野生化した豚が交配し、イノブタが繁殖している。イノシシや豚類は鼻で田畑を掘り返すので、土壌表面の放射性セシウムも食べてしまう可能性があり、実際に調べたところ、ヤギとは異なり体内の放射性セシウム濃度が高いことが判った。現在は汚染した動物について、血液と筋肉や各臓器間の放射能濃度の関係を測定している。もし血液を採取して各組織中の放射能濃度が推定できれば、食に供することができるかどうかの目安になるからである。

生き物の場合には、体内に入っても通常は放射性セシウムは代謝によって体外に出される。一般に放射性セシウムの生物学的半減期は、魚も鳥も動物の場合にも長くても100日ほどと見積もられている。

4. おわりに

今回の調査研究を通じて全般に言えることは、事故により降ってきた放射性物質は、いわば接着剤の付いた花粉のようにどこにでもくっついて離れなかったということである。特に、手を加えられていない土壌では、依然としてセシウムは表層に留まっていると考えられる。一般に、「汚染」といえば、汚染物質が水などの媒体により広がって、人間の体内に入り害を引き起こす現象のように考えがちである。しかし、放射性物質の汚染はこれまでの汚染と異なり、環境中の放射性物質はほとんど動かないのである。

これらの事実を基に飯舘村では、農地に水をひき、軽く攪拌し、放射性セシウムがくっついている細かい粘土が沈まないうちにその泥水を畑の端に掘った溝に集め入れている農家のグループがあり、その作業で水田の9割の放射性物質が除去された。溝の中には水がなくなったら非汚染土壌を入れ込む。溝の底や周りに設置した簡易放射能測定器で、常に汚染土壌が溝の壁から動かないことをモニターして確かめている。溝は非汚染土壌で覆われているので近くに行っても被ばくはしない。放射性物質は溝中に留まっているものの、共に暮らしていこうというスタンスである。こんな除染法もひとつの答えかもしれない。

以上、私たちの調査結果の一端を紹介した。これらの詳細について興味のある方は、以下の文献を参照していただければ幸いである。

(2014年1月15日記)

－ 参考文献 －

- 1) Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident, T.M. Nakanishi and K. Tanoi ed. Springer, 2013. (無料で全てダウンロードできます)
- 2) 中西友子, 「土壌汚染—フクシマの放射能のゆくえ」NHK ブックス, 2013.



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

原子力学会が春の年会を開催

日本原子力学会は3月26～28日の3日間、都内で春の年会を開催した。初日の原子力学会福島原発事故調セッションでは、事故調委員長を務めた田中知氏が、福島事故の直接要因は津波対策と、過酷事故対策が不十分であり、緊急時対策や事故後の対策、種々の緩和回復策が不十分であったことだと指摘。その直接要因をもたらした背後要因として、専門家の自らの役割に関して認識の不足などをあげた。さらに今後については、原子力安全の目標の明確化と規制基準の体系化や、深層防護の理解の深化と適用の強化、原子力安全研究基盤の充実強化などを提言した。

原発事故避難者に焦点をあてたセッションでは、福島県内で地域メディアエ이터として活動している半谷輝己氏が、専門家は「可能性は否定できない」などと正確性を重視しすぎた説明をしており、結果としてメッセージが

伝わっていないと発言。放射線の影響についても多くの当事者にとって必要な情報は、大ぐくりの相場観の提示だと述べた。

民間事故調の委員長を務めた北澤宏一氏は特別講演で、福島事故後に各国を訪問した後の経験則として、日本よりも国土の狭い経済先進国は、福島原発事故のようなことがらに対応できず、脱原発すると指摘した。また、原子力安全委員会が「長時間にわたる全交流動力電源喪失は…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はない」という指針を決めた過程において、委員から異議を唱えることができにくい雰囲気があったことに言及。この点について原子力学会などのアカデミアが、中立性を確保するために何らかの関与をする仕組みを構築すべきだと提案した。

(原子力学会誌編集委員会)

放射線リスクコミュニケーションで施策パッケージ

政府は2月18日、原子力災害避難住民の帰還に向けた放射線リスクコミュニケーションに関する施策パッケージを公表した。各省庁が取り組む施策を、現場の良好事例にも触れながら取りまとめている。あわせて情報発信のベースとなる資料「放射線リスクに関する基礎情報」も公表した。

施策パッケージによると、住民への放射線による健康影響に関する情報提供はこれまで、講演会・セミナーの開催や広報誌の配布などが行われているが、今後は個人によって考え方が異なるという前提に立ち、「本当に聞きたい話を気兼ねなく聞ける双方向のコミュニケーションをきめ細かく実施する必要がある」としている。

その上で原子力規制委員会による「帰還に向けた安全・安心対策に関する基本的考え方」を踏まえた取組と

して、(1)正確でわかりやすい、(2)少人数によるリスクミの強化、(3)地元に着した専門人材の育成強化、(4)住民を身近で支える相談員によるリスクミの充実——の項目ごとに関連施策を整理した。

また、大学や自治体による取組事例にも言及。近畿大学では11年夏から、川俣町の委託を受けて個人線量計を用いた子ども一人一人の被ばく線量測定を行い、健康相談にも応じており、近年では大学全体としての被災地復興支援プロジェクトに拡大している例をあげている。

放射線の健康リスクを説明する情報をわかりやすくコンパクトにまとめた「放射線リスクに関する基礎情報」は復興庁のホームページ(<http://www.reconstruction.go.jp>)で見ることができる。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

原発運転停止で75%の企業が売上減少、原産調査

原産協会は2月19日、原子力発電関連産業の動向を調査した。国内216社(うち電気事業11社、鉱工業他205社)から得た回答を取りまとめたもの。75%の企業が、原子力発電の運転停止によって売上減少など経営環境が悪化していると回答した。

12年度で原子力関係支出高は、電気事業者が1兆5千億円で前年度より3千億円の減少、鉱工業他が1兆5千億円で同1,700億円の減少。また、鉱工業他の受注残高は2兆円で前年度より2,100億円の減少となった。

原子力関係従事者数は約4万7千人となっており、前年度比では、電気事業者がやや減少。鉱工業ではやや増加し、全体としては微増だった。

13年度の原子力産業事業を取り巻く景況感については、89%の企業が「悪い」と回答。12年度の86%からさらに悪化している。

原子力発電所の運転停止による売り上げへの影響は、

原賠支援機構法改正案を閣議決定

政府は2月28日、原子力損害賠償支援機構法の改正案を閣議決定した。福島第一原子力発電所事故炉の廃止措置について、熔融燃料の取り出しや汚染水処理など完了までの取組が困難かつ長期にわたることから、原賠支援機構の業務に廃炉関係を追加し、技術支援を総合的に行わせるのが趣旨。「原子力損害賠償・廃炉等支援機構」と改称し、今通常国会での成立を目指す。

原賠支援機構は福島原子力災害を受けて、11年9月に同法に基づき、被災者に対する損害賠償の迅速かつ適切な実施を目的として設立された。

原子力災害対策本部が13年12月にまとめた福島復

前年度比減が145社(75%)にのぼった。14年度以降も90%の企業が「減少」または「横ばい」と見通している。このほか64%の企業が「雇用(人員)や組織体制」について今後の影響があると回答し、そのうち7割が「熟練技能者の育成・技術伝承の困難」を懸念として述べ、雇用の縮小が技術力の低下に拍車をかけつつあることが浮き彫りとなった。

興加速化の指針では、「事故収束に関する万全な対応」に向けた国の取組として、廃炉支援業務と賠償支援業務の連携強化のため、原賠支援機構の活用を含めて検討することとされている。

改正法案では、新機構に廃炉関係業務の意思決定機関として、委員を大臣認可とする「廃炉等技術委員会」を設置。業務拡充に伴い副理事長職を新設、理事を増員するほか、廃炉対策の状況・課題を把握し、専門的技術的観点から適切な支援を行わせるよう、助言・指導・勧告の機能や廃炉技術に関する研究開発も業務として定めることとなった。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

【米国】

SMR で年内に最初の認証申請

官民の協力により世界市場に台頭できる小型モジュール炉(SMR)の開発・商業化を進めている米国で、今年の第3四半期にも最初のSMR設計に関する認証審査(DC)の申請が、また、15年には2件目で申請が行われる見通しであることが明らかになった。

米原子力エネルギー協会(NEI)が2年に1回開催するSMRフォーラムの席で、2月25日に米原子力規制委員会(NRC)のG・アポストラキス委員が述べたもの。国内SMRの開発は製図板上の作業から許認可・建設段階に順調に歩を進めつつあり、米国初のSMR設計で建設工事が始められる日はそう遠くないとしている。

米エネルギー省(DOE)は2012年、産業界とのコスト折半で出力30万kWかそれ以下のSMR設計2件を6年間で商業化支援するという4億5,200万ドルの計画を公表。昨年12月までにバブコック&ウィルコックス(B&W)社の「mPower」、ニュースケール社のSMR設計を支援対象に選択済みだ。

アポストラキス委員によると、mPower設計についてはすでに、B&W社と組んだテネシー峡谷開発公社(TVA)がクリンチリバー・サイトで2020年代初頭の運転開始を目指して、15年第2四半期に建設許可を申請すると見られているほか、ニュースケール社もサバナリバー・サイトで数年遅れで後を追う見通しになっている。

DC審査においてはSMRの様々なシステムや構造物・機器の安全性を確保するため、リスク情報を活用したアプローチを組み込むようNRCがスタッフに指示。NRCはSMR機器の品質を保証するため同手法を採用入れた許認可を目指しており、具体的には安全上の実質的な重要度に応じて機器やシステムを分類し、それに合わせた品質保証対策を適用する。

事業者は安全関連機器のうちNRCの規制上、実際に重要なものは5~6%に過ぎないと認識しており、この分類がいかに控え目になり得るかを示していると同委員は強調。ただし、安全上重要でない大多数の機器・システムの扱いについては、スタッフと産業界が合意点に達するのは難しかったとしている。

B&W, 第4世代・進行波炉開発で テラパワーに協力

米国のバブコック&ウィルコックス(B&W)社は3月17日、テラパワー社が進めている第4世代の進行波炉(TWR)開発に支援協力するための覚書を同社と締結した。B&W社は現在、PWR技術に基づく第3世代プラスの小型モジュール炉(SMR)「mPower」を独自開発中であることから、概念設計段階にあるTWRを予備設計段階に進める戦略的な技術供給者として、テラパワー社が必要とするエンジニアリング技術や機器製造その他のサービスを提供していく考えだ。

テラパワー社はマイクロソフト社の創業者として知られるビル・ゲイツ氏が後援する原子力開発ベンチャー企業。同氏が規模の縮小拡大が可能で温室効果ガスを出さず、持続可能かつコスト競争力のあるエネルギー源の開発に乗り出した2006年に企業概念が創案された。

劣化ウランを燃料に使用するTWRは少なくとも40年以上、燃料交換なしに運転継続が可能と言われる次世代型高速炉で、冷却材は液体金属ナトリウム。現在、22年頃の運開を目標に電気出力60万kWの実証炉「TWR-P」の開発を進めており、115万kWの商業炉は20年代後半に運転を開始する計画だ。

B&W社が提供するサービスと支援の分野は多岐にわたっており、機器の設計と製造、燃料加工プロセスの開発と試作燃料の製造、原子炉の設計エンジニアリング、原子炉の運転支援、米国内外におけるスタッフの拡充、流動ループ試験、許認可支援、材料試験など。B&W社からこうした支援を得つつ、テラパワー社は設計作業を継続するとともに、TWRを世界規模で商業化するための準備を行っていく。

今回の覚書を通じてテラパワー社は、原子力産業界の卓越した技術が利用可能となり、新型原子力技術の国際供給チェーンの中で米国企業をアクティブに保つことができるとの期待を示した。

放射線を検知も環境に影響なし、 米 WIPP

米エネルギー省(DOE)がニューメキシコ州で操業する軍事・超ウラン元素(TRU)雑固体廃棄物の深地層処分場(WIPP)で、2月14日に自動大気汚染監視器が地下655mの施設内で放射線を検知した。その際、地下施設に従業員はおらず、地上施設にいた従業員も予防措置として所定の避難場所へ移動。地上において従業員や機器、設備の汚染が検知されていないことから、DOE

では16日、人の健康や環境に対する被害はなかったと発表している。

WIPP内では大気中に混入した、いかなる浮遊物も「ろ過」するよう設計された高性能防護フィルタ・システムが放射線の放出を最小限に抑制。今回、地下施設内で大気中の放射線を検知した換気システムは自動的にフィルタ・モードに切り替わった。また、WIPP境界に設置された複数のモニタにより、汚染その他の危険が外部に及ばなかったことが確認されたとしている。

スタズビック社、主要事業を売却

放射性廃棄物の処理を専門とするスウェーデンのスタズビック社は2月12日、米国における低中レベル廃棄物処理事業や合併企業の持分を米国籍のエナジーソリューションズ社に2,300万ドルで売却するなど、米市場でのプレゼンス縮小の方針を表明した。同社が特許を持つ廃棄物の熱分解・減容システム「THOR」を北米と中国で使用する権利もこの取引に含まれる。

同社は世界で幅広い事業を展開しているが、米国での売上は2013年実績でグループ全体の1%程度。売却でもたらされる8,800万クローナ相当のキャッシュフロー効果により財務状況を改善し、潜在的な成長の可能性を残した安定した企業を目指すとしている。

【ハンガリー】

パクシュ原発増設計画、ロシアが 100億ユーロの低金利融資

ハンガリーのM・バルガ国家経済相は2月6日、同国唯一の原子力発電所であるパクシュ原発の増設計画にロシアから最高100億ユーロの融資を受ける条件の詳細について、両国が合意に達したと発表した。1月14日に両国首脳が基本合意していたもので、総工費の約80%が21年ローンでハンガリーに提供されるという内容。バルガ大臣は「市場ではあり得ないレベルの低金利・長期の融資」と評価している。

同相によると、この増設計画は2015年にスタートし、最初の5年間は計画準備作業に充てる予定。23年に増設炉の1基目を完成、2基目が25年に完成した後、21年間かけて返済することになっており、最初の11年間の金利は3.95%となる。続く第2段階で4.5%、最終段階で4.9%と変動していき、2046年に完済。早期完済オプションも付随する契約で、最終的な総工費に応じて限度額一杯まで融資を受ける義務もないなど、双方にとって最適の取引だと強調した。

なお、現地の報道によるとハンガリー議会は同日、

256 対 29 でこの取引を承認した。票決に際しては環境保護派など反対議員による妨害もあった模様だが、同国の V・オルバーン首相はパクシュ原発がハンガリーの総発電量の 4 割を賙っているという事実から、「パクシュ原発の改築なくして、安全で廉価かつクリーンなエネルギーを国内で生産することはできない」と断言。同原発がなければハンガリーは貧しい寂れた国になり、経済力も低いものになると述べたことが伝えられている。

同原発には現在、出力 50 万 kW のロシア型 PWR (VVER) が 4 基稼働している。80 年代に運開した 1 号機については規制当局が昨年、32 年まで 20 年間の運転認可延長を承認。ロシアが建設する 2 基は各出力 120 万 kW の VVER になると見られている。

【フィンランド】

ロシアと新協定、損害賠償問題をクリア

フィンランドとロシアの両政府は 2 月 25 日、原子力平和利用分野における新たな二国間協力協定に調印した。2004 年に原子力部門の協力協定が満了して以降、両国は法的枠組となる協定なしで原子力協力を行ってきたが、昨年、フィンランドのフェンノボイマ社がピュハヨキに建設するハンヒキビ原子力発電所 1 号機にロシア製原子炉の採用を決めたことから、原子力損害賠償に関する事項の解決も含めて新たな協定を締結する必要性が生じたもの。

新協定への調印はフィンランドの首都ヘルシンキで、同国雇用経済省 (TEM) の J・パヴァーオリ大臣とロシアの原子力総合企業ロスアトム社の S・キリエンコ総裁が実施。ロスアトム社傘下のロスアトム・オーバーシーズ社やフェンノボイマ社に加えて、国内で原発を操業する 2 事業者も同席した。協力分野として特定されたのは、原子力研究、原子炉、原子力によるエネルギー生産、原子力安全、放射線防護、環境保全などとなっている。

調印に至るまでの交渉で特に焦点となったのは、原子力損害賠償に関する項目。フィンランドは現在、原子力賠償に関する国際的な枠組としてパリ条約に加盟する一方、ロシアはウィーン条約に加盟しており、国境を接する両国間の越境損害についてはどちらの条約も効力を持ち得なかった。TEM の説明によると、新協定では両条約を結び付けるジョイント・プロトコルによってこうした課題がクリアされ、事故を起こした方の加盟条約に従って賠償処理が実施されるとしている。

フェンノボイマ社、ハンヒキビ計画の出力変更で環境影響評価

フィンランドでハンヒキビ原子力発電所 1 号機の建設を計画しているフェンノボイマ社は 2 月 13 日、120 万 kW 級原子炉をピュハヨキに建設することを想定した改定版の環境影響評価 (EIA) 報告書を雇用経済省 (MEE) に提出した。

議会在建設計画を承認した後に原子炉出力を変更したことに伴う措置で、MEE は今後、関連する他の省庁や機関から EIA に対する見解を募るとともに、国民が自由に意見を述べる場となる公聴会の開催に向けて、メディアや地元の公式掲示板、および近隣自治体に開催の詳細を通知する方針。聴取した見解と EIA に基づき、MEE としての最終声明を 6 月頃に取りまとめる計画だ。

フェンノボイマ社は当初、160 万～180 万 kW の原子炉建設を計画しており、議会から同計画に対する「原則決定 (DIP)」を得るため、2008 年に作成した EIA は 180 万 kW 級原子炉の建設を想定して実施した調査の結果を網羅。これに伴い昨年 2 月、160 万 kW 級の「EU-ABWR」を提案する東芝に優先交渉権を与えたという経緯がある。

しかし、同社はその後、採用設計の出力を 100 万～130 万 kW に変更した。昨年 12 月には 120 万 kW のロシア型 PWR (VVER) の最新シリーズである「AES-2006」を推すロシアのルスアトム・オーバーシーズ社と原子炉供給契約を締結。2024 年までに運転を開始させるなどとした。

MEE の指示により改定した新たな EIA の中で、フェンノボイマ社はピュハヨキにおける 120 万 kW 原子炉の建設は実行可能との結論を明記。08 年の EIA と比較して、現地の水系や漁業・自然保護区域に対する環境影響は 180 万 kW を想定した評価結果より少し小さくなると強調した。MEE は今回の EIA や関連の報告書に基づき、2010 年に議会在承認した現行の DIP がロシア製原子炉オプションをカバーしているか、また、同 DIP を再考すべきかについて法的な判断を下すとしている。

【スウェーデン】

原発稼働率、2013 年は好調

スウェーデンでリングハルス (100 万 kW 級 PWR 4 基) とフォルスマルク (100 万 kW 級 BWR 3 基) の両原発およびドイツでブルックドルフ原発 (PWR, 148 万 kW) の所有権 20% を保有しているパッテンフォル社は 2 月 4 日、2013 年中は同社の発電設備の中でも特

に、原発の稼働率が好調だったことから同社の年間総発電量は対前年比 1.6%増の 1,817 億 kWh に達したと発表した。

同社では総発電量の約 5 割を火力、約 3 割を原子力、2 割を水力で供給しているが、昨年は出水率の低下により水力発電所の稼働率が低迷した。その一方で、褐炭火力と風力の発電量が増加したほか、原子力発電所でも近年の設備近代化作業が功を奏し、発電量は 519 億 kWh を記録。過去約 40 年間の操業で 2 番目という高実績だったとしている。

発電量の増加は経費の削減につながっており、厳しい電力市場状況にもかかわらず、純売上高は 2.6%増の 1,716 億クローナに、異常な事項を調整した後の定常的な利益は 1.3%増の 279 億クローナになったと強調。ただし、経常利益は 301 億クローナの減損損失によってマイナス 64 億クローナに低下したほか、税引き後利益も 248 億クローナの減損損失のためにマイナス 135 億クローナに落ち込んだ。

同社では、「前年の先渡し為替ヘッジやコスト削減のお陰で、ドイツの電力卸売市場における価格の低下化や、CO₂ 排出枠割当の価格上昇による悪影響を抑えることができた」と説明。年間の営業経費が前年実績から 32 億クローナ削減されるなど、過去 3 年間の削減額が 90 億クローナに達したと指摘している。

【ウクライナ】

チェルノブイリ 1～3 号機の廃止措置が本格化へ

ウクライナ建設審査当局がチェルノブイリ原子力発電所 1～3 号機の永久閉鎖・密封管理プロジェクトについて、「すべての規制要件を満たしている」と確認したことが明らかになった。同発電所が 3 月 17 日に公表したもので、正式に承認されれば今年から 2028 年まで 3 億 8,500 万グリブナ(約 42 億円)を投じる廃止措置作業がいよいよ本格化する。

1986 年の 4 号機事故の後、同じ黒鉛チャンネル型炉(LWGR)である 1～3 号機(各 80 万～100 万 kW)は 91 年から 2000 年にかけて閉鎖となった。4 号機では現在、劣化した石棺に新たな覆いを被せる作業を実施するなど廃止措置を取るまでには長期の時間を要することから、これとは別に、残りの 3 基について廃止措置計画が策定されていたもの。

永久閉鎖・密封管理プロジェクトは作業を次の 6 段階に分けて実行予定で、(1)消火用水供給システムの改造、(2)原子炉圧力管と制御・防護チャンネルの解体および圧壊、(3)1、2 号機原子炉の密封管理と密封管理ゾーンの特定、(4)1、2 号機原子炉ホールのアーチ型屋根の改造と燃料交換機の解体、(5)3 号機の原子炉密封管理と密封管理ゾーンの特定、(6)3 号機のアーチ型屋根改造と燃料交換機解体——となる。究極的な目標は、3 基に含まれる放射性物質や電離放射線源が 50 年間にわたって安全な管理貯蔵状態に置かれるよう保証し、3 基を安全に解体することだ。

28 年まで密封管理状態に置いた後は、46 年まで最も汚染の激しい機器をこれら 3 基から取り除く作業を実施。50 年目の 64 年までには主要な建屋や構造物および設置物を完全に解体し、これらを制限免除レベルまで除染することになる。

【ロシア】

実証炉に燃料を初装荷、高速炉実用化計画進む

ロシアの原子力総合企業ロスアトム社によると、同国の高速炉実用化基地であるベロヤルスク原子力発電所サイトで、出力 80 万 kW の実証炉「BN-800」となる 4 号機の燃料装荷作業が 2 月 2 日に開始された。同サイトでは出力 120 万 kW の大型商業用高速炉となる「BN-1200」の建設も同 5 号機として計画されるなど、プルトニウムと MOX 燃料の燃焼が可能な高速炉の実用化に向けて、着実に世界の最先端を突き進んでいる。

ロシアの連邦環境・技術・原子力監督庁(ROSTEKHANADZOR)は昨年 12 月、4 号機の運転を許可。初装荷燃料のサイトへの搬入など、初臨界プログラムの準備作業が始まった。燃料の装荷については今年 1 月に ROSTEKHANADZOR が特別許可を発給しており、3 か月にわたって装荷作業が続けられる。初臨界の達成は 4 月になると見られている。

ロシアでは出力 1.2 万 kW の高速実験炉 BOR-60 が 1969 年からウリヤノフスクで、また 60 万 kW の原型炉「BN-600」が 1980 年からベロヤルスク 3 号機として順調に稼働中。実証炉である 4 号機は 80 年代に着工したものの、体制がロシアに変わる中で作業が一旦中断し、2006 年に本格的に再開されていた。

解説

活断層と地震の科学

活断層の長期評価と今後の課題

産業技術総合研究所 重松 紀生

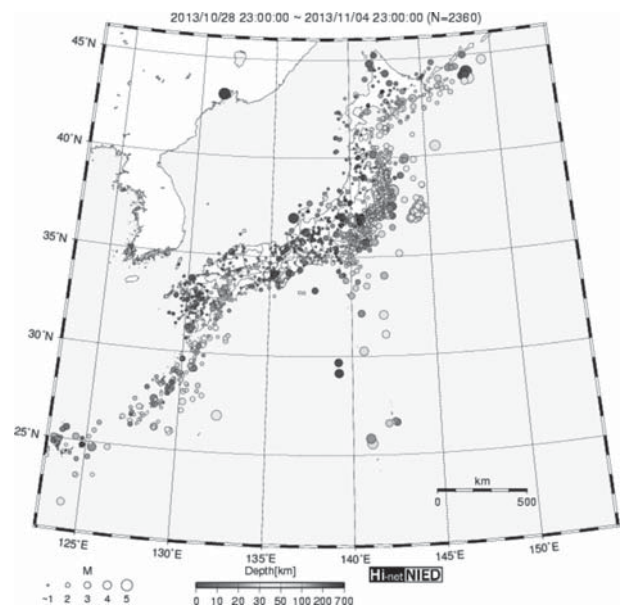
原子力発電所の敷地内の断層が活断層であるかの可能性、地震と活断層の関係、東北地方太平洋沖地震後の日本列島の活断層に関する議論など、活断層と地震の関係が話題になることが最近多い。本解説では、断層や活断層といった用語の定義について解説をし、活断層のリスクの評価がどのように行われているのかを解説する。一方、原子力発電所の立地等の観点での断層の評価、さらに地震の予測という観点での活断層の評価には課題が多く、これらの課題について最後に述べる。

I. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震を始めとして、日本列島では数多くの地震が発生している。この様子は防災科学技術研究所のホームページ¹⁾でも公開されている。第1図に示す震源分布のうち東北地方を見ると、2種類の震源の分布が見られる。ひとつは太平洋側から日本海側に徐々に深くなる震源の分布であり、東北地方太平洋沖地震の余震である。もうひとつは、地表付近の深さ10km程度より浅い領域において多数発生している地震である。

東北地方太平洋沖地震やその余震は、沈み込む太平洋プレートと日本列島の陸側のプレートの境界で発生する地震であり、M(マグニチュード)8を超える大きな地震が発生することがある。これに対し、深さ10km程度より浅い領域において発生する地震は、活断層と呼ばれる断層の活動により発生する。その地震の規模は大きくてもM7程度であるが、人が住んでいる場所から震源が近いいため、強い揺れなどにより大きな被害が出る。

本稿では、日本列島に被害を与える地震のうち、活断層で発生する地震に焦点を当てる。まず断層と活断層の定義を紹介する。次に、現在行われている活断層のリスクの評価方法について紹介する。最後に、断層の評価、地震の予測の課題を述べる。



第1図 日本列島付近の地震の震源分布(2013年10月28日から11月4日)
色の濃さは震源の深さ、丸の大きさはマグニチュードを表す。図は防災科学技術研究所ホームページより¹⁾。

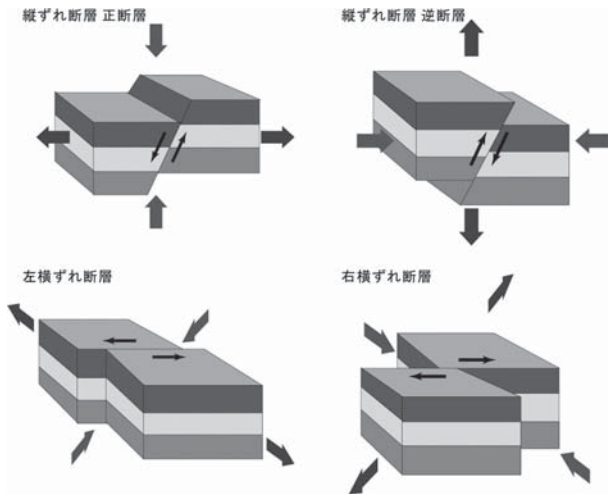
II. 断層とは

1. 断層の定義

断層とは、地層や岩石の中の割れ目に沿って両側の岩盤がずれている場所である。断層のずれ方は、第2図のように大きく縦ずれ断層と横ずれ断層に分かれる²⁾。縦ずれ断層には、上盤が下盤に対してずり下がる正断層と上盤が下盤に対してずり上がる逆断層がある。断層のずれに伴い、正断層では地盤は水平方向に延びるのに対し、逆断層では地盤は水平方向に縮む。一方、横ずれ断

Outline of Active Fault and Earthquake Sciences ; Long-term earthquake assessment and future problems : Norio SHIGEMATSU.

