

巻頭インタビュー

1 「もんじゅ」から「はやぶさ」までを語りつくす!

原子力と関わることになったきっかけ、そして民主党政権となり原子力政策に取り組む当事者となつてからのこれまでと、これからについて聞いた。

川端達夫
文科相に聞く

聞き手 小林容子



解説

39 高速炉熱流動・安全評価ロードマップの概要と今後の活用に向けて

「高速炉熱流動・安全評価」特別専門委では、熱流動・安全評価ロードマップを中心に報告書をまとめた。同報告書に基づき国際標準を目指す日本型高速炉技術開発の目標、課題および大学の役割を解説する。

「高速炉熱流動・安全評価」特別専門委員会

44 気候変動問題解決の切り札として、原子力をどう位置付けるか? —炭素価格で市場にシグナルを

原子力や再生可能エネルギーの普及には炭素価格を導入し、市場にシグナルを送ることが最も効果的である。

鈴木達治郎

48 地球温暖化対策の方向性と原子力発電の役割—持続的な温暖化対策の取り組みに向けて

環境と経済が両立し、持続的に温暖化防止に取り組むためには、どのような方向をめざせばよいのか。定量的な分析事例をふまえて、そのあるべき姿を示す。

秋元圭吾

時論

7 小学校において原子力・放射線教育は可能か

広島・長崎の平和教育と共に原子力・放射線教育を小学校で必須にできないだろうか。

杉山憲一郎

9 原子力政策大綱見直しへの視点 原子力政策円卓会議2010の討議をふまえて

私たちは「原子力政策円卓会議2010」というボランティアな結社を組織した。

吉岡 斉

解説

22 世界の高速炉サイクル技術開発の動向(第3回/最終回) —革新的なナトリウム冷却高速炉サイクル技術と開発課題

3回の連載最後となる今回は、ナトリウム冷却高速炉サイクルに関わる革新技術に焦点をあて、原子炉やその周辺で採用が検討されている新技術、シミュレーションや核燃料サイクル技術開発の最前線と今後の展望、開発課題について述べる。

山口 彰, 柳澤 務, 森山裕丈

34 「もんじゅ」運転再開 臨界達成と炉心特性把握 —炉心確認試験報告

「もんじゅ」は、14年5ヶ月ぶりに運転を再開し、安全に、炉心確認試験を終了した。また、長期間の原子炉停止によりアメリカシウム241を多く含む炉心において、世界でも数少ない貴重な炉物理データを取得した。

宇佐美 晋



お知らせ

21 日本原子力学会の新法人移行への取り組み 理事会、総務財務委員会

表紙の絵 「マルシェ・ムフタル」 藤田征芳

第41回「日展」へ出展された作品を掲載いたします。(表紙装丁は鈴木 新氏)

パリ市内のマルシェ(露店・朝市)も郊外の大型スーパーマーケットに押されざみだが、パリ五区ムフタル通りのマルシェには、色どり豊かで新鮮な野菜や果物がいっぱい、幾度も訪ねて描かせてもらっている。

解説

53 ナチュラルアナログ；自然に学ぶ地層処分—数万年先を予測する工学技術とは？(第3回)

前回までに解説した、ナチュラルアナログの最前線の知見を、地層処分の工学技術としてどのように適用していこうとしているのかを解説する。

北山一美, 佐藤 努, 吉田英一

59 原子力人材は海外展開で活性化を図る—原子力人材育成関係者協議会定量分析WG分析結果

原子力技術者の育成の問題点を、定量的なトレンドデータに基づいて分析するとともに、将来のニーズを踏まえて課題を整理した。原子力産業の発展を図るには、人材育成面においても十分な対策を講じる必要がある。 氏田博士

連載講座 実験炉物理:未来へのメッセージ 次世代の安全基盤の確立に向けて(3)

69 実機炉心における実験炉物理手法開発

PWRの実機における炉物理検査は、取替炉心設計の妥当性や安全性パラメータ、原子炉の各種計測装置の校正などを確認するものである。この手法のこれまでの経緯と今後の動向を紹介する。 島津洋一郎

連載講座 ICRP 新勧告—新しい放射線防護の考え方と基準(7)

74 現存被ばく状況

ICRP 2007年勧告は放射線防護のアプローチを、計画被ばく、緊急時被ばく、現存被ばくの3つに分類した上で、防護システムを整理した。このうち今回は、現存被ばくについて解説する。 飯本武志

ATOMOS Special 世界の原子力事情(10) アジア編

65 ベトナムの原子力事情

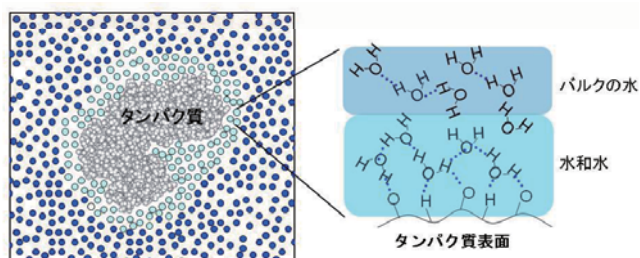
ベトナムは2030年までに、14基の原子炉を建設する計画だ。 酒井利明

活動報告

79 「地球温暖化問題と原子力の役割」 関東・甲越支部講演会 Atoms for Future 清水直孝

11 NEWS

- 経産省の原子力関連の概算要求は9.7%増
- もんじゅの炉心確認試験が終了
- 「国際原子力開発」設立にむけ準備室
- 保安院、島根1, 2号機に厳しい評定
- 原燃、熔融炉異常で最終報告
- タンパク質の生命機能発現に水が重要な役割
- PET 診断用薬剤で微小ガンも鮮明に画像化
- 海外ニュース



タンパク質を覆う水の分子はネットワークを形成し、その生命機能発現に重要な役割を果たしている。(News p.13)

談話室

80 ニュージーランドの暮らしと語学 ブラッシュアップ(その1)

—クライストチャーチの3ヶ月

松田美夜子

Relay Essay ドナウ川の畔から(5)

82 自転車先進都市ウィーン 柏村元一

ジャーナリストの視点

83 溝はなぜ埋まらない 横川浩士

6 From Editors

84 「2011年春の年会」研究発表応募・参加事前登録のご案内

85 編集委員会からのお知らせ

86 会報 原子力関係会議案内、人事公募、英文論文誌 (Vol.47, No. 10) 目次、主要会務、編集後記

WEB WEBアンケート

学会誌記事 WEB アンケートシステムが復旧しました。記事の評価をお願いします。

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

学会誌ホームページはこちら

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

INTERVIEW

「もんじゅ」から「はやぶさ」までを語りつくす！

文部科学大臣
内閣府特命担当大臣(科学技術政策)
衆議院議員 川端 達夫氏に聞く

原爆忌の午後。大臣室。

公務から足早に戻って来た大臣が、はやぶさとイトカワの模型に歩み寄る。私達取材陣が大臣を囲む。30 cm 位のイトカワの模型に、米粒大のはやぶさが張り付いて羽を休めている。

川端大臣が静かに語り始めた。

「このはやぶさが幾多のトラブルを乗り越えて7年間の宇宙の旅を終えようと、地球大気圏近くまで戻って来ました。そして、お父さん(はやぶさ)は大気圏突入時に、“ここからはお前だけ行け。おれは使命を終えた。ここで燃え尽きる”。そう言ってカプセルを切り離した

のです……回収されたカプセルには切り離したコードが、あたかも“へその緒”のように残っていました。まるで血の通ったような話です。このような物語に感動したのは日本だけではありません。世界が共有したのです。」



聞き手 小林容子(本誌編集委員)

学生時代、研究テーマなど

小林(聞き手) お忙しいところ今日はありがとうございます。早速ですが、大臣は理系出身とのことですが、京都大学の学生時代の研究テーマはどのようなものだったのでしょうか？ また学部・院を通じた思い出などを。

川端大臣 ボクは工学部で化学工学を学びました。物質 A と B を反応させて新しい物質 C を発見するのは、理学部の化学なのです。化学工学は、分かりやすく言えば、こういう条件でやるとたくさん出来るというところが重要です。理学部の化学がピーカーレベルだとすれば、工学の化学ではタンク規模以上での製造が見込まれないといけません。つまり、化学工業に結びつくような規模です。

—そもそも化学に関心を持たれたきっかけは。

もともと実家が薬局だったのです。私が育った昭和20

年代、30年代は、日本は戦後でまだ大変な頃だった。実家の商売の景品にゴム風船をおもちゃに与えていたのですが、これが喜ばれた時代です。その頃、父親が薬局で亜鉛の破片に塩酸をかけて水素を作り、風船に詰めると浮かんで飛んでいく。これはボクにとっては魔法に映ったのです。

中学生になった春休みに急性腎炎にかかり、病気の経過を見るために父親がボクのオシッコを毎日採ってどの程度タンパク質が尿に含まれているか検査をしてくれた。試薬を入れるとタンパクが沈殿するのが面白くて、自分でやるようになった。この検査は結構正確で、医者の方のおりにしていると3,4日でタンパクが減ってきた。そこで油断すると、今度は増えたりしてこれはいかんと……そういう環境で育ったので、割と自然に化学になじんで好きになっていったのです。

—そうなんですか。それで学部の時はどのようなことを。

4年の時は乾燥工学をやりました。多孔質物質の乾燥



過程における熱と物質の同時移動の分析です。例えば、湿らせたレンガの上から風を吹かせて、その乾燥過程を分析していました。ところが大学紛争が激しさを増していき、キャンパスは混乱状態に陥りました。

—大学紛争の真っ直中だったのですね。

京都大学では、学部から大学院への進学に際し、別の研究室を選ぶのが慣しでした。ボクの場合7つの講座が選択肢にあった。そのうちのひとつが宇治市にあったのです。吉田キャンパスの混乱から離れて、静かな中で研究できると期待し、宇治キャンパスにあった原子核化学工学の研究室を選んだのです。そこは、学問というよりはむしろエンジニアリングの世界でした。

大学院でも化学工学の研究をしました。化学工学では化学工業で必要とされる装置や操作の研究が主になります。ボクのテーマは、多段式交流抽出機の最適化でした。例えば、低濃度の物質を99.999%に濃縮しないとけないときに、カラムの入口に原料を放り込めば、濃縮された物質が出口から得られる。条件をいろいろ与えて、最も良い結果を得るための設計研究です。

—実験漬けだったのでしょうか？

もちろん実験も必要ですが、ボク自身がやっていた設計システムの研究開発はむしろコンピュータを駆使した計算工学です。

—それは意外ですね。

当時、通産省が情報処理技術者の資格試験を創設しました。ボクはその第1号の資格取得者なんですよ。

—そうなんですか。種別は。

確か第2種の資格を持っています。言語としてはFORTRANを主に使っていました。当時はカードに穴をあける方式でした。カードで1枚に1行コーディングします。一箱で2,000枚入りしました。これを何十箱も計算センターに渡して結果を待ちます。それがねえ、苦勞してプログラムしたのに、エラーで瞬時に終わりなんて

ことがしばしばでした。テープも使っていました。テープをコンピュータにロードする時は、こう目を瞑ってね、お願いだから通ってくれ！と念じていました。

—大学院生の生活はどのような感じで。

研究所のすぐ外の溝にフェンスがあり、それを跨げば敷地外です。そんな間近に下宿し、学食で朝昼晩食べて、夜中の12時頃まで研究してフェンスを跨げばすぐに寝ているという生活の繰り返しです。そして、逃れて来たはずだった学生運動もじわじわと宇治にも波及してきました。

会社時代

—大学院修了後に東レにお勤めされましたが、その時はどのような仕事/研究に従事されたのでしょうか？

私は滋賀のエンジニアリング研究所に勤務し開発研究に従事しました。新素材の開発と工業化です。東レ時代に2つのことに取り組みました。

ひとつは炭素繊維、つまりカーボンファイバーの基礎研究です。当時、化学繊維を高温で処理することにより炭素の繊維ができそうだという事は分かっていましたが、焼いた結果、うまく繊維になる物質を見つけ出し、千度程度に温度を上げて安定して連続的に製造するにはどうすればいいかなどに取り組みました。2年ほど経ったらなんとか連続的にできる目処が出た。ちょうどその頃に、愛媛に新しい試験生産設備を作ったので、炭素繊維のチームが移って行ったのです。ボクはといえば、滋賀に残って研究テーマが逆浸透膜の開発に変わりました。水処理の分野です。当時は逆浸透膜のようなものが世の中にあるということだけは分かっていましたが、人工的に作れるようなものではなかったのです。開発研究では、まず装置を作ることから始めました。少人数のチームでしたが、なかなかうまく行かなくて随分苦勞しました。

—そうこうしているうち、やがて逆浸透膜もなんとかものになる見通しが出て来た。丁度そのころにボクは会社をやめる方向に向かっていった。政治の世界に関わるようになってきたのです。

—政治の世界へのきっかけは。

逆浸透膜の開発研究をやっていた頃に、会社で労組の役員の順番が回ってきたのです。その頃たまたま滋賀県知事選があった。その知事選には現職の知事が三選を目指し立候補をするのですが、金権体質との批判があった。そこで、その金権政治を打ち破るため、武村正義さんが知事選にでるといので、選挙の際、ビラまきをやりました。現職の知事と比べ、武村さんは権力も金もなかったのに、結果的に知事選に勝った。周囲から凄いことがおこったといわれました。ボクは、これは化学反応のように面白いと思ったのです。

—そういうことだったのですね。物質の化学反応から社会の化学反応へと。

ここに携帯電話がありますね(とポケットから取り出す)。ボクの手を離れた瞬間に落ちますね。そうするとこういう風に机でバウンドして止まる……この過程は決まっていますね。会社のエンジニアリングではそんなことを競っていた。そんな時に、政治の世界は全く違うことを知りました。極端なことが起る。この携帯電話が手を離れたら、上に飛んでいくとか。自然科学の世界では真実の一つと決まっていますね。しかし政治では、全然違うことで世の中が決まっています。そこに政治の面白みや大切さもあり、それをやらなければいけないという使命感のようなものを感じるようになっていったのです。



—いまや東レのカーボンファイバーや逆浸透膜は現実のものになっていますね。

そうですね。政治に関わる以前はある願望がありました。それは将来、テレビで東レが製品を宣伝しているときに、これはな、お父さんが開発したんだよと子供たちに自慢したいと。研究へのこだわりもあったし、自分の成果が社会の役に立っている現場にいたかった。ところが、全然違う方へ行ってしまった。不思議な感じではありますね。

エネルギー政策、原子力政策

—国会議員になられて、どのようにエネルギー政策に関わりをもたれてきましたか。その時の方向性(理念)や苦勞なされた点などは?原子力エネルギーに対する考え方も含めてお願いします。

政治に関与するようになって、ちょうど24年前に民社党から国政に出ました。この党は結党以来、自民党に替わる政党になるという使命感をもって。イデオロギー先行ではなく、責任ある政策を実施しなければならぬと。

基本は安全保障なのですね。軍事的な安全保障はもちろんですが、エネルギーと食糧の安全保障もとても大事

です。ボクの出身地の滋賀の隣は福井です。大学院で原子力に関係する研究をした。そんなこともあって、民主党のエネルギー政策調査会長に就きました。政党が出来た頃は原子力には慎重にという人もいました。そんななかで、ボクと枝野さんと岡田さんとでまとめて、原子力は過渡的に重要なエネルギー源と位置づけたのが最初でした。なんとなく本流ではないというイメージだったのです。そこから、3年かかって、党のネクストキャビネットで、“日本における原子力発電及びプルサーマル発電に就いては、(中略)……原子力政策を着実に推進する。”(2006年9月6日)と明言しました。過渡的という言葉はなくなり、原子力がきちんと位置づけられるようになったのです。さらにこれをもとに、私が会長をしていたエネルギー政策調査会において、エネルギー政策の中で改めて原子力を位置づけました。今日、広島で原爆の平和祈念式典がありました。ここに2007年に民主党がまとめた原子力政策の文言があります(とコピーを手にとって)。“日本が唯一の被爆国として、核不拡散に資する原子力の平和利用に積極的に貢献することは、国際的な責務である。安全と透明性を前提とした原子力政策を進めるとともに、使用済燃料等の最終処分については、国の責任を明確にして取り組むべきである。”(2007年5月23日)ということ。要するに、もう原子力が基幹エネルギーであるということ。ここに一番苦勞しました。

軍事的安全保障と食糧およびエネルギー安全保障は政権が変わっても、国民に決して不安を与えてはならないと思います。その点では、ボクたち民主党政権で着実にやって来れたと思います。

—昨年選挙時の民主党のマニフェストでの原子力に関する記述と比較し、今年になってから、つまり、大臣が科学技術も担当されるようになってから、随分と原子力に積極的になっています。ここは大臣の意向がかなり効果をもっているということでしょうか?例えば、最近では国際展開ということで閣僚がインドやベトナムに出向いておられます。

基本的にいま申し上げた位置づけがベースになって、マニフェストに反映されているので、ボクになって加速したという訳でもないですね。一方、民主党政権になり、我が国の技術を世界に発信していくことに力を入れており、原子力技術についても政府を上げて海外への売り込みに取り組んでいます。

「もんじゅ」再開

—実際に原子力政策を担当されて、特に印象に残っていることは?

それは「もんじゅ」の再開ですね。14年半の間、地元の方々のご苦勞は並大抵のものではありませんでした。「も

んじゅ」の再開は、本当にそれを取り巻く皆さんの努力と熱意の成果だと思います。この再開という節目にその担当の任にあったことは本当に嬉しかった。鳩山総理が辞任して、6月上旬に一度内閣が総辞職した際に、自分は大員として何をやったのかと振り返ったときに、一番に思い出したのは、教育関係については高校無償化の実現であり、科学技術関係ではなんとといっても「もんじゅ」の再開でした。

一高速増殖炉開発について大臣のお考えは？

やはり、資源の少ない我が国は長期的なエネルギーの安定供給を確保しなければなりません。また同時に、地球環境問題に対し大きな貢献をする技術ですから、しっかり取り組んでいく必要があると思っています。一時は、世界で高速増殖炉開発をやめるという状況の時もありましたが、最近では諸外国でも研究が進められています。つい最近、隣の中国でも実験炉が臨界を達成しましたね。そのようななかで、我が国の「もんじゅ」は非常に大きな技術的アドバンテージであると考えています。また、非核兵器国で高速増殖炉を含めて核燃料サイクル技術全般の平和利用ができるのは現在のところ日本だけです。これを自らストップするのは、我が国のエネルギーセキュリティの観点からも問題があると考えています。ただ、14年間休止していたというダメージはいろいろな意味であったと思います。その回復に努めていかねばならないと思っています。

はやぶさ

一世の中では「はやぶさ」の奇跡的帰還に沸き、日本はやはり科学技術だという論調が盛り上がっています。科学技術への投資のあり方についてのお考えをお聞かせ下さい。

昨年秋、ある会合に出たら、局長が緊急に説明



に来られて、「はやぶさのエンジンが全部止まりました」といわれてね。もうこれはアウトじゃないかと……しかしエンジンの部品を組み合わせるにより復活した。まるで「はやぶさ」という生きている人がいて、最後の力を振り絞ったように奇蹟が起きたとしか思えない。もう人か神様のようになっていますよ。「お父さんは燃え尽きるから、息子よお前は行け」などとドラマチックな話ですよ。

科学技術の世界は、もっと速く移動したいとか、癌を直したいとかいう実利的な成果がいっぱいあるものです。実利性は科学技術のひとつの大きな役割です。それと同時に、なにか不思議な現象に出会ってなぜだろうと考えること。宇宙の果てはどうなっているのだろう。そこを見てみたい、行ってみたいと夢をはせること。これも科学技術のなせる技です。それがなにか役に立つのかと言われたら、役に立たないかもしれない。しかし、お金では買えないもっと大きなものを与えてくれるのは間違いありません。

昨日、総理が予算委員会で「学問は遊びだ」と仰っていた。夢があって、疑似体験できるようなことがあって、なにかを見極めたいということが一番根本にあるんです。そのような願望が科学技術の発展を促すのではないのでしょうか。まだ、イトカワの物質が捕集されたかどうか分かっていませんが、はやぶさは夢を与えてくれました。直接的に役に立つという以外のことが、どれだけ多くの人に夢と希望を与えていることか。こんなのは計算できない価値がある。こういうことも国の底力だと思います。具体的にすぐに経済効果が出ないというところに、実は科学技術の奥深さや価値があると思います。

でも夢や希望だけでもない。すでにイオンエンジンや制御技術が大変注目されています。今後いろんなことに役立つ技術が育ってきたのです。

一夢や希望はもちろん、宇宙は先端技術を育む場所でもあるわけですね。

はやぶさも、もちろん人々に夢や希望を与えただけではなく、既にイオンエンジンや制御技術が大変注目されています。先ほど申し上げた「何かを見極める」という願望を追求することにより、様々な工夫や技術開発が促され、結果として今後いろんなことに役立つ先端技術が育ってきているのです。

スペースシャトルなどに比べれば、はやぶさのコストはものすごく少ない。日本には宇宙ステーションに物資を補給できるHTVもあり、予算の割には宇宙関連技術のレベルは非常に高い。

また、面白いことにこうした先端技術の中には日本の伝統文化を応用しているものもあります。例えば、いま注目されているイカロスですが、この帆の折りたたみには日本の折り紙の技が応用されている。この帆は地上では直径1.6mなのに、宇宙空間にパッと花開いた帆は14

m 四方にまで広がり、これが太陽風を受けて反作用で動く。ここにも新しい夢と希望がある。また、人工衛星の太陽電池パネルを宇宙で広げるのにも、「みうら折り」という折り紙の技を基に開発した技術が使われています。これを応用した道路地図もありますが、こんな風になると凄いです。ひとつの操作でパッと綺麗に開く。折り目の形は平行四辺形なんです。そして折り目が少しずつずれてくる。ここには日本の折り紙の技が活かされています。折り紙を外国の人に教えると、この端っこをぴたっと合わせるということができないんですよ。日本人というのは独特の素晴らしい能力を持っています。日本人らしいものや方法、文化がいっぱいある。これを先端技術に活かしていくということは非常に面白いことだと思います。国際的な会議のときに、会議資料を正方形に折ってツルを折ると、一気に日本人のステイタスが上がるかもしれない。(笑)

教育について

—日本はエネルギー地下資源小国です。次世代を担う児童・生徒(小中高生)へのエネルギーや原子力教育についてお考えを。

いろいろな地域のイベントなどでボクも見聞しましたが、子供たちも環境問題に興味を持っていますね。エネルギーも車のガソリンとか電気とかいろんな種類があります。手でハンドルを回すと豆球が点くとか、太陽電池で電気が点く。子供の関心は深いし、実験も好きですね。したがって、子供にいろいろ体験させて興味を持ってもらうということが重要と考えます。その場合、実験は自分の手でやらないとだめですね。何人かのチームでもいいのですが、先生が一人でやって生徒に見せるだけでは効果が薄い。しかし、例えば6人で1チーム作って実験をしようとする、その準備、指導、片付まで全部やるとなかなか大変です。特に理科が得意でない先生は実験を敬遠するという傾向がある。そこで、実験の補助をしてくれる人などのバックアップ体制を考えて学校で取り入れています。

理科で、実験は面白いですか好きですかと聞くと、子供の頃はその比率が高い。ところがだんだん減ってきます。これは入試のあり方が関係していると思います。例えば、大学入試で実験はやりません。入試は知識、つまり座学止まりです。実験が面白いということが、試験につながらないので廃れる。

例えば、音楽を聴いていいなあと思うから、もっと聴こうとなる。そういうところは、音楽も舞台も理科も同じです。音楽の才能を評価するのに、音符の名称がなにかってことはあんまり関係ない。英語もそうでしょう。いくら知識があっても会話が出来ないとなかなか難しいということもある。

理科の話に戻せば、面白いな不思議だなんてことが将来につながるように、できるだけ低学年の頃から、エネルギーのことも含めて、面白い、不思議ってことに触れ合うようにしていきたいものです。

—中学校で放射線の教育が30年ぶりに復活しました。

現代の医療現場では、放射線の高度な利用技術の恩恵にあずかっています。放射線のことを教育現場でもっと伝えていく必要はある。医療以外でも、ボクたちの身近な生活に放射線は活かされている。例えば、水泳のビート板とか車の車内各所に使われているフォーム素材の形成に放射線が利用されている話などは、意外に知られていないと思う。(学会の作成したクリアファイルをみながら)いろいろな形で情報発信していくことが重要と考えます。

最後に

—日本原子力学会へ一言頂けますでしょうか？

ボクが受験した頃、京大工学部は全部学科別の入試だったのですよ。東大の何類という大きな括りではない。学科毎に別々に志願者を募って、倍率出して試験がされる。そういうきめ細やかさがあつた。当時は、電子、原子核、航空、建築あたりが難関で、化学工学は中から下ぐらいでした。原子核の最低点でも、化学工学なら上位です。そういう時代に原子力を修めた人達が大体定年を迎えている。それが現在の状況ですね。当時、自分はどこを受けるかっていうのは、リスクを考えながら慎重に決めました。きめ細やかさがあつて、ボクたちには自然に決意のようなものが芽生えました。今は〇〇系とい



う大振りな分類での募集になっていて、その決意のようなものは薄れているかも知れません。

とにかく当時、45年くらい前ですが、原子力工学科はレベルが一番高かった。そして、20年くらい前に、原子力はもうやめると各大学が一斉に看板を下ろしはじめた。そしてここへ来て、一旦やめた大学がようやく戻ってくるようになった。大変良かったと思います。ただ、過去20年以上の退潮のなかで、原子力の技術者の知識の蓄積や継承が難しくなった状況はまだまだ回復の途上だと思います。

「もんじゅ」にしても、再稼働はしましたが、この先を支えていく人材がどうかということが大きい。原子という名前が学科や専攻に戻ってきたのは本当にありがたいことです。しかし、まだまだの感は否めません。人材育成は今後ますます重要になります。産官学が連携を密にとり、人材育成に邁進して頂きたいと考えていますし、その中核として原子力学会の役割は大きいと期待してい

ます。

原子力の世界展開もあり、日本の技術は世界的にも注目されてきていますので、しっかり力を入れていかないといけない。日本は唯一の被爆国であるのと同時に、その一方で、再処理や高速増殖炉など原子力平和利用のオプションをフルセットで持ち、行使できる非核兵器国では世界で唯一の国です。そういう日本のユニークな立場を活かして、皆さんには世界的な場で活躍し貢献して欲しいと思っています。

—今日は楽しいお話もあり、1時間があっという間に過ぎました。お忙しいところ大変ありがとうございました。

(文部科学大臣執務室にて取材 2010年8月6日午後)

(企画・取材：本誌 澤田哲生，白川典幸；

取材協力：喜多充成)

From Editors 編集委員会からのお知らせ

○学会誌記事執筆者のための

テンプレートを用意しました
執筆要領と合わせてご利用下さい



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

○「投稿の手引」「和文論文テンプレート」を 改定しました。

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

—最近の編集委員会の話題より—
(9月10日 第3回編集幹事会)

【学会誌関係】

- ・一般法人化対応 WG で編集委員会規程類の検討が行われ、その結果報告とコメントについて説明があった。現状の運営と整合するように文言などを委員会内で確認を行い、調整することになった。

- ・学会誌 Web アンケート・システムの復旧状況について報告があった。9月初旬に復旧し、現在、5～8月号分のアンケートを募集中。

【論文誌関係】

- ・編集委員会運営内規の改正案について検討し、細部を修正の後、承認した。
- ・新規に発行する会議録論文集 Progress in Nuclear Science and Technology の発行準備状況が報告された。Volume 1 として ISORD5 会議論文集を本年10月頃、Volume 2 として SNA+MC2010 会議論文集を2011年3月頃発行する予定。
- ・英文誌海外出版社からの出版に関連して、現在電子ファイルに登録している J-Stage 担当者と近日中に打ち合わせをすることが報告された。

編集委員会連絡先 <<hensyu@aesj.or.jp>>



小学校において原子力・放射線教育は可能か



杉山 憲一郎(すぎやま・けんいちろう)

北海道大学大学院工学研究院 教授
1972年、北海道大学工学研究科機械工学専攻修士課程修了。以来、北海道大学においてナトリウム実験を中心に液体ナトリウム冷却型高速増殖炉の熱流動・安全性研究に従事。現在、日本エネルギー環境教育学会副会長

航空学の父とよばれた Karman は、自伝で一般市民が定期便プロペラ機の利用を始めるまで、彼の母親は息子が大きく貢献した航空機に対して信用を置いていなかったと述べている。原子力技術者の家庭でも、家族が原子力に対して恐怖感を持っている場合が多いと聞く。原理が高度で、身近に存在せず、恩恵が実感できない技術に対する一般的な反応である。特に、原子爆弾による広島・長崎のイメージが強い日本ではそうである。

高度な科学技術で社会が成り立ち、資源・環境制約が大きい21世紀を生きる児童・生徒・先生達には、原子力・放射線の教育は必須である。テレビ・新聞情報に惑わされることなく、自分達に必要なエネルギー資源をグローバル社会でどのように確保していくか、主権者として日本の方向をどう定めていくのか、これらの課題は現在の文部科学省・教育委員会に任せておいて解決できる問題ではない。専門家が学校教育現場との対話を通して、原子力・放射線を含めたバランスの取れたエネルギーの基礎・基本情報を提供し、協力していかなければ解決できない課題である。

児童・生徒へのエネルギー基本情報の提供が如何に重要かを、再生可能エネルギーで注目されている風力発電を例に述べてみる。デンマークの風力発電が消費電力量の20%近くを供給していることは、マスコミ報道のお陰で日本国民には周知のことと思う。しかし、デンマークの1次エネルギーの構成比と人口を聞かれて即座に答えられる日本国民は皆無ではないだろうか。石油44%、天然ガス21%、石炭21%、再生可能エネルギー14%である。化石燃料の構成比では、日本の構成比と大きく異なっていない。小学校中・高学年で日本のエネルギー構成比を教えられていれば、この種の報道に対して、賢い児童は先生・親達に再生エネルギー以外の構成比について質問し、二酸化炭素放出量に関心が向かう。

酪農国であるデンマークでは陸上の風力発電は限界に達し、洋上発電に移行しようとしている。デンマークの沖合は水深10~25 mの岩盤で、漁業補償問題がないなど条件に恵まれている。緯度的には大西洋側から安定した偏西風が吹き洋上も含め風力発電には適している。一方、現在すでに北海油田からの供給量が減少しており、

適切な情報が提供されている中学生であれば、日本と比較しデンマークの将来の課題も議論できる。

もう一例を述べたい。ルノー・日産連合は、2008年10月、蓄電技術・充電設備・法人／個人向けサービスで豊富な経験と知識を持つフランス電力(EDF)とゼロエミッション車実現で覚書に調印した。さらに、2009年11月には、フランス原子力庁(CEA)およびフランス戦略投資基金(FSI)と電気自動車用バッテリーの開発・生産を行う合弁会社を設立するための同意書に調印した。ルノー・日産連合はすでにイスラエル、デンマーク、ポルトガル、米国テネシー州、神奈川県とこの技術でパートナーシップの関係を築いている。エネルギー自給率が8%と低いフランスでは原子力発電が80%近くを占め、隣国へ電力を輸出している。フランスでは夜間電力を有効利用すれば、well-to-wheelのゼロエミッション車の世界モデルを作り上げることができる。そんなに原子力発電に依存して良いのか。高レベル放射性廃棄物が溜まり最終処分はどのようにするのかという質問が日本では出てくる。フランスでは再処理工場が順調に操業を続け、最終処分場もほぼ決まっている。また、一般のフランス人は自国の原子力政策が21世紀の世界モデルになり得ると感じている。小学生でもわかるモーターのみの電気自動車の話題で授業展開ができたとすれば、日本の最終処分場の問題も前進するのではないだろうか。

次世代教育の緊急・必須情報をもう一つ。サウジアラビア、クウェート、バーレーン、カタール、アラブ首長国連邦、オマーンが作る湾岸協力機構は、2006年11月に原子力利用を宣言し、アラブ首長国連邦はすでに韓国とそのプロジェクト契約を結び具体的作業に入っている。サウジアラビアも間もなく具体的な建設計画を公表しプロジェクトのパートナーを決めるはずである。世界市場に出回っている油の2/3が重質油と言われており、温暖化・環境対策の観点から、重質油の利用はコストがかかり市場性は減少する一方である。最大の産油国のこのような動きは何を意味するのであろうか。児童でもわかる。

日本の児童・生徒は、二酸化炭素などの温室効果ガスによる気候変動問題への大きな関心から、1回の授業が

用意されれば、原子力の必要性は理解する。現状の日本の教育では、小学校の国語の時間に広島・長崎の原爆による悲劇、すなわち、放射線の恐ろしさを学ぶが、その後、放射線の量によるリスクの大小を学ぶ機会はない。そのため、放射線がある環境はリスクあり、放射線がない環境はリスクなしのON-OFFの判断のみとなる。

今春、北海道大学の新入生約50名を調査しこのことを確認した。自然放射線の存在に対する認識は皆無に近く、放射線は微量でも危険と感じている。ラドン温泉のラドンは放射線を出しているが皆さんはなぜラドン温泉に入りたがるのかと質問をすると回答に困る。上記の国語の時間における原爆の悲劇に加えて、社会科の時間に原子力の危険性のみを学ぶ機会も多い。このような継続的な学習により、放射性物質を多量に内蔵し発電中も含め放射線を放出している原子力発電所は危険であり、大地震が発生した時、本当に大丈夫だろうか心配している。

新学習指導要領の中学校3年理科の最後で、水力、火力、原子力などのエネルギーを有効に利用することの重要性、原子力発電では放射線が出ること、自然界には放射線があることを教えることが明記された。中学校の理科の教員に聞くと、高校受験の前であり受験問題には出ないこの単元を教える教員は例外を除いていないと回答される。相当数の教員に機会あるごと聞いたが、回答は同じであった。また仮に教えようとしても、先生自身が放射線教育を正規に学んでいないため、生徒が納得する授業展開は無理であるとの回答が圧倒的に多い。新学習指導要領でエネルギー変換を教えることになっている中学校の技術についても、技術を専門とする複数の先生に聞いてみた。回答は想像外であった。高校受験に関係がないため、各学校に通常1名が配属されている技術科の先生がその学校で教える技術の分野が、その学校の技術科になっているとのことである。つまり、先生の好みで何を教えても良いという訳である。

新学習指導要領では、ガイドラインの主旨を理解し、より効果的に授業を行い、持続可能な社会構築のために主体的に情報を収集し、考え、積極的に社会参画できる能力と態度を身に付けた児童・生徒を育てることとなっている。資源に恵まれず、技術により外貨を稼ぎ成り立っている日本では人材育成がすべてと言ってもよい。受験だけが優先される現在の教育現場の実態を知って愕然とした。最近の就職難で、失業がなく安定した職業として教員希望者は多い。しかし、現状の中等教育では21世紀型の原子力を含むエネルギー教育に興味を持ち、情熱を燃やす若手先生を育てることは難しいと感じる。

1990年代後半は、エネルギーを含めた資源はお金を出せば買えるもの、東側ブロックは崩壊し世界的な核戦争の危機は去り、21世紀世界はバラ色に見えた。しかし、

ソビエト崩壊から10年後に見えてきたものは、新興国の著しい経済発展である。資源制約・地球環境的制約を前提とした持続可能な社会の構築のため、原子力・放射線教育を小学校で必須にできないだろうか。

以下では北海道での原子力・放射線教育の取組みの一端を紹介する。新学習指導要領の小学校4年生社会科では、暮らしを支える飲料水・電気・ガスから一つを選ぶ学習単元が用意されている。当然、水に恵まれている日本では豊かな生活を支え、二酸化炭素を多量に出している電気を学んでほしいと思う。実態は全国的に飲料水が選択されている。なぜか、この種の単元では各教育委員会は副読本を作らなければならない。頼るべきは市町村の環境部であり、目で見てわかる上水道の副読本となる。電気会社に副読本作成の助言を求めたとしたらどうなるだろうか。副読本が発行されるや否やガス会社からガスの副読本も作って下さいという要求が来る。この煩わしさを避ける観点からも発行できるのは飲料水副読本という訳である。

北大エネルギー教育研究会では、次世代に北海道の生活を支える電気エネルギーを理解してもらうため、暮らしを支える電気を学ぶ単元の指導案を提案し、副読本「北の電気ものがたり」を試作した。全道の約1,200校の小学校に配ると共に、全道54校で試行実践を行って頂いている。北海道の電源別発電量に加えて、小学校の先生達の要望で原子力発電の原理と安全の基礎およびMOX燃料サイクルの絵を入れた。また、教員メンバーの繋がりでも、札幌市環境教育副教材(5,6年生用)に本年度から採用され、市内約200校に配布された。札幌市内の小学校高学年の児童の手に、初めて、電源別で発電所のおおよその場所と数、電源別での発電量、日本のエネルギー自給率等の情報が渡った。再生可能エネルギーである水力発電所は、数は多いが発電量は少ない。原子力発電所は1か所で発電量が大きい。児童にとっては興味深い事実であり、今後の学習に繋がる。

小学校6年生理科「生きていくための体の仕組み」の単元では、放射線可視化画像を活用した学習指導案を提案した。放射線が病気の早期発見や歯の治療に役立っていること、X線検査に用いる放射線の量は自然界からの量に比べても小さく、原子爆弾で亡くなった人たちに比べて桁が大きく違うことが学べる。小学校で、広島・長崎の悲劇と共に、放射線の危険性(リスク)は量によることを無理なく学べることは重要である。加えて、日常生活でのリスクが学べる学習指導案が全国で使われるようになれば、原子力・放射線に対する認識が変わっていくと信じる。さらに詳しい情報に興味のある会員は以下のHPにアクセスして頂きたい：http://www.hkd.meti.go.jp/information/sign_energy/enekan.htm

(2010年 8月4日記)



原子力政策大綱見直しへの視点

原子力政策円卓会議2010の討議をふまえて



吉岡 斉(よしおか・ひとし)

九州大学副学長(国際教養学, 社会科学担当)

専門は, 科学技術史, 科学技術の社会学および科学技術政策。1990年代以降は, 原子力政策史および原子力政策論を, 最も重要な研究テーマとしてきた。2001~2009年, 内閣府原子力委員会専門委員。

1. 深刻な停滞状態にある日本の原子力

内閣府原子力委員会が原子力政策大綱改定に着手しようとしている。現在の政策大綱は2005年10月14日に閣議決定された。それから5年が経過しようとしているが, 政策大綱策定後の日本の原子力研究開発利用活動は, 深刻な停滞状態に陥っていると言える。商業原子力発電については, 東通1号機, 志賀2号機, 泊3号機が運転を開始したが, 浜岡1・2号機が廃止され, 純増は1基のみとなった。また原子力発電の設備利用率は, 2003年度に東京電力等検査・点検偽装事件の影響で59.7%に落ち込んだあと70%前後にまで持ち直したが, 2007年の新潟県中越沖地震による東京電力柏崎刈羽原子力発電所の地震災害により再び極端な不振に陥り, 2007年度と08年度は約60%にとどまった。

核燃料サイクル事業については, 日本原燃六ヶ所再処理工場は, 2006年4月に始まったアクティブ試験が, 高レベルガラス固化設備のガラス溶融炉のトラブルなどにより難航を重ねている。また高レベル放射性廃棄物処分についても, 原子力発電環境整備機構 NUMO が設立されてから10年たつが, 候補地さえ決まっていない状態である。そうした牛歩状態から脱却する道を原子力関係者は模索中である。

2. 政策大綱改定へ動き出した原子力委員会

新たな十年紀を迎え原子力委員会は7月, 原子力政策大綱の見直しの必要性に関する検討を始めた。9月末を目処に見解を取りまとめる予定だが, 場合によっては見直さないと姿勢には驚きを禁じ得ない。自動車検査登録制度(車検)や原子炉定期検査などは, 特段の問題がなくても安全確保のために必ず行わねばならない。原子力政策大綱の定期的見直しは, 近年制定された一連の基本法に基づいて策定される一連の基本計画とは異なり, 法的に義務づけられていない。しかし, 長期計画の時代から半世紀にわたり, 原子力委員会の草創期より慣習として定着しており, 定期的見直しの慣習を改めるには特別

の理由が必要である。

見直しの必要性に関する「ご意見を聞く会」は, 原子炉定期検査に例えれば, 一部の機器のサンプル調査に相当するものであり, そこに重大な異常が認められなかったからといって, 定期検査自体を実施しないのは危険な考え方である。また2009年の政権交代によって, 原子力政策は政治的オーソライズを取り直すことが必要となっており, 新しい政策大綱案を国会の場で精査してもらうのは, そのための適切な手続きである。

3. 政策大綱改定を行うべき5つの理由

しかし今述べた理由に加えて, 政策大綱見直しを行うべき理由は幾つもある。筆者は1997年に高速増殖炉懇談会委員を務めて以来, 総理府の内閣府への改組を挟んで2009年まで, 原子力委員会専門委員を13年にわたり務めてきた。とくに2000年長期計画および2005年政策大綱の策定に際しては委員として参加した。そうした実績・経験を踏まえて, 政策大綱見直しにおける特に重要な5つの点を挙げる。(包括的にリストアップすると長くなるので今回は5項目にとどめた。)

- (1) 原子力研究開発利用の推進を前提として作業が進められた。原子力基本法第1条は, 原子力研究開発利用の推進を目的に掲げているが, 個々の事業については是々非々の判断を下すのは策定会議の責務である。とくに商業原子力発電に対する政策については, 脱原子力発電を含む幾つかの政策選択肢を設定した政策総合評価を行うべきである。なお, 政策評価部会の活動も, 政策大綱を前提として行われており, 同様の欠陥を有する。
- (2) 前回の策定会議において最も高く評価すべき点は, 核燃料サイクルバックエンドについて, 再処理路線と直接処分路線の総合評価を行ったことである。しかしその方法論は机上の仮想シナリオの比較を基本とし, それに「政策転換コスト」という形で現実シナリオをドッキングさせた非合理的なもので,

個々の評価基準にてらした判断もその多くが不適切だった。これについては筆者が代表となって実施した核燃料サイクル国際評価パネル報告書に詳しく書いた。改めて合理的な核燃料サイクル評価を行うべきである。

- (3) 政策大綱のみに限った話ではないが、権限・責任について不明瞭な記述が多い。そのひとつは「国」という表現の曖昧さである。組織名を具体的に表記しなければ権限・責任を明確にできない。とくに重要なのは原子力委員会と経済産業省の権限・責任の関係を明確にすることである。もうひとつは政府と民間との関係である。1994年長計までは、民間事業についても政府が実施主体や実施時期も含めた具体的方針が示されていたが、2000年長計では、民間の事業計画を紹介した上でその円滑な推進を期待するという基本様式が採用された。しかし2005年政策大綱では、この点に関して先祖返り現象が随所にみられる。そうし「国策民営」的世界からの脱却が急務である。
- (4) 政策大綱策定後に経済産業省総合資源エネルギー調査会が策定した原子力立国計画には、政策大綱の記述を踏み越えている重要な点が3つあった。ア. 高速増殖実証炉建設を2025年頃までに実現する。イ. 日本型次世代軽水炉によって既設炉をリプレースする。ウ. 民間第2再処理工場を建設し全量再処理を進める。政策大綱はそれらを否定していないが、書いていない基本政策をあとから付け加えることは政策大綱からの逸脱を意味する。原子力委員会が原子力行政の最上位に位置する組織である以上、その再検討が必要である。また実際的にも、日印原子力協定問題をはじめ、重要案件が政策大綱策定後に相次いでおり、それらの検討も必要である。
- (5) 冒頭で述べたように、原子力事業は深刻な停滞状態に陥っている。それは基本政策の見直しを必要とする事態かも知れない。その可能性を視野に入れつつ徹底的な点検を行い、抜本的な合理化の方向性を示すことが必要である。さもなければ、停滞状態は解消されないだろうし、それを放置することは原子力委員会として許されないだろう。

4. 原子力政策円卓会議2010

さて、私たちは「原子力政策円卓会議2010」というボランティアな結社(association)を組織した。2010年5月1日に初会合を開き、8月末までに計5回の会合を開いた。その世話人は、飯田哲也(環境エネルギー政策研究所)、澤田哲生(東京工業大学)、長崎晋也(東京大学)および筆者の4名である。メンバー(原則として名前を

示さない)は約30名であり、今後、短くとも10年程度にわたって原子力政策に責任をもって関与しうる当事者が、個人の立場で参加するものとしている。そして原子力研究開発利用に対する「推進派」から「批判派」まで、幅広いスペクトルに跨がっている。ただしこの「推進派」、「批判派」というレッテルに違和感を表明するメンバーは多い。いわば、「どちらとも言いきれない派」である。会議は非公開で行われ、チャタムハウス・ルール(メンバーは会議内容について発言者の名前を第三者に察知させない形でのみ口外できる)に従う。メンバーの多くは、現在の日本の原子力政策がさまざまな点で歪んでいるという認識をもち、その見直しが必要であると考えている。またそれについて立場を超え、タブー・建前・しがらみなどにとらわれない理性的かつ公平で公正な議論が可能であり、それによって問題点の所在について、多くの共通認識を獲得することが可能だという期待をもっている。

そうした観点から原子力政策の諸問題について、過去5回にわたり包括的に検討してきた。その経験を通して、共通認識の獲得が可能だという当初の期待は今や確信へと変わりつつある。原子力研究開発利用に対する全面肯定と全面否定の「二項対立」はもはや過去の遺物であり、日本社会・国際社会の実態や、原子力技術・原子力体制の実力を、正確に踏まえたリアリスティックな議論により、誰もが是々非々の判断ができるはずである。新たに発足するであろう「政策大綱策定会議」(仮称)が、そのような生産的な議論の場になることを願ってやまない。

「原子力政策円卓会議2010」は9月中旬に、原子力委員会および一般社会へ向けて、原子力政策改革に関する提言を発表する予定である。その骨子はほぼ固まりつつある。その中で最も強調したいと筆者が考える論点は以下の4点である。

第1は、各主体の権限・責任が明確に分節化され、最終的にリスクを引き受ける責任主体の顔がはっきり見えるシステム作りである。

第2は、政策論議を内容希薄な建前論、急所をオブラートで包む政治的タブー、虚構的な国家戦略・国際戦略などから解放し、政策論議を実質化することである。

第3は、研究・開発・利用の事業評価および安全規制を実質化することである。その形骸化は予算の無駄遣いを増長させ、事故・故障・トラブルのリスクを高める。

第4は、そうした質実剛健なシステムをしっかりと背負うことのできる人材をしっかりと養成することである。もしそれができなければ原子力研究開発利用の将来は暗い。

(2010年 8月20日 記)



