

学会声明

1 「地球のためのクールエネルギー原子力」

日本原子力学会は、地球温暖化対策を重要なテーマとする洞爺湖サミットが開催される機会に、原子力エネルギーの有効性が広く正当に評価されるべきであることを、国際社会に向けて発信する。

「春の年会」セッション報告

16 地震による設備の健全性への影響などを議論—学会が柏崎刈羽発電所と中越沖地震で特別セッション

新潟中越沖地震では、断層がどう動いたのか。それが発電所にどのような影響を与えたのか。しだいに明らかになってきたそのメカニズムと、今後の見通しを紹介する。 佐田 務



報告

19 原子力カルネッサンスに向けた柔軟な放射線防護体系

国際放射線防護委員会の新勧告は完成したが、IAEAでは国際基本安全基準を改定する動きが本格化している。このような中で、日本のような原子力先進国には、今後の原子力開発に不要な負担を強いることが無いようにする努力が求められている。 岸田哲二

巻頭言

3 「課題先進国日本のエネルギー政策」

小宮山 宏

時論

4 日朝関係の展望—国交正常化交渉を中心に

近くて遠い国、北朝鮮。日朝国交正常化に向けた交渉は、拉致と核・ミサイル問題で行き詰っており、交渉が今後、軌道に乗ったとしても経済協力問題という難しい問題が控える。

遠藤哲也

解説

21 高速増殖炉サイクルの技術開発

高速増殖炉サイクル技術の実用化をめざして平成18年にスタートした研究開発プロジェクトFaCT。原子力機構では今、その主概念であるナトリウム冷却FBRと先進湿式法再処理、簡素化ペレット法燃料製造の組合せの開発に資源を集中した研究開発を行っている。

佐賀山豊、長沖吉弘

26 次世代原子力システムの核拡散抵抗性

次世代原子力システムの研究開発が進む中、核不拡散への配慮はますます重要となってきた。特に、「核拡散抵抗性」の確保が同システムの設計要件になりつつある。抵抗性についてのこれまでの議論、評価手法、そして今後の課題や方向性について解説する。

千崎雅生、久野祐輔、井上尚子、勝村聡一郎

私の研究から

32 エクセルギーと経済と人類の歴史

エネルギー(正確にはエクセルギー)資源は燃焼や転換によって、採掘に要するエネルギー以上のエネルギーの余剰を産む。この「余剰」があるために、エネルギーは労働とともに、実質経済を司っている。

福田研二

表紙イラスト Provence プロヴァンスの窓辺 / フランス・プロヴァンス地方

何げなく飾られたリースに住人達の心のあたたかさを感じる。古い建物だが大切にそれを使っていて、クリスマスのリースがそれを引き立てていた。

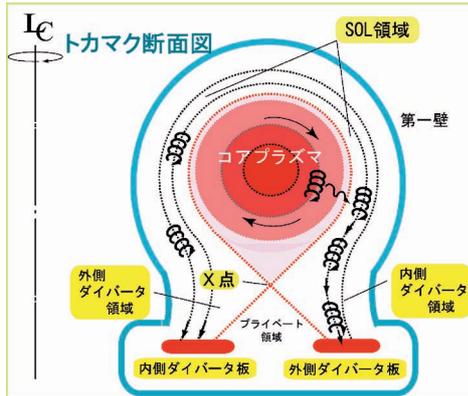
絵 鈴木 新 ARATA SUZUKI
日本美術家連盟会員・JIAS 国際美術家協会会員

連載講座 今、核融合炉の壁が熱い！
—数値モデリングでチャレンジ(1)

36 はじめに、壁の前で何が起きているのか？

核融合の実用化への鍵の一つとなるのが、核融合炉の「壁」を構成する高熱流機器やブランケットの開発だ。そこにはどんな物理や化学、工学が渦巻いているのか。初回は壁の前で何が起きているのかを、数値モデリングによって解き明かす。

相良明男, 乗松孝好, 畑山明聖, 滝塚知典

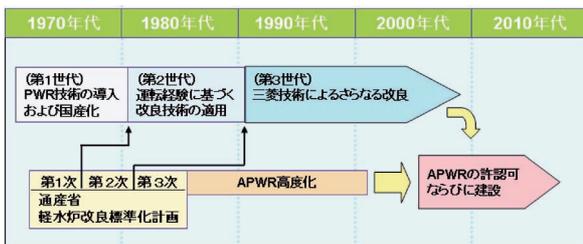


連載講座 軽水炉プラント
—その半世紀の進化のあゆみ(9)

42 日本の軽水炉開発(3)
—PWRの改良標準化(①)

米国から導入された軽水炉は初期の運転段階でさまざまなトラブルを経験する。このため当時の通産省は、軽水炉の改良標準化計画を推し進めた。今回はそのうちPWRの信頼性向上への取り組みを、メーカーの視点から紹介する。

北村哲男, 鈴木成光



リレーエッセイ

53 「東海村の研究所から」小山田 修/
「コミュニケーションがつなく想い」長須真由美

ジャーナリストの視点

57 「負の発想を変える時期」

吉田 仁

7 NEWS

- 原子力委が原子力白書を公表
- 原子力委, 原子力の利用拡大めざした取組を決定
- 東大と原子力機構が人材育成で連携協力
- 茨城大と原子力機構が教育分野で連携
- 中性子で微粒子の配向過程を解明
- 原産, 従事者被ばく線量記録の一元化で提言
- 海外ニュース

私の主張

48 「原子力」は地球環境対策の決定打となり得るか—トリウム熔融塩炉による増殖サイクルの提言 古川和男

会議報告

- 50 高レベル放射性廃棄物の地層処分事業の推進に向けて—NUMO 技術開発成果報告会 土 宏之
- 51 倫理委員会企画セッション報告—「08年春の年会」から 辻 政俊
- 52 高い双方向性・独自性を目指した対話—原子力青年ネットワーク連絡会・学生連絡会共催『学生と若手社会人の対話 in 大阪』 岡本将典

- 6 会告 「第50回通常総会」のご通知
- 47 書評 横山須美
- 54 From Editors
- 55 50周年記念記事の募集
- 58 英文論文誌 (Vol.45, No.6) 目次
和文論文誌 (Vol.7, No.2) 目次
- 60 会報 原子力関係会議案内,
「日米欧原子力学生国際交流」派遣学生募集,
主要会務, 編集後記

WEB アンケート

2月号のアンケート結果をお知らせします。(p.56)
学会誌記事の評価をお願いします。 <http://genshiryoku.com/enq/>

学会誌ホームページが変わりました
<http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/atomos/>

「春の年会」理事会セッション(2008年3月27日)において、河原 暉会長より、本年7月に開催される洞爺湖サミットに向けた日本原子力学会声明が発表されたので、ここに掲載する。

日本原子力学会声明

「地球のためのクールエネルギー原子力」 Nuclear, Cool Energy for the Earth

前 文

私たち日本原子力学会は、原子力エネルギーの学術的、技術的専門家集団として、地球温暖化対策を重要なテーマとする2008年洞爺湖サミットが開催される機会に、下記のメッセージを国際社会に向けて発信する。

記

世界のエネルギー需要は、2030年には、現在の対策のままではおよそ5割増しになると見込まれている。地球環境を維持しつつ、増大するエネルギーを確保するために、各国で低炭素エネルギー源による多角的なエネルギー確保への取り組みが活発に行われている。

原子力エネルギーは低炭素エネルギーのひとつであり、燃料のウランは、他と比較してエネルギー密度がはるかに高い上に、温暖化効果ガスをほとんど排出しない。またウラン資源は、地球上の特定地域への偏在が少なく、供給安定性に優れている。さらに、ウラン燃料はリサイクル可能で、資源を千年単位で有効利用できる特長を持つ。ゆえに、温暖化防止の国際的枠組みにおいて、原子力エネルギーの有効性は、広く正当に評価されるべきである。

しかし同時に、私たちは、原子力の平和利用には、常に大きな課題が存在することを認識している。すなわち、安全性の確保、核不拡散と核セキュリティの確保、そして極めて長期にわたり放射性物質として存在する廃棄物問題である。これらの問題は、科学者・技術者としても果敢に挑戦すべき課題であり、私たちは、その解決が技術的にも社会的にも可能であると確信している。

美しい地球、豊かな生態系を育む自然と共存する人類社会を営み続けるために、科学者・技術者はたゆまず研鑽し、成果を高め、現世代から次世代へ公平な資産を継承していかなければならない。日本原子力学会はその責務を果たすために、原子力科学者・技術者の英知を集め、地球温暖化抑制のために、技術開発を推進し、クールエネルギー原子力と世界の人々との調和ある発展と平和に貢献してゆく。

以 上

Akira KAWAHARA, President of the Atomic Energy Society of Japan, issued the proclamation below at the 2008 Annual Meeting on March 27 for the Toyako Summit to be held in July of this year 2008 in Japan.

Proclamation of the Atomic Energy Society of Japan

Nuclear, Cool Energy for the Earth

We of the Atomic Energy Society of Japan, as a group of academic and technical professionals in the field of nuclear energy, wish to take the convening of the 2008 Toyako Summit, one of the important themes of which is addressing global warming, as an opportunity to issue the following proclamation to the international community.

Global energy demand is expected to increase by 50 percent by the year 2030 if current world energy policies are retained. Active pursuits are underway in many countries to find diverse forms of energy from low-carbon sources to meet an increasing demand while maintaining the global environment.

Nuclear energy is one form of low-carbon energy, and the uranium used for fuel not only has a far higher energy density than other sources, but the conversion process emits almost no greenhouse gases. Uranium resources also exist in many parts of the world, rather than being confined to certain regions, making it a significantly more stable source of energy in terms of supply. Furthermore, uranium fuel is recyclable and can be used effectively for a time span on the order of thousands of years. Accordingly, nuclear energy should be widely and duly recognized for its effectiveness in international schemes for the prevention of global warming.

At the same time, however, we realize that there are major issues invariably present for the peaceful use of nuclear energy. Specifically, there are issues in ensuring further safety, the nonproliferation of nuclear weapons, nuclear security, and the management of radioactive materials that persist as waste for extremely long periods of time. Scientists and engineers must take bold approaches in addressing these issues, but we are confident that solutions exist for both the technical and social aspects.

In order for the society of humankind to continue on this beautiful planet Earth and live in harmony with the rich ecosystems nurtured by it, scientists and engineers must be tireless in their efforts to develop and refine solutions so that we may pass down a just legacy from the present to future generations. To do our part towards fulfilling that duty, the Atomic Energy Society of Japan is committed to gathering knowledge from nuclear scientists and engineers, promoting technological advances, and contributing to peace and development in a manner in which nuclear energy as a 'cool' energy can coexist in harmony with the people of the world to help curb global warming.

課題先進国日本のエネルギー政策



東京大学総長

小宮山 宏 (こみやま・ひろし)

東大大学院工学系研究科博士課程修了，工学博士。東大教授などを経て，平成17年より現職。「知識の構造化」，「『課題先進国』日本」，「地球温暖化問題に答える」など多数の著書がある。

ビジョン2050(文献1)

2050年における日本の電力システムを，私は次のように描いている。

エネルギー源の主力は原子力と自然エネルギー，両者のシェアは同程度で，電力の総供給量は現在とほぼ同じ。変動する需要に対応する調整機能を，揚水発電，ヒートポンプ給湯など現存する技術に加えて，今後開発される電気自動車のバッテリーなど「蓄エネルギーデバイス」群が担う。電力はエネルギー総需要の大半を占め，日本のCO₂排出量は現在の2割，すなわち8割減となる。

このビジョンを実現するためには，原子力発電を現状維持あるいは増強，自然エネルギーは，現在の水力発電の5倍程度にまで高める必要がある。増分を担うのは，太陽電池，風力，バイオマス，中小水力である。

原子力と自然エネルギーからなるシステムの課題は，大きな負荷変動を避けたい原子力と，大きな出力変動が不可欠な自然エネルギーによって，いかにして安定かつ柔軟な供給システムを構成するかにある。現在でも夜間電力は過剰である。そのため，余剰電力でダムに水をくみ上げエネルギーを貯めている。それだけではまだ余るため，さまざまな工夫がされている。エコキュートという商品名で売られているヒートポンプ式の給湯システムは，夜間の電気をお湯として貯めておくことができる上に，電気エネルギーの4倍程度の湯をつくることのできるから効率もよい。夜間電力で製氷し，昼間の冷房に使うのも同じ発想である。

しかし，自然エネルギーが増えてくると，こうした既存の「蓄エネルギーデバイス」だけではとても対応できない。最も期待できるのは自動車のバッテリーであろう。自動車の進化のありそうなパターンは，エンジンがハイブリッド化され，プラグインハイブリッドとなり，やがてエンジンがとれて電気自動車になることである。進化に応じて積載するバッテリー容量が増加していく。電気自動車は1台で20 kWh以上のバッテリーを積載する必要があるが，この容量は，家庭の1日のエネルギー消費量の平均値に相当する。新電力システムにおける「蓄エネルギーデバイス」の主翼を担うことができるはずだ。

原子力発電と自然エネルギーと「蓄エネルギーデバイス」を組み合わせた脱化石電力システムが，2050年のビジョンである。

異端は異教より憎し?

太陽電池やバイオマスの研究をしていた頃に気がついたことがある。お互いが欠点をあげつらうのだ。太陽電池派は，光合成効率は低いからバイオマスは太陽電池の何十倍もの面積を必要とすると攻撃する。バイオマス派は，太陽電池はコストが高いと反撃する。風力発電派も同様である。原子力派による自然エネルギー批判はまた厳しい。出力や電圧の変動の大きい，あんな汚い電源は使い物にならない，量的にもかすみたいなものだ，といった具合だ。自然エネルギー派の反撃は，もちろん原子力の安全性だ。

しかし，人類は危機に瀕しているという事実をよく考えないといけない。地球温暖化は大変なことだと考えた方がよい。100%確実なことなどももちろんないが，現在の知見からすれば，大変な事態が進行しているのである。原子力の意義を語るために自然エネルギーを貶める必要などないし，逆も真だ。非化石エネルギー資源の導入を，なんとかスピードアップしないと間に合わない。エネルギーという巨大なシステムは，舵を切ってエンジンを全開にしても，簡単には進まない。例えば，最初の原子力発電所が稼働してから世界のエネルギーの1%を担うまでに30年の歳月を要している。世界のエネルギーシステムの切り替えには，おそらく1世紀かかるだろう。

あれかこれかの二者択一ではない。あれもこれもなのだ。

日本のこのビジョンは，原子力と自然エネルギーの比など国情に依存する点はあるが，世界に敷衍することが可能である。つまり，われわれ自身の課題を解決すれば，その解は世界標準に発展しうるのである。それが国際競争の本質であるということ，日本人は今，肝に銘じなければならない。エネルギー問題に限らない，拙著「『課題先進国』日本」(文献2)をお読み頂けると幸甚である。

(2008年 4月4日記)

文献1 地球持続の技術(岩波新書 1999年 小宮山 宏著)

文献2 「課題先進国」日本(中央公論新社 2007年 小宮山 宏著)



日朝関係の展望 国交正常化交渉を中心に

元 日朝国交正常化交渉政府代表・原子力委員会委員長代理 遠藤 哲也

戦後すでに60有余年がたち、終戦処理として残された主な外交案件としては、北方領土問題を解決しての日露平和条約の締結と北朝鮮との国交正常化の2つになっている。日朝国交正常化は1990年、金丸自民党副総裁(当時)の訪朝を契機に交渉が始まってから、かつてマラソン交渉といわれた日韓交渉以上の長い交渉となり、17年以上が経過しているが、その見通しは立っていない。

交渉はなぜ行詰っているのか、最大の難関は拉致問題だが、加えて核・ミサイル問題が挙げられる。だが、交渉が今後なんとか軌道に乗ったとしても経済協力問題(資金供与)は難しい問題である。筆者はこの小稿で、これらの諸点について何が問題であり、交渉進捗の見通しがあるのかなどについて私見を述べてみたい。

日朝国交正常化はなぜ必要か

そもそも日朝間の国交を正常化することはなぜ必要なのか。北朝鮮のように個人崇拜にこりかたまつた国、人権を無視する国、若干の鉱物資源を除いては経済的にもさして魅力のないアジアの最貧国の一つとなぜ国交正常化を急ぐ必要があるのか。国交が正常化すれば、日本からの資金協力が始まるが、これは独裁者の懐に入り、政権の延命に寄与するのではないかと、むしろ北朝鮮が「普通の国」になるのを待った方がよいのではないかなどの疑問を抱く向きがある。

だが、戦後処理という歴史上の責任は重い。特に、朝鮮半島については、いわゆる36年間の植民地統治の過去を清算するという意味がある。北朝鮮が日本にとって僻遠の地にある小国ならいざ知らず、一衣帯水の隣国で、当然のことながら常に問題が生じ、その国と自由に話し合いができないというのは、極めて不便、不都合であり、また不自然である。北朝鮮のような甚だ不透明な国の場合、日本の安全保障上の観点からも好ましくない。友好国になることは難しいとしても隣国同士の正式な関係を作ることは最小限必要である。

資金協力が、相手国の軍事力強化につながり、政権の延命に資するという側面は完全に否定できないが、北朝鮮への経済協力には過去の「負の遺産」の清算という側面があるし、協力の仕方によってはマイナス面をある程度抑えることができよう。

北朝鮮との国交正常化を時間を決めて、いつまでに実現すべしといった必要は全くないし、望ましくもないが、諸問題を解決して、なるべく早く国交を正常化することは日本にとってもプラスであろう。しかし、何が何でも早くということでは全くなく、筋道に沿ってきちん

と進められるべきである。

拉致問題にいかに対処するか

拉致問題について日朝双方の立場は完全に対立している。日本側は(1)すべての拉致被害者およびその家族の安全確保とすみやかな帰国、(2)真相の究明、(3)拉致実行犯の引渡しを要求し続けているが、他方、北朝鮮側は日本側が提起した問題についてはできる限りのことはやってきた、拉致問題は解決済みであるとの立場を繰り返している。伝えられるところによれば、先の南北首脳会談(2007年10月)でも、金正日国防委員長はどうやって死んだ者を生きかえらせることができようかなどと述べた由である。

日本側としても、拉致問題は国民感情上の大問題となっているので、安易に譲歩することはできず、他方、北朝鮮側も首脳の発言がからんでいるので後に引けず、北朝鮮のような体制で本当の真相が明らかになるのは政権が替るのを待つしかなかる。そうであるとすれば、拉致問題の処理は「全面解決」ではなく「進展」であり、そのためには双方が少しずつ歩み寄る以外に現実的方法がないのではないと思われる。北朝鮮についていえば、少なくとも日本側の照会に対してこれまでのような木で鼻を括ったような応答ではなく、特定失踪者も含めてもう少し誠意をもった返事なり調査(場合によっては日朝の共同調査)をすることが考えられよう。また特定されている拉致実行犯の引渡しについてもある程度前向きに考えてよいのではないかと。他方、日本側としても、拉致問題の解決、進展云々を一般論として繰り返すばかりではなく、どこに糸口を見出すのかを具体的に考える必要があり、北朝鮮の対応次第では制裁の一部を象徴的に解除することも考えてはいかがだろうか。

いずれにせよ、拉致問題についての非は完全に北朝鮮側にあるとはいえ、双方がつっぱったままでは事態は進まず、日本側にとっては国民感情、世論がからむので非常に難しいがある種の政治的な対応が求められるのではなかろうか。

核・ミサイル問題の本当の解決

北朝鮮の核・ミサイル開発(両者は不可分である)は特に日本の安全保障に直接かかわる問題で、この問題が日本にとって納得いく解決がなければ日朝国交正常化はあり得ない。北朝鮮のミサイルは日本全域をすでに正確な射程に入れており、現在、北朝鮮の核弾頭がミサイルに搭載可能に小型化されているのかはわからないが、これも時間の問題であろう。北朝鮮の核は日本にとっての直

接の脅威である。

核問題は六者協議において取り上げられ、北朝鮮自身も核計画の廃棄を原則的には約束し、廃棄に向けてのとりあえぬロードマップも描かれているが、それとはっきりしたものではなく、北朝鮮は例によってのりくろりと条件闘争を展開している。

北朝鮮は核問題を六者協議、なかんずく、米朝間の問題としてとらえており、これまで日朝の二国間協議で日本がこの問題をとりあげても一切応じてこないで、したがって基本的には六者協議、特に米朝の話し合いに頼るしかない。ただ米国は国内政治的な理由からか北朝鮮への対応振りが必ずしも首尾一貫しておらず、そもそも米国が最も恐れるのは北朝鮮の核の拡散であって、日本とは脅威の認識が相当に違うので安易な妥協に走るおそれがないとは言えない。

日本としては、六者協議、特に米国が言葉はともかく、CVID(完全な、検証可能な、後戻りのできない核の廃棄)の原則に立ち戻り、北朝鮮の本当の非核化を追求することを強く希望する。なお、ミサイル問題は核の影に隠れてあまりとりあげられていないが、これは核と同じく重大な問題である。日朝平壤宣言(2002年9月)で約束されたミサイル発射のモラトリアムは一体どうなったのか。2006年7月のミサイルの連続発射が示すように北朝鮮との約束は最高首脳レベルのものであっても、理屈をつけて破られるものであることを十分に認識しておくべきである。いずれにしてもミサイル問題についても北朝鮮との間で真剣な話し合いが行われなければならない。

軍事的、政治・外交的動機から大金を投じて開発し、核実験まで強行した核は北朝鮮にとっては「虎の子」であり、そうやすやすと手放すとは思えない。北朝鮮の真の(見せかけでない)非核化のためには、日本は米国との意思疎通を十分に保ち、新しい大統領の下での韓国とも協調しつつ日米韓が結束して問題に対応していくことが必要不可欠である。北朝鮮の非核化は日朝国交正常化の前提であるのみならず、日米同盟の下での米国の「核の傘」に対する日本の信頼性を確かなものにするためにも必要不可欠である。

経済協力問題への対処

拉致と核問題の解決に目途がつき、日朝交渉が本格的に軌道に乗った場合、最大の問題は経済協力である。この問題は日朝交渉が始まって以来、財産請求権だ、賠償だ、補償だと原則論でもめてきたが、ようやく財産請求権をお互いに放棄して経済協力でもって対処するという、いわゆる「日韓方式」に落ち着いたのは日朝首脳会談の成果であった。

日朝が同じ土俵に乗ったのだから、今後の最大の問題は金額である。金額についての一つの目安は、1965年に調印された日韓国交正常化の際の無償協力3億ドル、有償協力2億ドルの事例だが(ちなみに当時の日本の外貨保有高は約18億ドル)、半世紀以上も前のことであるし、この金額自体高度の政治判断の結果であって、日朝間の参考になるものではない。拉致問題や核実験などでわき起こった日本国民の北朝鮮に対する不信感や昨今の日本の厳しい財政事情を考えると、金額決定は国内政治的に容易なことではない。他方、北朝鮮の方にとってはこの経済協力問題が日朝国交正常化の最大のねらいであって、韓国への正常化に伴う協力資金が韓国の高度経済成長の引き金となったように、北朝鮮は経済復興、特にインフラ整備に使いたいと考えているのではなかろうか。

もう一つの問題は経済協力の供与方法についてである。日本は「日韓方式」を下敷にしようとしているが、これは日本の資機材、役務の供与であり、相当に複雑な手続きを必要とする。北朝鮮は、経済協力方式に合意したものの、請求権放棄の対象は物的損害だけで、人的被害に含まれていないと考えている模様で、その一例として従軍慰安婦問題をあげている。正常化交渉の場での議論から察するに北朝鮮側は代表団レベルでさえ、この「一括解決・経済協力方式」を正確に理解していないふしがある。ましていわんや最高首脳レベルではどうだろうか。もし北朝鮮が自由に使える現金(外貨)が懐に入ってくるようなことを少しでも期待しているとしたら大変な誤解である。