(2013年12月25日受理)



第2図 断層のずれのタイプ

図は文部科学省地震調査研究推進本部「地震の発生メカニズムを探る」より²⁾。

層には、断層を挟んで反対側の岩盤が左方向にずれる左横ずれ断層と、断層を挟んで反対側の岩盤が右方向にずれる右横ずれ断層がある。実際の断層は、縦ずれと横ずれの両方成分を持つことが多い。

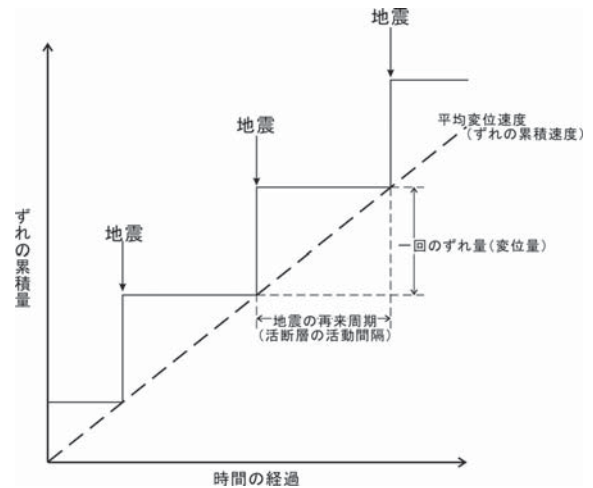
断層のうち、最近の地質年代に活動(ずれ)を繰り返す、将来活動する可能性のある断層を活断層と呼ぶ。活断層が活動する原因は、断層面に地殻変動に伴うせん断応力がかかっていることである。逆に、せん断応力がかかっていない断層は動かない。断層には正断層、逆断層、左横ずれ断層、右横ずれ断層があることを述べたが、この違いはせん断応力の向きの違い、さらには断層周囲の岩盤にかかる主応力の向きの違いによる。

活断層は常に動いているわけではなく、大部分は普段は固着をしていて間欠的に動く。断層が間欠的に動いたときに地震が発生する³⁾。断層運動とは、岩盤に応力がかかることにより発生する破壊現象である。断層のずれの蓄積量と時間の関係を見ると、時間の経過とともにずれの蓄積量は階段状に増加していく(第3図)。日本列島には多数の活断層があるが、最も変位速度が大きな断層で、活動の再来間隔(活動間隔)は数千年に1回程度、変位速度は1~10mm/年である⁵⁾。

2. 断層のずれ、断層露頭

活断層で地震が発生した時、ずれが地表に現れることがある。通常、活断層で発生する大地震の震源(断層の破壊が始まった場所)は深さ10~15km程度であることが多い。マグニチュードが7を超えるような大きな地震では、震源から始まった破壊が地表に到達し、地面をずらす。このような地表に現れた断層のずれを地震断層と呼ぶ。

最近、日本で発生した地震では、地震断層は1995年1月17日の兵庫県南部地震、2011年4月11日の福島県いわき市で発生した地震に際して現れている。第4図



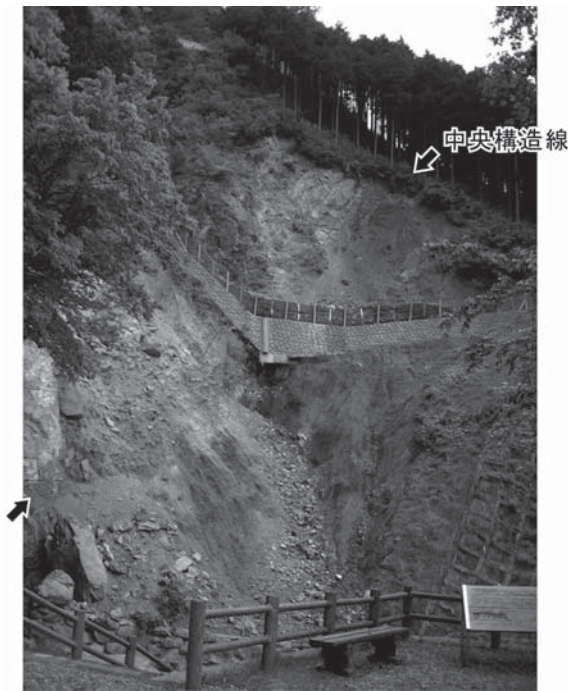
第3図 活断層の時間(年)の経過とずれの累積量の模式的関係図は文部科学省地震調査研究推進本部「日本の地震防災・活断層」を改訂⁴⁾。



第4図 2011年4月11日の福島県いわき市で発生した地震に際して現れた井戸沢断層のずれ
地震前は崖の上と下は同じ高さだった。

は2011年のいわきの地震の際の井戸沢断層のずれであり、最大で2mの正断層による縦ずれを引き起こしている。兵庫県南部地震は、淡路島北西部の野島断層から、神戸市北方にそびえる六甲山地山麓に延びる活断層に伴って発生した地震である。地震に際して野島断層では、断層の南東側の地面が北西側に比べ最大1.4m隆起し、最大2.1m右横ずれのずれを引き起こしている⁶⁾。このような活断層の直上に建築物等があった場合、地震による強い揺れだけでなく、ずれによる被害が発生する。これらの建築物がダムや発電所、鉄道・道路などの重要インフラ施設の場合、影響が甚大になる。

断層が地表に露出する場所が断層露頭である。断層に沿った岩石は、断層運動によって破碎し軟弱な破碎帯が分布している。破碎帯の内部は、水と岩石の反応によって大量の粘土鉱物が含まれている。断層に沿ってずれを生じた部分は、特に著しく破碎され、粘土の塊(断層ガウジ)となっている。第5図は、三重県松阪市飯高町月出にある日本の陸上では最長の1,000kmの長さを持つ



第5図 中央構造線の露頭の状況
中央構造線の断層の部分を示した。

断層である中央構造線の露頭である。露頭の上部を構成している白っぽい岩石と、下部を構成している黒っぽい部分の境界が断層(中央構造線)であり、その下盤側は厚さ数10mにわたり軟弱な破碎帯となっている。

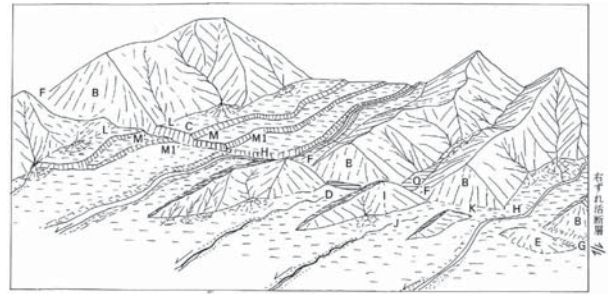
断層ガウジは、透水性が低く水をほとんど通さない。これに対し、破碎が比較的弱い部分は逆に透水性が高い⁷⁾。このため傾斜している断層などでは、断層上盤の破碎帯に大量の水が溜まり、これを断層ガウジがせき止めていることがある。トンネル工事で下盤側から掘削を行った場合、断層ガウジを掘り抜いた瞬間に上盤側破碎帯に溜まっていた大量の水が流出することがある。

3. 地形に現れる活断層

活断層のずれは同じ場所で繰り返す。このため活断層のずれは地形として累積する。第6図に、右横ずれ断層について、ずれにより生ずる地形を模式的に示した。右横ずれの断層運動に伴い、山の尾根、河川、そして河川の周囲に形成している河岸段丘がずれている。ある程度活動度が高い活断層の分布は地形から知ることができる^{4,5)}。

III. 活断層の評価

日本列島には多数の活断層がある。その中で活動度が高いと考えられる110の断層について政府地震調査研究推進本部により長期評価が行われている⁹⁾。これは活断層に関する調査研究に基づき、将来活動する区間、次の地震の規模、その際のずれの量、地震発生確率などを過去の活動履歴等に基づき推定したものである。



第6図 右横ずれ断層による地形のずれの模式図
図は岡田, 他(1979)⁸⁾を活断層研究会(1991)⁵⁾により改訂したもの。

活断層に関する調査研究では、活断層の位置、形状、運動方向や、過去の活動についての調査が行われる。活断層の位置、形状、運動方向は活断層地形の調査、断層露頭箇所の地質調査に基づく。過去の活動に関する情報として過去の活動時期、平均活動間隔、ずれの平均速度は、その活断層の活動度を直接表す情報である。ここでは後述するトレンチ調査が重要である。また段丘などの形成時期のわかっている地形と断層の関係から、過去の活動に関する情報を判断できる場合がある。

1. トレンチによる断層の活動履歴調査

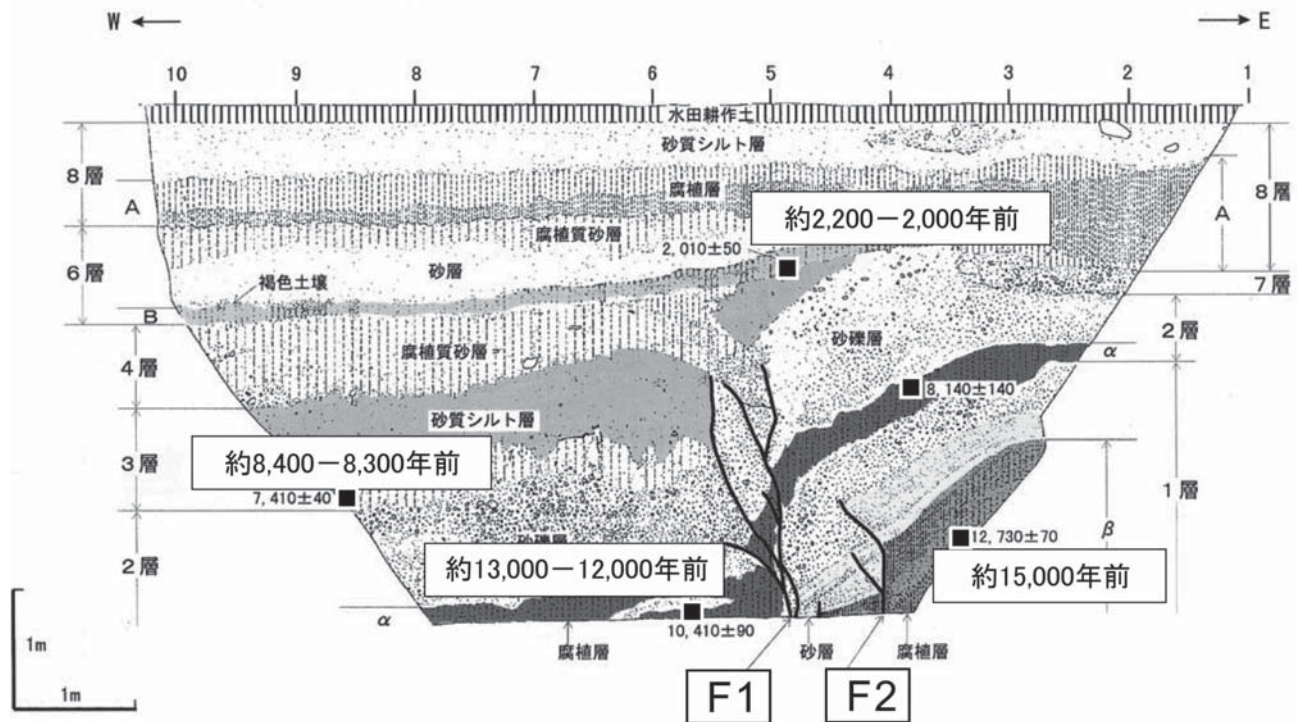
断層が堆積層を切る場合、堆積層の堆積時期とそれを切る断層との関係から、断層の活動時期を推定することができる。断層を横切る溝(トレンチ)を掘ることにより、堆積層を切る断層露頭を人工的に作り、それにより断層の活動履歴を明らかにできる。これにより、断層の1回の地震による変位量もしくは複数回の累積変位量、運動像(正断層・逆断層・横ずれ断層)、変位した(地震による断層運動があった)年代が明らかになる。なお、トレンチ調査では、堆積層が水平方向に広がっているため、断層運動の上下成分は定量的に求まるが、横ずれ成分は定性的にしかわからないことが多い。また断層が変位した年代から、活断層の平均活動間隔、最新活動時期がわかる。

第7図は九州熊本県の日奈久断層帯の柵(かこい)地点第2トレンチの壁面スケッチである^{10,11)}。日奈久断層帯は熊本県上益城郡益城町木山付近から八代海南部に至る断層帯で、右横ずれが卓越する。全体の長さは約87kmで、概ね北東-南西方向に延びる。1回の地震で活動する断層の長さ L (km)と、その時のマグニチュード M の間には

$$M = (\log L + 2.9) / 0.6$$

の経験式が知られており¹²⁾、この約87kmが同時に動いたとすればM8.1程度の地震が発生すると推定される。

第7図のトレンチでは、下位から1層 β 層から8層までの地層が堆積しており、これらをF1とF2という2つの断層が切っている。これらの断層はそれぞれ1つ地



第7図 日奈久断層帯の樁地点第2トレンチの北側壁面スケッチ

炭素同位体年代(黒四角:測定箇所)を暦年較正した値を四角枠内に示した。図は日本原子力発電機構(1998)¹¹⁾を地震調査研究推進本部(2013)¹⁰⁾により改訂したもの。

震活動を示している。断層F1は3層を切っており、6B層に覆われている。従って、F1の原因となった地震は、3層堆積後、6B層堆積前に発生した。同様に断層F2の原因となった地震が1β層堆積後、2α層堆積前に発生したことを示している。

このトレンチでは、各地層において炭素同位体年代が得られている。これは炭素の放射性同位体である¹⁴Cの存在比率に基づく。F1に切られる3層からは約8,400～8,300年前、F1を覆う6B層からは約2,200～2,000年前の年代が得られている。このことからF1のずれを引き起こした地震は、約8,400年前以後、約2,000年前以前のいずれかの時期に発生したと判断できる。同様にF2のずれを引き起こした地震は、F2に切られる1β層から約15,000年前、F2を覆う2α層から約13,000年～約12,000年前の年代が得られていることから、約15,000年前以後、約12,000年前以前のいずれかの時期に発生したと判断できる。実際の活動時期が求まった年代の幅のどこであるかは判断できない。

樁地点第2トレンチからは最新活動はF1の原因となった地震と判断される。トレンチ調査から判断されるもう一つの活動であるF2のずれを引き起こした地震を考えると、日奈久断層帯の平均活動間隔は3,600年～13,000年程度であると判断される。

2. 日奈久断層帯の長期評価

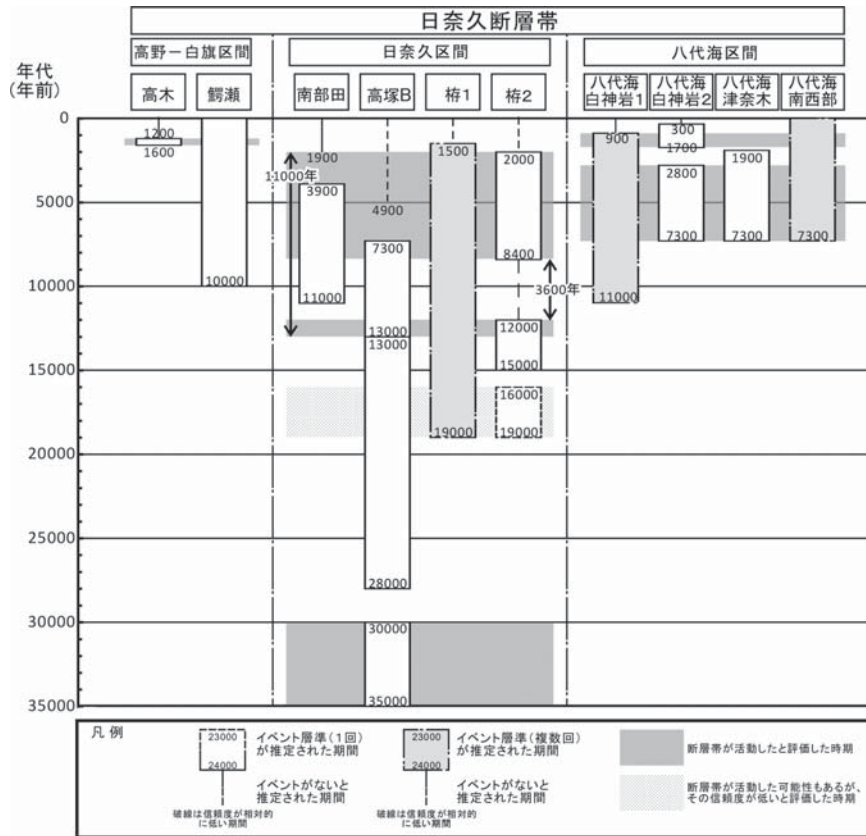
複数箇所得られた活動履歴を比較することにより、

断層帯全体の活動状況を評価できる。第8図は、日奈久断層帯に沿って得られた活動履歴を並べたものである¹⁰⁾。これを見ると、高野-白旗区間では約1,600年前以後、約1,200年前以前に最新活動があったと推定される。一方、この活動は日奈久区間では認められない。従って、日奈久断層帯は高野-白旗区間、日奈久主区間、八代海区間と複数の活動区間に分かれて活動していると推定される。

また樁地点第2トレンチ以外の結果を合わせると、日奈久断層帯の日奈久区間についての最新時期が約8,400年前以後、約2,000年前以前、平均活動間隔が3,600年～11,000年程度と推定される。仮に最新活動が約8,400年前、平均活動間隔が3,600年とすると、平均活動間隔に対し十分長い時間が経過していることになる。活断層の活動間隔が従うと考えられるBPT (Brownian Passage Time) 分布を用いた確率計算を行うと¹³⁾、今後30年以内の大地震の発生確率はほぼ0%～6%と求まる。BPT 分布を用いた確率計算では、活動間隔が長いと数字が小さくなり、この確率値は決して小さな数字ではないことに注意が必要である。

IV. 断層評価の問題・地震の予測の課題

断層の評価は現在、地震の予測という観点と原子力発電所の立地等という2つの観点で行われている。前述の政府による活断層の長期評価は地震の予測という観点で行われている。一方、原子力発電所、核燃料廃棄物処分



第8図 日奈久断層帯の活動の時空間分布
図は地震調査研究推進本部(2013)を改訂¹⁰⁾。

場の長期安定性などの施設の立地を考える場合、活動度よりも断層が活断層であるか否かが重要である。原子力発電所の場合、平成25年7月8日に施行された「実用発電用原子炉に係る新規制基準」¹⁴⁾において、「将来活動する可能性のある断層等」は、後期更新世以降(約12~13万年前以降)の活動が否定できないものとし、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降(約40万年前以降)まで遡って活動性を評価する。」と規定されている。

原子力発電所等の重要施設は、新しい堆積層がない場所に立地されることが多い。従って、活断層の長期評価で行われる、堆積層の堆積時期とそれを切る断層との関係から活動時期を推定する手法が使えないことが多い。一方、断層破砕帯内部にはその運動方向を示す構造が観察されることがある。また断層破砕帯には原岩には見られない粘土鉱物が含まれている。この粘土鉱物は断層運動の深さにより形成される種類が異なる。これらの慎重な検討により、対象断層が活断層であるか否かをある程度判断できる可能性がある。今後、このような考え方を原子炉の「規制基準」等に取り込むことも重要であろう。

地震の予測という観点を見た場合、前述の活断層の長期評価は、地震の短期直前予知はできないという観点から行われている。一方、前述の通り活断層で発生する大地震の震源の深さは10~15km程度である。このよう

な断層深部の情報に基づけば、より高精度の地震予測が可能になるかもしれない。しかし、断層深部の情報に基づく予測のためには、断層深部で起こる現象の理解が不足していること、活断層深部を直接観測することが技術的に不可能であることという2つの大きな問題がある。

断層深部で起こる現象の理解のためには、岩石の変形の性質の理解が不可欠である。岩石の変形の性質は、温度・圧力条件により大きく変化する。例えば、10~15kmより深くなると、温度が300℃を超え、岩石は塑性的に流動し地震のような破壊は起こりにくくなる。過去の断層深部が地表に露出している場所の状況に基づく¹⁵⁾、塑性流動した岩石の分布の幅は限られている。また断層のずれの蓄積量と時間の関係は、第3図とは異なり、時間の経過とともにずれの蓄積量は直線的に増加していくと考えられる。現状では、地下の異なる条件下における断層の挙動についての理解は、地震の予測ができるほど十分ではない。

観測技術という面では、日本列島の地殻変動は、衛星測位システムの発達により高精度かつリアルタイムで捉えることが現在では可能である¹⁶⁾。また、日本全国には稠密な地震観測網が整備され、それによる地震データに基づき、地下の速度構造を求めることができる¹⁷⁾。しかし、衛星測位システムによる観測は、地下10~15kmの地殻変動を直接見ているわけではない。また地

震データに基づく速度構造解析も、高空間分解能での解析には限界がある。さらに観測データと岩石の挙動をつなげる手法にも課題がある。結果的に活断層深部については、十分な情報を得ることができないというのが現状である。

V. 結 言

日本列島には多数の活断層がある。この一部について政府地震調査研究推進本部により、地震の予測という観点から長期評価が行われている。また、原子力発電所等の安全審査において、敷地内の断層が活断層であるかの審査が行われている。

原子力発電所等の敷地内の断層の審査にあたっては、敷地内に新しい堆積層がないことが判断を困難にしている。このためには、新たな判断基準が必要である。一方、地震の予測という観点では、高精度の予測は現在不可能である。ここで、大地震が発生する断層深部(深さ10～15km程度)の情報の活用が必要かもしれない。このためには、断層深部で起こる現象の理解と、直接観測技術という2つの大きな問題がある。今後、より高い精度での地震の予測を行うためには、断層深部の情報をいかに捉え、それを評価に生かすかに関わっていると考えている。

一部の図については、防災科学技術所、文部科学省地震調査研究推進本部、原子力発電技術機構が作成した図を利用させていただいた。記して感謝します。

— 参考資料 —

- 1) 防災科学技術総合研究所, 防災科学技術総合研究所ホームページ,
<http://www.bosai.go.jp/>.
- 2) 文部科学省地震調査研究推進本部, 地震の発生メカニズムを

- 探る一発生のしくみと地震調査研究推進本部の役割 -, p. 35 (2004).
- 3) 松田時彦, 活断層, 岩波書店, p.242 (2002).
- 4) 文部科学省地震調査研究推進本部, 日本の地震防災・活断層, p. 27 (2004).
- 5) 活断層研究会, 新編日本の活断層, 東京大学出版会 p. 412 (1991).
- 6) 栗田泰夫, 水野清秀, 1万分の1兵庫県南部地震に伴う地震断層ストリップマップ—野島・小倉及び灘川地震断層—, 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター, p. 74 (1998).
- 7) J.S. Cain, *Geology*, 24, 1025–1028 (1996).
- 8) 岡田篤正, 愛知県の地質・地盤(その4)(活断層), 愛知県防災会議地震部会, (1979).
- 9) 文部科学省地震調査研究推進本部, 文部科学省地震調査研究推進本部ホームページ
<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>.
- 10) 文部科学省地震調査研究推進本部, 布田川断層帯・日奈久断層帯の評価(一部改訂), p. 66 (2013).
- 11) 原子力発電技術機構, 平成9年度原子力発電立地確認調査に関する報告書(1), p.136 (1998).
- 12) 松田時彦, 地震第2輯, 28, 269–283 (1975).
- 13) 文部科学省地震調査研究推進本部, 長期的な地震発生確率の評価手法について, p.46 (2001).
- 14) 原子力規制委員会, 敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド,
http://www.nsr.go.jp/nra/kettei/data/20130628_jitsuyoutishitsu.pdf (2013).
- 15) 重松紀生他, 地学雑誌, 112, 897–914 (2003).
- 16) 国土地理院, 国土地理院ホームページ,
http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss_main.html.
- 17) M. Matsubara, *et al.*, *Tectonophysics*, 454, 86–103 (2008).

著者紹介

重松紀生 (しげまつ・のりお)

産業技術総合研究所
(専門分野/関心分野) 構造地質学, 断層深部での岩石の変形.