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

経産省の原子力関連の概算要求は前年比9.7%増、文科省は前年並み

政府の2011年度の概算要求が、8月30日にまとまった。このうち文部科学省の一般会計総額は10年度当初予算比4.3%増の5兆8,348億円で、エネルギー対策特別会計は同0.5%増の1,418億円。分野別では、科学技術予算の総額が同4.0%増の1兆761億円で、このうち原子力関連には同0.1%増の2,197億円が計上された。内訳は、高速増殖炉サイクル開発が408億円、放射性廃棄物処理処分が334億円、地域との共生が126億円、ITER計画が117億円。機関別では、放射線医学総合研究所が同1.8%減の100億円、原子力機構が同1.1%減の1,094億円となっている。

また文科省の特別枠は8,628億円で、その中には

宇宙や原子力など技術の世界展開448億円が盛り込まれた。

一方、経済産業省の一般会計総額は今年度当初比4.9%増の1兆410億円、エネルギー対策特別会計は同8.5%増の7,579億円。このうち原子力関連は同9.7%増の1,924億円で、電源立地交付金や原子力広報・広聴などの地域との共生が1,409億円、原子力発電所の新增設やり替え、設備利用率の向上が43億円、原子力安全規制と防災体制が287億円、核燃料サイクルと高レベル放射性廃棄物関連が165億円となっている。特別枠の中の新成長戦略関連では原子力発電などインフラ・システム輸出の事業費165億円が盛り込まれた。

もんじゅの炉心確認試験が終了、次は40%出力試験へ

高速増殖原型炉「もんじゅ」は7月22日、性能試験の第1段階となる計20項目の炉心確認試験を終了した。5月6日に14年半ぶりに運転を再開し、同8日に臨界到達後、最大約0.7%まで出力を上昇。約2か月半の試験期間中で6回の間中評価を行い、結果を公表しながら、万全を期して進められた。

炉心確認試験時の運転体制は、各当直班8名以上で構成し、そのうちの中・上級運転員は、この間に全員が制御棒操作を経験したほか、様々な警報発報に対応するなど、運転管理実績を積んだ。

試験期間中に発生した不具合32件はいずれも、原子炉施設の安全確保の観点から問題となる事象ではなく、水平展開、直接的処置、原因究明を図り、今後の保守管理に反映させる。

試運転再開後、天候の変化などにより多くの警報

発報が発生し、関係機関への通報・公表を行ってきたが、原子炉施設の安全確保、プラント運用に影響しない設備・機器の不具合については、定例プレス日報で公表するなど、適正化を図った。

プルトニウム崩壊によるアメリカウムを多く含む炉心の安全性確認や炉物理データについては、臨界となる制御棒位置の変化から、時間とともに減少する炉心反応度を分析し、基本特性に係わる有用なデータを取得するなど、着実に成果を得た。

今後は、11年度に予定する40%出力プラント確認試験に向け、これまでの経験を反映した運転管理・保守管理を実施していくとともに、燃料交換、水・蒸気系設備の機能確認試験等、準備を進めていく。

(資料提供：日本原子力産業協会)

電力・メーカー6社、秋の「国際原子力開発」設立に向け準備室設置

東京、中部、関西の3電力会社と、東芝、日立製作所、三菱重工業の企業6社は7月6日、原子力発電の新規導入を目指す国に対して、日本全体として原子力発電プロジェクトに関する提案活動を行う新会社「国際原子力開発」(仮称)の設立に向けた「準備室」を同日付で設置した。これを受けて直嶋正行経産相は談話を発表し、「新興国に対する我が国の原子力産業の展開を官民連携して推進していくための大きな第一歩であり、まずは、喫緊のベトナムの原子力プロジェクトの受注に向けて、日本側の提案の取りまとめやミッションの派遣など積極的な活動を期待したい」と述べ、経産省としても支援策を実施していく方針を示した。

新会社設立に向けて、これまで経済産業省をはじめとした関係者と企業6社は6月に「企画委員会」を設置して、ベトナムで計画中の原子力発電プロジェクトの受注に向け、官民一体となった提案の検討を行ってきたが、今後の具体的な活動を速やかに展開することを目的として、今秋設立予定の新会社に先立ち、企業6社による「準備室」を設置した。同「準備室」の組織は、社長就任が予定されている東京電力の武黒一郎・前副社長(6月25日から同社フェロー)の下に、ベトナム担当部、事業部(BWR/PWR)、総務部を設置し、これまでの関係者による「企画委員会」と緊密な連携を取りながらプロジェクト受注を推進していく。(同)

保安院・総合評価、保守管理不備を重くとらえ島根1,2号機に厳しい評定

原子力安全・保安院は7月9日、国内原子力発電所について試行的に開始した保安活動総合評価で、中国電力島根発電所1,2号機を、5段階で最も厳しいレベル「許容できない課題が見出された」と評価した。両機において発覚した保守管理不備問題を重くとらえ、評価に反映した。

保安院は、新検査制度施行の一環として6月、原子力発電所各号機ごとに、09年度保安活動状況を5段階にランク付けした総合評価結果を発表したが、保守管理不備に伴う処分措置がかかっていた島根1,2号機については、評価保留となっていた。今回の評価結果は、優良な順に、「課題が見出されなかった」が10基、「軽微な課題が見出された」が19基、「課題が見出された」が2基、「重要な課題が見出さ

れた」が21基で、最も劣る「許容できない課題が見出された」は島根1,2号機の2基のみ。

保安活動総合評価は、プラントごとに、発生した事故故障等について客観的に評価した「安全重要度評価」(SDP)と、安全性にかかる運転状態のレベルを評価した「安全実績評価指標」(PI)を勘案し、評定を決定するが、プラントの安全性そのものを評価するものではない。島根1,2号機では、法令報告事象などハード面でのトラブルはなかったものの、保守管理体制や品質保証システムが十分に機能せず、多くの機器が点検周期を超過した事案をSDP評価で重くみた。なお、PI評価では、問題は確認されなかったとしている。(同)

日本原燃、熔融炉異常で最終報告 炉内に有意な損傷なし

日本原燃は7月28日、六ヶ所再処理施設の高レベル廃液ガラス熔融炉A系での炉内異常に関する最終報告を、原子力安全・保安院に提出した。08年に発生した炉内天井レンガ脱落等に関し、原因調査・対策検討を行ったもの。

今回の報告では、脱落したレンガの回収、炉内の

ガラスの抜き出し、炉内観察等を実施した上で、炉内に異物が残存せず、他に有意な損傷がないことなどを確認した。原因については、これまでの経過報告で推定した通り、(1)天井レンガの脱落は間接加熱装置の急激な温度降下の繰り返しによる、(2)かくはん棒の曲がりはおもりとパワーマニピュレータ(遠

隔保守用のロボットアーム)による押し込み荷重が当初の想定を超えたため——に変わりはないとしている。

対策としては、温度降下が緩やかになるように間

接加熱装置の運転操作を行うことに加え、レンガの脱落を想定した作業手順の整備、定期的なガラス熔融炉の炉内観察など、措置を講じることとしている。(同)

タンパク質の生命機能発現に関する水の本質的役割を解明 —タンパク質と水和水の「構造の揺らぎ」を中性子により観測

奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科の片岡幹雄教授と日本原子力研究開発機構の量子ビーム応用研究部門の中川洋研究員の共同研究グループは、タンパク質表面を覆っている水がネットワークを形成することが、タンパク質が生命機能を発現するために本質的に重要な役割を果たしていることを明らかにした。

タンパク質等の生体分子と水との関係を明らかにすることは、生命を理解するための根本的な課題の一つ。生命機能の発現を担う基本素子であるタンパク質は、細胞内の水中において、その構造を巧みに変化させ動くことによって機能を発揮している。「構造の揺らぎ」と呼ばれるこの動きには、その表面を覆っている水和水と呼ばれる水のネットワークが重要な働きをしていると考えられているが、水和水のどのような性質が原因であるのかについては、よくわかっていなかった。

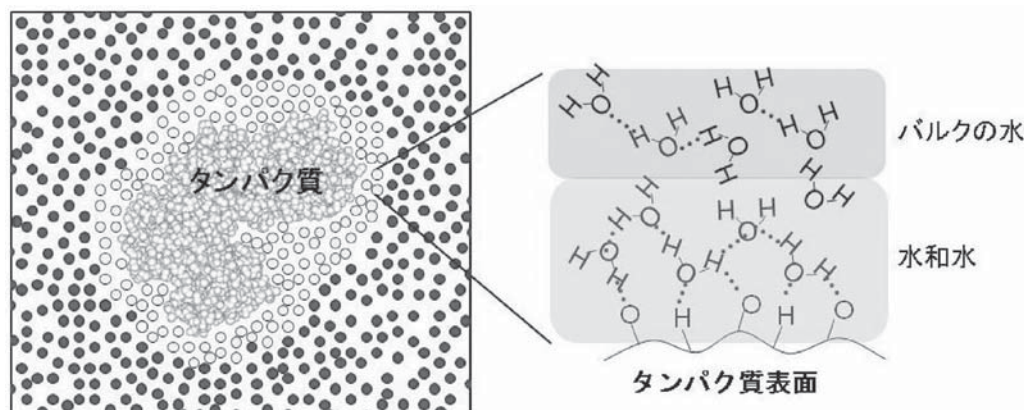
今回、中川研究員らのグループは、モデルタンパク質である核酸分解酵素スタフィロコッカルヌクレ

アーゼについて、タンパク質と水和水の動きを研究用原子炉 JRR-3における中性子散乱実験により観測するとともに、計算機シミュレーションを行い、タンパク質の構造の揺らぎに対する水和水の影響を定量的に調べた。その結果、水和水がタンパク質の表面全体を覆うネットワークを形成し、その水和水ネットワークの揺らぎがタンパク質の構造の揺らぎを誘導すること、さらにタンパク質が生命機能を発現するには、水和水がネットワークを形成することが必須であることを初めて明らかにした。

この研究は、生命活動における分子レベルでの水の本質的役割に関する極めて重要な基礎的知見を与えるものであり、今後、酵素活性機構の解明や創薬設計手法の高度化、食品保存の研究など多岐の分野への貢献が期待される。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press2010/p10072801/index.html>)

(資料提供：奈良先端科学技術大学院大学、
日本原子力研究開発機構)



タンパク質と水の関係のイメージ

タンパク質とふれている水の分子は水和水と呼ばれ、タンパク質を覆ってネットワークを形成している。その周囲にある水分子は異物とふれていないため、バルクと呼ばれる。

新しいPET診断用薬剤で微小ガンも鮮明に画像化 —原子力機構，群馬大など開発

5H(あるいは10%病)という別名を持つ褐色細胞種。副腎などで発生し、エピネフリン(アドレナリン：副腎髄質で作られるホルモンの一つ)などを過剰に分泌させ、重篤な高血圧症を引き起こすがんだ。早期発見すれば根治が見込めるのだが…。日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部RI医療応用研究グループの石岡典子グループリーダー、群馬大学医学部の花岡宏史助教、遠藤啓吾教授の研究チームは、新たに開発したPET診断用薬剤⁷⁶Br-MBBG(メタプロモベンジルグアニジン)により、粟粒ほど(約2mm)の微小な褐色細胞種を画面上に鮮明に映りだすことに成功した。これをPET診断に用いれば早期発見に威力を発揮するものと期待される。

現在の医療では、病気を早期にかつ正確に診断することが重要で、RIを使ったPET診断はこのための優れた診断技術の一つとなっている。同研究チームは、原子力機構高崎量子応用研究所のイオン照射

施設「TIARA」のイオンビームを利用し、RIとして期待度の高い臭素⁷⁶(⁷⁶Br)を使った新しい診断薬の開発を進めてきた。石岡グループリーダーによると、「新しいPET用核種である⁷⁶Brの安定的な製造に成功し、実際の診断用薬剤への応用を検討しました」という。具体的には⁷⁶Brの有用性を示すために、性能を比較しやすいMIBGという薬剤があることから、ベンジルグアニジンに着目し、今回の成果を得ることができたとしている。

「今後は、医療分野における様々なRIの利用法として、個々のRIの元素としての特性を活かした薬剤の開発、RIを使った治療薬の開発など、その可能性を追求していきたいと考えています。このために、患部に確実にRI薬剤を送り込む送達システムRI-DDSの開発を進め、RIを用いたテーラーメイド医療の実現への貢献を目指して研究を進めていきます」

(資料提供：科学新聞)

動画配信のご案内

原産協会では、原子力関係の情報を毎月、動画配信(インターネット・テレビ)「Jaif Tv」として、原産協会ホームページ(<http://www.jaif.or.jp/>)から、無料でお届けしている。

2010年7月～9月の番組は以下の通り。

・加速する原子力ルネッサンス—世界の原子力発電

開発(7/15公開)

- ・人材育成と原子力の新たな可能性の追求—京都大学原子炉実験所の取り組み(8/16公開)
- ・日本原子力研究開発機構・東濃地科学センターの施設と研究内容(9/15公開)

(資料提供：日本原子力産業協会)

海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[米国]

FENOC, デービスベッセの上蓋交換へ

米国のファースト・エナジー・ニュークリア・オペレーティング社(FENOC)は6月21日、オハイオ州で操業するデービスベッセ原子力発電所の圧力容器上蓋を来年秋に前倒しして交換することを決めた。3月に応力腐食割れの見つかった箇所はすでに

修理が完了しており、7月から約1年間に限定して運転を再開する。

同発電所は2月末に燃料交換停止に入ったが、3月12日に上蓋の制御棒貫通ノズル69本中24本で小規模の応力腐食割れが発見された。同炉では2002年にも圧力容器上蓋でホウ酸による腐食が発見され、04年に交換したばかり。その際、未完成の発電所から未使用の上蓋を引き取って据え付けたが、炉心の温度上昇に弱い素材で製造されていたことが判明している。

このため FENOC は当初、2014年に予定していた上蓋交換を来年秋に早めて実施すると決定。取り替え用の上蓋はすでに仏アレバ社が製造済みで、今年秋にも同発電所に輸送される。

[カナダ]

ニューブランズウィック州のポイントプロロー原発、FS でアレバに内示書

カナダのニューブランズウィック(NB)州政府は7月8日、同州で唯一の原子力発電所であるポイントプロロー発電所における2号機増設の実行可能性調査(FS)について、同発電所を所有するNBパワー社とともに仏アレバ社への発注内示書(LOI)に調印した。

カナダではこれまで、カナダ原子力公社(AECL)製の重水炉のみが稼働していたが、今回のLOIでアレバ社は第3世代+の中型軽水炉となる、(1)出力125万kWのBWR「KERENA」、(2)日本の三菱重工と共同開発している出力110万kWのPWR「ATMEA1」を提案。同国で初めて、軽水炉が建設される可能性が出てきた。

NB州ではかねてより同州を東部沿岸地域のエネルギー・ハブとする構想を進めており、2号機の増設は再生可能エネルギーなどとともに同構想をクリーン・エネルギー・パークとして具現化する重要な要素。建設および運転期間中に大規模な雇用が創出され、原子力関連の研究・教育・製造・設計分野の拠点となることも期待している。

アレバ社は原子炉に限らず、同パークを構成するあらゆるエネルギー設備の建設や新たな研究開発への投資を通じてエネルギー・ハブ構想の実現に向けた支援を約束。FSで良好な結果が出れば、軽水炉の設計・建設のみならず、資金調達を含めた建設計画全体に責任を負うため、州政府は財政リスクを免れることができる。同社はまた、同州を原子力研究開発における中心センターとすべく、州内の大学教育や教育訓練についても協力を表明しており、NB州政府およびNBパワー社は今年末までに、これらすべての協力分野をカバーする詳細な協定をアレバ社と結ぶ考えだ。

2号機の増設についてNB州政府は2007年、

AECL製の最新型炉であるACR-1000の採用を想定し、AECLが率いるコンソーシアムである「チームCANDU」および、第三者機関であるMZコンサルティング社に事業実現可能性の調査を委託した。両社の調査は報告書として州政府に提出されたが、AECLが並行して進めていた同1号機の改修工事が大幅に遅れ、14億ドルの予算を超過する見通し。こうした背景が影響し、AECLへの2号機発注は見送られたと伝えられている。

[フランス]

アルストム社、米チャタヌーガで大型タービン製造工場開設

発電設備や輸送機器製造の大手であるフランスのアルストム社は6月24日、総投資額約3億ドルで米テネシー州のチャタヌーガに発電所用・大型タービン発電機器製造工場を開設した。

原子力発電所の新設計画が進展しつつある同国での需要拡大が見込まれることから、北米発電機器市場に進出するのが狙い。すでに、北米で欧州加圧水型炉(EPR)の売り込みを進めているユニスター社に対しては、少なくとも4基のタービン発電機を新工場で製造し、納入することになっている。

アルストム社によると、新工場で製造するのは火力用および原子力用の蒸気タービン、ガスタービン、および大型発電機などで、既存の旧型タービンを最新鋭に改造することも可能。原子力用蒸気タービンの製造については、世界でも最大規模となる出力170万kW級の「アラベル」の製造に必要な機器を装備しており、次世代原子力発電所の機器製造にも対応できる。

米国の中央部という大型発電機器の製造・出荷には理想的な立地条件にあるほか、道路や鉄道網、水路とのアクセスも良好。テネシー川を利用して、重量千トンまでの機材の揚げ降ろしが可能なドックを装備しているのが最大の特長だと強調している。

同社はすでに、フランス、ドイツ、スイス、中国でタービン製造工場を操業中で、中国では広東大亜湾発電所や嶺南発電所に対してタービン機器の納入実績がある。

原子力・代替エネルギー(CEA)が複数の海外機関と協力

フランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)はこのほど、海外の複数のエネルギー関連機関と協力を締結した。

フランス原子力産業の今後の発展を支えていくため、諸外国と設備やマンパワー、研究成果を共有することにより、先進的な燃料サイクル技術や次世代炉の開発で資金分担を図り、効率的な開発を進めていく方針だ。

7月1日に発表されたのは、英国・原子力コミッション機構(NDA)との放射性廃棄物管理や原子力施設の解体・廃止措置に関する協力の枠組み協定。具体的な協力分野としては、(1)解体・廃止措置の方法、コスト見積りおよびプロジェクト管理、(2)廃棄物の回収と処理、関連コストの見積り、(3)輸送、(4)土壌汚染、汚染評価の方法および環境影響評価——が挙げられている。

6月25日には、ドイツのエネルギー・グループであるE.ON社と協力枠組み協定を締結。ここでは原子力エネルギーの将来利用に焦点を絞った新しい研究開発プロジェクトの実施を目的としている。

両社共通の関心事項である、現在、主力として稼働中の第2世代原子炉、およびいくつかの国で建設が始まっている第3世代原子炉に関するプロジェクトを行うほか、燃料サイクル・オプションを組み合わせる将来の第4世代原子炉についても、今世紀半ばの商業利用を目指し、協力して研究開発していく考えだ。

E.ON社は同協定に基づいてCEAの研究成果が利用可能となる一方、CEAはフランス国外で計画あるいは実施中の研究プログラムの中に複数の炉型を加えることができるとしている。

ロシアの原子力総合企業であるロスアトム社とは、6月8日に使用済み燃料再処理技術や廃止措置など幅広い分野における共同研究実施で2国間協力協定を結んでいる。

同協定は両者が過去に締結した2つの協定を更新する位置づけだが、協力分野は大幅に拡大。原子力エネルギーの開発戦略に始まり、燃料サイクルや次世代型原子炉の開発、将来のガス冷却炉、放射線安

全、核物質安全の基礎研究、緊急時対策など、多岐にわたっている。

協力活動の中でもっとも大きな部分を占めるのが使用済み燃料と放射性廃棄物の再処理技術開発について。原子力施設の廃止措置やそれに伴う放射性廃棄物管理、医療用・工業用の放射性同位体の生産と活用に関する協力にも力を入れる方針だ。

なお、自動車メーカーのルノーとは、戦略的協力協定を締結。電気車両や新エネルギー、清浄燃焼エンジンなど、クリーン車両とその持続的な可動性に関する技術研究で協力していくとしている。

原子力産業界の展望で報告書、EDF中心の入札チーム編成など勧告

N・サルコジ大統領は7月27日、2030年までを見据えたフランス原子力産業界の今後の在り方に関する勧告報告書を公表した。

昨年末にフランス原子力企業連合がアラブ首長国連邦(UAE)の原子炉建設計画受注を逃した反省から、同大統領の指示により仏電力(EDF)グループのF・ルスリー名誉会長がまとめたもの。UAE案件では、主力商品である欧州加圧水型炉(EPR)の初号機建設がフィンランドで大幅に遅れるなど、アレバ社の責任を追及する声が上がっていたほか、原子炉の運転・保守で実績のあるEDFの参加が遅れるなど、企業間の連携不足が受注失敗の一因として指摘されていた。

報告書は、海外の顧客ニーズに合わせた原子炉輸出が可能な専門組織、大統領に直結するエネルギー省をフランス政府が創設することや、アレバ社を始めとする同国企業を世界の原子力産業界のリーダーとすべくEDFを「チーム・フランス」の牽引役に据えるなど、15項目を勧告。今後、これらを叩き台に、官民が一体となって海外の原子炉受注拡大を目指した活動を展開していくと見られている。

ルスリー報告書はまず、世界が今、原子力需要の堅調なルネッサンス期を迎え、今後20年間に新たに約250基の新規原子炉建設が見込まれると予測。この機会をフランス原子力産業界が的確に捕らえていくには、2030年までに国内と海外の両面で課題に直面するとしている。

[英国]

NDAが廃棄物処分計画の概要公表、1処分場に全種類埋設

英国で高レベル放射性廃棄物(HLW)処分の実施主体となっている原子力デコミッショニング機構(NDA)は7月6日、深地層処分計画の概要と経過についてまとめた報告書『地層処分——実施に向けた段階的手続き』を公表した。すべての放射性廃棄物は、中間貯蔵後に時期をずらして一つの深地層処分場に埋設し、2130年以降、最終的にすべての坑道と立入口を埋め戻すと仮定した概念例を提示している。しかし、まだ初期段階の暫定計画であることから、後に複数の処分場が必要になる可能性についても言及している。

英国では2006年、中間貯蔵と地層処分を組み合わせる管理方針を政府が決定し、08年に6段階の地層処分場サイト選定手続きを示した「放射性廃棄物の安全な管理に関する白書」を公表した。これに従って、サイトの選定は政府が主導権を取って進める一方、NDAは下部組織の放射性廃棄物管理局(RWMD)を通じて処分場の計画立案と開発を担当。今回の報告書は、これまでの準備作業や処分対象となる廃棄物の数量など、処分場受入れに関心を持つ自治体等にできるだけ多くの関連情報を提供するのが目的だとしている。このため、基礎となる「標準計画」を白書に基づいて便宜的に設定したものが、今後の技術開発動向やサイト固有の評価など、不確定要素次第で最終的な判断が変化する可能性がある」と強調している。

[ポーランド]

米国とポーランドが原子力共同宣言、原子炉建設で米企業にも機会

米国とポーランド両国は7月14日、原子力部門における産業および商業協力で共同宣言に調印した。

ポーランドが進めている同国初の民生用原子力発電所建設計画において、米国の原子力企業にも公平に参入の機会を与えられるよう道筋を付けるためのもの。米国はポーランドが加盟する欧州原子力共同体(EURATOM)と平和利用分野における原子力協

力協定を締結済みだが、具体的な原子力貿易が実現するまでには、ポーランドが国際的な原子力損害賠償責任体制に参加するなどのハードルが残っていると見られている。

この日、共同宣言に署名したのは、ポーランド政府原子力エネルギー開発全権委員のH・トロヤノフスカ経済省次官と米商務省のF・サンチェス国際貿易次官。サンチェス次官は12日から13日にかけて、「ポーランド民生用原子力政策に関する米国貿易ミッション」を率いて同国を訪問していたもので、目的はポーランドの原子力発電開発計画に米国企業が提供できる原子力技術やサービスおよび経験をアピールすることだ。米エネルギー省(DOE)と国務省の代表、および米国の主要な原子力企業10社の幹部が参加したとしている。

[フィンランド]

議会が2件の原子炉新設を承認

フィンランド議会は7月1日、2件の新規原子力発電所建設計画に関する政府の「原則決定(DIP)」を賛成多数で承認した。国内で6、7基目となる原子炉について、電力2社は各1基の建設許可を今後5年以内に政府に申請するが、順調に進めば2020年頃には運開が可能となる。隣国スウェーデンでは6月、30年にわたった脱原子力政策の撤回が決まったのに対し、天然資源に乏しく燃料輸入に長く依存してきたフィンランドは既に2002年、チェルノブイリ事故以来欧州では初めて、原子炉(現在建設中のオルキルオト3号機(EPR))の建設を決定。今後も、温室効果ガス削減対策も含め、エネルギー多様化政策の一環としても原子力の推進に拍車をかける方針だ。

フィンランドでは現在、テオリスューデン・ボイマ社(TVO)がオルキルオト原子力発電所4号機を、また、電力コンソーシアムであるフェンノボイマ社が2か所の新規建設候補地のいずれかで出力150万~250万kW程度の原子炉建設を計画。同国政府は今年5月、フォータム社が申請していたロビーサ3号機建設計画を含む合計3件の計画のうち、TVOとフェンノボイマ社の2件についてのみDIPを承認した。どちらの計画もまた、採用炉型は未定だが、TVOは出力100万~180万kWとし、総工費は30億

～40億ユーロを予定。フェンノボイマ社は、中西部のピュハヨキに仏アレバ社製の欧州加圧水型炉(EPR)を1基、あるいはその北部に位置するシモに東芝製 ABWR 1 基の建設を検討している。

[ロシア]

世界初の海上浮揚型原発が完成

ロシアの総合原子力企業であるロスアトム社は6月30日、世界で初の海上浮揚型原子力発電所(FNPP)である「アカデミック・ロモノソフ」がサンクトペテルブルクのバルチック造船所(BZ)で完成したと発表した。

FNPPは航行用推進システムを持たないが、発電用の船用原子炉KLT-40S(出力3.5万kW)を2基搭載。完成式典に出席したロスアトム社のS・キリエンコ総裁やサンクトペテルブルク州のV・マトピエンコ知事らの見守るなか、タグ・ボートに曳航されて進水した。

FNPPの全長は144mで幅は30m。1サイクルにつき12年間の運転サイクルで3サイクル、合計約38年間の操業が可能で、送電線の設置や取替え用燃料の輸送が非経済な遠隔地域においては、従来の地上設置型原子力発電所を建設・運転するより格段に経済的だという。

キリエンコ総裁によると、ロシア国内では極北の遠隔地域で特に、FNPPのように低出力の発電所の需要が高く、国外では開発途上国や脱塩用原子炉を必要とする国などから多くの関心が寄せられているとしている。

FNPPは2007年4月にセベロドピンスクで着工、組立て工事は昨年5月にBZで始まった。今後は約2年間の試運転を経て、2012年末までに極東カムチャツカ地方で「ビルチンスク原子力発電所1号機」として運開する見通しだ。

[UAE]

規制当局が一部の建設準備作業を認可

アラブ首長国連邦(UAE)の連邦原子力規制庁(FANR)は7月11日、同連邦初の原子力発電所建設予定地であるブラカにおける限定的なサイト準備作

業と一部の機器の製造を認可した。

今年4月に、UAEの原子力発電開発計画実施機関である首長国原子力会社(ENEC)が提出した2つの申請を承認した。これにより、ENECは韓国の企業連合に発注した1～4号機について、原子炉の安全性と無関係の発電所構造の作業を含むサイト準備活動のほか、圧力容器や蒸気発生器、加圧器、冷却ポンプといった安全系機器の製造・組み立てを開始することが可能となった。

これらの機器は、同企業連合に参加している斗山重工業が6月末に韓国電力から製造契約を受注しており、ENECは今年後半にも製造を開始させたい考えだ。

なお、ENECがサイト準備認可に基づいて土木工事を始めるためには、アブダビ首長国の環境庁(EAD)から別途、建設環境許可(CEP)を得る必要がある。一方、同プロジェクトの非原子力部分に関する環境影響声明書(EIA)については、すでにEADから承認を取得済みとなっている。

[インド]

米国とインドの原子力協力、印の再処理で協定調印

米国とインドは7月30日、両国が民生用原子力協定の下で原子力貿易を行う際、必要条件となっている再処理に関する取り決めと手続きに関する協定に調印した。米国起源の核物質の再処理や、米国の核燃料企業によるインドでの事業取引を可能にするもので、2年前に両国が調印した原子力協定の実質的な運用に向けてまた一つ、ハードルがクリアされたことになる。

協定の調印はワシントンの駐米インド大使館において、M・シャンカル印大使と米務省のW・パーンズ政治担当国務次官が行った。両国は3月末にこの件に関する合意に達して以降、関連の手続き等を進めていたもので、予定より半年ほど早く調印にこぎ着けたとしている。

米務省によると、米国はこれまで欧州原子力共同体(EURATOM)と日本に対してのみ、再処理を事前同意。今回の協定により、インドも今後、再処理工場を国内に建設し、米国が責任を負うべき使用済み燃料を国際原子力機関の保障措置下で再処理す

ることができる。

[中国]

中国の高速炉研究開発計画 実験炉が初臨界を達成

中国の原子能科学研究院(CIAE)は7月21日、北京南部で建設中だった高速実験炉(CEFR)が初臨界を達成したと発表した。高速炉開発でかつては世界のトップを走っていた欧米諸国が開発を中止する一方、現時点ですでに実験炉と原型炉を運転しつつ実証炉を建設するロシア、実験炉が稼働中のほか原型炉が間もなく完成するインド、今年5月に原型炉「もんじゅ」が14年半ぶりの臨界を果たした日本に続いて画期的な成果を収めた。高速炉研究開発における新たな波はアジアで着実に高まりつつある。

CEFR炉は熱出力6.5万kW、電気出力2万kWでナトリウム冷却方式のプール型原子炉。ロシアの原子力総合企業であるロスアトム社が建設に協力したが、CIAEでは機器の国産化率は7割に達したとしている。CIAEはまた、高速炉によってウラン資源の利用率は6割以上に上がるとしており、CEFRの後継として出力60万kWの原型炉(CPFR)や出力100万kW以上の実証炉(CDFR)の建設を検討。国際原子力機関(IAEA)が06年に改訂したデータベースにも、CPFRは検討中の扱いで掲載されている。

しかし、ロスアトム社傘下の原子力建設輸出企業であるアトムストロイエクスポート(ASE)社によると、昨年10月にロシアのV・プーチン首相が中国を訪問した際、ASE社はロシアで建設中の80万kW級・高速実証炉(BN-800)と同型の高速炉を2基、中国に建設するための準備工実施でCIAEおよび中国原子能工業有限公司(CNEIC)と契約を締結。同契約には、建設プロジェクトの事前調査なども含まれており、最初の1基の建設工事は2011年8月に開始されるとしている。

[韓国]

斗山重工業がUAE向け機器製造を受注

韓国の斗山重工業は6月30日、アラブ首長国連邦(UAE)で建設する原子力発電所の主要機器製造

で、同建設計画の主契約者である韓国電力(KEPCO)と約40億ドルの契約を結んだ。原子力を韓国の戦略的輸出産業とする初プロジェクトとしての重要な位置づけであることから、官民の総力を結集して対応していく方針だ。

昨年末にUAEの首長国原子力会社(ENEC)と結んだ総額400億ドルの契約のうち、KEPCOの企業連合は約200億ドルで同国産業界が開発した改良型加圧水型炉(APR1400)を4基、アブダビ首長国のブラカに建設する。

初号機の完成を2017年に予定していることから、ENECは今年4月、(1)1号機～4号機までのサイト準備認可と(2)安全系機器の製造・組立てに関する限定的認可——を連邦規制庁(FANR)に申請。(2)の認可が下り次第、同企業連合に属する斗山工業はこれら4基の圧力容器、蒸気発生器、およびタービン機器の設計・製造を開始することができる。

同社は霊光原子力発電所1号機の建設に係わったのを皮切りに、国内の複数の原子力発電所に機器を供給。国外では中国で建設中の三門および海陽原子力発電所用にAP1000の機器供給をウェスチングハウス(WH)社から受注したほか、米国で計画されているAP1000の6基についても08年に契約を獲得済みだとしている。また、これに対応するため、2012年までに同社の製造能力を現在の3.5基/年から5基/年に拡張する計画である。

[国際]

ウラン需給予測を公表、「100年以上の供給可能」

経済協力開発機構・原子力機関(OECD/NEA)と国際原子力機関(IAEA)は7月20日、世界のウラン資源量、生産量および需要量について調査・分析した『ウラニウム2009』(通称=レッド・ブック)を公表し、「08年の消費ペースで行けば、現在の総確認資源量で今後100年以上は十分、世界の原子力発電所への供給が可能」との結論を明らかにした。

レッド・ブックは両機関が2年に1度、編さんしているもので、23回目の発行となる今回は、世界40か国から2009年1月1日現在の情報を収集。世界の大規模ウラン生産国だけでなく、生産開発を始めて間もない国のデータも初めて加えているのが今回の

特徴だ。2035年までの世界の原子力設備容量や原子炉における所要量の予測についても、ウランの長期需給動向の分析と並行して掲載している。

〈ウラン資源量〉

2009年版ではウランの資源量、生産量および需要量がすべて、07年版以降、増加しており、世界各地で行われているウラン鉱山探査・開発活動への投資額は倍以上の伸び。総確認資源量は630万6,300トン(15%増)となったが、この数値には80年代以降初めて、1キロあたり260ドル以下の天然ウラン鉱石、または1ポンドあたり100ドル以下のウラン精鉱(U_3O_8)という高コスト資源が含まれている。確認資源の総量は全般的に増加したものの、採掘経費が増えたため低コスト資源の生産量は実質的に減少。ウランの消費率が08年程度であれば、これらの総確認資源量で100年以上は十分に供給することができる。

〈原子炉での所要量〉

原子力は価格競争力のあるベースロード電源であるだけでなく、温室効果ガスを排出せず、エネルギー供給保障にも大きな役割を果たし得るとの認識から、現在、数多くの国が原子力発電設備の拡大を計画。2035年までに世界の原子力設備容量はネット出力で5億～7億8,500万kWに増加すると予測される。このことから、原子炉でのウラン所要量も年間8万7,000～14万トンに増加する見通しだ。

〈需給の将来見通し〉

過去の例にも見られるように、ウラン探査への投資増加は重要資源の発見や新規資源の確認につながる。仮に市場状況が一層改善されれば、追加の資源探査が誘発され、さらなる資源の確認をもたらすことが予想される。

したがって、2035年までに世界の原子力設備容量が高ケースで拡大した場合でも、消費されるウランは総確認資源量の半分以下。あとはウランの需要量増加に合わせて、いかにタイムリーかつ環境上、持続可能な方法で鉱山開発していくかが課題として残る。

これに加え、ウランの生産容量について予測してみると、2020年代後半までは高ケースのウラン所要量を賄うことが可能と考えられる。しかしながら、既存鉱山での生産量増強や、新鉱山を開発する際の資金的な課題や期間などを鑑みると、これらの生産量拡大をすべて計画通りに進められるとは考えにくい。結果として、余剰在庫などの2次資源が引き続き必要となり、濃縮施設で残渣濃度を低く設定するなどの節約によって、ある程度まで補完することになると予測される。

このような需給状況は現在の技術水準で判断したものだが、新型炉や燃料サイクルなどの今後の技術開発がウランの長期的な供給力に良い方向に作用することも考えられ、ことによると、さらに供給力が延びることもあり得るだろう。

日本原子力学会の新法人移行への取り組み

(社)日本原子力学会 理事会
総務財務委員会

社団法人 日本原子力学会は、平成20年12月に国の法令で決められた公益法人制度改革に対応し、一般社団法人への移行に向けて作業を進めることを、平成22年6月の通常総会で決定いたしました。今後準備が整い次第、平成22年度末の一般社団法人への移行認可を目途に手続きを開始する予定です。

今回の公益法人制度改革では、法令施行後5年間は猶予期間として従来と同様に法人を存続できますが、平成25年11月までに移行手続きをしない場合は「解散」することとなります。このため、当学会では平成20年7月に新法人移行のためのワーキング・グループを設置し種々の検討を進めてきました。

(1) 「公益社団法人」ではなく「一般社団法人」への移行を目指す理由

公益社団法人の場合には税法上の優遇措置が得られますが、当学会の場合、公益法人の条件(収支相償、公益事業比率等)を維持するための事務経費(人件費等)を考えると、公益法人の財務上のメリットは出ません。また、「公益」という法人名称が使えませんが「学会」のネームバリューが大きく、「公益」と「一般」の名称によるイメージ差は小さいと判断しました。なお、一般社団法人移行によっても、日本原子力学会の活動方針に変更はありませんが、一般社団法人では事業活動の公益性に関して制限がないため、事業の展開が自由にできるのも魅力です。

(2) 新法人移行により必要となる取り組み

本年6月の通常総会にて、一般社団法人移行方針並びに新定款(案)および細則(案)を決議していただきました。また、学会運営の要となる規程、規約、内規(規程類)の全面的な見直し・体系化を行っています。

移行認可のための申請準備も併せて進めています。申請のポイントは、

- ① 当学会が、今までに公益社団法人として運営をしてきた中で蓄積された財産額(公益目的財産額)を算定し、
- ② 公益目的のために行う事業への支出などにより、「公益目的財産額」に相当する金額をゼロにするための事業(実施事業)を決定し、
- ③ 移行認可後、実施事業により公益目的財産額をゼロにするまで支出する計画(公益目的支出計画)を策定することです。

移行認可後は公益目的財産額がゼロになるまで、毎年、公益認定等委員会(内閣府)による審査を受けます。

実施事業には、学会誌、論文誌(和文/英文)の発行事業を考えており、これらの事業は今までも継続して行っていた事業です。したがって、財源を特定した財務管理を行うことで、学会の収支が悪化することはありません。

(3) 一般社団法人に認可されると何が変わるのか？

学会運営のセルフガバナンス強化、財務・会計の計画性や透明性を高める以外は、今までと基本的に変わらないと考えています。すなわち、各支部・部会等の独自性や主体性を発揮し、従来通り、支部・部会等の活動を展開して頂くということです。

学会運営については、一般社団法人の場合には行政庁による監督がなくなる代わりに、新しい法律により組織のセルフガバナンスが求められます。すなわち、新たに定めた定款・細則や規程類に基づき、学会内組織運営の管理能力を高めることが必要です。

その一環として、学会運営による期末の決算額を期首の予算額に一致させるための組織的な改善努力や、会計処理を本部、部会、支部といった組織全体で統制・管理して会計の透明性を高めるために、出納を本部で一括して行うことなどを考えています。

(4) 今後のスケジュール

学会の総会決議である一般社団法人移行方針に基づき、今秋には移行のための認可申請を内閣府に対して行う予定です。

認可以降は、公益目的支出計画に基づき、公益目的財産額がゼロになるまで管理していきます。公益目的財産額がゼロになった時点で、一般社団法人への移行が完了します。現在の試算では、4～5年で移行が完了する見込みです。

なお、新法人移行に関して今まで春の年会・秋の大会などで会員の皆様にご説明した資料を、当学会のホームページ(<http://www.aesj.or.jp/>)に掲載していますのでご参照ください。

Focus

世界の高速炉サイクル技術開発の動向 第3回(最終回)

革新的なナトリウム冷却高速炉サイクル技術と開発課題

大阪大学 山口 彰,

日本原子力研究開発機構 柳澤 務, 京都大学 森山 裕文

2009年12月にIAEA主催の高速炉システム国際会議(FR09)が開催された。本連載ではこれまで2回にわたって、このFR09での議論を中心に、主要国で活発化している高速炉開発計画のあらましと、ナトリウム冷却高速炉やそれに関連する核燃料サイクルについて紹介してきた。最終回となる今回は、その高速炉の本格的な実用化に向けた取り組みとして、ナトリウム冷却高速炉サイクルに関わる革新技術に焦点をあて、原子炉やその周辺で採用が検討されている新技術、シミュレーションや核燃料サイクル技術開発の最前線と今後の展望について述べる。さらに高速炉開発を取り巻く今後の課題として、安全性や核不拡散、運転経験、技術伝承と人材育成の問題について論じる。

I. 革新的高速炉技術

1. ナトリウム冷却炉の革新技術

FR09では、各国から経済性・信頼性の向上、設計裕度拡大等の目標を達成するために、革新技術を導入したナトリウム冷却高速炉(SFR)が報告されている。この中で、実証炉、商用炉級のSFR概念が報告されていたのは、第1表に示す日本^{1,2)}、ロシア³⁾、インド⁴⁾、中国⁵⁾、フランス⁶⁾、韓国⁷⁾の6ヵ国である。本章では、これらの国々の炉システムを構成する原子炉構造、冷却系統、冷却系機器、建屋で検討されている革新技術について、日本の商用炉JSFR(1,500 MWe)のものと比較して紹介する。

各国のSFRの主な仕様、革新技術の調査結果を第1表に示す。また、革新技術を総合的に説明している日本のJSFRとインドの商用炉CFBRの説明図を第1,2図に示す。

Trends of Fast Reactor Cycle Technology Development in the World No.3 (Last of Serial) ; Advanced Sodium-cooled Fast Reactor Cycle Technology and Development Issues : Akira YAMAGUCHI, Tsutomu YANAGISAWA, Hirotake MORIYAMA.