日朝交渉上、横たわる問題はいずれも気が遠くなるほど難しいものばかりで、容易に解決できるようなものではない。交渉の初期に日本政府代表として参加し、したがって個人的にも愛着があり、かつ生来慎重な楽観主義者(cautious optimist)の筆者も日朝交渉の今後についてはどうも楽観的になれない。だが、日朝国交正常化は日本の国益にかなうものでありかつ、東アジアの平和と安定に資するものなので、筋道に沿い、原則に従いながらも、柔軟に粘り強く対処していくべきである。

(2008年 2月18日 記)

遠藤哲也(えんどう・てつや)



東大法学部卒業後、外務省入省。科学技術審議官、IAEA 理事会議長、特命全権大使(在ウィーン国際機関日本政府代表部、日朝国交正常化交渉、KEDO 担当等)、原子力委員会委員長代理などを経て、2006年からは(財)日本国際問題研究所シニアフェロー



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

原子力委員会が平成19年版原子力白書を公表

原子力委員会は、本年3月21日の閣議を経て、平成19年版原子力白書を公表した。

今回の原子力白書では、「国際社会に貢献する原子力研究開発利用を目指して」と題し、第1章において、①国際社会における地球温暖化対策としての原子力エネルギー利用に対する期待の高まり、②原子力平和利用を確保するための国際的取組の強化、③我が国における原子力研究開発利用の動向等、平成19年の原子力を巡る国内外の状況について概観するとともに、国際社会に貢献する原子力研究開発利用を目指して今何をなすべきか、我が国が取り組むべき課題について言及している。

具体的には、原子力発電所の設備利用率が依然として低迷していること、新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所が設計基準を大幅に越える地震動を経験したことや高レベル放射性廃棄物地層処分施設の立地が難航していることなど、我が国の原子力発電が様々な困難に直面していることから、国民や立地地域との相互理解活動の強化や、リスク管理活動の一層の強化、原子力エネルギー利用活動の高

度化に向けた取組の充実等を掲げている。また、世界的に、エネルギーの安定供給を図りつつ、2050年に向けた温室効果ガス排出量の大幅削減を実現していくためには、地球温暖化対策には原子力エネルギー利用の拡大が不可欠との国際社会での共通認識の形成や国際的枠組みの構築に向けた取組の充実、原子力エネルギー利用の拡大に資する研究開発活動の強化等を掲げている。さらには、放射線利用の一層の拡大、多様化に向け、量子ビームテクノロジーの推進や専門人材の育成等に取り組むべきとしている。

第2章以降では、我が国の原子力政策の基本方針である「原子力政策大綱」の項目に沿って、各章冒頭で分野ごとの全体概要について記述しつつ、原子力の研究、開発および利用に関する最近の動向について網羅的かつ具体的に記述している。

(注) 原子力白書は、原子力委員会ホームページで

ご覧いただけます。
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/index.htm>

(資料提供：原子力委員会)

原子力委員会が「地球温暖化対策としての原子力エネルギーの利用拡大のための取組」を決定

原子力委員会は、本年3月に「地球環境保全・エネルギー安定供給のための原子力のビジョンを考える懇談会(座長：山本良一東大教授)」からの報告を受け、標記の取組を決定した。

この懇談会は、地球温暖化対策とエネルギー安定供給のために、原子力が果たす役割についての議論が国内外で急速に進んでいることを踏まえ、ハイリゲンダムサミットにおいて我が国等が示した2050年までに温室効果ガス排出を半減するという目標に向けて、今ここで何をなすべきかを検討するために、環境、エネルギー、原子力、経済、市民活動等の分

野の有識者を委員として設置されたものである。

懇談会では、計7回の会合を行って検討を進め、この報告を取りまとめた。この間、報告案の段階で国民からのご意見を募集し、いただいたご意見を最終報告に反映している。

報告では、世界的にエネルギーの安定供給を図りつつ、温室効果ガス排出量の大幅削減を実現していくためには、エネルギー消費の節約、エネルギー利用効率向上や再生可能エネルギー利用等の他の有力な対策の最大限の実施と並んで、原子力安全、核不拡散および核セキュリティの確保を大前提とした原

子力エネルギー平和利用の地球規模での拡大が不可欠との認識のもとに、我が国は、次の6項目を重点に取り組むべきとしている。

1. 地球温暖化対策には原子力エネルギーの平和利用の拡大が不可欠との共通認識の形成と、利用拡大に向けた国際的枠組みの構築
2. 原子力エネルギーの平和利用の前提となる、核不拡散、原子力安全および核セキュリティの確保のための国際的取組の充実
3. 各国における原子力エネルギーの平和利用推進のための基盤整備の取組への積極的協力
4. 世界的な原子力エネルギーの平和利用の拡大

に資するための原子力エネルギー供給技術の性能向上を目指した我が国における研究開発活動の強化

5. 国内における原子力政策上の課題への取組の強化
6. 原子力エネルギー利用を安全に推進するための取組に関する国民との相互理解活動の強化

(注) 上記懇談会および委員会決定については、原子力委員会ホームページでご覧いただけます。

<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/vision/index.htm>

(資料提供：原子力委員会)

東京大学と日本原子力研究開発機構が連携協力に関する協定を締結—原子力界のトップリーダーを養成へ

東京大学と日本原子力研究開発機構は4月8日に、連携協力の推進に係る協定を結んだ。国家戦略ビジョンを描き、激変する国内外の原子力情勢に対応し、日本のエネルギー安全保障の確保と世界的な地球環境問題解決に貢献する強い意志と責任感を持ったトップリーダーを養成することがねらい。原子力エネルギー分野から放射線利用さらには原子力社会学までを総合的・体系的に教育研究する東京大学と、我が国最大の原子力研究者・技術者集団である原子力機構が、包括的に協力し連携しなければならないとの共通の認識から、この連携が実現した。

今後は、「共同研究等の研究協力」、「人材交流」、「人材育成」、「研究施設・設備の相互利用」等、幅広い連携協力を進めることで、我が国の学術および科学技術の振興に寄与することが期待される。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/news2008/>)



左が東京大学の小宮山 宏総長，右が原子力機構の岡崎俊雄理事長

080409/index.html)

(資料提供：日本原子力研究開発機構)

茨城大学と原子力機構が連携協力に関する協定を締結

茨城大学と原子力機構は、平成20年3月18日付けで「国立大学法人 茨城大学と独立行政法人 日本原子力研究開発機構との連携協力に関する協定書」を締結した。

茨城大学と原子力機構は、これまで旧日本原子力研究所時代に締結した教育および研究の協力に関する協定に基づき、連携大学院方式による理工学研究

科原子科学分野での教育プログラムを設けて連携協力を実施してきている。今回、締結した協定に基づいて、茨城大学が平成20年度から我が国で初の原子力に関する理学部教育プログラムを開始することで、学部から大学院修士における一貫した教育が可能になる。

また、「双方が有する研究施設・設備の共同利用



右が茨城大学の菊池龍三郎学長，左が原子力機構の岡崎俊雄理事長

等]、「共同研究等の研究協力」，「人材の交流」，「人材の育成」等，幅広い連携協力を進めることで，我が国の学術および科学技術の振興に寄与することが期待される。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/news2007/080318/index.html>)

(資料提供：日本原子力研究開発機構)

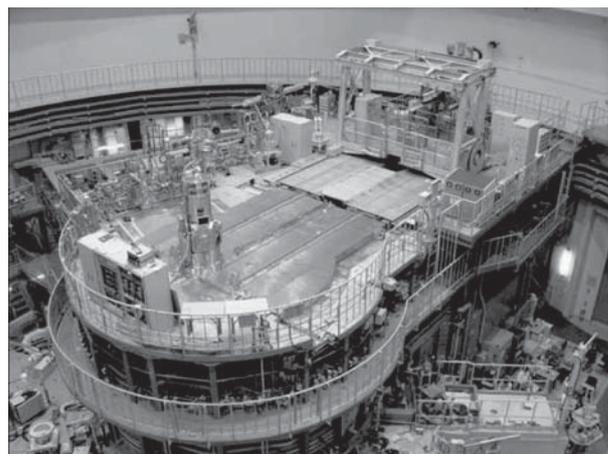
中性子で微粒子の配向過程を解明 —中性子回折で実現したセラミックス微粒子配向過程の直接観察

物質・材料研究機構量子ビームセンターの寺田典樹研究員らは日本原子力研究開発機構先端基礎研究センターの目時直人研究主幹らと共同で，研究用原子炉 JRR-3(茨城県東海村)を使って中性子散乱実験を行い，溶媒中に分散した弱磁性微粒子が磁場によって配向する過程を直接観察することに成功した。

セラミックスの中でもアルミナ材料は，電気絶縁特性，耐熱性，力学特性，熱伝導，光学特性が優れているため広く用いられている。アルミナ材料を形成するアルミナ微粒子を強磁場環境下において一定方向に配向することにより，こうした特性はさらに向上する。しかしながら，磁場による配向をより完全にするためには，微粒子の配向過程の解明が求められていた。

研究用原子炉 JRR-3を用いた中性子散乱実験によって，10テスラまでの磁場下で，溶媒中に分散したアルミナ微粒子が配向する過程を観察することに初めて成功。この結果，アルミナ微粒子を完全に配向させるためには20テスラ以上の強磁場が必要であることを明らかにした。

本成果は，磁場によって弱磁性の微粒子が配向す



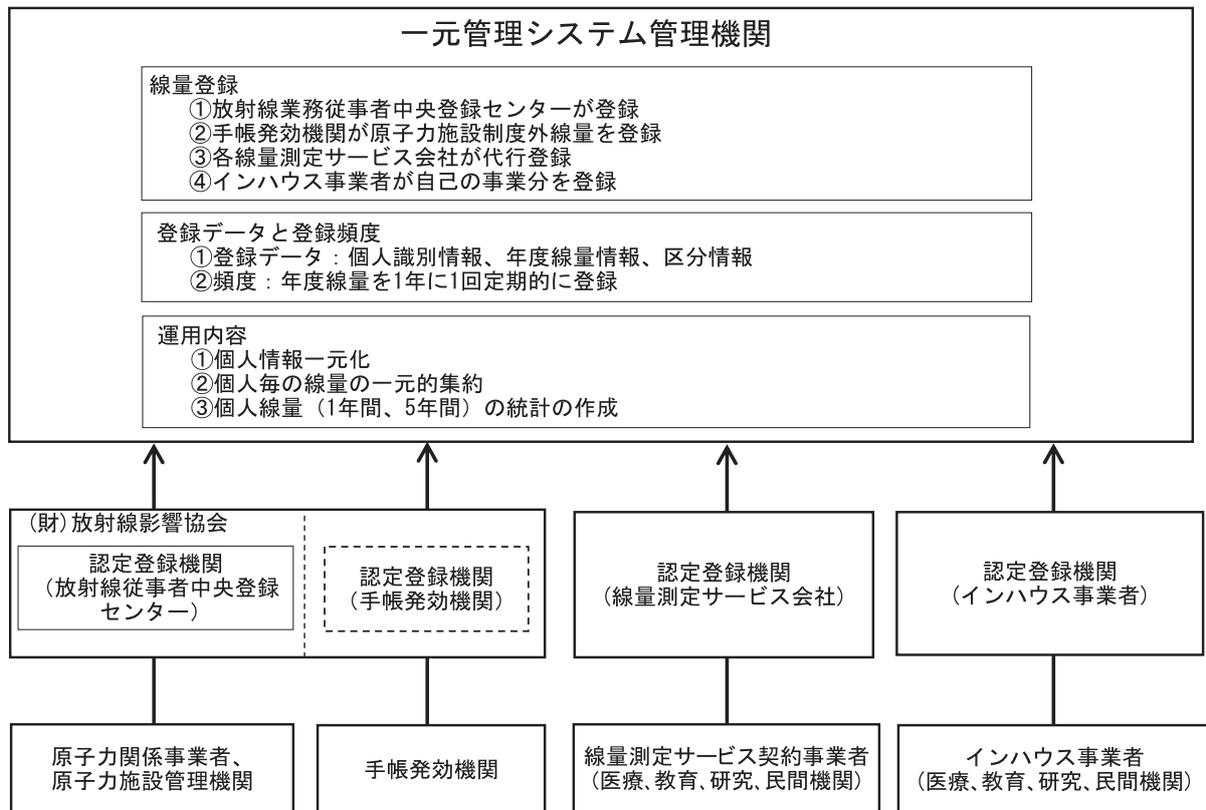
中性子散乱実験を行った研究用原子炉 JRR-3

る過程を直接観察した初めての例であり，中性子回折が微粒子の配向過程を直接観測する手段として有用な方法であることを示している。X線と比較して物質を透過する能力の高い中性子を用いると，試料全体の磁場配向過程を捉えることができるため，今後，中性子回折によって様々な材料の微粒子の配向過程が解明されることが期待される。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press2007/p08031803/index.html>)

(資料提供：日本原子力研究開発機構)

原産協会，従事者被ばく線量記録の一元化で提言



一元管理システムの全体構想(案)

日本原子力産業協会の「原子力・放射線従事者の被ばく管理システム検討委員会」(草間朋子委員長)は、このほど、従事者被ばく線量記録の一元的な登録制度(図参照)について中間報告を取りまとめ、3月の原産協会理事会に報告、了承された。

同委員会は、従事者の被ばく線量の記録を適切に管理し、個人の健康を確実に守るとともに、国民の原子力・放射線の平和利用への更なる理解等に資するために、平成18年7月から、従事者被ばく線量記録の一元的な管理システムについて、システムの必要性和その構成、必要な費用と開発工程、必要とされる行政措置などについて、幅広く検討を進めてきた。今後、原子力安全委員会、原子力委員会など、国等への提言活動と並行して、最終報告をまとめる予定である。

放射線業務従事者の被ばく線量記録の登録管理制度については、原子力施設で従事する放射線業務従事者に限り、(財)放射線影響協会の中央登録セン

ターで運用されているが、わが国全体で50万～60万人と推定される従事者の一部分にとどまっている。研究施設、医療施設、原子力施設で働く放射線業務従事者数の増大と勤務先等の頻繁な変更など、雇用の流動化に対応して、従事者の放射線防護をさらに高める必要が生じている。

中間報告は、わが国の放射線防護法令が複数の法令に分かれており、担当する省庁も多岐にわたっていることから、関係行政機関並びに関係事業者が一体となって取り組むため、国のしかるべき機関に「システム構築・システム運営」推進のための協議の場を発足させることなどを提言している。

報告にはまた、一元管理の対象となる「事業者」に中小規模の事業者が多いことから、国が開発費用を負担することにより、放射線を取り扱うすべての「事業者」が参加しやすい環境を作ることなどの提言が盛り込まれている。

(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)

[カナダ]

オンタリオ州、既存炉のリプレース に向け年内にも炉型選定へ

カナダのオンタリオ州は3月7日、既存炉のリプレースをにらみ、新規に建設する原子力発電所の炉型を年内にも選定する意向を明らかにした。同州は原子力発電を今後も基幹電源と明確に位置づけ、400億加ドルを投じ、最大6基にバックフィット作業を実施することに加え、新たに2基を建設する計画だ。

カナダ経済の中心地であり、同国最大の人口を抱えるオンタリオ州では、現在16基の原子力発電所(すべてCANDU炉、グロス出力計1,195万kW)が運転中。いずれも州営電力であるオンタリオ・パワー・ジェネレーション社(OPG)が所有し、うちブルース原子力発電所をブルース・パワー社が、ダーリントン原子力発電所とピッカリング原子力発電所をOPGが運転している。

今回、州エネルギー省、OPG、ブルース・パワー社の3者によるレビューの結果、①仏アレバ社製USEPR、②カナダ原子力公社(AECL)製ACR1000、③GE日立ニュークリア・エナジー社製ESBWR、④ウェスチングハウス・エレクトリック社製AP1000——の4炉型を採用炉型の候補に決定した。今後のスケジュールは、6月末をメドに4社からの入札を締切り、早ければ年内にも炉型を選定。2012年頃には着工し、2018年には初号機を運開させたい考えだ。

連邦政府のG・ルン天然資源相は再三にわたって、「カナダの原子力産業界の未来は、国産技術であるCANDU炉がオンタリオ州で採用されるかどうかにかかっている」と強調し、同国最大の原子力発電市場であるオンタリオ州に対し、AECL製CANDU炉の採用を強く働きかけてきた。オンタリオ州のD・マッギンティー州首相はこれまで「国際市場も見据え、州民にとって最適な選択をしたい」とCANDU炉と距離をとることを示唆していたが、今回の候補炉型の一つに最新型CANDU炉であるACR1000を加えたことで連邦政府の意向に一定の

配慮を示した形となった。

ブルース・パワー社が4基新設を 想定してアルバータ州への新規導入 を申請

カナダ・オンタリオ州を本拠地とするブルース・パワー社は3月13日、アルバータ州への原子力発電導入を目指すエナジー・アルバータ社(EAC)の買収を完了。同時に、アルバータ州ピースリバーを対象としたサイト準備認可(SPL)を、カナダ原子力安全委員会(CNSC)に申請した。

ブルース・パワー社は今回、10億加ドルを投じ、計4基(出力合計400万kW規模)の新設を提案。環境影響評価や地元自治体への理解促進活動が順調に進めば、早ければ初号機を2017年にも運開させたい考えだ。

もちろんSPLの申請は、実際の建設に向けた最終判断ではないが、同社は許認可プロセスに要する期間を3年と見込み、今後3年内に最終判断を下したいとしている。

アルバータ州の電力需要量は2000年より年率3.2%の上昇率で増加の一途をたどっており、2017年までに500万kW、2027年までに、1,150万kWの発電設備容量の増強が必要だと予測されている。そのためブルース・パワー社は、EACが計画したプロジェクト、ACR1000(出力120万kW級)×2基の規模を拡大。炉型についても、必ずしもCANDU炉にこだわらず、経済性を鑑みて総合的に判断するとしている。

カナダ連邦政府は、2020年までにCO₂排出量を2006年比で20%削減するとの計画を掲げ、原子力発電を検討すべき重要事項と位置づけている。

ただし原子力発電所の許認可は連邦政府の管轄だが、審議段階で立地州の意見も尊重される。そのためアルバータ州のE・ステルマック州首相は、ブルース・パワー社のSPL申請を受け、「導入を検討する専門家パネルを設置する」として原子力発電に関する議論の場を設ける考えだ。

カナダ唯一の民間原子力発電事業者であるブルース・パワー社は昨年11月、EACが進めてきたアルバータ州での新規建設プロジェクトを買収し、新たに発足させるブルース・パワー・アルバータ社に継

続させることでEACと合意していた。

[米国]

エンタジー社、グランドガルフ・サイトを対象に7件目のCOL申請

エンタジー社は2月27日、ミシシッピ州のグランドガルフ・サイトを対象とした建設・運転一体認可(COL)を、原子力規制委員会(NRC)へ申請した。採用炉型はGE日立製のESBWRで、1基を建設する。COL申請は、今回で7件目。

これはエンタジー社が、ニュースタート・エナジー・デベロップメントの一員として申請したものの。もっともエンタジー社は、建設の最終判断については、「COL取得後に検討する」としている。グランドガルフ・サイトは当初、2基の原子力発電所が建設されていたが、2号機の建設は1990年にキャンセルされ、1号機しか建設されなかった経緯がある。

ニュースタートは、2002年に米エネルギー省(DOE)が発表した『原子力発電2010プログラム』を受け、原子力発電所の新規建設に向けた新しい許認可プロセスの実証を目的として2004年に設立されたコンソーシアム。

ペルフォンテ・サイトにウェスチングハウス社製AP1000を、グランドガルフ・サイトにESBWRを建設することを目標としており、すでにペルフォンテ・サイトを対象としたCOLは、昨年10月にテネシー峡谷開発公社がNRCへ申請している。

COL申請に掛かるコストは、DOEとコンソーシアムとで折半されることになっており、コンソーシアム参加企業は低コストでCOLを申請することが可能になる。

なおグランドガルフ・サイトは、昨年3月、NRCより事前サイト許可(ESP)を発給されている。またエンタジー社は、ニュースタートとは別に、単独での新規建設プロジェクトも抱えている。ルイジアナ州のリバーバンド・サイトにESBWR×1基を建設する計画で、2008年内にCOLを申請する考えだ。

プログレス・エナジー社、総額170億ドル規模の新規プロジェクトを申請

プログレス・エナジー社は3月11日、米国フロリダ州公益事業委員会に、同社が計画する新規原子力発電所建設プロジェクトを承認するよう、正式に申請。プロジェクト総額が170億ドルにも達するとの試算を明らかにした。フロリダ州では、フロリダ・パワー&ライト社も昨年10月に同様の申請を行い、18日に同委員会から新設プロジェクトを承認されている。

今回プログレス・エナジー社が申請したのは、フロリダ州レヴィー郡の新規サイトへのAP1000(出力110万kW)2基の建設プロジェクト。同サイトは、同社のクリスタルリバー原子力発電所の北東13kmに所在し、既存の送電網へのアクセスも容易だ。

フロリダ州の発電所立地法では、新たに発電プラントを建設する場合、州公益事業委員会から当該プラントの必要性を承認されなければならない、と規定されている。また、州環境保護局からの認可取得も義務付けられている。

今後、州公益事業委員会は年内に公聴会を開催し意見聴取を実施。同州の電力需給予測だけでなく、レヴィー郡へのプロジェクトが最も経済性の高い選択肢なのか、同州全体の電源多様化やエネルギー・セキュリティ向上に寄与するか等の観点から、プロジェクトを総合的に判断する。

一方、プログレス・エナジー社は、年内に州環境保護局にサイト認可を申請。連邦レベルの原子力規制委員会(NRC)にも、年内に建設・運転一体認可(COL)を申請する予定だ。同社は、早ければ2016年にも初号機を運開させたい考えだ。

フロリダ州は雇用の急増と温暖な気候を背景に、米国で成長の著しい州の一つである。過去30年間に世帯数は50%増加し、電力需要も30%増加した。クリスタルリバー原子力発電所が開業した1970年代以来、プログレス・エナジー社のフロリダ地域の顧客数は倍増している。

州公益事業委員会への申請書の中で同社は、今後10年で電力需要はさらに25%拡大すると予測してお

り、エネルギー効率の向上や再生可能エネルギーの導入などに加え、原子力発電所の新設が電力の安定供給や電力料金抑制に重要な役割を果たすと指摘している。そして、レヴィー郡のサイトへの新設プロジェクトのコストについて、許認可手続きから用地取得、建設、機器・燃料調達に至るまで、総額170億ドル規模(うち30億ドルは送電インフラの整備)に達すると試算している。

電力料金は2009年から2018年にかけて年率3～4%上昇する見込みだ。同社は「当社だけでなく消費者にとっても、かなり大きな負担となる」としながらも、「燃料価格高騰のリスクや将来的なCO₂排出の高価格化を想定すると、新規原子力発電所による便益は大きい」と強調し、理解を求めている。

「停電騒動の原因は送電網」—NEI が声明

米フロリダ州で2月26日午後1時頃、マイアミ近郊のフラガミ変電所で障害が発生し、送電網の電圧が急激に低下。同送電網に接続されていた稼働中の火力発電所や原子力発電所が、安全のため一斉に運転を停止し、マイアミ地域が停電に見舞われた。

運転中だったターキーポイント3、4号機(出力各76万kW)も、安全に自動停止した。なお同じくフロリダ州で稼働中の他の原子力発電所は、障害の発生した当該送電網には接続されていないため、順調に運転を継続している。同州では予測される電力需要の急増に対し、発電設備容量の拡大が計画されているが、同時に送電インフラの老朽化が指摘されていた。今回の停電騒動は、送電インフラ再整備の必要性を痛感させることになった。

今回一部マスメディアが、「原子力発電所が緊急停止したことが原因で大停電が起こった」と報道し、多くの誤解を生む事態を招いた。今回の緊急停止は原子力発電所のトラブルが引き起こしたのではなく、あくまでも送電網のトラブルが大停電の原因であることは明らかである。

そのため米原子力エネルギー協会(NEI)は、声明を発表。(1)送電網にトラブルが生じると、発電所は発電した電力が送れなくなり、原子炉が安全のため自動停止する設計になっている、(2)原子力発電所だけでなく他の火力発電所も、送電網のトラブルによ