解説

福島原子力発電所の事故対応および廃炉のための遠隔操作・ロボット技術

東京大学 浅間 一

東京電力福島第一原子力発電所の事故後、高放射線環境下での様々な作業において、ロボットや遠隔操作機器の活用が求められた。本稿では、これまでに導入されたロボットや遠隔操作機器について紹介するとともに、現在廃炉に向けて行われている技術開発の取り組みについて解説する。また、福島原発の廃炉や、今後起こり得る災害に対する備えとして何をすべきかについて述べる。

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故後、高放射線環境下での様々な作業において、ロボットや遠隔操作機器の活用が求められた¹⁾。事故直後は、それらの機器がなかなかスムーズに導入できなかったものの、これまでに30種類以上のロボット技術が投入され、事故対応や廃炉に向けての作業において、多大な貢献を果たしている。本稿では、これまでにどのようなロボットや遠隔操作機器が導入されたかについて紹介するとともに、現在廃炉に向けて行われている技術開発について解説する。また、今後、福島原発の廃炉に向けてどのような技術開発を行う必要があるか、さらに今後起こり得る原子力事故に対する備えとして何をすべきかについて述べる。

II. 福島原発事故におけるロボット技術活用のニーズ

事故直後の緊急対応におけるロボットや遠隔操作機器のミッションは、状況把握、原子炉や使用済み燃料プールの冷却とその安定化、汚染物質の封じ込め、瓦礫の除去による作業環境改善などであったが、冷温停止後(平成24年1月以降)は、廃炉に向けた使用済み燃料プールからの燃料や燃料デブリの取り出しに移行している。しかし、現場で様々な作業を行っている作業員の被ばくを低減することが何よりも重要なミッションである。

事故直後は、政府と東京電力が、福島第一原子力発電所の災害対策復旧のための6つの特別プロジェクトチー

Remote-Controlled Technology and Robot Technology for Accident Response and Decommissioning of Fukushima Nuclear Power Plant: Hajime ASAMA.

(2013年12月8日受理)

ム(PT)を設置した。そのうちの一つがリモート・コントロール化PTであり、ここで緊急対応におけるロボットや遠隔操作機器を現場に導入するための議論が行われた。

政府と東京電力は、福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋として、当面の取り組みのロードマップを作成し、それに沿って様々な緊急対応の活動が行われた。事故発生直後、原子炉建屋の周辺は放出された汚染物質により放射線量が非常に高く、作業員が接近することも非常に困難な状況であり、様々な場面でロボットなど遠隔操作可能な機器の活用が求められた。しかし、事故直後の緊急対応においては、極めて混乱した状況が存在した。遠隔操作機器のユーザーである東京電力は、どこにどのようなロボット技術が存在するのかを十分に把握することができず、逆にロボット開発を行う研究者やロボット製造業者は、どこにどのようなニーズが存在するのかがなかなか把握できなかった。そこで、ロボット関係の研究者や技術者が集まり、災害対応の状況に関する情報交換を行うとともに、対災害ロボティクスタスクフォース(ROBOTAD: ROBOTics Taskforce for Anti-Disaster)²⁾を設立し、投入可能なロボット技術に関する情報収集を行うとともに、ロボットで用いられている部品の耐放射線性能や、原子炉建屋内でのロボットを遠隔操作するための無線通信の可否など、災害現場や事故現場にロボットを導入するための技術的な議論をweb上で、あるいは会合を持ちながら行い、国や東京電力が設置したりリモート・コントロール化PTなどに対して様々な情報を提供するなどの支援活動を行った。

緊急対応、および廃炉措置におけるロボット技術活用の具体的ニーズは、注水冷却、建屋内外の調査(映像による把握、放射線量、温度、湿度、酸素濃度等の計測)、

瓦礫除去、機材の運搬・設置、サンプル（ダスト、汚染水、燃料デブリなど）の採取、遮蔽、除染など、非常に多岐にわたった。その作業内容のみならず、場所、環境条件も非常に多様であり、この多様なニーズに対し、これまでに様々なロボット技術が投入された。

Ⅲ. 事故対応で活用されたロボット技術

1. 冷却

東京電力福島第一発電所の事故発生直後は、原子炉や使用済み燃料プールの冷却が最大の課題であった。安定な注水を行う手段として、平成23年3月22日より、コンクリートポンプ車による注水が4号機で行われた。使用されたのは、Putzmeister社製および中国三一重工社製のコンクリートポンプ車である。その後、数台が1, 3, 4号機において導入され、遠隔操作できるように改造された。コンクリートポンプ車は、ぞうさん、キリン、マンモス、シマウマなどの愛称で呼ばれていた。遠隔操作では、コンクリートポンプ車のブームの先端に照明とカメラを設置し、免震棟からカメラ画像をモニタリングしながら、注水が安定に行えるようにブーム（アーム部）等を無線LANによって遠隔制御した。

2. 瓦礫除去

平成23年4月6日より、無人化施工機械による瓦礫除去が開始された。事故直後の福島第一原子力発電所内には、津波によって発生した瓦礫と、原子炉建屋の水素爆発によって発生した瓦礫が多数存在した。特に、水素爆発によって発生した瓦礫は、放射線レベルが高く、発電所内での復旧作業の大きな妨げとなっていた。そこで、大成建設、鹿島建設、清水建設のJV（共同企業体）が、高線量作業環境における作業員の被ばく線量の低減を目的として、無人化施工機械を用いた瓦礫の除去を行った。具体的には、バックホウ、クローラダンプ、オペレータ車、カメラ車などが複数台使用された。

先端のアタッチメントをアイアンフォークに付け替えたバックホウを遠隔から無人で操作し、瓦礫をコンテナに収納するとともに、クローラダンプを遠隔から無人で操作し、コンテナ保管場まで輸送する。この無人化施工機械を用いた発電所内の瓦礫除去作業は、11月までの約7ヶ月間実施され、約56,000m²のエリアに存在した、約20,000m³の瓦礫（屋外のみ）を除去することに成功した。

その後も、平成23年5月10日より、3号機の原子炉建屋大物搬入口内外において、遠隔操作機器を用いた瓦礫除去が開始された。使用された機器は、米国QinetiQ社製のTalonやBob Cat、スウェーデンBrokk社製のBrokk-90やBrokk-330などである。水素爆発を起こした原子炉建屋の内部も放射線レベルの高い瓦礫が多く存在しており、それらの除去がこれらの機器を用いて行わ

れた。なお、Talonには、アイダホ国立研究所から提供されたもの1機と、QinetiQ社から直接供与されたもの2機があったが、瓦礫除去に使用されたのは後者である。その後、平成25年7月25日には、3号機原子炉建屋内1階瓦礫等の障害物の撤去作業に遠隔操作重機ASTACO-SoRa（日立エンジニアリング・アンド・サービス社製）が使用されている。

また、水素爆発を起こした原子炉建屋の最上階瓦礫の除去作業が遠隔操作によって行われた。4号機の原子炉建屋上部の瓦礫については、放射線量レベルが低かったために、建設機械を用い有人作業で撤去を行ったが、3号機の原子炉建屋上部の瓦礫については、放射線量レベルが高いために、作業員の被ばく線量低減のため、原子炉建屋周辺に構築した構台および地盤面より、クレーンやバックホウ（ニブラ）など、遠隔操作による無人重機を用いて実施された。

また、鹿島建設は、平成25年6月24日に3号機の放射線レベルの高い瓦礫の搬送作業の完全自動化を達成したと発表した。原子炉建屋の瓦礫撤去作業現場から構内保管施設までの約1kmを無人化クローラダンプによって、構内保管施設入口から保管場までの傾斜角7%のスロープや切り返し部を含む往復約800mの走路を無人化フォークリフトによって自動運搬している。

3. 調査

平成23年4月17日から、米国iRobot社製のPackbot（2台）を用いて原子力建屋の内部の調査が開始された。当初Packbotは、建屋内の放射線量・雰囲気温度・雰囲気湿度・酸素濃度の測定に用いられたが、その後も、Packbotは、炉心スプレイ（CS）系の健全性確認や原子炉建屋1階部分の調査などに数多く用いられている。

平成23年6月には、千葉工業大学、東北大学、国際レスキューシステム研究機構（IRS）、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）などが開発したQuinceが投入された。Quinceは、瓦礫上などの走破性に優れていることから、階段の昇降が必要となる建屋内のミッションで活用された。Quinceは、平成23年6月24日に行われた地下の汚染水のサンプリングと水位計の設置のミッションには失敗したものの、平成23年7月8日には2号機の3階部分の調査、平成23年7月22日にはPackbotとともに炉心スプレイ（CS）系の健全性確認にも活用され、大いなる貢献を果たした。平成23年10月20日には2号機の5階部分の調査に成功したが、帰還の際に通信のトラブルによって3階部分で動作不能となった。その後、同形の機種として、Quince 2、Quince 3が投入され、これらは、2号機原子炉建屋1階MSIV（主蒸気隔離弁）室調査など、現在でも建屋内の調査などに活用されている。

この他にも、日本原子力研究開発機構 (JAEA) が開発した調査用ロボット JAEA-3, TOPY 工業が開発した Survey Runner, 三菱電機特機システムが開発した FRIGO-MA, ホンダと産総研が開発した高所調査用ロボット, 東芝が開発した4足歩行ロボットと小型走行車などが、人が進入することが困難な原子炉建屋内の様々な調査に用いられた。

これらのロボットや遠隔操作機器以外にも、米国 Honeywell 社製の小型無人ヘリ T-Hawk による原子炉建屋の空中からの調査、工業用内視鏡を用いた2号機格納容器内調査、日立製作所製の ROV (水中ロボット) による4号機使用済燃料プール内調査・瓦礫分布マップ作成、日立製作所製のバルーンを用いた1号機オペレーションフロア調査など、ロボット技術を使って調査が行われている。また、JAEA 製のロボット操作車 RC-1 も、米国 QinetiQ 社製 Talon を用いた調査、ガンマカメラを用いた線量分布測定などに用いられた。

平成25年11月13日に、資源エネルギー庁のプロジェクト (後述) によって開発された遊泳調査ロボットが、格納容器からトラス室に漏えいしている汚染水を発見した。これは、遠隔技術タスクフォースでの議論に基づき、設置された WG (主査：九州工大浦環教授) で具体的な検討を行い、日立 GE ニュークリア・エナジー社が開発したものである。これまでも、汚染水の漏えい箇所を特定すべく、様々なロボットが投入されてきたが、漏えい箇所を初めて発見できたという点で、特記すべき成果である。

4. 除染

平成23年6月末から7月上旬にかけて、米国 iRobot 社製の Warrior 及び Packbot を用いて、3号機原子炉建屋の清掃作業が実施された。Warrior に掃除機を設置し、床面等の清掃を行うことによる除染、環境線量の低減が図られたが、大きな効果は得られなかった。なお、Warrior は、その後も3号機の原子炉建屋内干渉物の移動などにも使用されている。

平成25年11月28日からは、ATOX 社製の除染装置の遠隔操作によって、2号機原子炉建屋1階の除染作業が行われている。これ以外にも、資源エネルギー庁の補助金 (後述) によって開発が行われていた高圧水洗浄除染装置、ドライアイスプラスト除染装置、プラスト・吸引回収除染装置や、Pentek 社製除染機器 (スキャブラ) などが逐次投入されている。

IV. 廃炉に向けてのロボット技術開発

原子力委員会東京電力福島第一原子力発電所中長期措置検討専門部会では、この極めて困難な課題をいかに解決し、ミッションを達成するかを検討が行われた³⁾。廃炉に向けての中長期ロードマップ⁴⁾が示されるととも

に、今後の廃炉に向けての研究開発の実施においては、以下の2点が明記されている。

- ・国が責任を持って、必要な研究開発を進める
- ・国内外の英知を結集して、中長期の事故収束にあたる

これを受け、政府と東京電力は、中長期対策会議の中に研究開発推進本部を設置するとともに、中長期ロードマップの進捗管理を行うための運営会議を設置し、中長期対策における研究開発の推進を行った。さらに、平成25年2月には、東京電力福島第一原子力発電所の廃炉推進体制を強化するために、政府・東京電力中長期対策会議は廃止され、新たに「東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議」が設置された。廃炉に向けた進捗の詳細な確認は、廃炉対策推進会議 (現廃炉・汚染水対策チーム会合) の事務局会議で行われている。

なお、廃炉に向けた研究開発を、さらに国内外の英知を結集して推進するための技術研究組合「国際廃炉研究開発機構 (IRID: International Research Institute for Nuclear Decommissioning)」が平成25年8月に発足した。この機構が今後の研究開発を主導することになる。

以下に、これまで廃炉に向けて行われているロボットや遠隔操作機器の研究開発の例を紹介する。

1. 資源エネルギー庁の補助金・委託費による遠隔操作機器の研究開発

平成24年度には、経済産業省資源エネルギー庁の発電用原子炉等事故対応関連技術開発費補助金 (5.0 億円) および基盤整備委託費 (15.0 億円) によって、原子炉建屋内の除染作業、原子炉建屋・格納容器からの漏えい箇所の調査、格納容器内部状況調査、原子炉建屋漏えい箇所止水・格納容器下部補修作業、圧力容器／格納容器の腐食に対する長期健全性評価などの研究開発が進められている。実施者は、プラントメーカ3社 (日立 GE ニュークリア・エナジー、東芝、三菱重工業) である。

プラントメーカ3社は、国内外の英知を結集してこれらの開発を行うべく、適用可能な技術を公募によって調査し、技術カタログ⁵⁾としてまとめるとともに、これに基づき、開発項目ごとに公募を行うなどして、国内外の有用な技術を調達しながら、開発を進めている。

また、平成25年度においても、資源エネルギー庁は、発電用原子炉等廃炉・安全技術基盤整備委託費および開発費補助金を予算として計上し、格納容器漏えい箇所特定技術・補修技術の開発、格納容器内部調査技術の開発、遠隔除染技術の開発、圧力容器内部調査の技術の開発、燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発などが行われている。

2. 遠隔技術タスクフォース

前述の政府・東京電力中長期対策会議の研究開発推進本部では、研究開発は、ミッションごとに個別のプロ

プロジェクトが進められていたが、ロボットや遠隔操作機器の開発は、多くの困難が予想され、またプロジェクト全体をカバーする必要があることから、横断的な組織として、遠隔技術タスクフォースが設置された。ここでは、様々なニーズに対し、ロボット技術(RT: Robot Technology)をどのように活用し、ミッションを達成するかを検討し、ソリューションを提案したり、一つのアプローチが失敗したことも想定し、そのバックアッププランを提案するとともに、具体的な研究開発プロジェクトの立ち上げ、その実施時における助言を与える役割を負っている。

これまでに述べたような機器開発の検討に加え、原子炉建屋の屋上階調査や圧力抑制室の漏えい個所の調査、サプレッションチェンバー(S/C)内の水位計測などのミッションに対し、ミッションごとにWG(ワーキンググループ)を設置し、それを遂行するための遠隔操作システムの検討などを行っている。具体的には、小型飛行船、小型無人ヘリ、懸垂機構、遊泳調査ロボットなどを活用した調査システムや、様々な計測手法の検討を行うとともに、経済産業省資源エネルギー庁の平成24年度発電用原子炉等事故対応関連技術基盤整備事業「円筒容器内水位測定のための遠隔基盤技術の開発」でS/C内水位測定用遠隔操作デバイスが(WG主査：芝浦工大松日楽教授)、また「遠隔技術基盤の高度化に向けた遊泳調査ロボットの技術開発」で遠隔操作遊泳調査ロボットが開発されている。それらの導入はすでに開始されており、前述のような顕著な成果をあげている。

また、4足歩行ロボットを用いた圧力抑制室のベント管下部周辺調査においてトラブルが発生した際にも、遠隔技術タスクフォースにWGが設置され(主査：千葉工大米田教授)、問題点を吟味するとともに、改造案の検討が行われた。なおこれについては、WGの検討結果に基づきしかるべき対策が施され、ベント管下部周辺調査のミッションに成功している。

政府・東京電力中長期対策会議の研究開発推進本部が廃炉対策会議に移行した後も、ロボットや遠隔操作機器の開発は継続して行う必要があり、遠隔技術タスクフォースの機能は、前述の研究開発技術組合「国際廃炉研究開発機構」の中で継続されていくことになると考えられる。

3. 災害対応無人化システムプロジェクト

NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)は、平成23年度第三次補正予算で災害対応共通基盤技術として、災害対応無人化システムプロジェクト⁶⁾を行った(10.0億円)。本プロジェクトでは、我が国において、災害時に無人で対応できるロボット等(災害対応無人化システム)の実用機の開発が必要であるとの観点から、作業員の立ち入りが困難な、狭隘で有害汚染物質環境下に

ある設備内等において、作業現場に移動し、各種モニタリング、無人作業を行うための作業移動機構等の開発が行われている。開発項目は以下の通りである。

(1) 作業移動機構の開発

- ①小型高踏破性遠隔移動装置の開発
- ②通信技術の開発
- ③遠隔操作ヒューマンインタフェースの開発
- ④狭隘部遠隔重量物荷揚/作業台車の開発
- ⑤重量物ハンドリング遠隔操作荷揚げ台車の開発

(2) 計測・作業要素技術の開発

- ⑥大気中・水中モニタリング/ハンドリングデバイス等の開発・改良
- (a)ガンマカメラの開発
- (b)汚染状況マッピング技術の開発
- (c)災害対応ロボット操縦訓練シミュレータの開発
- (d)水陸両用移動装置の開発

(3) 災害対策用作業アシストロボットの開発

- ⑦作業アシストロボットの開発

これは、原発事故対応を目的としたプロジェクトではないが、ここで開発されている技術は、福島原発事故の中長期措置にも適用できることを前提としたものであり、今後の廃炉対策においても随時活用することが大いに期待されている。

V. 今後の課題

1. 廃炉に向けて

平成25年11月に使用済み燃料プールからの燃料の取り出しが開始され、中長期ロードマップの第2期に突入した。しかし、廃炉までには30~40年かかると予想されており、今後も、除染、汚染水の漏えい箇所の特定・補修、燃料デブリの調査・取り出しなど、人が行うことが困難な作業が目白押しであり、廃炉に向けてのロボットや遠隔操作機器開発は、継続的に行っていかなければならない。また、現状のロードマップでは、格納容器を補修し、水を張り遮蔽した上で燃料デブリの取り出しを行う計画となっているが、実際には、格納容器の水張りのための健全性チェックや補修を行うことは、非常に困難なことが予想されるので、バックアッププランとして、気中での燃料デブリ取り出しのための技術開発も必要となる可能性もある。その場合、機器には格段に高い耐放射性が要求されることから、基盤技術開発からしっかり行う必要が生じると考えられる。

廃炉に向けて開発が求められているロボットや遠隔操作機器は、いずれも新規に開発されるものばかりであり、現場で確実に使用できる装置として完成させるには、研究開発された後も、機能検証、実証試験、さらにはオペレータの訓練などもしっかり行った上で、投入する必要がある。日本原子力研究開発機構は、福島廃炉技術安全研究所を設置するとともに、遠隔操作機器・装置

実証施設(通称モックアップ施設)の建設・運用を行う計画を進めている。この施設は、今後、開発されたロボットや遠隔操作機器の機能検証・実証試験、オペレータの訓練を行う上で極めて重要な役割を果たす。

2. 原子力災害への備え

ドイツのKHGやフランスのGroupe INTRAは、それぞれ1977年、1988年に設立された原子力緊急対応組織である。いずれの組織も、ロボットを含む原子力災害用の実用機材を多数有しており、オペレータの訓練も日々行いながら、原子力事故発生後24時間以内に、必要な機材と人員を現場に配備できるように体制を整えている。日本においても、福島原発の事故を教訓として、今後発生し得る原子力災害に対して備えを持つことが極めて重要であることがようやく再認識された。

電気事業連合会は、原子力事故が発生した場合にも、多様かつ高度な災害対応が可能な支援体制を構築するとして、2015年度中に「原子力緊急事態支援組織」を設置するとしている。またこれを受け、日本原子力発電(株)は、原子力緊急事態支援センターを設置し、災害対応用ロボットなどの機材を逐次調達するとともに、オペレータの訓練プログラムを実施している。災害は極めて多様であり、複雑な環境で多様な作業を行うことが求められることから、今後も、必要となる機能を有する様々なロボットを随時調達し、配備、運用を行い、センター機能を拡充していくことが計画されている。

3. 災害への備えとしてのロボット

日本は、地震、津波、台風、火山爆発など、自然災害が多い。また、劣化などによる社会インフラ(トンネル、橋梁、高速道路、ダムなど)や設備インフラ(化学プラント、コンビナートなど)の事故も急増している。

産業競争力懇談会では、2011年度から災害対応ロボットに関するプロジェクトを実施し、災害に対する備えとして、このような災害に対応可能なロボット技術の開発と運用システムを構築する方策を検討するとともに、その技術によって産業競争力を高めるための提言を取りまとめている^{7~9)}。ここでは紙面の制約から、その提言の内容に関する詳細は別報¹⁰⁾に譲るが、非常時に対する備えとして、ロボットなどの機材を持つ上で最も重要なことは、単に研究開発と実証試験を行うのみならず、平時からそれらを利用するような状況を構築することである。

福島原発の事故を受けて、これから長期にわたり取り

組まなければならない廃炉に向けてロボット技術の開発・活用などの活動が、災害対応ロボットの社会実装の先導役となることが期待される。

VI. おわりに

本稿では、東京電力福島第一原子力発電所事故に対して、これまでに活用されたロボットや遠隔操作機器などについて紹介するとともに、今後廃炉に向けて必要となる技術開発について述べ、また、今後起こり得る原子力事故への備えとしてのロボット技術の開発と運用について述べた。なお、本稿の執筆にあたり、ロボットや遠隔操作機器の現場導入に関して、東京電力(株)吉野伸氏、田中勤氏、日本原子力研究開発機構川妻伸二氏に情報を提供していただいた。

今回の経験をもとに、原子力災害のみならず、自然災害や社会インフラや設備の事故などの人工災害(産業災害)に対しても、人が行うことが危険、あるいは困難、不可能な作業をロボットや遠隔操作機器で行えるように備えることが、ナショナルレジリエンスという観点で極めて重要である。

— 参考資料 —

- 1) 浅間 一：東日本大震災及び原子力発電所事故に活用されるロボット技術, ITU ジャーナル, vol. 42, no. 2, pp. 44-47, 2012.
- 2) <http://roboticstaskforce.wordpress.com/>
- 3) 原子力委員会：“東京電力(株)福島第一原子力発電所における中長期措置に関する検討結果”, 東京電力(株)福島第一原子力発電所中長期措置検討専門部会, 2011.
- 4) <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/conference-j.html>.
- 5) http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/20120626_01.html.
- 6) http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100045.html.
- 7) <http://www.cocn.jp/common/pdf/thema39-L.pdf>.
- 8) <http://www.cocn.jp/common/pdf/thema50-L.pdf>.
- 9) <http://www.cocn.jp/common/pdf/thema60-S.pdf>.
- 10) 浅間 一：“災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システムの構築”, 日本ロボット学会誌, vol.32, no.1, pp.37-41 (2014).

著者紹介

浅間 一 (あさま・はじめ)

東京大学

(専門分野/関心分野) 自律分散型ロボットシステム, 空間知能化, サービス工学, 移動知, サービスロボティクス, ヒューマンインタフェース。



「原子カムラ」の境界を越えるための コミュニケーション(2) 「フォーラム」という取り組み

パブリック・アウトリーチ 木村 浩

原子力発電所に代表される社会的忌避感を内包する施設(迷惑施設)と社会とが適切な関係を作ろうとする場面において、市民と専門家のその技術に関連する認識のギャップは、それを阻む大きな要因のひとつとして古くから指摘されてきた。福島事故後に特によく聞かれるようになった「原子カムラ」という言葉に表されるように、この市民と専門家のギャップはますます広がっている。本稿では、このお互いのギャップを越えるために著者らが取り組んでいるコミュニケーション・フィールドである「フォーラム」を紹介する。

I. はじめに

原子力発電所に代表される社会的忌避感を内包する施設(迷惑施設)と社会とが適切な関係を作ろうとする場面において、市民と専門家のその技術に関連する認識のギャップは、それを阻害する大きな要因のひとつとして古くから指摘されてきた。そして、福島第一原子力発電所事故(以降、福島事故)の後によく聞かれるようになった「原子カムラ」という言葉は、この市民と専門家のギャップを示した端的な言葉として捉えることができる。

原子力業界は、なぜ社会から「原子カムラ」と認識されるのだろうか。「ムラ」を形作るのは、ムラ内部の構成員の凝集力ばかりではない。「ムラ」を外から見ると「ムラ」自体をどのように捉えるのか、ということも「ムラ」を形作る要因になりうるだろう。すなわち、「ムラ内部の構成員」と「世間(Public, 集合としての市民)」との相互作用によって、その2者の間に境界が生じた(境界をお互いが作り上げた)状態と捉えることができる。

そして、「原子カムラ」の存在は、市民への情報伝達を考えると、大きな弊害となる。

まず、市民と専門家との間は、情報の偏りが大きいことは否定できない。従来、この2者間のコミュニケーションについては、市民の声を聞くことこそが大切、市民をパートナーとして扱うことが大切など、多くのコ

ミュニケーション専門家が指摘してきた。しかし、実際に行われるコミュニケーションの場では、この情報の偏りが存在するために、どうしても専門家から市民への情報伝達が主なものとして実施されてきたのが実情である。

しかし「原子カムラ」の存在が強く指摘されている今、従来と変わらないコミュニケーションを実施しても、意味は全くなくなってしまった。なぜなら、「原子カムラ」からの情報は信頼されないのが現在の社会的状況であり、つまり、発信された情報の価値が受け手側ではゼロに等しく、情報提供型のコミュニケーションは何の意味も持たない。

福島事故後、原子力産業に関する情報の透明化が特に叫ばれるようになった。しかし、原子力という科学技術においては一番専門性の高いことが期待できる「原子カムラ」から出される情報は、社会から信頼されない。社会に提供される情報に対して、社会が適正に判断できない状況というのは、将来の日本のエネルギー問題を解決していく際の大きな障害となることは想像に難くない。

したがって、原子力業界が取り組まなければならないのは、市民と専門家が協働して「原子カムラ」を越えることによって、適正な情報を社会が獲得できるようになるための風土を作り出すことである。そのためにも、原子力専門家と市民との健全なコミュニケーションを可能とするために、この「原子カムラ」の境界を、内(原子力専門家)から外(市民)から協働して乗り越えていくための取り組みが必要であろう。

では、このような取り組みはどのようにして実行可能だろうか。著者が代表を務める研究グループでは、市民と専門家が対等な立場で、お互いの間のギャップとはそも

A Communication Method beyond the Gap between Citizens and Experts (2) ; Introduction of "Forum" : Hiroshi KIMURA.