(2010年 7月22日 受理)

各回タイトル

第1回 加速する高速炉開発：2020年に商用炉の運転開始

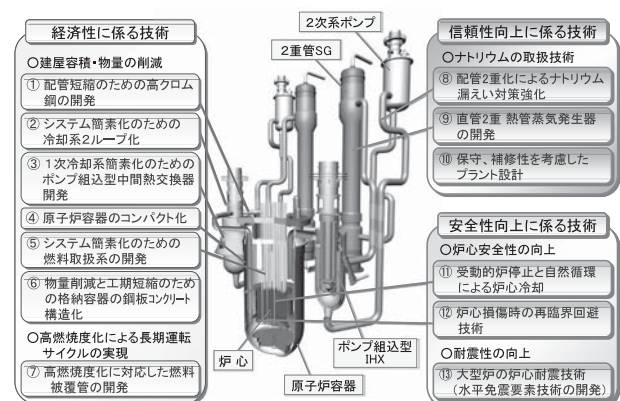
第2回 各国のナトリウム冷却高速炉サイクル技術開発の現状と展望

(1) 炉型

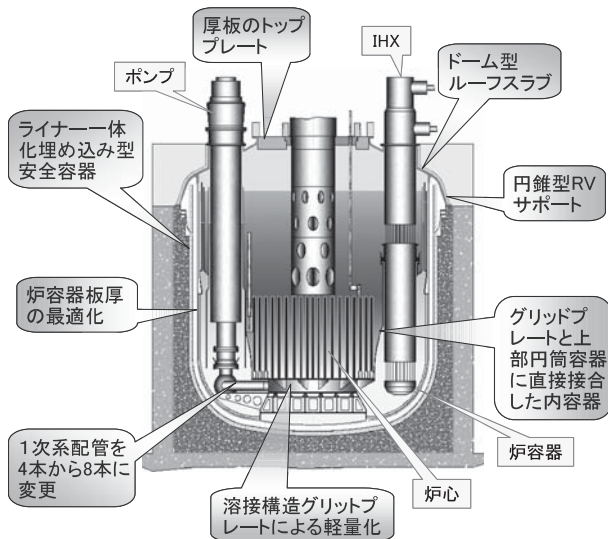
SFRの炉型には、ループ型(原子炉容器と中間熱交換器(IHX)、ポンプを配管で結んだ構成)とプール型(原子炉容器内にIHX、ポンプを設置した構成)がある。日本のJSFRはループ型で、他国の炉型はプール型である。JSFRがループ型を採用している理由は、1次系機器の保守補修性に優れ、将来の2次系削除プラントへの移行が容易であること、および日本の耐震条件が厳しいことから原子炉容器の小型化を目指しているためである。

(2) 原子炉構造

原子炉構造は、原子炉容器、炉心、燃料を交換するための回転プラグ、炉心を支持する炉心支持構造などから構成されているが、革新技術としては原子炉容器の小型化を達成するための工夫が検討されている。ループ型の



第1図 日本の商用炉(JSFR)の革新技術¹⁾



第2図 インドの商用炉(CFBR)の革新技術項目⁴⁾

JSFRでは、単回転プラグの採用などにより、原子炉容器径の縮小を図っており、商用炉級で容器径が10 m 台(10.7 m)に収まっている。一方、プール型の原子炉容器は、IHX、ポンプが容器内に設置されるため大型化することから、IHXとポンプの基数、配置などの工夫により縮小化が図られており、実証炉級で約13 m、商用炉級で約15 mとなっている。

また、プール型の原子炉容器型式を従来の円筒型容器にした場合は、上部デッキの物量が増大することから、ロシア、インド、中国の商用炉ではフラスコ型の容器(第2図参照)に変更して、デッキの大幅な物量削減を図る工夫が示されている。

原子炉容器の構造課題である高温ナトリウム液面部の健全性を確保するための革新技術としては、次のものが挙げられる。ループ型のJSFRでは、原子炉容器が小型であることから、熱過渡の緩和、高温構造評価法の高度化および高温強度が高いステンレス鋼(316FR鋼)の採用などにより、高温容器(ホットベッセル方式)にて、構造健全性を確保する方策が計画されている。一方、プール型では、物量増加となる炉壁冷却システム(低温ナトリウムで炉壁を低温化するシステム:コールドベッセル方式)を導入することで、構造健全性を確保する方策が取られている。

(3) 冷却系統

1次系のホットレグ温度は、各国とも550℃程度の高温を指向しており、プラント熱効率の向上を目指している。これにより、JSFRでは蒸気条件:495℃/18.7 MPaにおいて、プラント熱効率として高効率の42.5%を達成できる設計が示されている。

ループ数については、ロシアBN-1200の4ループ以外は各国とも最低ループ数の2ループを採用しており、冷却系物量、建屋物量の削減を図っている。ループ数削減による課題である配管口径の増加対策は、JSFRにおいて高流速(約9 m/s)を採用し、口径の増大を抑制している。高流速の見通しをつけるため、日本において配管流体力学振動の研究開発が行われており、成立見通しが示されている。

崩壊熱除去系(DHRS)については、各国とも受動的DHRSを採用しており、パッシブな設計が世界の趨勢となっている。その中でも、JSFRでは、自然循環除熱

第1表 各国のナトリウム冷却炉の主な仕様および革新技術

| 項目 | 日本 ²⁾ | ロシア ³⁾ | インド ⁴⁾ | 中国 ⁵⁾ | フランス ⁶⁾ | 韓国 ⁷⁾ | |
|---------|--|--|--|---|--|--|--|
| プラント型式 | 商用炉 JSFR | 実証炉(商用炉) BN-800 (BN-1200) | 原型炉(商用炉) PFBR (CFBR) | 実験炉(実証炉) CEFR (CDFR) | 実証炉(商用炉) ASTRID (—) | 実証炉(商用炉) KALIMER (—) | |
| 出力: MWe | 1500 | 880 (1220) | 500 (500) | 20 (600~900) | 500~600 (1500) | 600 (1200) | |
| 炉型 | ループ型 | プール型 | プール型 | プール型 | プール型 | プール型 | |
| 1次系温度 | 550/395 °C | 547/354 (550/410) °C | 547/397 °C | 530/360 (500~550) | 545/395 °C | 545/390 °C | |
| 蒸気温度/圧力 | 495℃/18.7 MPa | 490 (510) °C /13.7 (14) MPa | 480℃/17 MPa | 480℃/14 MPa | 490℃/18.5 MPa | 500℃/16 MPa | |
| 革新技術 | 原子炉構造 | 円筒型容器: 10.7m 単回転プラグ ホットベッセル | フラスコ型容器: 12.9m (フラスコ型容器: —) 2重回転プラグ | 円筒型容器: 12.9m (フラスコ型容器: 12.1m) 2重回転プラグ | フラスコ容器: 8m 2重回転プラグ | 円筒型容器 単回転プラグ コールドベッセル | 円筒型容器: 11.4m (円筒型容器: 14.5m) 2重回転プラグ コールドベッセル |
| | 冷却系統 | 2ループ IHX: 6基、ポンプ: 1基/ループ 自然循環式DHRS | 3ループ (4ループ) IHX: 6基、ポンプ: 3基 (IHX: 4基、ポンプ: 4基) 受動的DHRS | 2ループ IHX: 4基、ポンプ: 2基 (IHX: 4基、ポンプ: 2基) 強制+自然循環式 DHRS | 2ループ (—) IHX: 4基、ポンプ: 2基 受動的DHRS | 2ループ IHX: 4基、ポンプ: 4基 受動的DHRS | 2ループ IHX: 4基、ポンプ: 2基 (IHX: 4基、ポンプ: 4基) 強制+自然循環式 DHRS |
| 技術 | 冷却系機器 | 9Cr鋼配管 ポンプ組込 IHX 2重管式直管SG SG: 1基/ループ 一体貫流式SGシステム | ヘローズ設置2次系配管 — 直管SG: 10基/ループ (直管SG: 2基/ループ) EV/SH分離型システム | — — 直管SG: 23m 4基/ループ (直管SG: 30m: 3基/ループ) — — 一体貫流式SGシステム | — — 直管SG: 1基/ループ — — EV/SH分離型システム | — — 直管SG モジュールSG: 6基/ループ (モジュールSG: 9基/ループ) 一体貫流式SGシステム | — — 2次系9Cr鋼配管 — — ヘリカルSG: 1基/ループ (2重管式直管SG: 1基/ループ) — 一体貫流式SGシステム |
| | 建屋・免震 | SC造格納容器 原子炉建屋: 水平免震 | — — | — — | — — | — — 原子炉建屋: 免震 | — — 原子炉建屋: 水平免震 |
| その他 | — 炉内設置C/T Na ⁺ ウナダリの2重化 | — — 炉内設置C/T (BN-600 から変更) | — — 炉内設置C/T | — — 炉外設置C/T | — — 炉内設置C/T | — — | |

DHRS: 崩壊熱除去系 EV/SH: 蒸発器/過熱器 C/T: コールドトラップ SC造: 鋼板コンクリート構造 —: 仕様不明

式 DHRS を採用しており、安全性・信頼性の向上を目指している。自然循環除熱式 DHRS の検証のため、日本では1/10規模の水システム流動試験およびナトリウム試験が行われており、自然循環除熱の成立性見通しが示され、評価手法の構築も行われている。韓国においても、系統熱流動および自然循環除熱特性の成立性検証のため、主冷却系統および崩壊熱除去系を模擬したナトリウム試験が計画されている。

(4) 冷却系機器

JSFR では、冷却系機器の物量合理化を図るため、IHX に1次系ポンプを組み込んだ「ポンプ組込み IHX」を導入しており、機器合体により、大幅な冷却系機器の物量の削減、原子炉建屋の削減を図っている。機器合体にともなう課題として、ポンプ振動による IHX 伝熱管の健全性、長軸化するポンプ軸の回転安定性などが挙げられているが、この課題解決の研究開発が実施されており、成立性の見通しが報告されている。

蒸気発生器(SG)は、各国で設計研究が精力的に進められており、JSFR では伝熱管の水リークによって発生するナトリウム-水反応の抑制を図るため、伝熱管を2重にした2重管式直管SGを採用している。同様の方策は、韓国の商用炉でも計画されている。SGの伝熱管型式は従来、ヘリカル型と直管型が設計製作されていたが、各国とも商用炉においては製作性が容易な直管型が指向され、統一が図れる傾向にある。直管型SGの基数については、ユニット化とモジュール化に分かれ、日本、韓国はユニット化(1基/ループ)を目指し、ロシア、インド、フランスはモジュール化(フランスの商用炉: 9基/ループ)を目指している。ただし、ロシアの原型炉 BN-600、実証炉 BN-800では、モジュール化(10基/ループ)を採用したが、弁付き分岐配管の物量が増大したことから、商用炉の BN-1200では、2基/ループのユニット化に変更する計画が示された。なお、2重管式直管SGの研究開発としては、日本において2重伝熱管の試作試験が行われており、10m級の2重管の製作見通しが示されている。

SFRにおける配管は従来、ステンレス鋼配管を引き回して構成成立性を確保していたが、JSFRでは、高温強度が高く、熱膨張量が低い9Cr鋼を採用し、配管長の短縮を図っている。同様の方策を指向しているのが韓国の KALIMER であり、ロシアの BN-1200では、2次系配管にベローズを設置して、熱膨張量を吸収する方策が示されている。

(5) 原子炉建屋

ナトリウム冷却炉は、低圧で高温であることから、原子炉容器の肉厚は薄肉(JSFR: 60 mm)となっているため、地震時の座屈強度確保が課題である。この対策とし

て、日本の JSFR では、他国と比べて地震条件が厳しいことから、JSFRの原子炉建屋に水平免震装置(積層ゴムとダンパのシステム)を設置して、地震条件を緩和する工夫を図っている。フランス、韓国も同様に、原子炉建屋に水平免震装置を設置する計画を示している。

(6) ナトリウム漏えい対策

ナトリウムの漏えいに備えて、ループ型、プール型とも1次系の原子炉容器、冷却系機器・配管にはガードベッセルを設置する対策を採っている。2次系の冷却系機器、配管には、JSFRにおいてエンクロージャで2重化しており、冷却材漏えいによるナトリウム火災の縮小化を図っているが、他の SFR では、2重化の計画は示されていない。(三菱 FBR システムズ・戸田幹雄)

—参考文献—

- 1) IAEA-CN-176/01-02, (2009).
- 2) 08-10 P*, 3) 08-02*, 4) 08-01*, 5) FRP-01*,
- 6) 01-12*, 7) 08-15 P*.

*: 2)以降の参考資料のうち、FR09での発表論文については、“IAEA-CN-176/”および“(2009)”を省略して論文番号のみで示している。(以下の各節でも同様表記)

2. 進展するシミュレーション技術

高速炉の開発では設計と安全解析の各段階においてシミュレーション技術が重要な役割を果たすと期待されている。主たる適用分野は伝熱流動と原子炉物理であり、伝熱流動と核動特性のカップリング、伝熱流動と構造応答のカップリングなどの複合分野もシミュレーションを活用できる領域である。FR09にてシミュレーションのセッションで発表された論文18件¹⁾のうち、伝熱流動分野が11件、炉物理分野が6件、燃料分野が1件である。伝熱流動分野では、高速炉固有のシステムコードと汎用性のある数値流体力学(CFD)コードが必要である。前者については、各国それぞれが設計や安全評価用にコードラインアップを用意している。後者に関連して、OECD/NEAの報告²⁾にも見られるように、質点型のモデル(lumped mass model)では評価できない安全上重要な多次元現象が認識されてきたことから、CFDの安全評価への活用が進んでおり、国際協力によりそのためのガイドラインが策定されている。このガイドラインは单相流を念頭においたものであり、最初に安全評価へのCFD適用を試みたのは1980年代後半の日本やフランスであった。軽水炉と異なって高速炉は、沸点まで400 K程度の余裕をもつ单相流システムである。ナトリウム中では可視化が困難、不活性雰囲気が必要などによりナトリウム実験は高価であり、水や気体に比べれば高度の計測技術が必要になる。安全性と開発効率性の観点から、高速炉分野でCFDコードを積極的に活用することの利益は大

きいと考えられる。

FR09での国別の発表状況は、日本が9件、米国が6件、韓国が2件、ロシアが1件である。韓国からは、多次元効果を考慮したシステム解析コードMARSコードの高速炉版、MARS-LMRによる安全解析とCFDコードによる自然循環解析が発表されている。ロシアからは、自国で開発した17の解析コードで構成される安全解析用のコードパッケージの紹介と、これらを確率的リスク評価(PRA)と連携させるとの報告³⁾がある。米国は、炉物理解析コードに関する2件の発表と炉物理解析の不確かさを扱う研究、燃料の分子動力学研究、システム解析コードSASSYSとCFDコードの組合せによる安全解析、そしてCFDによる燃料バンドル解析である。各国とも、上に述べたような安全解析コードの整備とCFDの利用を志向している。シミュレーション技術がお家芸の米国と日本の論文が多いのは当然であるが、2010年の世界トップ10に中国のスーパーコンピュータ2台が入るなど、昨今の中国や韓国のハードウェアの充実が目覚ましい。日本は原子力機構の22位が最高位という状況である。中国の基調講演⁴⁾では、高速炉用の解析コード群を開発済みで現在検証(Verification & Validation: V&V)を実施中と述べており、今後の進展が予想される。インド⁵⁾においては、フランスと協力関係を構築し伝熱・流動と構造解析のコードを導入・整備している。

わが国のシミュレーション技術は世界有数であり、コードシステムも充実している。今後、シミュレーション技術を実用化するために、いくつか提言を記す。まず、現有の安全解析のシステムコードは1980年代から90年代に開発されたものが多く、高速炉の実用化と国際展開に向けてラインアップを再評価することが望まれる。次に、CFDコードの活用およびV&Vのためのガイドラインを定める必要がある。そしてシミュレーションにおいて適正な保守性を割り振るための不確かさを考慮する方法を開発し、シミュレーションの適用性を合理的に説明することが求められる。(大阪大学・山口 彰)

—参考文献—

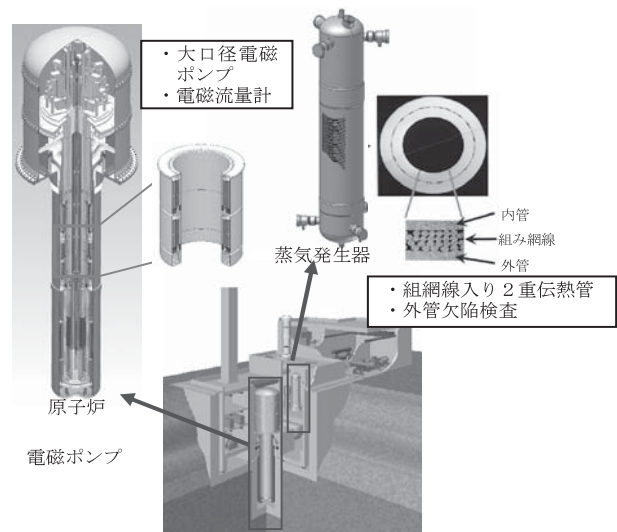
- 1) IAEA-CN-176/KN-06, (2009);
FR09のFast reactor analysis: advanced simulationのセッションで発表された論文一式。
- 2) Organisation for Economic Cooperation and Development, Best Practice Guidelines for the use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications, NEA/CSNI/R (2007)5.
- 3) 06-10*, 4) FRP-01*, 5) INV-06*.

3. 小型高速炉の革新技術

大型高速炉は主として基幹電源を目的としたものであ

るが、送電網が未発達な遠隔地などに適合するために小型高速炉が開発されている¹⁾。FR09では小型高速炉として、ロシアの鉛ビスマス冷却炉のSVBR-100(100 MWe)²⁾や日本の4S(Super-Safe, Small and Simple)炉などが報告されているが、本節ではSFR小型炉として4S炉について簡単に紹介する。4S炉の特徴は装荷した燃料を交換することなく30年運転可能で、自然現象を活用した安全設計、静的機器の採用によるメンテナンスの低減などである。4S炉は第3図に示すように、原子炉容器内に1次主循環ポンプ、IHXを設置したプール型高速炉であり、金属燃料炉心を採用し環状反射体を上向きに駆動して反応度制御される。2次冷却系は1ループで、崩壊熱除去系は動的機器がなく、原子炉のガードベッセル外側から自然対流により除熱するRVACS(Reactor Vessel Auxiliary Cooling System)と、2次冷却系に設置してある空気冷却器により構成されている。

2007年に米国原子力規制委員会に4S炉の設計承認のための事前申請が行われた。また、これに関連して米国の軽水炉のガイドを参考に、「統計的安全評価手法」に基づく炉停止失敗事象の解析手法が開発されている^{1,3)}。1次主循環ポンプに静的機器である電磁ポンプを採用することで、長期間メンテナンスが不要である。従来実績より1.5倍の大口徑で高さ/直径比が小さい実規模試験体が設計・製作され、その製作性が確認された⁴⁾。また、電磁ポンプの電源喪失時に流量を急減させないためのバックアップ電源ならびに環状流路用の電磁流量計を開発し、実規模装置による試験が行われる予定である⁵⁾。SGの組網線入り2重伝熱管については、内外管の破損をモニタし、ナトリウム-水反応を防止できる設計としている。内管、外管それぞれ独立にギャップを塞ぐことなくレーザー溶接する技術が開発され、長尺2重管が製作可能である⁶⁾。また2重管の内外管とも内管の内側から検



第3図 小型高速炉4Sの革新技術

査する技術として、電磁氣的渦電流探傷法によって外側表面欠陥で直径1 mm、深さ20%肉厚相当の欠陥を検出することが可能である⁷⁾。

以上、安全性向上、メンテナンス要求低減にむけた革新的な技術を紹介したが、これらは小型高速炉のみならず大型炉にも適用可能である。(東芝・坪井 靖)

—参考文献—

- 1) IAEA-CN-176/03-21 P, (2009).
- 2) 03-22 P*, 3) 08-06*, 4) 02-10 P*, 5) 04-15 P*,
- 6) 02-14 P*.

II. 革新的核燃料サイクル技術

1. 燃料開発

FR09では、高速炉燃料について、日本^{1~3)}、米国^{4,5)}、フランス⁶⁾、欧州⁷⁾、ロシア^{8~10)}、インド^{11,12)}、韓国¹³⁾から、革新的概念を含む最新の成果や今後の計画に関する報告があった。近未来の炉心燃料やMA(マイナーアクチニド)含有燃料の製造技術、物性評価、照射挙動評価などを網羅し、対象燃料も酸化物燃料、金属燃料、炭化物燃料、窒化物燃料と幅が広い。その中でも、酸化物燃料は近未来の先進的炉心燃料として、日本、フランス、ロシア、インドで、ペレット燃料や振動充填燃料の開発が精力的に進められており、実用化を目指した製造技術の改良などによる製造負荷(コスト、工程、廃棄物)の削減などを目標とした研究開発に関する報告が見られた。またインドについては、酸化物燃料の量産技術開発を着実に進展させ、高速炉開発で先行してきた国々の技術に追いつき、部分的には追い越している最近の状況が把握できた。金属燃料も米国・韓国では近未来の炉心燃料の候補として研究開発が進められており、インドや中国では酸化物燃料に続く次期高性能燃料概念となっている。より長期的な視点で、欧州を中心に炭化物燃料や窒化物燃料を対象とした研究も進められており、従来の研究成果に立脚して、さらに信頼性を向上させるためなどの詳細研究や知見の蓄積が試みられている。

MA含有燃料は今回の報告で主要な題材の一つであった。MAの均質リサイクル・非均質リサイクルの両者が想定されており、酸化物燃料、金属燃料、窒化物燃料が日米欧露で研究が進んでいる。その中で、MA含有酸化物燃料について均質リサイクルを想定した研究開発やMA含有金属燃料の研究開発に関する日本の報告は、最新の成果を示しつつ、物性評価、製造技術開発、照射試験、照射挙動評価といった主要事項を広くカバーしており、系統的に充実した研究開発が進められていることが示された。米国、フランス、欧州、ロシアもMA含有燃料の研究開発を進めており、近い将来にはさらに充実した成果により、MA含有燃料に関する知見が深まって

いくことが期待できる状況にある。

ポスターセッションを含む多くの報告では、照射試験結果に基づく挙動研究や計算科学的手法による解析評価などを含め、種々の研究開発に関する報告がなされ、近い将来の信頼性に優れる先進燃料概念の実現やより長期的な革新的な燃料概念について幅広い選択肢の提示につながっていくと期待される。

(日本原子力研究開発機構・水野朋保, 船坂英之)

—参考文献—

- 1) IAEA-CN-176/INV-01, (2009).
- 2) 07-06*, 3) 7-09*, 4) INV-03*, 5) 07-10*,
- 6) 07-02*, 7) INV-04*, 8) INV-02*, 9) 07-03*,
- 10) 07-05*, 11) 07-04*, 12) 07-07*, 13) 07-08*.

2. 湿式サイクル

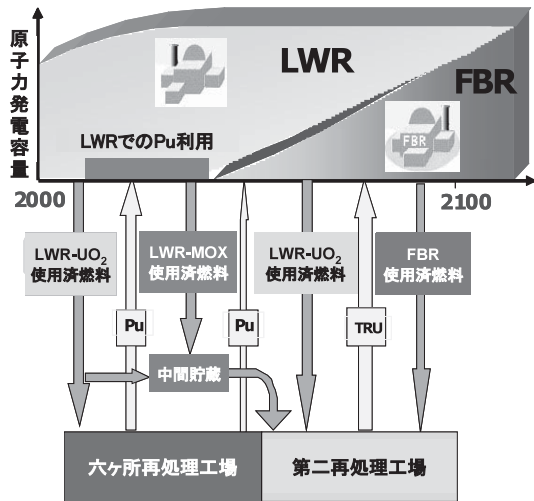
FR09で各国から発表された核燃料サイクルの概要をまとめた結果を第4図に示す。日仏米露印中からの湿式核燃料サイクルに関する発表^{1~17)}を概説する。

原子力国の中では、日本、フランス、米国、ロシア、インド、中国において、高速炉および軽水炉の酸化物燃料を対象とした先進的な湿式再処理技術を開発している。日本では、「高速炉サイクルの実用化戦略調査研究」および「高速炉サイクル実用化研究開発」(FaCT)プロジェクトの中で、湿式再処理技術(NEXT法)の開発が進められてきた。NEXT法は、高速炉使用済燃料の溶解液から晶析により大部分のウランを除去し、共除染工程でU, Pu, Npを(核拡散抵抗性向上のため)一緒に抽出分離し、抽出廃液からAm, Cmを回収する技術である。この方法は高速炉平衡期(原子力発電所がすべて高速炉の時代)に向けて開発されているものであり、平衡期の前に来る軽水炉から高速炉への移行期(第5図)への

| | | 2000 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|------|------|------|-----------|----------------------------|-------|--------------|---------------|
| 米国 | 高速炉 | | | Gen-IV | | | |
| | サイクル | | AFCI GNEP | | | | |
| フランス | 高速炉 | | | ☆P | | ☆C | |
| | サイクル | | | ☆COEX, DIAMEX-SANEX, GANEX | | | |
| 日本 | 高速炉 | FS | FaCT | | ☆D | | ☆C |
| | サイクル | | | | | | |
| ロシア | 高速炉 | | | ☆D | ☆C | | |
| | サイクル | | ☆MOX燃料製造 | | | ☆LWR使用済燃料再処理 | |
| インド | 高速炉 | | ☆P | ☆C | | | |
| | サイクル | ☆試験 | ☆実証 | ☆高速炉サイクル | | | (⇒乾式金属燃料サイクル) |
| 中国 | 高速炉 | | ☆E | ☆D | ☆C | | |
| | サイクル | | パイロット | ☆商用再処理 | | | (⇒乾式金属燃料サイクル) |
| 韓国 | 高速炉 | | | | ☆D | | D ☆C |
| | サイクル | | ☆コールド | ☆工学 | ☆先進乾式 | | |

E: 実験炉, P: 原型炉, D: 実証炉, C: 商用炉

第4図 各国の核燃料サイクル計画¹⁾

第5図 移行期の核燃料サイクル²⁾

適用も考慮した核燃料サイクル技術として開発されている。

再処理大国フランスの開発方針は明確で、現行のUとPuを分離回収するPUREX法(日本では分離後UとPuを1:1で再混合して回収)に続き、UとPuを分離しないCOEX法、MAを回収するDIAMEX-SANEX法、U、Pu、MAを一括回収するGANEX法と、順次、核拡散抵抗性を向上させる湿式再処理技術を開発する計画である。いずれの技術も溶媒抽出法を採用しており、リン酸系あるいはアミド系の有機溶媒の適用を考えている。リン酸系溶媒はPUREX法で実績があるが、アミド系は実績がなく工学実証が課題と考える。

米国では現状使用済燃料を発電所サイト内に保管しているが、種々の将来オプションについて検討している。湿式法としては、先進的核燃料サイクル研究(AFCI)において、まずPuを非抽出性錯体としてUだけ選択的に抽出分離し、その後、PuをNpと共存状態で精製するUREX法を開発している。分離したUは再濃縮あるいは低レベル廃棄物化のため高純度とし、PuとNpの共存により核拡散抵抗性を向上させる。他のMA(AmやCm)およびIやKrなどの放射性ガスも分離回収する計画である。UREX法の課題は、非抽出性Pu錯体の安定性検証と考える。

ロシアでは、PUREX法の再処理工場RT-1がマヤツクで1977年から稼働中である。RT-1の容量は400 t/yであるが、最近100~150 t/yのペースで、軽水炉VVERや高速炉BN-600などの使用済燃料を処理している。ロシアはRT-1に続く先進的再処理技術を適用したRT-2(600 t/y)をクロスノヤルスクで2035年から運転開始する計画である。先進技術としては核拡散抵抗性を向上させた湿式法が有力であるが、乾式法の適用も検討している。

インドでは、トロンベイ(30 t/y)、タラプール(100 t/y)、カルパッカム(100 t/y)の3つの湿式再処理工場を有しており、初期の金属燃料や重水炉の使用済燃料を処理している。また、高速実験炉FBTRへの燃料供給やFBTR使用済燃料処理も行っている。インドは高速炉サイクルの導入に積極的で、高速炉用再処理施設をカルパッカムへ建設する計画であり、将来的には国内資源量が豊富なThサイクルへの移行をめざしている。急速な高速炉導入やThサイクルに適したシステムの構築が課題と考える。

中国も膨張を続けるエネルギー需要に対応して壮大な原子力(高速炉)導入計画を有している。PUREX法再処理の小型試験施設が現在、アクティブ試験中で、800 t/yの湿式再処理工場を2025年に運転開始する予定である。核拡散抵抗性向上、MA/長寿命FPの回収も考えており、これらの先進技術の開発が課題と考える。

(日立GEニュークリア・エナジー・深澤哲生、
日本原子力研究開発機構・船坂英之)
—参考資料—

- 1) IAEA-CN-176/KN-05, (2009).
- 2) 05-02*, 3) 05-01*, 4) 05-03*, 5) 05-06*, 6) 05-11*,
- 7) 05-12*, 8) 05-14*, 9) 05-15*, 10) 05-16*,
- 11) 05-17 P*, 12) 05-18 P*, 13) 05-26 P*, 14) 05-28 P*,
- 15) 05-29 P*, 16) 05-31 P*, 17) 05-32 P*.

3. 乾式サイクル

本節では、日露韓からあった乾式再処理の発表について概説する。

高速炉および軽水炉燃料の先進的な乾式再処理技術は、これまで米国、ロシア、日本が開発をリードしてきた。近年では韓国からの発表が増えてきており、FR09では日露韓の3国から発表があった。熔融塩電解法を用いた乾式再処理技術の開発は、高速炉サイクルの技術開発の中で進められ、核不拡散性が高いという特長を持つ。乾式再処理技術には、金属燃料と酸化物燃料とを対象にした2種類があり、いずれも熔融塩電解法をベースにした技術である。金属燃料乾式再処理技術は、使用済金属燃料を熔融塩中で電解することにより、精製された金属ウランとTRUを回収する方法であり、米国、日本、韓国を中心に開発されてきた。一方、酸化物燃料乾式再処理技術は、使用済酸化物燃料を熔融塩中で雰囲気制御しながら電解を行い、UO₂およびMOXの顆粒析出物を回収する方法であり、ロシア、日本を中心に開発が進められてきた。

金属燃料乾式再処理技術の国内開発では、電力中央研究所が中心に開発を進めており、プロセス開発から実用化開発の段階に来ている。これまで課題であったマテリ

アルハンドリングおよびプロセス処理速度においては、核燃料物質を含有する熔融塩や液体カドミウムの高温度輸送技術の開発が進められ、バッチ処理でも実用的な処理速度を有する処理プロセスを実現している¹⁾。また、メインプロセスのみでなく、サブプロセスである使用済熔融塩の処理方法も開発が進められている。処理方法の一つとして使用済熔融塩からのFP除去技術であるゼオライトカラム法が開発され、通液条件による除染係数評価が行われている²⁾。

また、軽水炉から高速炉サイクルへの移行期プロセスとして、湿式技術と乾式技術を組み合わせたハイブリッド再処理技術の開発が行われている。湿式プロセスから金属燃料乾式プロセスに繋げるプロセスを開発することにより、軽水炉用の高純度ウランと高速炉用のTRUの回収が可能となる^{3,4)}。

海外では、米国以外に韓国が精力的に開発を進めており、2028年に10 tU/年規模の乾式処理の実証施設(PRIDE:PyRoprocess Integrated inactive DEMonstration)が計画されている。この施設の中に40 m×4.8 m×6.4 mのアルゴン試験セルを設置し、遠隔操作、保守の開発検討を行う予定である⁵⁾。

ロシアでは、MOX燃料高速炉サイクルの2050年完成を目指しており、酸化物乾式再処理技術(AINFCT)によりMOX顆粒析出物を回収し、得られた顆粒析出物を振動充填法を用いて燃料製造することも検討されている^{6,7)}。

(東芝・水口浩司,

日本原子力研究開発機構・船坂英之)

—参考資料—

- 1) IAEA-CN-176/05-20 P, (2009).
- 2) 05-22 P*, 3) 05-18 P*, 4) 05-24 P*, 5) 05-19 P*,
- 6) KN-05*, 7) 05-01*.

Ⅲ. 安全性と核不拡散

1. 安全性

今後のエネルギー需要の増大に対し、持続可能な供給源として有力なSFRは将来、その導入基数が飛躍的に増大することを考慮すれば、実用化時代に向けてより高い安全性を目指すべきである。第4世代原子力システムに関する国際フォーラムであるGIFの安全目標や、革新的原子炉および核燃料サイクルに関する国際プロジェクトであるINPROの基本原則を参照すべきであろう。

FR09^{1,2)}およびGIF-IAEAのSFRの安全性に関するワークショップ³⁾での発表によれば、各国で共通して採用されている安全アプローチでは、基本的に深層防護に基づき安全性の確保を図るべきとされている。すなわち、深層防護のレベル1, 2, 3に対応する異常発生防止、異常の制御と故障の検出、事故の制御を行うことにより

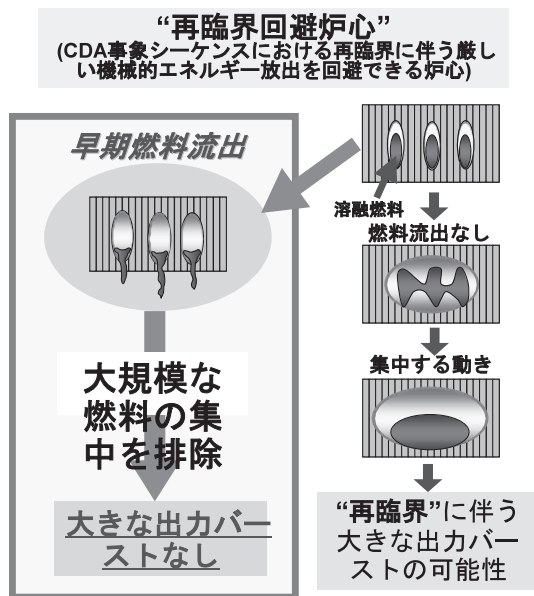
より事故を設計基準内にとどめる、レベル4に分類される事故の進展防止およびシビアアクシデントの影響緩和を行うことにより過酷なプラント状態を制御し、レベル5である避難の必要性を実質的に排除することを目指している。シビアアクシデント対策に関して各国の具体化方策は異なっていたりするが、炉心損傷の防止や影響緩和について設計上の考慮を行うことは共通している。許認可では決定論的な手法による評価が行われるものの、確率論的安全評価を十分活用して行われるべきとしている。

SFRの安全性確保にあたっては、SFRの特徴を踏まえて検討する必要がある。良好な特性としては、ナトリウムの冷却性能がよく自然循環による崩壊熱除去が容易であること、冷却材沸点までのマージンが大きく比較的長い猶予時間があること、低圧系であるため冷却材の喪失防止が容易であることである。一方、ナトリウムは化学的に活性であること、大きな炉心サイズになるとナトリウムボイド反応度が正となること、炉心が最大反応度体系にないことから、炉心損傷時において燃料移動に伴う再臨界による機械的エネルギーの放出の可能性があることである。炉心損傷に関する研究はSFRの開発初期から精力的に進められ、炉内・炉外試験研究や炉心損傷解析ツールの開発が行われてきた。また、炉心損傷の防止・緩和に関わる設計概念の検討・開発が行われてきている。

日本は、GIF、INPROの目標を参照した上で安全要求を設定し、受動的な安全特性の活用、炉心損傷の防止ならびに影響緩和、特に、炉心損傷の炉内終息を目指している。JSFRは炉心損傷対策として、自己作動型原子炉停止機構(SASS)による発生防止、最大ナトリウムボイド反応度の制限、第6図に示されるような再臨界回避概念の導入を図ることとし、ダクト付集合体による熔融燃料プールに至る前の燃料排出により再臨界による機械的エネルギーの発生防止、核的終息後の燃料デブリの冷却を自然循環で行うことなどの緩和対策を行うこととしている。

ロシアは全SFRで合計61回のナトリウム漏えいを経験したが、安全上問題となるケースはなかった。また、27回のSG水漏えいを経験し、BN-350の大規模リークによりモジュラー型を選択していたが、近年のBN-600の良好な運転実績を踏まえ、BN-1200では大型の一体型にシフトしようとしている。BN-800、BN-1200とスケールアップしていくが、経済性と両立を主張し、固有の安全性と受動的な安全性の活用を行うとしている。研究開発については、MBIRという多目的なSFR試験炉の運転開始を2019年に行うべく準備を進めている。

インドからは、PFBRおよび次期炉の安全性の説明が

第6図 燃料の早期排出による再臨界回避概念²⁾

行われた。原子炉容器の耐衝撃試験などを行いつつ炉心損傷事故に関する評価を行っているが、炉内試験などの裏付けがなく、機械的エネルギー発生ポテンシャルを評価する機構論的な評価コードの詳細が不明である。

米国は、炉心のフィードバック反応度、自然循環除熱、炉心損傷時に燃料分散特性を有する設計選択を含む固有の安全特性が、大規模放射性物質放散にいたる事故を極めて起こりにくいと判断できるレベルまで、例えば、格納容器への放射性物質放散が 10^{-6} /炉年より低い確率まで、安全の向上が可能であるとしている。金属燃料炉心による固有の安全性を主張しているが、炉心損傷後の推移についても言及し、燃料分散と燃料デブリの冷却性で1次バウンダリーの健全性が確保できるとしている。

フランスは、高いレベルの安全性を保証する欧州加圧水型炉(EPR)で採用された原則や目標を参照している。安全アプローチは、経験のフィードバックを含めナトリウム炉の特徴を考慮し、炉心損傷の防止ならびに影響の格納、容認できない事象の実質的排除、ナトリウムに起因するリスクの管理に基づいている。フランスは、2012年に向けて安全要求に対応する安全設計概念の検討を行っている。

各国とも、導入する高速炉はその時代の軽水炉と同等の安全性を確保するとし、上層レベルの安全要求に関しては同様の安全確保を目指している。下層の安全設計要求になると各国の多様な意見があるように見られるが、安全要求に関する議論を行い、国際的な調和を図ることが重要と考えられる。

安全評価手法としては、シビアアクシデントを評価するためのレベル2 PSA(確率論的安全評価)に関する手法開発・適用研究、パラメータの不確かさに関してモンテ

カルコ法を用いて統計的評価を行う統計的安全評価手法の手法開発・適用の進展がみられる。これらは、安全裕度の把握や重要なパラメータの同定を行う上で重要であり、リスクベース規制において有用な情報となる。

(日本原子力研究開発機構・中井良大)

—参考文献—

- 1) FR09のSafetyのセッションで発表された論文一式。
- 2) IAEA-CN-176/KN-03, (2009)。
- 3) IAEA-GIF Workshop on Operational and Safety Aspects of Sodium Cooled Fast Reactors, June, 2010。

2. 核不拡散(核セキュリティ)

原子力の平和利用における核不拡散対策は、これまでIAEA保障措置協定の締結など制度的な対応が中心であった。近年、追加議定書に基づく保障措置が適用されるとともに、統合保障措置とよばれる新たな概念が生み出されることにより、その強化と効率化が図られるようになった。また同時に、2010年4月の核セキュリティサミットに象徴されるように、原子力におけるセキュリティ強化に向けての国際情勢は大きく変化しており、それに関する規制の強化が図られている。

一方で、将来の原子力発電や核燃料サイクルに対しては、上述の制度を受け入れていくだけでは、核不拡散対策として必ずしも十分ではないという考え方が強くなってきた。今後、大規模化する核燃料サイクル、特に高速炉サイクルにおける取り扱うプルトニウムの質および量に対する国際社会の懸念は大きく、保障措置などの制度のみの適用だけでは限界があるという考え方が強い。さらに、国際制度を「脱退」というケースも考慮に入れたような、より強力かつ効果的な不拡散対策が必要と考えられている。

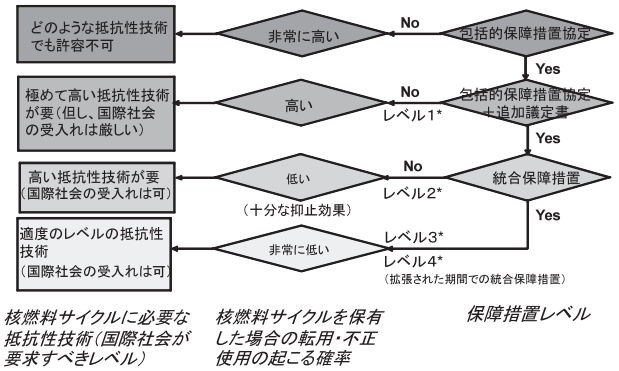
その1つの対策として「核拡散抵抗性」が取り上げられ議論されるようになった。核拡散抵抗性をもつ技術とは、原子力システム自体が核不拡散性の高い性格を有するものであることを意味する。保障措置のような制度的なものが外部から付加した対策(外在的措置)であるとするれば、核拡散抵抗性技術とはシステム自体の内に秘めた不拡散対策(内在的措置)、すなわちシステム自体が核拡散(転用、不正使用など)を起こすことに対し困難な技術を示す。原子力システムに物理的な防護(PP)を施すだけでなく、核拡散抵抗性という対策を持たせることが、国家およびテロリスト両面に対する核不拡散の効果的なアプローチとされている。

では、どの程度の抵抗性技術を採用すれば核不拡散上の要求が満たされることになるかという課題に突き当たるが、これに対する統一的な解は未だ存在しない。近年、国際社会では、抵抗性技術について多くの議論がなされ

ており、昨年の GLOBAL2009においては、核不拡散分野に関して「核拡散抵抗性技術開発、政策、導入」と分類され、約60もの論文が発表されている。今回の FR09においては、発表件数こそ少ないものの、上記の課題に対しての議論がなされるなど、高速炉開発における核不拡散対策の重要性について再認識することができたと考えられる。

FR09開会における岡崎俊雄 FR09大会議長(原子力機構理事長)および川端達夫文部科学大臣の歓迎挨拶(箱崎大臣官房審議官による代読)の挨拶においては、平和利用である高速炉システム開発における核不拡散、核拡散抵抗性の向上などを目指した研究開発の重要性が述べられた。一方、近藤駿介原子力委員長の講演では、日本は、安全性、経済性、持続可能性とともに、核拡散抵抗性を有する高速炉とそのサイクルシステムの実用化を目指しているが、プルトニウムを MA と共に取り扱うことにより、核兵器への転用の魅力度を下げることができると述べた。P.ライオンズ米国 DOE 筆頭次官補代理の講演では、米国の原子力技術について設定された5つの戦略目標のうち、1つを「ゆりかごから墓場まで」という形で燃料供給を保証した民生原子力協力により核不拡散を図る、とした。その他、ロシア、韓国、日本などの専門家のプレゼンテーションにも核拡散抵抗性の議論が含まれていた。

高速炉燃料サイクルの平行セッション5.3(核不拡散・核セキュリティ)では、幅広い核脅威の問題に対応する制度的手段や新技術による抵抗性強化の追求の試みについて、米国の専門家より紹介された¹⁾。現状では核拡散を完全に排除する技術は存在しないものの、今後の技術開発と設計によって、おそらく非国家的核拡散の脅威を排除し、国家的核拡散の脅威を低減できるであろうとの見解が述べられた。しかし、そこではやはり制度的手段、すなわち保障措置、核物質防護や輸出規制が重要な役割を果たすことから、全体として核拡散抵抗性を高めるためには、多種の対策を並行して採ることが必要であることが指摘された。一方、制度的手段と技術的手段、多国間アプローチといった多重防護的な対策の最適化を図ることの重要性が、フランス AREVA の専門家により強調された²⁾。また、高速炉ブランケットのプルトニウム富化度を下げる方法や、新燃料/使用済燃料の適切なハンドリング(併設や多国間アプローチ)、いわゆる「設計による保障措置」など具体的な考え方が示された。さらに核拡散抵抗性に関する何らかのクライテリアの必要性が強調された。日本では、これまで長い保障措置の歴史的経験を有することから、国家的核拡散のリスクが小さい場合には、制度的手段、特に追加議定書を含む統合保障措置が最も効果的であるとの見解が強調された³⁾。



第7図 保障措置と核拡散抵抗性技術のトレードオフ関係(例)

そこには保障措置と核拡散抵抗性技術の間にはトレードオフの関係があり、両者間の適切なバランスを図ることにより、全体として核拡散抵抗性を適正化するべきであるとの考えが示された(第7図)。

全体としては、保障措置に代表される外在的手段が重要であるとの認識で一致したが、高速炉と関連核燃料サイクルの経済性向上を図りつつも、いかにして核拡散抵抗性を盛り込むか、多重防護として、内在的手段と外在的手段のバランスをどのように採るかについて、今後取り組むべき課題として認識された。そのためにも核拡散抵抗性に関するクライテリアの必要性が認識された。

(日本原子力研究開発機構・久野祐輔)

—参考文献—

- 1) IAEA-CN-176/05-14, (2009).
- 2) 05-15*, 3) 05-16*.

IV. 運転経験と技術伝承

1. 運転経験

高速炉の運転経験を近年、蓄積してきたのは主にフランス¹⁾、ロシア²⁾、インド³⁾、日本⁴⁾であり、運転を通じて貴重な成果が得られている。

フランスの原型炉フェニックスでは、運転時に発生した主要な出来事として、4回の負の反応度変化による炉停止とそれに対する原因究明を実施した経験、設計寿命延長に関して、安全要求を満たすための改造工事と検査に係る経験、および照射炉として運転し最後の(End of Life)試験を行ってきた。また実証炉スーパーフェニックスでは、2次冷却系にナトリウムスプレイ火災を想定し、その対策として実施した改造工事、および廃炉に必要な研究開発を実施した。これらの炉の運転経験を通じて、電磁ポンプ、コールドトラップなどのナトリウム機器の性能確認ができたこと、モジュラー設計のSGの交換容易性、および今後のプロジェクトで重要となる60年の寿命を達成するための材料選定など、設計や保守の最適化検討のための知見が多く蓄積された。今後の課

題として、安全性の向上、稼働率、コストなどをPWR並みに向上させるため、CEA、AREVA、EDFのさらなる連携の必要性が強調されている。

ロシアでは、研究炉から現在建設中の実証炉まで30年にわたる豊富な高速炉の研究開発および運転経験がある。実験炉BOR-60は、主として各種の機器や材料特性や燃料特性の試験、水リークを含むSGの特性試験、ナトリウム機器の特性試験などを約40年間実施し、さらに2015年まで寿命延長が計画されている。これらの運転を通じて、プラントの故障や検査・保守に関する知見や機器の寿命に関する膨大な知見の蓄積がある。すなわち、運転初期には計画外のトリップが比較的多く発生したものの、ここ20年間では主要な炉停止要因は外部電源喪失であり、許容レベルを超える放射性物質の放出はなかった。一方、原型炉BN-350は、運転初期に製造品質が原因で比較的多くの水漏れがSGに発生したが、モジュラー型SGに改良することにより克服した。これらの設計や運転経験が反映された原型炉BN-600は30年近く運転され、運転初期にはナトリウム漏れが比較的多く発生したものの、防止対策の導入によりナトリウム漏れを大幅に減少させることができ、さらに許容レベルを超える放射性物質の放出は生じていない。これらの運転経験を生かして、BN-600の設計寿命の30年から45年への延長が計画されるとともに、実証炉BN-800の建設が進んでいる。BN-800運転の目的の一つはクローズド核燃料サイクルの実証であり、電力会社にとって産業規模での燃料の拡大利用とともに、MA含有燃料の利用も目指している。

インドの実験炉FBTRは1985年臨界以来運転を続けており、またその成果を生かした原型炉PFBRの建設が進められている。FBTRは主として炭化物燃料を用いた炉であり、これまでの運転で最大165 GWd/tの燃焼度を達成し燃料破損は発生しなかった。ところが1987年の燃料交換時に、燃料集合体挿入の誤動作により炉心集合体の損傷が発生した。このトラブルに対する修復装置の開発や燃料取扱いシステムの高度化が行われるとともに、その経験を生かしてPFBRのためにナトリウム中検査装置が開発された。さらに2002年には2次系の純化システムに設置されていたバルブからのナトリウム漏れ、および原子炉格納建屋の遮へいコンクリート壁を冷却する冷却チューブからの水漏れが生じたものの、それ以外のナトリウム冷却系やナトリウムポンプは正常に稼働し、SGにも漏れはなく、さらにその他の安全系や補助系も問題はなく運転された。これらのFBTRの運転経験から得られた知見をもとに、2003年にPFBRの建設が開始され、2012年に商用運転が開始される予定となっている。さらにPFBRの後継炉では、寿命60年、稼働率85%、建設期間5年、使用鋼材の20%節約などに

より経済性を高め、GIFやINPROの国際プロジェクトを考慮にいれつつPFBRより高い安全性を追求していく。

日本の実験炉「常陽」は、原型炉「もんじゅ」以降の炉のための照射用炉心として、さらに出力向上に伴うIHXなどの主たる機器の性能向上を図るためアップグレードされ、2007年まで大きな故障もなく運転が行われ、多くの知見を蓄積してきた。しかし、温度制御型照射燃料集合体の切離し失敗に起因するトラブルにより、2007年以降停止している。一方、「もんじゅ」は1994年に初臨界を達成したものの、約1年半後に2次冷却系よりナトリウム漏れい事故が発生し、運転を停止した。その後、ナトリウム漏れい事故の原因究明や安全総点検を行うとともに、プラントの改造工事や確認試験を行ってきた。2010年5月には14年5ヶ月ぶりに運転再開し、性能試験が開始された。また「常陽」および「もんじゅ」では、国内大学や海外機関から研修生を受け入れ、高速炉やナトリウム技術の継承にも注力し国際的にも貢献している。また、「もんじゅ」の停止期間中にトラブルや許認可の経験も蓄積されており、これらの知見は2025年に運転を目指している実証炉の設計をはじめとする実用化研究に活用されていく。

(日本原子力研究開発機構・柳澤 務)

— 参考資料 —

- 1) IAEA-CN-176/INV-05, (2009).
- 2) INV-08*, 3) INV-06*, 4) INV-07*.