り自動停止した——等と指摘し、冷静な判断を求めている。

フロリダ・パワー&ライト社(FPL)が所有・運転するターキーポイント発電所は、火力発電所3基(1, 2, 5号機)、原子力発電所2基から構成されている。

FPLは火力発電所の運転については27日までに再開したが、原子力発電所2基については今回の運転停止の機会にメンテナンス作業を実施。4号機は、3月3日早朝までにフル出力運転に復帰した。

フロリダ州委、FPL社のターキーポイント増設プロジェクトを全面承認

米国フロリダ州公益事業委員会は3月18日、フロリダ・パワー&ライト社(FPL)から申請されていた原子力発電所増設プロジェクトを、賛成多数で承認した。これによりFPLは、早ければ来年にも、増設へ向けたプロジェクト・コストを電力料金に課金することができる。

FPLは今後、州環境保護局から認可を取得するとともに、年内にも連邦レベルの原子力規制委員会(NRC)へ建設・運転一体認可(COL)を申請する考えだ。同プロジェクトはFPLが所有するターキーポイント・サイトに、6号機と7号機の2基を増設するもので、それぞれ2018年、2020年の運開を目指している。採用炉型は未定だが、合計出力220万～300万kW規模を計画している。プロジェクトの総コストは、採用炉型にもよるが、「12～24億ドルの範囲」(FPL広報部)だという。

また今回公益事業委員会は、プロジェクトの承認にとどまらず、FPLが主要資機材調達に要する“手付金”を支払うことも承認。これによりFPLは、実際の建設に必要な大型鍛造品や、工程上重要な原子炉やタービンの部品など、調達のリードタイムが長い資機材を確保することが可能となり、増設プロジェクトの実現性が大きく高まることになる。

大型鍛造品の製造が可能なのは、世界でも日本製鋼所1社に限られていることなどから、原子力発電所の建設ラッシュが起こった場合に大型鍛造品の納期が大幅に遅れることが懸念されている。そのため米国内でも、ドミニオン社、エンタジー社、イクセ

ロン社など新規建設プロジェクトを抱える原子力発電事業者が、それぞれ供給者と事前に資機材調達契約を締結し、自衛策を講じている。公益事業委員会の決定はこうした傾向を反映したもので、原子力発電所建設の実現へ向けた州政府の肩入れぶりを象徴している。

米原子力産業界が人材獲得に奔走 —ノースカロライナ州が調査

米国では今後10年以内に、原子炉運転、メンテナンス、放射線防護、燃料設計など原子力分野の熟練技術者が大量に退職時期を迎える。この退職時期は、米国の原子力発電事業者が新規原子力発電所の建設に向けて準備を進める重要な時期と重なっている。

そのため米国の原子力産業界では、定年を控えた技術者の補充に奔走している。原子力事業者だけでなく、許認可発行や検査を行う規制当局、複雑な許認可手続きを支えるコンサルティング会社、プラントの維持管理や建設を請け負う会社では求人が急増している。

ノースカロライナ州での調査によると、ウィルミントンのGE日立ニュークリア・エナジー社は過去3年間で技術者500名を新規に採用し、今後5年間でさらに900名の増員が予測されている。シャーロットのデューク・エナジー社では今後1年間で200名を採用予定。ローリーのプログレス・エナジー社は昨年、140名を採用したが、今年も同数を採用する計画だという。

原子力規制委員会(NRC)は、国内の原子炉を審査する検査官ばかりではなく、米国の原子力発電所に設備機器を供給する海外メーカーの品質管理を確保する調査官も求めている。NRCは昨年、441名を採用し、今後3年間に600名以上を採用する予定だ。NRCのD・クライン委員長は、「規制者および事業者にとって、人材育成が今後10~20年に対応すべき重要な課題の一つ」と指摘する。

他の多くの原子力工学部が姿を消す中、ノースカロライナ州立大学の原子力工学部は低迷時期を定員数の削減で乗り切り、現在では、過去最高の196名の学生が、原子力産業界で生涯保障される職業や高給そして専門職としての出世を目指している。

ノースカロライナ州立大学原子力工学部の学生たちは、学内の研究炉で技術を磨きながら、休暇中にプログレス・エナジー社やデューク・エナジー社の原子力発電所で有給の運転実習をして経験を積んでいる。また運転実習を経験することにより学生は、原子力発電所の安全性を実感することができ、電力会社にとって地域社会に対する優秀な“広報官”になる側面もあるようだ。

どの産業にも浮き沈みがあるが、米国の原子力産業界は特に厳しい時期を経験してきた。原子力発電を野心的に拡大した1970年代には、金利が2桁に上昇し、建設費は暴騰。さらに1979年にはペンシルバニア州でTMI事故が発生し、原子力産業界のイメージは悪化。発注キャンセルは原子力発電所だけではないが、計画中のものから建設中のものまで100基を超える原子力発電所建設プロジェクトが葬られた。

新規採用は据え置かれ、当時の原子力産業界従事者は、より有望な分野に流出していった。現在、米国の原子力産業界従事者の平均年齢は50歳前後であり、その多くが希望すれば55歳で定年退職が可能である。米国の原子力発電所を四半世紀にわたって担ってきた技術者の約35%、約1万9,600名が、5年以内にまとめて退職していくと予想されている。

原子力産業界ではこれまで、各社間での技術者の引き抜きが少なかったが、今回の爆発的な求人の増加で、原子力技術者の「動き」が活発になっている。プログレス・エナジー社原子力部門のトップ、J・スカローラ CNOは、優秀な人材をNRC、GE社、ウェスチングハウス社に奪われていると指摘する。「求人市場の競争は激化しており、学生が来年5月に卒業するのを待たずに、クリスマス休暇中に仕事をオファーすることは珍しいことではない」(同CNO)ようだ。

[南米] アルゼンチンとブラジル、濃縮工場 を共同建設へ

アルゼンチンのC・キルチネル大統領とブラジルのL・ルーラ・ダ・シルヴァ大統領はこのほど、ウラン濃縮の合併会社を設立し、濃縮工場を共同建設することで合意した。詳細は不明だが、両国の原子力発電所への燃料供給を目的としている。

アルゼンチンは原子力産業先進国で、2基の原子力発電所を擁し、積極的に原子力機器の海外輸出を行っている。1983年に、ガス拡散法によるウラン濃縮に成功したが、資金難から濃縮活動を停止。海外からの燃料供給に頼っているのが現状だ。一方のブラジルも2基の原子力発電所を運転し、世界第6位のウラン埋蔵量を利用して、2006年からレゼンデ濃縮工場を操業開始している。ブラジルは2010年までに核燃料の完全な国産化を目指しており、将来的には燃料の海外輸出も視野に入れている。

[英国]

英政府、BE社の保有株売却を検討

原子力発電所の新規建設に向けて動き始めた英国で、中心的なプレイヤーになると目されているブリティッシュ・エナジー社(BE)だが、フィナンシャル・タイムズ紙の一連の報道により、BEの売却問題が一気に表面化。BE自身も3月17日、複数社と協議中であることを正式に発表した。

同紙によると、BE株の35.2%を保有する英政府は、財務アドバイザーにUBSを据え、独Eon社、独RWE社、仏電力公社(EDF)、イベルドロウラ社、パッテンフォール社、スエズ社、フォーラム社、英セントリカ社、英スコティッシュ&サザンエナジー社(SSE)等にBE株の売却を持ち掛けているようだ。

BE株の買収に対する各社の関心は高いと見られているが、それはBEの既存炉を評価してというよりは、英国の新規建設プロジェクトを評価したものと考えるのが普通だ。BEの所有サイトは電力需要の高いイングランド南東部に多く、原子力発電所の新規建設プロジェクトにとって非常に有利な立場にある。つまりBE株を手に入れると、ほぼ確実に英国の新設プロジェクトに参入できることになる。逆にいうと、ライバル社にBE株を一括売却された場合、プロジェクトに参入できる可能性はほぼゼロになるわけだ。「英国政府はそこを突いて高値での競り合いを狙っている」と見る向きもある。

ただしBE株を部分売却するか、一括売却するかについては、政府内部でも意見はまとまっていないようだ。財務省は少しでも高値で一括売却させたい考えだが、ビジネス・企業・規制改革省(BERR)

は、一括売却された場合、国内原子力産業界に競争原理が働かなくなるとして、慎重な姿勢を示しているという。

4炉型の初期審査完了

英国での新規原子力発電所建設に向け、申請された4炉型を審査していた保健安全執行部(HSE)と環境庁(EA)は3月18日、包括的設計審査(GDA)のフェーズ1を完了。4炉型とも安全性および環境面等で瑕疵のないことを確認した。今後、ビジネス・企業・規制改革省(BERR)が中心となり、4月末をメドに対象炉型数を3炉型へ絞る。そして、より詳細な検討を実施するフェーズ2に移行することになる。

GDAは事前設計認可の一種で、米国の設計認証のようなもの。HSEが昨年発表した新しい認可制度だ。

審査対象となっている4炉型は、①カナダ原子力公社(AECL)のACR1000(120万kW)、②仏アレバ社のEPR(160万kW)、③米GE日立ニュークリア・エナジー社(GEH)のESBWR(155万kW)、④米ウェスチングハウス社のAP1000(110万kW)——の4つ。

[ブルガリア]

電力公社、ベレネ出資者を2社に絞る

ブルガリア電力公社(NEK)は3月10日、ベレネ原子力発電所への共同出資者をエレクトラベル社(ベルギー)と独RWE社の2社にまで絞った。今後さらに協議を継続する。共同出資の募集には、各国の電力会社5社が応札していた。

NEKは昨年5月、ベレネ発電所を所有するベレネ電力(BPC)を設立し、BPCへの自己出資比率を51%にすることを発表。同10月からは、残る49%の出資者の選定を開始していた。

ベレネ発電所は、露アトムストロイエクスポート社(ASE)製VVER1000の2基から構成される。ASEを主契約者とし、年内にも建設を再開、2013年頃の初号機運開を目指して準備作業が進められている。

原子力学会「春の年会」から

地震による設備の健全性への影響などを議論

—学会が柏崎刈羽発電所と中越沖地震で特別セッション

日本原子力学会は3月27日に大阪大学で開いた春の年会で、「新潟県中越沖地震柏崎刈羽原子力発電所 地震報告会」と題する特別セッションを開いた。約250人が傍聴した会合では、産業技術総合研究所の杉山雄一氏が「今回の地震は、発電所の沖合から発電所のある南東方向に傾き下がる断層がひき起こしたと推定される」と指摘。また東京電力の吉田昌郎氏は「地震による原子炉建屋への影響評価を解析した結果は、全号機ともせん断ひび割れ発生の目安値を下回っており、それはおおむね弾性範囲内にとどまっていることを確認した」と述べた。さらに会場参加者との質疑では、堆積層による影響や今回の地震に伴う規制強化への懸念などについて質問があった。本稿では、このセッションのもようを紹介する。

「安全上重要な設備の損傷はなかった」

最初に登壇した東京大学の班目春樹教授は、「中越沖地震は、幅広い問題を提起した。原子力施設の耐震は、事業者が安全性や健全性を確認するのはもちろんだが、それを規制当局がきちんと確認しなければならない」と指摘。さらに「その際には評価基準が必要であり、その前提として規格や基準を策定する必要がある。そのためには、地震学や地質学、耐震工学などさまざまな分野における研究開発が必要となる」と述べた。

次に登壇した東京電力原子力設備管理部の吉田昌郎部長は、「柏崎刈羽原子力発電所の代表機器に対する点検および解析結果」というテーマで、こう説明を始めた。

「新潟県中越沖地震によって発電所が受けた影響を調べるために行った炉内点検の結果では、全号機で設備の機能や構造に影響を及ぼす異常は見つからなかった。しかしながら全号機のタービンと一部の軸受構成部品に、軽い接触痕があり、7号機の低圧タービンの翼に一部破損

が認められた。また耐震クラスの低い屋外設備では、地盤沈下などの大きな相対変位による損傷に加え、地震動による被害を確認している」

次に設備の健全性評価については、「点検と地震応答解析により設備が受けた影響の評価を行う。また、並行して実施している地質調査の結果から基準地震動 S_s を策定するとともに、 S_s に対する耐震安全性評価を行う」と説明。さらに点検については、①点検対象機器の抽出、②地震の影響が同等と考えられる機種に分類、③地震の影響が及ぶ可能性のある部位を整理し、有効な点検方法を検討、④機種ごとに整理した方針を個別機器へ展開し、個別機器の要領書等へ反映、⑤点検の実施、⑥点検後の評価—という順序で進めていることを報告した。

一方、地震応答解析では、「全号機の原子炉建屋の評価を行っており、7号機の場合、原子炉建屋を構成している鉄筋コンクリート造の耐震壁で見つかったひび割れの最大幅は0.3 mmで、重大な損傷とされるひび割れ幅約1.5 mmを下回るなど、代表的な設備ではいずれも評

価基準値を大きく下回るものとなった。またそれは、おおむね弾性範囲内にとどまっていることも確認した。なお建設時の条件に比べ、今回の地震で発生した応力とその余裕を調べたところ、十分な余裕があることがわかった。残りのプラントについては、順次報告していく」と説明した。

最後に同氏は「7号機については今年6月を目途に、点検・解析の結果から、設備の総合評価を行う。他のプラントも順次、点検結果と照らし合わせながら、総合評価を行っていく予定だ。

応力に及ぼす地震力の影響について

■ 建設時の条件における地震力の影響

機器	部位例	考慮すべき荷重 ^{※1}			発生応力 ^{※1}	余裕 ^{※1}
		自重 ^{※2}	圧力	地震力		
原子炉圧力容器	RPV胴	1	30	2	33	67
	基礎ボルト	5	-	20	25	75
原子炉格納容器	ドライウェル上鏡	2	2	1	6	94
炉内構造物	蒸気乾燥器	6	-	2	8	92
炉心支持構造物	シュラウド	1	1	5	7	93
容器 (熱交換器等)	胴板	10	5	5	20	80
	基礎ボルト	-	-	10	10	90
ポンプ	基礎ボルト	0	-	1	1	99
配管(主蒸気系)		30	15	20	65	35

※1 許容応力を100とした場合の応力の割合(%)

※2 配管反力、スクラム反力等の活荷重を含む

なお点検・解析にあたっては、最新の学術知見、調査・点検技術をフルに活用するとともに、点検・解析のプロセスや結果については、徹底的に情報公開する。また。今回の地震により得られた教訓の共有を図り、世界の原子力安全の向上に貢献していくつもりだ」と述べた。

「消防体制など管理運営面などでは課題も」

続いて登壇した原子力安全・保安院の山田知穂氏は、「中越沖地震における原子力施設に関する調査対策委員会」における検討状況を中心に説明。自衛消防体制については、「初期消火体制を充実させるために要員の24時間常駐を基本とし、常時10名程度以上の初動要員を確保することとした。また消火設備については、消火配管や消火用水タンクの耐震強度や耐震構造を改善し、系統の多重化・ループ化等を実施して、震度6強～7程度の地震に対しても必要な機能の維持を図ることが可能な基準を採用する」と述べた。

一方、耐震安全性について、設計時に想定した加速度を超える揺れがあったことから、設備に生じたひび割れによる耐震性への影響や、地震による応答が弾性状態にとどまったかどうかなどの原子炉建屋への影響を評価し、その結果として「もし、ひび割れの影響があったり、弾性状態を超えていたりした場合には、詳細に検討した上で、必要に応じ補修することになる」と説明した。

また地質調査では、震源の特定や地震波の伝わり方、揺れが敷地地盤に与えた影響、地震を起こす可能性のある震源断層をどこにどのように想定すべきかなどについて審議していることを報告。今後は、「敷地および敷地周辺の地質・地質構造に関する調査や評価、今回の地震による地震動に関する調査や評価、今後想定すべき地震動に係る評価について審議していく」と述べた。

なお今回の地震では、地震発生時の各安全機能等の確保状況を評価した結果、「止める」、「冷やす」、「閉じこめる」と「電源」の機能は確保されていたと評価できるものの、運営管理面では運転員の訓練や非常参集時を含めて体制の整備・強化を行う必要があるなどの教訓や課題が得られたと指摘した。

「震源断層からサイトまでの距離を過大評価」

一方、産業技術総合研究所活断層研究センター長の杉山雄一氏は、「今日は地質学、地震学的な観点から見た中越沖地震について述べる」とした上で、「日本列島は4つのプレートの境にあり、今回の地震は北アメリカプレートとユーラシアプレートの境で起きた。北西-南東方向の水平圧縮力によって引き起こされたものだ。また今回の地震は、主として、発電所の沖合から発電所のある南東方向（陸側）へ傾き下がる断層がひき起こしたと推

定される。解析の結果、発電所の方向に向って傾斜する断層が8割、発電所から遠ざかる北西方向に傾斜する断層が2割ぐらいのエネルギーを放出したと推定される」と説明した。

さらに、「今回の地震による地震動は想定を超えた。その理由は、①震源断層のアスペリティ（通常は強く固着していて、あるとき急激にずれて地震波を出すところ）の個性、②同地域内の厚い堆積層が地震動を増幅した、ことにある。なお同原発の周辺には、別の活断層がいくつかある。今後、これらが単独で、あるいは一緒に動いたらどうなるかということも、想定しておかなければならない」と指摘した。

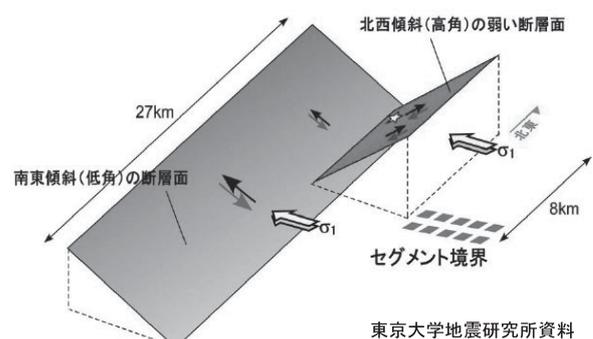
「なお日本列島は今から1,500万年くらい前に大陸から引き離され、引っ張られた際のお盆状の“くぼみ”（堆積盆地）に厚い堆積物がたまり、その“くぼみ”のへりが活断層となっていることが多い」と述べた。

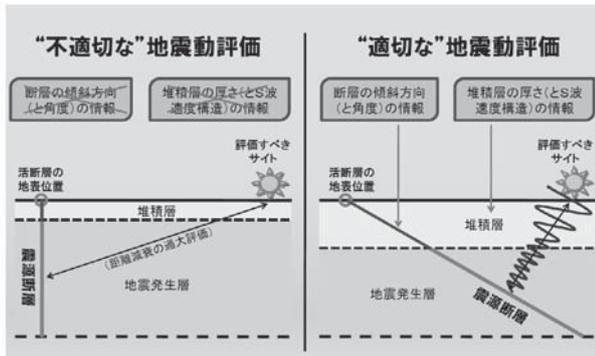
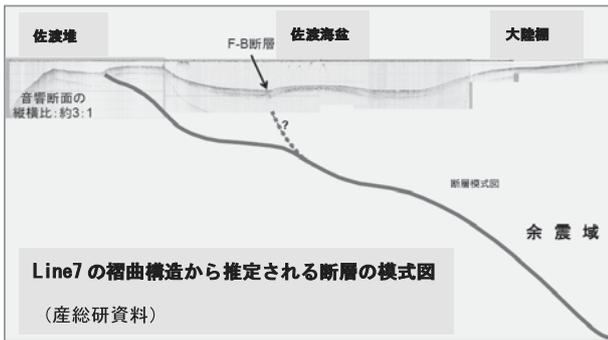
最後に同氏は、「堆積層が厚い地域に分布する活断層は、海底や地表への到達位置と、地震波を生成する断層深部が、水平方向にも鉛直方向にも、大きく離れている。しかし、幸いなことに、堆積層が厚い地域では、地下にひそむ断層に沿うすべりによって、堆積層の褶曲変形や長波長の変動地形が形成される。このような活褶曲や変動地形の変形の特徴から、地下にひそむ断層のタイプ、傾斜方向、さらには3次元形状を推定することができる」と述べた。

これに対し会場参加者が「他の原子力発電所での堆積層はどうなっているのか」と質問。同氏は「他の原子力発電所も調べたが、柏崎刈羽発電所の堆積層が最も厚い。また2003年に東京電力が行った海域活断層の再評価では、沖合に長さ20 kmの活断層を見つけていたが、その断層が発電所の下へもぐりこむような傾斜をしていたことを考慮しなかったため、結果的に震源断層とサイトの間の距離を過大に評価してしまった」と答えた。

「知見を深めて共有し、教訓を反映していく」

続いて原子力安全委員会の早田邦久委員が、「原子力安全委員会の取り組み—新潟県中越沖地震について」をテーマに説明。「原子力安全委員会が昨年12月に設置し





た耐震安全性評価特別委員会は、既設原子力施設の耐震安全性の確認や、新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所の施設が受けた影響について、詳細な確認やその健全性の評価などを調査審議している」と説明した。

また「地質・地盤に関する安全審査の手引き検討委員会」は、耐震設計審査指針に基づく安全審査に資するため、断層に関する評価のうち、耐震設計上考慮する断層の認定について方法等を示すことを目的としており、その議論は大詰め段階にあることを紹介した。

さらに原子力安全委員会は今年3月に「安全研究フォーラム2008」を開催。「原子力施設の耐震安全と安全研究」をテーマに、国内外の関係者が情報の共有と議論を行ったことを報告した。

一方、原子力安全委員会では昨年12月に、火災防護審査指針を改訂。同氏は、そのポイントは大規模地震による火災発生を考慮した要求の明確化、運転管理における火災防護対策の強化、耐震設計による不等沈下およびこ

れに伴う火災発生の防止であると説明した。

さらに今後については、「既設原子力発電所の耐震安全性の確認(バックチェック)や、地質・地盤に関する安全審査の手引き改訂の検討、残余のリスクの評価に向けた検討、耐震安全性に関する安全研究等の充実・強化を進めていく。また日本原子力学会に対しては、科学的知見、安全研究、判断基準となるデータ等について、評価や取りまとめ等に係わる活動を期待している」と述べた。

「地震に強い発電所を作る」

4人の説明が終わったあと、会場参加者が、「このような地震後に規制が強化されることについて懸念する」と質問。これに対し山田氏は、「規制を厳しくしさえすれば安全性が向上する、というわけでは必ずしもないという点については指摘のとおり。あくまで科学的、合理的な規制、必要な規制を行っていく」と回答。早田氏は、「バランスのとれた規制になるよう、原子力安全委員会では意見していく」と述べた。また班目氏は、「規制がどのようにあるべきかということについて、学会が発信していないことに、一番の原因があると思う」と発言した。さらに「兵庫県南部地震の後、防災だけではなく減災対策にも力が入られるようになった。それを教訓にしてほしい」との意見に対し、吉田氏は、「地震に強い発電所を作る。それは経営の点でも重要だと思う」と述べた。

(本誌諮問委員・佐田 務)



報告

原子カルネッサンスに向けた柔軟な放射線防護体系

(株)日本ネットワークサポート 岸田 哲二

I. はじめに

世界原子力協会(World Nuclear Association: WNA)・放射線防護ワーキンググループ(Radiological Protection Working Group: RPWG)は、2002年発足以来、原子力発電所の運転を含む原子燃料サイクルのフロントからバックに関連する、世界の原子力産業界の放射線防護関係者(会員数 約50人)が集って次のような活動を行っている。会員相互の意見交換、情報交換のみならず、世界の原子力産業界を代表して、国際放射線防護委員会(The International Commission on Radiological Protection: ICRP)を始めとする国際組織と放射線防護体系に関して積極的に協議を重ねている。具体的な一例を挙げると、ICRP クラーク前委員長、ホルム委員長らと筆者(WNA 常任理事かつ RPWG 指導者の立場から)らが意見交換を重ね、線量限度について、ICRP 1990年勧告の内容をそのまま新勧告に残させることで、放射線防護体系の継続性を守り、不必要な混乱を未然に防ぐなどの成果を上げた。また、国際原子力機関(International Atomic Energy Agency: IAEA)や経済協力開発機構/原子力機関(the Organisation for Economic Co-operation and Development/the Nuclear Energy Agency: OECD/NEA)の会議などでも積極的な意見交換をしている。さらには、アジアの国々の代表的専門家とのハイレベルかつ継続的な意見交換をして、原子カルネッサンスにふさわしい放射線防護体系を提言している。

一方、2007年に ICRP 新勧告が出されたものの、その勧告ではいくつかの重要な概念に関する解釈が明確化されていないため、放射線防護体系に関する議論は、そのまま IAEA の場に移って続いている。その意味で、今後の IAEA での議論がますます重要となっている。

II. 放射線防護が果たしてきた役割、その光と影

ICRP を中心に構築されてきた放射線防護体系は、原子力の発展を支える根幹として、放射線障害などの問題発生を未然に防ぐことに大きく貢献してきている。しかし、一方では、その体系の中で使われている「しきい値

The Flexible Radiological Protection System to the Era of Nuclear Renaissance: Tetsuji KISHIDA.