(2014年1月6日 受理)

■前回タイトル

第1回 市民と専門家との間に存在する心理的境界

そも何なのか、なぜそれが生じたのか、さらには、知識、情報量、経験、社会的立場、価値観、人生観等までを含んだお互いの背景を共有し、尊重する仕組みを作ること、解決に向けた何かしらの方針が得られると考えた。

そこで、私たちのグループでは、平成25年5月から7月にかけて、市民10名程度、専門家10名程度が一堂に会して話し合うコミュニケーション・フィールド「フォーラム」を提案・試行した。フォーラムには、市民と専門家が対等な立場で、お互いの間のギャップを深く認識し、そのギャップを越えて、かつ、尊重しあえるように、さまざまな工夫を施した。シリーズの2回目になる本稿では、このフォーラムについて、設計から実施の様子までを紹介する。

II. 「フォーラム」という取り組み

1. 「フォーラム」が有すべき条件の整理

フォーラムにおいて、もっとも重要かつ達成の難しい課題は、どうしたら異なるお互いを「尊重」できるようになるのか、ということである。そのためには、フォーラムへの参加者が、自分とは異なる考え方もあってよいし、それが当たり前だと考えることができるようにならなければならない。そして、そのように考えることを良しとする雰囲気を作らなければならない。そのために、(1)参加者が公平だ／話題等が誘導的ではないと思える場作り、(2)冷静な話し合いを導く／その場を客観的に捉えられるような場作り、の2つの要件を配慮してフォーラムを設計しなければならない。そこで、この2つの要件からフォーラムが有すべき条件を整理した。

「(1)参加者が公平だ／話題等が誘導的ではないと思える場作り」を満たすための条件について、まず、参加者の決定に際して、社会調査を基にして、原子力に関する意見が偏らないように参加者を選択する。また、フォーラムでの話し合いは、1グループ6～7名の「グループワーク」を中心として、ブレインストーミングを導入し、特定の人が話しすぎないようなコミュニケーション・ルールを設定するなど、市民と専門家が対等に話せる雰囲気作りをする。さらには、フォーラムで話し合うテーマは、原則として参加者が決めるようにし、運営側の誘導や特定の人の意見をことさらに取り上げるようにならないよう、運営側のルールも設定する。

なお、フォーラムの目的を考えればお互いの立場や考え方を尊重することが第一義であって、何か具体的な提言などをするのではない、ということが確認され、オープンエンドのコミュニケーション・フィールドとすることとした。

フォーラムで話し合われたことは、チャタムハウスルール(Chatham House Rule、その会議で得られた情報を利用できるが、その情報の発言者やその他の参加者の身元および所属に関して秘匿する義務を負うというルー

ル)を準用して、個人が特定できない形にしてホームページ¹⁾で公開した。これによって、参加者が何を話しても隠されないことを確認できるようにし、フォーラムの運用についての公平性を保証することとした。

次に、「(2)冷静な話し合いを導く／その場を客観的に捉えられるような場作り」を満たすためには、市民と専門家との間で、忌憚のない話し合いができるようにする必要がある。しかし、ともすれば感情的な話になり、話題がすれ違ってしまっただけでなく、結果としてお互いを「尊重」するということができなくなってしまう。そこで、既往の文献^{2~4)}を参考にして、コミュニケーション・マニュアルを作成する。これは、その場を進行・管理するファシリテーターを含む参加者全員がコミュニケーションする際に意識すべきチェックリストとしての形を取っている。これによって、今、話されている内容が何かを見極め、話し合いですれ違わないようにすることを期待した。

また、フォーラムのプログラムは、参加者にファシリテーターをなるべく経験してもらえるように工夫する。これによって、自分を話し合いの外に置き、話し合いを客観的に見るチャンスとする。その場を進行・管理するというファシリテーションを経験することで、コミュニケーションのときに、自分と異なる意見に対しても冷静になれる。その場を客観視し、そのものとして受け入れることは、相手を「尊重」する第一歩となる。

2. 「フォーラム」の設計

フォーラムの具体的な設計については、若松らの研究⁵⁾を利用することとした。若松らによれば、ワークショップの設計は5つの段階を経る。①「観察者の目的設定」(実施者の視点)、②「ワークショップの目的設定」(参加者の視点)、③「テーマ研究、専門家ネットワーク」、④「市民パネル募集、決定」、⑤「ワークショップの内容、段取りの決定」である。実際に、①～⑤に従って、フォーラムを設計した。

設計の概要について簡単に述べる。①「観察者の目的設定」については、著者らの研究グループの目的であるので、本稿にはすでに記した。②「ワークショップの目的設定」については、フォーラム参加者の目的と観察者側の目的を同じものとする事とした。つまり、フォーラム参加者も、「原子カムラ」の境界をいかに越えるのか、という課題の解決に取り組むということである。また、市民と専門家の間でも、この目的は同じである。

③「テーマ研究、専門家ネットワーク」とはテーマに関する専門知識、視点の多様性を把握し、それらの多様性を確保するように、講師などを行う専門家の整理および依頼を行うという段階である。しかしフォーラムは、市民と専門家が対等な立場でコミュニケーションする場であり、あるテーマについて話し合うものではないため、

講師は呼ばないこととした。なお、全体を取り仕切る総合ファシリテーターやサブファシリテーターは、経験の多い研究協力者に依頼した。

④「市民パネル募集、決定」、⑤「ワークショップの内容、段取りの決定」については、Ⅱ-3と-4を参照していただきたい。

ところで、前述したとおり、フォーラムの公正性を担保するためにも、記録の公開をどのようにするかがとても重要であった。そこで、具体的には以下のように記録の公開に関する基本方針を作った。

「フォーラムは非公開とし、フォーラム会場には、フォーラム参加者、実施者および資金提供関係者以外の立ち入りはない。ただし、フォーラムで話し合われている公正性を期すため、話し合われた内容は、チャタムハウスルールを準用して、本研究のホームページに公開する。」

実際に、平成25年度に行ったフォーラムで話し合われた内容は、この基本方針に従ってホームページ¹⁾にすべて公開されている。ご覧いただければ幸いである。

3. 「フォーラム」参加者の選定

参加者の決定は、シリーズ(1)で紹介した社会調査をもとにして、原子力に関する意見がなるべく母集団と相似になるように心がけて、参加者を選定した。

首都圏住民の参加者選定について、まず、首都圏調査の質問紙調査回収時に回答者(500名)に、調査員がフォーラム参加者募集の資料を手渡した。その結果、応募した者は8名(女性2名、男性6名)であった。別途、性別・年齢のみを基準に不足分を補うため、関係者の知人に面識のない知人(4名)を紹介してもらった。計12名(女性5名、男性7名)から、「原子力発電への賛否」「性別」「年齢(20・30歳台/40歳代以上)」を基準に、それぞれほぼ同数になるよう、フォーラム参加者10名(女性5名、男性5名)を選定した。一方、日本原子力学会員の参加者選定について、学会員調査の質問紙調査対象者(1,400名)に、フォーラム参加者募集の資料を同封し

た。その結果、応募した者は25名(女性2名、男性23名)であった。「年齢(20・30歳台/40歳代以上)」「専門分野(【複数回答】「総論」「放射線工学と加速器・ビーム科学」「核分裂工学」「核燃料サイクルと燃料」「核融合工学」「保健物理と環境科学」)」を基準に、フォーラム参加者10名(女性2名、男性8名)を選定した。

参加者選定後に、フォーラム参加者の原子力利用への認識・意見分布について、それぞれ首都圏住民あるいは日本原子力学会員とそれぞれほぼ同じであることを確認した。ただし、住民の参加者は「関心が高め」「中立意見は少なめ」であった。

4. 「フォーラム」の実施

平成25年5月から7月にかけて、隔週土曜日に全5回のフォーラムを実施した。第1表に全5回の基礎情報を示す。20名の参加者のうち、専門家1名が途中でリタイアした。その補填は行っていない。また、その他の参加者は途中で欠席はあるものの、最後まで続けた。2回欠席した者はいない。各回のテーマは参加者の意向を尊重して、研究者が決定した。

第1図はフォーラムの基本的な進め方を示したものである。話し合いは基本的にはグループワークで行い、サブファシリテーターがそれを支援する。話し合った結果は全体で共有し、多様な意見の存在を認識できる構造になっている。

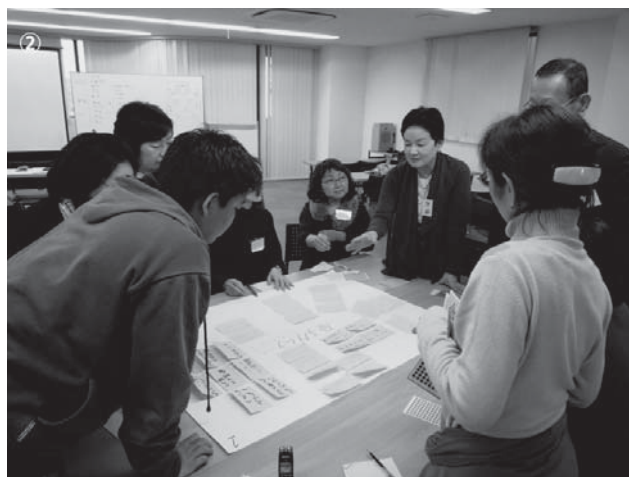
さて、フォーラムの実施に伴って見られた問題点とそれへの対処を、紙面の都合上1つだけ紹介しておく。

もっとも重大な問題点は、フォーラム自体が原子力肯定に偏っているように見える、という声何人かの参加者から聞かれたということである。その理由としては、たとえば、テーマが原子力推進への誘導のように見えることや、サブファシリテーターがグループワークの進行に関わり過ぎていて、誘導的であるということである。

前述したとおり、(第1回と第5回を除き)フォーラムで話し合うテーマは、原則として参加者が決めるルールであった。実際に、第1回フォーラムの最後には次回話

第1表 全5回の「フォーラム」に関する基礎情報

	日時	テーマ	参加者
第1回	平成25年5月25日 13:00～17:00	「原子カムラ」とはなんだろうか？	19名
第2回	平成25年6月8日 13:00～16:30	なぜ、原子カムラはなんとなく良いイメージを持たれないのか？そのイメージを払拭するには、どうしたら良いだろうか？	17名
第3回	平成25年6月22日 13:00～16:30	原子力に関心を持つためにはどうしたらよいか？無関心は本当にダメなのか？「原子力への関心」とはそもそも何なのか？	16名
第4回	平成25年7月6日 13:00～16:30	原子力は本当に安全か？原子力は本当に必要か？原子力はやめることができるのか？エネルギーの中の原子力の位置づけは？	18名
第5回	平成25年7月20日 13:00～16:30	もう一度考えよう……「原子カムラ」はあるのか、ないのか、何なのか？「原子カムラ」というものをどうしたらよいか？	19名



- ①グループワークは、6～7名の3グループで行った。どのメンバーとグループになるかは、くじ引きで決めた。話し合いはブレインストーミングの形を取り、そのルールも明確にして、参加者で共有した。
- ②グループの中の1名がファシリテーターになり、グループの話し合いを進めた。ファシリテーターもくじ引きで決めた。運営側からは各グループに2名のサブファシリテーターを用意し、進行を支援した。
- ③グループワークの後の全体共有の様子。3グループがそれぞれ話し合った結果を全員に話す。3グループのまとめはそれぞれ全く異なる視点で語られることがほとんどであり、参加者に多様な意見の存在を認識してもらえる機会となった。

第1図 「フォーラム」の基本的な進め方(イメージ)

※実際の参加者情報は示せないため、本研究の関係者が準備として行った模擬フォーラムの様子を示している。

し合うテーマについて、参加者から意見表明をしてもらって、テーマを絞り込んでいった。それを受けて、運営側で検討をし、設定した第2回のテーマが第1表にもある「なぜ、原子カムラはなんとなく良いイメージを持たれないのか？そのイメージを払拭するには、どうしたら良いだろうか？」というものであった。このテーマについて、結局、運営側の誘導ではないか、という意見が寄せられた。

この意見から、確かに「原子カムラ」の境界を越えることがフォーラムの目的であるが、境界を越えるために悪いイメージを払拭する必要があるかどうかは参加者が話し合って考えることであると、私たちは気づかされた。今回のフォーラムについては、運営側が参加者に求めるのは「参加者同士が尊重する」ことだけであり、運営側が「こういう意見が良い、こういう意見は悪い」というような価値観を持っている、と参加者に思われてはいけなかった。

その後、第3、4回(および第5回)のテーマの文言については、偏った誘導になるような表記にならないように、原子力に関してはなるべく両論併記になるように、細心の注意を払うようにした。

次に、サブファシリテーターのグループワークへの関わり方が誘導的だ、という意見は、初期(特に第1回)に見られたものである。これは、参加者のファシリテーション・スキルの程度にも関わる。

フォーラムの初期においては、ファシリテーターというものを未経験の参加者が多く、したがってグループワークの進行に戸惑いが見られた。それをサポートするために、ファシリテーションの経験豊かな者をサブファシリテーターとして各グループに2名ずつ配置した。すると、サブファシリテーターにその気はなくても、周りの参加者からはサブファシリテーターがその場を取り仕切ってしまうような雰囲気になってしまった。

そこで、第2回からは、サブファシリテーターの役割を制限し、その代わりに、グループワークの進め方を確認できる書面を参加者に配布した。そして、制限されたサブファシリテーターの役割については明文化し、それについて参加者と意識共有するようにした。その結果、グループワークの進行は一時的につたなくなってしまうものの、参加者が中心となって進められ、話し合いの公正性が高められた。

なお、参加者のファシリテーション・スキルは回を追

第2表 フォーラムを終えての参加者からの意見(第5回フォーラム終了後のアンケートより)

<p>〔市民参加者からの意見〕</p> <ul style="list-style-type: none"> •意見のへだたりを越える前に、冷静に意見を言える、この人となら意見を言えるし、聞ける、という人と人の信頼関係を築くことが大切。それには時間をかけて、継続的な取り組みが必要と感じました。 •信頼関係を築くためには、きれいごとを言うだけでなく、不都合なことも正しく情報公開し、スピーディに提供していくのが一番ですが、専門家が根本的に一般人をバカにして、無能扱いして、どうせ無理だろ?的な心掛けでは、信頼なんかされないと思いました。対等な関係で話し合えなければ、真の理解など得られませんし、不信感にしかならないと思いました。情報を正しく出すこともまた必要と思います。 •原子力カムラの住民の方は是非、一般住民と原子力についてコミュニケーションを図って下さい。わからないなりに色々考えています。 •コミュニケーションを取る事の大切さを認識しました。 	<p>〔専門家参加者からの意見〕</p> <ul style="list-style-type: none"> •できるだけ一般的な考え方を心掛けていたが、あらためて自分がムラの考えにそまっていたことに気付いた。 •信頼の損失は大きく、地道にわかりやすい説明をくり返していくことが境界を超えるために必要なことを痛感しました。 •説明不足、努力不足を毎回痛感。たえまぬ努力で失われた信頼を少しでも回復させたい。 •原子力技術者に対するマネジメント及び倫理教育が大切です。 •専門家、一般の方各10名の意見ではあるが、どうするべきという点で考えが整理されたのはよかった。 •今回のフォーラムでは、一般の方と言いながら議論に前向きな立場の人々であり、ある程度議論がかみ合うのは当然という気もした。 •フォーラムで専門家と一般の方が一緒に出した結果は一樣ではありませんが、それを「ムラ」の組織を変える動きに進めてください。 •ぜひ、今後もこのような活動を続けてほしいです。 •原子力で安全神話が続く限り、事故は必ず起きる。公正な研究を望みます。
---	---

うごとに飛躍的に向上し、また、参加者は徐々に忌憚のない意見を言うようになった。第4回を過ぎると、話し合いは参加者によるファシリテーションで概ねうまく進行するようになり、サブファシリテーターは記録作業を中心に行えば良いようになった。

Ⅲ. 今後の展望

フォーラムが終了した後、フォーラムの効果を確認するために、参加者へのインタビューを実施した。

フォーラム参加前は、市民は専門家に「難しいことを言うのだろうか」「お高くとまっているのだろうか」というイメージを持ち、専門家は市民に「感情的に批判してくるのだろうか」「聞く耳を持たないのだろうか」というイメージを持っていたと言う。お互いの思い込みによるイメージで、お互いに距離を取ってしまった状態、すなわち、境界のある状態であると言える。

一方、フォーラム参加後は、市民は「専門家もただの人なのだ」「専門家のなかにもいろいろな考え方があるのだ」ということに気づき、専門家は「市民から必ずしも責められるというわけではないのだ」「市民にはちゃんと話をすれば通じるのだ」ということに気づいたと言う。フォーラムの目的である「お互いの間のギャップを深く認識し、尊重しあえる関係作り」に関しては、一定の効果を上げたと言える。

現在、フォーラム参加者の「気づき」がどのようにして起こったか、フォーラムの目的達成のためにどのような改善が必要か、という観点からインタビュー結果を詳細に分析している。これらの分析を受けて、平成26年度

に行われる予定の第2期のフォーラム開催に向けて準備を進めている。そして、第2期フォーラムを通じて、フォーラムの持つ機能の明確化と、それを達成するためのシステム化を行い、本取り組みを社会に組み入れていくための知見をまとめる予定である。

なお、本研究は、平成24年度および25年度原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ「[原子力ムラ]の境界を越えるためのコミュニケーション・フィールドの試行」により実施されている。最後に、フォーラムにご協力くださいました参加者の皆様に、この場を借りて、深く感謝の意を表します。

— 参考資料 —

- 1) <http://www.ponpo.jp/forum/>.
- 2) Ortwin Renn, *et al.*, *Fairness And Competence In Citizen Participation*, Springer, (1995).
- 3) フラン・リース, *ファシリテーター型リーダーの時代*, プレジデント社, (2002).
- 4) 堀公俊, *ファシリテーション入門*, 日本経済新聞社, (2004).
- 5) 若松征男, *科学技術政策に市民の声をどう届けるか*, 東京電機大学出版局, (2010).

著者紹介



木村 浩 (きむら・ひろし)

特定非営利活動法人パブリック・アウトリーチ

(専門分野/関心分野) 社会調査, リスク認知, リスク・コミュニケーション/特に原子力と社会との関係に関する領域

解説シリーズ

レジリエンスエンジニアリングの動向

第2回 組織安全とレジリエンス

早稲田大学 小松原 明哲

レジリエンスエンジニアリングは、変化する状況に人が柔軟に対応することで安全を求めるヒューマンファクターズのアプローチとして提案されてきたものであるが、このアプローチは組織の安全においても有益である。本稿では、safety-critical system や socio-technical system を運営する組織が「強く」あるためには、レジリエンスは必須であることを指摘し、そのための条件について考察する。また、組織の安全を達成するためには、現場のレジリエンスの成功が必要となることを指摘し、そのために組織がなすべき管理についても検討する。

I. はじめに

原子力施設など安全が重大な意味を持つシステム (safety-critical system) や、電力、交通、情報通信などの社会技術システム (socio-technical system) を運営する組織には、多大なる社会的責務がある。例えば社会技術システムについて考えてみる。社会技術システムが提供するサービスが乱れたり、途絶したりすると、社会は大混乱に陥る。電力会社であれば、わずか0.07秒の瞬間電圧低下で需要家に多大なる損害を与えた事故を考えれば、明らかであろう(四日市瞬時電圧低下事故：2010年12月8日発生。四日市コンビナートの工場などに一時操業停止等の多大なる影響、損害を与えた)。「電気の本質」のわずかな乱れすら現代社会では許されず、ましてや長期停電、さらには電力設備(そこには原子力発電所も含まれる)が公衆災害を越すことは許されることではない。結局「安全」とは、システムが所期の目的を安定的に遂行することと言い換えることができ、換言すれば、事故とは、約束されたパフォーマンスが発揮されず、需要家や社会に混乱を与える事態ということができる。

安全は何もせずに達成できるものではない。これらシステムを運営する組織は、何らかの管理(マネジメント)を行うことが必要となる。その管理を通じて、安全のための万全で磐石な能力を有する組織が、強い組織ということになる。安全成績がよい(事故が生じていない、インシデント件数が一定以下にとどめられている)という

ことは、単なるラッキーが継続してきているだけかも知れず、また、後述するように、今までになかった組織への脅威が出現するかも知れず、その組織が将来に向けて安全であるという保障にはならない。そこで、E.Hollnagel は、安全に対して“変化する条件の下で成功する能力”¹⁾と、より組織の内部に踏み込んだ定義を与えている。

II. 組織のレジリエンス

1. ハザードとそれへの対応

安全が阻害される事態は、何らかの原因(ハザード)によりもたらされる。従って、まずはハザードを予見(anticipate)することが必要となる(なお、ここでいうハザードとは機械安全などという危険源ということではなく、システムの安定的なオペレーションを妨害する要素(安全阻害要素)を意味している)。ハザードは無数に存在し、またその脅威の度合いも異なると考えられるが、種類のにはおおむね、次の5つが考えられる²⁾。

- ・自然要素：地震、津波、暴風雪、突風、竜巻、落雷などの気象や、小動物、ウイルスなどの生物。後者であれば、例えば電柱に巣をつくるカラスや送電線をかじるネズミ、管理スタッフに感染症をもたらすウイルスがそうである。航空機では、バードストライクが重大な脅威となる。
- ・社会要素：ふざけて鉄塔に登りトラブルを起こす人や、嵐、釣り糸、ラジコンなどが電線に絡まるなどの事態。電線盗などの犯罪行為。制御設備へのコンピュータウイルスの侵入や、原子力施設へのテロなどの攻撃行為。景気の変動や新規採用者の質的量的変化などの社会情勢も組織に対するハザードとなりえる。

Current Status of Resilience Engineering (2) ; Organizational Safety composed of Resilience : Akinori KOMATSUBARA.

(2014年1月25日受理)

■前回タイトル

第1回 レジリエンスエンジニアリングの概要と今日的意義

- ・技術要素：設備機器等，技術システムの技術的不具合。具体的には新技術の使用，技術と技術の新しい組み合わせ，技術の使用前提の変化，設備老朽化などによる技術的トラブル。
- ・サービス対象要素：需要が供給を上回る事態。システム全体としてみると，安定的なサービス供給の阻害となる。
- ・人的要素：システムの開発・維持・運用に携わるスタッフのいわゆるヒューマンエラーや違反。

組織はこれらのハザードの出現を予見，発見し，何らかの対策を講じ，そしてその一連の対応を常に振り返ることで，ハザードに関して「強い組織」であり続ける必要がある。

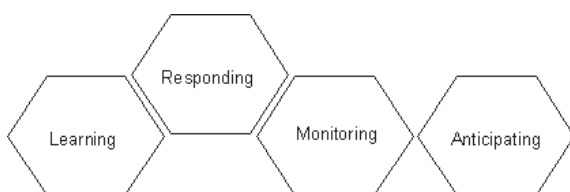
組織のレジリエンスはこのことを意味する。すなわち，組織は組織内外に存在するハザードにより，安全が阻害される可能性に常にさらされているから，それに対して柔軟に対応する能力を備えていなくてはならないということである。それにより，事故のない信頼される組織となり，永続的に発展していくことが可能となる。これは，J.Reason³⁾のいう安全文化のうち，「柔軟な文化」につながるものとも考えられる。

E.Hollnagel⁴⁾は，レジリエンスは，第1図の4つの要素(能力)から構成されると述べている。以上のことをこのモデルに従って言うとな次のようになる。

すなわち，そもそも出現するハザードにはどのようなものかを予見(anticipate)する。そしてそれらハザードの出現を監視(monitor)し，出現に際しては適切に対応(respond)する。何を監視し，どう対応すればよいかは学習(learn)している必要がある，またハザードに対しての対応や監視ぶりを振り返り，学習することも必要となる。

2. 組織の強さ度の測定

当該組織が直面するハザードは種類の多岐にわたるが，その一つでも予見漏れがあったり，あるいは監視や対応に甘さがあれば，そこを突かれて安全が脅かされる恐れがある。裏返すと，この全体の管理の状態を評価することで，レジリエンス度という点において組織の安全に関する層の厚さ(安全能力)を評価することが可能となる。E.Hollnagelはこのための評価方法として，RAG(resilience analysis grid)を提案している¹⁾。RAGにおいては，ハザードの予見，監視，対応，学習の展開状



第1図 レジリエンス行動のための4能力⁴⁾

態，すなわち，管理の仕組みとその機能状態を所定項目により評価することで，どのようなハザードに対してどのような弱さを組織が持っているかを啓発的に把握することを狙っている。RAGは研究段階といえ，まだ具体的な成果は十分示されていないが，組織安全の評価手段として関心を集めている。

III. 組織のレジリエンスの4要素

組織のレジリエンスについて，筆者の意見も多分に混じえながら，RAG¹⁾を踏まえて具体的に検討する。

1. ハザードの予見(anticipating)

組織のレジリエンスにおけるの第一歩は，ハザードの予見である。ハザードの予見は，時間的に短期的にも長期的にも見ていく必要がある。例えば来週の台風の襲来ということは時間的に短期的であるが，経済状態の変化や治安の悪化などといったことは，時間的に大きなスケールの中で誰も気がつかないうちにゆっくりと(長期的に)忍び寄ってくる可能性がある。後者は特に組織のレジリエンスを考えるとときには重大で，例えば気象についてみても，竜巻や爆弾低気圧など今までになかった新たなハザードが出現してきている。ヒューマンファクターについても，新入社員の学力や技術的リテラシーの変化，勤労意識の変化，少子化による労働力確保困難などは，緩やかに生じる組織にとっての重大なハザードとなりえる。従ってハザードの予見は，様々な時間スケールで網羅的になされることが必要となる。

2. ハザードの監視(monitoring)

ハザードを予見しても，その出現に気づかなければ対策は講じられない。従って，ハザードの出現を監視する体制を整え機能させることが必要となる。このときは，ハザードの出現を事前に捉えるか出現後に捉えるかが，組織のレジリエンスにおいてポイントとなる。これについては3つの監視があり得る。第1表に交通機関での例を示す。

遅れ指標(lagging indicator)：過去に出現したハザードを，次の計画期に監視する。リアクティブな安全活動はこのアプローチである。安全活動としては分かりやすいが，新たなハザードは常に現れており，遅れ指標による活動は取り返しがつかない結果を許すことがある。

進行指標(current indicator)：現在出現しているハ

第1表 レジリエンスのための監視指標
(交通機関の例。予見されたハザード：降雪 時間：短期)

指標	例
先行指標	寒気南下予報に基づく予想降雪量
進行指標	現下の降雪状態
遅れ指標	昨冬の降雪量・降雪日数

ザードに対して迅速に対応するコンカレント的な安全アプローチ。往々にして「場当たり」「泥縄」ともなる。特に大きな組織では、対応体制や対策方法を予め定めておかなければ、内部調整に時間が取られ、効果的な対応を講じられなくなる可能性が高い(福島第一原子力発電所事故直後の混乱は、そのことを物語っている)。また十分に意識して監視をしていないと、時代の変化のような徐々に忍び寄ってくる長期的なハザードは、予見していても気づかない恐れもある。

先行指標 (leading indicator) : ハザード出現の予兆, 可能性を監視し, それを捉えて, ハザードの出現以前に事前対策を講じるプロアクティブなアプローチ。いわば“平時に異常時の準備をする”ことである。インフルエンザの流行予想を行い, 蔓延する前に予防接種を推奨することがそうである。

安全を最優先にしなくてはならない組織においては, 先行指標の監視と, それに基づく対応が重視されるべきであることは自明だろう。結果的に遅れ指標や進行指標による対応よりも, “安くつく”場合も多いのである。

3. ハザードへの対応 (responding)

監視されたハザードに対して, それに対する対応を行う。ここでのポイントは, 「実際に対策を講じるのか?」という意味決定と, 「どういう対策を講じればよいのか?」という方法論となる。

(1) 実際に対策を講じるのか?