2. 技術伝承・人材育成

(1) 海外の取組み

FR09では、海外からは3件(IAEA¹⁾、フランスCEA²⁾、インド³⁾)の口頭発表があった。また、ヤングジェネレーションイベント(YGE)⁴⁾では、世代間での経験や知識の伝承、国際協調、情報交換の重要性、必要性とIAEAに対する要望について意見交換があり、会議の最終日に声明が出された。

IAEA¹⁾では、人材の高齢化などに鑑みた知識保存計画⁵⁾を進めている。FR09では、高速炉に関する知識を保存する知識保存システムが紹介された。高速炉に関する技術、知識情報を、国際原子力情報システム(INIS)などのデータベースから50,000の部分的データ、9,000の全文データを収納しており、メンバー国は利用可能である。格納された知識情報は要素技術や分野などで整理されている。将来の活動においては、高速炉と核燃料サイクルのデータベースの向上が特に重要である。

フランス²⁾からは、ナトリウムスクール(ESML)と高速炉運転・安全スクール(FROSS)の詳細な紹介があった。これらのスクールは30年以上にわたってSFRの分野でのニーズの変遷に柔軟に対応してきた。現在では

INSTN(国立原子力科学技術高等学院)の中に高速炉に関する新たなトレーニングコースを設けており、延べ4,500名のトレーニング実績を誇る。高速炉の運転員や技術者のトレーニングだけではなく、研究開発をサポートする役割も担っている。他国からの受講者を受け入れており、人材育成に果たしている役割は大きい。例えば、日本からも原子力機構との協定や、「敦賀原子力夏の大学」の優秀学生をINSTNに派遣する「海外インターンシッププログラム」⁶⁾などを介した交流がある。

インド³⁾ではインディラ・ガンジー原子力研究センター(IGCAR)の近傍で原型炉PFBRを建設中であり⁷⁾、2011年の臨界、2012年の運転開始を目指している。そのため、約400炉年にわたる世界のSFRの運転経験の調査や、24年間のFBTRの運転経験などをPFBRの設計に活かしている。人材育成では、IGCARに高速炉の専門的トレーニングを行うスクールが設置され、第一線の研究者・技術者から受講者への暗黙知を含む知識・技術の継承が継続的に行われている。教育機関と研究開発機関の協同や、国内・国際会議への積極的参加の推奨なども特徴であり、近年、電力需要が急速に伸びているインドにおいて、高速炉成功のための知識管理の重要度は大きい。(福井大学・泉 佳伸)

(2) 日本の取組み

(a) 実験炉「常陽」の活用⁸⁾

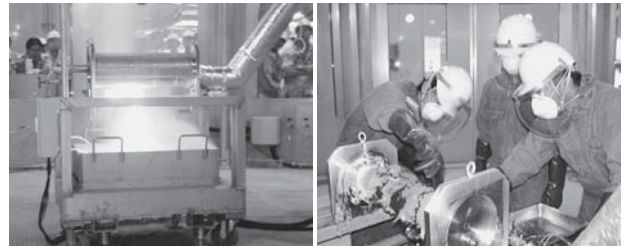
学生を対象とするトレーニングを主体に、2008年度から本格的に開始された。トレーニングには、「常陽」を始め照射後試験施設、プラントシミュレータ、ナトリウム分析施設などの活用に加え、経験豊富な原子力機構の技術陣が当たっている。

トレーニングには以下の5つのコースがある。①炉物理解析と実炉データの比較、②炉物理とシミュレータを用いたプラント動特性試験、③多重放射化箔法とヘリウム蓄積型フルエンスモニタ法による中性子束測定、④レーザー共鳴イオン化質量分析を用いたタグガスの測定、⑤放射化学分析(トリチウム測定を含む)。

これらのコースは、すべて講義と実験、現場の見学で構成されており、②のコースを除いて1ヶ月をかけて実施されている。コース①、②は、高速炉の炉物理特性を計測と解析の両面で学べるため、大学から高く評価されている。また、実際のSFRの施設を隅々まで見学することができ、貴重な経験が得られることから、すでに200名を超える学生がこのトレーニングを修了しており、人材育成に大いに貢献している。

(b) 原型炉「もんじゅ」の活用⁹⁾

「もんじゅ」の運転員、保守要員、エンジニアに対し、それぞれの専門技術に加え、ナトリウム取扱い技術を習得すことを目的として、27のコースを設けている。



第8図 ナトリウム漏えいへの対応訓練の状況

運転技術の教育には、運転シミュレータ(MARS: Monju Advanced Reactor Simulator)を用いている。ナトリウム取扱いや保守技術の教育のためには、専用の施設(FRTF: Fast Reactor Test Facility)を新設した。ここでは、ナトリウム取扱い技術として、ナトリウムループの運転、配管からのナトリウム漏えいへの対応、純化技術などを学んでいる(第8図)。また、保守技術として、燃料交換、ナトリウムポンプのオーバーホールなどの訓練が行われている。2000年から始まったこの教育には、これまでに約7,000名が参加した。

学生のための教育訓練としては、大学院生を対象とした「敦賀原子力夏の大学」を2006年より開催しており、150名以上の学生が参加した。高校生以下については、2007年よりエネルギー環境教育のサポートを行っており、約5,000名の生徒に講義を行い、地元を中心とした次世代技術者の育成に貢献している。

(三菱FBRシステムズ・伊藤隆哉)

—参考資料—

- 1) IAEA-CN-176/10-01, (2009).
- 2) 10-02*, 3) 10-04*.
- 4) 城 隆久, “FBR実用化にむけた国際協調の在り方について—高速炉システム国際会議(FR09)ヤングジェネレーションイベントにて”, 日本原子力学会誌, 52, [4], 235(2010).
- 5) 尾本 彰, “国際原子力機関(IAEA)の現在と将来—原子エネルギーの利用”, 原子力 eye, 51[2], 12~13(2005).
- 6) 竹田敏一, 泉 佳伸, 玉川洋一, “福井大学における原子力教育・研究—地域連携型の教育・研究”, 日本原子力学会誌, 52, [2], 91~97(2010).
- 7) FRP-03*, 8) 10-08 P*, 9) 10-03*.

V. おわりに

原子力カルネサンスと表現され、原子力が活況を呈する中、軽水炉を中心とした技術は成熟期、普及の段階にある。一方、基軸エネルギーとして、高速炉を中心とした次世代の原子力エネルギー構想の実現を果たしていくことは、技術発展の本来の営みとしての流れであろう。革新技術を取り入れた設計を実用化するには、現象の理解・認識をベースとする技術開発と、システム化をめざ

す設計との総合的ループが機能して、その中に潜在している課題や期待を発見していくことが求められる。

日本、フランス、ロシア、インド、中国および韓国では、2020年頃から今世紀中頃までの高速炉の実用化を目指して、積極的な高速炉開発計画が進められている。これまでの多くのSFRの運転を通して、SFRの基本技術はプロトタイプ級で実証されてきた。それらを社会が受け入れることができる実用化の段階にステップアップするには、産業レベルでの成立性の実証、核燃料サイクルとの整合性、規制の整備、核不拡散を中心とした国際的な位置づけなどの課題解決が必要である。産業レベルの成立性では、経済性はもとより、予防保全を軸とした運転信頼性や、それを支えるインフラ体制なども関係してくる。核燃料サイクルとの整合性では、運転経験を積みつつ進化する燃料自体の高性能化と、それを支える核燃料サイクル技術が統合的に整合されていく必要がある。その核燃料サイクルシステムの構想が産業レベルで実用化できることを目指し、循環型社会に貢献していくことが要件となる。

2009年末に、フランスのSFR原型炉フェニックスが運転を停止した。現在運転中のSFRとしては、実験炉として日本の「常陽」、ロシアのBOR-60、インドのFBTR、中国のCEFR(2010年7月21日に初臨界達成)が、また原型炉として日本の「もんじゅ」、ロシアのBN-600があり、それぞれがSFR開発において貴重な役割を果たしている。「もんじゅ」は、この5月に運転を再開し、まず発電プラントとしての信頼性実証、運転を通じてのナトリウム取扱技術の確立を達成するとともに、次世代を担う技術や人材を育てる国際研究開発拠点としての役割が期待される。運転中の高速炉が安全な、信頼性

高い運転の実績を積み、運転、予防保全技術を高度化するとともに、万一の事故に対する備えも考えておくべきであろう。

本連載の中で国際的な取組みについても、種々紹介されている。国際指針・基準の作成や技術の世界標準化を目指すとともに、特に燃料開発や安全性の研究では、試験施設の特徴を生かした共同研究、また運転経験を十分活用する観点から、事故・トラブル事例の原因究明、対策、修理技術などに関する技術交流も活発になることが望まれる。

国内では、2010年7月に、日本原子力学会に新型炉部会が発足した。本部会は、高速炉を中心に据えて各部会と連携を図りつつ、プロジェクト推進を取り巻く諸課題に取り組んでいくことになっている。

2012年頃には、次回の高速炉システム国際会議の開催が予定されており、技術開発が一段と力強いものに進展していることを期待して本連載を終える。

(日本原子力研究開発機構・柳澤 務)

著者紹介

山口 彰(やまぐち・あきら)

大阪大学

(専門分野/関心分野)伝熱・流体工学, 原子炉工学

柳澤 務(やなぎさわ・つとむ)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)高速炉システム工学, 原子力・社会連携

森山裕丈(もりやま・ひろたけ)

京都大学

(専門分野/関心分野)核材料工学, 放射化学, 核燃料サイクル

「もんじゅ」運転再開

臨界達成と炉心特性把握—炉心確認試験報告

日本原子力研究開発機構 宇佐美 晋

高速増殖原型炉もんじゅは2010年5月6日、14年5ヶ月ぶりに原子炉を起動して性能試験を再開し、同月8日、臨界に到達した。性能試験の第1段階である炉心確認試験は、炉心の安全性確認に係る試験や研究開発の目的で炉心およびプラントのデータを取得する試験から構成されるが、同年7月22日、全20項目の試験からなる炉心確認試験を終了した。これにより、長期停止プラントで安全に原子炉を起動して運転できること、炉心が安全上の核的制限値を満足していること、および長期停止後の再起動炉心にあっても炉物理特性が精度よく評価できることを確認した。特に、長期炉停止に伴い、燃料中のプルトニウム241の壊変により生成したアメリシウム241を炉心平均で約1.5 wt%含有する炉心の炉物理特性データは、世界でも数少なく、実用化を目指した高速増殖炉の炉物理研究開発の発展にも資するものである。

I. はじめに

高速増殖原型炉もんじゅ(以下「もんじゅ」という)は、1995年12月に発生した2次主冷却系ナトリウム漏えい事故後、運転を停止してきたが、2010年5月6日午前10時36分、14年5ヶ月ぶりに性能試験を再開し、同月8日午前10時36分、臨界到達を確認した(第1図)。性能試験は、約3年間にわたり、3段階に分けて実施していく計画であり、その最初の段階の炉心確認試験を78日間にわたって実施し、同年7月22日に終了した。本稿では、「もんじゅ」の性能試験計画の概要を述べるとともに、炉心確認試験の結果について報告する。



第1図 臨界到達の確認(2010年5月8日午前10時36分)

Resumption of System Start-up Test of Prototype FBR Monju—Report of Core Confirmation Test : Shin USAMI.
(2010年 8月16日 受理)

II. 性能試験再開までの経緯

「もんじゅ」は、熱出力71.4万kW、電気出力28万kWのプルトニウム・ウラン混合酸化物(MOX)燃料を用いたナトリウム冷却型の高速増殖原型炉で、わが国初の高速増殖炉発電プラントとして、1983年5月に原子炉設置許可を取得し、1985年10月に建設を開始して、1994年4月5日に初臨界、1995年8月29日に初送電に成功した。その後、性能試験中の1995年12月8日に2次主冷却系Cループからのナトリウム漏えい事故が発生し、原子炉を停止した。

この事故を受けて、事故の原因究明と再発防止策の検討、安全性総点検を行い、ナトリウム漏えいに対する設備の改善等の改造工事を実施した。その後、改造工事を終えた設備・機器の機能・性能を確認する「工事確認試験」と、長期間停止している機器・設備も含めプラント全体の機能・性能を確認する「プラント確認試験」を実施するとともに、2010年1月31日に原子炉格納容器全体漏えい率検査や起動前点検などの性能試験前準備・点検を終了し、原子炉を起動するための準備を完了させた。また、設備の健全性に加え、組織体制、品質保証体制、保全プログラムなど、行動計画に基づく改善活動に総力を挙げて取り組んできた。その結果、2010年4月28日に地元自治体から運転再開の了承を得て、同年5月6日に待望の運転再開(性能試験再開)の日を迎えた。

III. 性能試験の概要

性能試験は、「もんじゅ」が長期間運転を停止していた

こと、および燃料が長期間保管状態にあったことを踏まえ、より慎重な手順を踏んで安全性の確認を行うため、「炉心確認試験」、「40%出力プラント確認試験」、「出力上昇試験」の3段階に分け、段階的に出力を上げながら約3年間にわたって確実に実施していく計画である。また、性能試験の段階的な実施を通して、高速増殖炉開発に携わる技術者の技術力向上と将来への技術継承を図るとともに、ナトリウム冷却型高速増殖炉のプラント全体システムの運転特性データ等を取得していく計画である。

- (1) 第1段階の「炉心確認試験」では、原子炉を臨界状態にして、炉心の安全特性等を確認するため、炉物理データ等の取得を行う。
- (2) 第2段階の「40%出力プラント確認試験」では、水・蒸気系およびタービン・発電機を含むプラント全系統の機能と性能の確認を目的とし、核加熱による系統昇温を行い、40%電気出力で試験を実施する。
- (3) 第3段階の「出力上昇試験」では、本格運転に向けた出力上昇および100%出力運転時におけるプラント全系統の性能確認を目的とし、40%、75%、100%電気出力で試験を実施する。

また、3段階からなる性能試験全体で実施する試験項目は、炉心特性、しゃへい特性、プラント特性の3つの分野について計117項目を計画している。

IV. 炉心確認試験

性能試験の第1段階に位置付けられる「炉心確認試験」は、制御棒価値、プラント内外の空間線量当量率および1次主冷却系循環ポンプのフローコーストダウン特性を測定する試験等、合計20項目の試験で構成される(第1表参照)。2010年5月6日に炉心確認試験を開始し、5月8日に臨界を達成、長期停止、燃料交換後炉心でも十分な精度で臨界予測が可能であることを実証した。その後、基本的な炉物理特性として臨界性、制御棒価値を測定し、過剰反応度と反応度停止余裕を確認して、6月に国の使用前検査(過剰反応度測定検査、反応度停止余裕測定検査)を受検し、安全上の核的制限値を満足していることを確認した。さらに、冷却材の温度や流量の変化による反応度変化(温度係数や流量係数)の測定や、反応度印加時の炉心の自己安定性(フィードバック反応度特性)の確認等、研究開発を目的とした試験を行い、主に炉物理特性(特に、Am-241を多く含む炉心の特性)の把握に資するデータを収集した。その際、原子力学会を通じて大学等から提案のあった研究開発目的の試験として、未臨界度測定法の実機高速炉への適用性を評価するための試験も実施した。また、中性子計装の健全性確認のための測定、1次主冷却系循環ポンプフローコーストダウン特性確認、超音波を利用した新型ナトリウム温度

第1表 炉心確認試験の項目

- (1) 炉心の安全性確認に係る試験
 - 1) プラント運転操作を伴う試験

- ① 制御棒価値確認
- ② 中性子計装特性確認
- ③ 核出力校正確認
- ④ 過剰反応度測定試験
- ⑤ 反応度停止余裕測定試験

- (2) 研究開発等の目的で炉心およびプラントのデータを取得する試験

- 1) プラント運転操作を伴う試験

- ⑥ 流量係数評価
- ⑦ 温度係数評価
- ⑧ フィードバック反応度評価
- ⑨ 1次主冷却系循環ポンプ
フローコーストダウン特性確認
- ⑩ 未臨界度測定法適用性評価

- 2) プラント運転操作を伴わない試験

- ⑪ 空間線量当量率確認
- ⑫ ナトリウム純度確認
- ⑬ ナトリウム放射化量評価
- ⑭ アルゴンガス純度確認
- ⑮ 放出放射性物質挙動評価
- ⑯ 新型ナトリウム温度計特性評価
- ⑰ 圧力損失変化評価
- ⑱ 燃焼係数評価
- ⑲ 炉内中性子源効果評価
- ⑳ 崩壊熱評価

計の特性確認等も実施し、7月22日に、全20項目の試験を終えて炉心確認試験を終了した。

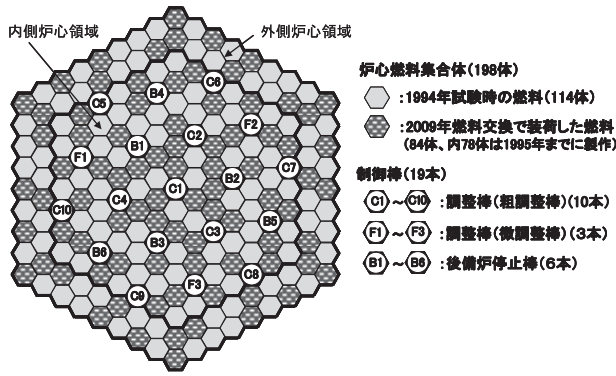
以下に、主要な試験の概要を示す。

1. 臨界達成と制御棒価値確認

2010年5月6日10時36分以後備炉停止棒 BCR 1 の引抜きを開始して性能試験を再開し、逆増倍曲線による臨界点の推定を行って、同月8日10時36分、臨界到達を確認した。中性子計数率調整後の臨界制御棒位置は、炉心中心の粗調整棒 CCR 1 が793 mm、その他の調整棒12本(CCR 2～10, FCR 1～3)が795 mmの引抜き位置で、後備炉停止棒6本(BCR 1～6)は上限位置(1,100 mm)であった(なお、調整棒の上限位置は1,000 mm)。この臨界時の制御棒位置は、核データライブラリー JENDL-3.3 と炉心管理運用コード(3次元3角メッシュ体系6群拡散燃焼計算コード等)による予測(調整棒位置:775～930 mm)の範囲内であった。

全19本の制御棒に対し、炉心中心の粗調整棒 CCR 1 にはペリオド法を適用し、他の制御棒については CCR 1 を基準とした置換法を用いて、おのおのの制御棒の制御棒価値および制御棒校正曲線を詳細に測定した。

炉心確認試験の炉心は過剰反応度が小さいことから、



第2図 炉心構成図

置換法の測定は、基準となるCCR1と評価対象の制御棒のみを挿入状態とし、その他の制御棒は全引抜き状態で行った。これは、前回性能試験時(1994年)と大きく異なる点であり、制御棒価値等について、解析値と比較する上で不確定要因(制御棒の相互干渉の補正の不確かさ等)の少ない試験データといえる。

2. 過剰反応度測定試験, 反応度停止余裕測定試験

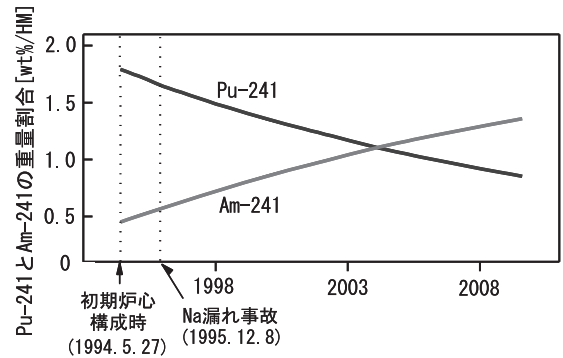
臨界制御棒位置と制御棒校正曲線から、炉心が有している過剰反応度、反応度停止余裕および反応度添加率を算出し、第2表のとおり、安全上の核的制限値を満足していることを確認した。

炉心確認試験の炉心は、1994年に実施した前回の性能試験の炉心と比較して、約14年5ヶ月間の長期炉停止に伴い、長期保管燃料中のプルトニウム241(Pu-241)の壊変により生成したアメリシウム241(Am-241)を多く含んでいる(第3図参照)。この放射性壊変による核分裂性のPu-241の消滅と核分裂性でないAm-241の生成により、炉心の過剰反応度は、1994年の前回の性能試験後の約14年5ヶ月の間に4%Δk/k程度低下した。そして、燃料交換により反応度を回復した炉心確認試験の炉心において、過剰反応度の予測値(0.4~0.5%Δk/k)^{a)}と測定値(0.6%Δk/k)の差が、予測上の不確かさ(±0.3%Δk/k)の範囲内で一致することを確認した。これにより、14年前に使用した燃料(114体:初装荷燃料I型)^{b)}

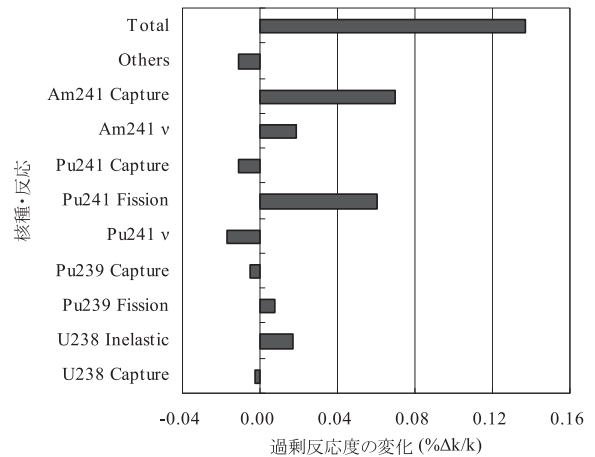
第2表 過剰反応度および反応度停止余裕測定結果(自主検査結果)

| | 測定値 | 制限値 |
|------------------------|----------------------|-----------------------|
| 過剰反応度(180℃)(Δk/k) | 0.006 | 0.057以下 |
| 主炉停止系の反応度停止余裕*(Δk/k) | 0.067 | 0.01以上 |
| 後備炉停止系の反応度停止余裕(Δk/k) | 0.062 | 臨界未満 |
| 主炉停止系の最大反応度添加率(Δk/k/s) | 5.2×10 ⁻⁵ | 8×10 ⁻⁵ 以下 |

* : 最大反応度価値を持つ制御棒1本が、全引抜きのまま挿入できないとした場合。



第3図 Pu-241とAm-241の重量割合 (Pu, U, Amの合計重量に対する重量割合)



第4図 核データの変更(JENDL-3.3→JENDL-4)による過剰反応度解析値の変化

と14年間炉外で保管した新燃料(78体:初装荷燃料II型)^{c)}、さらに新規に製作した燃料(6体:初装荷燃料III型)^{d)}の3種類の燃料を用いた炉心でも、十分な精度で、臨界予測ができることを実証した。

Am-241を炉心平均で約1.5wt%含有する炉心のデータは、世界でも数少なく、Am-241の核データライブラリーの妥当性検討にとって貴重である。検討例として、核データライブラリーをJENDL-3.3から最新のJENDL-4に変更した場合の過剰反応度解析値の変化を第4図に示す。前述のとおり、JENDL-3.3ベースの過剰反応度の解析値は、測定値に対して0.1~0.2%Δk/kの過小評価にあるが、第4図から、JENDL-3.3からJENDL-4への変更に伴い、主に、Am-241とPu-241の寄与により、過剰反応度の解析値が測定値と一致する方

^{a)} 1994年の前回性能試験結果に基づくバイアス補正(E/C補正)を考慮した炉心管理運用コードによる予測値は0.4%Δk/kであり、超微細エネルギー群効果補正等を用いた詳細な3次元解析手法による予測値は0.5%Δk/kであった(ともに核データライブラリー JENDL-3.3を使用)。

^{b)-d)} 核分裂性プルトニウム富化度:
 初装荷燃料I型(内側炉心/外側炉心) 約15wt%/20wt%
 初装荷燃料II型(内側炉心/外側炉心) 約16wt%/21wt%
 初装荷燃料III型(内側炉心/外側炉心) 約16wt%/21wt%

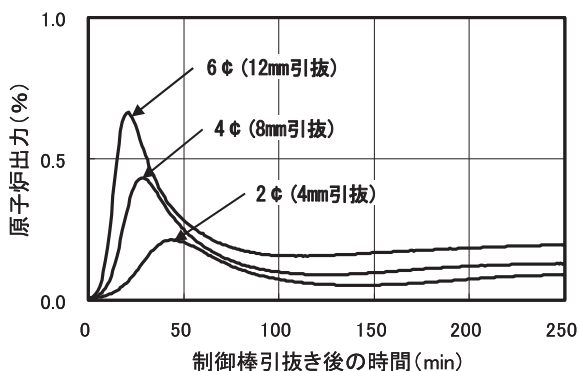
向に変化しており、JENDL-4の改訂が妥当であることを示唆している。

3. 温度係数評価

原子炉ゼロ出力臨界状態において、1次主冷却系循環ポンプの入熱と補助冷却設備による温度調整により、原子炉容器内のナトリウム温度を約190℃～約300℃の範囲で系統が等温でかつ連続的に昇温または降温させ、温度変化前後の反応度変化(臨界制御棒位置の変化)を測定して温度係数(=反応度変化/温度変化)を求めた。その測定結果から、温度係数は約 $-3 \times 10^{-5} \Delta k/k$ (約190℃～約300℃)と負の値となり、炉心の温度上昇に対して反応度が減少する負のフィードバック特性をもっていることを確認した。なお、ナトリウム温度が低い領域(約190℃～約200℃)の温度係数は、約190℃～約300℃の温度幅の温度係数に対して、その絶対値が若干大きな値を示したが、これはドップラー成分の温度依存性が影響しているものと考えている。また、原子炉容器内ナトリウム温度の変化率を変えた測定においても、同等の温度係数が得られた。さらに、1994年の前回の性能試験結果との比較から、温度係数の絶対値がわずかに減少していることがわかったが、これは、前回の炉心からのPu-241の壊変(Am-241の蓄積)と燃料交換による燃料組成の変化に起因していると推定している。また、温度係数を、ドップラー効果の成分(対数成分)と熱膨張効果の成分(線形成分)に分離して整理することにより、温度係数の測定データからドップラー係数を分離する試みを行っている。

4. フィードバック反応度評価

本試験は、原子炉出力が上昇するような反応度の外乱が入った場合に、負の反応度フィードバック特性により、原子炉出力の上昇が抑制されること(「自己安定性」)を確認するものである。試験では、炉心中心制御棒CCR1を一定量引き抜いて反応度(2¢, 4¢, 6¢)を印加して出力を上昇させ、そのまま運転操作を行わずとも、ドップラー効果等の炉心固有の反応度フィードバックとプラント応答(冷却材温度上昇に追従した補助冷却設備による温度制御)によってプラント状態が安定に静定す



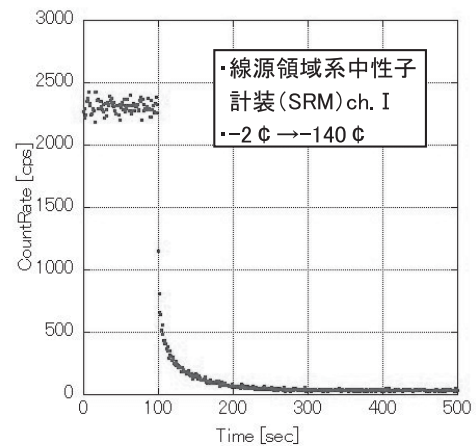
第5図 制御棒引き抜き(反応度印加)後の原子炉出力推移

ることを確認し、炉心特性の基礎データを取得した(第5図参照)。

5. 未臨界度測定法適用性評価

軽水炉では、未臨界度測定を応用した制御棒値測定が開始されており、定期検査工程短縮のための技術が開発されつつある。そこで、未臨界度測定法の高速増殖炉実機への適用性を確認するため、中性子検出器信号の時系列データを取得し、3種類の手法(ロッド・ドロップ、逆動特性法および炉雑音解析法)により未臨界度を評価した。そして、前述のIV-1節の制御棒値確認の結果(制御棒校正曲線)から算出した未臨界度と比較することによって未臨界度測定法の適用性を評価した。本試験は、日本原子力学会(「もんじゅ研究利用」特別専門委員会)からの提案項目をもとに実施したものである。

ロッド・ドロップおよび浅い未臨界条件での逆動特性測定では他の測定と比べ制御棒値との一致性が比較的よい結果が得られた。ロッド・ドロップで得られた代表的な中性子束信号を第6図に示す。また、逆動特性測定の深い未臨界条件においても、浅い未臨界条件で評価した中性子源強度を与えることで、評価可能な見通しを得た。一方、炉雑音解析法(ファインマン- α 法等)については、中性子相関特性が確認されていないが、今後、他の測定方法とともに、測定データの解析条件の妥当性や最適化、精度評価について検討を進めていく予定である。



第6図 ロッド・ドロップの測定結果

V. まとめ

「もんじゅ」は、2010年5月6日、14年5ヶ月ぶりに性能試験を再開し、5月8日に臨界を達成した。第1段階の性能試験である炉心確認試験は、安全最優先のもと、透明性の確保に努めて実施し、同年7月22日に計画通り20項目の試験をすべて終了した。炉心確認試験を通じ、長期停止プラントで安全に原子炉を起動して運転できる

こと、炉心が核的制限値を満足していること、長期停止後の再起動炉心にあっても炉物理特性が精度よく評価できることを確認した。また、温度特性等、実機における種々の炉物理特性に係わるデータを取得するとともにプラント系統設備の機能および性能を確認した。Am-241を多く含む炉心の炉物理特性の把握等、一連の試験を通じて得られた結果は、今後の「もんじゅ」の炉心管理への反映のみならず、後継炉の設計や解析精度向上等の高速炉研究開発の発展にも資するものである。

今後、40%出力プラント確認試験および出力上昇試験

において、炉心特性、しゃへい特性およびプラント特性に係る「もんじゅ」の性能を確認していく。

著者紹介

宇佐美 晋(うさみ・しん)



日本原子力研究開発機構
高速増殖炉研究開発センター
(専門分野/関心分野)炉心特性試験、
しゃへい特性試験、プラント特性試験

学会誌アンケートシステムのご案内

編集委員会では、多くの読者からのご意見をうかがうため、学会のホームページを利用したWebアンケートを導入しております。学会誌に関する感想や意見をお寄せください。

学会誌ではWeb上で回答いただいたデータをもとに、記事の方向づけを進めていく方針です。

＜アンケートの回答方法＞

- ① 学会誌評価専用のWebサイト(<http://atomos.aesj.or.jp/enq/>)を開いてください。
ここでは、過去に発行した学会誌を選択することができます。評価していただく号をクリックしてください。
- ② 当該号の記事が表示されましたら、それぞれの記事について5段階で評価をお願いいたします。この際、一部の記事に対する評価だけでも構いません。
さらに『次へ』をクリックしてください。
- ③ 学会誌全体に対する評価や意見、今後掲載を希望する記事、編集委員会への要望などを記入できる画面が表示されます。回答は意見のある項目のみで結構です。
記入されましたら『次へ』をクリックしてください。
- ④ あなたご自身についておうかがいする画面が表示されます。ここでいただいた情報は、アンケート結果を全体で集計する際にのみ、限定して使わせていただくものです。
- ⑤ 『送信』をクリックすると、終了です。

・②、③のページでは、途中まで入力した回答の内容を保存することができます。詳しくは②、③ページ目の下部にある説明をご覧ください。

・個別の記事について、意見や要望を記入できるページもご用意しております。②のページの理由・コメント欄の『回答する』をクリックしていただくと、記入画面が表示されます。こちらにもご回答していただければ、学会誌の方向づけにいっそう役立てることができると編集委員会では考えています。

解説

高速炉熱流動・安全評価ロードマップの概要と今後の活用に向けて

「高速炉熱流動・安全評価」特別専門委員会

環境・資源制約が大きい21世紀のグローバル経済は、化石燃料で維持することは極めて困難である。次世代軽水炉の建設・運転のみならず、新興国の中国・インドに後れを取ることなく、ナトリウム冷却高速炉開発を力強く推し進めなければならない。「高速炉熱流動・安全」特別専門委員会報告書の熱流動・安全評価ロードマップを中心に、国家基幹技術として国際標準を目指す日本型高速炉技術開発の目標、課題および大学の役割を解説する。

I. はじめに

東側ブロックの崩壊から20年、21世紀のグローバル経済は環境・資源制約が大きく、化石燃料で維持することは極めて困難であることが誰の目にも明らかになってきた。中国を始めとする新興国のエネルギー需要が順調に伸び、供給とのギャップを生じた場合、大規模なエネルギー危機が発生する可能性さえある。第4世代炉としてのナトリウム冷却高速炉開発の重要性が一層増し、開発を加速しなければならない時代に入った。

最初に、2009年に米国を抜いて二酸化炭素排出量で世界トップに立った中国の輸送部門に注目して、エネルギー需要と原子力発電所の建設ラッシュに触れたい。中国の自動車保有台数はすでに6,000万台を超え、日本の保有台数を抜くのは時間の問題となっている。経済活動が順調であれば、1/4世紀後には3億台まで増加し、約4人に1人が所持する時代を迎えるという予測もある。2009年、環境面から中国政府は、北京、上海など13都市をハイブリッド車、電気自動車(EV)などの電動自動車のモデル都市とし、タクシー、バス、営業車を電動自動車のモデルとした場合の購入資金補助を決めた。2010年にはモデル都市を20に拡大し個人購入にも補助を始める見込みである。

このような流れは、既存の自動車技術で日本に20年の遅れを取っているといわれる中国企業が「動く家庭電化製品」と形容されるEVで世界市場に打って出る戦略に繋がる。すなわち、EV用充電インフラ整備の課題を、中国大都市の大気汚染抑制・クリーン電力供給対策として解決し、そこで養われたノウハウを生かし新興国価格

で世界市場を狙える。2010年代は、中国政府・中国企業が“環境保全、エネルギー安定供給、世界産業育成という目標を同時に解決する戦略”を貪欲に進める時代となる。

この中核になる稼働中の原子炉は11基、912万kW、発電設備構成比で1%であるが、現在、21基、2,362万kWが建設中で、許可済の計画は27基、2,970万kWに及んでいる。合計した設備容量は、中国国務院の「原子力発電中長期発電計画(2005-2020年)」に掲げる目標4,000万kWを大きく上回り、10年以内に日本の設備容量を超えて6,000万kWに拡大する。さらに、進行中の三門発電所と台山発電所での第3世代炉AP1000(125万kW)とEPR(175万kW)の建設は、運転経験を積みその後の国産化という世界トップレベルでの拡大路線に基づいている。

その先の中国の高速炉開発はどうか。ロシアが14年に高速実証炉BN 800(880 MWe)の運開を予定している。資金的に潤沢な中国はこの実証炉技術に高い関心を示している。すなわち、10年に見込まれているNa冷却高速実証炉CEFRの運転開始に続き、建設ラッシュで設備容量が急拡大している軽水炉への燃料の安定供給も視野に入れて、ロシアの実証炉技術を活用した“2010年代末実証炉運転開始計画”を検討中である。

加えて、インドは最大16基の軽水炉建設(VVER 1000)を計画しており、米国とはIAEA監視下の民生用再処理工場建設の交渉を進めている。並行して、2012年に高速原型炉PFBR(500 MWe)の運開を予定しており、その実績を踏まえて2020年以降に同規模の安全性・経済性を向上させた商業炉の建設を計画している。

このように見てくると、東側ブロックが崩壊しどん底にあった1990年代中から始まった高速増殖原型炉「もんじゅ」の運転停止は、日本の高速炉技術の蓄積とリードにとって“大きな損失の15年”であったことがわかる。先進的な大型技術開発では“継続こそが力なり”である。エ

The Outline of Road Map for Thermal-hydraulics and Safety Evaluation in FBR Development and Its Utilization : Special Committee on Thermal-hydraulic and Safety Evaluation of Fast Reactor.

(2010年 6月18日 受理)

エネルギー資源小国日本は、選択と集中で高速炉の開発を加速すべきであり、ロードマップが必要な所以である。

本解説は、このような新興国の躍進と将来展望を見据えて、熱流動部会員を中心に取りまとめた「高速炉熱流動・安全」特別専門委員会報告書の要点を紹介したものである。特に、新興国の中国・インドに後れを取ることなく我が国の国家基幹技術である高速炉開発を力強く進めていくため、熱流動・安全評価ロードマップを中心にその道筋を解説した。併せて、次代を担う大学院生に国際標準を目指す日本型高速炉技術開発の目標、課題および大学の役割を理解して頂くことも意図した。

(北海道大学・杉山憲一郎)

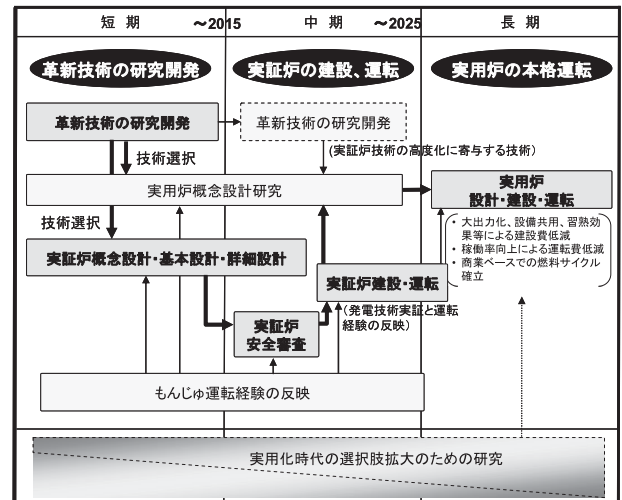
Ⅱ. 高速炉の開発ロードマップ

高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT プロジェクト) では、近い将来のグローバルニーズに適合するため、安全性と信頼性の確保を前提として、高速炉の特徴を活かしたウラン資源の有効利用と超ウラン元素のリサイクルによる環境負荷低減の能力を発揮しつつ、次世代の軽水炉と経済的に競合しうる概念として、先進的な大型の2ループ高速炉プラントの設計概念 (JSFR) を設定し、これを実現するための革新技術の開発とプラント設計研究を進めている。本専門委員会では、FaCT プロジェクトにおける JSFR の開発計画に基づいて、高速炉実用化に向けた開発ロードマップについて検討し、高速炉の熱流動と安全評価の分野についての課題を把握して整理した。

1. 高速炉の開発ロードマップ

巨大技術である原子力の技術開発を進めるにあたっては、開発の対象となるプラント像とそれを支える技術課題を明確にし、これを産官学の関係者で共有するとともに、次世代を担うことが期待される若手研究者たちにアピールしていくことが重要である。また、プロジェクト全体に一貫性があり、かつ、継続的に実施され、その状況が把握できることが重要である。そのための一助となることを目的として、高速炉実用化に向けた開発ロードマップを検討した。その概念を第1図に示す。

当面は、JSFR の成立性に係わる主要課題に重点的に取り組むことが重要であるが、もんじゅに続く実証炉の実現に向けては、より広範かつ詳細な設計、評価に加えて、安全審査に向けた設計評価指針類の整備、評価手法の検証整備、工事認可に向けた技術基準類の整備等が必要であり、これらの活動における学協会の寄与が期待される。また、実用化までのタイムスパンが約40年に及ぶことから、新たな着想や他産業も含めた技術進歩を取り入れた、より革新性の高い技術の導入も視野に入れておくことが重要である。JSFR では多くの革新技術を取り入れているものの、その設計技術の基礎はもんじゅで開



第1図 高速炉実用化に向けた開発ロードマップ

発された技術に根ざしており、もんじゅの今後の運転によって得られる発電プラントとしての経験は、実証炉の設計、建設、運転のための基礎となる情報を与えるものであり、高速炉実用化に向けて極めて重要である。

基幹電源としての高速炉開発の重要なマイルストーンとしては、2025年頃までの実証炉の運転開始、2050年前での商業炉導入が目標として設定されている。また、より短期的には、実用施設およびその実証施設の概念設計並びに実用化に至るまでの研究開発計画を2015年に提示することを目指すこととしている。このように、実用化までの研究開発期間が長期にわたることから、高速炉実用化に向けた開発ロードマップは、主として革新技術の研究開発を行う2015年頃までの短期、実証炉の設計、建設、運転を目指す2025年頃までの中期、実用炉の本格導入を目指す2025年頃以降の長期の3つのタイムスパンに分けて整理した。

短期フェーズでは、JSFR の概念成立性に係わる主要な技術課題を中心として研究開発を行い、その結果に基づいて採用すべき技術の採否を判断するとともに、不採用とする技術については代替となる技術の適用性について検討するとともに必要となる研究開発計画を策定する。また、この技術採否判断の結果を反映して、実用炉および実証炉の仕様を提示する。

中期フェーズでは、実証炉の基本設計を実施するとともに、プラントとしての実現性を見通すための大型のナトリウムループ等を用いた流動試験、主要機器・構造の試作等を行い、安全審査を経て建設、運転を行っていく。実証炉の設計・建設・運転にあたっては、もんじゅの経験によって得られたプラント技術を反映することが重要かつ不可欠である。

長期フェーズについては、実証炉の建設、運転が実現した以降となることから、実証炉の技術を基盤としつつ、さらなる技術の高度化の余地を確保することが適切であり、さらなる高速炉の可能性を追求する観点から、

高効率、高信頼性を追求した新型熱交換器やエネルギー変換システム等のより革新的な技術についても研究を継続することが望ましい。

2. 伝熱熱流動に関する開発課題と取組み

プラント建設コストを低減するためには主要器の物量および建屋容積の削減等が有効である。JSFR では原子炉容器径を出力に比して小さくすることにより、炉上部プレナムの体積が小さくなっている。また、炉内流況が炉心上部構造の影響を受ける。このため、自由液面からのガス巻込み、キャビテーションを伴う液中渦の発生、原子炉トリップ時の温度成層化現象、炉心出口部における高周波の温度変動などが適切に抑制・緩和できるように炉内流動を適正化するための研究開発が行われている。また、製作性と構造健全性を見通せる範囲で熱交換器やポンプなどの冷却系機器の大容量化が図られ、1ループ当たりの容量を増加させてループ数を削減、1次・2次冷却系を2ループ構成として冷却系統が大幅に簡素化されている。2ループ化に伴う課題として、1系統の流量増大に伴う配管の流力振動、1系統の故障や破損による影響の増大に対する安全評価等が摘出されており、それぞれ検討が進められている。崩壊熱除去系には、自然循環のみにより炉心冷却を達成できる完全自然循環型の設計を採用することにより、受動安全の強化が図られている。異常時の炉心冷却の機能を担う崩壊熱除去機能の評価は、高速実験炉「常陽」における自然循環試験や「もんじゅ」における各種プラント動特性試験によって検証された1次元プラント動特性解析モデルを用いて行われているが、そのJSFRの体系への適用性については自然循環崩壊熱除去を対象とした縮尺試験、3次元自然循環評価手法による解析結果との比較などにより検証が進められている(第2図)。このほか、直管型蒸気発生器の伝熱流動特性評価等が行われている。

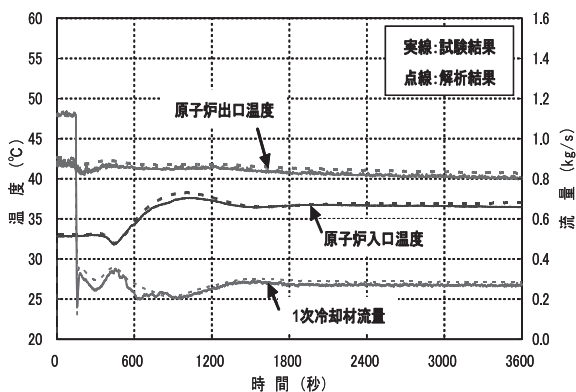
3. 安全評価に関する開発課題と取組み

JSFR では炉心安全性の向上を図るため、仮に安全保

護系の不作動により炉停止に失敗するような事態を想定しても、炉心冷却材温度上昇により制御棒を落下させる自己作動型炉停止機構(SASS)を採用し、仮に安全保護系信号の不作動により原子炉停止に失敗するような事態を仮定しても、冷却材温度上昇によって受動的に制御棒が落下し、炉心損傷を防止する設計としている。SASSの設計技術は、種々の材料試験や炉外での応答測定や耐熱過渡試験、常陽での保持力等の機能確認を含む信頼性実証試験等を経てほぼ整備された段階にある。JSFRでは仮想的な炉心損傷事故時にも、有意な機械的エネルギーが発生することなく原子炉容器内で事象終息できることをめざしている。熔融燃料が大規模なプールを形成する前に熔融燃料を炉心領域外に流出させるため、内部ダクトを設けた燃料集合体概念が取り入れられている。さらに、燃料デブリの受皿を原子炉容器底部に設置するなど原子炉構造に工夫を施し、損傷炉心物質を原子炉容器内にて保持冷却可能な設計としている。これらの設計方策の有効性を確認するための研究開発が行われている。熔融燃料の炉心外への流出挙動については、カザフスタン共和国にある安全試験炉 IGR を用いた EAGLE と呼ばれる試験において、実燃料を核加熱により熔融させ、炉心外へ流出させることに成功している。このほか、ナトリウム漏えい対策、蒸気発生器の水漏えい挙動評価技術等が開発されている。

4. もんじゅの研究開発と高速炉実用化への貢献

我が国初の発電する高速増殖炉であるもんじゅについては、原子力政策大綱において、早期に運転再開し、「発電プラントとしての信頼性の実証」を10年程度以内を目的に達成することとされている。発電プラントとしての信頼性の実証は「安全・安定運転の達成」、「性能試験」、「原型炉技術評価」から構成されている。計画に従ったプラントの安全・安定運転を運転開始後10年程度以内を目的に行い、運転管理要領類の整備、定期検査・保守方法の確立、ナトリウム漏えい等に対する異常時対応手順書の整備、異常発生後の処置要領の整備が行われる。性能試験は、炉心確認試験、40%出力プラント確認試験、出力上昇試験の3段階で実施される。炉心確認試験では、臨界から定格出力までの炉心・遮へい特性の確認、すなわち制御棒値の測定、反応度係数の測定等が行われ、実際の炉心特性が設計の範囲内にあることが確認される。「原型炉技術評価」において、前回の性能試験のデータと今回実施する性能試験のデータとを合わせて、もんじゅ炉心の核熱設計、遮へい設計の手法の検証が行われるとともに、最新の研究開発成果に基づく核データおよび評価手法の検証が行われる。また、40%出力プラント確認試験および出力上昇試験で得られるデータに基づいて、系統および機器の性能評価が行われるとともに、プラント動特性解析コードの検証が行われる。以上の成果



第2図 自然循環崩壊熱除去機能の評価
(縮尺水試験と解析との比較)

は実証炉・実用炉の設計・運転等に活用される。

(三菱FBRシステムズ(株)・久保重信,
日本原子力研究開発機構・飛田吉春)

Ⅲ. 安全規制活動における安全研究ロードマップ

1. もんじゅ運転再開

2010年5月8日午前10時36分、高速増殖原型炉「もんじゅ」は、2次主冷却系配管でのナトリウム漏洩事故以来、14年5ヶ月ぶりに臨界に到達した。現在、日本原子力研究開発機構(JAEA)は、1%以下の核出力で1次および2次主冷却系を運転し、余剰反応度や制御棒の炉停止余裕などの安全上重要な炉心核特性を把握する目的で、約3ヶ月にわたる炉心確認試験を実施中である。原子力安全・保安院(NISA)は、炉心確認試験を始めとして、今後の40%出力および100%出力試験など起動試験全体を立会い検査の対象として選定し、もんじゅの安全な運転が確保されることを厳格に確認する計画である。

2. 高速炉の安全規制におけるJNESの役割

JNESは、わが国のTSO(Technical Scientific Support Organization)として、国が行うもんじゅの安全規制を多面的に支援している。もんじゅの燃料は、長期保存によって²⁴¹Puが崩壊し、余剰反応度が低減したため、2006年には、Pu富化度を増加し燃料組成を変更した炉心の安全審査が行われた。JNESは、²⁴¹Amの増加によってボイド反応度が増加する効果や、炉心流量減少時反応度抑制機構喪失事象(ULOF)の起因過程では燃料蒸気による機械的エネルギーが生じないことなどを、最新知見に基づいて独自に評価し、設置許可変更申請書の記載事項が妥当であることを確認した。

JAEAは、2008年にアクシデントマネジメント整備報告書(AMG)を国に提出した。JNESはレベル1およびレベル2 PSAを行い、炉心損傷頻度(CDF)および格納容器機能喪失頻度(CFF)が、発電炉の性能目標の指標値(CDFが 10^{-4} /年程度、CFFが 10^{-5} /年程度)を十分下回り、JAEAが行ったAM策が妥当であることを確認した。また、14年以上にわたり長期に保管した機器の故障がCDFに与える影響をFV/RAW重要度などのリスク指標を用いて評価し、JAEAが行った長期保管設備の検査体制の妥当性を確認した。

3. 高速炉の規制課題

上述の通り、高速炉安全規制の第1の課題は、もんじゅの起動試験における安全確保である。起動試験では、蒸気発生器の伝熱管破損抑制方策の妥当性確認試験やプラント動特性・炉物理試験が実施される予定であるが、JNESは、これらの試験の妥当性を評価する手法整備をほぼ完了している。一方、保安規定の運転制限条件(LCO)を逸脱した場合の修復必要時間、機器の重要度

分類を考慮した保全計画、保安活動総合評価など、リスク情報を用いた評価が必要である。特にもんじゅの場合、ナトリウム漏洩事象の社会的インパクトが大きいことから、炉心損傷確率以外の適切な指標選定が課題である。また、耐震バックチェックの一環として、レベル1およびレベル2 PSAによる残余のリスク評価が必要であるが、マルコフ連鎖モデルを用いた現象イベントツリーの定量化手法や炉心損傷挙動解析モデルと連携した格納容器応答挙動評価手法など、PSA手法の高度化が課題となる。