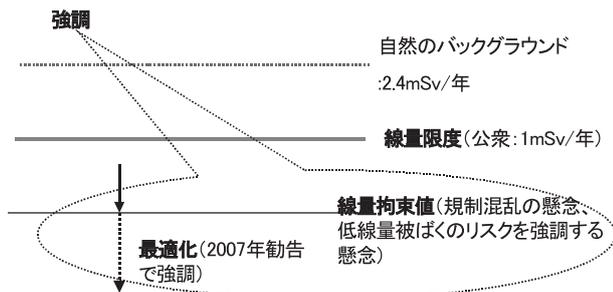
(2008年 3月11日 受理)

のない直線仮説」(Linear-non-threshold: LNT)が「放射線防護上の便宜的な仮定」であるにもかかわらず、「どんな微小な放射線であっても、人体の被ばくによる影響が考えられる」という認識に変更されつつあり、その結果、放射線恐怖症が世の中に広まることとなった。すなわち、ほんのわずかな放射線被ばくでさえ原子力の抱える本質的な問題として扱われる誤解を生むこととなっている。その典型的な例の一つとしては、チェルノブイリ事故のリスク評価で、集団線量をベースに、その因果関係が実証されていないにもかかわらず、低線量放射線によるがんの死亡者数が、大々的に発表され、いたずらに放射線の恐怖感を増大させたことが挙げられる。2007年の ICRP 新勧告では、この集団線量の扱いが見直されたものの、このような誤解を防止するには、100 mSv を下回る低線量放射線リスクは、現代の生活に内在する種々のリスクと分離不可能な程度に低いものであるという事実を、一般的な常識として周知する必要がある。

ICRP 新勧告が出た現時点では、この観点からいえば、IAEA・放射線安全のための国際基本安全基準(Basic Safety Standard: BSS)改訂において、線量拘束値が規制体系の中に導入される可能性があることが大変懸念される。線量拘束値は実質的に放射線防護体系に以前からある概念だが、これまでは最適化の道具の一つであって、規制には組み込まれていなかった。しかし、これを線量限度と同等あるいはそれ以上に重要な考え方として強調しようとする議論が出ている。

これには2つの大きな問題がある。1つは規制の混乱を招く懸念があること。もう1つは放射線恐怖症がさらに広まることである。前者については、これまで線量限度のみが被ばくに係わる数値的な基準として考えられていたところに、線量拘束値を持ち込むこととなるが、線量限度と線量拘束値の関連が不明確のままであること、また、後者については、線量限度以下のところに設定される線量拘束値から、さらに、最適化を行い、被ばく線量を下げることが求められることに起因して発生する問題である(図参照)。

このような状況下では、放射線被ばくの怖さを科学と異なる次元で議論することとなる。原子力関係者にとっても理解しにくい体系を、線量限度に加えて線量拘束値を強調する体系に変えることは、専門家でも混乱する恐れがある。ましてや、一般公衆にとっては理解を超える



線量限度：被ばく線量の上限值

線量拘束値：ある線源から予想される被ばく線量の上限值

注) 複数の線源が存在したとしても公衆の被ばく線量が、線量限度を超えないことを確実にするため、また、個人の被ばく線量の不公平さをなくすように、線源から予想される被ばく線量の上限值(線量拘束値)を決める(公衆の場合は1 mSv以下)。そして、その線量拘束値を出発点として、さらに被ばく線量を低減させるための最適化が求められようとしている。一方、複数の線源が存在したとしても、被ばく線量は、それぞれの線源の最大線量の総和にならないこと、また、線量拘束値は出発点ではなく、目標値であるとの指摘がある。

線量限度と線量拘束値の関係

ものとなり、そのことが原子力に対する不信感、不安感を拡大させることになる。現行の基準で公衆そして放射線作業従事者の安全は充分確保されており、新たに線量拘束値を規制に取り入れられるとすれば、原子力の経済合理性を損なう懸念すらある。今、原子力ルネッサンスの時代にあっては、体系の影の部分が増大されることを避けなければならない。

Ⅲ. 放射線防護体系における合理性

ICRP 新勧告の議論で放射線防護の専門家の間で確認できたことは、現在の放射線防護体系の健全性を維持すべきであるということである。原子力が他のエネルギー源と共存するためには、放射線防護体系が合理的であることが必要である。例えば、これまで、原子力のリスクは他の産業のリスクなどと明確に比較されてこなかった面があるが、今後は、化学物質のリスクあるいは他のエネルギー利用に伴うリスクなどとの比較も行いつつ、原子力に対する正しい理解を拡げることが必要である。

Ⅳ. 放射線防護体系における柔軟性

放射線防護体系に関する長年の議論の結果として、放射線防護の三原則(正当化、最適化、線量限度)が確立された。放射線防護体系継続性の観点から、この三原則は今後も体系を構築する基本概念として堅持される必要がある。

線量拘束値を特別に強調しないことは、2007年に完成したICRP 新勧告より一足早く、2006年11月に完成したIAEAの文書体系の最上位文書である Fundamental Safety Principles(Safety Fundamentals SF-1)でも明確に表現されている。SF-1では、原子力安全の原則を10項目にまとめている。そのうち、原則第4、第5、第6に放射線防護の三原則が1990年勧告の表現を使って記述

されている。SF-1はBSSと同様、IAEAの単独文書ではなく、Euratom, OECD/NEA, WHOなど9つの国際組織の協力によって作られている。したがって、今後、このSF-1は、IAEAなどが基準を改定する場合のベースになるべき極めて重要な文書と位置付けられる。

現在進められているBSSの改定作業において、SF-1とICRP 新勧告間の整合を取るには、線量拘束値は、「最適化」のツールの一つであり、規制ではないことを明確にすることが重要である。原子力の長年の経験によって得られた知見なども勘案しながら、いろいろなツールの中から、最適と考えられるやり方を選定することで、「最適化」を進めることが、体系の硬直化を防ぐ上で大切である。

原子力発電の分野で公衆および作業員の被ばく低減が世界的に進んだ経緯を振り返ると、その原動力は線量拘束値ではなく、情報交換、情報公開である。言い換えると原子力産業界が、世界原子力発電事業者協会(WANO)あるいはOECD・NEA職業被ばく情報システム(ISOE)などで情報を公開し、関係者がその情報を良好事例(ベンチマーク)として、被ばく低減活動を自主的に推進してきたことが今日の成果につながっている。線量拘束値の使用を否定するものではないが、一律に線量拘束値を当てはめることは、「最適化」する上で必ずしも有効とはいえない。あえて繰り返すが、多様な方法の中から最適な方法を選択することが最も重要である。

Ⅴ. 課題

ICRP 新勧告は完成したが、IAEAではBSS改訂の議論が本格化している。第4回NEAアジア会議(2007年12月13、14日、東京)で、中国、韓国、日本から新勧告の内容に対して線量限度と線量拘束値の関係が不明確で、混乱が起こる心配がある等の強い懸念が出された。これから原子力を積極的に進める国々からこのような意見が出された意味をICRPおよびIAEAは強く受け止める必要がある。IAEA・BSSをそのまま国内法令に取り入れる国があることを考えれば、日本のような原子力先進国には、今後の原子力開発に不要な負担を強いることがないようにする努力が求められている。そしてこの努力が、科学的・合理的な放射線防護体系の確立に貢献すると信ずるものである。

著者紹介

岸田哲二(きしだ・てつじ)



(株)日本ネットワークサポート
(専門分野/関心分野)原子力発電全般

高速増殖炉サイクルの技術開発

日本原子力研究開発機構 佐賀山 豊, 長沖吉弘

独立行政法人日本原子力研究開発機構では、国家基幹技術である高速増殖炉サイクルの主概念であるナトリウム冷却高速炉(酸化物燃料)、先進湿式法再処理、簡素化ペレット法燃料製造の組合せの開発に資源を集中し、高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT)として、その実用化に向けた研究開発を行っている。

FaCT プロジェクトでは、2010年に革新的な技術の採否判断を行い、2015年にはFBRサイクルの実用施設および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提示する。その成果によって2025年に実証炉が運転開始されるよう、国際協力を活用しながらFaCTプロジェクトを効率的、効果的に進めていく。

国家基幹技術「FBR サイクル」の開発に着手

高速増殖炉(FBR)とは、高速の中性子による核分裂反応を利用してエネルギーを取り出しながら、核分裂に寄与しない余剰な中性子を利用して核燃料を増殖することが可能な原子炉である。FBRを利用し、核燃料のリサイクルシステム(FBR サイクル)を構築することで、エネルギー資源の利用効率を飛躍的に高めることができる。

また、FBRは、核燃料の効率的な燃焼によって発電量あたりに必要な燃料を少なくすることができる。さらに、現状では高レベル放射性廃棄物として核分裂生成物とともにガラス固化するマイナーアクチニド(MA)も核分裂させることができる。FBRサイクル内でMAをリサイクルし、高レベル放射性廃棄物中にMAを移行させないことにより、発電量あたりのガラス固化体発生量を低減し、地層処分後の潜在的な有害度を低減できる。

このようなFBRサイクルの特長を踏まえ、国は2006年3月に定めた第3期科学技術基本計画において、当該技術を国家基幹技術の一つに指定し、今後、我が国の総力をあげてその研究開発を推進することとした。さらに、2007年3月に策定された「エネルギー基本計画」では、エネルギー資源を徹底的に有効利用していくための取組みを着実に推進していく必要性が示され、政府としてFBRサイクルの早期実用化を進めていくことが明確にされた。

一方、FBRサイクルの研究開発は、原子力開発の黎明期より進められ、1999年7月には、開発実績と最新知見に基づき将来の基幹電源としての適切な実用化像とそ

こに至る研究開発計画を改めて整理・提示するため、独立行政法人日本原子力研究開発機構(原子力機構)は、電気事業者とともにオールジャパン体制で「FBRサイクルの実用化戦略調査研究」を開始した。この研究は2006年3月まで実施され、酸化物燃料を用いたナトリウム冷却FBR、ピューレックス法の簡素化を図り、MA回収も行う先進湿式法再処理、燃料粉末の取扱いを改善し遠隔操作により燃料を製造する簡素化ペレット法燃料製造の組合せの概念が、安全性、経済性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性、資源有効利用性の開発目標への適合可能性が高く、技術的実現性の面でも有望であると評価し、総合的に最も優れているとした。

文部科学省は、「FBRサイクルの実用化戦略調査研究」の成果を評価し、上記の技術の組合せを「主概念」、すなわち現在の知見で実用施設として実現性が最も高い実用システム概念とし、今後は実用化に集中した技術開発を行い、FBRサイクルの研究開発を加速すべきとした。さらに、原子力委員会は、原子力政策大綱を踏まえて、文部科学省の評価結果を含め、経済産業省が取りまとめた「原子力立国計画」等、これまでに国の関係各機関が示した今後のFBRサイクルのあり方に関する検討結果に基づき、今後10年程度の間における我が国の高速増殖炉サイクル技術の研究開発に関する基本方針を2006年12月末に決定した。その中では「文部科学省、経済産業省および原子力機構は、今後、電気事業者、製造事業者、大学等と連携・協力し、主概念を中心に研究開発を推進し、安全性、経済性、環境適合性、資源利用率および核拡散抵抗性に係る性能目標を達成できるFBRサイクルの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」等の具体的な基本方針が示されている。

原子力機構は、FBRサイクルの実用化に向け、電気

Current Status and Perspective of FBR Cycle Development :
Yutaka SAGAYAMA, Yoshihiro NAGAOKI.

(2008年 1月16日 受理)

事業者らとともに、この主概念を中心とした研究開発を「FBR サイクル実用化研究開発」、通称 FaCT プロジェクト(Fast Reactor Cycle Technology Development Project)として推進していくこととした。

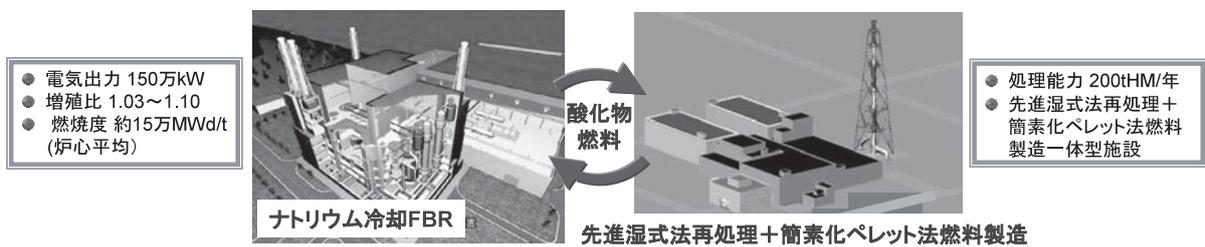
FaCT プロジェクトで実用化を目指す概念

FBR サイクル主概念の施設概念を第1図に示す。酸化燃料ナトリウム冷却FBRは、電気出力150万kW規模(ツインプラント)で建設費を開発目標の90%程度にまで合理化できる可能性を持ち、核燃料サイクルを構築することで、軽水炉をFBRに約60年間でリプレースで

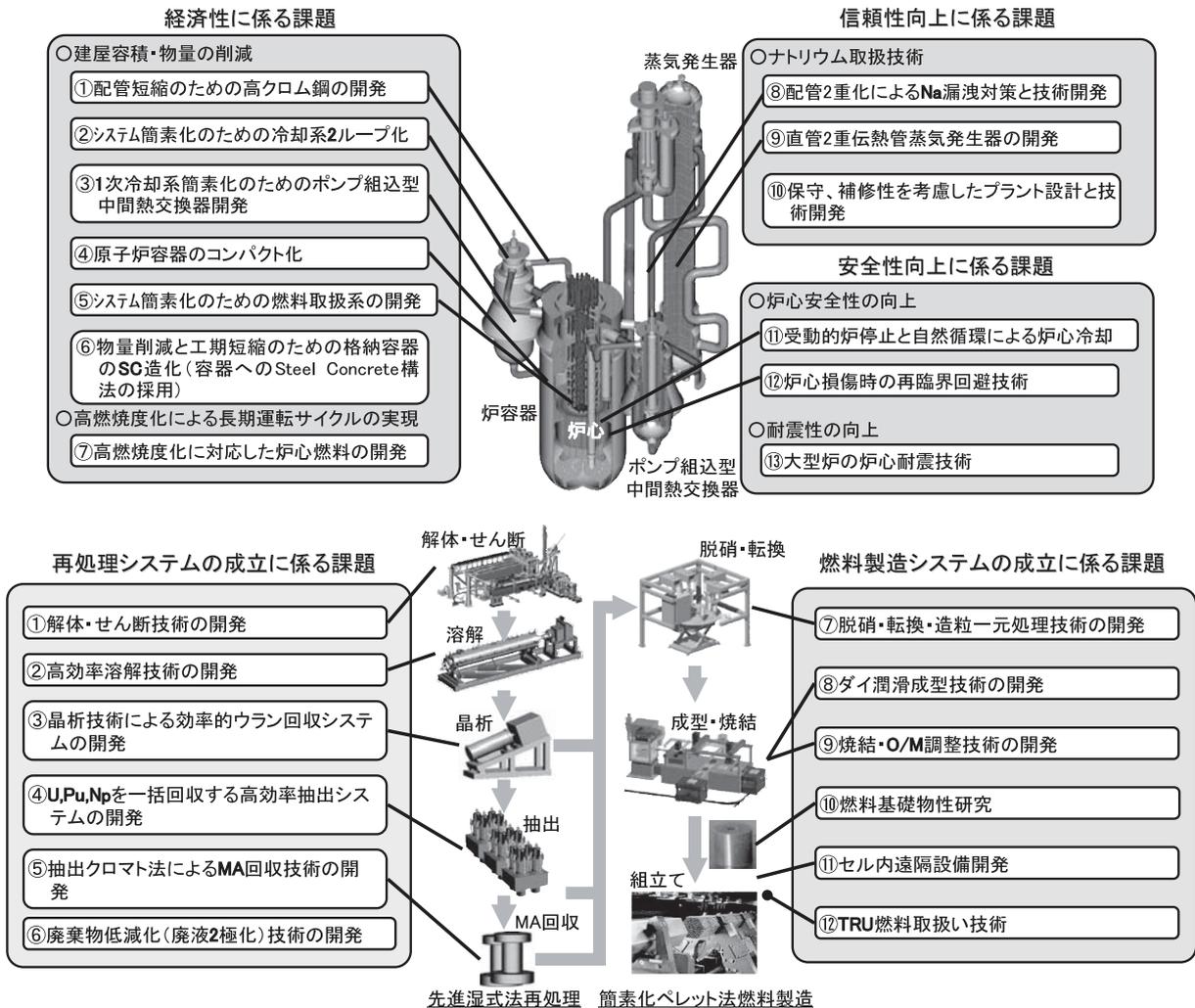
きる増殖性を持っている。FBRは燃料中の不純物の許容性が高いうえ、MAの燃焼が可能であることから、単独のプルトニウムを存在させない核燃料サイクルを構築できる。

一方、FBR サイクル主概念には、革新的な技術を多く採用しており、今後、確認・実証しなければならない課題がある。FaCT プロジェクトは、革新的な技術についてその採用可能性を判断できるところまで具体化させ、「もんじゅ」における発電プラントの信頼性実証などの研究開発成果も踏まえ、2015年の目標達成を目指している。FBR サイクルの技術開発課題を第2図に示す。

FBR の課題は、経済性に係る課題、信頼性向上に係



第1図 FBR サイクル主概念の施設概念



第2図 FBR サイクルの技術開発課題

る課題、安全性向上に係る課題の3グループに分類される。経済性に係る課題には、配管を短縮できる高性能の構造材料の開発、システム簡素化のための冷却系2ループ化、1次系ポンプと中間熱交換器の合体、原子炉容器のコンパクト化など、また高燃焼度化による運転サイクルの長期化を目指した炉心燃料の開発がある。

信頼性向上に係る課題には、ナトリウム漏洩対策としての配管二重化、直管二重伝熱管を用いた蒸気発生器の開発、保守・補修性を考慮したプラント設計が挙げられる。安全性向上のためには、受動的炉停止と自然循環による炉心冷却や炉心損傷時の再臨界回避技術、耐震性向上のために炉心耐震技術の開発が課題として挙げられる。

先進湿式法再処理については、従来の再処理技術である硝酸溶液への燃料溶解と溶媒抽出によるプルトニウム等の除染・回収技術をベースに、経済性向上、環境負荷低減、核拡散抵抗性強化の観点からプロセスおよび機器に革新的な技術を採用しており、主要工程の成立性に係る課題がある。

燃料集合体を解体後、晶析のために燃料ピンを短くせん断・溶解し、高濃度の溶解液を得る技術、物質の溶解度差を利用し固液分離を行う晶析工程により溶解液中の大部分のウランを回収し、後段の溶媒抽出工程の処理流量削減と設備合理化を図る技術、プルトニウムをウランやネプツニウムとともに一括回収する溶媒抽出技術、溶媒抽出残液中のMAの回収に多くの試薬や溶液を使用しない抽出クロマトグラフィ技術等の開発が必要である。さらに、廃液処理の点で発生廃液を高レベルと極低レベルに2極化し、廃液処理コストの低減を図る技術も挙げられる。

簡素化ペレット法燃料製造は、原料溶液段階でのプルトニウム富化度調整や原料粉末の流動性改良に加え、潤滑剤を原料粉に混ぜず金型に直接塗布するダイ潤滑成型技術を取り入れることで、従来のFBRの混合酸化物燃料製造における粉末取扱い工程等を合理化し、燃料製造設備の簡素化を目指したプロセスである。一方、実用FBRサイクルでは、低除染で再処理されMAを含む原料を取り扱うため、遮へいセル内に設置された機器・設備を遠隔操作してペレットを製造することが前提となる。このため、おのおの工程の成立性に係る課題のほか、遠隔操作、保守・補修に適した機器の開発が必要である。また、原子炉の燃料には、高い品質保証のもとでの製造、炉内での健全性確保が求められ、燃料物性等の基礎研究もまた重要である。

技術の早期実用化に向けて

FaCTプロジェクトは、原子力機構が電気事業者とともにFBRサイクルの研究開発を進め、実用化につな

げていく大プロジェクトである。このためには、実験室規模で研究開発を行うだけでなく、工学規模で技術を実証し、実際に商業ベースで導入できるようにしていかなければならない。

先に述べた文部科学省の評価では、FBRサイクルの実用化に向けた研究開発ロードマップが示されている。このロードマップを第3図に示す。

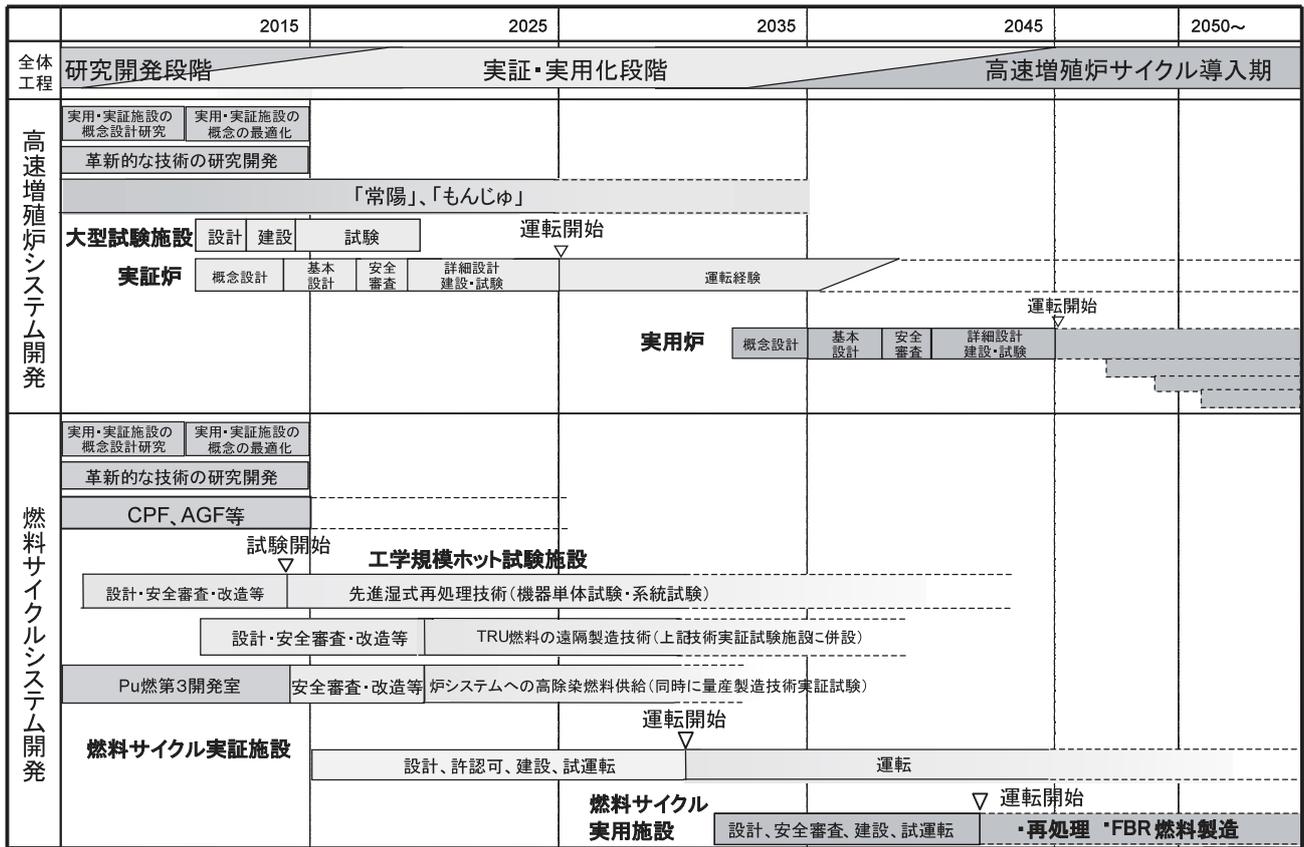
研究開発ロードマップは、社会環境の変化や国内外における研究開発の進展に対応し、適宜見直されるものであるが、注目すべきは研究開発段階の成果を踏まえ、技術実証を含む次段階の具体的な流れの明確化である。研究開発の手戻りをなくすため2010年に革新的な技術の採否を判断し、2015年のFaCTプロジェクトの成果を踏まえて実証施設の基本設計と建設を行い、工学規模の技術実証を本格化する。FBRについては2025年に実証炉を運転開始し、燃料サイクル実証施設については、技術開発の進捗を踏まえ、実証炉の運転と整合を図りながら段階的に燃料の供給・リサイクルを行っていくこととなる。工学規模の技術実証試験、施設の運転経験を蓄積し、2050年以前からのFBRサイクルの商業ベースの導入につなげていく。