遅れ指標, あるいは進行指標により現に生じた, あるいは生じているハザードに対しては, そのハザードがもたらした(もたらしている)事態に見合った対策を後追いのとることができる。これには異論の生じる余地はないだろう。

一方, 先行指標による対策は, もしかすると取り越し苦労になるかもしれない。インフルエンザの予防接種にしても, 流行が予想されるからといって, 自分は罹患しないかもしれない。罹患したら確かに困るが, 果たして予防接種に5千円近い大金を払う価値があるのだろうか, と躊躇する人も多いのではないだろうか。つまり, 往々にして, 被害の程度が極めて大きいが発生頻度が極めて少なく, かつ, 対策に多大なコストのかかる事象に対しては, 「そこまでやらなくても……」という判断がなされることがある。この場合, 判断基準を, 「対策コスト(予防注射代金)」とみなすか, 仮にそこを突かれて事故が生じた場合の「被害に対する事態収拾費用(医療費や療養費, 欠勤に伴う逸失利益)の発生防止への先行投資」としてみなすかにより判断が変わる。安全を最優先にしなくてはならない組織においては当然, 後者に立たなくてはならない。

(2) どういう対策を講じればよいのか?

ハザードへの対策としては, 第一義的にはハザード自

体の除去が望ましい。例えば人的ハザードに対しては, ヒューマンエラー対策が重要である。技術ハザードについてみれば, 信頼性の高い技術を使うことや, 適切な点検・交換による設備の技術的トラブルを避けることが望ましい。しかしハザードには予見はできても除去困難なものもある。その場合には, バリアを構築する必要がある。自然ハザードに対する防災, 社会ハザードに対する防犯, セキュリティはそれに該当する。なお, 繰り返しになるが, これらの対策は, 遅れ指標や進行指標によるのではなく, 先行指標によることが重要となる。ヒューマンエラーについてみれば, 事故が起こった後にエラー対策を講じるのではなく, 新入スタッフの特質を評価した上で事前に教育訓練を行うことや, エラーの起きにくい作業・環境改善を事故を待たずに講じることが望まれる。

ハザードの除去もできないし強固なバリアも構築できない場合もある。その場合には, そのハザードの影響が組織全体に及ばないように局所で吸収し, 受けた影響を速やかに回復することが必要となる。予防接種はこの対策の一つといえる。また医療機関であれば大規模災害時には多数の患者が殺到することが予想され(サービス対象のハザード), 全体としての医療サービス低下が懸念される。この場合にはトリアージ(負傷者に対して治療・搬送の優先順位をつけ, 優先順に対処すること)を行うことで, 全体としての医療サービス低下を小さく留めることがそうである。

ところで, ハザードの予見ができなければ, 当然, 監視もできないし対応もできないという話となる。これが想定外ということとなるが, しかし, だからといって予見できなかった(想定外)として済ますことはできない。それは社会技術システムや, safety-critical system における安全の意味を考えれば自明だろう。そこで, 想定外, あるいは想定を超えるハザードに襲われたら, この組織はどうなるか, を想定し, それにより対応をとることが必要となる。別の言い方をすると, この組織にあっては困ることを想定することは可能であり, そのあっては困ることが生じたときに, どう, 事態を静定させるために行動するかを事前に定めて, 対策を準備することは可能ということである(100%とは言わないまでも)。保険の考え方はそうであり, 傷害, 死亡, 失業などの「あっては困ること」をもたすハザード別に監視や対策を取るのではなく, 「あっては困ること」に対して保険金という形で状態回復を図る仕組みといえるだろう。

4. 学習 (learning)

学習においては予見, 監視, 対応それぞれがうまく行ったのか, うまく行かなかったのか, そしてそれはなぜかを振り返り, 組織のレジリエンス能力をさらに高める。振り返りは, うまく行かなかったときだけではなく

く、うまく行ったときにも行うべきである。というのは、結果としてハザードにうまく対処できたとしても、単なるラッキーだけだった場合もあるからである。また本当にうまく行ったのなら、そのノウハウを顕在化し、組織として共有することも重要となる。

Ⅲ. 現場のレジリエンスの組織による管理

1. ヒューマンファクターズのレジリエンス

組織が、組織に降りかかるハザードを予見し、それに対して具体的に対処する場合には、管理サイド (blunt end) での経営管理的な対応と、現場サイド (sharp end) での現場的な対応があり得る。

例えば、航空機の運航は気流 (自然ハザード) の影響を受けることは不可避である。この場合の対応として、例えば、乱気流に負けない航空機材化や、気流の乱れにうまく乗る autopilot system の搭載は、経営判断を必要とする経営管理的な対応となるだろう。

一方で、時間的に短期的なハザードであり、かつハザード除去、あるいはバリア構築での対応ができず、現場スタッフの努力で対応できる範囲のハザードに対しては、現場サイドのスタッフの対応に委ねることができる。先の例であれば、運航乗務員が、気流にうまく乗る操縦を行い (この中には、気流の乱れを早期に予見し、それを避ける針路を取ることも含まれる)、気流による揺れを最小限に食い止めることがそうである。

ヒューマンファクターズとしてのレジリエンスエンジニアリングは、このことを意味する。従来のヒューマンファクターズが、ヒューマンエラーをいかに抑止するかという点に注目してきたのに対して、レジリエンスエンジニアリングでは、ヒューマンエラーを含むハザードをヒューマンファクターがいかに柔軟に受け止め、ダメージを受けたシステムをいかに早期に回復するか (安定を保つか) という点に注目しており、「人に頼る安全」のアプローチをとる。ただし、組織のレジリエンス同様、場当たりや単なるラッキーを期待するものではない。つまり、現場のレジリエンスは磐石な体制のもとで成功裏に終わるよう、組織により事前準備される必要がある。

2. 現場のレジリエンスを成功させるために組織は何を管理すべきか

現場スタッフのレジリエンスを成功に導くためには、組織はいくつかの点について、確実なマネジメントを行うことが必要と考えられる^{2,5)}。これらのマネジメントが組織において欠落すると、レジリエンスの成功は期待できない。

- ・レジリエンス行動の資質を現場スタッフが有していること。具体的には、テクニカルスキル、ノンテクニカルスキル、自ら取り組む前向きな態度、心身の

健康があること。なお、ノンテクニカルスキルとは状況認識、コミュニケーション等、テクニカルスキル以外の業務に必要となるスキルを表すもので、レジリエンス行動のための重要資質であるが、必要条件であって十分条件ではない。

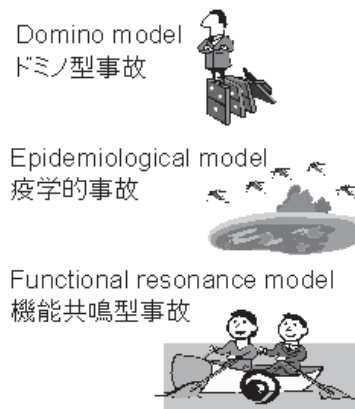
- ・レジリエンス行動のための資器材などリソースが準備されていること。
- ・レジリエンス行動が許容される組織管理体制であること。ハザードに対する柔軟な対応への裁量の余地が与えられていない組織では、柔軟な行動ができないからである。
- ・安全のためのレジリエンスであるとの合意、納得があること。レジリエンス行動が安全以外の、例えばコストダウンに駆動されると事故につながる恐れがあるからである (例えば JCO 社臨界事故 (1999) は、組織に課せられた利益確保というハザードのもとに、効率を求めての現場のレジリエンスな行動により生じたともいえる)。
- ・責めない文化が確立されていること。レジリエンス行動が不首尾に終わったときに、結果論からそれを責めると、次からの前向きにレジリエンスな行動を行うモチベーションが阻害されるからである。
- ・機能共鳴型事故に対する防御ができていないこと。

なお、機能共鳴型事故は、現場のレジリエンスの危険性につながるため、節を改めて簡単に説明する。

3. 機能共鳴型事故

ヒューマンファクターに起因する事故の説明モデルは、大きく、ドミノ型事故、疫学的事故、機能共鳴型事故がある⁶⁾。この模式を第2図に示す⁷⁾。

ドミノ型事故は、特定できる原因があり、それが引き金となってドミノ倒しのように事故に進展する形態の事故であり、対策としては原因を特定し除去するか、事故への進展を食い止めるバリアを構築する。RCA (root



第2図 事故モデルの模式図⁷⁾

疫学的事故の説明図は J.Reason³⁾に基づく。

cause analysis)に分類される事故分析手法はこのモデルに依拠している。

疫学的事故は、組織風土が乱れている場合に脈絡なく事故が起こるもので、一つ一つの事故(第2図では蚊)の対策を講じても埒が明かず、根底にある組織風土を改善する(第2図では沼を埋める)必要がある。これはちょうど、衛生状態が悪い都市において、一人ひとりの疫病患者を治療していても埒が明かず、都市の衛生状態を改善することが必須となることと同じである。

機能共鳴型事故とは、各人(機能を果たすべき actor) がなした行動の齟齬(機能共鳴)で起こる事故といえ、第2図ではボートを漕ぐ二人が前に進む共通目標のもと、タイミングに齟齬をきたしたままレジリエンスにオールを漕ぐことで、ボートが転覆することで表している。

機能共鳴型事故の例として、日本航空焼津沖ニアミス事故(2001)がある。これは対向飛来した2機の航空機のうち1機はTCAS(衝突防止装置)のアドバイに従い、もう1機は管制指示に従い、ともに降下したために起きたニアミスである。双方ともに大目標としての航空機の安全運航のもと、衝突を避けるためにレジリエンス行動を真剣に行っているが、それぞれその行動の依拠(制御)が異なったために生じたものといえる。

機能共鳴型事故はまさにその瞬間の現場レベルでは解消困難であり、組織が齟齬解消の事前管理を行うことが必要となる。ただし、このタイプの事故については、分析手法としてFRAM(FRAM: functional resonance analysis method)⁶⁾が提案されているものの、検討は遅れている。

IV. おわりに

本稿では、安全が最優先に考えられなくてはならない safety-critical system や、安定的なサービス供給が重大な意味を持つ社会技術システムの安全のための、組織のレジリエンスについて検討した。また、現場に委ねられるレジリエンスについて、それを成功に導くための組織のなすべき管理について検討した。

レジリエンスエンジニアリングは、人口に膾炙して久しくなったが、研究途上の部分も多く、今後の検討が望

まれている。ただし、レジリエンスエンジニアリングは、そもそも安全の組立てが、「リスク論」や「ヒューマンエラー防止論」からスタートしたものは異なることは確かであり、矮小化した議論に陥らないよう、十分に留意する必要がある。特に現場のレジリエンスであれば、いわば臨機応変や機転を利かす、気を利かす、ということともなるだろうが、しかし、それはときに現場任せとなったり、“とりあえず”を許容し、規程が崩れ、裏マニュアルを常態化させ、安全文化を崩壊させることにもなる。組織としてのしっかりとした安全戦略、管理が必要である。その意味でレジリエンスエンジニアリングには当然、限界や弱点もある。従って、レジリエンスに頼るのはどこまでか、今までの安全のアプローチとどう整合させていくのかなど、根本的な部分から慎重に検討することが重要となる。

— 参考資料 —

- 1) E.Hollnagel; Epilogue: RAG The resilience Analysis Grid, In E. Hollnagel, *et.al.*, (eds), Resilience Engineering in Practice, A Guidebook. UK: Ashgate, 2011.
- 2) 小松原明哲; レジリエンス・エンジニアリングの概念とその展開, ヒューマンインタフェース学会誌, 14(2), 83-88, 2012.
- 3) J. Reason, *et al.*, 高野研一監訳; 保守事故—ヒューマンエラーの未然防止のマネジメント, 日科技連出版, 2005.
- 4) E.Hollnagel; Prologue: The Scope of Resilience Engineering (文献1)と同じ).
- 5) A.Komatsubara; Resilience must be Managed; Proposing Safety Management Process Including a Resilience Approach (to be published in Ashgate Studies in Resilience Engineering #6 (2014)).
- 6) E.Hollnagel, 小松原明哲監訳; 社会技術システムの安全分析 FRAM ガイドブック, 海文堂, 2013.
- 7) 小松原明哲; レジリエンスによる事故を避ける: 機能共鳴型事故を巡って, 日本人間工学会関東支部第43回大会講演集, 25-26, 2013.

著者紹介

小松原明哲 (こまつばら・あきのり)
早稲田大学
(専門分野)人間生活工学。



出力が変動する再生可能エネルギー発電の 大量導入と電力システムの進化(3)最終回 運用ルール, 市場設計と最適な設備形成

東京大学 荻本 和彦

世界そして我が国で、持続的なエネルギーシステムの構築に向け、再生可能エネルギーへの期待が高い。再生可能エネルギー導入の大きな割合を占める太陽光発電や風力発電など、出力の変動する再生可能エネルギー電源の導入を含め、将来の電力システムの課題と対策について、技術面、制度面に分けて紹介する。

変動する再生可能エネルギーの大量導入による変動 (variability) の増加とそれに対応する柔軟性 (flexibility) の低下は、電力システムの需給調整の課題をこれまで以上に難しくする。前回の (Part 1, 2) の技術編に続き、(Part-3) では、再生可能エネルギーの大量導入、電力市場自由化の先行した欧米の事例を見ながら、これらの需給調整の課題が電力システムの運用制度にもたらす課題と、新たな技術を含め需給調整の課題を解決する諸技術を活かすための新たな制度構築への取り組み、そして最適な設備形成の実現方法について解説する。

VI. 柔軟性向上のための運用制度

前章で述べたように、風力発電や太陽光発電など出力が変動する再生可能エネルギー発電を電力システムに組み込むためには、従来電源、再生可能エネルギー発電の出力調整、需要の能動化、電力貯蔵技術、電力システムの連系を含めた運用の高度化などの対策技術を最大限に活用し、電力の経済合理的な安定供給を実現することが不可欠である。これらの対策技術を活かすためには、技術の特性を活かすことのできるシステム運用についての制度設計やルール制定が必要となる。

1. 電力システムの制度とルール

電力システムは、発電、送電、配電、需要の各部分を構成する設備・機器、制御・保護システム、そしてそれらを直接、間接に運用する人間系で構成されている。制御・保護装置は、障害・事故を含む様々な設備・機器の内外の状況の変化に自動で対応し、さらに人間に情報を伝え、その操作を設備・機器に反映する。電力システム

の運用にあたり、制御・保護装置の様々な状態の変化に対する対応についての事前の設定と人間の行動を規定する考え方は制度や運用ルールと呼ばれる(以下「運用の制度とルール」と呼ぶ)。運用の制度とルールは、経済合理性と安定性といった上位レベルの目的のもと、操作対象となる機器・設備の機能・性能と、プラント外の機能・性能を勘案して制定される。電力システムの運用の特色は、第一には、燃料費や運転維持費に代表される経済性と停電などで測られる安定供給のためにシステム全体の最適化の効果が大きいことである。第二は、落雷などの自然現象、発送配電設備の障害の原因が多様で、それらの波及が1/100秒など極めて速く、安定供給が損なわれた場合の経済・社会的な損失が大きいため、柔軟かつ迅速な制御・保護、復旧操作が求められることである。

第二次世界大戦後、欧米を含む多くの国において、各国のエネルギー政策のもと、電気事業は社会インフラとして発送配電を一体的に行う垂直統合型の事業者(いわゆる電力会社)により行われてきた。しかし、1980年代以降、石油危機後の景気低迷に対応する公益事業の民営化や規制緩和といった経済政策、複合発電、熱併給発電などの技術進歩、比較的安定な化石燃料価格を背景として、多くの国々で、競争原理の導入として、公平な競争条件を確保する観点から、小売りの自由化や、従来の電力会社の発電部門と送配電部門の分離(発送電分離)が行われた。

欧米で始まった電気事業への競争原理の導入において

High Penetration of Variable Renewable Generation and Evolution of a Power System (3) ; Operation rule, market design and optimum deployment : Kazuhiko OGIMOTO.

(2014年2月17日 受理)

■前回までのタイトル

第1回(Part 1) 新たな課題と技術的施策

第2回(Part 2) 柔軟性向上のための新技術

は、ステークホルダーの数が電力会社1社から飛躍的に増えることから、制度設計と運用ルールの制定の重要性は一層重要となり、システム全体での経済性と安定性と維持向上という目的に加え、多数のステークホルダーの参加の下での、公平性、事故・障害のリスク分担管理という一層難しい多目的問題を解くことが必要になる。

電気事業で最も注目を集めている制度の一つが、卸電力市場である。欧米の卸電力市場の目的は、電力の価格決定と取引を通じた運用の最適化と設備形成の最適化への価格シグナルの提供である。しかし、現状の卸電力市場が、競争原理の導入により経済性、安定性、環境性に安全性(3E+S: Economy, Energy security, Environment, Safety)を満たすエネルギー需給の実現に効果的な価格シグナルを出せるかどうかは、自明ではない。例えば、安定供給のための新規電源の確保は欧米の卸電力市場の創設当初より解決されていない課題であり、市場メカニズムにより二酸化炭素排出量を持続的に削減するためには、炭素排出コストを市場価格に含めなければならないことも明らかである。つまり、市場によりある社会的な目標を実現するためには、市場がその目標の実現に沿った価格シグナルを発するような制度設計が必須である。

これらの既存の難問に加えて、これからの電力市場では、前節で述べた再生可能エネルギー発電の変動性の克服のための柔軟性を確保するという役割が加わり、柔軟性の確保と運用の最適化には、より複雑な多目的最適化問題を解くことが必要となる。

再生可能エネルギーの導入という政策目標を実現するため、欧米でこれまで導入されてきた電力市場の構造のもとでは、増加する変動性と不確実性に対応すべく、従来の前日市場に加え、当日市場においてエネルギー市場の取引の時間刻みの細分化(例えば15分刻み)と、取引決定時間の直前化(例えば45分前)が行われてきている。また、kWh単位での取引を行うエネルギー市場を補間するこれまで取引規模が限られていたアンシラリー市場と呼ばれる、「ガバナーフリー、周波数調整などの速度の速い需給調整手段などを対象とした市場」の重みが増す。そして、この柔軟性をより経済的に確保するためには、今後の市場は、火力発電など集中電源の調整力ばかりではなく、先に述べた再生可能エネルギー発電の出力調整、需要の能動化、新しいエネルギー貯蔵技術などによる多様な柔軟性を取り込む必要がある。

しかし、エネルギー市場の直前取引や、アンシラリーサービスのニーズは、需給変動が電力システムの柔軟性を越えた場合に限って大きく顕在化するため、アンシラリー市場の市場価格の騰落(ボラティリティ)は極めて大きいことが予想される。増加する需給変動に対し電力市場と最終的な送電運用者による対応が量的、反応時間的に十分なものとするのは、今後の大きな課題である。

さらに、電気が、発電した量・使う量などの、いわゆ

る電力量で取引される「エネルギー市場」においては、可変費がゼロの再生可能エネルギー発電の割合の増加に伴い、従来電源の稼働率の低下と市場価格の下落により、電源の事業採算性が低下する。欧米ではこの現象が既に発生しつつあり、安定供給に必要な火力電源などの確保が難しくなっている。これに対して、変動の緩和には再生可能エネルギー発電の出力抑制や調整がシステム全体の視点からは有効であるが、その場合、発電事業者は、発電電力量が減少し売上の減少につながり、事業としては好ましくない。この新たな課題を制度と運用ルールの工夫で解決することが、出力抑制・調整の適切な活用の鍵と言える。

2. 分散システムの導入に係る制度とルール

Smart Gridが、リーマンショック後の第1次オバマ政権の政策の重要な柱となり、世界の大きな注目を集めてから約5年経った。Smart Gridは、今までより優れた電力(あるいはエネルギー)システムを意味し、そこには様々な技術、ビジネスが含まれるが、その中で重要な役割を果たすのが情報通信技術を活用した無数の電源、需要を管理する考え方である。

この無数の分散システムの導入により実現される新たな機能が、先に述べた需要の能動化と、集中/分散のエネルギーマネジメントの協調であり、この機能を最大限に活用するためには、新たな要素である多様な分散システムを既存の電力システムと整合して導入し、新しい電力需給システムに進化させることが必要となる。このため、様々な技術の研究・開発と、前節で述べた制度設計・運用ルール制定の動向に基づく標準化、規格・基準の策定が製品の開発と普及の鍵となる。

Smart Gridに係る標準化の領域は極めて広い。従来、個別に発達してきた電力、家電機器、情報・通信といった分野の規格・基準の整合という分野はあまりにも巨大というべき大きさであるが、現在、新しい標準化手法であるシステムアプローチを含め、世界的な標準化の取り組みが行われ、日本もこれに継続的に参加し、一部の分野をリードしている²⁹⁾。

標準化を実現した上で、これらの無数の小規模の電源、需要される新たなシステム構成要素を、どのような目的のためにどのような制度と運用ルールで運用するかは今後の大きな課題である。例えば、家庭用の蓄電池が普及した場合、高機能な情報通信手段が併せて実現されれば、極めて高速かつ柔軟な制御が可能となる。しかし、蓄電池の運用は極めて自由度が高いことから、電力の売買価格で個別に制御すると、価格に極めて敏感な動作をすることになる。このため、小規模な調整を集めて大きな調整単位として取引を行うアグリゲータからの直接制御がなければシステム全体としての最適な運用の実現は難しい。しかし、アグリゲータからの直接制御は、

住宅全体としての最適制御を実現するとは限らず、また、直接制御にはネット上の不正行為であるハッキングなどのリスクも伴う。

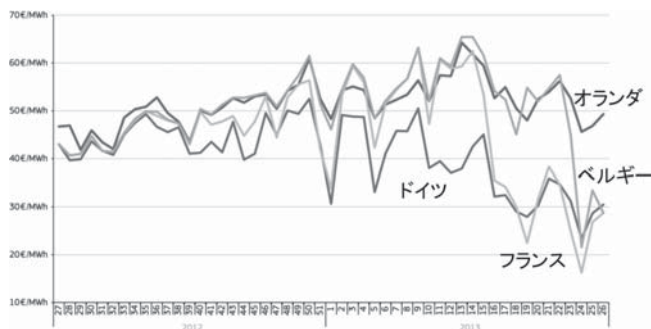
電力システムの進化には、技術と、技術を活用するため制度と運用ルール、そしてこれらを支える標準化が不可欠である。

3. 欧州の電力市場に関する取り組み

炭素排出の持続的削減と経済発展を基本政策とするEUの電力市場は、年間約1兆kWhの日本市場の約3.5倍の規模を持つ。このEUの電力システムは1990年代以降、段階的な自由化が進められており、EUでは、2014年に域内電力市場の統合を目指している。

これに対し、第16図に示すドイツ、オランダ、フランス、ベルギーの週間の卸電力市場価格では、ドイツの価格が2012年を通じて低い傾向を示していたが、2013年第1四半期には、太陽光発電と風力発電の大きな発電量のため、他の3国の価格と大きな乖離を示した。また、ドイツでは、それまで夜間に発生していた負の価格が昼間にも発生した。これらは、緊密に連携されているはずの西ヨーロッパ電力市場の統合が不完全であることやドイツの再生可能エネルギー導入による卸電力市場への大きな影響を意味し、域内統一市場を目指すヨーロッパにとり、その達成に大きな障害があることを示すものと言える。

Part 1で述べた2011年12月の欧州委員会報告書「Energy Roadmap 2050」、それを受けたEuropean Climate Foundation³¹⁾の「Power Perspectives 2030³²⁾」では、エネルギー電力市場について大きなスペースを割いて議論が行われた。また、2011年6月の欧州委員会報告書「Renewable energy: A major player in the European energy market³³⁾」と関連の作業報告書では、2020年以降の再生可能エネルギー政策の柱として、再生可能エネルギーの域内での市場統合、再生可能エネルギーへの協調のとれた支援スキームの制定・改訂、加盟国間での再生可能エネルギー取引の増加を求める内容を発表し、2012年12月、欧州理事会はその内容を確認す



第16図 ドイツ、ベルギー、フランス、オランダの週間の卸電力市場価格の推移³⁰⁾

る決定を出した³⁴⁾。

一方、エネルギー、電力市場に関しては、2011年3月発効のEUガス電力市場指令「Third Package³⁵⁾」に沿って、各国においてガスと電力市場の域内統合への取り組みが行われている。2012年11月には、エネルギー市場の域内統合の現状に関する欧州委員会報告「Making the internal energy market work³⁶⁾」と作業報告書が出され、2014年を目標とした市場統合による効果を示し各国の努力を求めるとともに、消費者保護、制度・ルールとエネルギーインフラの整備などの必要性が強調された。

上述の「The Third Package」では、ヨーロッパ共通のネットワークコードを制定する枠組みが導入され、EU委員会は、加盟各国の規制機関の協議体ACER³⁷⁾と電力、ガスの運用者ネットワーク(ENTSO-E, ENTSO-G)³⁸⁾の助言のもと、ネットワークコード制定の優先リストを作成した。そして、このリストに基づき、ENTSO-Eは、欧州の連系された電力システムの運用と設備形成を確実なものとするため、系統運用者、配電会社、需要家、発電事業者などの参加を得て、電源・需要・直流送電(HVDC)の接続要件、系統運用、市場運営などに関する要項を策定している³⁹⁾。この要件、要項には、再生可能エネルギーの大量導入による需給変動の増加に対応するための需給調整や周波数調整の内容も含まれ、各国の電力市場、システム運用の制度、ルールとの複雑な調整が行われている。