高速炉安全規制の第2の課題は、高密度燃料を用いたもんじゅ高性能炉心の安全審査の準備を確実に行うことである。現在、JNESでは、JAEAの事故解析結果の妥当性評価の観点から、地震時集合体3次元群振動評価手法やULOF起因過程とその後の炉心損傷過程とを整合して解析できる統合炉心損傷挙動評価手法の開発など、並列計算機の導入と併せ手法の高度化を図りつつある。また、燃料機械設計の妥当性評価の観点から、高速炉燃料技術基準の整備と燃料照射挙動解析コードの整備が必須課題となる。

高速炉安全規制の第3の課題は、もんじゅ次期炉(高速炉実証炉)の安全審査要件を整備することである。特に、技術的には発生するとは考えられないULOFなど5項事象の設置許可における位置づけ、ナトリウムと同族であるため気相への移行量が格段に大きいセシウム(Cs)の立地評価での位置づけなど、見直すべき課題が散見される。また、実用化時代の高速炉は、発電のみならず、超長半減期核種の消滅や水素製造などの多目的利用に供せられる可能性が大きいことから、従来の原子力安全規制概念を超えた幅広い審査要件の検討が重要である。

4. 安全研究ロードマップ

本委員会では、上述した高速炉の安全規制に係る研究課題を、①設計・建設段階に必要とされる研究、②運転段階の安全確保に必要な研究、③規制の高度に必要なとされる研究の3カテゴリーに分類し、現行もんじゅ、もんじゅ高性能炉心、もんじゅ次期炉の各システムへの反映先と研究工程、重要度と緊急度、大学での実施可能性などを整理し、広く原子力学会員に訴求できるロードマップとして整理して提案した。

(原子力安全基盤機構・遠藤寛)

Ⅳ. ロードマップに対する大学の期待と貢献

高速炉の開発は、研究開発機関、規制機関、産業界が一体となってなされるところであるが、そこに大学がどのように関与するのかという観点から提言をしたい。

日本原子力学会「2010年春の年会」の伝熱・流動および原子炉安全工学のセッションにおける口頭発表件数は合

計93件であった。高速炉に関する研究発表は42%(39件)を占めるが、大学単独、つまり大学の自主的な研究発表はわずか2件である。また、企業等との共同発表を含めても8グループから11件である。文部科学省の資料「原子力人材の育成について(平成22年3月)」によれば、原子力関連の学科、専攻を持つ大学数は15、専攻は持たないが原子炉伝熱・流動、安全研究を行う大学数も同数程度と考えられる。高速炉の研究・開発は国家基幹技術、魅力的で夢があるプロジェクトである。しかるに高速炉に関する大学の研究発表は実に少ない。特に自主的な研究は2件しかない。高速炉の研究・開発において大学の存在感は薄く、高速炉開発に対する大学の関心が低いということであるが、一方で、プロジェクトに大学が参加しにくい構造的な問題はないだろうか。

Branscomb 元米国大統領科学技術顧問はロードマップを“A consensus of articulation of scientifically informed vision of attractive technology futures”と定義する。ロードマップは合意形成ツールであり、研究開発の方向性を示すものである。その効能として関係者の結束の促進、技術開発重複の防止、大規模プロジェクトの可視化、研究者や技術者のミッションの明確化、社会にビジョンや公約の明示と理解がなされる。またロードマップは自己のテーマの選定・検討に役立つという意見が多い。大学人にとって技術の将来の方向性を理解し研究ニーズの動向を把握し研究を提案する、すなわち産学連携のコミュニケーションツールとして、ロードマップは機能するのである。

高速炉の研究開発に大学が加わることにはいくつものメリットがある。まず、大学の研究リソース(伝熱・流動、安全分野の数百人の研究者)を利用できる。大学が先行的にオフロード技術を研究するため、革新的な技術の導入に伴う研究開発リスクを低減できる。目標とプロセスを産学官が共有すれば有機的な連携組織体となりうる。大学が関与することにより学会などの中立的活動が容易となり説明性が高まること、多様な観点が導入されることの利点がある。そこで、大学における高速炉研究者の拡大のために、高速炉の魅力・ニーズを大学に伝えること、研究インフラストラクチャ(施設、ソフト、資金)を充実させること、研究交流の場を適切に設けることが必要である。ニーズと資金が明示される研究課題は大学にとって魅力的である。研究ニーズが明確であれば問題意識をもって研究に取り組む人材の育成が進み、第一線で活躍する産業界の研究者や技術者に指導を受ける

ことができる。大学の研究テーマには広がり生まれ、学生への研究動機付けができるとともに、研究資金の獲得の可能性が高まる。両者の交流は多様な価値を生み出すのである。

高速炉開発ロードマップは、その開発の目標とマイルストーン、そこに至るプロセスを明示することによって、研究・開発ニーズ共有化を可能とする。そして大学と産官が共通の認識と方向性を持つためのコミュニケーションツールとなる。これは、ロードマップ策定のプロセスからの合意形成により達成できる。産官は研究ニーズを継続的に発信すること、大学はロードマップを参照しつつ研究動向とニーズを把握し、自発的な研究(シーズ研究)を開拓すること、さらに研究成果の技術評価と共同研究推進の仕組み、研究ニーズとシーズのマッチングを行う情報交換の場を整えるべきであり、そのためにロードマップが活用されることを期待する。

(大阪大学・山口 彰)

V. おわりに

当学会「高速炉熱流動・安全評価」特別専門委員会において策定された開発側ロードマップとともに、今後のもんじゅおよび実証炉のための規制の高度化に必要な安全研究ロードマップ、さらに大学の高速炉熱流動・安全研究の活性化にこれらをどのように活用し、貢献していくかなど技術ロードマップと産学官連携の基盤を構築した。高速増殖原型炉「もんじゅ」が14年間の停止期間を経て、再び臨界に至り、順調に炉物理試験が進捗している現在の状況を踏まえ、実証炉につなげるための安全研究をロードマップを軸にして展開し、ローリングによりこれらを具体化する必要がある。

(原子力安全基盤機構・笠原文雄)

—参考資料—

- 1) 「高速炉熱流動・安全」特別専門委員会、「高速炉熱流動・安全」特別専門委員会報告書、2010年3月。
- 2) 日本原子力研究機構、日本原子力発電、高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCTプロジェクト)フェーズI中間とりまとめ、平成21年7月。
- 3) 日本原子力研究機構、「もんじゅ」における研究開発計画について、平成21年12月(第47回原子力委員会資料)。
- 4) 原子力安全基盤機構、平成20年度原子力安全基盤機構年報、平成21年10月。

気候変動問題解決の切り札として、原子力を どう位置付けるか？

炭素価格で市場にシグナルを

原子力委員会委員長代理 鈴木 達治郎

気候変動問題解決の切り札として、原子力への期待は世界的に広がっている。温暖化対策として有効に機能するためには、OECD 国際エネルギー機関(IEA)などの予測によると、2050年までに現在の3倍以上の規模拡大が必要とされている。ただ、必要なのは原子力だけではなく、再生可能エネルギーや効率改善など、すべての対策技術を導入・普及する必要がある。それらの普及には炭素価格を導入し、市場にシグナルを送ることが最も効果的である。原子力発電も、世界平均コストで見ると、必ずしも競争力が明確ではないため、炭素価格導入により、相対的競争力を高めることが有効と見られる。さらに、原子力に固有な課題として、安全性と社会受容性、廃棄物と使用済み燃料管理問題、核不拡散・核セキュリティの3大課題を克服することが不可欠である。

I. 温暖化問題と原子力カルネッサンス

2009年12月現在、世界には435基、373 GWeの原子力発電が稼働中である。1990年代以降、欧米において原子力発電所の新設がなかったこともあり、原子力発電の伸びは停滞気味であった。しかし、ここ数年、世界中で新設の動きが目立ち始めた。世界原子力協会(World Nuclear Association)の調べ¹⁾によると、建設・計画中の原子力発電所は28ヵ国、189基(199 GWe)に上るとされている。なかでも、米国(19基)、ロシア(37基)、中国(90基)、インド(15基)など、大国で新設の計画が動き出しており、さらにベトナム、UAE、タイ、インドネシアなど、新たに原子力を導入する国も増えている。この結果、国際原子力機関(IAEA)²⁾では、2030年までに480～730 GWeまで伸び、OECD/NEA³⁾は2050年までに600～1,450 GWe程度まで急成長するとみられている。これらの高い期待が、原子力カルネッサンスと呼ばれる現象に繋がっている。この背景には、欧米先進国を中心として、既存原子力発電所の多くがまもなく更新時期を迎えることも考慮しておく必要がある。

2009年に発表されたSchneider & Frogattの報告⁴⁾によると、2025年までに236基(186 GWe)の原子力発電所が運転開始から40年を迎えるので、更新することができなければ、世界の原子力発電所は逆に大幅な減少に繋が

る可能性もあると見ている。

一方、温暖化対策として、原子力発電が有効な貢献をするためには、どの程度の伸びが必要なのだろうか。2003年に発表された米マサチューセッツ工科大(MIT)の報告「原子力の未来」⁵⁾によると、2050年までに1,000 GWe、すなわち現在の3倍程度の伸びが必要だとしている。2008年に発表されたOECD/IEAの報告書⁶⁾では、2050年までに世界の温暖化ガスを半減させるためには、原子力発電所を今から2050年までに毎年24～32基建設することが必要(2050年に1,250 GWe程度となる)とされている。

過去、最も急成長した70年代でも年間20基程度の伸びであったことを考えれば、これは決して容易な目標ではない。これが実現しないと、世界の総発電量に占める原子力発電のシェアは現在の16%程度から低下してしまう可能性もあり、温暖化問題克服のために原子力発電の急成長が期待されているわけだ。

II. 温暖化削減コストカーブと原子力の位置づけ

原子力への期待はこうして高まっているが、これはその他の温暖化対策技術に対しても同様である。上記のIEA報告書にもあるように、大幅な温暖化ガス削減には、今考えられるすべてのエネルギー選択肢が必要だ。なかでも、効率改善(省エネ)技術は最もコスト効果が高い選択肢といわれ、IEAの予測で約半分(49%)が省エネ技術による貢献と期待している。再生可能エネルギーの貢献も大きく(21%)、原子力は6%程度と期待されて

Role of Nuclear Power in Solving Climate Change Issues ; Send a signal to the market by putting price on carbon :
Tatsujiro SUZUKI.

(2010年 6月21日 受理)

いる。

このように、すべての選択肢をうまく組み合わせていく必要があるが、その組合せの基準のひとつとなるのが、「温暖化ガス限界削減費用」(温暖化ガス1トン削減するのに必要な追加費用)と見られている。第1図は、マッキンゼーコンサルティング会社が作成したもので、横軸に潜在的なCO₂削減ポテンシャル、縦軸にCO₂削減限界費用をとって、各削減対策を比較した「マッキンゼーの温暖化ガス削減コストカーブ」と呼ばれている⁷⁾。縦軸でマイナスとなっている場合は、リターンが期待できる技術、すなわち省エネ技術のように投資したあと、エネルギーコストが節約できてトータルで見ると利益が期待される技術、ということになる。

この図を見ると、原子力は、真ん中より右手、コストは10ユーロ/tCO₂程度となっている。この意味するところは、世界平均で見ると原子力は市場メカニズムでの普及は難しいことになる。ただし、このカーブは世界全体の平均コストで見ているので、地域や国によって当然異なると思われる。ではどうすれば、このように「コスト高」のエネルギー技術を普及させることができるのだろうか。

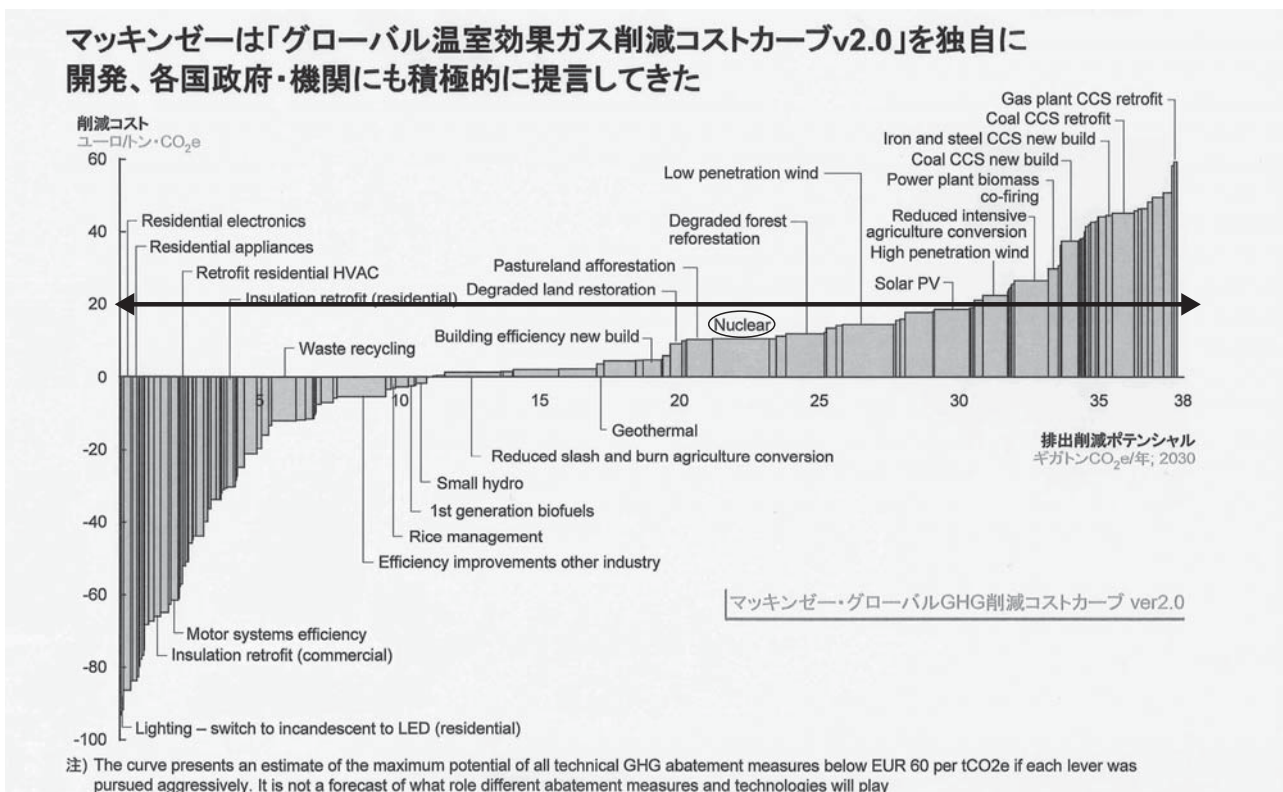
Ⅲ. 炭素価格で市場にシグナルを

先ほどのコストカーブに、トン当たり20ユーロの線を引いてみよう。これは、市場に20ユーロ/tCO₂の炭素価格がついたことを意味する。そうすると、原子力を含め

多くの技術の削減費用が「マイナス」になることがわかる。こうなると、市場メカニズムで多くの温暖化対策技術が普及することにつながる。マッキンゼーは、これを「炭素価格による市場へのシグナル」とよび、「環境ビジネスが利益を出すことに繋がる重要な政策」と見ている。

米国では、平均原子力発電コストが8.2c/kWhと推定されており、石炭火力(6c/kWh)、天然ガス火力(6.5c/kWh)と比べ、競争力がないと見られている。しかし、\$25/tCO₂の炭素価格が市場に導入されると、石炭火力は8.2c/kWh、天然ガス火力は7.5c/kWhとなり、原子力も相対的な競争力が高まると見られている。同様に、英国では、すでに排出量取引制度が導入されており、10~20ユーロ/tCO₂で取り引きされている。その結果、原子力発電は既に競争力があると期待されており、英国政府は原子力発電に特別な政府支援はしないとの政策を打ち出している。

日本では、原子力は石炭や天然ガスに比べて競争力があると見られているが、温暖化対策としてみた場合、どのような位置づけとなるだろうか。まず、既存の発電所の稼働率を向上させる対策は、ほとんど追加投資が必要ないので、削減費用コストはマイナスとなり、最もコスト効果の高い選択肢となる。さらに、新設の場合でも、石炭や天然ガス火力を代替すると考えると、競争力があるためやはり削減費用はマイナスとなり、コスト効果が高い有力な選択肢と位置づけられる。削減ポテンシャル



第1図 マッキンゼーによる世界の温暖化ガス削減費用コストカーブ(2030年まで)

出所：McKinsey & Co., Greenhouse Gas Cost Curve v.2.0. 2009

としては、稼働率を現在の65%から85%まで向上させると、約5,000万トンの削減(1990年比4.0%)、新設9基分は約6,000万トン(1990年比4.6%)の削減に繋がると推定されており、原子力だけで1億1千万トン(1990年比8.6%)の削減を達成できると期待される。これらは、炭素価格が導入されなくともコスト効果が高い選択肢として進められると期待される。

しかし、炭素価格が導入されると、そのコスト効果がさらに明白に認識されることとなり、原子力をはじめ他の温暖化対策技術にとっても大きな促進要因となることが期待される。世界レベルでも京都メカニズムで、すでに炭素価格がクレジットとして取り引きされているが、現在、原子力発電は京都メカニズムでのクレジットとして認証されていない。原子力の世界的普及を考えるとすれば、原子力による温暖化ガス削減分もクレジットとして取り引きできるようになることが望ましい。

そのような海外とのクレジット取引が導入されれば、現在、日本政府が検討している「2020年までに90年比25%削減」も、経済成長にそれほどマイナスの影響を与えずに達成できる可能性がある。国立環境研究所、日本経済研究センター、慶応大学の計算によると、国内だけで削減を達成しようとする、経済成長率には-3.1~-3.6%という大きな負の影響がでると推定されている。しかし、これを海外から15%クレジット(50ドル/CO₂)を購入することができるとすれば、その影響は-0.8~-0.9%程度に抑えられると推定されている。

このように、日本も含めて、排出量取引が導入されれば、原子力発電を含む多くの温暖化対策にとって促進要因となり、経済成長と環境の両立も可能となると期待される⁸⁾。世界レベルで原子力を推進するのであれば、国内で排出量取引制度に反対することは、決してプラスにならないことを、関係者は理解すべきであり、炭素価格を市場に導入することをむしろ歓迎すべきなのである。

IV. 3大課題の解決が不可欠

しかし、原子力発電の世界的普及は、経済性だけで達成されるわけではない。これまで、過去に高い伸びを期待されながら、実現できなかったという実績もある。今後、原子力が世界規模で高い伸びを実現するためには、以下の3課題の解決が不可欠と思われる。

(1) 安全性と社会受容性

1986年の旧ソ連でおきたチェルノブイリ発電所事故以来、世界の原子力発電所のパフォーマンスは改善しており、安全性も向上してきている。しかし、今後は新たに原子力を導入する国も増加していくことを考えると、さらに安全性を高めた原子炉の開発や、発電所の安全運転確保を含む安全文化の普及が不可欠であろう。世界中、どこで深刻な事故が起きても、世界の原子力プログラムに深刻な影響を与えることを再確認して、原子力の普及

に努めるべきだ。

一方、原子力関連施設の立地や運転には、それが社会に受容されていることが必要である。社会に受容されるためには、上記の「安全なパフォーマンス」が不可欠である。

(2) 放射性廃棄物と使用済み燃料の管理

次に、重要な課題は、放射性廃棄物と使用済み燃料の管理である。100万kW級原子力発電所からは毎年25~30トンほどの使用済み燃料が排出される。再処理するにせよ、直接処分するにせよ、安全に貯蔵管理することが発電所の円滑な運転には不可欠である。したがって、原子力発電を導入あるいは拡大していくためには、あらかじめ使用済み燃料の貯蔵管理能力を確保しておくことが望ましい。

再処理するにせよ、直接処分するにせよ、高レベル廃棄物の最終処分を実施することが必要となる。しかし、最終処分場の計画を着実に進めていく間も、その貯蔵管理が必要となる。今後50年間という温暖化対策の時間軸を考えると、最終処分場が完成していない国もまだ存在する可能性が高い。処分場の操業が実現するまでの安全管理を確保しておくことが不可欠となる。もちろん、最終処分計画の着実な進展もこの中に含まれる。

(3) 核不拡散・核セキュリティ

最後に、原子力発電の拡大が、核拡散、および核テロリズムのリスク拡大に繋がらないように、核不拡散・核セキュリティの確保が必要だ。ただし、原子力発電所の建設だけでは、核拡散・テロリズムのリスクをそれほど高めるわけではなく、最も注意すべきは、軍事転用が可能な核物質(高濃縮ウランとプルトニウム)およびそれを生産可能とする施設(濃縮・再処理)とその能力の拡散である。高濃縮ウランやプルトニウムの安全な防護・管理、さらにはそれら在庫量の削減、そして機微な核燃料サイクル施設と技術の拡散を抑制することが、最も重要な課題ということになる。国際原子力機関(IAEA)でも検討されている核燃料サイクルの多国間アプローチ(MNA)など、新たな枠組みを構築していくことも必要と考えられており、わが国も積極的に関与していくことが望まれる。

—参考資料—

- 1) 原子力委員会 国際専門部会中間とりまとめ 参考資料3 「原子力の平和利用にかかわる内外の状況」, 2009年.
http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/kokusaisenmon/houkoku/091225_sankou.3.pdf
- 2) Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030, 2008 Edition, IAEA RDS-1.
- 3) OECD/NEA, Nuclear Energy Outlook 2008.
- 4) M. Schneider, A. Frogatt, The World Nuclear Industry Status Report 2009, Aug. 2009.

http://www.bmu.de/files/english/pdf/application/pdf/welt_statusbericht_atomindustrie_0908_en_bf.pdf

- 5) MIT Interdisciplinary Study, "The Future of Nuclear Power," 2003.

<http://web.mit.edu/nuclearpower/>

- 6) OECD/IEA, "Energy Technology Perspective 2008".
 7) McKinsey & Co., Greenhouse Gas Cost Curve v.2.0. 2009.
 8) 原子力委員会, 成長のための原子力戦略, 2010年5月.
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/kettei100525.pdf>

著者紹介

鈴木達治郎(すずき・たつじろう)



原子力委員会 委員長代理
 専門は原子力政策, 核不拡散政策。

学会誌への投稿原稿の扱いについて —採否に関する判断条件—

編集委員会

学会誌への投稿は、それに先立ち記事提案書(学会 HP に記載)の提出が必要となります。提出された記事提案書は編集委員会で審議し、通過したものについて(投稿)原稿を提出していただくことにしています。

編集委員会では、会員の皆様から寄せられる投稿原稿、投書には、謙虚に耳を傾け誠実に対応するようにしています。

記事の内容については、著者に責任がありますが、学会誌へ投稿された原稿を記事として掲載するかどうかについては、編集委員会が判断いたします。編集委員会が下記のいずれかに該当すると判断した記事提案書(場合によっては、記事提案書に基づき執筆された投稿原稿)については、記事として掲載することをお断りすることになっています。

- (1) 事実を無視し、あるいは歪曲した意見。
- (2) 文章に論理性がなく、意味不明な場合。
- (3) 掲載することにより、学会の品位に傷がつく恐れがある場合。
- (4) 良識に欠けると思われる意見。例えば、個人あるいは組織への中傷・誹謗、一方的な極め付けなど。
- (5) 美醜、好悪に類する判断が求められている場合。
- (6) すでに掲載された記事と同様の内容を繰り返し主張している場合。
- (7) 商業的な広告・宣伝などを目的とする場合。
- (8) 会員にとって掲載する意味がない。
- (9) 内容がタイムリーでない。
- (10) 内容が正しいかどうか判断できない。
- (11) 関係する機関の了解が得られていない。
- (12) 余り期間を空けない同一者からの投稿。

(註1) 記事提案書の審議結果については約1か月で事務局よりお知らせいたします。

(註2) 掲載否の場合、該当事由の番号をお知らせしますが、それ以上の説明は致しません。また、編集委員会に対する常識を欠いた要求*が求められた場合にも返答いたしません。

*例えば、極めて短い期限での返答の要求、守秘義務に反する情報開示を求めたりする場合など。

(2009年7月3日改定)

地球温暖化対策の方向性と原子力発電の役割

持続的な温暖化対策の取り組みに向けて

(財)地球環境産業技術研究機構 秋元 圭吾

2013年以降の国際的な排出削減枠組み・目標の合意を目指して2009年12月にデンマーク・コペンハーゲンで開催された国連気候変動枠組条約の第15回締約国会合では、26ヵ国・機関の首脳による「コペンハーゲン合意」を条約加盟国が「留意する (take note)」という形で何とか決裂を回避するに留まった。国内では2020年の中期目標の議論が行われてきたが、日本政府は、主要国参加の前提条件付きで1990年比25%削減を目標とした。本稿では、これら国内外の温暖化対応の状況を概観し、これに関連した定量的な分析事例を紹介する。その中で、原子力発電に期待される役割についても言及する。そして、環境と経済が両立し、持続的に温暖化防止に取り組むために必要な方向性について論じる。

I. 地球温暖化対応をめぐる国内外の情勢

地球温暖化問題は、国内外において、ますます最重要課題の一つとして取り上げられるようになってきている。主要国首脳会議(G8)でも毎回、最重要テーマとして議論されるようになった。しかしながら、2009年12月に開催された国連気候変動枠組条約(UNFCCC)の第15回締約国会合(COP 15)で見られたように、各国の意見は対立し、全世界的な合意は相当困難な状況が続いている。温暖化問題は各国とも重要視するようにはなっていないが、各国の経済発展段階、経済状況等によって、その度合いは様々である。多目的な政策目標の中で、温暖化対策にどう折り合いをつけていくのかは各国で状況は大きく異なっている。本章では、温暖化問題をめぐる国際交渉および国内対応の状況について概観する。

1. 地球温暖化対応の国際情勢

(1) 地球温暖化対応の主な国際情勢

2007年にインドネシア・バリで開催されたCOP 13において、2013年以降の温暖化防止のための国際枠組み・目標を2009年までに採択するとして「バリロードマップ」が採択された。UNFCCCでの2013年以降の枠組み・目標の議論は、枠組み条約の下部に位置する京都議定書の下に設置された特別作業部会(議定書AWG)に加え、条約の下にもAWG(条約AWG)を設置し、議論が進めら

Overview of Global Warming Mitigation Measures and Role of Nuclear Power ; Toward Sustainable Measures Responding to Global Warming : Keigo AKIMOTO.

(2010年 6月15日 受理)

れた。これにより、京都議定書から離脱した米国や、実質的な削減義務を負っていない途上国についても、国連の下で排出削減への実質的な取り組みの道が開かれることとなった。

(2) COP 15の概要と評価

そしてデンマーク・コペンハーゲンで開催されたCOP 15は、2013年以降の枠組み・目標を合意すべく、数多くの各国首脳も参加し議論を行った。しかしながら、各国の意見対立が改めて顕在化し、26ヵ国・機関の首脳による「コペンハーゲン合意」を条約加盟国が「留意する」という形で何とか決裂を回避するに留まった。

コペンハーゲン合意では、気温上昇を2℃以内に抑制するという科学的知見を認識するとした。EUはこれまで産業革命以前比で2℃以内に抑制することを主張してきた。しかし、コペンハーゲン合意では、「科学的知見を認識する」としかしておらず、目標とはなっていない。しかも、どの時点の気温から2℃以内の上昇に抑制するのかの基準年も明記されておらず、ほとんど意味を有さない合意に留まった。COP 15では、EUはじめ先進国は世界のGHG排出量を2050年までに半減する目標も合意しようとしたが、途上国の強い反対があり、コペンハーゲン合意には記載されなかった。

最大の焦点となっていた2020年の排出削減目標については、UNFCCCの附属書I国(主に先進国)は国別排出総量目標を、非附属書I国(主に発展途上国)は排出削減行動目標を2010年1月末までに提出することが合意された。その他、先進国による途上国への資金援助についても合意がなされた。

これまで、温暖化問題に関する国際交渉は、EUが主導して、UNFCCCの下、ほぼすべての国が参加する枠

組みが志向されてきた。しかし、現実的には200を超える国・地域の利害が衝突する中で、コンセンサス方式が採られる国連の枠組みにおいて決定することは困難であることが、EU首脳を含め、より多くの人が理解するようになった点は注目に値する。「コペンハーゲン合意」は国連の枠組みの中で合意されたものではあるが、26カ国・機関の首脳によって合意されたものにすぎない。また、これを決定する過程もこの問題を象徴するものであった。26カ国・機関の首脳によるものとはいえ、実際には米中2カ国首脳による合意といってもよいものであった。京都議定書は、米国が離脱し、中国は事実上排出削減の義務を負っていないが、この2大排出国の排出量は40%程度を占めており、この2カ国が実質的な排出削減に取り組まなければ実効ある温暖化防止にはほとんどつながらない。そういう意味ではこれまでの枠組み・議論がむしろ適当とはいえないものであり、土壇場に来て、むしろ真っ当な姿になったと評価できるものである。

そして、今後の交渉でどのようになるかは不明瞭であるが、「コペンハーゲン合意」はプレッジ・アンド・レビュー(誓約と検証)の形式となっており(現時点ではレビューの手続きもなく、プレッジに留まっている)、京都議定書のように目標未達成の場合の罰則措置がある枠組みとは大きな違いがある。今後は、各国がプレッジした削減目標の妥当性の議論、罰則措置の議論などが行われるものと見られる。しかし、「コペンハーゲン合意」はこれまでの京都議定書の下で国連が管理する排出クレジットだけではなく、2国間において独自に認証する排出クレジットの利用など、排出削減の柔軟性は格段に大きくなる可能性がある。原子力発電を先進国の支援の下、途上国で建設した場合に先進国のクレジットとして認めること(CDMクレジット化)や、省エネ製品・省エネ機器輸出のCDMクレジット化などが容易になり、実際にも排出削減に大きく寄与する枠組みとなるよう期待もできる。

2. 地球温暖化対応の国内情勢

(1) 中期目標をめぐる国内情勢

日本政府は、2013年以降の排出削減枠組み・目標策定に向け、2008年10月に総理直轄の「地球温暖化問題に関する懇談会」の下に「中期目標検討委員会」(座長：福井前日銀総裁)を設置し、排出削減目標について科学的な分析を行った¹⁾。そこでは6つの選択肢について、国際公平性、長期の排出削減目標との関係、具体的な対策、経済影響等について分析・評価が行われた。その科学的な分析を基に、パブリックコメント、意見交換会などを行った上で、麻生元総理は2009年6月に、国内削減分、いわゆる「真水」として2005年比15%減を2020年の日本の目標とすることを表明した。しかし、政権が変わって、鳩

山前総理は2009年9月の国連会合で、前提条件付きながら1990年比25%減(2005年比では30%減)を目指すと表明した。そして、温暖化問題に関する閣僚委員会・タスクフォースにおいて25%減の経済影響分析等が実施された。

そして、2010年3月に、長期目標として1990年比80%減、2020年の中期目標を前提条件付きながら1990年比25%減などを含んだ「地球温暖化対策基本法案」が閣議決定された(2010年6月に一旦廃案)。なお、1990年比25%減のうち、「真水」として、どの程度を目指すのかについては、原稿執筆時点では明らかになっていない。

(2) 温暖化対策の国内制度

政府の中心的な対策は、省エネ法(正式名称は「エネルギーの使用の合理化に関する法律」)であり、1998年に大幅に改正が行われ、自動車や家電などのエネルギー消費効率について、トップランナー方式を導入した。トップランナー方式は、現在商品化されている製品のうち、もっともエネルギー効率が優れているものの性能水準に配慮して省エネ基準を設定するもので、世界的に見ても大変厳しい対策となっている。また、2008年には、産業部門と比べて削減が進んでいなかった運輸部門や民生部門へ適用範囲を拡大する改正が実施された。

再生可能エネルギーの普及については、2003年に施行された「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」(通称、RPS法)によって行われてきた。これは電気事業者が一定割合以上の新エネルギー利用を義務付けるものである。

上記に加えて、日本経済団体連合会(以下、経団連)傘下の企業は、経団連自主行動計画によって、京都議定書の期間2008~2012年の削減目標達成に取り組んできた。名称は自主行動計画であるが、政府の審議会で進捗状況の確認が行われるなど、実質的には政府との協定のような形になっている。しかも排出削減目標が未達になりそうな電力、鉄鋼業界は、目標が達成されるように海外の排出クレジットを3.1億トン(約束期間1年あたりでは6千百万トン)購入するまでしており、事実上、相当強い拘束力を有していると見ることができる。

一方、2010年3月に閣議決定された「地球温暖化対策基本法案」には、環境税、国内排出量取引制度の導入が言及されている。また、再生可能エネルギーの全量固定価格買い取り制度の創設も言及されている。しかし、これらは日本における既存の制度や税制の中で、追加的な排出削減効果の大きさや国際競争力など、総合的な視点から深い検討と議論が必要と考えられる。

II. 地球温暖化対策の分析・評価

本章では、長期および短中期それぞれの視点から、地球温暖化対策についての分析・評価を紹介する。長期的には特に技術開発・普及の方向性を、短中期については

温暖化対応の具体的な対策と各国の排出削減目標達成の削減費用についての分析・評価を示す。

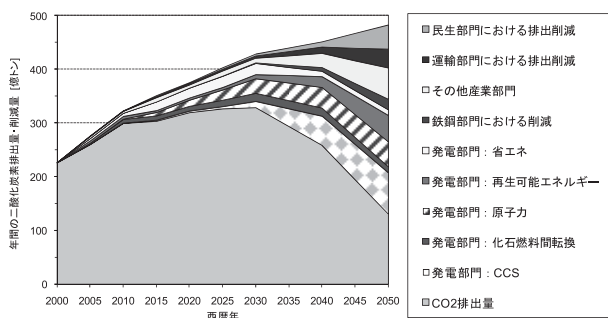
1. 長期の分析

(1) 長期の排出削減目標の意味

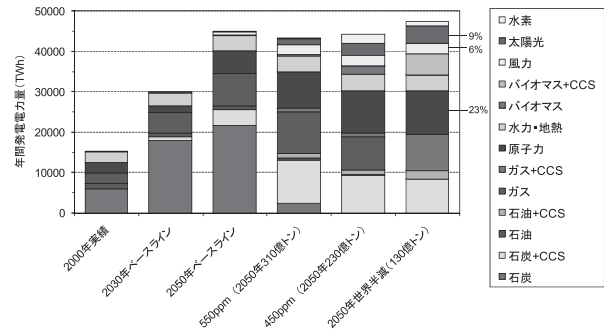
温暖化防止の長期目標としては、EUは1996年に産業革命以前からの気温上昇を2℃以内に安定化するという目標を打ち出して以来、国際的にこの目標がよく議論されている。IPCCの第4次評価報告書において整理された排出削減シナリオにおいて最も低い大気中温室効果ガス濃度に安定化するシナリオも2℃上昇のシナリオとなっている。しかし、これはIPCCなどの科学の要請という言われ方がしばしばされるが、IPCCはその報告書において科学的に決めることができない問題であると、明確に否定している。あくまで政治合意事項である。先進国首脳会合では、産業革命以前からの気温上昇を2℃以内に安定化する目標とおおむね近い目標である世界の温室効果ガス排出量を2050年までに半分以下に抑制するという目標を掲げている。しかしながら、G8に合わせて開催されている主要途上国も参加した会合ではこれまでこの目標に合意できておらず、COP15においても合意ができなかった。現在、先進国と途上国の排出量はおおよそ1:1であることからすれば、世界排出量を半減するという事は、先進国が仮に排出量をゼロとしても、途上国は現状排出量以下に排出を抑制しなければならず、今後の経済成長を目論む途上国の同意が得られないのは当然とも言える。

(2) 長期の排出削減対策の分析

このように世界の排出量を半減することは大変難しい取り組みであり、削減費用とのバランスを踏まえて適切な目標を設定していくことが必要であろう。一方で、長期的にエネルギーの脱炭素化を図り、排出削減を行っていくことは必要不可欠であり、どのような対策でそのような大幅な排出削減を目指すべきかを分析しておくことは重要である。第1図は、世界が費用効率的に排出量半減を行うためのセクター別・対策技術別の削減の寄与度を示したものである。また、第2図は、排出削減目標レベルごとの世界の発電構成の例である。



第1図 2050年に世界のCO₂排出量を半減するための費用効率的な排出削減対策の分析例(RITE分析)



第2図 排出削減目標毎の世界の発電構成の分析例(RITE分析)

分析からの重要な示唆は、費用効果的な排出削減のためには、様々な技術・方策を、地域、時点、セクターなどで組み合わせることが重要であり、それによって「技術的には」世界で排出量を半減することも可能であることである。しかし、同時に、この分析結果は、費用効果的な排出削減の分担を示しているが、2050年の限界削減費用は330\$/tCO₂にも達しており、世界全体がこのように大きな削減費用を負担して実際に対策に取り組めるかは相当困難と言わざるを得ない。むしろ、排出量半減のような世界を目指すにはどのような対策を目指すべきかの方向性として認識すべきであろう。

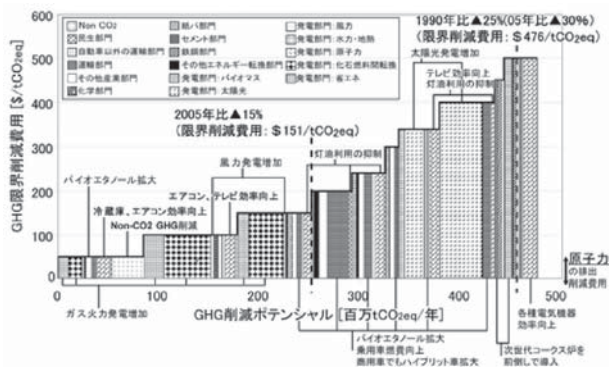
CO₂排出量を半減するためには、半減が困難な部門を発電部門で補う必要があるため、発電部門では、原子力、太陽光、風力、バイオマス発電などの再生可能エネルギーの拡大、二酸化炭素回収・貯留(CCS)によって電力はほぼ排出ゼロが求められる。原子力発電は、費用効率性の高いエネルギー源であるため、排出削減レベルによらず、ある程度の拡大が費用効率であるが、半減のように大きな排出削減を目指すには、さらに原子力発電の拡大を目指すことが必要不可欠になってくる。

2. 短中期の分析

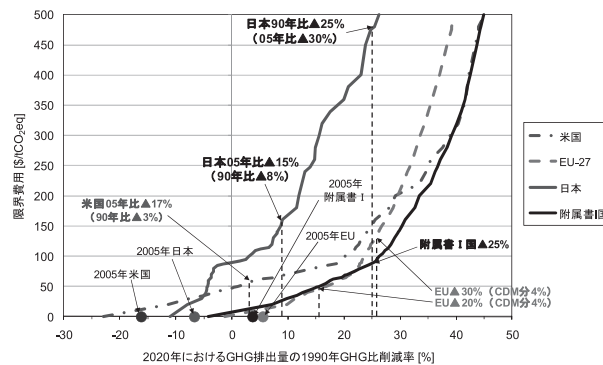
2020年頃までの短中期においては、とりわけ、エネルギー供給、エネルギー多消費産業においては、既存設備の寿命が長く、また計画から建設までのリードタイムなどを考えると、大きな変更は難しいことに留意が必要である。本節では、日本における2020年の具体的な対策、経済影響について概観し、最後に、国際的な排出削減目標から日本の排出削減の位置づけを見ることとする。

(1) 日本国内の分析

第3図は日本における対策別の温室効果ガス排出削減費用曲線である。原子力発電は比較的安価な対策と推定されるが、2020年までの方策としては原子力発電を現状計画以上に建設するようなことは事実上不可能である。一方、原子力発電として短中期の排出削減に寄与できる余地としては、稼働率の向上が大変重要である。これは、費用的にも大変安価に実現できるため、最大限の努力を払うべきである。稼働率を上げるには、制度の見直しも



第3図 2020年における日本の温室効果ガス排出削減費用曲線(RITE分析)



第4図 2020年における主要先進国における限界削減費用曲線の推定例(RITE分析)

必要であるが、同時に、透明性のある原子力発電所の運用を更に推進していくことも重要である。

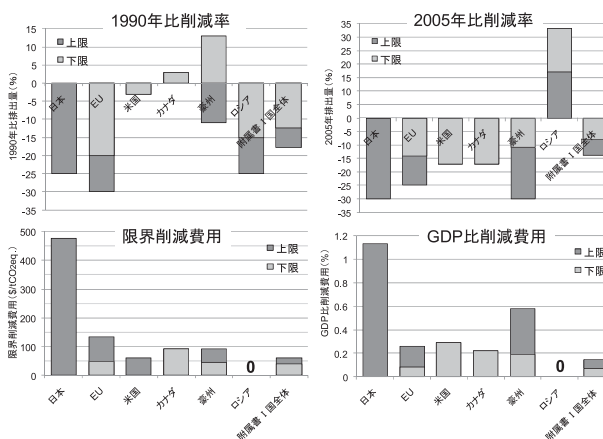
中期目標検討委員会の検討では、削減目標の違いによらず、2020年までの新設の原子力発電は9基を想定した。一方、稼働率については、現在の約60%から大幅に改善するとし約80%を想定した。なお、1990年比15%削減においては90%の稼働率を想定した(日本エネルギー経済研究所による分析²⁾)。

国内の経済影響は、中期目標検討委員会における分析によると、1990年比7%減(2005年比14%減)では基準シナリオにおける2020年のGDPよりも0.5~0.9%の低減、可処分所得は0.7~3.1%の低減、90年比15%減(2005年比21%減)ではGDPは0.8~2.6%減、可処分所得は1.9~8.2%減、90年比25%減(2005年比30%減)ではGDPは3.2~6.6%減、可処分所得は4.5~15.9%減と推定されている。分析モデルによって大きな幅があるものの、いずれにしても大きな排出削減になるに従ってGDPは低減し、可処分所得もより大きく低減する傾向となっている。

政府の目標である1990年比25%削減は、主要排出国すべての排出削減への取り組みが前提となっており、また、真水としてどの程度の排出削減を目標とするのかも現時点では明確になっていないが、いずれにしてもこの削減目標を達成するためには、相当大きな削減費用負担が生じるものと見込まれる。

(2) 世界の削減目標から見た日本の削減目標

また、持続的な排出削減行動のためには、排出削減目標の国際公平性については、特別な配慮が必要である。各国間で削減費用が大きく異なっていれば、現実社会では、国内対策・政策の余地が限られてくる。第4図は、日米欧および附属書I国全体の削減費用を推定したものである。日本は、産業部門において省エネルギーが進んでおり、排出削減余地が小さく高い削減費用となっている。真水で2005年比15%減(1990年比8%減)では151 \$/tCO₂、仮に1990年比25%減をすべて真水で実現しようとすれば476 \$/tCO₂もの限界削減費用となるものと推



第5図 「コペンハーゲン合意」において提出された各国排出削減目標の評価(附属書I国)(RITE分析)

定される。

そのため、コペンハーゲン合意に基づき、各国が提出した削減目標を実現するための費用を見ても、第5図に見ることができるように、突出して高い削減費用が必要と見られる。なお、第5図で示されるように、世界の主要先進国は現時点では、2005年比で15%減前後(基本的には海外排出クレジット込みで)、限界削減費用では50 \$/tCO₂前後の目標が多いことがわかる。各国間で国際公平性の高い削減目標となるように、今後も粘り強い国際交渉が求められる。

Ⅲ. 温暖化対策の今後の取り組みに向けて

地球温暖化問題は大変重要な国際政治課題となっており、国際的に温室効果ガスの大幅な排出削減を求める流れとなっている。しかしながら、第II章で見たように、国内外で議論されている削減目標を実現するには、相当大きな費用負担となる可能性が高い。短中期的に大きすぎる費用負担は、低炭素な社会を実現するための長期的な技術開発・普及を逆に妨げる可能性もあり、慎重な対応が必要である。最後に、本章ではこのような状況の中

で、排出削減の費用負担をいかに小さくし、環境と経済の両立をはかっていくべきかについて論じる。

1. 温暖化対策技術のコスト低減への技術開発

エネルギーは差別化をはかりにくい製品である。むしろ、同じ品質で安定的かつ安価に供給することこそがエネルギー供給者の使命とも言える。CO₂排出削減のために高い費用をかけても、同じ電力量から得られる効用は、温暖化問題がなければ基本的に変わらない。よって、CO₂排出削減に伴って費用が追加的に発生すれば、他への消費ができなくなり、その分、効用が減ることになる。したがって、将来世代が温暖化影響によって効用を大きく減じられることがないように適切なCO₂排出削減の対応をする必要はあるが、できるだけ安価にエネルギーが供給・利用できるような技術開発を行って、温暖化対策コストの低減をはかっていくことは重要である。

2. 温暖化対策技術の技術普及障壁の除去

社会には様々な技術普及障壁があり、費用効果的な対策であっても普及が妨げられている例も多い。省エネ技術は、高価な機器であってもエネルギー消費量を抑制できることにより、寿命までの運用期間全体で評価すると、正味では負の削減費用となる場合も多いが、必ずしも広く普及していない場合も多い。社会は様々な制約の下で限定合理的な対応をとっており、コスト合理的な対応ばかりが採られるわけではない。例えば、欧米のように、短期的な利潤を追求する株主の下では企業は長期的な投資を行いにくくなるが、これも障壁の一例である。また、一部の途上国等では、環境にむしろ悪い効果をもたらす環境破壊的な補助金も見受けられる。それぞれ、社会の仕組みなどとも密接に関係しているため、全体を踏まえた上での対応が必要であり、対応が容易ではないものも多いが、このように、技術普及障壁の除去も、実質的な排出削減費用を低減させるために重要である。

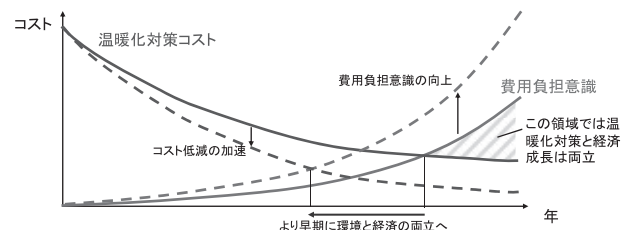
3. 温暖化対策以外の効用増がもたらされる対策と一体化させた対策を実施

安定的なエネルギーを安価に供給できることは社会の効用増大につながる。エネルギーセキュリティは通常忘れられた効用となりがちであるが、長期的には効用の増大につながる。よって、例えば、温暖化対策とエネルギーセキュリティ対策とが相乗効果を有する対応を行うことによって、実質的な温暖化対策費用の低減を目指すことも重要である。また、高度な情報交通システムの導入によって渋滞の緩和や交通事故の減少とともに、交通流の制御によってCO₂削減を行うことも相乗効果を生み出

し、実質的に温暖化対策費用を引き下げる好例と言える。さらには、都市のクオリティ向上と同時に、省エネ型の都市構築を行うこともこの一例であり、経済と温暖化対策の両立に有効である。

4. 温暖化対策を行うことが効用増をもたらすような環境意識の向上

温暖化問題は長期で全世界的な問題であるため、身近に感じにくく、自律的な対策は現時点ではあまり期待できない。よって、政府の介入が必要であり、上記1～3節の対策がうまくいったとしても基本的には経済には負の影響となる。真に温暖化対策と経済が両立するためには、温暖化防止のために積極的に対策費用を負担したいと思う社会とならなければならない(第6図)。すなわち、温暖化対策のために負担する費用よりも、その対価として得られる効用の方が大きい状態が必要である。この状態では温暖化対策をとることは、経済に負の影響にはならず、むしろ経済発展が促されることになる。そのため、温暖化問題の認識を深める教育も重要である。ただし、環境意識が高まるためには、成熟した経済が必要であり、経済状況が良くなければ、この状態を作り出すことはできない。なお、政府の調査でも一家計あたり負担してよいと考える温暖化対策費用は、月5千円以上とするのはわずか2.2%に留まっており、この状態の実現には程遠いのが現状であることを認識しておかなければならない。



第6図 環境と経済の両立に向けて(概念図)

—参考資料—

- 1) 福井俊彦(編), 地球温暖化対策中期目標の解説, ぎょうせい, (2009).
- 2) 茅陽一(監修), CO₂削減はどこまで可能か—温暖化ガス-25%の検証, エネルギーフォーラム, (2009).