研究開発段階を担うFaCTプロジェクトでは、原子力機構の有する研究開発施設を活用し、実証・実用化段階につなげていくことが重要である。とりわけ、実験炉「常陽」での照射試験による燃料・材料の開発、原型炉「もんじゅ」の運転・保守経験を通じた発電プラントとしての信頼性の実証および実機プラントの運転、保守・補修技術等の確立が実用化にあたっては不可欠である。

開発体制の面では、FBRサイクルの商業ベースでの導入を2050年頃からとした原子力政策大綱以降、FBRサイクルの実用化に向けた動きが本格化している。特に、経済産業省、文部科学省、電気事業者、製造事業者、原子力機構による「高速増殖炉サイクル実証プロセスへの円滑移行に関する五者協議会」(五者協議会)の設置と議論に注目する必要がある。

五者協議会は2006年7月に設置され、今後の研究開発に対するユーザー側の要求、国際協力のあり方、開発スケジュールと実証ステップのあり方、軽水炉からFBRへのサイクル側(再処理・燃料製造)の移行シナリオなどを検討することとしている。

FBRについては、実証炉の運転開始を狙い、製造事業者の中核として三菱重工業(株)が2007年4月に選定され、責任と権限およびエンジニアリング機能を集中する体制が整った。これを受け、FBRの研究開発プロジェクトを推進する原子力機構とFBR開発を専業として行う三菱FBRシステムズ(株)との連携によりFBR開発が推進されることとなった。また、2007年5月には五者協議会より、FBRの実証ステップとそれに至るまでの研究開発プロセスのあり方に関する中間論点整理が示され



第3図 FBRサイクル実用化に向けた研究開発ロードマップ

た。この中で、機器開発試験・システム試験、部分構造試作を実施することおよび実証炉の電気出力を50～75万kWの範囲とした上で当面の実証炉の概念検討を実施することが合意され、実証炉のサイズと商業炉に至るまでに必要な炉の基数、全システム試験・機器・構造実寸試作の要否と仕様、国際協力のあり方を2015年までに節目を持って整理することとされた。同時に、国際協力のあり方について「我が国技術の世界標準の獲得を目指した、具体的な国際協力のあり方を柔軟に検討」するとの論点が示され、米仏のプロトタイプ炉開発のタイミング等で、国際協力のあり方を検討するとの方向性が示された。

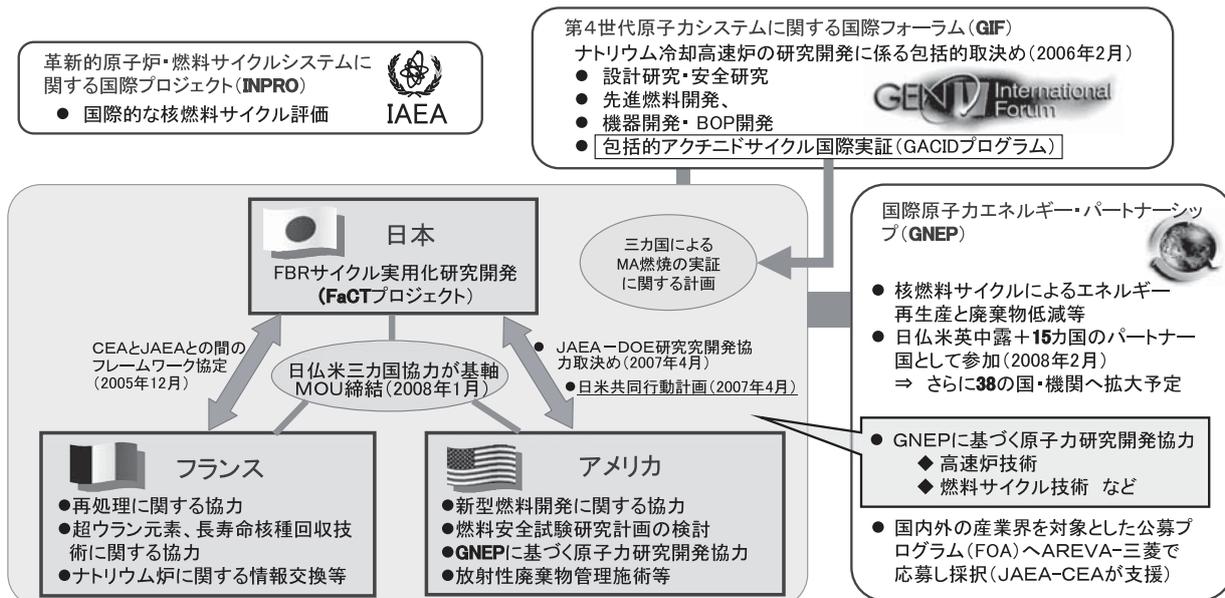
燃料サイクルについては、2010年頃から国の検討が予定されている第二再処理工場の仕様が、研究開発および技術実証と密接に関係することから、文部科学省、経済産業省、電気事業者、日本原燃、メーカ、原子力機構により、その検討への準備が行われている。2007年12月に示された「第二再処理工場に係る2010年頃からの検討に向けた予備的な調査・検討について」では、原子力機構が当該検討の中核機関となり、今後、検討体制を強化するとともに、米仏等との連携をはじめとする国際協力の活用を配慮することとしている。

国際協力を活用した積極的な開発の推進

FBRサイクルの研究開発において、国際的な共同研究・共同開発は、研究開発のリスクや資源負担の低減の可能性だけでなく、国際協力を通じて設計概念を共有することにより、世界標準のFBRサイクル概念構築の可能性が大きい。国際協力の現状を整理し第4図に示す。

「第四世代原子力システムに関する国際フォーラム」(GIF)を通じた多国間協力の枠組みが次々と具体化する中、2006年2月に米国が提示したGNEP構想では、米国内の経済成長のための原子力発電の新設促進だけでなく、高速炉を含む先進的な核燃料リサイクルによるエネルギー生産性の向上と放射性廃棄物の低減等が示されており、民生再処理凍結政策から実質的な反転を図るものとなっている。現在、GNEP構想は日本を含む21のパートナー国と17のパートナー候補国、オブザーバ国・機関で構成され、国際的な原子力の研究開発を推進する枠組みとして世界的な広がりを見せている。日米の間では、2007年4月に日米共同行動計画が署名され、GNEPに基づく原子力研究開発協力が進められることになったほか、原子力機構は米国エネルギー省と先進原子力技術等に係る研究協力協定を締結した。

フランスでは、2006年1月にシラク前大統領が「2020年に第四世代のプロトタイプ炉を運転開始する」旨の演



第4図 FBR サイクル研究開発に係る国際協力の現状

説を行い、FBR サイクルの研究開発が加速している。フランスは現在、ナトリウム FBR、ガス FBR 等の研究開発を行うとともに、放射性廃棄物管理の研究に関する法律に基づく先進的な燃料サイクルの研究開発を進めており、原子力機構は2005年12月に再締結した原子力協力分野におけるフレームワーク協定の中で研究協力や技術情報交換等を行っている。日仏は、ナトリウム冷却 FBR の分野において相互の技術に対する理解が深く、日本が多くの知見を有するループ型のナトリウム冷却 FBR を日仏の共同提案として GNEP へ提示している。この事実は、世界標準の FBR サイクル概念構築に向けて一歩進んだことといえよう。

その他、国際原子力機関による「革新的原子炉・燃料サイクルに関する国際プロジェクト」(INPRO) では日本を含む20カ国以上の国々が参加して、次世代の原子力システムに関する共通の評価手法を開発しており、国際的に共通した物差しにより FBR サイクルの認識が共有化されつつあるといえる。

最後に

国家基幹技術である FBR サイクル技術を実用化していくうえでは、2010年そして2015年の成果、すなわち FaCT プロジェクトの成果をきちんと示していく必要が

あり、それはロードマップの見直しを含め今後の進め方の判断に大きく影響する。また、この大プロジェクトを着実かつ確実に進めていくには、国内の検討の具体化をより強力に進め、国際協力を活用した積極的な開発の推進が必要である。

これらをきちんと進めることで、2050年以前には国家基幹技術 FBR サイクルを実用化できるものと考えている。

著者紹介

佐賀山 豊(さがやま・ゆたか)



日本原子力研究開発機構(日本原子力発電株より派遣)
(専門分野/関心分野)機械工学, 原子力発電工学, 国際原子力研究開発

長沖吉弘(ながおき・よしひろ)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)原子炉物理学, 核燃料サイクル戦略

次世代原子力システムの核拡散抵抗性

日本原子力研究開発機構¹⁾ 千崎 雅生¹⁾, 久野 祐輔¹⁾²⁾,
 東京大学²⁾ 井上 尚子¹⁾²⁾, 勝村聡一郎¹⁾

次世代原子力システムの国際協力プロジェクトは2000年頃から本格的に開始された。開発に当たっては、経済性、安全性、環境負荷低減性等と並んで核拡散抵抗性の確保が開発目標に掲げられている。なかでも核拡散抵抗性は国際的コンセンサスを得ることの重要性が高く、そのための共通理解を形成することが必要であり、国内外において原子力技術分野と核不拡散分野間での相互理解が重要となる。本稿では、過去約30年間の核拡散抵抗性に関する議論の経緯や代表的なプロジェクトの核拡散抵抗性評価手法について紹介するとともに、核拡散抵抗性の基本的な考え方および今後の課題と方向性について解説する。

I. はじめに

近年、革新的な原子力システムの開発へ向けた議論が活発化しているが、一方で核拡散への懸念も増大しつつある。IAEAを中心に制度的な対策として樹立してきた保障措置は、これまでもっとも有効な核不拡散対策の一つとして社会に受け入れられてきた。1990年代初頭に起きたイラクや北朝鮮の未申告活動の発覚で、IAEAは従来のNPT協定に基づく保障措置手法(申告されたものを検認する)の問題点を突き詰められた。IAEAはさらなる対策として、IAEAは追加議定書に基づく新たな保障措置対策を打ち出し、その実効性は顕著に向上したと考えられる。しかし、今後の原子力利用のグローバルな拡大に伴う核拡散リスクの増大に対処するためには、現在の保障措置の適用だけでは限界がある。国際的に原子力の平和利用を一層推進するためには、より強力かつ効果的な核不拡散対策が不可欠と考える。その一つとして「核拡散抵抗性」が取り上げられ議論されるようになった。

核拡散抵抗性の議論は、古くはINFCE(International Fuel Cycle Evaluation: 国際核燃料サイクル評価)¹⁾で本格的に行われた。その後、原子力冬の時代の到来とともに1990年代末頃まで陰を潜めていた。そして近年、上述のように、その必要性が再考されるに至っている。

核拡散抵抗性は英語の Proliferation Resistance に相当する言葉であるが、簡単にいえば「核拡散のしにくさ」

Proliferation Resistance of Next Generation Nuclear Energy Systems: Masao SENZAKI, Yusuke KUNO, Naoko INOUE, Soichiro KATSUMURA.

(2008年 2月19日 受理)

¹⁾例えばIAEA または他の国際的監督下に置かれる、多国間管理または核燃料供給保証メカニズム、GNEP 構想などのような新たな形態を示す。

といえる。核拡散は、核兵器国以外への核兵器の拡散である水平拡散と、核兵器国における核兵器の数的拡大である垂直拡散がある。核拡散抵抗性は水平拡散の抵抗性を表す。核拡散抵抗性を考える上で、以下の(1)~(3)の問題を明確にする必要がある。

(1) 何の核拡散抵抗性が高いのか

原子力システム, 原子力施設, 規制環境

(2) どの拡散者(Proliferators)に対する抵抗性か

国家(State), 国家機関(National Organization), 非国家主体(Non-State Actor, Sub-National Group) など

(3) どのような行為に対する抵抗性か

核兵器・核爆発装置の製造, 未申告の核物質の盗取・転用, 原子力技術の不正使用, 技術移転, 妨害破壊行為等

現在(1)については、一般的に原子力システムの抵抗性を示すとされている。また(2)については、国家を対象とすること(テロなど非国家主体の行為に対しては物的防護(Physical Protection)で対応)、さらに(3)については、核兵器・核爆発装置の製造を目的とした未申告の核物質の盗取・転用, 原子力技術の不正使用等が対象と考えられる。

核拡散抵抗性では、技術的手段(内在的特性)、保障措置およびその他の制度²⁾(外在的特性)の核拡散リスクに対する影響度を、明確に評価しておくことが重要である。

技術的手段は3つのカテゴリーに分けられる。燃料サイクルの分離系プルトニウムを減らす手段(混合転換法)、転用を放射能等で防護する手段および、物理的障壁で防護する手段である。これらの手段は、転用に対して相対的困難さを高めるとともに転用スピードを遅延させるという部分の効果に限られる。一方、保障措置やそ

の他の制度的手段は、技術的手段に比べ絶対的な効果をもつためその重要性がより高いと考える。ただし、核燃料サイクルの不正使用を確実に魅力のないものにする技術的手段は、核拡散抵抗性全体のパッケージの一部となり得る。

なお INFCE の結果が示すように、国家が核兵器計画を行わない最後の決め手は、核不拡散に対する政府の決意であるという考え方(核不拡散は政治的な問題)は現在でも有効と思われる。

II. 経緯

過去約30年の間、原子炉および核燃料サイクルについて、その「核拡散抵抗性」に関し様々なプロジェクトが行われてきた。初期の代表的なものとしては、1976年から1980年に米国で実施された NASAP(Nonproliferation Alternative System Assessment Program: 核不拡散代替システム評価計画)と1977年から1980年に実施された上述の INFCE がある。NASAP では核拡散抵抗性の考え方について整理した。INFCE では核拡散抵抗性について初めて国際的な議論が行われた。ワンス・スルー方式(使用済燃料を再処理せず残存核燃料物質をリサイクルしない方式)、核燃料サイクル(クローズド燃料サイクル)ともに抵抗性はある、また、様々な燃料サイクルにおける転用に対する抵抗性については、現在および将来にわたって普遍的に正しい単一の評価はない、それゆえ、一般に燃料サイクル中で拡散上センシティブな点を確認し、拡散リスクの抑止法を追求することが重要かつ建設的であると結論付けられた。

その後、核拡散抵抗性の議論は約20年近くの間、本格的にはなされなかった。その理由として、米国では1970年代以降、原子力発電プラントの新規建設が途絶えていたことと、プルトニウムの民生利用を制限する米国カーター政権の核不拡散政策の影響(FBR 開発の中止、Pu の民生利用の禁止等)が考えられる。さらに1979年のスリーマイル島事故、1986年のチェルノブイリ原子力発電事故発生などの影響により、原子力への期待が世界的に後退したことが挙げられる。

しかし、1997年11月、米国大統領科学技術諮問委員会(PCAST)報告書は、21世紀には発展途上国における生活水準向上に伴う人口増加による電力需要が増大し、これに対応するため、高い経済性と安全性、放射性廃棄物発生量の抑制、核拡散抵抗性等を具備した革新的原子炉システムの開発が必要と指摘した。その上で、21世紀における原子力エネルギー利用の重要性および米国の原子力科学技術再活性化の必要性を答申した。米国エネルギー省(以下、DOE)は、これを受けて、原子力に関する米国の国際競争力、技術基盤の維持、核拡散抵抗性、米国指導力の強化を目的に、1999年から NERI(Nuclear

Energy Research Initiative: 原子力研究イニシアチブ)を開始した。NERI は米国内を対象としていたが、加えて国際版としての I-NERI を2001年にスタートした。これはコスト分担も含め、各国との協力のもと次世代原子力システムを開発しようというものである。また DOE はNERAC(Nuclear Energy Research Advisory Committee: 原子力エネルギー諮問委員会)を1998年に設置し、核拡散抵抗性と NERI と I-NERI の研究項目の検討のために、1999年に TOPS(Technological Opportunities to increase the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems: 世界の民間原子力発電システムの核不拡散抵抗性強化のための技術的な機会)²⁾タスクフォースを NERAC 下に設置した。TOPS は米国が核燃料サイクルを推進する上で、自身の核不拡散政策への対応として出された重要なプロジェクトの一つである。

現在、主流となっている次世代原子力システムの国際協力プロジェクトは、2000年から開始した IAEA の INPRO(International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles: 革新的原子炉および燃料サイクル国際プロジェクト)³⁾と、1999年設置の NERI の流れをくむ GEN IV(Generation IV: 第4世代原子炉システム)の国際フォーラムである GIF(Generation IV International Forum: 第4世代国際フォーラム、2002年開始)⁴⁾である。

III. 核拡散抵抗性の定義と基本的理解

2002年10月にイタリアのコモで IAEA によって国際技術会合が開催され、抵抗性に係わる技術・政策の専門家の参加のもと、核拡散抵抗性の定義とその基本的理解について議論が行われ、報告書 STR-332⁵⁾が発行された。ここで合意された内容は現在、国際的にコンセンサスを得られていると考えられる。以下に概要を紹介する。

[定義]

国家が核兵器や他の核爆発装置を獲得することを目的とした核物質の転用や未申告生産、技術のミスユース(不正使用)を防ぐための特性

核拡散抵抗性の程度は、技術的設計特性、運転形式、制度的取決め、保障措置の組合せで決まる。

[基本的理解]

「核拡散抵抗性」とは、

- ・将来の原子力システムが、核兵器計画のための材料獲得には非魅力的なものであり続けることを確実にするものである。
- ・管理や検認の手段のような外在的抵抗性の措置は、内在的特性の有効性レベルがいかなるものであっても不可欠なものである。
- ・補完的で冗長性のある特性と措置が何重ものバリア

を提供することで強化できる。

- ・ 内在的な特性と外在的な措置の最適な組合せが、他の設計上の配慮と整合して原子力システムに含まれるときに、最も費用対効果が良くなる。
- ・ 原子力システムの設計と開発のできるだけ早い時点で考慮に入れることで強化される。
- ・ 外在的措置は、内在的特性の有効性レベルがいかなるものであっても不可欠なものである。

これにより、「国家」が脅威者となる場合を「抵抗性 (Proliferation Resistance: PR)」の対象とし、「非国家主体」、「サブナショナル」が脅威者となる場合を「物的防護 (Physical Protection: PP)」として明確に区別した。この定義により、従来の複雑になりがちだった議論をよりシンプルにすることができる。INPRO と GEN IV では、上記の核拡散抵抗性の定義を基本的に採用している。

IV. 代表的な抵抗性プロジェクトの概要

本章では、はじめに国内外の核拡散抵抗性に関する1990年代後半以降の代表的なプロジェクトを紹介し、続いてそれらの抵抗性評価手法が対象とする核拡散への行為と拡散者を示し、評価手法の特徴を紹介する。最後に、INPRO と GEN IV の手法の比較を示す。(代表的な抵抗性についてのプロジェクトの推移を第1図に示す) [代表的なプロジェクト]

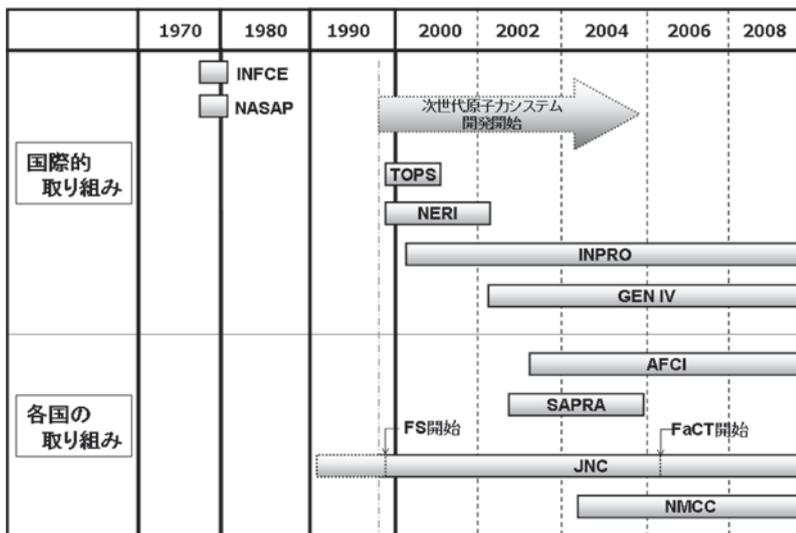
TOPS は、DOE のNERAC が1999年に設置したタスクフォースである。ここでは、第4世代の重要な目標である核拡散抵抗性を向上する原子炉技術および燃料サイクル技術とその研究開発計画、国際協力項目等が検討された。AFCI (Advanced Fuel Cycle Initiative: 先進的燃料サイクルイニシアチブ) はDOE が主導する米国のプロジェクトである。米仏日の研究所、大学等を中心にBRP (Blue Ribbon Panel: 政府任命の学識経験者による

諮問委員会)を2003年に設置した。米国内の核燃料リサイクルの可能性を伴う様々な核燃料サイクルシステムの核拡散抵抗性の比較検討を実施した。INPRO はIAEA 総会決議により、2000年に提案され、11月に開始された。現在までに技術保有国、これから原子力技術を持つとする国および原子力技術の利用国が参加し、日本を含め27ヵ国1機関とオブザーバー(2007年7月末時点)が参加している。前述の報告書STR-332の核拡散抵抗性の定義を採用している。

GEN IV は、DOE が提唱したもので、2030年頃の実用化を目指して第4世代原子炉という次世代の原子炉概念である。国際的枠組みで2001年からI-NERIでの次世代原子力システム研究開発が進められていた。2002年には新たに国際的な枠組みとしてDOEがGIFを結成し、同年11月に専門家グループを設置した。米国中心のメンバーのほかに国際メンバーとしてEU、日本、韓国などが参加している。INPROと同じく報告書STR-332の核拡散抵抗性の定義を基本的に採用している。

フランスにおいては、核不拡散の観点から次世代の原子力に際して、核拡散抵抗性を持つシステム開発が重要としてCEA(フランス原子力庁)を中心に検討が進められている。また、その核拡散抵抗性評価手法として、SAPRA (Simplified Approach for Proliferation Resistance Assessment of nuclear systems⁶): 原子力システム核拡散抵抗性評価への簡易アプローチが開発された。これは2003年に、フランス国内の政府関係者や事業者の専門家からなるGTR3 (Working Group on Proliferation Resistance and Physical Protection: 核拡散抵抗性評価手法開発ワーキンググループ)を設置して検討したものである。CEA, EDF, AREVAなどが参加している。

日本においては、JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute: 核燃料サイクル開発機構(現(独)日本原



第1図 代表的な核拡散抵抗性のプロジェクト

第1表 行為と拡散者⁷⁾(著者参考訳)