EUでは、電力・ガス市場における統合化に対し、各国政府が政策的に市場運営に介入する可能性が指摘されている。エネルギーの安定供給、産業政策、低炭素排出電源に対する取り組みなど、各国の考え方は一様ではなく、それらすべてが各国間、そして国内市場に影響する。今後はさらに、欧州全体が協力した取り組みで、コスト低減と安定供給を確保できるとされている。

また、2050年に向けて想定される再生可能エネルギーの導入と電力取引の拡大の実現には、配電網、送電網、系統間連系の整備が喫緊の課題であるとされ、2020年までは現行の計画に沿ったこれらの整備、2020年以降の再生可能エネルギー導入拡大を成功させるためには、域内のネットワーク問題の解消、送電網の拡大による現在の連系の範囲を超えた連系システムが必要とされている。また、ENTSO-e, ENTSO-g(ガスネットワーク)とACERによるネットワークインフラの10年計画では、投資家のための長期ビジョンが提示されている。

さらに、各地の再生可能エネルギーの活用のためには、需要を電動化するなど、数多くの分散した小規模な柔軟性の資源を統合して利用する必要がある。このためには、分散電源、スマートグリッド、EVなどの新しいネットワーク利用を含め、従来分離している送電と配電の機能統合や、現在、北海で進められている海底ケーブル網に代表される新しいインフラ整備が必要としている。

しかし、欧州の域内の統一エネルギー・電力市場への道は平坦ではない。先に述べた Energy Roadmap 2050 および Power Perspectives 2030 のフォローアップとして 2012 年秋から年末にかけて行われた一連のセミナー⁴⁰⁾では、卸電力市場に関する議論が行われた。様々なロードマップからの期待に応えるための卸電力市場に関する施策として、統一市場実現、電力システム運用の高度化、需要家の市場参加などの効果的な市場運営、先渡し市場、技術開発、CO₂ 価格などの行政の選択的介入の重要性が示される一方、再生可能エネルギーの変動に対応できる電力市場、システム運用制度の実現、価格シグナルによる最適な設備形成について、多くの難問があることが確認された。さらに、これらの対応が難しかった場合の大きな政策転換の可能性として、容量市場の導入や、卸電力市場から過去の垂直統合型の統合資源計画 (Integrated Planning) への回帰の可能性も示された。多くの関係者がこのような回帰を望んではいないとしながらも、この議論の状況は、再生可能エネルギー大量導入に現実的に直面した欧州にとって、長い時間をかけて確立してきた電力市場の再設計・運営改善の難しさを示している。

EC は 2012 年 11 月に容量メカニズムについてのパブリックコメント募集を行い、2013 年 11 月には容量メカニズムを含む電力市場に対する公的介入に関する加盟各国へのガイダンスを発表した⁴¹⁾。このガイダンスの本文では、既存の市場制度に対する公的介入である容量メカニズムは、既存の電力市場を補完するものであり、市場の機能を阻害してはならないとしている。また、固定価格買取制度 (FIT) に代表される再生可能エネルギー導入に関する公的介入も市場の機能を阻害しないこと、その導入は EU 全体としての総量の最大化が目標であり、各国内の最大化を優先してはならないこと、そして能動化された需要による需給調整を市場化することなどの重要性を指摘した。そして、ガイダンスの付属文書では、既に本シリーズで前回までに述べた需給調整の課題、対応策に続いて容量メカニズムの 2 つの方法である Strategic Reserve と Tendering Procedure を述べ、それらの実施においては多様な対策技術を公平に扱うこと、実施期限を設けること、地域を跨ぐ市場参加を可能とすること、競争を阻害しないことが重要であることを指摘された。

2013 年 11 月、ACER は 2014 年中盤での答申策定に向けて、電力・ガス規制に関するプレパブリックコメントを募集した。募集に当たり、再生可能エネルギー導入に伴う柔軟性の不足やガス火力を中心とした従来発電所の事業性の低迷などに対し、価格メカニズムの透徹、市場の規模拡大、新しい需給調整技術間の競争促進による柔軟性の確保、需要の能動化などによる再生可能エネルギーの導入と競争の促進のための対策が提示された。

これらの EC を中心とした動きと並行して、各国は独自の新規電源確保の施策検討を進めている。英国は 2014 年秋には、2018 年を対象とした初の容量オークションを実施する予定である。ドイツでは 2013 年夏に国内の議論の結果、容量市場の導入を判断する時期ではないという中間結論が出され、当面、Strategic Reserve 制度の導入検討が進められている。国により異なる容量メカニズムの制度が導入された場合、一種の補助金を得た電源をそれぞれの電力市場でどのように公平に扱うかといった新たな課題が生じる。さらに、容量市場で、既設電源を維持するだけではなく、新規電源を開発するためには、相当期間の収入を約束することが必要であり、「様々の柔軟性を備えた対策のそれぞれの確保量」の判断など、新たな課題についての議論が続いている。

4. 米国の最近の取り組み

米国においては、欧州と同様、電気事業の規制緩和が進み、その過程ではカリフォルニアの大停電を始めとする多くの電力システムに関わる課題が発生した。連邦エネルギー規制局 (FERC⁴²⁾、州公益事業委員会 (Public Utilities Commission)、北米信頼度協会 (NERC⁴³⁾ などの規制側、系統運用者 (ISOs/RTOs)、卸・小売り事業者はこれらの多くの課題を解決する過程で、技術や設備に加え、様々な制度の改善を行ってきた。米国は、州あるいはシステム毎に電気事業の規制緩和や再生可能エネルギーの導入を含めた電力需給構造が大きく異なる。このため、米国の電気事業制度の一般論を述べることは困難であることを断った上で、以下、FERC の容量市場に関連した柔軟性に係る制度設計の議論について述べる。

米国では、再生可能エネルギー発電の大量導入以前の段階で、市場の価格シグナルによる新規電源の確保が難しいという問題を回避するために、東部の 3 電力システム⁴⁴⁾では将来の電源容量を調達するための仕組み (容量市場) を導入し、運営している。この容量市場に関し、FERC は、2013 年 9 月に技術会議⁴⁵⁾を開催して、今後の検討の論点整理を試みた。この会議に先立ち、FERC 事務局の文書⁴⁶⁾では、容量市場の設計要素の論点として、需要カーブ、遡りおよび約束期間、取引商品の定義、要求性能、市場支配力の 5 点を挙げた。このうち「取引商品の定義」では、変動する再生可能エネルギーの大量導入などの状況の変化に対応し、従来の一定の条件が付いた単一の kW あるいは kWh 単位ではなく、起動・停止時間、調整速度など多様な柔軟性を取り込んだ取引の必要性が提起された。会議では、個別のシステムの需給調整の必要性と、従来電源に加え、需要の調整、バッテリーなど異なる技術特性の需給調整における価値を想定して、単一あるいは複数の取引商品の優劣について議論が交わされた。会議の結果は公開され、2013 年 12 月までパブリックコメントが募集され、2014 年もこ

の議論は継続されている。

このように、米国での容量市場の議論は、柔軟性の価値と調達方法の検討にも焦点が当たっていることが特徴である。また、柔軟性の費用や効果算定としては、国立再生可能エネルギー研究所(NREL)などにより、様々な検討が行われ、料金や運用制度への反映が模索されている。他方、太陽光発電と風力発電の抑制について、各国の発生状況、発生原因と軽減対策などがまとめられた⁴⁷⁾。需給調整を従来電源で実施する場合の増分費用については、数百機を対象としたデータ分析が行われ、起動停止、部分負荷運転、出力調整の費用や運用費への影響が分析された⁴⁸⁾。さらに、変動する再生可能エネルギー発電連系費用の算定についての米国内の需給調整機関での取扱いについて調査が行われ、統一的な方法がないことが報告された⁴⁹⁾。今後、これらの検討を継続し、制度や運用ルールに反映してゆくことが重要であることの認識のもと、少しずつではあるが需給調整の技術的、制度的な検討が進められている。

5. 我が国への示唆

2013年2月の我が国の電力市場についての提言である「電力システム改革専門委員会報告書(以下「システム改革報告書」)では、その改革を貫く考え方を、「これまで料金規制と地域独占によって実現しようとしてきた『安定的な電力供給』を、国民に開かれた電力システムの下で、事業者や需要家の『選択』や『競争』を通じた創意工夫によって実現する方策が電力システム改革である。」としている。卸電力市場の意義については、「卸電力市場の活性化は、経済合理的な電力供給体制の実現と、競争的な市場の実現の双方にとって非常に重要である。(中略)加えて、卸電力市場の厚みの向上は、透明性・客観性の高い電力価格指標の形成にも資するため、電力取引の活性化や発電における投資回収の見通し向上といった効果も期待される」と述べられている。

その後、2013年4月の「電力システムに関する改革方針」の閣議決定等を経て、遅くとも2020年までに実現すべき電力システム改革の工程、手順の基本的な方向性が示され、実務的な課題への対応も含めた具体的な制度設計に関する検討・審議を行うため、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会電力システム改革小委員会の下に「制度設計ワーキンググループ」が設置され、現在(2014年1月現在)も検討が継続されている。

これまでの検討では、容量市場などの容量メカニズムを我が国の制度に取り込むことが議論されているが、これまでに欧米の状況で見たように、再生可能エネルギーの大量導入という新しい状況のもとで、いずれの容量メカニズムもその有効性は確認されていないばかりではなく、多様な柔軟性を確保するためにどのような容量メカニズムあるいは市場の再設計を行えばよいのかについて

議論がまさに始まった状況である。また、米国の取り組み例で見たように、例えば、従来型の発電機を需給調整に最大活用した場合の機器の損耗、発電効率の低下、運転保守の増大など、同じ技術を用いる場合でも、現状顕在化していない要素も、市場制度や運用ルール設計に取り込む必要がある。

これらの問題を俯瞰すると、ほぼ均質な火力電源による競争を前提として設計された現在の電力市場制度では、変動する再生可能エネルギー発電の大量導入下での多様な柔軟性を持つ需給技術の最適な設備形成を決定できず、その内容は市場外からの介入で決定せざるを得ないことを意味する。制度の変更は、様々なステークホルダーに対し大きな社会経済的な影響を与える。そして市場導入後は、その変更や廃止は容易ではない。他方、先に述べた欧米のような太陽光発電や風力発電の導入の課題が日本で起こるのは、導入量の極端な偏り避け、発電の抑制を技術的、制度的にうまく組みこむことで、2020年代の中盤以降になると考えられる。従って、我が国の電力市場のあり方については、これまで約20年の歴史を持ち、電源確保と再生可能エネルギーの変動対策の現実的な課題に直面した欧米における様々な取り組みを参考にすることが重要と考えられる。

VII. 最適な設備形成に向けて

前章では、一定の設備構成を前提にして、出力が変動する再生可能エネルギーの大規模導入の技術的な対策を最大限に活用するための運用の制度やルールについて述べ、市場の価格シグナルでは持続可能な電力需給を実現するための電力システムの設備形成のあり方を示すことが困難であることまでを述べた。本章では、持続可能な電力/エネルギーシステムに向けた設備形成である、いわゆるベストミックスについて述べる。

これからの日本ばかりではなく世界の電力のベストミックスの考え方は、集中電源により管理不能な需要に供給するという従来の「供給のベストミックス」から、太陽光発電や風力などの変動する再生可能エネルギー発電から、能動化された需要や新しいエネルギー貯蔵技術までを含めた「需給のベストミックス」に変化する。

その上で、資源の賦存や発電特性に地域特性のある再生可能エネルギーと需要の能動化が一定の役割を果たす以上、電力需給のベストミックスは、全国/全世界一律のものではなく地域の特性が反映され電力システムごとに異なるものとなる。電力の需給調整という改めて注目すべき課題もその違いを反映したものとなる。

電力需給は、その土地の特性とニーズを活かして生産から利用が行われる点で、農業によく似ている。このため、それぞれの地域において異なる電力需給になるのが一般的である。従って、それぞれの地域に導入される再生可能エネルギー発電を含めた電力需給のベストミックス

スは、地域の需給特性、他地域との連系条件に基づき考える必要がある。

また、火力・原子力などの大規模電源や資源が地域的に偏在する風力発電は、需要地から離れた場所への立地が避けられない。太陽光発電の場合でも都市や工業地帯などエネルギー需要密度の高い場所での自立は極めて困難である。変動する再生可能エネルギーの大量導入においては、より広い地域の発電電力を合計して変動を緩和できる「ならし効果」の活用も重要である。また、太陽光発電や電気自動車の充電需要に備えるためには配電網の拡充・整備が必要となる。このため、電力需給のベストミックスは、エネルギー資源の分布だけではなく需要との関係から必要となる送電網、配電網さらには電力システム間の連系線といった流通設備を含めて最適化する必要がある。最後に、この電力需給のベストミックスの実現には長い時間を要するため、目指す姿を共有し継続的に考えるための指標体系に基づくエネルギー需給全体のベストミックスという視点が重要である。これらについては別稿を参照いただきたい⁵⁰⁾。

VIII. おわりに

3回シリーズで、出力が変動する再生可能エネルギー発電の大量導入のもとでの電力システムの課題と、技術および、制度とルールに関する取り組み状況と課題解決の可能性について述べた。電力システムの電源が、出力をほぼ制御できる火力・原子力中心の構成から、太陽光発電や風力発電といった出力が不確定な電源の割合を増加させてゆくことは不可能ではないが、長い時間と、多くの努力が必要であることをなるべく具体的に述べたつもりである。

例えば、太陽光発電や風力発電の変動に耐える電力システムの需給運用の高度化にも長い時間を要する。太陽光発電や風力発電の出力予測技術だけをとっても、その開発は、気象や発電などの実績のデータを蓄積して特性を分析することから始まる。水力発電では河川の特徴を把握するために、数十年にわたる流量データを蓄積している。太陽光発電や風力発電のデータ収集・蓄積は、水力設備の洪水設計ほどの厳しい要件ではなく、その必要となる期間は水力の場合より短くてもよいと考えられる。しかし、2010年の猛暑のように電力システムの運用に影響する異常な気象現象や、大規模な ramp 現象の把握・分析も必要であり、多数の観測点による最低10年のデータの蓄積が必要と考えられる。

電力システムを構成する機器、制御システム、制御のための情報通信システムなどが安定かつ経済的に運用できるか、また、様々な事故や災害においても安定供給を継続することができるかは、実験や実証をすることは難しく、実際の運用の中で徐々に検証してゆく必要がある。2014年2月、国際エネルギー機関は、本解説で述

べた柔軟性を主題とした報告書“The power of transformation”を公表し、柔軟性の強化に向けた技術と制度の並行した発展の重要性を示した。

今後の大きな環境変化の中で持続可能な電力需給の実現に向けては、国内外の状況を真摯に見定め、必要となる電力需給の柔軟性の向上のための技術普及と運用の制度やルールの整備を並行して行い、継続的な改善を実践することが必要であろう。

－ 参考資料 －

- 29) 林秀樹：スマートグリッドに関する標準化の動向, IEEJ 全国大会講演論文集, 6-S11-6, 第6分冊 ppS11 (19-22) (2013).
- 30) DG Energy: Energy on European Electricity Markets, Volume 6, issue 2, Second quarter (2013).
- 31) <http://www.europeanclimate.org/index.php/en/>.
- 32) European Climate Foundation: Power Perspective 2030 (2011)
<http://www.roadmap2050.eu/project/power-perspective-2030>.
- 33) EU: Communication – Renewable energy: a major player in the European energy market [COM/2012/271].
- 34) EU: Council conclusions on Renewable Energy (2012.12).
- 35) EU: Electricity & Gas markets
http://ec.europa.eu/energy/gas_electricity/legislation/legislation_en.htm.
- 36) EU: Communication "Making the internal energy market work" [COM (2012) 663].
- 37) Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER).
- 38) European Network of Transmission System Operators for Gas, Electricity (ENTSO-G-E).
- 39) ENTSO-e: Network Code Overview,
<https://www.entsoe.eu/major-projects/network-code-development/>.
- 40) <http://www.roadmap2050.eu/project/roadmap-to-reality>
- 41) EU: Communication “Delivering the internal electricity market and making the most of public intervention” [com (2013) 7243].
- 42) Federal Energy Regulatory Commission.
- 43) North American Electric Reliability Corporation.
- 44) PJM Interconnection, L.L.C. (PJM), ISO New England Inc. (ISO-NE), New York Independent System Operator, Inc. (NYISO).
- 45) FERC: Technical Conference on Centralized Capacity Markets in RTOs/ISOs (2013).
- 46) FERC: Centralized Capacity Market Design Elements.
- 47) Debra Lew, *et al.*: Wind and Solar Curtailment, NREL/CP-5500-60245 (2013.9).
- 48) D. Lew, G. Brinkman, *et al.*: Impacts of Wind and Solar on Fossil-Fueled Generators, NREL/CP-5500-53504 (2012.8).
- 49) K. Porter *et al.*: A Review of Variable Generation Integration Charges NREL/TP-5500-57583 (2013.3).
- 50) 荻本和彦：電力需給のベストミックス、火力原子力発電協会誌, Vol.63, No.10, pp789-802 (2012).

著者紹介

荻本和彦 (おぎもと・かずひこ)
本誌, 56 [1], p.24 (2014) 参照.

核燃料サイクルフロントエンド

第3回 海外ウラン資源開発株式会社によるウラン資源開発と最近の開発動向

海外ウラン資源開発(株) 浜井 富生

海外ウラン資源開発株式会社は日本の原子力発電へのウラン燃料の安定供給を目的として、1970年に設立された。1978年に生産を開始したアフリカ・ニジェール共和国のアクータ鉱山、1999年から生産を開始したカナダ・マクリンレイク鉱山からのウラン精鉱引取分の全量を日本の電力会社に販売して来た。2011年の福島第一原発事故前は、日本で必要なウラン燃料の10～15%を安定して供給していた。今回、当社のウラン鉱山開発について紹介するとともに、最近の探鉱・開発案件のいくつかについて紹介する。

I. 海外ウラン資源開発(株)の活動

1. ニジェール・プロジェクト

1969年ウラン資源確保対策のため、日本原子力産業会議にウラン資源開発委員会が設置された。当時アフリカ各地でウラン共同探鉱の提案がなされており、この中でフランス原子力庁(CEA)から提案されていたCEAおよび西アフリカのニジェール政府との共同探鉱を積極的に推進することとなった。

1970年5月に株主33社(電力9社、非鉄鉱山10社、商社6社、重電6社、銀行1社、個人1名)により海外ウラン資源開発株式会社(OURD)が設立され、CEAおよびニジェール政府と共にアクータ組合が創立された。

探鉱活動が1970年から1972年まで実施され、開発可能なウラン鉱床を確認した。その後、実施したフィージビリティスタディを経て1974年にはアクータ鉱山株式会社(COMINAK)が設立され、当初の株主はOURD 25%、CEA 44%、ニジェール政府 31%であった。(第1図、第2図)

1974年から開発工事を開始し、1978年に最初のウラン精鉱が生産された。その後、生産を継続しており、2013年末までの累計生産量は66,500tUに達し、さらに10年程度の可採鉱量を有している。現在COMINAKの株主はOURD 25%、AREVA 34%、ニジェール政府(SOPAMIN) 31%、スペイン・ウラン公社(ENUSA)

Nuclear Fuel Cycle - Front-end (3) ; OURD's Uranium mines and recent Uranium projects development : Tomio HAMAI.

(2014年1月14日 受理)

■前回タイトル

第2回 多様なウラン鉱床の形成と資源の持続性

10%となっている。

OURDは生産量の最大43.3%を引き取る権利を有しており、開山以来の販売量は28,000tUで、この全量を日本の原子力発電所を保有する電力会社9社に販売した。

アクータ鉱山はニジェールの首都ニアメの北東850kmに位置しており、道路または空路によりアクセス可能である。鉱床は砂岩型のウラン鉱床で、当初開発



第1図 アクータ鉱山製錬所



第2図 ニジェール位置図

されたアクータ鉱床に加え、アコラ鉱床、エバ鉱床が南北7kmの範囲に連続して分布している。これらの既存鉱床に加えて、さらに南部には有望な鉱化帯を確認しており、採鉱作業を継続している。

採掘は坑内採掘で、地表から長さ1.3kmの2本の斜坑で深度200mの鉱床を含む水平層にアクセスし、充填式残柱採掘法と柱房式採掘法(残柱を置く採掘法)を採用している。ジャンボ削岩機による穿孔、発破後積込運搬機で坑内一時貯鉱場に運搬する。その後、トラックにて坑内1次破碎場に運搬後、ベルトコンベアにて坑外に運搬している。採掘品位は過去のアコラ、アクータ鉱床採掘時は0.5%Uであったが、現在の主力鉱体であるエバ鉱床では0.35%Uである。(第3図)

製錬所は降雨がほとんどないことから、工場設備の大部分が野外に設置されている。製錬生産能力は2,000tU/年で、鉱石を乾燥後粉碎し、硫酸と硝酸ナトリウムによる浸出、ケロシンによる溶媒抽出、マグネシウムによる沈殿の各工程を経てウラン精鉱を生産し、ドラム缶詰め後、フランスの転換工場に輸送している。

従業員は約1,100人であるが、10人程度のフランス人上級幹部を除いて、ニジェール人により操業されている。

生産量は当初生産能力と同じ2,000tU/年であったが、採掘品位の低下に伴い現在の生産量は1,500tU/年となっている。(第3図)

2. カナダ・プロジェクト

1987年旧動力炉・核燃料開発事業団(動燃)(現・日本原子力研究開発機構)はカナダ・サスカチュワン州アサバスカ盆地東縁のミッドウェスト(以下MW)プロジェクトの15%権益を取得し、予備的経済性評価を行い有望なプロジェクトとの結果を得た。旧動燃はこのプロジェクトを継承する国内企業を募り、OURDが1990年にこれを購入した。これに伴いOURDはカナダ現地法人OURDカナダを1991年に設立し、旧動燃からMWの15%権益を取得した。その後1993年にはウラン市況低迷期にMWの開発を促進するために、マックリーク(ML)プロジェクトと権益の等価交換を行う相互



第3図 アクータ鉱山・坑内作業員

補完契約を締結した。両プロジェクトとも法人格なきジョイントベンチャー(JV)により運営されている。現在のMLJVの権益比率はAREVA 70.0%, Denison(カナダの中堅ウラン企業)22.5%, OURDカナダ7.5%である。またMWJVの権益比率はAREVA 69.16%, Denison 25.17%, OURDカナダ5.67%である。両JVともオペレーターはAREVAである。

1997年日本政府は旧動燃が保有していたカナダにおけるウラン採鉱権益を2001年3月までに譲渡することを決定した。これに対してOURDを含む4社が興味を表明し、25%の均等出資により日加ウラン社を設立し、その100%子会社である現地法人JCU Canada(JCU)が14案件のウラン採鉱権益を購入した。その後、日加ウラン社の解散、株主1社の撤退があり、現在、伊藤忠商事、OURD、三菱商事の3社がJCUに対し均等に投資している。OURDはマネージャーとしてJCUの運営、管理を行っている。

(1) マックリークレイク鉱山(ML)

MLはカナダ中央部サスカチュワン州のサスカトゥーンの北700kmに位置している。本鉱床は、高品位のウラン鉱床が多数分布するアサバスカ盆地の不整合関連型鉱床の一つである。(第4図)

1999年に生産を開始し、2010年まで19,200tUの生産を行った。当初の計画では2007年から後述のシガーレイク鉱山(CL)の鉱石と混合処理する予定であったが、出水事故によりCLの開発が延期され、MLの鉱石を2010年まで処理し、その後、生産は中断状態にある。

鉱区内の採鉱を生産開始後の2001年に再開し、2002年にはカリブー鉱床を発見した。現在も採鉱作業を継続中である。

過去の採掘は全て露天掘り採掘で、ジェブ鉱床、スーC鉱床、スーA鉱床、スーE鉱床、スーB鉱床の順序で採掘を行い、いずれも終了している。(第5図)

製錬所(ジェブ製錬所)は最も近代的かつ環境に配慮した製錬所であり、当初2,300tU/年の生産能力でスタートした。その後、CL鉱石の一部受託製錬のため第1次拡張工事を行い、2007年に生産能力は4,600tU/年となった。さらに2011年CL鉱石の全量処理を行うこととなり、生産能力を9,200tU/年に引き上げる第2次拡張工事を開始した。

製錬は硫酸および過酸化水素によるタンク浸出後、固液分離、清澄、溶媒抽出、アンモニア添加による沈殿工程を経て、梱包後転換工場に輸送している。

今後はCL鉱石の受託製錬を行うとともに、ML鉱区内にある未開発のマックリーク北鉱床、カリブー鉱床、スーD鉱床の開発を行うべく、採掘方法の検討を行っている。採掘方法としては従来採用を予定していた坑内採掘に加え、地表から採掘孔を掘削し、圧縮した水と空気による鉱石粉碎を行い、地表まで鉱石を運搬する



第4図 カナダ・アサバスカ盆地 主要ウラン関連情報



第5図 ML 鉱山・スー地区露天掘りピット

ジェット採掘法(SABRE)の試験中である。

(2) ミッドウェストプロジェクト(MW)

MLとほぼ同時期に開発される予定であったMWは当初、岩盤凍結後坑内からのジェット採掘法を採用し、連邦政府審査機関(現 CNSC)から1998年に環境評価の承認を受けた。

しかしその後の追加検討で、鉱床周辺の粘土が当初の予想以上に凍結しにくいことが判明し、この採掘法は断念せざるをえなくなった。その後、種々の採掘法の検討を行った結果、最終的に2005年に露天掘り法の採用を決定した。2006年にはCNSCに対して環境評価の手続きを開始したが、想定以上に審査に時間がかかり、2012年ようやく承認を得た。この間のウラン価格の低下、コストの上昇、環境対策の追加工事等により、一旦決定した露天掘り法による開発も断念せざるを得ない状況となった。現在MLで試験中のSABRE採掘法の適用を中心に、新たな開発計画を検討中である。

いずれの採掘法を採用しても、製錬所は建設せず、近傍のMLのジェブ製錬所での委託製錬を計画している。

鉱床は不整合関連型鉱床の不整合タイプで、埋蔵鉱量

は、鉱量590,000t、品位2.71%U、ウラン量16,000tUである。

(3) JCUプロジェクト(JCU)