著者紹介

秋元圭吾(あきもと・けいご)



(財)地球環境産業技術研究機構, 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻客員教授

(専門分野/関心分野)地球温暖化対応策の評価, エネルギーシステム評価

ナチュラルアナログ；自然に学ぶ地層処分

数万年先を予測する工学技術とは？ 第3回(最終回)

原子力発電環境整備機構 北山 一美，
北海道大学 佐藤 努，名古屋大学 吉田 英一

第1回，第2回のナチュラルアナログに関する解説はいかがでしたでしょうか？少し具体的なイメージを持っていただけたでしょうか？今回は最終回として，将来に向け，ナチュラルアナログの最前線を，今後進展していく地層処分事業にどのように役立てようとしているのか，地層処分の工学技術としてどのように適用していこうとしているのか，という観点を中心に展開していきたいと思えます。

ナチュラルアナログによって得られた最前線の知見の例は，(1)酸化還元反応に伴って形成された酸化物や酸化還元フロントは，一旦形成されると周辺の地質環境が還元状態となっても必ずしも還元状態に戻るとは限らないことを示唆している。そして必ずしもその酸化物が，天然バリア機能を低下させるとは限らないことも示している。(2)マカリーンプロジェクトでは高アルカリ環境に関わる様々な研究が行われているが，泥灰岩と地下水の反応による鉱物組合せの変化が実験やモデルで予想されたものとよく一致しており，セメント物質の劣化モデルの妥当性を示したものである。(3)オマーンの高アルカリ泉周辺の反応プロセスは，セメントから浸出する反応アナログと考えることができ，セメントの間隙や天然バリア内の亀裂でも同様の沈殿反応が生ずる可能性が高い。また，セメント環境でアラゴナイトが生成する，あるいは生成を予測できる環境をつくれれば，ヨウ化物イオンの移行遅延を期待できる可能性が高い，というような非常に示唆に富むものであった。

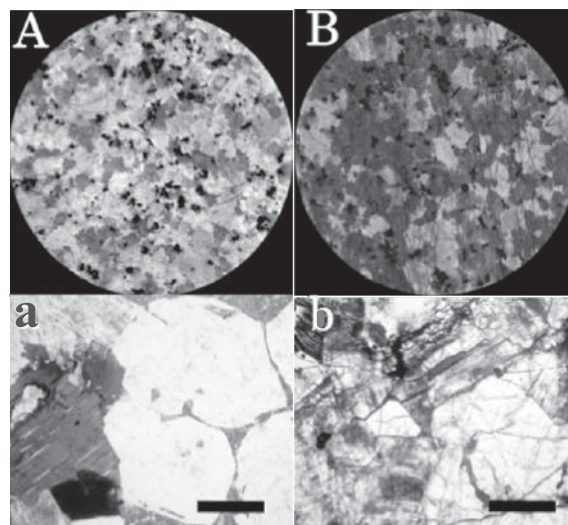
これらの現象等から，さらに一歩，工学技術への適用に進める例を紹介する。

I. 酸化還元反応のバリア機能の工学技術への適用

第2回の解説において，地質環境中では還元環境下の酸化物は，必ずしも還元されずに残存することを示した。では，そのような酸化物の存在は，地層処分システムの多重バリア機能に対してどのような影響を与えるのだろうか。本章では，地下深部の花崗岩中を事例にして解説を加えていく。

Natural Analogues/Supporting Geological Disposal: Gaining Evidence of Predictability on 100 ka Timescales:
Kazumi KITAYAMA, Tsutomu SATO, Hidekazu YOSHIDA.
(2010年 8月11日 受理)

第1図は，地下約300 mから採取された花崗岩ボーリングコアの断面写真である。Aは酸化してない新鮮なもので，Bは酸化された状態である。またa，bはそれぞれの薄片(岩石を薄く削って，光学顕微鏡用に加工したもの)の顕微鏡写真である。A，aで示されるように，本来，新鮮な花崗岩は，石英や長石，黒雲母などといった結晶の集合体であり，地下深部では，2次的な酸化物はほとんど含まない。しかし，地下岩盤には地下水を通す割れ目や断層が存在する。これら地下水の流動経路の周辺では，天水起源の酸化した地下水の流入に伴い，B，bで示すように，岩石全体の結晶粒界に茶褐色で特徴づけられる酸化物が浸透するような変質が認められることがある。実は，このような地下水や熱水による地下深部での変質が花崗岩盤の20～50%程度で普遍的に存在することがわかってきた¹⁾。



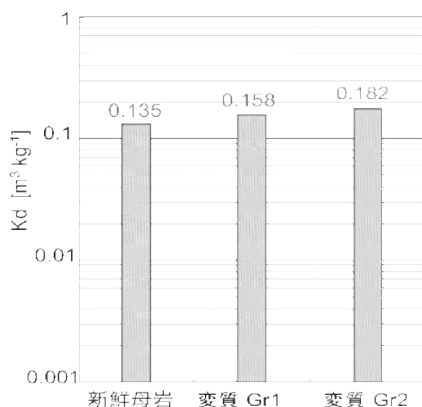
第1図 地下深部花崗岩(A:新鮮な岩盤コア写真，直径6 cm；a:新鮮な花崗岩の顕微鏡写真，スケールは1 mm；B:酸化変質した花崗岩；b:酸化花崗岩の顕微鏡写真)

地下岩盤の酸化や様々な2次の元素移動を伴う変質は、変動帯地質環境において形成された花崗岩(結晶質岩盤)においては特異なものではなく、地下環境を活用する上ではほぼ間違いなく遭遇する現象であろう。また、このような鉱物粒界に酸化物の沈積が生じるのは、地層処分場の地下坑道近傍においても想定されるものである。つまり地下環境を天然バリアとして活用するためには、これらの変質領域を避けることはできないだけでなく、こういった機能を適切に理解することが不可欠となる。

従来、こういった酸化物を有する岩盤や鉱物の評価は考慮されてこなかった。なぜなら、このような酸化物を形成させないような状態を前提とした処分システムを念頭に置いてきたからであり、また還元状態と考えられてきた地下環境に酸化物や変質帯がすでに存在するとはほとんど考えられなかったからである。しかし、実際の地下環境では酸化物が自然に存在し、また処分場の操業期間においても、酸化物を形成させない状態を維持することは難しいのが実状である。では、このような酸化物を有した岩盤のバリア機能は、そうでない岩盤に比して劣るのだろうか。その機能を推し量るべく実施した試験結果を第2図に示す²⁾。これは、第1図にあるような新鮮な岩石と酸化物を有する変質した岩石を、長さ5 cm程度のコア状にくり抜き、遠心分離器を応用した物質移動加速試験機で、岩石コア中にCsを透過させ、その吸着・遅延効果を調べたものである。なぜ遠心分離器のような装置を用いるかという点、5 cmものコアでCsを透過させる実験を行うと、その透過に最低でも数十年から、数百年はかかるかもしれないからである。それを遠心分離器を用いて加速させることで、数百分の1以下の時間で岩石を破壊させることなく、そのバリア機能を見ることが出来る。

その結果は、結論からいうとほとんど変わらないか、どちらかという点、酸化物を有する変質岩石の方が核種吸着・遅延機能が高いという結果が得られた。

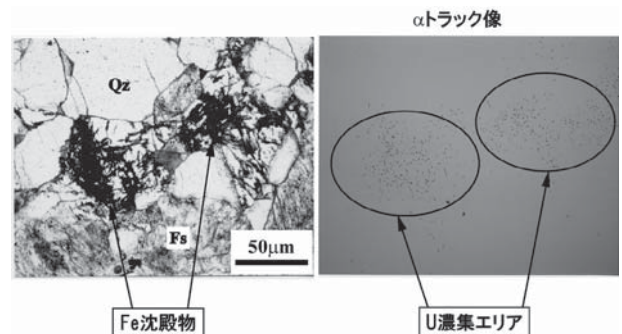
これまでの分析結果から、岩盤が変質すると空隙率が高くなり、地下水が浸透しやすくなる方向へと変化する



第2図 未変質花崗岩と変質花崗岩のCs吸着能力

ものの、それらの空隙に分散・沈積した酸化物が選択的にCsを吸着させているようなのである³⁾。一方、新鮮な岩盤の場合は、空隙率が低いことからもともと物質を移動させにくいものの、透過させても酸化物のような選択的に核種を吸着させる鉱物はあまりない。つまり、もともと透過させにくいことでバリア機能を発揮させるか、透過させやすくても吸着表面積が多くなり、また変質鉱物によって吸着機能が高まることでバリア機能を発揮させるかによって、結果的には同様のバリア機能が維持され得るということを示している。これらのことは、酸化物を伴う変質した岩石が、処分サイトで遭遇しても、あるいは坑道周辺に新たに形成されたとしても、バリア機能が低下することはないことを容易に想像させる。

このような花崗岩中の酸化物が、実は吸着剤として働いていることも、第2回の解説でも簡単に触れた通りである(第3図)。天然バリア機能の「実力」は、このような一見、工学的に「劣化」しているかのように見られる状態においても、アナログ事例と比較しつつ適切に評価することによって既成概念の修正も含めて確認することができる。したがって、将来的にはこのような鉄酸化物の吸着メカニズムを考慮したシナリオを核種移行シナリオに組み込むことで、より現実的かつ効果的バリア性能を評価することが可能になると考えられる。



第3図 花崗岩中酸化物に濃集した天然ウラン
(右: αトラック(矢印部分)がウラン濃集部)

Ⅱ. 高アルカリ環境におけるナチュラルアナログ研究の工学技術への適用

第2回で解説したように、処分場内で使用されるセメント系資材の劣化により生成する高アルカリ地下水と人工バリア材や周辺岩盤との相互作用が、安全評価上重要となっている。ただし、地下水の高アルカリ化が“アルカリプルーム”として処分場の施設内外に広範に影響するのか、あるいはセメント系資材と接している他の人工バリア材や周辺岩盤との境界付近だけが高アルカリ化するのかは不明である。第2回で紹介したマカリーンのナチュラルアナログでは、熱変成泥灰岩と地下水の反応

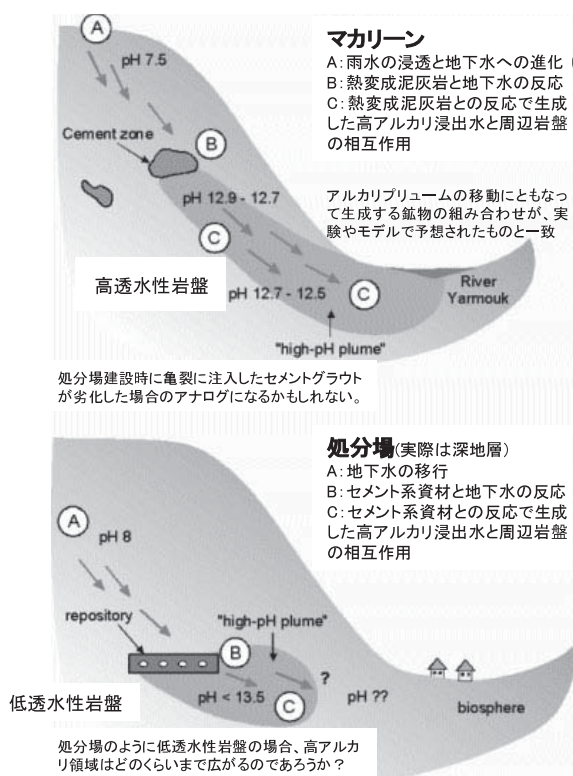
により生成した高アルカリ地下水が下流側に流れ、その移動にともなって生成する鉱物の組合せの変化が実験やモデルで予想されたものとよく一致しており、セメント系資材の劣化モデルの妥当性を示したものとなっている⁴⁾(第4図)。ただし、マカリーンの周辺岩盤の透水性は処分場で予定されているものよりも高く、そのため高アルカリ地下水が広範囲に移動することが可能であり、セメント系資材の劣化モデルの妥当性は「高透水性岩盤内における」という条件付きとなる。一方、処分場周辺岩盤は低透水性であることが前提となっており、マカリーンの研究事例は厳密にはアナログになっておらず、仮にマカリーンの周辺岩盤が低透水性であったならば高アルカリ地下水は発見されていなかったかもしれない(第4図)。ただし、亀裂を充填したグラウトの劣化を考えると、マカリーンの例はアナログになり得るかもしれない。ちなみに、低透水性の場合の反応輸送モデル計算の結果では、セメント系資材と接している他の人工バリア材や周辺岩盤との境界付近だけが高アルカリ化することが示されている。最近、同じヨルダンのクシャームマトラクで、高アルカリ地下水が低透水性の岩盤中を拡散により移動する現象が発見され、マカリーンの比較・検討が行われている⁵⁾。報告書は印刷中なので詳細は不明であるが、処分場の各種バリア材の性能評価を行う際には、「どの部分までどの程度の高アルカリ環境にさらされるのか」が重要になるので、マカリーンの比

較検討により高アルカリ地下水が広範囲に移動するかどうかの決定因子が明らかとなることを期待したい。

これも第2回で解説したように、弱吸着性の陰イオンであるヨウ化物イオンは、セメント間隙水と地下水との反応で沈殿するアラゴナイト(CaCO₃)に取り込まれていることが明らかとなっている。また、フランスで処分のために詳細に検討されている地層でも、ヨウ素は炭酸カルシウムに取り込まれていることが明らかとなっている⁶⁾、それ以外でも炭酸塩鉱物に富んでいる堆積物でのヨウ素の濃集が認められている。ヨウ化物イオンは炭酸塩鉱物に吸着しないことは実験的に確かめられているので、炭酸塩鉱物が生成する際に取り込まれているのである。まさに、自然が我々にヨウ素遅延のための方策を教えている。したがって、炭酸カルシウムが生成する、あるいは生成を予測できる環境であれば、性能評価の上でヨウ化物イオンの移行遅延を期待できることになる。これが可能であるならば、ヨウ素遅延のための立派な工学技術になるのであるが、事はそう簡単ではない。

炭酸カルシウムの組成を有する鉱物には、結晶構造の異なるカルサイト、アラゴナイト、バテライト等があり、処分場で予想される温度・圧力条件での安定相はカルサイトである。したがって、安全評価に用いる地球化学モデリングなどで何の制約もなく化学平衡計算をすると、カルサイトが出現することになる。もし、上述のようにカルサイトではなくアラゴナイトにヨウ素遅延能があるとすると、準安定相であるアラゴナイト(高压では安定相)の生成を意図する設計が必要になる。天然の低温低圧環境では反応初期に準安定相が出現し、それによって関係する元素の挙動が決定されている例が数多く認められる⁷⁾。これが一般的であるとするならば、反応初期に出現する準安定相の出現予測なしには、固相と相互作用する元素の挙動は予測不能ということになる。アラゴナイトの場合、溶液中にMgやSrが十分あるとカルサイトの生成が速度論的に抑制され、それらに生成が抑制されないアラゴナイトが生成される、と説明されている。したがって、現実的には、処分場で使用予定のセメントにMgを比較的多量に含む高炉水砕スラグを添加材として必要量加えたブレンドを設計する工学技術か、処分場から漏れいするCa-OHタイプ浸出水と天然バリア中に存在する地下水との反応で、岩盤中にアラゴナイトが生成することを予測するための工学技術が必要となる。どちらの場合にしても、準安定相も含めた2次鉱物の生成予測技術の進展が不可欠であり、ナチュラルアナログ研究で積んだレッスンは、そのための多くの練習問題を我々に与えてくれる。

以上のように、処分場で予想される高アルカリ環境では、人工バリアや岩盤に含まれる鉱物の変質とそれによって2次的に生成する鉱物の予測技術が重要となる。最近、原子力機構とクインテッサのグループは、カルフォ



第4図 マカリーンで認められる地下水の高アルカリ化と処分場で予想される地球化学反応プロセスのアナログ性(Alexander and Mazurek (1996)を一部改編)

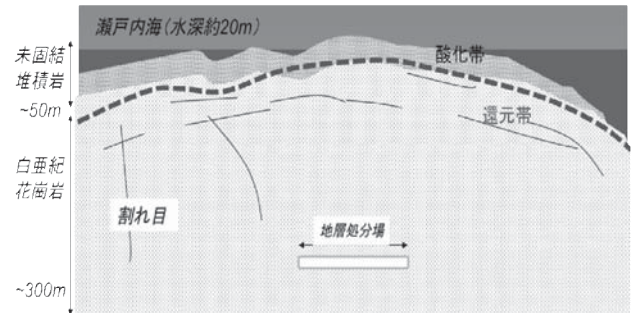
ルニア・サールスレイクにおいて、ベントナイトの主成分であるスメクタイトを含む泥岩に対して、アルカリ性環境下での変質に関するナチュラルアナログ研究を実施している⁸⁾。この研究では、実験で求められたスメクタイトの溶解速度式のいくつかを使って、ボーリングコアデータから得られている2次鉱物の生成量や分布を表現できるモデルの比較を試みている。地球化学・物質移動連成モデル解析が放射性廃棄物の地層処分において主要な長期安全評価手法の主要な手段である以上、今後このような試みが必須となっていくであろう。

放射性廃棄物の地層処分では、バリア材として様々な無機材料が用いられる。処分の安全評価では、無機バリア材の変質はネガティブに捕らえられることが多い。しかし、自然が教えてくれるように、変質によってバリア性能が初期より向上することが十分考えられる。例えば、セメント系材料の変質挙動は、以下の点で安全評価上有利に働く可能性も考えられる。(1)セメント系材料の変質により創り出される高アルカリ環境により、多くの放射性核種の溶解度が低減されるとともに、コロイドを不安定化させてコロイドによる移行が抑制される、(2)セメント系材料の変質により創り出される2次鉱物には、塩素イオンや硫酸イオン、炭酸イオンなどの陰イオンを取り込むことが可能な構造を有するものがあり、易溶性の放射性ヨウ素(¹²⁹I)や炭素(¹⁴C)、塩素(³⁶Cl)の移行を遅延する可能性がある、(3)セメント系材料の変質により生成する2次鉱物によって、放射性核種が地下水によって優先的に移行する空隙が閉鎖する可能性がある。筆者らは、以上のポジティブな効果が将来的に十分可能性のあるものと期待している。

セメント系材料の変質過程は、これまで普通ポルトランドセメントを中心に多くの研究者により研究されており、モデル化も行われている。したがって、既往の研究成果に基づいて、廃棄物処分環境におけるセメント系材料の変質に関する予測は可能と考えられる。しかし、溶解や沈殿の反応速度論に関するデータや、海水系地下水との反応や混合セメントの変質モデル等のデータが充実してこない、おそらく処分の安全評価屋はセメント変質をポジティブに取り扱ってくれないであろう。様々な環境においてセメントが設置された場合のアルカリ条件における長期挙動を予測する工学技術、あるいはその長期挙動に対応した設計をする工学技術の醸成が必須となるであろうし、それらはナチュラルアナログ研究で積んだレッスンを通して達成されると考える。

Ⅲ. 地下環境の地球化学的条件維持に関する工学技術への適用

I章で示したニアフィールドにおける核種移行・遅延プロセスが生じる日本の地下環境は、どのような環境なのだろうか。酸化物が存在する地下環境として、過去10

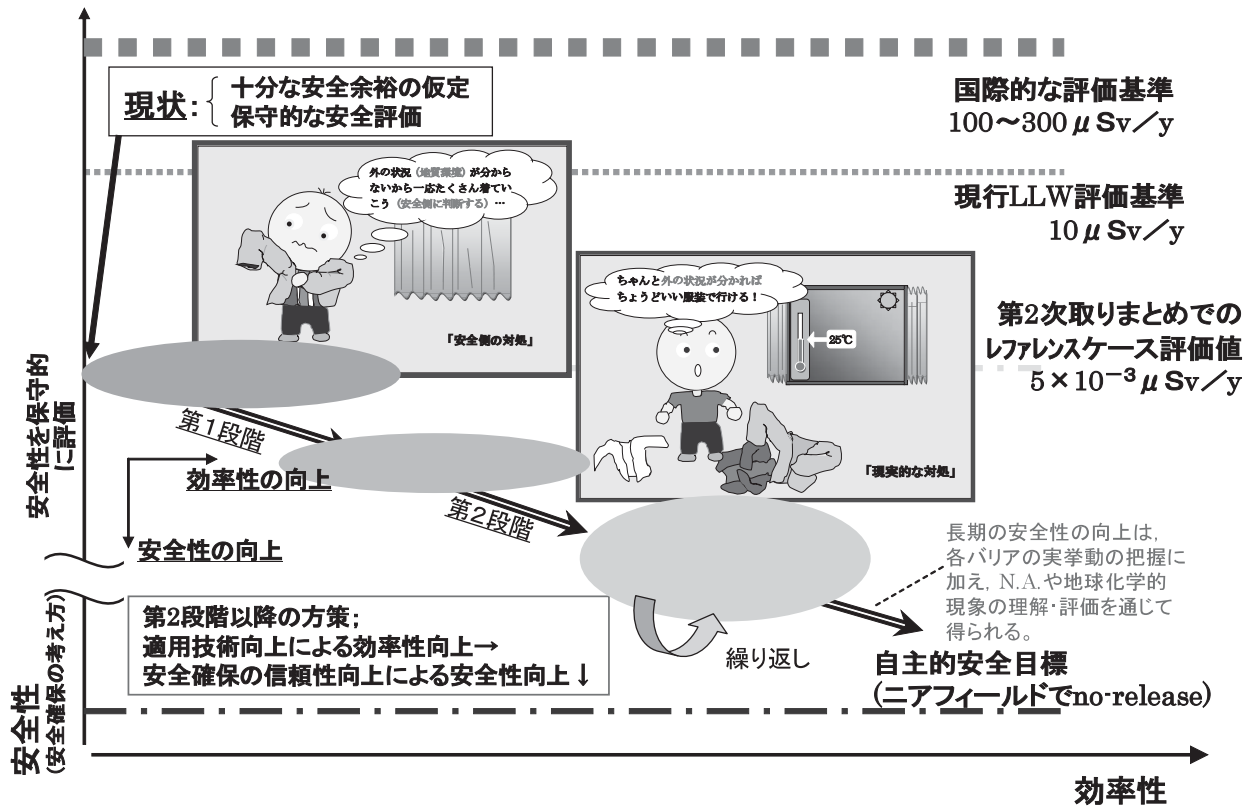


第5図 瀬戸内海海底下約200 mに建設中のLPG地下備蓄サイトでは、過去の氷河期に陸上に露出したにも関わらず還元状態が維持されている

万年程度の期間において、還元状態が維持されたことが実際に確認されている。第5図に示すのは、現在の日本の地下環境において建設されつつある海底下の地下備蓄サイトにおいて、過去何度も氷河期を経て地上に露出したにもかかわらず、還元状態が維持されている例の地下環境概念図である。地下備蓄サイトは海底下200 mであるのに対し、地層処分はさらに深部を想定している。このような例は特殊なものではなく、国内の様々な地質環境において認められているものである。日本の地下環境は、変動帯として様々な独自の遷移を経ているが、それでも地下300 m程度より深部は還元状態を維持していることが徐々に明らかとなっている。ナチュラルアナログとして今後検討を進めていくべき分野であると考えられる。これまで紹介してきた、自然界にみられる様々な物質移動に関わる現象のみならず、その他にも、いわゆる天然バリア機能の「実力」を示してくれる「アナログ」が多々確認されている。それらの現象から、どのように学ぶかが今後の課題でもあるが、少なくとも地層処分が不可能だとする「アナログ」は、これまで調査した限りにおいて存在しないことは確かである。

IV. 結論

これまでの地層処分事業では超長期に起こる事象を十分把握しきれていなかったため、どのような現象になっても人間への影響が少なくなると推測される(安全側の、または悲観的な)仮定において評価、判断してきた。しかし、酸化還元反応の例においては、長期に起こる事象は、還元状態への移行ではなく安定した酸化状態の維持ということになる。地下深部の地球化学反応ではその方がより安定ということになるが、これは地層処分の専門家の共通認識になっているわけではない。さらにセメントの劣化の例では第2回の第3図(e)の大まかな妥当性を示しているといえ、数十万年にわたり極端に大きなセメントの劣化はないと考えられる。またTRUの地層処分にあって、ヨウ素の取着は筆者らが特に注目している現象で、今後の安全確保にあたって極めて重要な知



第6図 地層処分の安全確保と効率化の概念図(イラスト；北大・松原勇武)

見を提供する。

本解説では、これらの現象を工学技術につなげる試みを述べてきた。地層処分事業は今後数十年以上にわたり進められるので、このような新たな知見が確実に得られた場合、従来用いられてきた仮定をより現実的に見直すことにより、安全性をより一層高め、事業に用いる操業技術や、安全評価手法をより一層合理的に進めることが可能となる。第6図はそのことを概念的に表している。地質環境が明確にならないときは現象が安全側(悲観的)になるよう考えて対応していくが、地質環境がわかれば、長期的に起こる不確実な現象や従来の実験や理論計算の限界等から、安全側の仮定を置いていたものを現実的な取扱いが可能であることを示している(第6図の厚着から適切な服装にすることに対応)。ここでは、このような試みを長期に繰り返して論理的に追求していくことによりその不確実性は低下し、安全性を高めると同時に合理的、効率的な事業推進が可能であることを示している。地層処分事業では、このような幅広い現象をそれぞれの現実の挙動に立脚した取組みによって、安全性と効率性の両立を図ることが不可欠であろう。

また、日本の地下環境そのものについて、現在進められている地下空間利用の知見は、たとえば第四紀中における様々な気候変動に対しても地下環境が地球化学的に安定であることを示唆している。多重バリアの核種閉じ込め性や隔離を保証してくれる地下深部の地質環境の地球化学的安定性についても、ナチュラルアナログを用い

て示す努力をもっと進めるべきであろう。このような現実の知見と評価手法をさらに発展させることにより、ナチュラルアナログの工学技術への適用という本題に関し大きく貢献できると考える。今後、さらに安全性を高めることを示す性能評価や効率的な事業展開に必要な設計・操業技術の検討部隊と、ナチュラルアナログとの間でデータや情報を共有しあい、相互に検討が進められるようなシステム化が必要である。そして、このようなシステムを用いた地層処分の様々な分野の相互検討を繰り返すことにより、ナチュラルアナログの数万年以上に及ぶ現象の最新の検討成果を、地層処分の工学技術として許認可や安全評価の場に積極的に活用することができるようになると確信している。

—参考文献—

- 1) S. Nishimoto, H. Yoshida, "Hydrothermal alteration of deep fractured granite: Effect of dissolution and precipitation". *Lithos*, **115**, 153-162(2010).
- 2) H. Yoshida, R. Metcalfe, Y. Seida, H. Takahashi, T. Kikuchi, "Retardation capacity of altered granitic rock distributed along fractured and faulted zones in the orogenic belt of Japan". *Eng. Geol.*, **106**, 116-122(2009).
- 3) H. Yoshida, S. Nishimoto, R. Metcalfe, "Altered crystalline rock distributed along groundwater conductive fractures and the retardation capacity in the orogenic field of Japan", *Proc. 12th Int. Conf. on*

- Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICEM 2009*, Liverpool, UK, ICEM-16332, (2010).
- 4) W.R. Alexander, J.A.T. Smellie, The Maqarin Natural Analogue Project (1989-1998), <http://www.natural-analogues.com/maqarin.htm>
- 5) W.R. Alexander, "A natural analogue study of cement buffered, hyperalkaline groundwaters and their interaction with a repository host rock IV: an examination of the Khushaym Matruk (central Jordan) and Maqarin (northern Jordan) sites", NDA Technical Report, NDA, Moor Row, UK, (2010), in press.
- 6) F. Claret, C. Lerouge, T. Laurieux, M. Bizi, T. Conte, J. P. Ghestem, G. Wille, T. Sato, E. C. Gaucher, E., Giffaut, C. Tournassat, "Natural iodine in a clay formation: Implications for iodine fate in geological disposals". *Geochim. Cosmochim. Acta*, **74**, 16-29 (2010).
- 7) K. Fukushi, M. Sasaki, T. Sato, N. Yanase, H. Amano, H. Ikeda, "A natural attenuation of arsenic in drainage from an abandoned arsenic mine dump", *Appl. Geochem.*, **18**, 1267-1278 (2003).
- 8) D. Savage, S. Benbow, C. Watson, H. Takase, K. Ono, C. Oda, A. Honda, "Natural systems evidence for the alteration of clay under alkaline conditions: An example from searles Lake, California", *Appl. Clay Sci.*, **47**, 72-81 (2010).
- 9) 木倉宏成, 北山一美, "地層処分の長期安全性に関する新概念 そのI総論, そのIIトピックス", 原子力学会「2010年秋の大会」予稿集, (2010).

著者紹介

北山一美(きたやま・かずみ)

原子力発電環境整備機構

(専門分野/関心分野)地層処分/原子燃料サイクル

佐藤 努(さとう・つとむ)

北海道大学

(専門分野/関心分野)環境鉱物学, 粘土鉱物学/汚染水・土壌処理, 廃棄物処分

吉田英一(よしだ・ひでかず)

名古屋大学

(専門分野/関心分野)地下環境地質学・応用地質学/地層処分および地下環境の長期的利用



原子力人材は海外展開で活性化を図る

原子力人材育成関係者協議会 定量分析 WG 分析結果

(財)エネルギー総合工学研究所 氏田 博士

原子力技術者の育成の問題点を、定量的なトレンドデータに基づいて分析するとともに、将来のニーズを踏まえて課題を整理した。今後、原子力発電の安全で持続的な供給を保証し、原子力産業の発展を図るには、人材育成面においても十分な対策を講じる必要がある。

I. はじめに

世界的に1980年代以降、原子力発電プラント建設が低迷してきたが、近年になり、地球温暖化やエネルギーセキュリティの問題がクローズアップされ、カーボンフリーで安定的な基幹電源としての原子力発電の重要性が世界的に高まっている。このような中で、原子力技術者の育成が喫緊の課題であることが世界的に認識されている。

日本においては、長期的なエネルギー戦略のもと原子力発電プラント建設が継続的に行われてきたものの、1990年代に入って原子力発電の新規建設が減速する中、原子力関連研究開発も低調になり、大学での原子力教育がやや希薄化してきたとの指摘が多く出されるようになってきた。

本稿では、以下のような観点から、原子力技術者の動向を定量的に分析した¹⁾。

- (1) 原子力技術者数の長期的な推移、産業界や研究機関への原子力専攻者就職の状況
- (2) 産業界や研究に携わる原子力技術者の状況
- (3) 発電所建設・運転基数に着目した原子力技術者の長期需要の評価

以上の分析に基づき、人材基盤確保のための課題と施策、原子力技術者、特に海外で活躍する技術者育成に有効な対策、等を検討した。

II. 人材基盤の長期的な傾向と年齢構成

1. 長期的傾向

日本と米国³⁾の原子力の創成期からの約50年にわたるプラント建設状況とそれに伴う人材の定量的な状況の推移を調査した。日本における状況に関しては、人材関連データ論文²⁾や原子力学会からの聞き取りなどから、(原

子力学会員数+原子力関係学科・専攻の学生数+原子力関係学科・専攻数)としてまとめている。

米国においては、1968年頃に着工基数が20基を越すピークを迎え、それに対応して原子力関係学科・専攻は一気に増え1973年には49講座になったが、その後、1979年のTMI事故以降は新規プラント計画がなくなったために、1973年以降は大幅減少を続け、2001年には25講座に半減した。米国原子力学会(ANS)の会員数は、学会の努力もあり、その後も漸増傾向を続け、1995年頃には17,000人であったが、その後は維持できず、数年で11,000人程度まで急激に減少し、2000年以降は一定を保っている³⁾。

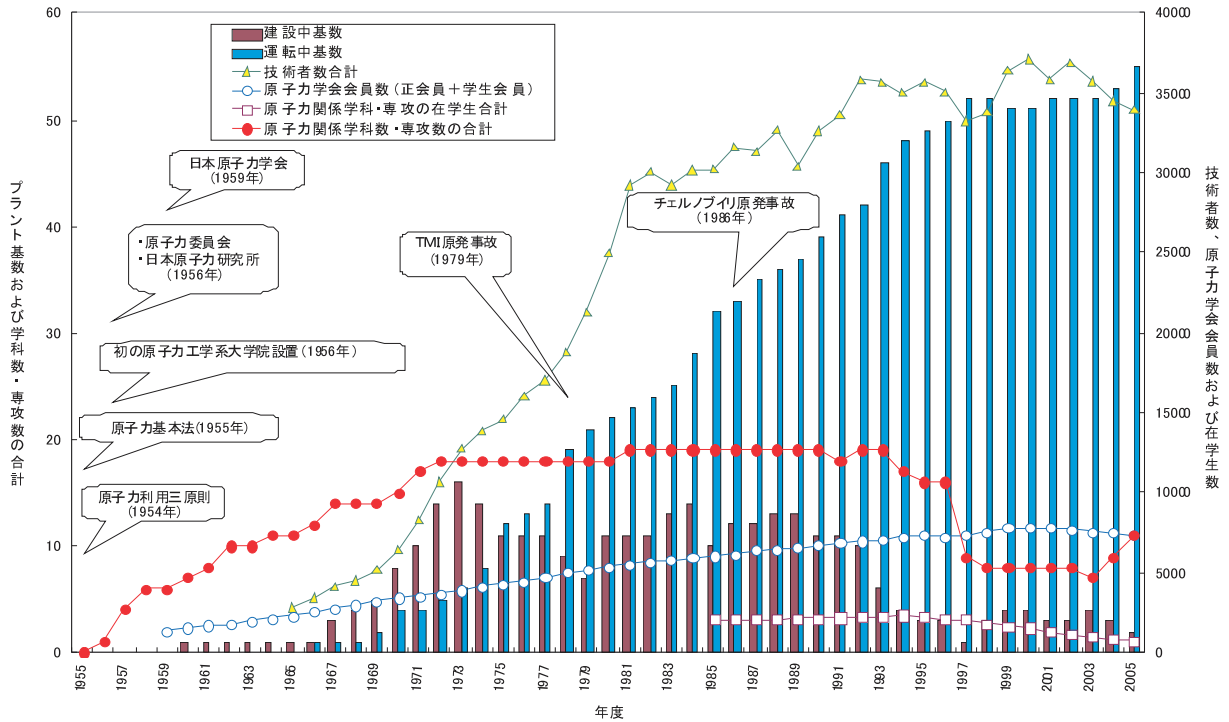
最近、米国では原子力発電所はリプレースの時期に来ており、新たに原子力カルネサンスとして、人材需要が高まってきている。そのため、米国の原子力人材の高齢化と人材需要の対策として、米国原子力産業協会(NEI)は2011年までに原子力業界として9万人もの新たな人材が必要として、その需要を公開している⁴⁾。また、DOEもNRCも大学への支援予算を増額する新たな政策を打ち出している⁵⁾。このため、人材が原子力業界に集まり、原子力工学科への入学者数は2000年の400人から2003年には1,000人まで増えている。

全体として、原子力人材は建設基数に依存して増減する傾向が見られ、新規建設計画の重要性がわかる。

一方、日本においては、第1図に示すように、原子力発電所の建設基数は1973年頃に20基近くにまでなるピークを迎え以降減少傾向が見られるが、いまだにわずかだが建設が継続されている。それに対応し、原子力関係学科・専攻は1970年代初頭まで増加し、その数を1980年代初頭まで維持し続けたが、その後の原子力発電プラント建設基数の減少、大学の講座の大括り化などが要因となって減少してきた。技術者総数で見ても、原子力発電プラント建設基数の減少、電力自由化などの要因により、2000年代初頭より減少傾向にあることが見て取れる。また、原子力学会の会員数で見ても同様の傾向にあ

Human Resource Problem Analysis in Nuclear Field : Hiroshi UJITA.

(2010年 4月31日 受理)



第1図 日本の人材関連トレンドデータ

る。このまま建設基数の減少が続けば、い
ずれ米国と同様に人材減少が予想される
が、ここ1~2年で国際展開対応のために
人材要求に増加傾向が見られるようにな
ってきた。

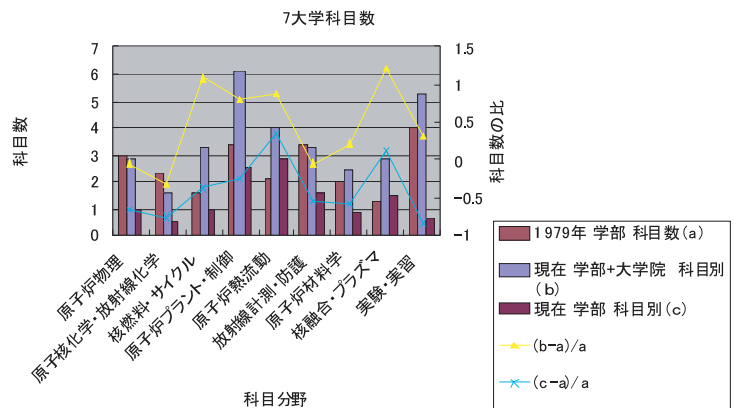
2. 年齢構成

米国の原子力人材調査結果は、原子力全
体で40歳代の人材が減少し50歳台の人材が
増加している⁵⁾など、原子力人材育成強化
の必要性として、原子力専門家の高齢化も
問題として認識されている。

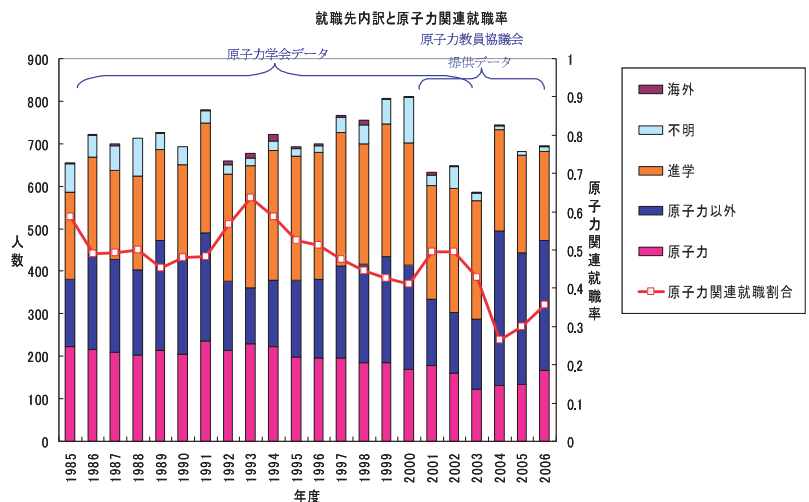
日本原子力学会会員の2001年から2006
年の年齢分布を見ると、55歳を境として若
い会員は減少し、それ以上の年齢層は増加
しており、年齢構成がそのまま5歳分程度
高齢化している⁷⁾。なお、日本の原子力メー
カ3社においても、1992年から2005年ま
での15年間で徐々にではあるが高齢化が進
み、原子力部門の技術系従業員の年齢分布
がそのまま5歳分程度高齢化している¹⁾。

Ⅲ. 大学の人材課題

我が国では、原子力に対するネガティブ
なイメージや、産業としての成熟による「建
設」から「保守」の時代への移行で、最先端
の研究対象や花形産業としての魅力が減っ
ている。このため、20年前には学生の間で



第2図 科目数の7大学の平均



第3図 原子力専攻の新卒者の状況

人気の高かった原子力系学科を志望する学生の数が減少した。原子力を選択し専攻する学生の学力や意欲が低下しているとの声も聞かれる。

大学の教育や研究において実験・研究は不可欠である。原子力はその特殊性から設備の維持・管理には多大な費用と手間がかかる。そのため、設備の更新は難しく老朽化した設備を使用するか、他の大学の設備を共同で使うこととなる。実験・実習の機会減少につながり教育の質の低下が懸念される。

1. 原子力教育の希薄化の懸念

大学の複数学科をまとめる大括り化により専門の工学科がなくなった原子力工学のような学科では、専門教育の希薄化も問題と考えられている。また、原子力工学科の学生の質の低下を憂う大学関係者もいる。一方、学生の質の低下は理工学系全体に係わる課題であり、決して原子力工学だけの問題ではないとの指摘もある。

事実、原子力の名前の付く工学科だけの在籍者数は、平成7年度の1,700人から17年度は200人まで激減している⁶⁾。一方で、名前こそ変わったが大学原子力工学関係者の努力のおかげで、一定数の(そしておそらく一定レベルの)原子力を勉強した学生が卒業し続けているのも事実である(後述の第6図参照)。

問題の本質は、大学の学科の大括り化により原子力工学科がなくなったため、「本来教えるべき講座を教えることができない、あるいはその時間数が不足している」専門教育の希薄化にあり、多くの先生が首肯している。近年、大学において実施された複数学科群ごとの大括り化により、学生が4年間または大学院を含め6年間に教育を受ける範囲が広がった。相対的に従来の原子力系学科において実施されていた原子炉物理、原子核化学・放射線化学、核燃料・サイクル、原子炉プラント・制御、原子炉熱流動、放射線計測・防護、原子炉材料、核融合・プラズマ、実験・実習などのコアになる科目に割ける時間数が大幅に減少した。原子炉物理の科目数は1/3、実験・実習は1/5に減少している。このことなどにより原子力の専門教育、体系的な専門知識の習得が困難になっている。第2図に旧7帝大の科目数の1979年と2008年現在との比較を示すが、データから見ても学部だけでは原子力工学の教育は不十分であり、大学院まで含めた一貫教育で、過去の講座数を確保している現状が見て取れる⁷⁾。科目あたりの時間数で見ても同様の傾向にある。

その中でも、実験の機会の減少による、応用力やプロジェクト力の低下を懸念する声は多い。特に原子力特有の実験機会の減少は、原子力の面白さを体験できずに卒業することになり、原子力への理解、意欲の不足の可能性まで心配する意見もある。

以上の声は、主に大学の先生方から聞こえてきている。一方の採用側は、大学の大括り化と技術の専門性向

上により大学院生の採用にシフトしている、また原子力工学科の卒業生に対して主に総合力を期待していることから、学生の質の低下を認識してはいるものの、現状では大きな問題とまでは考えていないようである。

2. 原子力専攻等の新卒者の状況

日本原子力学会等のデータ(大学教員の自己申告に基づく)によると、第3図のように、毎年700名から800名程度の学生が原子力関係の学科を卒業している。そのうち、200名から300名程度が進学し、500名程度が就職している。なお、2001年以降、データ変動は、個人情報保護や学科の大括り化などの影響により、一部のデータが収集不可だったためと思われる。原子力等を専攻した新卒者の原子力に関連する企業への就職割合は、変動はあるものの40%程度を維持しており、毎年200名程度が原子力産業界に就職していること、そのうち60%前後が鉱工業、20%前後が電気事業者に行くことが確認されている。

3. 原子力産業界の採用者数

電気事業連合会を通じて得たデータによると、電気事業者11社の採用者数は、第4図のように毎年100名前後(採用比率は25~20%)で推移し、2006年以降2年連続で明らかな増加(電気、機械と高専卒業者の採用が増加)を示している。電力自由化による一時期の採用減を補うため、学卒採用の比率の増加が原因と想定される。また、採用者数のうち原子力等の学科を専攻した学生の割合は2割程度である。

日本電機工業会を通じて得たデータによると、メーカー6社(IHI、東芝、日立製作所、富士電機システムズ、三菱重工業、三菱電機)の採用者数は、第5図のように、毎年100~150名程度で推移し、2006年や2008年には明らかに採用を増やしている。また、採用者数のうち原子力等の学科を専攻した学生の割合は1割程度である。

2006年や2008年における原子力産業の採用者数の増加と、原子力産業に従事する技術者総数の増加は、海外における原子力カルネサンスの影響などにより我が国においても原子力産業界の人材需要が徐々に拡大傾向にあることの反映と考えられる。

また、原子力等の学科を専攻した学生の割合が、それぞれ1~2割であることは、原子力産業が原子力等の学科の卒業生のみで成り立っているのではなく、機械、電気、化学、材料など多くの分野の卒業生が原子力卒業生の数倍以上の規模で原子力産業を支えている、言い換えれば原子力産業は総合工学産業であることを示している。

IV. 原子力産業に従事する技術者の状況

日本原子力協会(原産協会)が1959年から毎年実施して

いる「原子力産業実態調査」⁸⁾のデータによると、2007年度の原子力産業に従事する技術者の総数は約35,500名で、2005年以降2年連続で増加している。その内訳は、電気事業者が約9,300名(第6図参照)、プラントメーカー等を含む鉦工業が約26,200名(第7図参照)である。

電気事業者の技術者数を見ると、運転プラント基数の増加によるものと思われるが、技術者総数は増加傾向、その内訳の運転・保守技術者は増加傾向(1985年約3,000名、2006年約6,000人)、調査・計画・管理部門も増加傾向である。その一方で、プラント建設がないため、設計・建設工事部門は減少傾向にある。

プラントメーカーを含む鉦工業の技術者数は変動しているが、技術者総数で見ると、ほぼ一定水準で推移(2006年約25,500人)している。しかし、近年、新規建設が少ないことを反映して、設計者、研究者は減少(ピーク時約7,000人、2006年約4,500人)している。一方で運転保守に関わるサービス部門技術者は、増加(1985年約4,000人、2006年約9,000人)している。

プラントメーカーの動向を詳しく見るには、電機工業会(JEMA)の「原子力関係統計資料調査」データが有効である⁹⁾。それによる原子力技術者数(部門別)の推移を第8図に示す。1990年代前半をピークに、技術者数は減少(ピーク時約15,000人、2006年約10,000人)しており、特に、原子炉1次系技術者数の減少が著しい(ピーク時約8,000人、2006年約5,000人)。近年、各分野ともほぼ同様に底を打ったような傾向が見られる。