取り組み	行為	拡散者
TOPS	転用、盗取、ミスユース 原子力技術や 知識の持ち出し	国家 非国家主体
INPRO	転用 ミスユース	国家
GEN IV	PR 転用、ミスユース、 秘密裏での複製、 アプロゲーション	ホスト国
	PP 盗取、妨害破壊行為	非国家主体 非ホスト国 敵対者
米国 AFCI	転用 盗取	国家 テロリスト 若しくは非国家主体
フランス SAPRA	PR INPROと同様	INPROと同様
	PP 盗取	未定義
日本 JNC	転用、ミスユース、盗取	国家 非国家主体
日本 NMCC	未照射直接利用物質の 不法取得	国家 非国家主体

子力研究開発機構))が基本的な研究を1990年代から実施し、1999年から開始したFS(Feasibility Study on Commercialized Fast-Breeder Reactor Cycle Systems:FBR実用化研究開発)⁷⁾の候補概念を対象とした評価手法を開発した。2007年にはフェーズⅢがFaCTプロジェクト(Fast Reactor Technology Development:FBRサイクル実用化研究開発計画)となり、設計目標に抵抗性、物的防護も盛り込まれている。また、FSの中の一検討としてNMCC(Nuclear Material Control Center:核物質管理センター)もTOPSベースの評価を試み、保障措置とのバランスについて独自の検討を行っている。

各プロジェクトにおける核拡散への行為と拡散者は第1表のようになっている⁷⁾。

[各評価手法の特徴]

評価手法はMAUA(Multi-attribute Utility Assessment:多属性効用評価)を用いているTOPSの評価手法を基本としたINPRO, AFCl, JNC, SAPRAと、パスウェイ解析をベースにしたGEN IVとに分けられる。

TOPSの評価手法では、まず原子力システムの内在的特性を物質的障壁と技術的障壁に分類し、保障措置など外在的措置を制度的障壁とし、4つの脅威のタイプに対しておのおの障壁が有する重要性について、専門家による定性的評価を行った。他のINPRO, SAPRA, JNC, NMCCにおいても各障壁の定義や拡散シナリオの設定には違いがあるもののTOPSの評価手法を基本としている(第2表)。

第2表 TOPSにおける各障壁の属性²⁾(著者参考訳)

物質的障壁 (内在的特性)	同位体組成 化学的形態 放射線レベル 質量と容量 転換時間 検知性
技術的障壁 (内在的特性)	施設非魅力度 施設アクセシビリティ 核物質存在量 転用検知性 特殊技能専門性 時間
制度的障壁 (外在的特性)	保障措置 アクセス管理とセキュリティ ロケーション

JNCはTOPSの障壁を再検討して定量化を行い、2度の試評価を行った。同位体と放射線による抵抗性については効用関数の適用を試みた。SAPRAは、拡散フェーズを転用、輸送、転換、核兵器製造と区別し、TOPSの障壁を発展させ、より詳細な構造で専門家による評価を行った。国が他国の施設から核物質を盗取するシナリオと自身の施設から転用するシナリオをおのおの4ケースずつケーススタディを行い、評価結果から脆弱な点を特定する考察を行っている。NMCCは核拡散抵抗性の指標を核拡散障害次元と保障措置次元の2次元集計で評価している。INPROにおける手法は、ユーザーによる評価を重点に置いた手法であり、抵抗性の高いシステムとなるようなガイダンスを原子力開発者に提供することを目的としている。評価は、第3表のように基本原則(BP: Basic Principal), ユーザー要求項目(UR: User Requirements), 指標(IN: Indicator), クライテリア(CR: Criteria)および許容限度(AL: Acceptance Limits)で構成されている。主として韓国のケーススタディを基にマニュアルの作成が行われ、2007年に発行された。

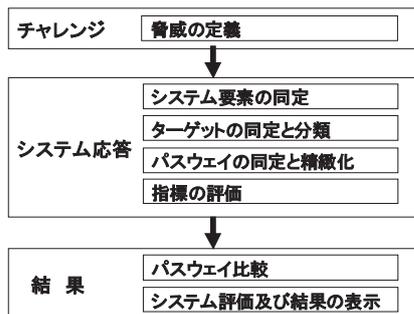
第3表 INPROの評価手法³⁾(著者参考訳)

基本原則 (BP: Basic Principal)	ユーザー要件 (UR: User Requirements)	評価基準 (CR: Criteria)	
		評価指標 (IN: Indicators)	許容限度 (AL: Acceptance Limit)
BP 革新的原子力システム(INS)が核兵器計画のための核分裂性物質獲得に対して魅力のないものであることが保証できるように、INSの全寿命を通して核拡散性抵抗性の内在的障壁と外在的障壁が組み込まれること。内在的障壁と外在的障壁の両者は不可欠であり、一方だけで十分とは考えない	UR 1 国のコミットメント: 核不拡散に関する国の関与、義務、そして政策が国際基準を満たす上で適当であること	IN 1.1 核不拡散に関する国のコミットメント、義務、政策が出来上がっているか IN 1.2 拡散抵抗性を取り入れるために制度的処置(手配)がなされているか	CR 1.1 法的枠組み(国際標準に合致) CR 1.2 制度的処置(制度的処置済み)
	UR 2 核物質と技術の魅力度: 核兵器計画にとって革新的原子力システムの核物質と原子力技術の魅力度が低いこと。これは、革新的原子力システムで製造される、または、処理されることになる未申告核物質の魅力度も含む	IN 2.1 核物質の質 IN 2.2 核物質の量 IN 2.3 核物質の形態 IN 2.4 核技術	CR 2.1 核物質の質の魅力度(専門家により物質の魅力度が、許容とされる「低」であること) CR 2.2 核物質量の魅力度(同上) CR 2.3 核物質の形態の魅力度(同上) CR 2.4 核技術の魅力度(専門家により設計の魅力度が許容とされる「低」であること)
	UR 3 転用の困難さと検出可能性: 核物質の転用は適度に困難で検出可能であること。転用は、未申告の核物質の生産、あるいは、処理のための革新的原子力システム(施設)の使用を含む	IN 3.1 計量 IN 3.2 封印監視手段とモニタリングの適用性 IN 3.3 核物質の検出可能性 IN 3.4 プロセス変更の困難性 IN 3.5 施設設計変更の困難性 IN 3.6 技術や施設のミスユース検出可能性	CR 3.1 測定系の質(国際の実践に合致する現状の設計またはそれ以上のもの-専門家の判断) CR 3.2 封印監視手段とモニタリング(現状の施設設計またはそれ以上のもの-専門家の判断) CR 3.3 核物質の検出可能性(現状またはそれ以上のもの-専門家の判断) CR 3.4 施設のプロセス(3.2と同) CR 3.5 施設設計(3.2と同) CR 3.6 施設のミスユース(3.2と同)
	UR 4 多重障壁: 革新的原子力システムは多層の核拡散抵抗性と対策を組み込むこと	IN 4.1 多重の内在的障壁と外在的措置により革新的原子力システムが保護される度合い IN 4.2 獲得パスを保護する障壁の堅固性	CR 4.1 多重防護*(可能と思われる経路が外在的措置と内在的措置(他の設計要求と両立できるもの)によりカバーできる) CR 4.2 拡散抵抗性障壁の堅固性
	UR 5 設計の最適化: 他の設計思想と両立するよう内在的障壁、および外在的対策の組み合わせが、費用対効果が高い核拡散抵抗性を提供するように(設計/エンジニアリング段階で)最適化されること	IN 5.1 拡散抵抗性は、革新的原子力システムの設計と開発において可能な限り早期に考慮されているか IN 5.2 核拡散抵抗性をもたらすまたは強化するために要求される内在的障壁および外在的措置をINSに組み込むコスト IN 5.3 当事国と承認機関(たとえば、IAEA、地域のSG機関など)の間で合意されたレベルの検証アプローチ	CR 5.1 抵抗性の設計への反映(革新的原子力システムの設計において拡散抵抗性が含まれていること) CR 5.2 PRの特性および対策のコスト(抵抗性強化のため、ライフサイクルを通しての内在的、外在的措置を施す最小限のコスト) CR 5.3 検証アプローチ(左記レベルのアプローチであること)

AFCI 下の BRP は, TAMU(Texas A&M University)が開発した手法を採用した。これは定量評価を目指し, 効用関数と各プロセスに核物質が滞留する時間の概念を導入した点に特徴がある。しかし, 属性の重要度については専門家による判断に基づいている。

GEN IVの核拡散抵抗性と物的防護の評価手法(PR&PP 手法)では, パスウェイ解析を採用している。この解析では, 解析者は原子力システムに対するチャレンジ(拡散者による脅威)をシナリオとして定義し, 拡散に至る様々なパスウェイ(経路)を設定する。GEN IVシステムの技術的および制度的な特性の, これらの脅威に対する応答を解析して定量的に評価する(第2図)。核拡散抵抗性についての評価結果は6つの指標, 物的防護は3つの指標で表現される(第4表)。第3図は評価結果の表示例であるが, この場合は面積が小さいほど高抵抗性であることを示す。

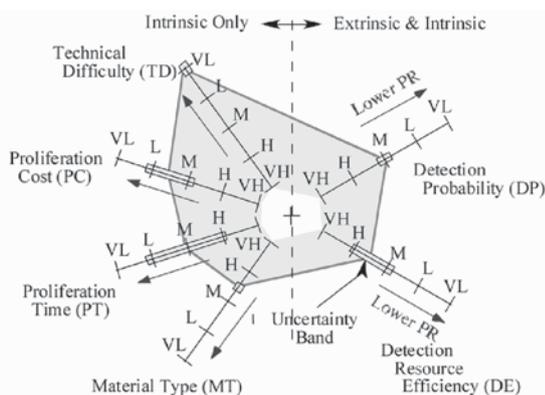
PR&PP 手法では, パスウェイ解析を採用しているため, 現状, 他のプロジェクトよりも詳細に解析を行うことになる。ESFR(Example Sodium Fast Reactor)サイ



第2図 GEN IVの評価手法手順¹⁾(著者参考訳)

第4表 GEN IVの核拡散抵抗性と物的防護の指標

核拡散抵抗性	核拡散の技術的困難性(TD) 拡散コスト(PC) 拡散時間(PT) 核分裂物質のタイプ(MT) 検知確率(DP) 検知リソースの効率(DE)
物的防護	敵対者の成功確率(PAS) 影響(C) 物的防護リソース(PPR)



第3図 GEN IVの核拡散抵抗性の結果表示例⁹⁾

第5表 INPRO と GEN IVの手法の比較¹⁰⁾(著者参考訳)

	INPRO	GEN IV
クライアント	革新的原子力システムに関心のある全ての国	GIF参加国
目的	要件に対するシステム設計の評価	原子力システム核拡散抵抗性の定量的評価
解析アプローチ	基本原則BP ユーザー要件UR, 基本原則CR (属性アプローチ)	脅威-システム応答-結果(パスウェイ解析アプローチ)
解析インプット	各国固有の状態システムと保障措置設計獲得/パス 費用対効果	システム設計保障措置設計獲得/パス
解析アウトプット	要件に関連するコンプライアンス/ギャップ研究開発の必要性	システム評価 パスウェイ比較研究開発の必要性
結果のユーザー	開発者 設計者 政策立案者(原子力ユーザーコミュニティに焦点)	開発者 設計者 政策立案者(原子力システムの設計と構築に焦点)

クルシステムを用いたデモスタディを通して, 定量化の手法(アプローチ)として, 定性的, Logic Tree, マルコフモデルのアプローチが開発された⁹⁾。特にマルコフモデルを用いた確率解析では, 拡散事象のダイナミックな要素(予測不能な人間の行為, 時間と共に変化する条件の効果等)を説明でき, また核物質のノーマルなフローと拡散行為に起因するアブノーマルなフローを時間依存のランダムプロセスとしてモデル化できる。現在ESFRを利用して, 複数のシナリオを用いたケーススタディを実施している。現在, 国際的なプロジェクトとして進行中のINPRO と GEN IVの手法の比較を第5表に示す。

V. 今後の課題と方向性

核拡散抵抗性は, 技術固有の内在的特性(Intrinsic features)と, 制度等による外在的措置(Extrinsic measures)の組合せとして高めることができる。核拡散抵抗性の評価は, できる限り客観的かつ定量的に行うことが重要である。また, ある原子力システムが, 相対的に内在的核拡散抵抗性が高い場合においても, 最終的には国ごとの, 制度の受入れ状況やインフラの有無などの, その国特有の状況に依存する。したがって個別にケーススタディを行っていくことが今後重要と思われる。

原子力システムの核拡散抵抗性を議論する上で重要なことは, 国際的に受容され, かつ経済的に許容される抵抗性技術レベルであること(達成可能なものであること)である。その際, 考慮されるべきことは当事国の国際制度受入れ状況, 特に保障措置受入れレベル(転用検出能力)である。システムの抵抗性レベルが保障措置の緩和の尺度となると期待する考え方もあるが, 保障措置の基礎に要するオーバーヘッドコストが大幅に減少すると期待するのはあまり現実的ではない。むしろ経済的競争に耐え得るシステムを確立するためには高度な保障措置下(例えば統合保障措置下でかつ高い転用検出機能を有する保障措置)で, その他の核不拡散措置がどの程度必要になるかを検討するというアプローチの方が現実的であるかもしれない。いずれにしても, 対象となる国々の異なる保障措置状況に従い対応できるようなフレキシブルな「核拡散抵抗性措置」の検討(最適化)が求められる。

原子力リネッサンスと呼ばれるように、世界的に原子力利用が進展する中で、これからの原子力利用国に対しては、核拡散抵抗性をもった原子力システムの開発は重要である。IAEA リソースの効率的運用からも高いレベルでの保障措置の実施など、外在的措置の整った国(国際的にベストプラクティスな評価の国)への、IAEA の保障措置の適用の一層の効率化に寄与すべきである(例えば統合保障措置の進化)。

上述の INFCE の結論にあるように、核拡散の問題は一義的には政治的問題であることから、最近の核拡散懸念への対応として、国際社会は政治面、すなわち新たな外在的措置の整備(核燃料供給保証など)にも積極的に取り組むべきである。また、核兵器国も抵抗性技術開発とその評価手法の開発に積極的に取り組むとともに、それを一方的に原子力開発国のみ押し付けるのではなく、自らの将来の原子力システムにも適用し、核兵器製造と原子力民生利用を完全に区別し、そして核兵器の完全な削減にも努力すべきと考える。

次世代原子力システムの開発においては、安全性、経済性を重視し、国際社会に受け入れ可能な原子力システムの概念設計を進めながら、そこに抵抗性を担保するための保障措置適用性(Safeguardability)等を組み込み、システム本体と並行して設計検討すべきである。また、さらに、その検討を国際枠組み(日米仏+IAEA, EURATOM など)で行うことで、将来の布石とすることが重要となる。供給保証や国際管理下での抵抗性の必要条件の整理と議論も概念設計の助けとなろう。将来的に第2の LASCAR(1987~92年)にかけ大型再処理の保障措置について議論された IAEA プロジェクト)を視野に入れて、そこで合意可能な、経済的な保障措置・計量管理概念と抵抗性技術開発を概念設計段階から検討に入れることが、次世代原子力システムとしての核不拡散戦略上重要となる。

—参考文献—

- 1) IAEA, *International Nuclear Fuel Cycle Evaluation Reprocessing, Plutonium Handling, Recycle*, Report of INFCE Working Group 4, (1980).
- 2) Nuclear Energy Research Advisory Committee, *Technologic Opportunities to Increase the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems*, (2001).
- 3) IAEA, *Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems*, IAEA-TECDOC-1575, (2007).
- 4) Generation IV International Forum, *Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems*

- Revision 5, GIF/PRPPWG/2006/005, (2006).

- 5) IAEA, *Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems*, IAEA-STR-332, (2002).
- 6) D. Grenche (AREVA NC), J.L. Rouyes (EDF), J.C. Yazidjian (AREVA NP), *Simplifies Approach for Proliferation Resistance Assessment of Nuclear Systems*, (2007).
- 7) M. Senzaki, Presentation Slides of "The Japanese Program on PR&PP", Global 2007, (2007).
- 8) J.Cazalet, Presentation slides of "Presentation of results, Use of results as a decision tool", 第四世代原子力システム核拡散抵抗性&物的防護評価手法セミナー, (2006).
- 9) M. Yue, L. Cheng, R. A. Bari, "A Markov Model Approach to Proliferation-Resistance Assessment of Nuclear Energy Systems", *Nucl. Technol.*, **162**, 26-44 (2008)
- 10) Myung Seung Yang, Presentation slides of "INPRO Methodology and Harmonization with GEN-IV Methodology", Global 2007, (2007)

著者紹介

千崎雅生(せんざき・まさお)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)核不拡散：核拡散抵抗性，保障措置，核セキュリティ，透明性

久野祐輔(くの・ゆうすけ)



日本原子力研究開発機構，東京大学
(専門分野/関心分野)核不拡散：核拡散抵抗性，保障措置，保障措置分析，透明性

井上尚子(いのうえ・なおこ)



日本原子力研究開発機構，東京大学
(専門分野/関心分野)核不拡散：核拡散抵抗性，保障措置，透明性

勝村聡一郎(かつむら・そういちろう)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)核不拡散：核拡散抵抗性，保障措置，核セキュリティ，透明性

私の研究から

エクセルギーと経済と人類の歴史

九州大学工学研究院 福田 研二

現代社会が直面する3Eやトリレンマ、さらには[経済・エネルギー・環境]に人口が加わる「多重複合問題症候群」の理解と解決に資することを目的として、「エネルギーと経済の関係」に関して筆者が考察してきたことを述べる。エネルギー(正確にはエクセルギー)が「実質経済」を担っている。実質経済と、貨幣の働きを重視する「現代の経済学」との関係について述べ、これらと自然や生態系の運動を含む「統合経済学」を提案する。エネルギーを専門とする理工系学徒は経済学を自らの専門分野として積極的に研究/勉強すべきである。

I. 2つの経済/経済学

筆者は原子力熱流動工学を専門とするが、最近『エネルギー経済論』¹⁾なる著作を刊行した。本著において、筆者は「エネルギー(正確にはエクセルギー)と経済の関係」について考察し、「エネルギーは労働とともに『実質経済』をつかさどる主人公である(後述)から、経済学において、エネルギーには従来以上に重要な役割が与えられなければならない」ことを指摘した。すべての「実質経済」現象は、労働を含むエクセルギーが駆動し、それが「貨幣」を介し「名目経済」現象として現れ、その「貨幣」は今や実質経済を大きく振り回している。

エネルギーや環境問題が大きな関心を集める中、「理工系」学徒が経済学に参入することも、その逆もとみに多くなってきている。しかし「物」に拘泥する一理工系学徒たる筆者の眼には、両者の学問的スタンスの違いは大きいように見え、真の「文理融合」はまだ遠いように思われる。

エネルギーや環境問題の解決には技術ばかりか経済的アプローチも必要であり、エネルギーを専門とする学徒は、むしろ「経済学」は理工系学問の一領域として積極的に勉強/研究すべきであると筆者は考えている。

本書において、相対的に、要素現象の抽出とモデル化、定式化、定量化と実証、帰納と演繹を積み重ねた末の体系化を重んじ、図式が多くを語り、文章は簡潔を尊ぶ(と個人的に考える)「理工系の経済学」を筆者なりに心掛けた。

ところで、例えば産業主体 A, B, C が、それぞれの製品を原材料や資本財として、それぞれの産業活動のため互いに交換する経済系を考えよう(第1図)。主体 A は主体 B, C に製品 a を売り、その代金および最終消費で受け取った代金で、B, C からそれぞれの製品 b, c を購入し、かつ雇用者へ賃金支払(付加価値の一部)等するものとする。

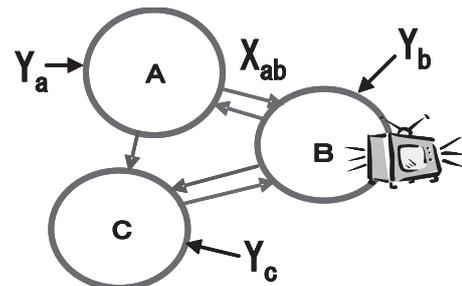
Exergy, Economics and the History of Human Beings: Kenji FUKUDA.

(2008年 3月10日 受理)

第1図で、例えば X_{ab} は、A から B に原・材料として中間投入される(すなわち A 製品を B が購入する)価額(¥), Y_a は A 産業に付与される付加価値額(¥)を表す。もちろん自己産業への中間投入 X_{aa} 等があってもよく、むしろ実際は大きな部分を占める。

主体数が多くなるほど彼らの関係は複雑なネットワークを形成するが、それを記述するには「産業連関表」と呼ばれるマトリックス表示を用いると非常に便利である。第1図の矢印で示されるような産業間の中間投入関係の場合、その「産業連関表」による表示は第1表ようになる。

最大500近くもの細分類の産業連関表が公表されており、産業間の連携が関わる種々の問題(例えば、産業間の価格伝播、製品のエネルギーや環境負荷濃度)を、マトリックス方程式を解くことによって詳細に求めることができるので、「理工系経済学」にとって、まず最初に採用すべき有力なツールであるといえる。



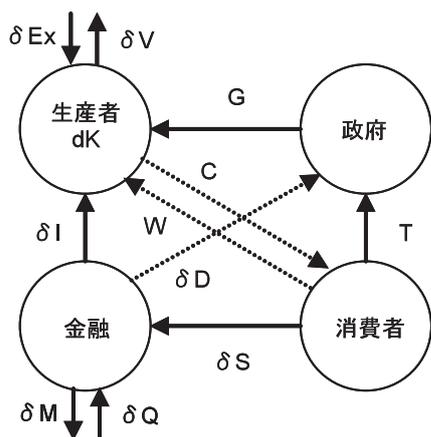
第1図 産業活動におけるネットワーク

第1表 第1図に対応する産業連関表

	環境利用 ↓				環境への製品廃棄 →
	A	B	C	F	
A		X_{ab}	X_{ac}	F_a	
B	X_{ba}		X_{bc}	F_b	
C		X_{cb}		F_c	
Y	Y_a	Y_b	Y_c	外部構造	

χ 資本, 労働, エクセルギー投入, 環境放出

(縦列は生産の流れ, 横行は消費の流れを表す。Y: 総所得額(¥), F: 最終需要(¥)。Y=Fが成立する。たとえば産業主体 A について $X_a = X_{ba} + Y_a = X_{ab} + X_{ac} + F_a$, X_a : 産業主体 A の総生産額である)



(生産者=産業部門は「内部構造」。消費者，政府，金融部門は「外部構造」を形成する。C：消費，G：政府事業，T：租税，W：給与，dK：資本増分， δI ：投資， δS ：貯蓄， δD ：国債， δQ ， δV ：海外投資， δM ：信用創造， ΔEx ：輸出。政府部門について $G=T+\delta D$ ；消費者部門について $W=C+T+\delta S$ ；生産者部門について $Y=C+\delta I+G+\Delta Ex=W+\delta V+\delta K$ ；金融部門について $\delta S+\delta M=\delta I+\delta D+\delta Q$ 等が成立する)

第2図 四者モデル

「産業連関表」は、産業活動における製品の流れによる「物質」やそれに付随する「価値」の「実質的」流れ(フロー)を表している。一方、「貨幣」は製品の流れとは逆向きであり、かつ金融(信用創出等)や政府部門(国債等)によって新たに発生したり消滅したりする。他産業の付加価値の一部がそれぞれの収益に転化する(利子や租税等)、部分的に、あるいは巧妙に産業連関表に組み込まれてはいるものの、むしろ「貨幣の集積と再分配」を担当する、産業連関表の「外部構造」(第1表，第2図)を形成していると見る方がよいように思われる。

消費者や資本家が、それぞれ付加価値の一部としての「賃金」や「資本費」を「最終消費」や「投資」に回すことによって「貨幣流」を担う「外部構造」と類似している。結局、産業連関表が「実質経済」の主要部分：「産業」部門の「内部構造」を表すのに対し、その「外部構造」：家計，投資，金融，政府部門は貨幣の活躍の場「名目経済」の主要部分を構成しているといえる。