JCUは当初14案件を旧動燃から継承したが、その後ミレニアムプロジェクトを加え、現在15探鉱案件を保有している。15件のうち14件がアサバスカ盆地(サスカチュワン州13件、アルバータ州1件)に、1件がヌナブット準州のシーロン盆地に位置している。全てのプロジェクトはJVとして運営されており、オペレーターは8件がAREVA、4件がCameco(カナダ最大手のウラン企業)、2件がDenison、1件がJCU単独となっている。15件のうち、鉱床が確認され鉱量計算が実施されたプロジェクトは5件である。

このうち唯一ヌナブット準州のシーロン盆地に位置するキガビックプロジェクトは、基盤タイプの不整合関連型鉱床で、鉱量10,418,000t、品位0.47%U、ウラン量49,000tUの大規模低品位型鉱床である。2006年から予備的経済性評価を開始し、また2011年に準州政府に対して環境評価の手続きを開始した。全てが順調に進めば、2021年から生産が開始されることとなる。これらの手続きと並行して大規模な探鉱活動を継続中であり、追加鉱量の発見が期待される。JCUの権益比率は33.5%で、AREVAがオペレーターである。(第6図)

またミレニアムプロジェクトは、旧動燃からの継承後、2001年に発見された基盤タイプの不整合関連型鉱床である。一部不整合面にも鉱床は賦存するが、大半は基盤岩中に胚胎し、地表から650~750mの深部に位置する。2006年から予備的経済性評価を開始し、また2009年連邦政府およびサスカチュワン州に対して環境評価の手続きを開始した。推定鉱量は2013年時点で鉱量743,000t、品位3.53%U、ウラン量26,000tUである。立坑を用いた坑内採掘を予定しているが、製錬所は建設

せず近隣の Key Lake 鉱山製錬所での委託製錬を想定している。全てが順調に進捗すれば、2021 年から生産が開始されることとなる。JCU の権益比率は 30.1% であり、オペレーターは Cameco である。(第 7 図)

ウィラーリバープロジェクトでは、2009 年にフェニックス鉱床が発見された。不整合面のみに鉱床が胚胎し、深度は 400m でほぼ平坦である。2013 年までに確認された推定鉱量は 152,400t、品位 13.2%U、ウラン量 20,000tU で、さらに鉱量を目指し探鉱を継続している。JCU の権益比率は 10% と小さく、オペレーターは Denison である。

JCU 設立後 2005 年までの年間探鉱費は 100 万カナダドル程度と鉱区権益維持の最低限の水準であった。その後のウラン価格高騰により探鉱活動は活発化し、また一部のプロジェクトが探鉱作業から経済性評価作業に移行したため探鉱費は急速に増加し、2007 年以降は年間 1,000 万カナダドルを支出している

II. 最近のウランプロジェクトの動向

1. シガーレイク鉱山(CL), カナダ

CL は 1981 年に発見され、その後の探鉱で高品位の不整合タイプの不整合関連型鉱床が確認された。1995 年に環境評価手続きが開始され、1998 年に地下水汚染を引き起す可能性のある岩石の適切な管理を条件に承認された。(第 8 図)

カナダ連邦政府は 2003 年に鉱山部門のみについて環



第 6 図 試錐探鉱現場(シーロン盆地)



第 7 図 高品位試錐コア(アサバスカ盆地)

境報告書の再提出を要請し、2004 年末にこれを承認した。これを受けて CLJV は開発決定を行い、本格的な開発工事が開始された。

しかしながら生産開始予定であった 2007 年の前年の 2006 年、2 度にわたり坑内で出水事故が発生し、開発済みの坑道は全て水没した。その後、止水と排水作業が行われたが、2010 年には別の個所から出水し、再度水没することとなった。再び止水、排水作業を行った後、開発工事は順調に進み、現在の計画では 2014 年第 2 四半期から生産が開始される予定である。フル生産到達後は年間 6,900tU の生産が見込まれており、近隣の McArthur River 鉱山に次ぐ世界第 2 位の生産量を誇る鉱山となる。可採鉱量は 537,100t、品位 15.5%U、ウラン量 83,000tU が計上されており、非常に高品位である。

採掘法は鉱床全体を凍結後、坑内からのジェット採掘によって実施し、坑内で粉碎される。このスラリーは ML に運搬され、前述のようにジェブ製錬所で全量製錬される。CLJV の権益比率は Cameco 50.025%、AREVA 37.100%、出光 7.875%、東京電力 5.000% である。日本企業 2 社が合計で 12.875% の権益を持つ世界有数のウラン鉱山が、3 回の出水事故を克服し、ようやく 2014 年生産を開始する。

2. パターソンレイクサウス(PLS), カナダ

PLS は過去 3 年間にわたって低迷するウラン市場において、唯一明るい話題を提供したプロジェクトとして注目される。

PLS も上述の ML や CL と同じくカナダ・サスカチュワン州のアサバスカ盆地に位置する。ただし操業鉱山が集中している東縁ではなく、南西部に位置していることが特徴である。本鉱床の近傍には、過去に操業していた Cluff Lake 鉱山や、UEX と AREVA とが探鉱中の Shear Creek 鉱床がある。PLS は Fission Uranium (カナダのジュニア探鉱会社) が 100% 権益を所有する探鉱段階のプロジェクトである。本格的な探鉱が開始されたのは 2007 年と新しく、その他のアサバスカ盆地と同様に空中磁気、空中電磁探査から開始されている。これ



第 8 図 シガーレイク鉱山



第9図 探鉱キャンプ(シーロン盆地)

に加え、土壌、湖水中のラドンガスを用いた探査が実施された点が特筆される。その結果、2011年には非常に高品位なウランを含む地表の転石が確認された。この転石を追跡する試錐が実施されたが、鉱徴は確認されなかった。2012年に空中電磁探査によって推定された地下の電気良導体にターゲットを移し、試錐の結果、鉱化帯が確認された。その後、この電気良導体に沿って多くの試錐が実施され、既に走行延長1.76kmにわたって鉱床が確認されている。

PLSの特徴として鉱床が深度50mの浅所で確認されていること、鉱床がアサバスカ盆地の外側に位置し、全て基盤タイプの鉱床であること、高品位で厚い鉱床であることがあげられる。

福島第一原発事故以後のウラン価格低迷により、カナダの中小ウラン探鉱会社は権益の売却、会社の合併、ウラン探鉱からの撤退を余儀なくされる困難な状況に追い込まれたが、PLS周辺のみ鉱区の取得ラッシュが起こり、探鉱活動が活性化した。

PLSではいまだ鉱量計算は実施されておらず、開発にいたる道筋は依然不明である。アサバスカ盆地西部には製錬所がなく、新たな製錬所建設には膨大な資金と環境評価取得のための時間が必要となることから、中小企業であるFission Uraniumによる開発は荷が重いと想像される。当面は試錐探鉱が継続され、鉱量の確定作業が実施されると思われるが、大手企業による会社買収の可能性も含め、今後の動向が注目される。

3. イムラーレン(IM), ニジェール

OURDが参加するアクタータ鉱山の南80kmに位置し、操業会社の66.65%株式をAREVAが、残りの33.35%をニジェール政府(SAPAMIN)が所有している。またAREVAの持ち分66.65%のうち10%分は韓国電力が資金を拠出している。

アクタータ鉱山と同様、砂岩型の鉱床であるが、品位は0.07%Uと低い。しかしウラン量は可採鉱量で214,000tUにも達し、未開発鉱床としては世界屈指の鉱床である。

鉱床の一部は地表に露出しており、露天掘りによる開発が計画されている。開発費用は12億ユーロ(約1,680億円)を超えと言われており、大型鉱山の開発案件である。生産量はフル生産時5,000tU/年が計画されている。

AREVAは2008年に環境評価の許可取得後、開発工事を開始した。当初は2011年から生産開始予定であったが、ウラン価格の低迷、地元住民であるトワレグ族の地元への還元要求、アルカイダグループによるAREVA技術者の誘拐事件、従業員のストライキ等により生産開始を2013年/2014年に延期するとAREVAは発表した。その後、ウラン価格の低迷により開発作業はさらに遅れ、生産開始はいまのところ2015年末とされている。今後の市場動向によっては、さらに遅延する可能性もある。

過去、ウラン鉱山の開発はニジェール政府をAREVA、すなわち旧宗主国であるフランス政府が支援する形で進められてきた。しかし近年、最貧国から脱却できない国民の不満を受け、ニジェール政府からウラン鉱山、特にAREVAへの要求が強まっている。AREVAは2013年にニジェール政府に対して3,500万ユーロの寄付を行った。ニジェール政府はこれをIM鉱山開発遅延に対する補償と発表した。AREVAはこれを否定している。

4. 日本企業が権益を持つプロジェクト

既述のプロジェクト以外で、日本企業の参加が公表されているウランの探鉱・開発プロジェクトを以下に列挙する。

- ・ West Mynkuduk (カザフスタン)
- ・ Kharasan (カザフスタン)
- ・ Dulaan Uul 他 (モンゴル)
- ・ Kintyre (オーストラリア)
- ・ Lake Maitland (オーストラリア)
- ・ Curnamona 地区他 (オーストラリア)
- ・ West McArthur (カナダ)

これに加え、日本の政府機関である石油天然ガス金属鉱物資源開発機構(JOGMEC)が、ウズベキスタンほかでウランの共同探鉱を行っている。



第10図 探鉱キャンプ近辺に生息するジャコウウシ (シーロン盆地)

Ⅲ. 最後に

資源の開発は非常にリスクを伴う投資である。資金を投下して探鉱を行い、鉱床を発見して鉱山開発・生産にまでいたる確率は小さい。しかしながら探鉱を行わないと新たな資源の発見はできない。

また鉱床を発見したとしても、これが経済的に開発できるかどうかは、経済性評価に左右される。さらにウラン鉱山の場合、開発のための環境評価の承認、開発・操業ライセンス取得に非常に長い時間が必要となる。貴金属や非鉄金属の鉱山では、鉱床発見後10年程度で生産開始に至るケースがあるが、ウラン鉱山の場合は20年程度とより長い時間が必要となる。JCUで経済性評価を行っているミレニアム、キガビックプロジェクトも生産開始は2021年以降の予定である。

現在、日本の原子力発電所は全て停止し、ようやく再稼働に向けての審査が開始された段階である。将来の日本の中長期的なエネルギー政策については、2013年12月6日に経済産業省が総合資源エネルギー調査会の基本政策分科会を開き、エネルギー基本計画の素案を提示した。この中で政府は原子力発電を重要電源と位置づけ、ベース電源として活用することを明記している。福島第一原発の廃炉、高レベル放射性廃棄物の処理など、まだまだ解決すべき多くの技術的な問題はあるものの、安定供給、コスト削減、温暖化対策の観点から原子力発電は引き続き重要な電源として活用すべきであろう。

今後、原子力発電が再開された場合、その原料となるウランの安定確保は引き続き重要な課題である。

OURDはニジェールにおけるウラン鉱山の操業に40年の経験を持ち、カナダでもジュブ製錬所を含むMLの権益を保有している。JCUは世界的にもウラン賦存ポテンシャルの高いアサバスカ盆地とシーロン盆地に15案件の権益を既に保有しており、そのうち2案件について経済性評価と環境評価が行われている。さらにこれらのプロジェクトを大手企業であるAREVA、Camecoと共に推進している。

直近の状況は非常に厳しいが、OURD/JCUは日本で唯一の民間のウラン鉱山の探鉱・操業専門の会社として、長期的な視野から今後もウラン権益の保持、ウラン精鉱の確保・供給を継続し、日本のエネルギーの安定供給に寄与したい。

— 参考資料 —

- 1) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, ウラン・ハンドブック 2011.

著者紹介



浜井 富生 (はまい・とみお)

海外ウラン資源開発㈱

(専門分野/関心分野) ウラン探査, 鉱山開発, 鉱山プロジェクト評価



From Editors 編集委員会からのお知らせ

— 最近の編集委員会の話題より —
(4月7日第10回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・英文誌は3月期に22論文が投稿された。6月号入稿済み。Special Issueへの投稿状況が報告された。
- ・和文誌掲載論文の英訳／転載に関して、候補論文の選定を進めることとした。
- ・春の年会でJNST Award 2013の表彰式を行った。また、学会中の編集委員会議の様子が報告された。
- ・論文誌関連規定類の見直し検討経過が報告された。
- ・次年度の編集委員候補者および委員の交代を承認した。
- ・審査結果に対する意見書等の取り扱いについて検討した。

【学会誌関係】

- ・核融合工学会 部会長に出席いただき、活動状況の説明を受け、学会誌記事になりそうなテーマについてディスカッションを行った。
- ・他学会誌の記事を福島事故に焦点をあて調査し、残された課題には何かあるか抽出し、今後の方策として生かしたい、という提案があった。どういった点に注意し記事を調査するか、具体的な調査方法を検討していくこととした。
- ・各委員より、記事提案の説明があった。うち、執筆者の内諾が取れている提案について承認された。
- ・巻頭言、時論、解説、ジャーナリストの視点の企画状況、今後の掲載予定について確認した。

編集委員会連絡先 < hensyu@aesj.or.jp >

世界の原子力事情

第6回 内外に積極的に原子力展開するロシア

日本原子力産業協会 小林 雅治

エネルギー安全保障や気候変動対策から、世界的には原子力開発を継続・推進する方向にあるが、欧米諸国ではその勢いは今ひとつ弱い。そのような中で、ロシアは国内での原子力発電所の建設だけでなく、海外諸国への原子力輸出も活発に進めている。高速炉開発も長い歴史を持ち、BN-600 (60万kW)が1980年以来運転を続けており、BN-800 (80万kW)が今春には初臨界の予定だ。さらに燃料サイクルの濃縮分野では世界シェアの3~4割を占める。旧ソ連時代の1986年にチェルノブイリ事故を起こし、ソ連崩壊後のしばらくの間は原子力開発が停滞したが、21世紀に入ると、そこから脱却して、原子力における存在感を高めている。ロシアの原子力開発の経緯や体制にも触れながら、原子力開発の全体像を眺めてみる。

I. ロシアの原子力産業

1. 原子力産業の歴史

ソ連の原子力産業は軍事利用から発展した。1943年設立の第2ラボ(後のクルチャトフ研究所)が軍事研究を進め、1949年8月、カザフスタンのセミパラチンスクで最初の実験を行った(第1表)。

1953年には中型機械工業省が設立され、原子力の軍事利用と民生利用の一切を担当した。その名称からも外部からカモフラージュされた組織であるが、「帝国の中の帝国」として強大な権威と権力を保持していた。

しかし、1986年のチェルノブイリ事故を契機に、原子力発電開発が停滞し、中型機械工業省の「栄光の時代」も終わった。省名もソ連原子力産業省と改名し、ソ連崩壊後はロシア原子力省(MINATOM)になった。

なお、この時期の世界的な動きとして、世界の原発の安全強化に向け連携・協力する組織としての世界原子力発電事業者協会(WANO)の設立総会が1989年にモスクワで開催された。また、冷戦終結を受け、旧ソ連において原子力を含む大量破壊兵器関連研究者・技術者の頭脳流出を防ぐ目的で、国際科学技術センター(ISTC)が1994年、モスクワで発足した。

2004年3月、ロシア原子力省は、省庁再編によりロシア原子力庁になった。省から庁への格下げに見える

Current Trends in Nuclear Energy (6) ; Aggressive Nuclear Power Development of Russia at Home and Abroad :
Masaharu KOBAYASHI.

(2014年2月20日 受理)

■前回タイトル

第5回 インドの原子力開発の動向

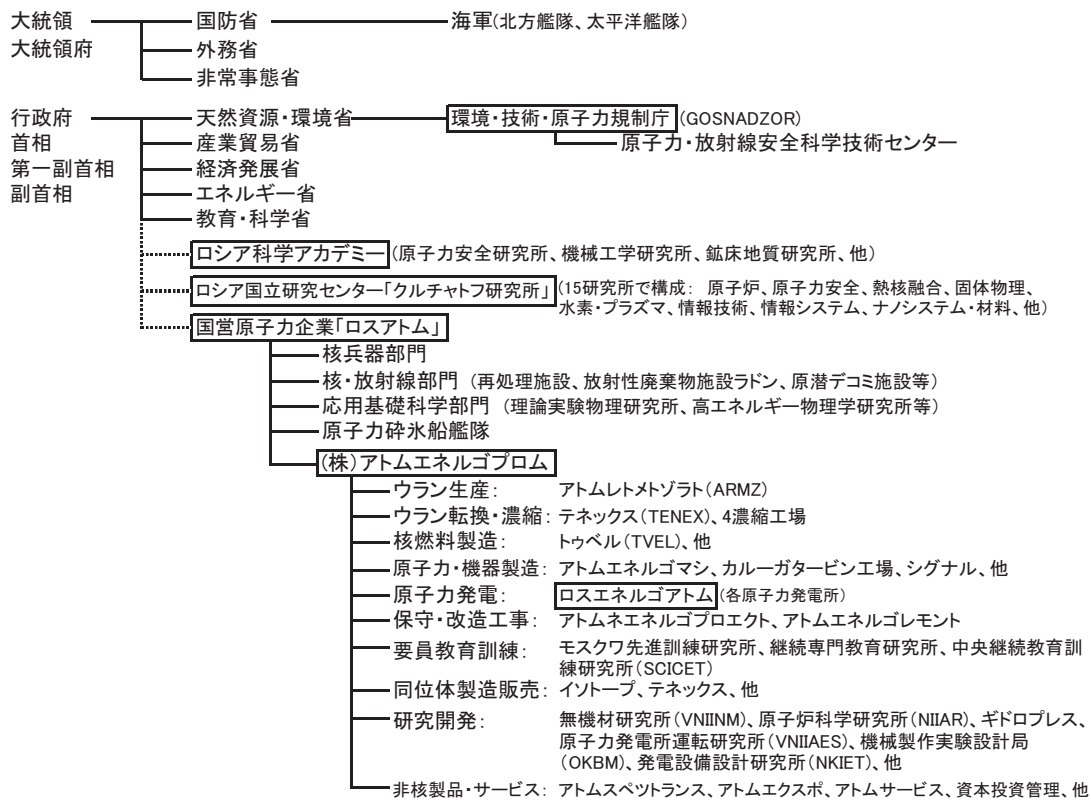
第1表 ロシア(ソ連)の原子力開発年表

1922	ソビエト社会主義共和国連邦(ソ連邦)設立
1943	原爆研究を目的に第2ラボ設立 (後のクルチャトフ研究所)
1948	マヤクでプルトニウム生産炉1号、初臨界
1949	セミパラチンスクで最初の核実験
1953	水爆実験に成功、中型機械工業省設置
1954	世界最初の原発オブニンスク黒鉛炉発電開始
1957	ウラルの核惨事(キシチム事故)
1959	世界最初の原子力砕氷船レーニン号就航
1964	最初の商業 VVER 運転開始(ノボボロネジ1号機)
1973	高速炉 BN-350 運転開始(海水淡水化兼用)
1974	100万kW・RBMK 運転開始(レニングラード1号機)
1981	高速炉 BN-600 運転開始
1986	チェルノブイリ原発4号機事故
1989	ソ連原子力産業省発足
1989	世界原子力発電事業者協会(WANO)設立総会
1991	ソ連邦崩壊、ロシア連邦成立
1992	ロシア原子力省発足
1994	国際科学技術センター(ISTC)発足
2004	ロシア連邦原子力庁発足
2007	国営企業ロスアトム発足

が、これにはプーチン大統領(当時)による原子力産業の統括・強化の狙いが込められていた。その表れとして、2005年11月、かつて首相を務めた実力者であるキリエンコ氏が、その使命を担って原子力庁長官に就任した。

2007年12月、原子力庁が廃止され、国営原子力企業ロスアトムが設立され、キリエンコ氏がその総裁に就いた。

ロスアトムは、①民生用の原子力企業を傘下におく(株)アトムエネルギーグループ(AEP)、②核兵器部門、③核・放射線安全部門、④応用基礎科学部門、などから構成される(第1図)。アトムエネルギーグループは、ウランの採鉱・採掘から濃縮、燃料製造などの燃料サイクル企業や、原子力発電所の管理・運転を行うロスアトム



第1図 ロシアの原子力関係組織・体制

トム、研究開発機関、アイソトープ企業、人材育成機関など、ほぼ全ての企業、機関から構成されている。これらのロシアの原子力産業・機関は350以上あり、19万人以上が従事していると言う。

ロスアトムは、国際的な原子力平和利用、核不拡散体制維持の面で、外交機能も有する。実際、ロスアトムのキリエンコ総裁が日ロ原子力協力協定に署名した(日本は当時の中曽根外相が署名)。

ロシアの原子力安全規制機関は、環境・技術・原子力規制庁(GOSNADZOR)である。2004年5月より、現在の名称になった。

II. 多様な原子炉を開発

1. VVER, RBMK, 船用炉を開発

ロシア(ソ連)の原子力平和利用の着手は早く、モスクワ郊外のオブニンスクで、1954年、世界最初の原子力発電所(ウラン黒鉛チャンネル型炉, 6,000kW)が運転を開始した。

ロシアの原子力発電開発は、黒鉛減速軽水冷却チャンネル型炉(RBMK)と加圧水型軽水炉(VVER)の2炉型を中心に進められた。

RBMKは、元々はプルトニウム生産炉から発展したもので、100万kW炉(RBMK-1000)がシリーズで建設された。史上最悪の事故を起こしたチェルノブイリ原子力発電所(現在のウクライナ)も同型炉である。チェルノブイリ事故後は、当時建設中だったスモレンスク3号機が

1990年に運転開始しただけで、新規建設の計画はない。

一方、VVERについては、VVER-440(44万kW)とVVER-1000(100万kW)がシリーズで建設された。VVERは水減速水冷却原子炉のロシア語の略称で、ロシア製加圧水型炉(PWR)のことである。

ロシアはチェルノブイリ事故後、安全性向上に取り組んでおり、最新のVVERは、耐震性の強化、二重格納容器や航空機墜落対策、コアキャッチャや受動的安全装置などの装備をしているようである。

これらの主要2炉型とは別に、北極圏の僻地のビリビノに、小出力の電熱併給チャンネル型炉(EGP, 1万2,000kW, 4基)が1970年代に建設された。

原子力砕水船の開発も早くから始まり、1959年には世界最初の原子力砕水船レーニン号が就航し、これまでに約10隻が就航した。この船用炉技術は、海上浮揚型原子力プラントに利用され、現在サンクトペテルブルクのパルチック造船所で建造中(第2図)。同プラントは、船用炉KLT-40を2基搭載したバージ型(タグボートで曳航・係留)で、2016年に東シベリアのベベク港に係留され運転開始の予定。電気出力7万kW, 熱出力1,400億カロリー/時。将来的には燃料不足に苦しむロシア北部等だけでなく、遠隔地での電熱源や海水淡水化用として、海外輸出(リース方式)も期待されている。

2. エネルギー戦略から高速炉開発を堅持

ロシア(ソ連)は、原子力開発の初期から、将来のエネルギー問題解決の鍵として、ナトリウム冷却高速炉の開



第2図 海上浮揚型原子力プラント

発を積極的に進めてきた。1969年に実験炉BOR-60、1973年に原型炉BN-350、1980年に原型炉BN-600が運転開始し、高速炉プラントに関する多くの技術的知見・経験を蓄積している。

BN-350は、発電/海水淡水化プラントとして、カスピ海沿岸のシェフチェンコ(現在カザフスタンのアクタウ)に建設され、砂漠地帯の発展に貢献したが、寿命のため1999年に閉鎖された。BN-600(於ペロヤルスク、第3図)は、電気出力60万kWのタンク型炉で、初期にはナトリウム漏洩・火災等、各種トラブルを経験したが、近年はほぼ順調に運転している。

これらの実績を背景に、1980年代に、ペロヤルスクと南ウラルに実証炉BN-800の建設に着工したが、チェルノブイリ事故等の影響を受けて、長らく凍結状態にあった。

しかし、21世紀に入って、ペロヤルスクでは建設が再開された。BN-800はこの1月に燃料の初装荷が始まり、今春には初臨界の予定である。これまでロシアの高速炉燃料は濃縮ウランを使用していたが、BN-800ではウラン・プルトニウム混合酸化物燃料(MOX燃料)を使用する。同地ではさらにBN-1200の建設計画が検討されている。BN-800は中国への輸出計画も進行中である。

これらのほか、鉛冷却や鉛・ビスマス冷却の高速炉開発も進めている(第2表)。

Ⅲ. 国内外で原子力開発を活発化

1. 世界4位の原発国、国内シェア25%目指す 21世紀に入ると、ロシア経済も低迷から脱し、原子

第3図 ペロヤルスク原子力発電所
(3号機がBN-600、この近くでBN-800を建設中)

力開発も活発化してきた。ロシアは、原子力発電を積極的に利用し、その分を石油、天然ガスの輸出に回し外貨を稼ぐ考えである。2006年1月、プーチン大統領(当時)は年頭記者会見で、ロシアの原子力発電量シェアを2030年までに25%(当時16%)に拡大する目標を発表。

2009年11月の政府の「2030年のエネルギー戦略」及び2010年央の同改訂版によると、2030年までに4,340万kWの原発を新增設する計画である。ロシアには古い原発も相当数あるため、同期間に1,650万kWの原発が耐用年数を迎えて閉鎖される見込みである。

2014年2月1日現在、ロシアの運転中原発は33基、合計出力2,425万kWであり、世界4位の原発国である(第3表)。運転炉の内訳は、VVER-440 6基、VVER-1000 11基、RBMK 11基、EGP 4基、BN-600 1基である。

ビリビノ原発以外にも数基の原発が地域暖房用に熱供給している。原発の運転実績について、1990年代の平均設備利用率は60%前後だったが、2000年代には70%台になり、2010年代には80%を超えるまでに改善している。

第3表から、ロシアでは、建設中、計画中、提案中の原発が多く、野心的に原発開発を進めていることが分かる。ちなみに、現在世界6位の中国はロシアを上回る急拡大の原子力計画を進めている。

2. 華々しい成果あげる原子炉輸出

ロシアは、ソ連時代には東欧諸国などの旧社会主義国に原発を輸出してきた。燃料も供給し、その使用済み燃料を引き取ってきた。

ロシアアトム傘下のアトムストロイエクスポート(ASE)が原発の輸出企業であるが、ロシアアトムのキリエンコ総裁だけでなく、大統領や首相が首脳外交を展開して、輸出ビジネスを展開している。最近設立されたルサアトム・オーバーシーズは、相手国企業との連携強化を通じて輸出につなげる国際活動を展開している。