V. 人材需要の長期予測

原産協会の「原子力産業実態調査」および日本電機工業会の「原子力関係統計資料調査」をベースに、我が国の原子力立国計画やIAEA(国際原子力機関)による2030年までの世界の原子力発電設備規模の予測¹⁰⁾などを考慮して、2030年までの原子力産業に従事する技術者の総数を長期的に予測した。

予測では、今後の海外における原子力発電プラント市場の競合状況等を考慮し、我が国のプラントメーカーが海外プラントの10%を受注し、国内で生産したと仮定した。

- 設計・建設人材： ～3,000人/建設基数
- 運転・保守人材： ～400人/運転基数

2030年までの予測結果は、第9図に示すように、電気事業者の技術者数は、運転中基数の増加を反映して、2030年に向けて漸増傾向を示すとともに、プラントメーカーを含む鉦工業の技術者数も海外プラントの受注などにより増加傾向を示し、原子力産業全体の人材需要は増加傾向を示すと予測した。

技術者の需要が急激には変動していないことより、原子力等を専攻した人材の供給については、海外プラントの受注動向に依存するものの、当面は量的な不足はない

と予想される。

次に電気事業者と鉦工業の技術者に、日本原子力研究開発機構や原子力安全基盤機構など国の技術者や研究者を加え、我が国全体の技術者、研究者の内訳を予測すると、技術者総数は、現4万人から2030年には5万5千人に増加する。約3万人程度が国内プラントの設計、建設、運転に従事し、リプレース時期には5,000人の需要がある。約1万人程度が海外のプラントの設計や建設に従事、3,000人から5,000人程度が研究開発に従事すると考えられる。

これは、現在の技術者や研究者の規模を維持するためには海外プラントの受注が必要不可欠であることを示すとともに、2030年以降に予測される国内のリプレース需要を満たすための人材確保・技術力の維持継承にも海外展開の成否が影響を与えるものと考えられる。

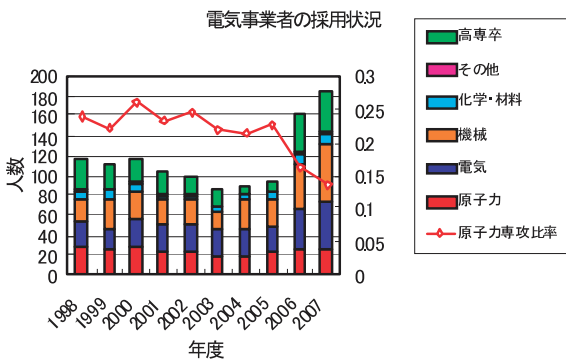
原子力専攻等卒業新規採用数を予測すると、国内対応ではしばらく現状維持程度の需要で、リプレース時期に30人ほどの増加が見込まれるが、国際化対応を考慮すると、現200人程度から40～50人以上の需要増が見込まれる。

VI. 考察

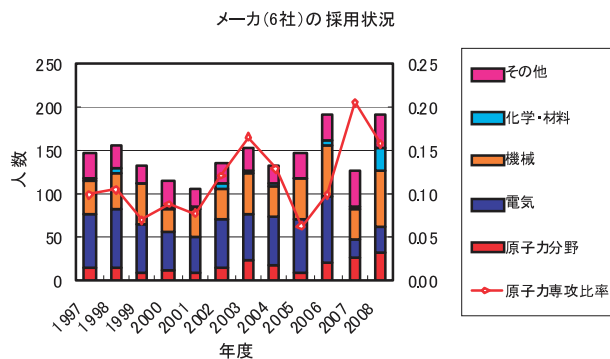
原子力分野の人材に関する定量的データを収集・分析した。その結果、量的にも質的にも現状では人材を維持しているが、産業界においては国内新規プラント建設の低迷による技術・技能の維持・継承等をはじめとした諸課題があり、また大学にはゆとり教育や学科の大括り化などによる専門教育の不足の危機感もある。

人材基盤確保のためには、一つの大学がすべての技術に対応するのは困難であり、それぞれの大学で機械や電気など基礎工学分野と連携した特徴ある原子力工学科の育成とその不足分を補うため、他大学での履修単位認定を促進する、不足する分野の指導者を他大学から派遣できる制度設計する、などによる大学間の連携が重要であろう。また、定量的な採用データに示したように、原子力産業界に占める原子力工学科卒の割合は1～2割であり、機械系や電気系の卒業生の方が多いので、他学科への働きかけも重要である。

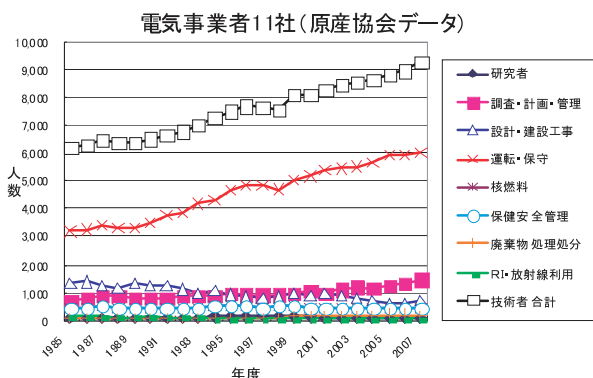
原子力関連講座をもつ大学で共通利用できるようなコアカリキュラム作成およびその教科書作りが進められている。これを作成する前提として、他学科の学部卒業生を原子力工学の大学院生として教育できるレベルに設定することが重要である。さらに、EUのENEN(原子力共通大学院)のように、他国での単位の取得を必須にするなどの連携強化や英語の共通言語化が、学生の人材の幅を広げる上で有効であろう。その中には、プロジェクトマネジメント講座など、各大学の特長を生かした教育機会の提供が望まれる。また、原子力機構との連携により実験の経験を積ませることも、物理現象の理解に有効



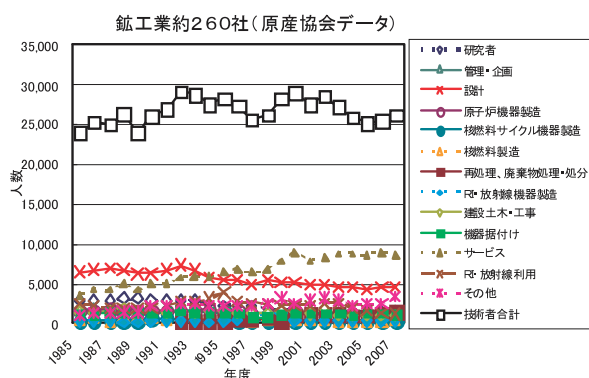
第4図 原子力産業の採用者数(電気事業者11社)



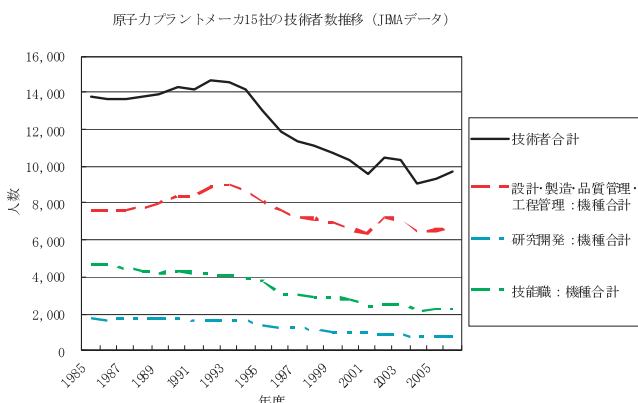
第5図 原子力産業の採用者数(メーカー6社)



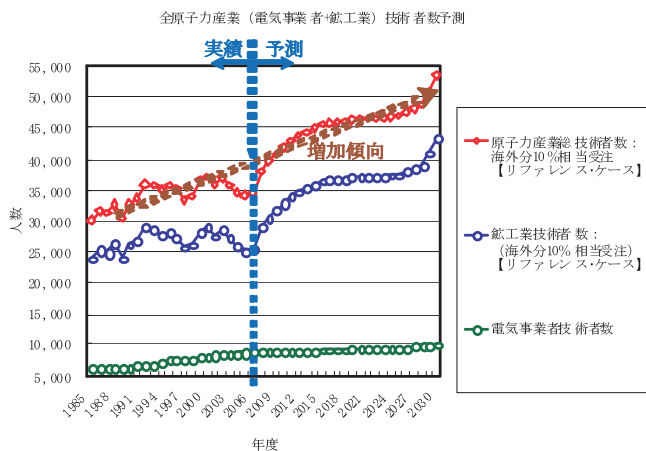
第6図 電気事業者の技術者数



第7図 原子力産業の採用者数(電気事業者11社)



第8図 原子力プラントメーカー15社の技術者数推移 (電機工業会(JEMA)データ)



第9図 全原子力産業(電気事業者+原子力産業)技術者数の予測

である。

もっとも有効な人材育成方策は、予測の章で述べたように、国際展開することである。国際人材育成のために、ある程度経験を積んだ若手技術者に、海外も含めて社会人教育の機会を与え、最新の知識と国際感覚を養成することは有効な方策と考えられる。

Ⅶ. おわりに

原子力分野の人材育成に関する中長期的課題を把握するため、原子力分野の人材に関する定量的データを集集・分析した。その結果、定量的にも質的にも現状では人材を維持しており、この状態を維持することが肝要である。しかし、産業界においては国内新規プラント建設

の低迷による技術・技能の維持・継承等をはじめとした諸課題があり、また大学にはゆとり教育や学科の大括り化などによる専門教育の不足の危機感もある。

人材基盤確保のためには、一つの大学ですべての技術に対応するのは困難であり、共通講座などによる大学間の連携が重要であろう。また、第4、5図の採用データに示したように、原子力産業界に占める原子力工学科卒の割合は1～2割であり、機械系や電気系など他学科の卒業生の方が多いので、他学科への働きかけも重要である。

人材基盤確保のために、以下の課題への取組みが必要であることが明らかになった。

- (1) 原子力業界として国際展開、計画的リプレース、

新規プロジェクトの積極的推進

- (2) それに応じた長期的人材要求と技術課題の明確化とロードマップ作成, およびメッセージ発信
- (3) 機械や電気など基礎工学分野を含めた大学間での特徴ある原子力分野の育成と相互連携の強化

もっとも有効な人材育成方策は, 国際展開することである。国際人材育成の方策として, ある程度経験を積んだ若手技術者に, 海外も含めて社会人教育の機会を与え, 最新の知識と国際感覚を養成することが有効であろう。

—参考資料—

- 1) 原子力人材育成関係者協議会: 2008-2009年度報告書, 平成20年7月-21年4月.
- 2) A. Kawahara, "Human Resources Development in Nuclear Industry—Japanese Experiment", Tokyo FNCA Symposium 2007, Sept. 2007. および原子力学会からの聞き取り, など.
- 3) C. Goodnight, "Overcoming the Challenges of the Aging Nuclear Workforce & Knowledge Transfer", WNA Annual Symposium 2006, Sept. 2006. および米国原子力学会からの聞き取り, など.
- 4) USDOE, University Reactor Infrastructure and Education Assistance Support, 2006. 1.
- 5) NEI Work Force Survey (May 2004).

- 6) 学校基本調査, 文部科学省.
- 7) 日本原子力学会, 平成19年度原子力コアカリキュラム開発調査報告書, 平成20年3月.
- 8) 「原子力産業実態調査」報告書(1985年度~2006年度), 日本原子力産業協会.
- 9) 原子力関係統計資料調査, 日本電機工業会.
- 10) *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030 (2007 Edition)*, IAEA, July 2007.

著者紹介

氏田博士(うじた・ひろし)

(財)エネルギー総合工学研究所

(専門分野/関心分野)エネルギー・環境・安全問題

波多野 守(はたの・まもる)

(財)エネルギー総合工学研究所

(専門分野/関心分野)エネルギー・人材問題

村田扶美男(むらた・ふみお)

日立 GE ニュークリア・エナジー(株)

(専門分野/関心分野)人材問題

河原 暉(かわはら・あきら)

(株)日立製作所

(専門分野/関心分野)エネルギー・人材・安全問題



ベトナムの原子力事情

一般財団法人 原子力国際協力センター 酒井 利明

I. ベトナムの概要

ベトナムは人口約8,700万人(2008年末),国土面積約33万平方キロメートル(日本は約38万平方キロメートル)であり,地図上の形も日本国とよく似ている。

かつては漢字文化が存在しており,国名のベトナムは「越南」,首都のハノイは「河内」,人名のホーチミンは「胡志明」と漢字表記することができる。また,「注意(chú ý)」「記念(kỷ niệm)」「意見(ý kiến)」などの発音は日本語とほぼ同じなど,文化的な近さを感じる。

ベトナムの政治体制は共産党一党体制であるが,経済面では1986年の第6回共産党大会よりドイモイ(刷新)政策を開始し,計画経済から社会主義指向の市場経済への移行を図っている。実質GDP成長率は5.3%(2009年),国家予算は約2兆6,000億円(2010年)である。

ベトナムが現在保有する発電設備容量は約1,570万kW(2008年末)であり,水力が約5割,火力が約5割である。容量のうち約7割をベトナム電力公社(EVN)が保有している。ベトナム北部は水資源が豊富なため,水力発電が主体であり,南部は電力需要が大きいため火力発電が主体となっている。経済成長に伴う電力不足を補うため,隣国の中国やラオスなどから電力を輸入している(全発電電力量の数%程度)。

II. 原子力開発の歴史

1. 経緯

1984年に首相直轄の機関としてベトナム原子力委員会(VAEC)が発足し,ベトナムの原子力の研究開発がスタートした。主な役割は「原子力分野の方針,戦略,計画立案」,「原子力技術に関する基礎・応用研究」,「原子力に関する法整備,規制文書の作成」,「原子力分野における技術系人材育成」などであり,傘下に5つの研究機関を持っている。(1993年には科学技術省(MOST)の管轄となり,2009年にはベトナム原子力機構(VAEC)へ名称変更している。)

1994年にはベトナム放射線・原子力安全管理機構(VARANSAC)が発足し,放射線防護と原子力安全に関する規制関係業務を行うこととなった。(2008年にはベトナム放射線・原子力安全機構(VARANS)へ名称変更

Nuclear Energy Development in Vietnam: Toshiaki SAKAI
(2010年7月15日受理)

している。)

1996年から2000年にかけて,IAEAの支援も得て,工業省(MOI)やMOSTによる「原子力発電導入に関する総合調査」などの原子力発電導入に関する可能性研究が行われた。

これらの報告書が首相に提出されたのち,2002年3月には工業大臣を委員長とする「原子力発電ステアリングコミッティ」を発足させ,原子力発電導入の本格的検討に入った。構成メンバーはMOST,計画投資省(MPI),財務省,法務省,EVN,VAEC等の代表17名である。

2002年6月に,ベトナム政府より日本に対しプレ・フィージビリティ・スタディ(プレFS)への協力依頼があり,(社)日本原子力産業協会(JAIF)が(社)日本プラント協会を窓口として協力することとし,同年8月より調査が開始された。ベトナム側はEVN傘下のエネルギー研究所(IE)が主体となって,主に文献による調査を行い,2003年11月に報告書案が出来上がった。

プレFSの調査項目は,原子力発電計画・必要性,経済性,建設計画,運転・保守概要,人材養成計画,サイト選定,環境影響評価,放射性廃棄物処理,原子力安全規制,国際協定,国産化,パブリックアクセプタンス(PA)などであった。1年強かけて行われた調査により,「2017年から2020年の間に200万~400万kW(100万kW×2~4基)の運転開始」,「軽水炉(PWR:加圧水型軽水炉,BWR:沸騰水型軽水炉)が適当」,「発電所候補地はニントアン省フックディン,ニントアン省ビンハイ,フーエン省ホアタムの3ヶ所」との報告がなされた。

2006年1月,MOSTが作成した「2020年までの原子力平和利用の長期戦略」を首相が承認した。これは原子力発電導入の意義とそのための方針を定めたもので,「2020年までに発電設備全体の5~9%となる200万~400万kWの原子力発電プラントを建設する」,「早急に人材育成と法制度整備を行う」,「初号機は海外より輸入するが,長期的には国産化を図る」,「原子力開発は産業技術の発展に寄与し,ベトナムの工業近代化をもたらす」,「関係機関の役割」などが記載された。

2007年5月,プレFS報告を首相が承認し,2008年2月には共産党政治局が承認したことにより,次は国会での承認を図ることとなった。

2007年9月,原子力発電導入に向け,先行投資や国内外の機関との協力・調整等の準備を統括する部門とし

て、EVN内に「原子力発電・再生エネルギー計画先行投資委員会(NRPB)」が設置された。

2008年4月、従来の原子力発電導入計画を修正し、「2020年時点の原子力発電基数を100万kW×4基とする」、「ニントアン省フォックディンをニントアン第一サイトとし2020年の運転開始を目指す。ニントアン省ビンハイをニントアン第二サイトとし、2021年の運転開始を目指す」、「初号機および2号機の事業主体はEVN」との政府決定が行われた。

2008年6月、ベトナム国会において、原子力発電に関する最初の法的枠組みである「原子力法(11章93条)」が採択された。

2009年11月、ベトナム国会において、投資報告書(プレFS報告書)が可決され、次に示す原子力発電導入計画が正式に決定された。

- ・ニントアン省の2地点(フォックディン、ビンハイ)におのおの原子炉2基からなる原子力発電所を建設する。各原子力発電所の発電出力は約200万kWで、合計400万kW以上とする。(最新型原子炉の発電出力は1基当たり130万kW以上であり、この点を踏まえた表現となっていると思われる。)
- ・最も先進的で安全が保証でき、実績および経済性のある軽水炉とする
- ・建設予算は200兆ドン(約1兆円)
- ・フォックディン地点(ニントアン第一原子力発電所)の建設開始は2014年で運転開始は2020年、ビンハイ地点(ニントアン第二原子力発電所)の建設開始時期については政府の提案により国会で決める。

なお、国会での議決内容も含め、ベトナム側では原子炉の選択にあたって、以下の6条件を満たすことが必要と考えているものと思われる。

- ・先進的で安全が実証された技術の提供
- ・資金融資への協力
- ・人材育成への協力
- ・燃料供給の保証
- ・放射性廃棄物処理・処分への協力
- ・国産化に必要な技術移転や産業育成への協力

2009年12月、ベトナム首相がロシアを訪問し、ロシア首相と原子力を含むエネルギー分野等で協力を強化することで合意し、同時に、EVNとロシアの原子力メーカーであるロスアトムとの協力文書が調印された。協力文書の内容は、フォックディン地点(ニントアン第一原子力発電所)におけるフィージビリティ・スタディについて、ロシアが協力することになったと報じられているが、両国政府からは正式に発表されてはいない。

さらに、2010年6月、ベトナム首相が2030年までに発電用原子炉を計14基建設することなどを内容とする「30年までの原子力発展計画の方向性」を承認したとの報道があった。これはニントアン省各サイト予定地での4

基と同サイト増設4基のほか、ベトナムの中部地域に計6基を建設するというものであり、電気出力の合計は1,500万~1,600万kWとなる。

ベトナムが原子力発電所建設計画を具体化したことで、日本、フランス、中国などベトナム原子力発電所の受注に向けて活発な営業活動が行われているが、2010年5月にはハノイ市にて原子力国際展示会が開催され、各国が競って自国の原子力発電のPRを行っている。同展示会の様子を第1図に示す。

2. 日本の支援・協力体制

2000年3月、ベトナム政府の要請を受け、JAIFとVAECとの間で原子力に関する協力覚書(MOU)を締結した。同時に、この支援協力を円滑かつ効果的に実施するために、JAIFを事務局として、電力会社、電事連、原子力メーカー、商社、原子力関係機関などで構成される日越協力連絡委員会および同幹事会、同WG(日越WG)を設置した。この支援体制により、2000年から2009年にかけて、ベトナム政府・共産党・電力会社などからの要人招聘、研修生受入れ、視察ミッション受入れ、日本からの原子力関係専門家派遣・原子力発電技術紹介ミッション派遣、ベトナムにおける国際原子力発電展示会への参加協力、現地原子力発電技術セミナー開催、ベトナムでの原子力発電所立地地点等評価を行うためのプレ・フィージビリティ・スタディ報告書作成支援などを実施し、ベトナムの原子力発電導入計画の進展に寄与してきた。

2009年3月、原子力発電新規導入国からの要請に的確に応え、効率的・効果的に協力・支援を行うために、わが国の関係機関が緊密に連携し、オールジャパン体制で一体となって取り組むこととして一般財団法人・原子力国際協力センター(JICC)が設立された。日本国政府などからの事業支援を得て、JAIF、日越WGと協働して前述したベトナムに対する支援活動を継続実施中である。

2009年6月、原子力発電の新規導入や拡大を検討する



第1図 原子力国際展示会の様子

国々の状況やニーズ等を踏まえ、より効果的・効率的に行うことを目的として、国内の関係府省および関係機関が情報共有等を行い、連携を強化する場として「国際原子力協力協議会」が経済産業省主導で設立された。下部組織として同運営委員会があり、適宜、開催される会議において、ベトナムも含めた情報共有が行われている。

2010年4月、経済産業省と電力会社(東京, 中部, 関西)およびメーカー(三菱重工, 東芝, 日立)は、ベトナムをはじめとする原子力発電新規導入国に対し、原子力発電プロジェクトに関して、官民一体となって受注活動を行う新会社(国際原子力開発(仮称))を設立することについて合意し、本年10月を目途に設立準備を進めている。

さらに、2010年6月には、アジア諸国などに対し「新幹線・都市交通・水・エネルギーなどのインフラ整備支援に官民あげて取り組む」との新成長戦略が閣議決定され、原子力発電について国主導のもと、官民一体となってビジネス機会の拡大を図ることとなった。

日本は過去40年以上にわたって原子力発電所に関する設計・製造・建設・運転・保守・安全規制・放射線管理・原子力防災などの経験を積み重ねてきている。日本としては、長年にわたり培ってきたこの経験を生かし、これらをすべて包含したシステムとしての原子炉輸出に向け、前述のベトナム原子炉導入6条件を満たしつつ、官民一体となって取り組んでいく。

Ⅲ. 原子力発電所予定地

原子力発電所建設が予定されているニントアン省フォックディン(Phuoc Dinh)村およびビンハイ(Vinh Hai)村はホーチミン市から北東約300 kmに位置している。最寄りの空港は軍港で有名なカムラン湾近くのニャチャン市にあり、そこから車で1時間30分から2時間程度である。ニャチャン空港へはハノイからは飛行機で1時間30分程度、ホーチミンからは1時間程度である。フォックディンサイト予定地(南)およびビンハイサイト予定地(北)は直線で約30 kmの距離にあり、ほぼ中間地点には人口約18万人のファンラン市がある。フォックディンサイト予定地周辺では海老養殖が盛んであり、そのための養殖場が海岸沿いに数多く存在する。同サイト予定地北1 km地点には人口約600人の集落があり、発電所建設に伴う移転対象となっている。ビンハイサイト予定地周辺では砂地農業が盛んである。同サイト予定地北1 km地点には人口約2,000人の集落があり、こちらも移転対象となっている。

ベトナムにおけるサイト予定地の位置を第2図に、各サイト予定地風景写真を、第3図(フォックディンサイト予定地)、第4図(ビンハイサイト予定地)に示す。

また、ファンラン市海岸よりフォックディン村方面の風景写真を第5図に示す。



第2図 サイト予定地(ニントアン省)



第3図 フォックディンサイト予定地



第4図 ビンハイサイト予定地

Ⅳ. ベトナム原子力発電関係組織

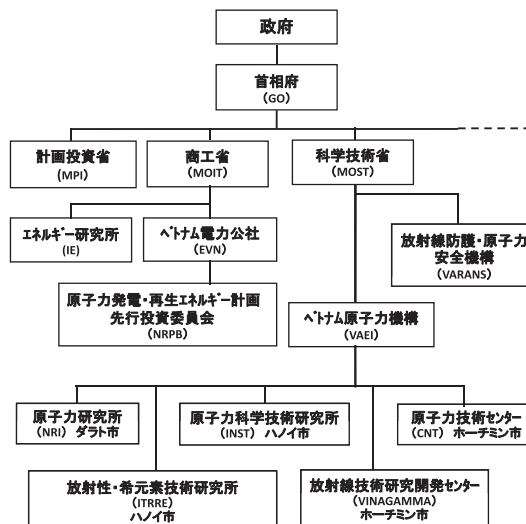
ベトナムにおける最新の原子力関係組織図を第6図に示す。

なお、VAECは2009年にベトナム原子力機構(VAEI)へと名称変更している。また、VARANSACは2008年



第5図 フォックディン村方面

にベトナム放射線・原子力安全機構(VARANS)へ名称変更している。



第6図 ベトナム原子力関係組織図

日本原子力学会誌 ATOMOS 広告のご案内

社団法人 日本原子力学会

「日本原子力学会誌」は、特集・解説・講演等、広く原子力に関わる記事を掲載し、我が国原子力研究、産業の発展に資するべく、努力しております。学会誌は毎月約8,000部が発行されており、電力、メーカー、大学、研究機関を中心とする会員および賛助会員の原子力関係者はもとより、広く原子力関係機関、市町村、マスコミ等にわたっております。

本誌への広告掲載は、発展の一助になるものと信じておりますので、ぜひ、広告の掲載をお願い申し上げます。

■賛助会員料金(消費税別)

| | | | |
|----|----------|--------------|----------|
| 表2 | 150,000円 | 前付 | 110,000円 |
| 表3 | 140,000円 | 後付 | 100,000円 |
| 表4 | 190,000円 | 差し込み (本誌に同封) | 230,000円 |

■一般料金(消費税別)

| | | | |
|----|----------|--------------|----------|
| 表2 | 160,000円 | 前付 | 120,000円 |
| 表3 | 150,000円 | 後付 | 110,000円 |
| 表4 | 200,000円 | 差し込み (本誌に同封) | 240,000円 |

■上記の金額は、1ページあたりのモノクロの料金です。カラーの場合、1ページあたり120,000円追加となります。また、版下・フィルム製作費は別途申し受けます。

■過去1年以上毎月出稿された機関につきましては10,000円引きとなります。

■連絡先 105-0004東京都港区新橋2-3-7新橋第二中ビル3F
社団法人日本原子力学会 学会誌編集担当 富田, 野口
TEL 03-3508-1262, FAX 03-3581-6128, E-mail: hensyu@aesj.or.jp

連載
講座実験炉物理：未来へのメッセージ
次世代の安全基盤の確立に向けて

第3回 実機炉心における実験炉物理手法開発

福井大学 島津 洋一郎

I. はじめに

実機における炉物理実験または炉物理特性の測定は、炉物理検査と言われており、加圧水型軽水炉(PWR)では毎回の燃料交換後の炉心(取替炉心)の起動時に実施されている。同じ軽水炉であっても、沸騰水型軽水炉(BWR)では炉心特性や制御法の違いにより、特に実測による確認がなくても安全性確保上支障がなく、BWRの導入以来、詳細な炉物理検査は実施されていない。このため、以下の記述はPWRを対象としている。

炉物理検査の目的は、(1)取替炉心設計の妥当性確認(予測値を測定値と比較し、設計の妥当性を確認)、(2)安全性パラメータの確認(事故解析使用パラメータや原子炉停止余裕などの重要なパラメータを測定し、当該炉心の安全性を確認)、(3)原子炉の各種計測装置の校正を確認することである。

検査項目は、プラントの建設直後の初回起動時や新たな核燃料の導入時の方が、よく似た炉心特性となった取替炉心より多い。これらの項目、検査法は、1970年に日本で最初のPWRプラントである美浜1号機が初臨界を達成した際に、米国のウエスティングハウス(WH)から伝授された手法と言える。当初は、大先輩であるWHの手法を踏襲していたが、徐々に独自の工夫を取り入れるようになっていった。筆者はたまたま、1970年の美浜1号機の炉物理試験の一部データ採取の経験をした。その時から35年が経過するが、この間に国内で行われた炉物理検査手法開発を振り返り、この分野における技術について紹介したい。

なお、本稿では、炉物理検査手法の開発に関連した項目についての説明となるが、全般的な解説は、文献1)や2)を参照されたい。

Experimental Reactor Physics "Past, Present and Future" —Towards Establishment of Safety Basis in Next Generation(3); Developments of Reactor Physics Measurement Methods in Commercial Reactors: Yoichiro SHIMAZU.

(2010年 6月4日 受理)

各回タイトル

第1回 KUCAにおける炉物理実験

第2回 臨界安全と未臨界度測定

II. データ採取法、処理法の改良

以下は、極めて簡単な改良であるが、当初はこのように極めて慎重に改良、開発がすすめられた。

1. 出力係数測定データ処理法の開発

出力係数とは、名の通り、単位原子炉出力変化あたりの反応度変化の割合である。この検査項目は初回起動時にのみ実施される。方法は、一定の出力で原子炉を安定させた状態で、原子炉出力、冷却材温度を測定し、その後、制御棒を操作し、数%程度の出力変化を与え、新たな出力レベルで安定させる。その際の制御棒による反応度変化を反応度計で測定する。この安定した状態で原子炉出力、原子炉冷却材温度を測定するという操作を何回か繰り返し、所定の出力変化を行い、その間の反応度変化から出力係数、冷却材温度係数、ドップラー係数を評価するのである。この記述からは、簡単に思えるが、下記のような点についての配慮が必要である。

- (1) 出力運転状態のため、制御棒による反応度添加と同時にドップラー効果や、冷却材温度効果の反応度フィードバックがかかり、ゼロ出力のような単純な反応度指示は得られない。また、制御棒の移動も、瞬時的ではなく、一定の時間を要し、この間の反応度フィードバック効果を補正しなければならない。
- (2) 出力係数のみならず、それを冷却材温度係数とドップラー係数に分離する必要がある。
- (3) 出力変化は一挙に行うのではなく、段階的に変化させるため、測定中にキセノンの濃度が変化し、反応度に影響を与える。

このため、測定状態を模擬した解析の結果により補正する等の対応を行い、実測データが評価され、極めて妥当な反応度係数の評価結果が得られた。

2. ゼロ出力時の減速材(冷却材)温度係数データ採取法の改良

当初のデータ採取法は、2ペンチャート上に反応度と、1次系の冷却材温度を同時にプロットさせ、そのデータを、データ整理員が読み取る。次に、通常のグラフ用紙に横軸に温度、縦軸に反応度を順次プロットしなお

し、その傾きから減速材温度係数を評価していた。しかし、この2つのデータを直接 X-Y プロッターにプロットさせれば大幅に手間が省ける。この手法の妥当性を示し、実機で検証し、実現された。

Ⅲ. 本格的な手法開発

1. デジタル反応度計の開発¹⁾

原子炉反応度計は、1点炉近似動特性方程式に基づく。動特性方程式は、入力された反応度に対して、中性子数または出力の変化を与えるものである。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n - \lambda_i C_i \quad (2)$$

ここで、 ρ ：反応度

β ：遅発中性子割合

Λ ：中性子生成時間

n ：中性子数

λ_i ： i 群遅発中性子崩壊定数

C_i ： i 群遅発中性子先行核濃度

反応度計はこれとは逆に、中性子数の変化が入力であり、その変化に対応する原子炉反応度を与える。このことから、逆動特性法といわれることがある。反応度は通常の炉物理検査の条件下では、中性子数の微分成分を無視することで、精度よく下記の式で与えられる。

$$\rho = \beta - \frac{\beta}{n} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (3)$$

各群の遅発中性子先行核濃度は、遅発中性子先行核に関する微分方程式(2)を直接積分することで算出される。このため、原理的には、積分機と四則演算器があれば、反応度計は構成できる。PWRが導入された当初は、アナログ式計算機の反応度計が実現されていた。

しかし、アナログ反応度計は、高精度の演算器を用いているが、起動の際に暖気運転が必要、外部ノイズに弱い、定数の設定がずれる、設定に時間を要する等、使い勝手に難点があった。しかし、美浜1号機の初臨界から15年ほど経過した頃から、デジタルデバイスや、マイクロコンピュータが汎用され始めたことから、デジタル反応度計の開発が行われた。開発に際し、留意点は、反応度評価精度の確保であった。反応度の単位は pcm で、これは 10^{-5} であり、十分な演算精度が必要であった。このため、下記の対策が採用された。

- (1) アナログ信号のデジタル変換精度： 当時の最高精度である符号付きで16ビット AD 変換器の採用。符号付きとした理由は、中性子検出器信号の増幅器に、ピコアンメータを使用していたが、このアナログ出力がマイナスの値であることによる。
- (2) 計算機内部演算： 演算精度の観点から、内部演

算はすべて倍精度(当時の計算機で10進19桁)とされた。

- (3) ノイズフィルタ： 中性子信号の種々のノイズを効率よく除去するフィルタ方式の検討。当時、カルマンフィルタが知られていたが、この方式の弱点は、計算負荷が大きいことであった。できる限り計算負荷を少なくするため、単純な、算術平均と1次遅れフィルタの組合せ方式も検討され、双方の比較が行われた。その結果、通常の使用範囲においては、後者のほうがノイズフィルタ性能、即応性で勝っていることからこの方式が採用された。

- (4) 演算周期： 遅発中性子先行核濃度の積分は、演算周期間は一定と仮定するため、演算周期が長くなると誤差が大きくなる。シミュレーション評価の結果、0.05秒が採用された。

実用化にはシミュレーションや、記録された実機信号による検証、最終的には、アナログ反応度計と同時に演算させ精度が評価された。その結果、従来の反応度計に勝るとも劣らない性能であることが確認され、実用が開始された。

反応度計がデジタル化されたことから、今までは、試験員がチャートからデータを読み取り、そのデータ処理を手計算で行っていたが、これらがすべて計算機処理できるようになり、大幅な効率化が達成された。このシステムは炉物理データ処理装置と呼ばれている。詳細は、文献1)を参照されたい。

2. 減速材温度係数測定法の開発

減速材温度係数測定は通常、最も正の値に近づく起動時のゼロ出力状態の値が、設計指針で要求されているように、負の値であることを確認するために行われる。当初は、前述のとおり、データプロットに基づいていた。しかし、反応度信号には、フィルタしきれないノイズがあり、評価誤差も想定されることから、設計値近辺で、温度の上下を繰り返し、4回程度の測定を行い、これらのデータから、設計温度での減速材温度係数を評価していた。このため、データ採取のみでも1回あたり、20~30分を要し、その前後で原子炉状態の安定を待つ必要があり、全体で3~4時間を要していた。この効率化のため、新たなデータ処理法が開発が行われた。

その手法は、ノイズ分析手法の一つである、フーリエ変換に基づくものである³⁾。具体的には、反応度と減速材温度の時系列データをそれぞれフーリエ変換により周波数分解し、相関が大きい成分を取り出す方法であり、ノイズを効率的に除去できるため、データ採取時間を短縮し、測定回数を削減することができる。

測定原理は以下のとおりである。測定される反応度には減速材温度変化による反応度成分とランダムノイズの和である。まず、この反応度と温度信号をフーリエ変換

して相関する成分のみを取り出すことでノイズを消去し、周波数ごとに、反応度と減速材の相互パワースペクトル密度と減速材温度の自己パワースペクトル密度の比から等温温度係数(減速材温度係数とドップラー温度係数の和)を求める。次に、信号の相関性の良い成分のみを抽出して平均する。このときの相関性の指標としてコヒーレンス $CH(\omega)$ というパラメータを使用する。コヒーレンスがあらかじめ設定した値以上の成分を平均して最終的な評価結果を得る。なお、減速材温度係数の評価は、等温温度係数の測定値からドップラー係数分を補正して評価されている。

本手法の妥当性については、実炉心での実証データを取得し、温度変化幅 1°C 、測定時間10分、1回のみで従来と同等の測定結果を得ることが確認され、実用化された。

なお、これとは別に、ウェーブレット変換による手法の開発も行われ、さらにデータ採取時間の短縮の可能性が示されている^{4,5)}。

3. 動的制御棒価値測定法に不可欠な中性子源並びにガンマ線バックグラウンド強度の測定手法の開発⁶⁾

制御棒価値測定法として、従来のようなボロン濃度変化を伴わず、大幅に測定時間を短縮させることが可能な動的制御棒価値測定法(Dynamic Rod Worth Measurement: DRWM)が採用されている。DRWMは米国で開発・実用化され、国内でも実用化され、すでに多くの実績がある。文献2)に詳細が紹介あり、参照されたい。

DRWMの実施にあたり、解決すべき問題がある。DRWMでは、ボロン濃度の希釈なしで、制御棒を連続して挿入する。このため、中性子束レベルは、挿入開始時に比べて2~3桁も低下する。もともと、ゼロ出力レベルでの測定であり、中性子束レベルは低く、すぐに原子炉内の中性子源や、ガンマ線のバックグラウンドレベルに近づく。一方、反応度計は信号の成分までは区別できず、補正なしでは誤った反応度を与える。この問題の解決手法について紹介する。

中性子源や、 γ 線バックグラウンドがある場合の動特性方程式は下記のように表される。

$$\frac{d(N-\gamma)}{dt} = \frac{\rho-\beta}{\ell}(N-\gamma) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + S$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell}(N-\gamma) - \lambda_i C_i$$

ここで、 N は γ 線の影響を含んだ中性子信号、 S は中性子源強度、 γ は γ 線強度である。これまでは、 S, γ を無視して反応度計算を実施していたが、 S, γ を求め、上記の式に代入することにより、これらの影響を考慮した反応度測定が可能になる。

S, γ の測定法は次のとおりである。臨界状態から制

御棒の挿入により既知の負の反応度を添加し、中性子束を低下させる。この際、次のパラメータを測定する。

$$G = \frac{(\rho_m - \rho)N}{\ell} = S - \frac{\rho}{\ell} \gamma$$

ここで、 ρ_m は補正なしで反応度計から得られる反応度、 ρ は真の反応度である。 G は上記のように、 S, γ で表され、速やかに一定の値に収束する。次に、制御棒を元の位置まで引き抜き、再び G の値を測定する。この場合は、 ρ はゼロである。これらの2つの G 値から、 S, γ を求める。

この手法の妥当性も実機データによる検証を経て、実用化された。

4. 中性子源を有する増倍体系の未臨界度の評価

中性子源を有する増倍体系においては、未臨界であっても、定常な中性子数が得られる。この状態での未臨界度を評価する一つの方法としては、中性子源増倍法がある。原理は極めて単純であるが、1点炉近似モデルであるため、実際の体系にそのまま適用することはできない。これは第2回で解説したように、未臨界度が深くなるにつれ、高次モードの成分が増えることによる。この問題を解決する手法として、1つは高次モードの中性子束分布の節になるところに中性子検出器を配置する方法がある⁷⁾。しかし、実際にはこのような場所に常に検出器を置くことができるとは限らない。他の方法として、基本モード抽出による評価法(修正中性子源増倍法)が検討された⁸⁾。これによると、1点炉近似の中性子源増倍法の原理に対して次の3種の補正を行う。

$$\rho_j^s = C_j^{\text{im}} C_j^{\text{sp}} C_j^{\text{ext}} \left(\frac{1}{Q_j} \right) \rho_{\text{ref}}^s$$

ここで、 ρ_j^s : 状態 j における未臨界度

ρ_{ref}^s : 基準状態での未臨界度

C_j^{im} : 中性子インポートランス変化に対する補正係数

C_j^{sp} : 基本モードに対する中性子束分布変化の補正係数

C_j^{ext} : 基本モード抽出係数

Q_j : 状態 j における中性子計数の増倍率

これらの係数の評価法等について、詳細は文献3)を参照されたい。

本手法の妥当性は、数値解析シミュレーションにより検証された。また、実機の臨界近接時のデータを用いた再現検証を行ったところ、十分な精度で設計値の未臨界度を得ることが確認された⁹⁾。なお、本手法の成立には、基準となる状態での未臨界度が必要である。この評価は、実測値を用いることで対応できる。

本手法はまだ実機へ適用されていないが、実機データによる十分な検証ののち、実用化も可能であると思われる。この観点については次章で記述する。

5. 実機のドップラー温度係数評価手法の開発

原子炉におけるドップラー温度係数は、核燃料の温度変化による反応度の変化率である。実験炉においては、小さなサンプルを照射孔に入れ、外部からレーザー等により加熱し、実測できることは知られているが、実機における反応度係数の評価例は今までには知られていない。PWRにおいては、従来から、実験炉における実験等で検証された解析モデルを用いた解析値が用いられている。しかし、今後、新たな概念の燃料を採用する際には、今までの評価法の検証が必要になる可能性がある。このような観点から、実機での実測手法の開発が行われた。

開発にあたり、留意された点は、①新たな計測装置を必要としないこと、②従来の起動試験の工程に大きな影響を与えないこと、③データ採取にあたり、従来の試験機器、データに影響を与えないことである。これらを配慮して開発された手法は次のとおりである。

(1) 採取データ

採取するデータは、従来の検査項目データで、一つは、等温温度係数の測定値、他の一つは、ゼロ出力試験の上限中性子束レベルの確認試験データである。

(2) データ処理原理と手順

データ処理の原理は動的同定法である。これには周波数領域で行う手法¹⁰⁾と、時間領域で行う手法が検討され、最終的には時間領域での動的同定法が採用された¹¹⁾。動的同定法とは、未知のパラメータを含む対象システムに、既知の入力を与え、その出力を計測し、対象システムのモデルの出力が計測された出力に最もよく一致するように未知のパラメータを定める方法である。

データ処理手順は5ステップで行われる。

(1) γ 線ノイズの削除

ゼロ出力試験であり、中性子束レベルは低く、 γ 線ノイズが含まれる。この中性子束変化のデータは、反応度に変換されるため、 γ 線ノイズの削除が必要である。 γ 線ノイズの混入率は、算出反応度が中性子束上昇時の一定反応度に一致するように定める。

(2) 温度反応度フィードバック成分の抽出

温度フィードバック成分は、上記の一定反応度の値からのずれとして得られ、減速材温度変化の成分と燃料温度変化の成分の和である。

(3) 原子炉出力の絶対値の決定

実測の中性子束の相対的な変化幅により、測定された減速材温度上昇幅が再現できるような原子炉出力の絶対値を評価する。観測された原子炉の出力が最高となった時点と、冷却材温度が最高になった時点の時間差(約50秒)がうまく再現されるように1次系の熱輸送モデル熱伝達の時定数を定めることができ、これを用いて絶対出力を定める。

(4) 燃料温度上昇による反応度フィードバック成分の補正因子評価

出力上昇中の中性子束分布は、燃焼度分布の影響で、炉心上方に歪むことから、燃料の温度分布もこの影響を受ける。このため、ドップラーフィードバック反応度は、均一に温度が上昇する際と比べて、平均温度上昇幅が同じでも反応度的には異なる効果がある。この因子を補正する。

(5) ドップラー係数の評価

測定された等温温度係数を用いて、減速材温度係数を消去することにより、ドップラー係数のみが未知数として残り、実測フィードバック反応度との関係で決定できる。

実機の実測データは1ケースしかないが、予測値と実測に基づく評価値とは極めてよい一致を示した。今後、実用に際しては実測データに基づく評価数を多くして検証を行う必要がある。

IV. 出力状態での検査手法の開発

—炉内外核計装校正検査¹²⁾

PWRでは、通常時における炉内軸方向出力分布の常時監視は、炉外にある長尺の上下中性子検出器を用いて、軸方向出力分布偏差(AO)により行っている。軸方向出力分布偏差とは次のように定義されたパラメータである。

$$AO = \frac{\text{炉心上半分出力} - \text{炉心下半分出力}}{\text{炉心上半分出力} + \text{炉心下半分出力}}$$

このため、正しく炉内のAOが監視できるように校正する必要がある。必要なデータは、炉内の出力分布データ(AO)と、その時の炉外検出器の電流値である。従来、キセノン振動を誘発し、種々の軸方向出力分布状態で、所要のデータを採取していた。しかし、キセノン振動の振動周期は約30時間であり、データ採取には1日程度を要した。

このデータ採取時間をなくすため、解析的手法の開発が行われた。まず、原子炉表面の点から出た中性子が、仮想的に軸方向に小さな部分に分割されたそれぞれの検出器に到達する確率を評価する。次に、規格化された任意の軸方向出力分布を与え、軸方向各点からそれぞれの区分検出器に到達する中性子計数を積算する。検出器電流に相当する値は、実際の検出器に相当する部分の区分検出器の計数を加算したものと評価する。これにより、種々の異なった出力分布に対する上下検出器電流に相当する積算計数が得られる。このようにして得られたAOと、検出器電流値との関係はまだ相対値でしかない。このため、定常状態でのAOと実際の電流値を用いて、そのAOで規格化することにより、所要のデータ評価が完了する。精度の実証ののち、実用化された。

V. これからの炉物理検査手法

上記で紹介したように、炉物理検査手法の開発は、常に一方に向かっていく。それはいかんにして、炉物理検査の時間を短縮するかという方向である。この方向は、電力会社にとっては稼働率向上の観点から当然である。この方向は今後も継続されると思われる。まだ実用化されていない手法もあることを紹介したが、それらも、炉物理検査時間の短縮に貢献できるものと思われる。具体的には以下のように修正中性子源増倍法の応用が考えられる。

本手法の適用には、基準となる未臨界状態での未臨界度が必要であるが、この計測は臨界になれば直ちに実施することができるので、大きな障害にはならないと思われる。その条件の下で、下記のような応用が可能であろう。

(1) 臨界接近時の中性子計数率データによる制御棒価値評価

前章で紹介したとおり、制御棒を引き抜き、臨界近接中の未臨界度が十分な精度で評価できることから、逆にこの手法を用いて、制御棒の価値を評価することができる。このようになれば、臨界後の制御棒価値測定検査が省略できるようになる。このためには、今までのようなオーバーラップモードでの制御棒引き抜き手順は変更されることになるが、現状と大きく異なるものではない。このような手法の精度の確認が今後望まれる。

(2) 制御棒落下試験時の検出器係数率に基づく制御棒価値評価¹³⁾

さらに1歩進んで、臨界近接開始前の試験として、制御棒の落下時間計測が行われている。この際の制御棒条件は、全制御棒挿入状態と落下時間計測対象のグループのみの制御棒が全引き抜き状態の2つの状態が得られる。この状態での中性子計数率データから、当該制御棒価値の評価が可能となる。数値解析によるシミュレーションではこの手法の可能性が指摘されている。

VI. まとめ

従来の炉物理検査手法の簡単な紹介に続き、新たな手法の開発について紹介した。上記したように、炉物理検査の手法開発により、検査時間はますます短縮化されている。このような状況は、経済的な側面では重要であるが、炉物理の理解や炉物理検査技術の伝承という側面からみると、必ずしも歓迎できないところがあると感じているのは筆者だけであろうか。最近、炉物理分野の専門家、技術者の急激な減少が危惧されており、このままでは原子カルネサンスを実りあるものにするうえで支障が出ないか心配でもある。この企画がこのような心配が杞憂であることを実感できる契機になれば幸いである。もちろん、このためには、電力会社はじめ、産学からのご理

解とご協力が欠かせないのはいうまでもないことである。

—参考資料—

- 1) 島津洋一郎, 他, "デジタル反応度計と炉物理データ処理装置の使用経験", 日本原子力学会誌, 32[3], 285 (1990).
- 2) 中野 誠, 他, "炉物理検査高度化の進展", 日本原子力学会誌, 46[8], 554(2004).
- 3) Y. Shimazu, "A new method of estimation for moderator temperature coefficient using Fourier Transform", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 32[7], 622(1995).
- 4) Y. Shimazu, "A feasibility study on Wavelet transform for reactivity coefficient estimation", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 37[12], 1009(2000).
- 5) 勝又陵介, 他, "Wavelet 変換による PWR 実機の減速材温度係数評価", 日本原子力学会誌, 43[8], 830(2001).
- 6) 島津洋一郎, "反応度測定のための中性子源ならびに γ 線強度の評価法", 日本原子力学会誌, 38[5], 400(1996).
- 7) Y. Shimazu, *et al.*, "Feasibility study on subcritical monitoring with a digital reactivity meter", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 39[11], 1182(2002).
- 8) M. Tsuji, *et al.*, "Subcriticality measurement by neutron source multiplication with a fundamental mode extraction", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 40[3], 158(2003).
- 9) W. Naing, "Subcriticality measurement of pressurized water reactors by the modified neutron source multiplication method", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 40[11], 970(2003).
- 10) M. Tsuji, *et al.*, "Estimating temperature coefficients by experimental procedures combined with isothermal temperature coefficient measurements and dynamic identification", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 43[5], 576(2006).
- 11) M. Tsuji, *et al.*, "Estimation of the Doppler Coefficient from a low power transient observed in a zero power reactor physics tests", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 46[5], 413(2009).
- 12) Y. Shimazu, "Analytical method for recalibration of incore and excore nuclear instrumentation systems of PWRs", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 28[4], 293(1991).
- 13) Y. Shimazu, *et al.*, "Feasibility study for evaluation of control rod worth in pressurized water reactors using neutron count rate during a control rod drop testing", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 28[4], 293(1991).