「産業連関表」は、製品やサービスという「製品」に「労働価値(≒人件費)」が付随し移動する「古典経済」の立場をよく表現するのに対し、その「外部構造」では、貨幣供給量が実体経済の運動を左右すると考える「ケインズ」や「マネタリズム」の立場のように貨幣の運動が主役になる。両者の関係についての理解が不十分であったことによって、ややもすれば、両者が対立的であったことは経済学にとって不幸なことであったと思う。

II. なぜ、エクセルギーか

ところで、「エネルギー資源」，「省エネルギー」，「エ

ネルギーの利用」など、日常的に使われる語：「エネルギー」は正確にはむしろ「エクセルギー」とすべきである。経済と強い関係があるのも、「エネルギー」よりはむしろ「エクセルギー」である。

「熱力学の第一法則」(「エネルギー保存則」)からわかるように、「エネルギーを消費する」といっても、実はエネルギーの一形態から他の形態に変換するだけでエネルギーの総量は変化しない。例えば、電気ヒータで湯を沸かす場合を想定すると、電気エネルギーを水の熱エネルギーに変換してもエネルギーの総量は変化しないから、もしもその逆変換を可逆的に行うことができるならば、「エネルギーを消費する」という言葉は意味をなさない。

実際は、電気ヒータを使って電気から熱へエネルギーを変換する過程は「不可逆」なので、「湯」の熱エネルギーの全量をもとの電気エネルギーに戻すことはできない。「エネルギーを消費する」という言葉は、「エネルギーの質」に順位がある事実：「熱力学の第二法則」を前提としている。「電気」や「運動エネルギー」，「位置エネルギー」，「仕事」など、いわゆる「力学的エネルギー」は(相互に可逆的に変換できる)「エクセルギー」そのものであり、ある物資のある状態Sの熱エネルギーや化学エネルギーの「質」は、「環境状態」をもう一方の熱源あるいは基準として、Sから取り出すことができる「仕事(エクセルギー)」の割合(「エクセルギー率」)で定められる。

「環境(海や大気，土)」中のエネルギーは無限に存在するが、それだけでは「エクセルギー」を取り出すことはできないため「基準状態」(エクセルギー率=0)になる。それから外れた任意の状態からは正の「エクセルギー」を取り出すことができる。

「生産過程」はもとより、あらゆる経済活動において「エクセルギー」が「価値」を持ち、経済指標：「価格」や「経済性」にも強く反映されると考えられる。さらに、あらゆる「自然の運動」や「生命活動」もエクセルギーによって駆動されることに気付けば、「エクセルギー」は「エネルギー」や「エントロピー」よりもはるかに我々にとって身近な、実質的意味を持つことがわかる。

III. エクセルギーと経済と人類の歴史

1. 労働と資源からのエクセルギーの関係

さて、人の経済活動の源泉としての食料は、人間という熱機関にとって、その採取に要する労働力以上の労働力を、それを摂取することによって得られるという意味で労働力の「余剰」を産む。人が食料を採取するために投入する労働力が、食料を摂取して得ることができるエクセルギーよりも大きければ食料としての機能は生じない。一定のエクセルギーの投入によってこれよりも大きなエクセルギーを得る(無から有を生じる!!)ことは熱力学の原理に反しているが、これが見かけ上できるのは、

太陽エネルギーが植物を育て差額を補填しているからである(動物も同じ状況にある。彼らの労働力は「有機的エクセルギー」と呼ばれよう²⁾)。

同様に、エネルギー資源(無機的エクセルギー)からも、燃焼・転換によって採掘、輸送や精錬等に要するエクセルギー以上のエクセルギー(したがってエクセルギーの余剰)を得ることができる。「余剰」の存在は、交換を旨とする経済において本質的役割を果たすが、これらエクセルギーの余剰 ΔE は「物理的」に存在するため「実質経済」をつかさどる。

ここで、人は、経済の「生産現場」ではエネルギー資源から得られる ΔE をあたかも自分の ΔE かのように利用し、見かけ上、大きな「量的労働生産性」を得るのに対し、「交換現場」では両者を完全に区別する。経済の主体は人であり、労働にはその分け前=賃金が与えられるのに対しエネルギー資源に与えられることはない。

エネルギー資源の価値も、その生産過程において投入された労働量(資本も労働の一形態である)によって定められる。その結果、「生産現場」における無機的エクセルギーの多大な貢献にもかかわらずその価格は極めて安く、人の労働は容易にエネルギー資源によって代替される(機械化、ITによる省力化)^{3,4)}。

2. 農業時代の経済

人が他の有機的エネルギーを利用する形態は、牛馬の利用から始まり、人力を単なる動力として使う奴隷制や、限りなく人を単純労働に使うベルトコンベア式労働集約型工業として現れた。これらは他者の労働力を利用することによって、その主人のみかけの労働生産性をあげている。

A・スミスはピン製造業を例にとり、分業が生産性を上げる大きな要因であると述べている。人海戦術における分業において、人はまさに食料で動く熱機関であり、人の労働力は熱力学的エクセルギーそのものである。分業においては生産と直接結びつかない無駄な動きを排除することができ、また生産と結びつく要素的労働行為において投入するエクセルギーの強度も増すことができる。ここでは労働強化やその利用効率の向上によって「量的労働生産性」を上げることができたといえる。

これは道具を使う場合も同様である。道具を使う瞬間は投入エクセルギーは大きく、かつ生産に集中している。例えば、はしご、のこぎり、ハンマー、弓、等々。どのような道具を使って一定の機械仕事を道具の特定の部分で発揮させようとしても、その仕事はその元となるエクセルギーを変換したもので、それを越えることはできない。結局、労働の各瞬間の時間的経緯を追えば、労働エクセルギーは熱力学的エクセルギーそのものである。

水河期の終りとともに、もっぱら狩猟・採集に頼る原

始的経済は農耕のそれへ劇的に変化した。水河期に棲息した狩猟対象：大型動物の数は減り、一方、温暖化による環境の好転によって人口爆発が生じた。人口圧力が、自然灌漑=洪水に恵まれた河川の河口において、食糧生産効率が高い農耕を開始させ、四大文明を発祥させたと考えられる。

本格的工業時代に至る前の「農業時代」においても、人は数回の温暖化と寒冷化の波の試練を経た。人口や経済はこれとほぼ連動し、あるいはマルサスによる人口論：「農業生産は算術級数的にしか増えないが、人口は幾何級数的に増えるので、やがて限界に至る(『マルサスの呪縛』)」に従う変動も繰り返した。

それでも、分業や道具の利用、肥料や品種改良、生産方式における工夫、家畜や農奴、自然エネルギーの利用等による農業部門における継続的労働生産性の向上が、次第に工業や商業部門に回る余剰労働人口を増し、経済規模と人口拡大を導く原動力になった。

3. 工業における労働生産性の意味

「産業革命」を契機として、人は動力源としてエネルギー資源の利用を急拡大させた。

ここでも、経済の「生産現場」では人の労働力も資源からのエクセルギーも同じ熱力学の「仕事」であり、両者は区別できない。機械がハンマを振ったとき、内部で人が振ったのか資源からのエクセルギーなのかは区別できない。ついに人は、生産活動において、[有機的エクセルギー+道具]という組合せから、はるかに強力な[無機的エクセルギー+機械]という組合せを開発し、量的労働生産性を増強することに成功したのである^{3,4)}。

「産業革命」以前は小児や女子も労働力として期待されていたが、革命は彼らの労働者としての役割を終らせ、「出生率」低下=少子化の時代に突入した。奴隷貿易の禁止(1807年)や南北戦争(1861~65)による奴隷解放もその歴史の流れの1コマとして捉えることができる。

ところで、工業(や商業)部門は農業(や漁業)部門が生産した「真の価値」：食糧=労働エクセルギーの余剰を消費し「交換価値」を生産する部門になっている。その製品の「真の価値(単位量のそれは価格 p)」は消費者の需要に応じて始めて消費者によって値付けられる。

機械によって「量的労働生産性 K 」を増加させることはできる。しかし、労働人口の産業間移動や新規産業の発生等のメカニズムを経て、結局は工業部門も農業部門とほぼ同じ(真の)「質的労働生産性 (pK)」を産むにすぎない。

「量的労働生産性」の向上に邁進した挙句、需要の限界に遭遇しては過当競争を演じ、価格低下を招いては共倒れに至る、工業時代の「マルサスの呪縛」はなおも健在であるように思われる。「大恐慌」(1929年)に際しては、自動車や鉄道、建築などの主要産業において、需要の増加

速度以上に供給のそれが急速であったため破局に至った、大恐慌の一因を見い出すことができる¹⁾。

「無機的エクセルギー」の利用によって扶養可能人口も急激に増えたが、運良く生を得、競争に勝ち抜き、生き残った者は、(近世の農業時代に比べ、我が国の場合)労働エクセルギーの40倍ほどの無機的エクセルギーを利用して、10倍ほどの1人当り実質所得を享受している^{3,4)}。

4. 貨幣が躍る現代経済

米国は、1970年代に貿易収支が、さらに80年代に経常収支も赤字に転落した。もはや長期的「金」の国外流出には耐え得ず、71年8月「ニクソンショック」によって米国はついに金・ドル交換を停止した。かくて貨幣は(真価値を比較的良く反映する)「金」や「貿易」の束縛から放たれた。

実質的裏付けが希薄な、単なる「信用貨幣」と化したドルは、米国の長期的貿易赤字や他国のドルの買い支えによっても世界中に散布された。産油国には石油代金が大量に蓄積した。公社債、国債、預金、年金、投資信託、各種ファンドといった形で集められ、貨幣資本と化した世界中の資金も国際金融市場に大量に回された。

それらは、いわば不要不急の富であるが、その貸与の代償として利子を得べく運用される。しかし貨幣資本は金融市場の往来だけによって利子を産み続けることは不可能で、適当な実物資本をパートナーとして見つけ、それに貸し付けられて初めて安定な営みを得ることができる。今はほとんどの決済が電子化された世界でなされるのでなおさら、「ストック」としての貨幣資本はすみやかに、遊休貨幣も掘り起こしつつ巨大なものに膨れ上がり、人々が生活を営む「フロー」の世界に参入している。

パートナーの収益力が弱まったり、より収益性が高いパートナーが見つければ、貨幣資本は「フローの世界」で収益性の低い実物資本から回収され、そこに残骸を残しつつ、成長産業に投資されては経済成長の原動力ともなる。少しでも収益性の高い実物資本を探すことは貨幣資本の宿命で、それが貨幣の良い運用とされる。

しかしその宿命のゆえ、プロセスは往々にして暴力的になり、人々から富や幸福、生命を奪う役割を演じては貨幣資本が関わる「葛藤の歴史」の主役にもなってきたのであろう。信用貨幣の価値が金融・財政・為替政策等によって比較的作為的に操作され、国境をまたぐならば国益も絡むから、「下手をすれば紙切れ」と実物資本との交換については、研究や議論の余地が大きい深刻な問題を含んでいる。

IV. 「統合経済学」樹立に向けて

産業連関表で表される構造に従って製品を生産/消費する形で、それに付随して「付加価値」が流れている。製

品の単位量当たりの付加価値を「付加価値濃度」(あるいはその「原単位」と呼ぶことにすれば、すなわちそれは「価格」の概念であり、その産業間波及は産業連関表の応用：いわゆる「価格モデル」を解くことによって求めることができる。「エクセルギー濃度」や「環境負荷濃度」も同様に、製品に付随し、実空間や産業空間を流れる。これら各種の「濃度」も「価格モデル」と同様のマトリックス方程式を解いて求めることができる(第1表)。あたかも物質の運動に付随して質量やエネルギー、運動量が輸送される「流体力学」で記述される現象と類似している。

「生態系」や「自然」、「世界(の国々の関係)」も産業連関表と同様の構造に従って運動し、記述することができる。例えば「生態系」の場合、その構成主体：「兎」、「山猫」、「人」、「草」等の相互の「捕食」、「被食」の関係は産業連関表における「中間投入」、「中間需要」に相当し、その相互関係に沿って、身体の構成物質：炭素化合物等とともに、動力源としての「エクセルギー」を伝播させている。したがって「広義の資本」としてのそれぞれの主体や全体の盛衰も、経済系のそれと相似な形で記述することができる^{3,4)}。

あたかも産業連関表の創始者レオンチェフが素描を示したように、「経済系」はそれ自身で閉じることはなく、すべての地球上の諸運動と連動し、それは恐らく多くはない類似の関数形で統合して記述できることがようやくわかり始めてきたのである¹⁾。地球上の環境と生態系、世界の国々と人々の生活の、一体システムとしての深い理解(思いやり)に至る過程から、トリレンマと称される閉塞した現状の打開と、新たな地球システム構築の次元へと我々を導く方向性や方策も浮かび上がってくるものと思っている。

— 参考文献 —

- 1) 福田研二, エネルギー経済論, 多賀出版, (2007).
- 2) E. A.リグリ, エネルギーと産業革命, 近藤正臣訳, 同文館, (1991).
- 3) 福田研二, “労働とエネルギー資源からのエクセルギーの生産性に関する考察”, エネルギー資源, 22[6], 468-474(2001).
- 4) K. Fukuda, “Production of Exergy from Labour and Energy Resources”, *Appl. Energy*, 76, 435-448(2003).

著者紹介

福田研二(ふくだ・けんじ)



九州大学
(専門分野)原子力熱流動工学, エネルギーシステム学

連載
講座

今、核融合炉の壁が熱い！
—数値モデリングでチャレンジ

第1回 I. はじめに

核融合科学研究所 相良明男, 大阪大学 乗松孝好

II-1 壁の前で何が起きているか？

慶應義塾大学 畑山明聖, 日本原子力研究開発機構 滝塚知典

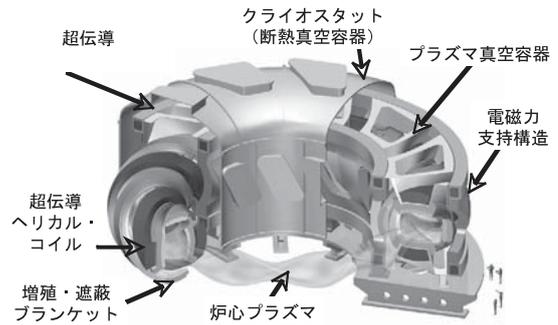
I. はじめに

1. チャレンジは始まっている

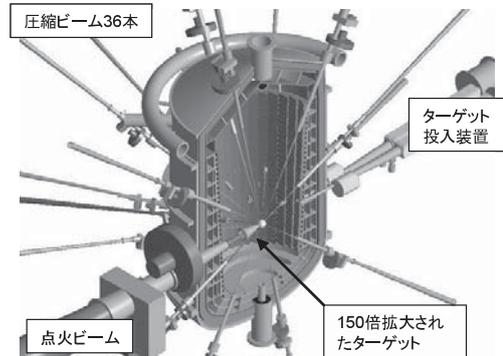
磁場を用いる国際熱核融合実験炉イータ(ラテン語で道の意, ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor)の建設が始まった¹⁾。慣性を用いる核融合分野では, 2012年頃には点火燃焼の実験が米国で予定されている。いずれも実用規模の核融合エネルギーを初めて発生させる。その後, 原型炉から実用炉へと続く。そこでは核融合炉の「壁」を構成する高熱流機器やブランケットが新しい主役となる。そこにはどんな物理や化学, 工学が渦巻いているか。数値モデリングによって壁の動きを理解して予測する研究が期待されている。核融合エネルギー炉を設計するチャレンジはすでに始まっている。

2. 炉の中で何が起きるのか

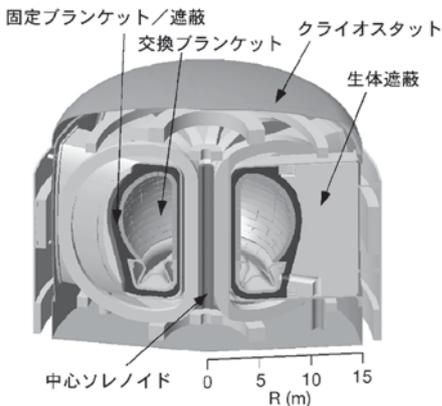
第I-1~3図にトカマク型核融合炉²⁾, ヘリカル型核融合炉³⁾, レーザー核融合炉⁴⁾の概念設計例を示す。核融



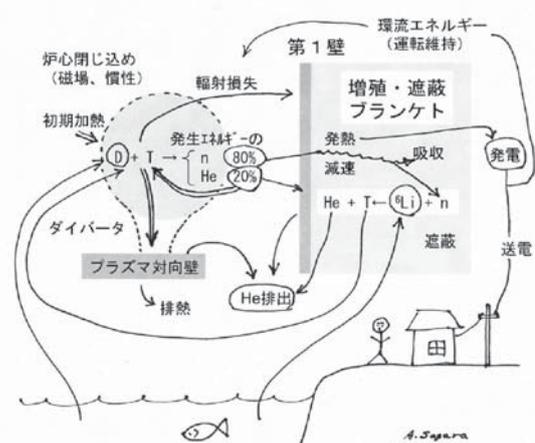
第I-2図 ヘリカル型核融合炉 FFHR³⁾



第I-3図 レーザー核融合炉 KOYO-F⁴⁾



第I-1図 トカマク型核融合炉 SlimCS²⁾



第I-4図 核融合炉壁(増殖・遮蔽ブランケット)の役割

The Fusion Reactor Wall is Getting Hot!—A Challenge towards the Future for Numerical Modelling (1): Chap. I introduction : Akio SAGARA, Takayashi NORIMATSU, Chap. II What is Really Happening Between the Plasma edge and the Wall?—1. Physics Modeling : Akiyoshi HATAYAMA, Tomonori TAKIZUKA. (2008年 1月29日 受理)

合エネルギー炉を実現するには、第I-4図に示すように、重水素(D)と三重水素(T)の高温高密度プラズマを使う。磁場閉じ込め核融合プラズマでは、高密度といっても大気の10万分の1程度だが、温度が1億度(10 keV)程度あるので数気圧の高圧となっており、これを5テスラ程度の磁場の磁気圧~100気圧で押し留める。あるいは強力なレーザーで高温プラズマを固体密度以上に圧縮できれば、短時間なら止まって見える“慣性”も強力な「容れ物」となる。レーザー方式については、本章の後半で詳しく述べるとして、まず磁場方式を前提に話を進めるが、基本原理は共通である。

DT核融合反応で発生するエネルギーの20%はアルファ(α)粒子(ヘリウムイオン)が受け持ち、主に高温プラズマの維持に使われる。そのエネルギーは、熱粒子のエネルギーや電磁波の輻射エネルギーとして最終的に「容れ物」の壁に逃げていく。これらのエネルギー収支がバランスすると外部加熱が要らない自己燃焼が続く。止める時はDやTの燃料供給をストップするだけでよい。正に焚き火の原理である。

他方、残り80%のエネルギーは高速中性子として「容れ物」から飛び出して、周囲の「壁」に入り込む。そしてブランケットの材料原子との衝突を繰り返しながら発熱し、冷媒によって炉外に運ばれて発電に至る。この過程で減速して熱化した中性子は、 ${}^6\text{Li}$ と反応してTを増殖する。したがって、ここでも1核融合反応当たり1T生成の収支バランスが必須である。これがクリアできれば、消費原料は海水からいくらでも安く手に入るDとLiだけであり、排出物は無害のHeだけである。

太陽においては、巨大な「引力の容れ物」の中で、陽子と陽子の核融合反応(P-Pサイクル)を持続し、ガンマ線とニュートリノのエネルギーを宇宙空間に放出している。一方、我々が人工太陽では、中性子を利用した全く新しい小型システムを構築している。しかしその容れ物の「壁」は、表面だけに特に集中する高熱流と、「壁」内部に突入して分散する高速中性子作用の、2重の過酷な条件にさらされることになる。第I-5図に示すように、ダイバータ熱流は太陽表面での熱流に近づくほどであり、中性子による壁材原子の弾き出し損傷(DPA)は高速炉容器の1,000倍ほどである。この両方を矛盾なく制御することも大きなチャレンジとなっている。そのためには、実験的研究開発に並んで、数値モデリングによって現象を理解して予測する研究が強く期待されている。

磁場閉じ込め方式の核融合炉は定常運転が基本である。したがって、第I-4図に示すように、磁気ダイバータによってヘリウムなどの不純物を常にポンプで排気し続けることも必須である。他方、慣性閉じ込め方式は間欠運転であるため、ダイバータは不要だが瞬間的な熱流が極めて高いため、別の要請がある。すなわち α 粒子による壁負荷は半径3mの液体壁で 10^{11}W/m^2 程度

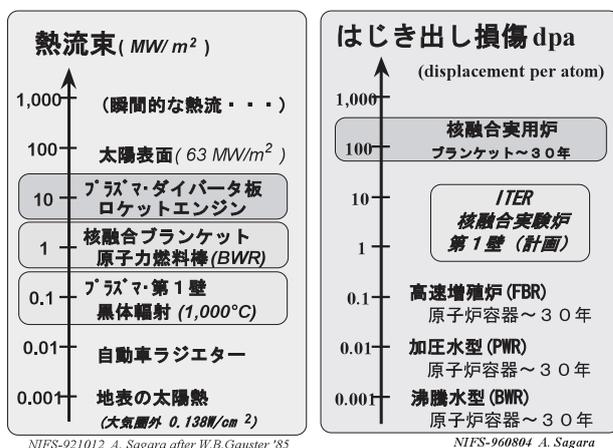
となる。最新の概念設計炉KOYO-Fの場合⁴⁾、第一壁は厚さ3~5mmの液体LiPbの滝で保護されていて、炉全体で10kg程度の液体LiPbが蒸発する。液体壁での課題の一つは、この蒸発した金属のその後の挙動である。次のターゲット照射の時までに(1s以下で)10Pa程度まで排気できるか検証をする必要がある。また、微粒子がターゲットに付着してターゲットの性能を落とす恐れがあるので、微粒子の挙動についての研究が必要である。

第I-6図に表面での現象をまとめる。時間的な経過は無視されていて、右半分は主に α 粒子が壁に到達した頃、左半分はそれにより蒸発したガスが対向壁に到達した頃をイメージして描かれている。 α 粒子は液体金属中に入ると、衝突を繰り返し、エネルギーを放出する。原子過程、電子遷移等を含めた詳細な過程については、本講座第IX章で詳しく触れられる予定である。

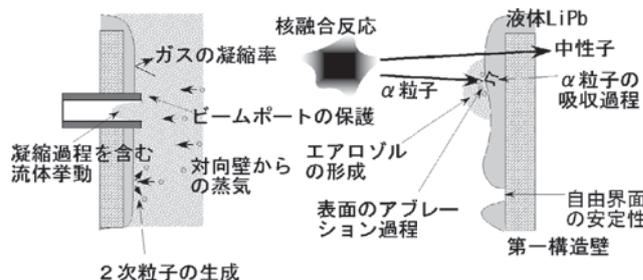
蒸発した液体金属は断熱膨張により、急速に冷却され、エアロゾルを形成しながらやがて対向壁にまで到達する。先に述べた流体力学的不安定性により形成された直径数 μm の粒子も同様である。これらの蒸気、エアロゾル、粒子がどのような効率で対向壁に吸収されるかは高繰返し照射を実現する上で大変重要なデータとなる。

3. この企画もチャレンジ

本講座では、以上の観点を全11章、12回に分けて、壁



第I-5図 単位面積当たりの熱入力の比較, 中性子照射による壁材原子1個当たりの移動割合の比較



第I-6図 液体壁レーザー核融合炉の表面近傍での課題 時間的な経過は無視されている。

の前で何が起きているか(Ⅱ章), その表面で何が起きているか(Ⅲ章), その中で何が起きているか(Ⅳ章), それによって壁はどのくらい熱くなるか(Ⅴ章), そのとき壁の中は傷まないか(Ⅵ章), それによって壁の寿命はどのくらいか(Ⅶ章), その時に壁が作る燃料をどうしたらいいか(Ⅷ章), そもそも壁は熱でどうなるか(Ⅸ章), その熱をどうするか(Ⅹ章), 今後の展望は(Ⅺ章)を駆伝方式でつなげてみる。リレーがしっかりこななければ, そこが新しい課題であろう。いずれにしても本企画もまた, 今までにないチャレンジである。(相良明男, 兼松孝好)

—参考文献—

- 1) <http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/>
- 2) K. Tobita, *et al.*, *Nucl. Fusion*, **47**, 892-899 (2007).
- 3) A. Sagara, *et al.*, *Nucl. Fusion*, **45**, 258-263 (2005).
- 4) 神前康次, 他, プラズマ核融合学会誌, **82**, 819-822 (2007).