イランのブシェール原発(1号機、VVER-1000)は当初、独シーメンス社が始めたプロジェクトだが、途中で中止されたのをロシアが引き継ぎ、2011年に送電開始

第2表 ロシアの高速炉開発

冷却材	名称	出力 万kW	運転年	備考
Na	BOR-60	1.2	1969	於ディミトロフグラードRIAR
	BN-350	15	1973	現カザフ、1999閉鎖、発電/脱塩
	BN-600	60	1980	於ペロヤルスク
	BN-800	80	(2015)	於ペロヤルスク
	BN-1200	120	(2020)	於ペロヤルスク
Pb	BREST-300	30	(2020)	於トムスク
Pb-Bi	SVBR-100	10	(2017頃)	於ディミトロフグラードRIAR
	MBIR	15	-	多目的炉

第3表 世界各国の原子力発電開発状況(上位6国)

国名	2012年の原子力 発電量とシェア		原子力発電所							
			運転中		建設中		計画中		提案中	
	億 kWh	%	基	万 kW	基	万 kW	基	万 kW	基	万 kW
1 米国	7707	19.0	100	9909.8	5	601.8	7	846.3	15	2400.0
2 フランス	4074	74.8	58	6313.0	1	172.0	1	172.0	1	110.0
3 日本	172	2.1	48	4256.9	3	303.6	9	1294.7	3	414.5
4 ロシア	1663	17.8	33	2425.3	10	916.0	31	3278.0	18	1600.0
5 韓国	1435	30.4	23	2065.6	5	687.0	6	873.0	0	0
6 中国	927	2.0	20	1704.1	28	3163.6	58	6263.5	118	12200.0

(2014年2月1日現在, 出典: IAEA/PRIS, WNA)

第4表 ロシアの原子力発電所輸出(主に21世紀の実績)

国名	原発	内容
ウクライナ	フメルニツキ2	(1985年着工, 1990年代建設中断)その後建設再開, 2005年9月運開
	ロブノ4	(1986年着工, 1990年代建設中断)その後建設再開, 2006年1月運開
	フメルニツキ3, 4	(1986/87年着工, 1990年代建設中断)2011年建設契約締結, 2015年頃建設再開予定
イラン	ブシェール1	1995年, ロシアがVVER-1000としての完成契約締結。2011年9月送電開始
	ブシェール2	近い将来, ロシアが建設の可能性
中国	田湾1, 2	1997年12月受注, 1999/2000年着工, 2007年5月/8月運開
	田湾3, 4	2011年9月, 2基建設契約が発効。2012年12月/2013年9月着工
インド	クダングラム1	2001年12月受注, 2002年着工, 2013年10月運開
	クダングラム2	2001年12月受注, 2002年着工, 2014年運開予定
	クダングラム3, 4	2007年, 建設覚書署名, 2014年頃着工の可能性
	クダングラム5, 6	2007年, 建設覚書署名
	ハリプール1~4	2009年, 建設確認(地元の反対運動強く, 流動的)
トルコ	アックユ1~4	2010年5月, BOO方式による政府間建設協定に署名, 1号機2016年着工予定
ベラルーシ	オストロベツ1, 2	2011年7月, 一括請負契約調印, 1号機2013年11月着工
バングラデシュ	ルプール1, 2	2011年11月, 建設協定に署名, 1号機2015年着工予定
ベトナム	ニントゥアン第1-1, 2	2009年12月受注, 2014年着工予定(遅延の可能性)
	ニントゥアン第1-3, 4	ロシア建設の可能性
ヨルダン	2基	2013年10月, 建設合意, 1号機は2020年運転目標
フィンランド	ハンヒキビ	2013年12月, 建設契約締結
ハンガリー	パクシュ5, 6	2014年1月, 建設契約に署名
カザフスタン	中小型炉	初号機のロシア建設が有力視

した(第4表)。ブシェールでは増設の可能性がある。

中国へは、1997年の建設契約に基づき、VVER-1000 2基を江蘇省連運港(田湾)に建設。2007年5月及び8月に運転開始した。田湾ではさらに2基を建設中である。

インドのクダングラム1, 2号機は2001年に受注, 1号機は2013年10月に運開した。2号機は今年中に運開予定である。クダングラムではさらに4基増設予定であり, ハリプールでの建設も確認された。

トルコのアックユ原発建設は、初のBOO(建設・所有・運転)方式であり、今後の原発輸出の一つの雛形として注目されている。

ごく最近では、仏、米・日、韓国企業などを負かし、ロシアがフィンランドのハンヒキビ原発(2013年12月)、ハンガリーのパクシュ原発5,6号機(2014年1月)の受注に成功した。ロシアが建設費の相当部分を融資している

ことも勝因の一つとなっている。

これらの国のほか、ベトナム、バングラデシュ、南アフリカ、ナミビア、チリ、モロッコ、エジプトなどの国々とも原発建設契約や原子力協力協定を締結するなど、積極的に働きかけを行っている。原発の新規導入国はほとんどが開発途上国であり、人材育成が極めて重要であるが、ロシアはその点でも、ロシア国内の大学や人材育成機関に年単位で多くの研修生を受け入れている。

IV. 燃料サイクルの完結目指す

国営企業ロスアトムが核燃料サイクル全体を運営し、原発同様に積極的に国際展開を図っている。

ロシアはウラン資源国でもあり、発見資源量では世界の約1割の65万トンUが埋蔵されている。国内のウラン生産量は3,500トンU程度であるが、カザフスタンで

第5表 ロシアの主な核燃料サイクル施設

ウラン濃縮工場(いずれも遠心分離法)				
事業者・施設名	所在地	tSWU/年	操業開始年など	
ウラル電気化学コンビナート	ノボウラルスク(旧スベルドロフスク 44)	10000	1949年(テイルU濃縮も)	
シベリア化学コンビナート	セベルスク(旧トムスク 7)	3000	1950年(回収U濃縮も)	
電気化学コンビナート	アンガルスク	3000	1950年(回収U濃縮も)	
電気化学プラント	ゼレノゴルスク(旧クラスノヤルスク 45)	8700	1964年(テイルU濃縮も)	
★ 1993年米ロ解体核高濃縮ウラン協定締結		20年間(1994～2013年), HEU500トンを低濃縮化して米に輸出		
燃料加工施設				
事業者・施設名	所在地	燃料の種類	tHM/年	操業年
機械建設工場	モスクワ州エレクトロスタリ	VVER,PWR	1800	1953年
		RBMK	460	1953年
		ペレット	1450	1953年
ノボシビルスク化学コンセントレート工場	ノボシビルスク州ノボシビルスク	VVER-1000	1200	1979年
		ペレット	660	1979年
生産合同マヤク:Paket 施設	チェリヤピンスク州アジョルスク	MOX	0.5	1986年
原子炉科学研究所(RIAR):ERC 施設	ウリヤノフスク州ディミトロフグラード	MOX 振動充填法	1	1981年
鉱業化学コンビナート(MCC)	クラスノヤルスク州ゼレズノゴルスク	MOX	60	2014年予定
再処理施設				
事業者・施設名	tHM/年	備考(操業開始年など)		
生産合同マヤク:RT-1	400	1971年～, 主にVVER-440, BN-600, 研究炉, 原子力砕氷船炉, 原潜炉。再処理回収ウランはRBMK燃料として利用。		
鉱業化学コンビナート(MCC):RT-2	800	1984年にVVER-1000用再処理工場として建設されたが1989年に建設中断。6000トンの湿式貯蔵プールが操業中。		
鉱業化学コンビナート(MCC):パイロット実証施設	100	VVER-1000用, 2016年操業予定。		

の採掘事業などを通じて2012年には7,600トンUを生産した。

ロシアは4ヶ所で濃縮工場を操業している(第5表)。小型遠心機を採用しているのが特徴で、合計能力は年間約24万トンSWU程度で、世界全体の3～4割を占める。以前はテネックスが管理運営していたが、最近はトゥベル(TVEL)の管理下にある。

2006年にプーチン大統領が提唱し、翌2007年に発足した国際ウラン濃縮センター(IUEC)は、アンガルスク濃縮工場に設置されている。現在、IUECの株式の保有割合は、TVEL70%、カザトンプロム10%、ウクライナ10%、アルメニア10%。

ロシアは現在のところ使用済み燃料の一部しか再処理していないが、2020年頃には大規模展開を考えている。

VVER-440の使用済み燃料は、マヤクの再処理工場RT-1(1971年操業開始)で再処理されているが、VVER-1000とRBMKの使用済み燃料は、再処理されずに、主に原子炉サイトに保管されている。RT-1は現

在、能力以下で操業しているようで、高レベルガラス固化体も製造・貯蔵されている。

ゼレズノゴルスクの鉱業化学コンビナート(MCC)の再処理工場RT-2は当初、VVER-1000の使用済み燃料用に1984年に建設開始されたが、1989年に建設が中断した。6,000トン容量の使用済み燃料貯蔵プールが稼働中で、既に満杯のためその貯蔵容量拡大や乾式貯蔵施設の併設が計画/実施中である。MCCでは、さらにVVER-1000燃料用の再処理実証プラント(PDC, 100tHM/年)が建設中であり、2016年には操業開始予定である。

著者紹介

小林雅治(こばやし・まさはる)

日本原子力産業協会

(専門分野/関心分野)世界・各国の原子力動向




 報告

CPD ノススメ

信頼される原子力技術者・研究者を目指して

 第3回(最終回) 日本原子力学会 CPD 制度のめざす姿
 — 検討状況と課題

 教育委員会 技術者教育小委員会 伊藤 晴夫
 (原子力安全推進協会)

われわれ原子力に携わるすべての技術者・研究者は、東京電力福島第一原子力発電所事故(以下、「1F 事故」)を防げなかったことの反省を踏まえ、世界最高水準の原子力安全の確保と、原子力への信頼回復に向け、弛まぬ努力を続けていく必要がある。このため、原子力技術者・研究者は、日々の研鑽に努めるとともに、こうした技術者・研究者の姿を、社会にアピールしていくことが必要であろう。前2回の連載で紹介した CPD 制度は、技術者・研究者個人の資質向上と共に、その努力している姿を「見える化」するためにも有効と考える。本稿では、技術者教育小委員会で2012年から取り組んできた原子力学会として目指すべき CPD のあり方に関する検討状況と課題について報告する。

1. はじめに

日本原子力学会では、2007年に会員の継続教育(CPD: Continuing Professional Development)活動の促進、定着を目指し、CPD登録システムを試験運用した。しかし残念なことに、広く会員間に定着させることはできず登録システムを停止せざるを得なかった。原子力学会教育委員会 技術者教育小委員会ではこの反省を踏まえつつ、更に、1F事故を契機に原子力技術者、研究者や原子力学会が置かれている環境等を考慮して、2012年度から会員が進めるべき自己研鑽としての CPD 制度について新たに検討を始めた。

本連載の第1回で日本工学会(原子力学会も参画している)から頂いた貴重なご意見、第2回で紹介した様々な学協会で進められている CPD を参考にして、第3回目となる本稿では原子力学会として CPD に再び取り組みようとする動機と共に“3.11 後の”原子力学会にふさわしい CPD 制度のあり方について、検討の現状を紹介すると共に、課題を提起する。

2. なぜ、今 CPD なのか

CPD とは、技術者・研究者が自らの技術力や研究力および倫理性向上のために自分の能力を継続的に磨く自己研鑽活動全般を指す。個々人が CPD に取り組むことにより様々な効果が期待できる。特に、過去に確立した

工学技術の確実な継承に加え、最新の技術や知見の吸収によって技術力が向上し、安全性の維持・継続的な向上に直接寄与できる点は重要である。

1F 事故の反省を踏まえて改正された新しい原子炉等規制法は、原子炉設置者に対し、施設の安全性について自ら評価し、継続的な安全性向上に取り組むことを求めている。このためには、事業者だけでなく、これをサポートするメーカ、妥当性を審査する規制者、更にそれを支援するアカデミアや研究機関の技術者・研究者が、継続的に技術力を向上させていくことが求められていると言えよう。一口に「原子力安全」と言ってもその範囲は非常に広く、原子力特有の核熱流動特性や放射線防護に関するものから、材料・物性、機械工学、電気工学、化学工学、1F 事故の引き金となった地震・津波等の観点からは、いわゆる地震工学、土木工学、建築工学等の広い分野が関わってくる。原子力に携わる技術者・研究者の役割・責任は大きく、総体として、これらの幅広い学際的な領域での最新知見の習得に努め、継続的に研鑽し、継続的な安全性向上につなげていくことが求められている。

1F 事故以降、原子力分野における人材育成の議論や活動が官民で活発になっている。しかし、これらの議論や活動に共通しているのは、新規の人材確保・育成に議論が集中していることであり、現役技術者・研究者の能力や資質の向上に着目、言及した例は少ない。

「人材育成を語る時、あなた自身の育成を考えていますか?」というのが、技術者教育小委員会の設定した Key Question である。すなわち、自分自身を育成する活動が CPD であり、わが国の原子力が岐路に立ち、ま

An Encouragement of CPD, Aspiring to Make Trustworthy Nuclear Engineers and Researchers (3); The New CPD for the Atomic Energy Society of Japan, Discussions and Challenges : Haruo ITO.

(2014年1月27日 受理)

た国際的な競争も激化している現在、より一層のCPDが望まれる状況にある。そのため、まず、技術者・研究者の一人ひとりが、自らの現状に満足することなく、CPDを通じて常に高みを目指していくという意識の普及・啓発を図ることが重要と考える。これが今回の連載を企画した動機である。

CPDには、実務を通じた研鑽に加えて、学協会の主催する各種講習会、シンポジウム等への参加、論文の発表、試験の受験、公的技術資格の取得等があり、それらの活動への参加を「自己研鑽のためのCPDプログラム」としてポイント化し、ポイントを積算することで自己研鑽の実績を「見える化」するのが、各CPDプログラムへのポイント付与・登録制度である。これで、自己研鑽の実績に定量性、透明性、客観性を与えることができ、更に資格制度への発展も期待できる。

3. 過去に試行したCPD登録システムを振り返る

(1) 過去の経緯

2002年、日本工学会のPDE(Professional Development of Engineers)協議会で、技術者CPDの重要性が議論され、原子力学会もこれに参加。学会内にCPD WGも結成され、2003年、第41回原子力総合シンポジウムで、「原子力という社会的に影響の大きな技術を取り扱うという観点から、過去に確立した技術を継承しかつ新しい技術の導入で安定運転に寄与する技術力を維持・向上するという目的を付加し、この継続教育に積極的に取り組む」ことを表明³⁾し、検討が続けられた。

2007年にはCPD登録システム導入が検討され、日本技術士会のCPD登録システムを流用した形で、2008年5月より会員の登録を開始した。5年間の試運用期間の後、本格運用に移行する計画であった。しかし、利用者数が極めて少なく、利用者数、登録件数の伸びも期待できそうにないことから、5年間の試運用期間を待たず、2009年にはCPD登録を中止せざるを得なかった。

(2) 反省点

2012年度に発足した技術者教育小委員会での問題を議論し、数々の反省点が挙げられた。以下は主なものである。

- ・学会がCPDに取り組む理念、必要性、重要性の啓発に十分な時間や、機会が取られず、またシステム運用方法が会員や会員組織に十分周知されない中で、登録システムの形だけが先行したのではないか。
- ・CPDポイント認定制度や資格制度を含め、会員がCPDに取り組むインセンティブが設けられなかったことも大きな要因ではないか。
- ・日本技術士会のCPD登録システムを有効活用したものの、プログラムの分類等が原子力学会に合ったものになっていなかったのではないか。

4. 原子力学会の目指す新たなCPD

以上のような反省や調査を踏まえ、原子力学会の新しいCPDのあり方の検討状況を主な課題との関連で以下に述べる。

(1) 明文化されたCPD目標の確立と学会員への啓発

日本原子力学会 倫理規程⁴⁾には、原子力技術者・研究者のあるべき姿や必修能力、自己研鑽の重要性を述べた項目が少なくない。倫理規程の主旨を適切に抽出し、原子力学会としてのCPD目標を定めることがまず重要である。その上で、CPDのあるべき姿と実践のための具体的内容を解説したガイドラインを作成し、会員の理解を得られる形にしていく必要がある。そして、CPDの重要性について学会全体としての認識、学会員の理解、意識を醸成していくことが最初の重要な課題であり、一定の時間が必要と言えよう。

(3) CPDプログラムとリソース提供サービス

原子力学会が主催・共催する大会、研究会、講演会、セミナーは多数企画されており、メールサービスにより会員に情報提供されている。これは個々の会員がCPDを計画・実行するために極めて有用である。さらに、CPDを意識したポータルサイトを設ければ、会員が、これらのCPD情報にアクセスすることも、自らのCPDを体系的に構築していくことも容易となる。ポータルサイトからのリンクを、原子力学会だけでなく、関連学会(保健物理学会、機械学会等)、原子力安全推進協会、日本技術士会、日本工学会等やその他の研修サービスにも広げれば、会員にとって、より利便性が高く実効的なCPD構築につながるであろう。原子力人材育成ネットワークの構築するDBとの連携も有望であり、学協会、大学他が発行するCPDに有用な各種教科書や参考書の情報も、提供されることが望ましい。

(4) CPD登録システムの仕組みと態様

過去の運用においては、日本技術士会のシステムを全面流用したが、このシステムはCPD課題として一般共通課題(倫理、環境、安全、社会動向、国際交流等)及び技術課題(専門分野、科学技術動向、関係法令、事故事例等)をバランスよく登録できるものの、多岐にわたる原子力の専門分野を分類して登録することができなかった。このため、CPD課題項目、形態区分のうち専門分野の内容を原子力学会員向けに最適化することが必要である。これによりバランスの取れたCPDとより専門を進化できるCPDが可能となる。ただし、システム構築のために必要なリソースとのバランスを考慮する必要がある。

構築後の管理・運営も、システムの成否を握る重要事項であり、CPDの登録や認定等のシステム管理及び保守等のために発生する相応の業務量への対処方法が課題である。

CPDポイント算出方法は、CPD登録システムの値打

ちを決めると言って過言ではなく、算出方法の決定は慎重に行う必要がある。従事時間を単位としてCPDの種類に応じた重みづけが行われる場合が多いが、資格との連携、原子力にとって世の中から特に求められる安全性向上、リスクコミュニケーションや社会貢献活動に資するCPDをどうポイントとして評価するか等が課題である。

(5) CPD実績とリンクした資格制度等の創設

もっとも直接的、簡明な資格制度としては、CPD(総合)ポイントがあるレベルを超えた会員を「CPD認定会員(仮称)」として認定(認定書等を発行)する方式がある。日本技術士会は、この制度を運用している。原子力学会の場合には、これを認定技術者・研究者として位置づけ、学会内活動での資格運用を検討するほか、会員HPで公表することが考えられよう。会員にとって、これは自己研鑽の証であり、社会にもアピールできる。ただし、CPD登録審査ないし監査の仕組みを設けてポイントの信頼性を確保することも必要となろう。

将来、賛助会員等の原子力関連機関・企業において、組織内でのキャリアパス、人事考課等にCPDポイントが有効活用されるようになれば、会員の自己研鑽や専門能力向上のインセンティブがより高まることが期待される。

さらに、CPDの内容に応じて、原子力学会として、「リスクコミュニケーション」、「安全性向上活動推進リーダー」のような資格が創設できれば、CPDへのインセンティブばかりでなく、継続的安全性向上や信頼回復の面からも望ましい制度となろう。ただし、これらには、専門性の観点や関連諸機関との注意深い議論が必要である。

また、今後ますます必要とされる国際エンジニア資格の付与条件として、学会CPDを活用することが考えられる。日本技術士会はCPDポイントをベースとして、APECエンジニア^aおよびIPEA国際エンジニア^bとの相互認証する制度を設けており、原子力学会にとっても将来的課題と言えよう。

(6) 資格以外のCPDインセンティブ

会員への直接的なインセンティブとしては、「春の年会」、「秋の大会」への参加費用の減免や年会費の減免が考えられる。しかし、これには財源が必要であり、セミナー等のCPDプログラムに対する参加費用徴収等を含

^a APEC (Asia-Pacific Economic Cooperation) エンジニア相互承認プロジェクトに基づき、いずれかの加盟国において資格登録を受けた技術者は技術能力が実質的に同等であるとして、APEC加盟国間で相互承認証明された国際エンジニア資格。

^b 15ヶ国の民間技術者団体間で合意されたIPEA (International Professional Engineers Agreement) 協定に基づき資格登録を受けた技術者は、加盟エコノミー間で技術能力が実質的に同等であるとして相互承認証明された国際エンジニア資格。IPEA協定の旧名からEMF (Engineers Mobility Forum) エンジニアとも呼ばれる。

め、検討が必要である。

新規制に盛り込まれた「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用」において、国内外の最新の技術的知見を取り入れることが求められ、安全性向上に資する教育・訓練等を報告することとなっている。CPDポイントを利用すれば、これらに対する努力を定量的にアピールすることもできよう。

(7) リソース

CPDを本格的に運用し効果を上げるためには、原子力学会としてそれなりの覚悟と長期の見通しが必要である。賛助会員から資金援助をお願いする案もあるが、原子力人材育成に関する政府の競争的資金を活用すること等も検討が必要と考える。

5. おわりに

以上、最終的に原子力学会CPD制度によって、「原子力技術者・研究者の一人ひとりが、自己研鑽にいそんでいる姿が見える」ようにするために解決が必要な課題を中心に、検討状況を述べた。従来試行したシステムの方向性に間違いがあったわけではなく、失敗の原因は具体性の詰めや啓発のための時間が不足していたことと考えられる。従って、これを再構築するためには、関係者各位が新たな認識のもとに、予算措置等も含め、情熱と覚悟をもって取り組むことが肝要である。まずはCPDの重要性に関する意識付け、啓発活動を十分に行いつつ、世界最高水準の原子力安全の確保、原子力への信頼回復に結び付く制度構築に向け着実に進んでいきたい。

— 参考資料 —

- 1) 橋谷元由, CPD ノススメ 信頼される“3.11 後の”原子力技術者・研究者を目指して 第1回 技術者のCPDを支援する学協会のあり方, 日本原子力学会誌, 56 [3], (2014).
- 2) 尾崎 章, CPD ノススメ 信頼される“3.11 後の”原子力技術者・研究者を目指して 第2回 様々な学協会が進めるCPD, 日本原子力学会誌, 56 [4], (2014).
- 3) 宮澤, 「原子力分野における技術者継続教育」, 第41回原子力総合シンポジウム予稿, pp.91-92, 2003.
- 4) 日本原子力学会 倫理規程
http://www.aesj.or.jp/ethics/02_/02_01_/

著者紹介



伊藤 晴夫 (いとう・はるお)

原子力安全推進協会,
(学会)教育委員会 技術者教育小委員会
(関心分野)計測制御, 設備診断技術, OE
情報分析評価

新刊紹介

放射線計測ハンドブック 第4版

Glenn F. Knoll 著, 神野郁夫, 木村逸郎, 阪井英次
訳, 868p. (2013.9), オーム社.
(定価 29,400 円) ISBN978-4-274-21449-3

本書は、米国ミシガン大学名誉教授が書かれた著書
“Radiation Detection and Measurement 4th Edition”の邦訳
である。邦訳の初版は1982年に発行され、約10年毎に改版
を重ね第4版に至っている。本書(第4版)は、近年の技術の
進展に伴う、新しい検出器やデジタル技術など、大幅に加筆
されている。

本書は20の章からなり、第1章から4章には放射線の性
質や統計、放射線検出器の一般的性質などの基礎的な事項が
書かれている。第5章から19章には電離箱、比例計数管、
GM計数管、シンチレーション検出器、半導体検出器、中性
子検出器など一般的に用いることが多く基本的な放射線検出
器について、動作原理、検出器が出力するパルス信号波形、
波形整形法などが書かれている。第20章にはバックグラ
ンドの起源や低減方法、検出器の遮蔽について書かれている。

本書は2つの使い方を意図している。一つは、大学3年か
ら大学院1年の放射線計測の教科書として、もう一つは、現
場で放射線計測を行う科学者や技術者が検出器技術の知識を

得る文献としての用途である。

放射線計測の特徴はランダムな現象を扱うことである。たとえば、放射線計測装置の性能を示すときに用いられる検出効率やエネルギー分解能は、検出器の動作原理、信号処理方法、時定数などによるが、定量的に議論するためには、放射線と検出器との相互作用、不感時間のモデル、2つのパルスの時間間隔のような統計的な振る舞いの理解が不可欠である。これらについては、第2章から4章に図表や式を用いて基本的な事柄から結論に至るまでの過程が丁寧に説明されており、数学の教科書などを読まなくても理解できる。第4章までを理解していれば、あとは放射線計測の目的に合った放射線検出器や信号処理手法を第5章以降から選択すれば良い。本書があれば、一般的な放射線計測装置を構築するのに十分である。

最後に、「放射線計測ハンドブック」は、放射線計測に関する名著であり、広く知られている文献である。特に第4版は多くの加筆がなされ、新しい技術も含まれている。私にとって手元に置いておきたい1冊である。

(東芝電力検査サービス株式会社・小野寺 徹)



短信

熱流動部会が若手研究者で交流フォーラム

原子力学会の熱流動部会は昨年9月5～6日の2日間、八戸市内で「若手交流フォーラム」を開催しました。この会合は、次代を担う若手研究者間の情報交換を目的としたものです。9名の学生と大学やメーカー、研究機関から11名が参加し、初日には最新の研究成果に関するポスター発表と議論を行い、2日目に東北電力の八戸火力発電所と八戸太陽光発電所を見学しました。

ポスター発表は盛況で、若手だけを集めたことで参加者の遠慮がなくなり、現在行っている研究の課題点、研究経緯の詳細など、かなり深く突っ込んだ議論が行われました。また、研究室・大学・職場の雰囲気などに関しても意見交換が行われ、参加者にとって有意義な時間となりました。翌日の火力発電所等の見学会では、廃止した4号機の部品のカットモデルや発電効率55%を予定しているコンバインドサイクルの建設現場、実際の制御室やメガソーラーを見学しました。実物のタービンの大きさや発電所施設の中身、最新式の制御端末や太陽光発電による発電量の変動の激しさなどを体感できたことは、貴重で新鮮な経験だったと感じています。工学に携わる者は、実際のモノを見て触って感じなければいけないと再認識できました。

なお熱流動部会は、このフォーラムを取り仕切る若手研究者のみで構成された「若手交流WG」を立ち上げており、第2回以降のフォーラム内容について検討を進めています。

(東北大学・江原真司)