著者紹介

島津洋一郎(しまづ・よういちろう)



福井大学附属国際原子力工学研究所
(専門分野/関心分野)原子炉工学, 原子炉物理, 炉心核設計, 炉心管理・制御

連載
講座ICRP 新勧告
—新しい放射線防護の考え方と基準

第7回 現存被ばく状況

東京大学 飯本 武志

I. はじめに

国際放射線防護委員会(ICRP)はその2007年勧告(Publication 103)において、放射線防護のアプローチを、従前の被ばくの“プロセス”に基づく手法から、被ばくの“状況”に基づく手法へと発展させた。考えるすべての線源、すべての事情を、次の3つの被ばく状況に適切に分類することで、勧告する防護システムを明快かつもれなく適用できるように工夫したのである。その3つの被ばく状況とは、

- (1) 計画被ばく状況： 線源の意図的な導入と運用を伴う状況のことである。計画被ばく状況は、発生が予想される被ばく(通常被ばく)と発生が予想されない被ばく(潜在被ばく)の両方を生じさせることがある。(連載第5回を参照のこと)
- (2) 緊急時被ばく： 計画された状況を運用する間に、もしくは悪意ある行動から、あるいは他の予期しない状況から発生する可能性のある好ましくない結果を避けたり、減らしたりするために緊急の対策を必要とする状況のことである。(連載第6回を参照のこと)
- (3) 現存被ばく状況： 管理について決定をしなければならない時に既に存在する被ばくの状況のことである。緊急事態の後の長期被ばく状況はこれに含まれる。

連載講座の今回は、上記(3)の「現存被ばく状況」に関するICRPの放射線防護の考え方を解説し、その具体的な適用の例として、長期放射線被ばくの状況に関する適用と、ラドン(本稿では、ラドン222, ラドン220(通称トロ

New ICRP Recommendation—New Radiation Protection Principle and Standards(7); Existing Exposure Situation: Takeshi IIMOTO.

(2010年 8月10日 受理)

各回タイトル

- 第1回 放射線防護の歴史的展開
- 第2回 放射線防護の生物学的側面
- 第3回 放射線防護に用いられる諸量
- 第4回 放射線防護の基礎—防護体系と原則
- 第5回 計画被ばく(線量拘束値, 履行)
- 第6回 緊急時被ばく

ン)およびそれらの壊変生成物を指す)に関する適用の例を紹介する。本稿は、主にICRP Publication 103「国際放射線防護委員会の2007年勧告」¹⁾より関連の記述を抜粋しつつ、若干の解説を加えたものである。

II. 現存被ばく状況における防護の原則

1. 正当化の原則

「放射線被ばくの状況を変化させるいかなる決定も、害より便益を大きくするべきである。」

2. 防護の最適化の原則

「被ばくする可能性、被ばくする人の数、及びその人たちの個人線量の大きさは、すべて、経済的及び社会的な要因を考慮して、合理的に達成できる限り低く保たれるべきである。」

つまり、防護のレベルは一般的な事情の下に最善であるべきで、害を上回る便益の幅を最大にすべき、という趣旨である。この最適化の結果として、大幅に不公平な状況が生じることを回避するために、特定の線源からの個人に対する線量またはリスクは制限すべきで、現存する被ばく状況の場合、この制限を目的として“参考レベル”が適用される。

III. 参考レベル

制御できる現存被ばく状況において、参考レベルは、線量またはリスクのレベルで表現され、これを上回る被ばくを許す計画の策定は不適切と判断される。したがって、このレベルを勘案して防護対策を計画し、防護を最適化すべきである。ある被ばく状況の参考レベルの値を設定する場合には、その一般的な事情が十分に考慮されなければならない。

現存する被ばく状況が確認され、かつ防護対策がなされたときは、作業員および公衆の線量を、実際に測定または評価することができる。したがって、参考レベルは実際に採用した防護の選択肢を遡及的に評価するベンチマークとして、様々な機能を担うことがある。計画された防護対策を履行した結果として得られた実際の線量の分布は、対策の成否に依存して、参考レベルよりも高い被ばくを含むこともありうる。その場合、可能であれば、

参考レベルより高い被ばくを、参考レベルより低くなるよう、継続的に努力をすべきである。それがまさに繰り返しの最適化プロセスである。

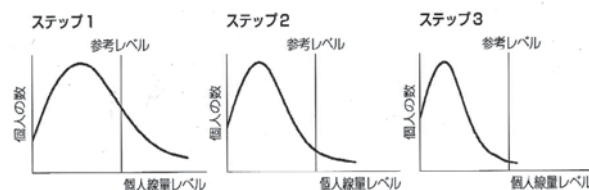
Ⅳ. ICRP 勧告の履行

1. 勧告の履行に関する一般原則

現存被ばく状況とは、管理についての方針決定がなされる時点で既に被ばくが存在している状況のことである。実際に、放射線防護の対策を正当化するか、あるいは少なくとも対策することを考えるほどの高い被ばくを生じるかもしれない現存被ばくの状況は、現に存在している。住居内または作業場内のラドンや、自然起源の放射性物質(NORM²⁾)が代表例である。また、ICRPの防護体系から外れた作業によって生じた環境中の放射性残渣、あるいは事故によって汚染された土地のような、人為的な現存被ばく状況についても、放射線防護上のなんらかの対策をする必要が生じるかもしれない。被ばくの低減対策が正当化されないことが明らかな現存被ばく状況もある。現存被ばくのうち、それを管理すべきか、管理になじまないかを議論すべき局面もある。その判断には、線源または被ばくが制御できるかの可能性だけでなく、経済的、社会的、文化的な一般的事情も勘案すべきで、規制当局の判断が必要となる。これは放射線源の「除外」「免除」の問題である。

現存被ばく状況では、複数の被ばく経路が関係する場合がある。またその線量が、極めて低いときから、稀なケースでは数十 mSvにも及ぶこともあり、個人の年線量として広い線量分布になる可能性もある。例えば、ラドンのように住居が関係する場合は、建材や被ばくする個人の行動で線量は大きく変動することが知られている。長年にわたって汚染している地域の個人被ばくは、住民の食習慣の違いで線量が大きく上下する。現存被ばくの状況では、このように、被ばく経路が多岐にわたること、あるいは個人の行動が重要になるので、実際の管理は難しくなる。

個人線量として設定された参考レベルは、現存被ばく状況における被ばくに対する最適化のプロセスで使用すべき、とICRPは勧告している。最適化された防護を履行することで、個人線量を参考レベルより下に引き下げることが目的としている。ただし、すでに参考レベルを下回っている被ばくを無視するのは適切ではなく、防護が最適化されているか、または更なる防護措置が必要かどうか確かめるため、それら参考レベルを下回る被ばくの状況についても一定の評価をすべきである。つまり、最適化プロセスのエンドポイントを先験的には決めるべきではない。最適化された防護のレベルは状況によって異なるからである。また、ある状況を管理するために設定された参考レベルの法的位置づけを決めるのは規制当局



第1図 現存被ばく状況における参考レベルの使用と、最適化プロセスの結果としての個人線量分布の経時的展開

の責任である。前述のとおり、すでに防護対策が履行されたときは、防護策の有効性を評価するベンチマークとして、参考レベルを適及的に用いることもできる。第1図に現存被ばく状況において、参考レベルがどのように使用されるか、その役割が図示されている。最適化のプロセスの結果として、個人線量分布が経時的に変化し、次第に、参考レベルよりも低い方向に向かっていることが理解できる。

現存被ばく状況の参考レベルは通常、予測線量 1 mSv から 20 mSv の間に設定すべきである。被ばくする個人は、被ばく状況に関する一般的な情報と、自身の線量低減の手段に関する情報を受けられるようにしておかなければならない。個人の生活習慣、行動が被ばくの重要な要因となるような状況では、教育や訓練とともに、個人のモニタリング、または何らかの線量評価が重要な要件になることもある。この典型的な例としては、事故後の汚染された土地における生活がある。

現存被ばく状況の参考レベルを設定するには、その状況の制御の可能性や、類似の状況における過去の管理経験が重要となる。現存被ばく状況では、ほとんどの場合、被ばくした個人も規制当局者も、被ばく線量を“通常”と考えられるレベルに近いあるいは同等のレベルにまで引き下げることが望むのが普通である。このことは NORM 残渣や事故による汚染などのような、人の活動から生じる物質による被ばくの状況に、特に当てはまる。対応はケースバイケースにならざるを得ない。

2. 長期放射線被ばくの状況への適用

長期放射線被ばくの状況に関する考え方は、ICRP Publication 82「長期放射線被ばく状況における公衆の防護」³⁾に記述がある。本勧告の副題には、「自然線源および長寿命放射性残渣による制御しうる放射線被ばくへの委員会の放射線防護体系の適用」とある。

長期放射線被ばくの状況のなかで扱いの難しい例題のひとつに、高濃度の屋内ラドンがある。これについては次節で詳しく解説する。もうひとつ、建材中や地中におけるガンマ線を放出する天然の放射性核種の存在もある。建材中の特定の放射性核種の放射能濃度について、線量低減対策を免除するためのレベル(介入免除レベルという)を、規制当局や関連する国際機関が定めるべき、とICRPは勧告している。このほか、ICRPの防護体系に基づく安全規制を受けていなかった過去の人間活動お

よび事象により発生した放射性残渣については、今後の防護対策の必要性、方法、規模および継続時間をケースバイケースで検討し、方針を決めるべきとも勧告している。状況の起源を追跡することができ、残渣を生んだ者たちがいまなお防護対策に対し、時間を遡って責任があると考えられる場合には、規制当局は、残渣に起因する線量を最適化のプロセスで決めたある線量(=参考レベル)以下に抑える、つまり制限をすることもできる。その状況を作った者たちに追加の放射線防護対策を求めることもできるということである。ただし、そのときの参考レベルの値は、計画被ばく状況の際の線量拘束値や線量限度よりも高くなることは当然にありうる。一方、放射線防護対策を必要としないと考えられるレベルの残渣には、追加的な制限を課すべきではない。

環境中に放射性物質が放出された事故の後には、避難など、人々の「通常」の生活がある制約を受けるような社会的混乱を引き起こすような防護対策が求められることがある。最終的にはどこかの時点で「常態」に戻る必要があるため、残留する長期被ばくが引き続き存在するにもかかわらず、ある段階で避難などの制約を中止するような決断が必要となるときもある。線量低減活動の中止を正当化するには、低減活動を発動させたであろうレベルにまで、実際の被ばくレベルが低減したことを確認したことを根拠とするのが最も単純である。そのようなレベルの被ばく低減がいまだ実現できていない状況の場合、それ以下では線量低減活動(介入)が正当化できそうにない現存年線量の一般参考レベル(<~10 mSv/年)を、低減活動中止のひとつの根拠とすることもできる。これは、Publication 82が勧告したレベルである。しかし長年実施されてきた防護対策を中止することは困難な場合もあるはずである。中止の決定が被ばく集団に受け入れてもらえない場合もあるだろうし、社会的な圧力が線量低減活動の中止による便益に優先することもあり得るからである。このような場合には、利害関係者(ステークホルダー)を意思決定の過程へ関与させることが非常に重要となる。

もうひとつ、公衆が使用する商品中の長寿命放射性核種にも考慮が必要である。その被ばく状況が計画被ばくの状況に分類される場合以外は、現存被ばくの状況として扱うべきである。現状では、種類の異なる商品が、同時に同一人物に高い長期被ばくを与える状況は考えにくい。ICRPはこの仮定に基づき、長期被ばくの有意な原因になる可能性のある、例えば、建材のような商品から予想される年線量について、一般介入免除レベルとして約1 mSvを勧告している。

Publication 103¹⁾では、上記を含む現存被ばく状況に関するいくつかのレベルが「参考レベル」一本でまとめられ、「状況に応じ、1 mSv/年から20 mSv/年の間」と整理された。

3. 住居内および作業場内のラドンへの適用

住居内および作業場内のラドンによる被ばくは、現存被ばく状況や、例えば、モナズ砂の貯蔵や処理のような行為から生じることがある。ICRPは以前に、ラドン、特にラドン222の被ばくに関する勧告書を刊行した⁴⁾。その後、いくつかの疫学的研究の成果から、比較的中位の濃度においてもラドン222被ばくのリスクが確認されている⁵⁾。欧州、北米および中国で行われた住居内での症例対照研究⁶⁾でも、肺がんのリスクと屋内ラドン222被ばくとの間に有意な相関が実証されている。これらの研究成果に基づき、ラドンに対する防護についての最新のICRP勧告が構築されている。

採鉱夫の疫学的研究と、住居内ラドン222の症例対照研究から導かれたリスク推定値には、現在、相互に顕著な一貫性が確認されている。採鉱夫の疫学的研究により、ラドン222による被ばくのリスク評価ができ、かつ、線量反応関係に対する修飾因子の影響がある程度調査できるため、これがリスク評価の強固な基盤となっている一方で、住居内ラドン222のプール研究の最近の成果は、いまや、採鉱夫の疫学的研究からデータを外挿することなく、人々が屋内で被るラドン222のリスクを直接的に推定できる状況にある⁶⁾。

ラドンのリスク評価に関するICRPの見解は、これまで採鉱夫の疫学的研究に基づくべきであるということであった。家庭内ラドン222被ばくについて現在豊富なデータが得られていることに鑑み、ICRPは、家庭内ラドン被ばくによるリスクの推定には、ラドン222の住居内症例対照プール研究の結果に基づくべき、と改めて勧告している。しかし、線量反応関係や、喫煙などの交絡因子(予測因子以外の、結果に影響を与えるおそれのある因子)の影響を調べるためには、採鉱夫の疫学的研究には、いまでもなお大きな価値があることは事実である。現在得られる疫学的な証拠によれば、ラドン222(および壊変生成物)の被ばくに伴う肺がん以外のリスクは小さいことがわかっている。

ラドンに関するICRP勧告の基盤となる論点は被ばくの制御性である。その被ばくが制御しやすいか否か、その制御性によって、例えば地下鉱山などの作業場におけるラドン被ばくをICRPの防護体系の対象とする必要があるかや、住居内ラドン被ばくを制限するための対策を考慮すべきかなどが検討される。このようにラドンは他の放射線源とは若干異なる方法で議論をしなければならない。被ばく経路が他の自然線源とは大きく異なり、ラドン特有であるからである。多くの個人にとってラドンは重要な被ばく線源であり、原理上制御できる(場合によっては制御しやすい)と考えられている。前述の通り、ICRPは家庭内と作業場のラドン222に対する防護について、Publication 65⁴⁾として勧告を公表している。その方針はいままで広く受け入れられてきた。それを最適化

の原則と参考レベルの使用を軸とした被ばく状況に基づく新たなアプローチに適応させることで、Publication 103¹⁾でもおおむね同じ管理方針が継承されている。

Publication 65では、被ばく低減対策を実施することがほぼ確実に正当となるラドン222からの実効線量が、年間10 mSvのレベルに設定されている。規制当局に対しては、3～10 mSvの範囲内で防護の最適化をしたうえで対策をとるべき、とされ、より低い参考レベルを模索することを期待している。この実効線量は、線量換算規約(注：平衡係数、滞在係数、呼吸率などのパラメータを代表値として固定し、線量⇔ラドン濃度の相互変換計算を単純化するための係数)によりラドン222の濃度値に変換することができる。住居と作業場では、同じ参考レベルであっても、主としてそれぞれの場所で過ごす時間が異なるため、対応する濃度値は異なっていた。住居については、年間3～10 mSvの線量範囲は、濃度として200～600 Bq・m⁻³で表現され、作業場については、500～1,500 Bq・m⁻³となる。つまり最適化の結果の表現は、対策レベル、すなわちそれを上回ると線量低減のために対策が求められる濃度レベルを設定することにあつた。

ICRPはPublication 103で、ラドンによる被ばくを制御するために、線源関連の放射線防護原則を適用することを勧告している。これは現場における防護の最適化を助けるために、規制当局が国としての参考レベルを設定すべき、という意味である。ラドンによる被ばく1 Sv当たりの名目リスクが若干変わったとしても、防護策の継続性と実用性を優先し、ICRPは、Publication 65⁴⁾で提示した通り、個人線量で示された参考レベルとそれに対応する放射能濃度に対して、10 mSvという線量幅としての高い側の値とそれに対応する放射能濃度を維持することとした。したがって、放射能濃度で表した参考レベルの高い側の値としては、引き続き、作業場については1,500 Bq・m⁻³、住居については600 Bq・m⁻³が採用されている。ただし、これについては若干流動的な国際動向があることを加筆したい。

2009年9月に世界保健機関(WHO)が屋内ラドンに関するハンドブック⁷⁾を刊行した。この文書では、最新のいくつかの疫学対照研究を根拠に、住居のラドンについての参考レベルを、ラドン222濃度として100 Bq・m⁻³に設定することが提案されている。この濃度は、線量に換算すると3 mSv/年相当になるとのことで、前述した従前の線量換算規約と比較すると、ラドンの線量学的リスクが約2倍に高く評価されることとなった。ICRPもこのハンドブックに対しいち早く反応した。2009年11月、ラドンの線量係数を従前の2倍にすることを視野に入れた声明文を公表する一方、現在ラドンに関する新たな勧告書を刊行するための検討作業に入っている。これらの動向に注視すべきである。

ラドンに関して、一般的な経済的、社会的情勢を考慮

して、国独自の参考レベルを定め、ついでその国の防護の最適化のプロセスにこれを適用することは、他の線源の場合と同様、その国の関係規制当局の責任となる。現場では、あらゆる合理的な努力を払い、住居内および作業場内のラドン222による被ばくを、国が定めた参考レベルより下に引き下げ、防護が最適化されていると考えることのできるレベルにまで被ばくを低減すべきである。また講じられる対策は、ラドン被ばくを合理的に、十分に低減できる手段を選択すべきで、ラドン濃度を国の参考レベルのすぐ下に抑えることだけを目的としたわずかな改善策をとることは十分ではない。

最適化プロセスを履行すれば、結果として、国の参考レベルを下回る放射能濃度になるはずである。濃度が引き続き低く保たれていることを担保するために、ときどき放射能濃度をモニタすること以外には、一般的にはそれ以上の対策は必要ないと考えられている。規制当局は、防護レベルが適正であることを確実にするため、ラドンによる被ばくにかかわる国の参考レベルの値を定期的に見直すべきである。

住居やその他の建物において、ラドンへの実際の防護対策をとる責任は、個人所有者に任されることが多い。しかし、実際のところ素人の彼らに、それぞれの建築物についての防護の最適化の判断を期待することはできない。そのため規制当局は、参考レベルに加えて、ラドン222に対する防護の最適化がすでになされているとみなすことのできるレベル、すなわち、それ以上の対策が不要なレベルを指定したいと考えることも想定される。いわゆる従前という、介入免除レベルの設定である。一方、ICRPは、屋内ラドン濃度が国全体の一般的な濃度を上回る可能性の高い、高ラドン地域を事前に指定しておくことに利点があるとも言っている。これにより、ラドンについて急を要するところに注意を集中し、また最も効果的でありそうなところに国の対策を集中することが可能になるからである。

職業被ばくに話題を移すと、国の参考レベルを上回るレベルの作業時のラドン被ばくは、職業被ばくの一部とみなすべき、とICRP¹⁾は勧告した。関連として、職業安全基準に関する国際的調和をはかる目的での1,000 Bq・m⁻³という対策レベル値が、すでに国際原子力機関(IAEA)の基本安全基準(BSS)に記述されている。ICRPも、ラドンの被ばく状況に対する職業防護を要求するための導入レベルとして、このBSS対策レベル値を、参考レベル相当の濃度値として国際的に使用してよいと考えているようである。このように、ICRPとIAEAはラドンの防護について互いの動向を確認しつつ、並行して検討を継続しているのが現状である。2010年1月現在、IAEA BSSの改定作業が大詰めの段階にきている。さまざまな環境パラメータが寄与するラドンを適切に管理するためには、BSSにおける職業被ばく防護のための要

第1表 1990年勧告と2007年勧告の防護基準の比較

| 被ばくのカテゴリ(刊行物番号) | 1990年勧告とその後の刊行物 | 今回の勧告 |
|---|--|--|
| ■ 現 存 被 ば く 状 況 | | |
| | 対策レベル ^{a)} | 参考レベル ^{a,m)} |
| ラドン(65) —住居内 —作業場内 | 3~10 mSv/年(200~600 Bq m ⁻³) 3~10 mSv/年(500~1,500 Bq m ⁻³) | <10 mSv/年(<600 Bq m ⁻³) <10 mSv/年(<1,500 Bq m ⁻³) |
| | 一般参考レベル | 参考レベル ^{m)} |
| NORM, 自然バックグラウンド 放射線, 人間の居住環境中の放射線 放射性残渣(82) 介 入: —正当化できそうにない —正当化できるかもしれない —ほとんど常に正当化できる | <~10 mSv/年 >~10 mSv/年 100 mSv/年まで | 状況に応じ 1 mSv/年から20 mSv/ 年の間 (5.9.2節参照) |

^{a)}別に指定されていなければ実効線量。

^{m)}参考レベルは残存線量を意味し, 個々の防護措置の結果回避された線量を意味した過去の勧告の介入レベルと異なり, 防護戦略を評価するために使用される。

件を発動する導入レベルとして, 1,000 Bq・m⁻³というラドンの濃度の表記のみならず, 対応する実効線量(≒年10 mSv)の併記も必要であると, 現在, 我が国は国際舞台で主張しているところである。さもないと, 例えば, 滞在時間が極端に短く, 実際の個人の被ばく線量がさほど大きくないにもかかわらず, 環境ラドン濃度が高く, かつ合理的に濃度低減できない場における作業はみな, 職業要件の管理が要求されることになってしまうからである。この動向にも, ぜひとも注視すべきある(連載第8回を参照のこと)。

4. 参考レベルの例

第1表では防護基準(現存被ばくにおいては“参考レベル”)に関する ICRP Publication 103(2007年勧告)¹⁾による値が, Publication 60(1990年勧告)およびそれから派生した一連の刊行物により提示されたこれまでの勧告に基づく数値と比較されている。現存被ばく状況においては, 2007年勧告は全体的には以前の数値を包含しているが, それらの適用範囲がより広範になっているといえる。

V. おわりに

本稿では, 現存被ばくの状況に関する放射線防護の考え方を解説し, その具体的な適用の例として, 長期放射線被ばくの状況に関する適用と, ラドンに関する適用の例を紹介した。ICRP 1990年勧告以降の複雑になりすぎた防護体系の単純化を目指し, この2007年勧告は約8年の議論を経て完成された。刊行に至るまでのICRPにおける検討経緯が当初より公開され, 国際的な意見交換が広く行われ, 行きつ戻りつの議論の結果としての着地点。この再整理された防護の枠組みが, 後に続くIAEAなどの国際機関による文書, またそれらを受ける我が国の放射線安全規制にも大きな影響を与えることになる。その過程において, 議論の基盤となるICRP勧告の記載

内容を十分に理解しておくことが極めて重要である。本稿がその一助となれば幸いである。

—参考資料—

- 1) 国際放射線防護委員会の2007年勧告(ICRP Publication 103), 日本アイソトープ協会, (2009).
- 2) 飯本武志, 米原英典, 小佐古敏荘, “自然起源の放射性物質の存在とその安全の考え方”, 安全工学, 48(4), 215-221(2009).
- 3) 長期放射線被ばく状況における公衆の防護(ICRP Publication 82), 日本アイソトープ協会, (2002).
- 4) 家庭と職場におけるラドン-222に対する防護(ICRP Publication 65), 日本アイソトープ協会, (1995).
- 5) Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York, NY.
- 6) S. D. Darby, D. Hill, H. Deo, *et al.*, “Residential radon and lung cancer—detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7,148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe”. *Scand. J. Work Environ. Health*, 32(suppl. 1), 1-84(2006).
- 7) WHO Handbook on Indoor Radon, World Health Organization, (2009).
- 8) International Commission on Radiological Protection Statement on Radon, ICRP, (2009).

著者紹介

飯本武志(いいもと・たけし)



東京大学
(専門分野/関心分野)放射線安全, 放射線防護, 線量評価, 放射線計測, 環境放射線(能)

活動報告

地球温暖化問題と原子力の役割

関東・甲越支部講演会 Atoms for Future

関東・甲越支部 企画委員会

関東・甲越支部企画委員会では、年間を通して講演会、見学会、原子力オープンスクール、若手研究者発表討論会、学生研究発表会等を企画、開催している。今回は、年数回開催している講演会 Atoms for Future(以下AFF)の活動を紹介します。AFFは、第1回「原子力産業界の今後の展開—日本原子力技術協会の役割」(講師：石川迪夫氏)から計10回開催しており、10回目の記念となるAFFを本年4月20日に学士会館(東京都千代田区)にて開催した。

講演は、最新の地球温暖化問題の状況を理解するために、『温暖化地獄』3部作の著者としても知られる、国際グリーン購入ネットワーク(IGPN)会長の山本良一氏(元東京大学生産技術研究所教授)を講師にお迎えし、「地球温暖化問題と原子力の役割」と題し、会員57名の参加を得て開催した。

講演で山本氏は、地球温暖化問題については科学者集団の見解を尊重することが第一義的に重要であるとした上で、世界は2℃以内に地球温暖化を抑制することを受け入れたにもかかわらず、このままでは2030年頃には2℃の壁を越えて「地球温暖化地獄の入口」を迎え、2050年頃にはティッピングポイント(臨界点)が次々と超えられる「地球温暖化地獄の5丁目」に突入し、最悪の場合、2060年にも4℃を突破することを警告された。現在、地球温暖化や海面上昇はIPCC等の最悪のシナリオに沿って推移していること、また、大気中の炭酸ガス濃度上昇に起因する海洋酸性化が生態系に重大な影響を与えることも指摘された。そして、2℃の壁を越えないためには、長期にわたる対策が必要であり、将来的には温室効果ガス排出量をゼロにする必要があること、また、早期に排出量

が減少に転じるほど、その後の削減率を緩和できるが、2020年に減少に転じた場合では、その後、年9%の削減が必要となること、これはソ連邦崩壊時の約5%削減を遥かに上回る水準を何十年も続ける必要があることを説明された。また、その場合の許容総排出量は110t/人であり、例えば現在、日本人は10t/人・年温暖化ガスを排出しているため、わずか11年で使い切ることになり、それ以降は排出量をゼロとしなければならないが、このような深刻な事実をメディアが全く報道しないことへの強い憂慮を訴えられた。

続いて、上記の深刻な状況やCOP15の失敗等を踏まえ、昨今、気候科学者達が地球を積極的に冷やす技術、ジオエンジニアリング(気候工学)について真剣に検討を始めたことを紹介された。ジオエンジニアリングでは硫酸エアロゾルを大気散布して地球を冷やす方法も検討されているが、このような技術と原子力技術との比較で言えば、原子力技術は実証された完成度の高い技術として優先的に利用すべきであり、ジオエンジニアリングは非常時の技術とすべきとの認識を示された。

講演後の質疑応答では、なぜ我が国において危機的な状況に関する正確な情報が国民に伝わらないのか、との質問に対し、欧米では懐疑論との激しい論争があり、政府等がWeb上にQ&Aを掲載していること、また、気象学会や科学アカデミーなどの専門家集団が声明を出し、国民にわかりやすく説明している点を指摘された。また、科学者集団がもっと社会的責任を果たすべきであり、原子力分野では原子力学会が声明等の発信活動を充実させ、国民の疑問に答えることが重要であると助言された。

炭酸ガスの排出量増大継続に危機感を覚えるとともに、原子力はその能力を十分発揮可能となるよう一層の努力が必要であると強く認識させられた講演であった。

関東・甲越支部企画委員会では、原子力の専門家以外の方も講師にお迎えし、時宜を得たテーマで今後もAFFを積極的に開催し、会員相互の啓発を図っていく予定である。

(日立GEニュークリア・エナジー・清水直孝、
2010年5月24日記)



講演風景

談話室

ニュージーランドの暮らしと語学ブラッシュアップ(その1)

クライストチャーチの3ヶ月

前原子力委員 松田美夜子

2月8日から4月30日まで、クライストチャーチの語学学校で12週間の語学研修に通った。英語を学ぶのは私の大学受験以来なので、50年振りである。英語を外国で学ぶのも初めての体験である。もともと英語は得意ではなく、うまくしゃべれない。特にヒアリングは苦手である。

そんな私が、今になって、英語をもっと使えるようになりたいと思ったのは、日本へこられる外国からの原子力関係のお客様、特に地層処分を進めているスウェーデンやフランスの地元からのお客様を心からおもてなしたいと思ったからである。そのためには、まず私が英語の環境になれることから始めたい。そんな気持ちで2月4日、夫と共にニュージーランドに旅立った。

なぜニュージーランドなのか

大学で廃棄物政策を研究していた私の専門は、環境先進国であるドイツを中心に、ヨーロッパ各国の廃棄物政策を定点観測することであった。したがって、原子力委員になるまでは、20年来、ヨーロッパの廃棄物政策(原子力を除く)を調査するため、毎年訪欧し続けていた。ニュージーランドはその対象になっていなかった。しかし、ニュージーランドこそ、自然保護政策に先進的な取り組みをしている国であることは知っていたので、ニュージーランドはぜひ一度訪ねてみたい国であった。また語学の達人の友人によれば、英国で英語を学ぶより、ニュージーランドは、特にクライストチャーチは、英国の伝統が色濃く残っていて、英国以上に英国らしいところであり、本場のクイーンズ・イングリッシュを学べるという。また英国で学ぶより安いのも魅力だと知らされた。最後に、真冬の日本を離れ、真夏のニュージーランドへ季節を超越することができること。これだけ条件が整うと、クライストチャーチは私の渡航先の第一候補になった。

旅行会社に頼むと高くなるので直接、ニュージーランドの日本人が経営する留学情報センターと連絡を取り、とりあえず滞在するためのコンドミニウム式アパートメントの手続きをお願いした。

クライストチャーチのまち

ニュージーランドの人口は426万人。面積は27万 km²、

四国を除く日本とほぼ同じ。人口密度は16人/km²、日本の21分の1。面積に比べて人口は極めて少ない国である。国の歴史は新しく、英国から独立したのは、第2次大戦後の1947年である。1860年代にイギリス人による入植が始まり、1907年にイギリスの自治領となった。クライストチャーチは、イギリス人が初めてニュージーランドを発見したときの寄港地アカロアに隣接した広大な平地で、イギリスの入植者たちが築いたまちなので、地名、通り、山川の名前、などすべてが祖国イギリスに由来している。

ガイドブックによると、150年前のイギリス人による開拓時代、その指揮を執っていた指導者たちの出身校がオックスフォード大学クライストチャーチ・カレッジであったことからこの町の名前がついたといわれている。入植時代から受け継がれたイギリス伝来の石造りの建物が並ぶ街並み。エイボン川に沿って作られた広大なハグレイ公園とボタニックガーデン。当時の開拓者たちが、ロンドンに負けない、まちを創り上げたいという意欲が実り、現在のクライストチャーチのまちは、ニュージーランドでも格別の格調の高さを誇っている。

彼らは理想のまちを創り上げるために、世界中からいろいろな植物を取り寄せた。その多くはハグレイ公園内のボタニックガーデンに今はみな大木となって聳え立っている。最初の寄港地アカロアから運んできた木は、しだれ柳。エイボン川東側のオックスフォード・テラス(ちなみに、エイボン川の西側はケンブリッジ・テラス)に



ハグレイ公園の巨木メタセコイア。エディンバラ公が1869年に植樹と記してある。141年前だ。

ある石碑の碑文によると、この柳の木は、(クック船長が)セントヘレナ島にあるナポレオンのお墓の柳から移植したもの。150年が過ぎて、エイボン川の両岸には見事な柳の大木が続いている。幹の直径1m以上、高さ30m以上。日本ではお目にかかれない立派な大木である。クライストチャーチの緑地帯の根幹を成しているのがナポレオン由来の木であることも歴史のつながりと伝統のつながりを身近に感じさせられ感銘を受ける。

クライストチャーチの人口は、45万人。カテドラル広場を中心とした半径約1kmがシティセンターで、この中に市街地が広がっている。朝晩はサラリーマン、労働者、学生などで賑わうシティセンターも、6時を過ぎると商店はほとんど店を閉じ、人通りも少なくなる。土日は商店が休みで、静かな街に戻る。

住居について

ニュージーランド滞在で最も気になるのが住居と学校の決定である。EU各国を旅してきた私たちは、旅慣れはしているが、外国暮らしのよしあしは、ホテルで決まると思っている。今回は滞在が3ヶ月と長期になるので、ビジネスホテルのようなところは、狭くて同行してくれる夫に気の毒である。今回は、自炊が出来る、自宅と同じ程度の生活空間のあるコンドミニウム式ホテルを選んだ。少し贅沢ではあるが、改装したばかりのシステムキッチンつきの4つ星ホテルである。場所は、市のシンボル、クライストチャーチ・カテドラルまでゆっくり歩いて5分。交通の中心であるバス・エクスチェンジまでも歩いて5分。近くには銀行、郵便局、コンビニなどがあり、10分ほど歩くと、大きなスーパーマーケットが幾つもあるショッピングモールがある。ハグレー公園やボタニックガーデンは歩いて15分。散歩がてらに高級ブチックなど覗いてみるなど大変便利な場所である。まちの中心街であるけれど、メインの大通りには面していないので、



日曜日のカテドラル広場。中心地なのに商店もしまつて人影もまばら。のどかで静かなまち。

非常に静かである。

街の中には15分間隔で無料シャトルバスが走っており、スーパーでの重い買い物にはとても便利。このバスには電気自動車が使われている。乳母車のお母さんも車椅子のひとも、誰でも利用し易いシステム。車椅子の場合、運転手が車を降りて乗車を手伝うなど、体の不自由な人も気軽に外出できるシステムが出来ている。

何よりもうれしかったのは、物価の安さ。1NZドルが70円から、滞在中に60円に下がり、割安感を味わった。きめ細かな泡をかぶった最高に美味しいカフェオレが5ドル、300円で飲めるのはとてもシアワセ。肉や野菜が日本の6割で買えるのは幸いであった。サーロインステーキはニュージーランドでは1キロ20ドル(1,200円)。どのお肉も本当に新鮮でおいしく食生活は豊かである。

どれくらいの費用が必要か

学生留学の場合、ホームステイをすると3食付1週間で、平均300ドル。13~16m²の個室に住める。現在、1NZドル70円なので、1ヶ月の生活費は8万4,000円となる。東京での学生生活に比べるとかなり安い。学費は学校によってさまざまだが、最も高いといわれる私が通った学校では、日課午前9時から午後3時15分まで、土日は休みで週400ドル(28,000円)、1ヶ月だと11.2万円になる。

この基本経費に、滞在週を掛けると必要経費が算出できる。日本から来る学生は、私の学校の場合、全体の2割である。夏休みとか、冬休みなどで変動があるが、クラスの中でも、4人でチームを組んだり、2人で組むので、日本人同士になることはなく、国籍をあまり気にすることはない。スイスからの学生の場合、クラス全員がスイス人だったりすることがあるが、日本人は少ないほうである。日本人の滞在日数は多くて3週間と短い傾向がある。台湾、タイ、韓国の学生は短くて6ヶ月と、日本人に比べて長い。ただし日本人の中にも、大学を休学してくる学生は、滞在期間が長い。日本人学生は、文法の成績が飛び切り優秀なので、もし6ヶ月滞在すれば会話は上達できる。

若い人たちは、1週間の海外滞在でも語学研修の効果がある。何よりの効果は、国際社会では学生はこんなに必死に勉強しているのだということをもっと感じる。今度はもっと時間をとって本格的に勉強しようと、新しい目標を得て、帰国するからである。毎週金曜日は、帰国する学生の修了式があり、学生一人ひとりが最後のスピーチをするのだが、滞在日数の少ない日本の学生は、必ずもう一度戻ってくるとスピーチしている。頼もしい限りである。

語学研修プログラムで学んだことが何かは次号で。

(2010年 6月7日 記)

自転車先進都市 ウィーン

郵船航空サービス ウィーン駐在事務所 柏村 元一

自転車先進都市であるウィーンを紹介したい。ウィーン市は面積約415平方キロ、人口約170万人。横浜市とはほぼ同程度の大きさで、人口はその約半分だ。市は環境負荷低減の観点から、市民に自転車の利用を推し進めている。統計では、全体の交通量に占める自転車数のシェアが現在は5%とのこと。2015年には8%に延ばす目標を掲げている。

市内のいたるところに自転車道があり、その総距離は1,100 km以上(1996年比で2倍)。総延長距離にすると東京～福岡間だ。その数値にはあらためて驚いた。自転車・歩行者専用道路もあるが、網の目のように張りめぐらされているのは、車道、歩道の一部が自転車道になっているケースだ。一方通行の細い道でさえ、車両の幅を削って自転車道が確保されていることに感心する。先日は車道の中央に自転車専用の左折レーン(車両は右側通行)を見つけた。

ウィーン市が発行する自転車道マップを手に街を走ると、どこへ行くにも大方、自転車道を走って目的地へたどりつける。歩道を走ったり、自動車の隙間を縫うように走らなくて済む。

City Bike Wien という公共レンタル自転車サービスもある。ウィーン市内を移動するケースの50%は、5 km以内の距離であるという統計があり、その移動手段は自転車に替わり得るというアイデアだ。市内60箇所以上にBike stationがあり、クレジットカード・キャッシュカードなどを機械に通して借り出すことができる。1時間以内は無料で最大120時間まで借りることができる。目的の自転車置き場に自転車があるかどうかは、インターネット上でリアルタイムにチェックできる。ちなみに2003年開始当初はすべて無料、施錠なしでスタートした。悲しいことに大量の自転車が盗まれたため、今のようなデポジットシステムになっている。

出発地住所と目的地住所を入れると、自転車道限定のルート検索ができるサイトもある。距離・時間ももちろん、ルートの傾斜状況もビジュアルに確認できる。

最もありがたいことは、地下鉄・国鉄の列車に自転車をそのまま持ち込めることだ。平日の9～15時と18時以降および週末・祝日はいつでも持ち込める。

とりえず自転車でフラッと出かけて、しんどくなったり、雨が降ったり、暗くなったりすれば列車に乗せてしまえば良いのだ。日本にいた頃は走った分だけ、戻らなければならなかったもので、これ以上進むべきかどうか

悩ましかったが、こちらは帰りの心配無用。この差は大きい。

国鉄は協力的で、各種キャンペーンを展開している。一例に、オーストリア国内1日乗り放題、自転車持ち込み費用込みのグループ乗車券がある。2～5人のグループに適用されるが、金額は人数に関わらず1グループで35ユーロ。5人利用の場合、1人あたりたった7ユーロになる。多くの人に利用してもらいたい良いアイデアだと思う。

ウィーン市内にもサイクリングコースはたくさんあるが郊外の風景も格別だ。ちょっと列車に乗ればワイン畑の丘が続き、小さな田舎の村々が点在する景色が広がる。

自称、ウィーン自転車部部长として、年に数回日帰りツーリングを企画する。自分を含め軟弱集団なのでコース選定の条件は厳しい。

- (1) 風光明媚なところまで列車利用
- (2) ハイライトとなる観光スポットがある
- (3) 食に関して名産品がある
- (4) 総距離30～50 km くらい
- (5) 途中で脱落者、自転車故障があっても困らないよう、国鉄の線路から離れすぎない
- (6) アップダウンの激しいものは除外
- (7) ゴール地点は駅近でワイン居酒屋がある
- (8) 列車の停車時間に余裕がある

過去に自転車を乗せようとしている間に列車が出発してしまったり、コース途中でうなぎの燻製を食べ、ワインを飲んですっかりくつろいでしまい、そこから最寄り駅までの20 km、延々と上り坂、かつ雨&逆風の条件にさらされたことがある。個人的には食いしん坊かつ酒飲みなので、(3)、(7)に特に気を配っている。

こんな条件にも対応できる懐の深さ、やはりウィーンは自転車先進都市だとつくづく思う。

(2010年 6月20日 記)



柏村元一(かしわむら・げんいち)
1970年生まれ 大阪府枚方市出身 関西大学卒業後、93年近畿日本ツーリスト入社、02年ジャルパックウィーン支店へ転職、05年から現職でオーストリア・中東欧の物流業務に従事。目標ツーキニスト(自転車で通勤する人)だが、つつい車通勤の日々を送っている。

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

溝はなぜ埋まらない

NHK 報道局 横川 浩士

東京に異動して1年。原子力取材漬けの日々を送っている。こうした中で、原子力に関わる人々と地域住民や国民との意識の差をより強く感じるようになった。わかりやすい例が、よく話題になる「安全」と「安心」だ。

事業者や国、専門家はよく「原発の安全性に問題はない」と指摘する。しかし、地域住民や国民が求めているのは「安心感」であり、どんなに「安全だ」と言われても、「不安だ」と感じる、この意識の溝が埋まらない。

なぜこの溝が埋まらないのか。それは、原子力の関係者と国民との間に横たわる絶対的な知識量と情報量の差に原因があるのではないかと思う。

話はいきなりずれるのだが、以前、投資用の賃貸マンションの1室を購入しないかと、誘われた経験がある。損はしないという。私は「そんなうまい話はない」と思ったが、ここは一つ、打ち負かした上で断ろうと思ひ、質問攻めにして矛盾点を突こうとした。「なぜ、あなた自身が購入しないのか?」「リスクはないのか?」「借りる人がいなかったら?」「地震や火事でマンションがつぶれたら?」「他社との比較は?」……。知識のない私なりにありとあらゆる質問をぶつけたが、そこは百戦錬磨の営業マン。すべてに答えを用意し、「大丈夫です。ご安心を」と返された。あやうく陥落しかけたが、最後まで私はこの業態への不信感をぬぐえず、お断りした。もしかすると、その営業マンは実はとてもいい人で「こんなにいい話なのに、なぜ断るのだろう?」と不思議に感じたかもしれない。しかし、私の「不信感」は消えなかった。

振り返ると、この不信感は、相手が私より圧倒的な知識と経験を持ち、私がどのような疑問点をぶつけても、満点の回答をする姿勢から、「相手の手の内で踊らされている」「どこか、気づかないところに落とし穴があるはず」という感覚がぬぐい去れなかったのが原因だと思う。あのとき、デメリットやリスク、落とし穴など、相手にとっても不利な情報を示し、本音をさらした上で詰め寄られたら、どうなっていたらだろうか。

原子力の関係者と地域住民や国民との溝もこれに近いのではないかと、感じる。

圧倒的な科学的な知識と経験を持つ事業者や専門家は、科学的知見から原発やその関連施設の安全性を噛み砕いてわかりやすく説明しようとする。しかし、多くの国民は専門知識を持つわけではなく、理論的に説明をされても「本当にそうなのか?」という不信感をぬぐい去ることができない。「安全」を押しつけられて

も、心のどこかで「理解できていない部分で何かが起きるのでは?」「裏で落とし穴があるのでは?」と感じてしまうのではないか。知識と情報を持つものは、それらを持たないものの不安をなかなか理解できないものだ。

もう1つ、両者の間の溝が埋まらない原因に、原子力の世界に存在する「本音と建て前」があると感じる。事業者と地元自治体との関係、国と地元自治体との関係、事業者と国との関係。どこを見ても、「本音と建て前」が存在し、さらには「タブー」も存在する。関係者一同、みなそれがわかっているのに、あえて触れない。その結果、国民からは「本音は別にあるんだろう」と見透かされ、それが不信感につながっているのではないか。

原子力の世界は、高度な知識や情報、経験が求められるが故に、研究者も事業者も行政も、その世界独自の論理にとらわれ、理屈に縛られることになる。その結果、「原子力村」とも表現されるような、国民には理解されない感覚を生み出しているのではないだろうか。

こうした溝は簡単に埋まらない。しかし原子力の関係者はもっと本音で国民と向き合うべきだと思う。「毎日、何億円も損をするから、早く運転を再開したい」「ベストの選択ではないが他に方法がない」「いろいろ検討しましたがやっぱり駄目でした」……。デメリットやリスク、失敗例などを示し、その知識量や情報量の上限を見せることで、逆に国民は、隠し事をしていないと感じ取り、安心感を得るのではないだろうか。きれい事ではすまされないのは重々承知しているが、そうした姿勢、心構えを持つことが大事だと思う。

知識や情報におごった姿勢や、建前論はメディアも陥りがちだ。メディアに身を置く者として、私自身、その影響力を十分に理解しつつ、自分の原稿や報道の姿勢に独りよがりな部分がないか、本質から目を背けていることはないか、常に意識し、求められる役割を果たしていきたい。

(2010年8月20日記)



横川浩士(よこかわ・ひろし)

NHK 報道局科学文化部記者

2001年東京大学農学部卒。NHK 入局。仙台放送局、石巻報道室、静岡放送局を経て、2009年秋から現所属。経済産業省を担当し、主に原子力や製品安全を取材。