Ⅱ. 壁の前で何が起きているか？

—物理モデル

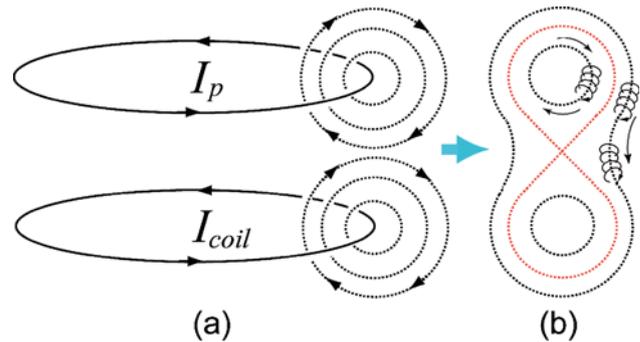
炉心プラズマと固体壁との間に位置する“境界層プラズマ”を通して, 国際熱核融合実験炉(ITER)では約10万kWもの熱が固体壁へと輸送される。さらに, 原型炉ではその約6倍にもなる。境界層プラズマの理解と, その制御なしには, 核融合炉の実用化はないといっても過言ではない。ITER設計活動を契機として, 境界層プラズマの数値モデリングは着実に進展してきている。まさに, “熱い”テーマである。欧米に比較して, 数値モデリングの立場からこの“熱い”テーマに取り組む研究者, とくに, 若手は数少ない。本稿をきっかけに, 少しでも多くの若手が, この分野に興味をもってくれれば幸いである。

1. 壁の前で何が起きているか？

(1) ダイバータとは？

核融合炉におけるプラズマと壁との相互作用を考える上で, ダイバータ概念を抜きには語れない。核燃焼コアプラズマを高温で高純度に保つためには, “高温プラズマと壁との相互作用をコアプラズマからできるだけ遠く離れた領域に限定し, 相互作用によって生じる不純物となるべくコアプラズマに入るのを防ぐ”ことが必要となる。

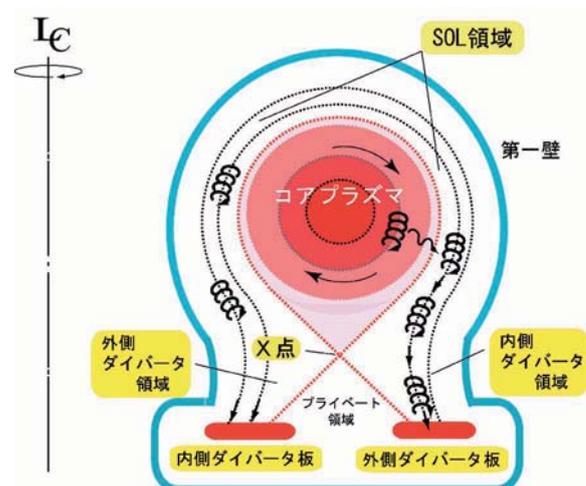
ここでは, 最も基本的なダイバータ概念を第Ⅱ-1図に示す。磁場閉じ込め核融合の代表的な一つであるトカマクでは, 第Ⅱ-1図(a)のように, コアプラズマに主に電子の流れによって生じる円環状電流 I_p が流れている。この円環電流に垂直な面を考えると, アンペールの法則から電流を取り囲むような磁場が生じる(磁力線の様子を破線で示した)。ここで, コアプラズマの下側に



第Ⅱ-1図 ダイバータ形状

円環状のコイル(ダイバータコイルと呼ぶ)を置き, プラズマ電流と同じ方向に電流 I_{coil} を流し, コイルを取り囲む磁場を作る。これら2つの電流による合成磁場は, 第Ⅱ-1図(b)のようになる。プラズマとコイルとの間に, 互いに作る磁場が打ち消しあい, 磁場の垂直面内成分がゼロになる点が生じている(トロイダルコイルで作るトロイダル磁場があるので, 磁場強度はゼロにならないことを注意しておく)。この点をその形状からX点と呼び, X点を通る8の字状の線(面)を, セパトトリックスと呼ぶ。セパトトリックスを境にして, 磁力線のトポロジーに大きな違いが生じていることが, 図から容易にわかる。セパトトリックス内部では, 磁力線はおのおのの電流を囲んで閉じているのに対して, 外部の磁力線は2つの電流を同時に取り囲む“ダルマ形状”となっている。

さて, 壁とプラズマの相互作用に話を戻す。閉じ込め装置ではプラズマを取り囲んで, 第Ⅱ-2図のように, 第一壁が存在する。上で述べたように, ドーナツ形のコアプラズマ領域では磁力線は閉じており, プラズマ粒子は磁力線に巻き付いて旋回運動(ラーマー運動)をしながらセパトトリックス内部に閉じ込められている。しかし時間がたてば, 衝突や乱流に起因する拡散過程により, セパトトリックス外部に流失する。ここで重要なのは, “プラズマは磁力線に沿って運動しやすい”という性質で



第Ⅱ-2図 トカマク断面図

ある。すなわち、流出してきたプラズマ粒子は、そのまま拡散してコア周りの壁に到達するのではなく、主に磁力線に沿って図に示したダイバータ板まで導かれる。したがって、ダイバータ板をコアから十分に離しておけば、壁とプラズマとの相互作用をコアから離れたダイバータ板にのみ限定することができる。セパトロックスと壁との間に存在する境界層のことを、“SOL (Scrape-Off Layer)”領域と呼ぶ。さらに、SOLのうち、X点より下のダイバータ板に近い領域のことを、特にダイバータ領域と呼ぶことが多い。

第II-3図は、ダイバータトカマク装置(ASDEX-U:ドイツ)の内部写真である²⁾。赤く発光している部分は比較的低温のプラズマであり、電離されきれない水素原子がプラズマによって励起されて赤の波長領域の光を発している。一方、高温プラズマからの発光は、可視光より波長が短く透明となり、プラズマを透かして裏側の壁が黒く見えている。右側の図は、この発光の様相を数値モデリングによって再現したものである。白と緑の矢印が、おのおの第II-2図の内側ダイバータ板と外側ダイバータ板の部分に対応している。

(2) ダイバータの功罪

ダイバータ配位は、上に述べたように、コアプラズマを高温・高純度に保ちやすいメリットがある反面、相互作用がダイバータ板に集中するというデメリットがある。言い換えると、コアプラズマから流出する粒子と熱をダイバータ板が、ほぼ一手に引き受けることになり、その負荷は熾烈なものとなる。これに対して、上に述べたITER³⁾においては、ダイバータ板におけるピーク熱負荷を10 MW/m²以下に抑えることが要求されている。そのため、ダイバータ板に到達する前に先に第II-3図でみたように、SOLやダイバータ領域における光の放射として、壁全体にエネルギーを分散させる(放射冷却ダイバータ概念)ことや、プラズマが直接ダイバータ板に届かないようにする(非接触ダイバータプラズマ概念)ことで、ダイバータ板へのプラズマの熱負荷を低減し、

この問題を克服する。これら概念が成立するかどうかについて、実験的な研究とともに、数値モデリングが重要な役割を果たしている。その詳細は、次回で詳しく説明する。実験炉の次のステップの実証炉⁴⁾では、核融合熱出力がITERの約5倍、300万kWにもなる。このうち、約1/5の60万kWがプラズマとしてダイバータ板にそのまま到達することになると、ダイバータ設計は極めて困難なものとなる。ダイバータの成立性が、磁気閉じ込め核融合炉実現にとって極めて重要な意味を持つ。数値モデリングの高度化と予測精度の向上が急務となっている所以である。まさに、核融合炉実現にとって、“熱い”分野といえる。

(3) 境界層プラズマで何が起きているのか?

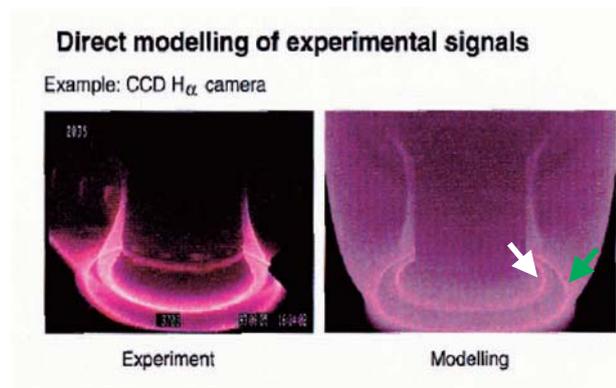
SOLおよびダイバータプラズマに関する数値モデリングの現状は、以下で詳しく述べることにして、ここでは、これら境界層プラズマで“どのような物理現象が起きているのか?”を、まずは定性的に考えてみよう。第II-4図に主な物理過程/現象を概念的に示す。

(a) クーロン衝突と SOL 中の熱輸送

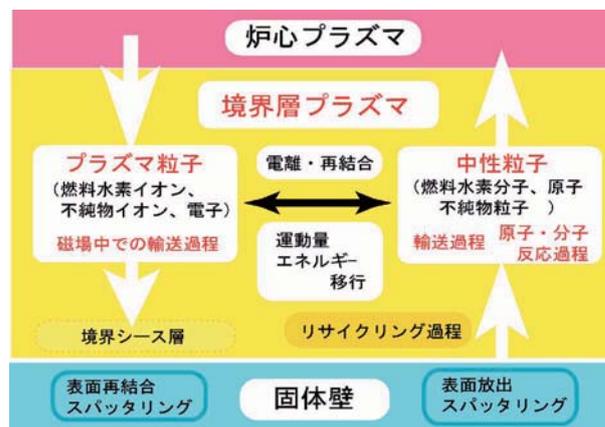
コアから漏れ出たプラズマ粒子は、先に説明したように、磁力線に沿って SOL 中を輸送される。コアに近い SOL 上流では、荷電粒子間のクーロン衝突過程が重要となる。クーロン衝突は、プラズマの温度が高くなるほど、その頻度は少なくなる。この性質は、SOL 中でのプラズマの磁力線方向の熱伝導や、不純物に働く力などを考える上で重要な役割を果たす。例えば、磁力線方向のプラズマの熱伝導率 κ_{\parallel} はプラズマ温度 T の5/2乗に比例して大きく変化する。

(b) シース

一般に、プラズマはイオンの密度 n_i と電子の密度 n_e がほぼ等しい“準中性”と考えられている。これは、もし電荷の偏りがあると電場が生じて、その偏りを打ち消すようにプラズマを動かすからである。しかしながら、ダイバータ板の直前では、このような準中性からのズレは大きく、定常的に大きな電場が存在する領域が存在している。この領域をシース領域という。イオンに比較して



第II-3図 トカマク装置(ASDEX-U)ダイバータ領域における水素原子からの発光 (左図:実験、右図:数値モデリング)²⁾



第II-4図 SOL/ダイバータプラズマ中の物理過程

電子は圧倒的に質量が小さく、速く動き回っているのので先にダイバータ板に逃げていき、板の電位を低下させていく。しかし、この電位降下は電子を減速させ、さらにはエネルギーの低い電子を反射する(負電荷を持つ電子にとって電位降下は上り坂になる)。このため、電子の壁への流入は減少していく。一方、イオンは、電位降下により壁に向かって加速され、イオンの流入は増加する。やがて、壁に入射するイオン粒子束と電子粒子束はバランスし、定常的な電位降下がプラズマと壁(ダイバータ板)との間に生じることになる。プラズマ粒子およびそのエネルギーは、このシースを介して壁に入る。シース抜きにはプラズマ-壁相互作用を語れない。

(c) 原子分子過程とリサイクリング過程

固体壁に到達したイオンは、固体表面で電子と再結合(表面再結合)し、中性の原子、あるいは、分子として、再びプラズマ中に戻っていく。これら中性粒子は、プラズマ(主として電子)と衝突し、解離、励起、電離(イオン化)などを行う。第II-3図のダイバータ領域における発光は、実はこのような励起過程によって生じた中性水素原子から放出される光を、CCDカメラによって撮影したものである。

ダイバータ板で生じた中性粒子が、ダイバータ領域でイオン化すると、磁力線に束縛され、再びダイバータ板に入射する。プラズマ(イオン+電子)→固体表面→中性粒子→電離→プラズマ(イオン+電子)→固体表面→…の過程が繰り返される。これを“リサイクリング過程”と呼ぶ。この過程において粒子束は増幅されることになる。粒子束の増幅が大きい“高リサイクリング状態”では、ダイバータ領域でのプラズマ密度が上昇するようになる。一方、プラズマ圧力は磁力線に沿ってほぼ一樣になるようにするので、ダイバータ領域のプラズマ温度は低下することになる。同時に、上で述べた解離、励起、電離などのプラズマと中性粒子との相互作用によって、プラズマはエネルギーを失い、ダイバータ板前面のプラズマの温度は低下する。励起、イオン化に加えて、中性粒子がイオンに、イオンが中性粒子になる荷電交換反応も重要な原子分子過程の一つである。荷電移行の際には通常、各粒子の運動エネルギーの変化は生じない。反応の結果生じる中性粒子は、もとのイオンのエネルギーを保持している。しかし“中性”粒子になるので、もはや“磁力線の束縛を受けず自由に運動”し、やがて壁に衝突する。イオンは磁力線に束縛され、ダイバータ板の限られた領域に入射するのに比べて、粒子・熱負荷は比較的広い範囲に分散される。

ダイバータ板前面に、低温の中性ガス層を形成し、これをあたかもクッションとして、プラズマと壁とを非接触状態に保つことができれば、ダイバータ板への粒子・熱負荷を著しく軽減することができる。このような“非接触プラズマ状態”については、次回でより詳しく説明

する。

(d) 不純物発生とプラズマ中で不純物イオンに働く力
ダイバータ板に入射するイオンは、上で述べたリサイクリング過程を行うと同時に、ダイバータ板の材料の原子をたたき出す(スパッタリング)。たたき出された原子は、不純物としてプラズマ中に放出される。スパッタリングの過程は、壁材料組成や壁に入射するイオンのエネルギー、入射角などに強く依存する。カーボン材料では、入射水素との化学反応によりメタンなどになって放出される場合もある(化学スパッタリング)。このようなプラズマ粒子と壁との相互作用については、本講座第3回で詳しく取り上げる。

壁で発生した不純物粒子は、燃料水素の場合と同様、プラズマ粒子との相互作用により、励起、イオン化される。一方、ダイバータ領域に流入するプラズマは、この不純物との相互作用によりエネルギーを失うことになる。ダイバータプラズマは冷却され、ダイバータ板への熱負荷が低減できるようになる。ただしこのとき、不純物イオンがダイバータ領域にとどまってくれる必要がある。コアへの侵入量が多ければ、コアプラズマは冷却されるし燃料が希釈されてしまう。はたして、不純物イオンはダイバータ領域にとどまるのか？それとも、コアに侵入してしまうのか？侵入量は、許容値以下に抑えられるのか？これらを精度よく予測することも、周辺プラズマの数値モデリングの重要な使命の一つである。

(e) ヘリウム排気

核融合反応によって発生する高エネルギーのヘリウムイオンは、燃料プラズマを加熱し、高温に維持する。しかし、この衝突過程でエネルギーを失ったヘリウムイオン(ヘリウム“灰”と呼ばれることもある)がコアプラズマに蓄積すると、燃料水素は希釈され核融合反応の出力が減少する。コアで発生したヘリウムイオンの一部は、燃料水素イオンと同様、SOL中を磁力線に沿ってダイバータ領域に導かれる。このようなヘリウム灰をダイバータ領域から、効率的に排気できれば、コアでのヘリウム灰の蓄積と燃料の希釈を防ぐことができる。コア、SOL中でのヘリウム粒子輸送、ダイバータ領域における排気は、核融合出力維持という観点で非常に重要である。

(畑山明聖, 滝塚知典)

—参考文献—

- 1) P. C. Stangeby, *The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices*, IOP Publishing London, (2000).
- 2) R. Schneider, X. Bonnin, K. Borrass, D. P. Coster, *et al.*, “Plasma Edge Physics with B2-Eirene”, *Contrib. Plasma Phys.*, **46**, 3 (2006).
- 3) 下村安夫, 他, “ITER 工学設計”, プラズマ・核融合学会誌 第78巻増刊, (2002).
- 4) R. Hiwatari, K. Okano, Y. Asaoka, K. Shinya, Y. Ogawa,

“Demonstration Tokamak Fusion Power Plant for Early Realization of Net Electric Power Generation”, *Nucl. Fusion*, **45**, 96 (2005).

*文献1)は, 上で取り上げた境界層プラズマの物理現象, 原子分子過程, 壁相互作用など広い範囲をカバーした優れた教科書。単なる現象の羅列ではなく, しっかりとした物理的見方も示してくれている。境界層プラズマに興味を持たれた読者は, ぜひ一読することをお勧めする。

著者紹介

相良明男(さがら・あきお)



自然科学研究機構
(専門分野/関心分野)核融合炉工学/特にプラズマ壁相互作用における物質移行物理学と炉システム設計統合

乗松孝好(のりまつ・たかよし)



大阪大学
(専門分野/関心分野)レーザー核融合/炉工学, トリチウム, ターゲット開発

畑山明聖(はたやま・あきよし)



慶應義塾大学
(専門分野/関心分野)プラズマ物理/特に核融合境界層プラズマおよび負イオン源プラズマのモデリング

滝塚知典(たきづか・ともりの)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)プラズマ物理/トカマクの周辺プラズマモデリング(特に粒子シミュレーション)および核燃焼プラズマの統合モデリング

原子力学会誌 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、毎月 8 千部を発行しており、全国の主要大学、原子力研究機関、電力会社、メーカー、地方自治体、メディアなど、原子力に関係する多くの方が目を通しています。また、昨年 4 月号から誌面を一部刷新し、学会誌の Web アンケートも開始しました。

さらに、本年 4 月号より表紙デザインと名称を変更し、より親しまれ、さらに多くの読者に読まれる学会誌として引き続き、刷新を行ってまいります。

この機会に、学会誌への広告掲載をぜひ検討していただけることをお願いいたします。

■ 広告料金(1頁あたり)

表 2	110,000 円	前付	80,000 円
表 3	100,000 円	後付	70,000 円
表 4	130,000 円	差し込み	160,000 円
前付色紙頁	95,000 円	記事中	80,000 円 (1/2 頁 40,000 円) *書籍・文献等広告に限る

※年間契約(一括お支払い)の場合、4 回以上 10%、12 回 20%割引

■ 原稿支給の場合は版下・フィルム製作費として 20,000 円、版下支給の場合はフィルム製作費として 5,000 円を別途申し受けます。

■ 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 FAX03-3581-6128 Eメール: hensyu@aesj.or.jp

連載
講座軽水炉プラント
—その半世紀の進化のあゆみ第9回 日本の軽水炉開発(3)
—PWRの改良標準化①

元三菱重工業(株) 北村 哲男, 三菱重工業(株) 鈴木 成光

I. はじめに

第7回講座の「軽水炉の導入(PWR)」においては、日本の原子力発電技術の草創期における海外技術の導入から国産化に至るまでの種々の取組みと技術の内容について紹介した。この時代に苦労を重ねて建設された国内のPWR型原子力発電プラント(PWR)が次々に運転を開始していくにつれ、残念なことに、機器の故障や定期検査における不具合などを次々に経験することになった。米国から導入された軽水炉は当初、“実証済み(Proven)”の技術として売り込まれたが、実際には開発途上の技術も含まれており、わが国最初のPWRの美浜1号機が1970年11月に運転を開始して1年半後の1972年6月には、蒸気発生器(SG)の伝熱管が漏洩するトラブルを経験した。その後のPWRでも各種の運転中のトラブルを経験するようになり、原子力発電プラントの信頼性が損なわれ、稼働率も大幅に低減することになった。

一方では、1973年に世界的な石油危機が発生し、わが国の経済に多大な影響を及ぼしたため、当時の通商産業省(現在の経済産業省に相当し、以下“通産省”と称する)は、国民経済の安定した発展を維持し、石油に代わるエ

LWR-Plants - Their Evolutionary Progress in the Last Half-Century—(9): Light Water Reactors Development in Japan③; Improvement Standardization Program for Light Water Reactors-PWR①: Tetsuo KITAMURA, Shigemitsu SUZUKI.

(2008年 3月19日 受理)

各回タイトル

- 第1回 原子力発電前史
- 第2回 軽水型発電炉の誕生
- 第3回 日本の研究用原子炉の始まり
- 第4回 日本の原子力発電の始まり
- 第5回 米国および日本の軽水炉の改良研究(PWR)
— Shippingportから美浜1号機まで
- 第6回 軽水炉の改良研究(BWR)
— ドレスデンから敦賀1号機まで
- 第7回 日本の軽水炉開発(1)
— 軽水炉の導入(PWR)
- 第8回 日本の軽水炉開発(2)
— 軽水炉の導入(BWR)

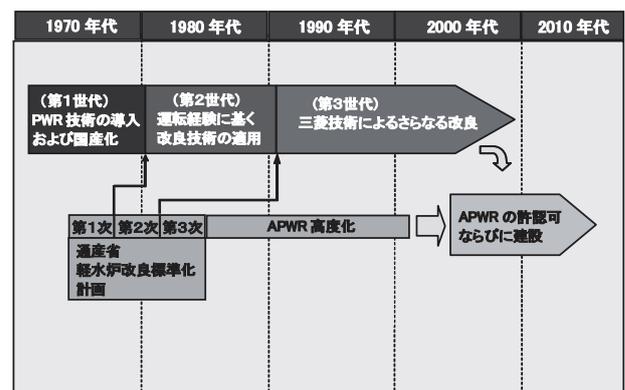
ネルギー源を確保するには、原子力発電の役割が一層重要であると認識した。そのため、通産省は1975年6月に「原子力発電設備改良標準化調査委員会」を発足させ、国産の原子力発電プラントの信頼を回復させ、原子力発電をわが国の主要電源として定着させるため、軽水炉の改良標準化計画を推進することになった。

今回の講座では、この軽水炉改良標準化計画(以下“改良標準化”と称する)に沿ったPWRの改良標準化についてメーカーの立場から紹介することにする。信頼性向上のための技術改良としてSGと燃料に焦点を当て、技術提携先のウェスチングハウス社(WH社)とも技術情報交換を行いながら、三菱の自主技術と電力会社の支援を得て改良してきた事項について述べる。その他の定期検査の効率化、プラント設計の改善、運転操作性の改善、経済性の向上などの技術改良については、第11回と第13回の講座で紹介することにする。

II. 軽水炉改良標準化計画の変遷

改良標準化は、1975年度の第1次から1985年度の第3次終了まで3段階を踏んで推進された。PWRの改良標準化の変遷を第1図に、各段階で設定された目標と主な改良策を第1表に示す。

1970年11月の美浜1号機の運転開始以降、いわゆる第1世代と呼ばれるPWRが次々に建設され、運転を開始



第1図 改良標準化の変遷(PWR)

第1表 改良標準化の流れ(PWR)

第1次改良標準化(1975年度～1977年度)	
【目標】	【主な改良策】
(1)信頼性および稼働率の向上	・燃料の曲がり軽減対策
(2)定期検査の効率化	・炉内構造物のバップルジェット対策
(3)作業性の向上と被ばくの低減	・SG伝熱管減肉腐食防止対策
	・原子炉容器蓋開閉装置の改善
	・SG伝熱管検査装置の改良
	・格納容器の内径拡大
	・主要機器の配置の改善
第2次改良標準化(1978年度～1980年度)	
【目標】	【主な改良策】
(1)機器のさらなる信頼性の向上	・SG改良(伝熱管材料、管支持板)
(2)保守点検の確実化と被ばくの低減	・原子炉容器蓋一体化構造物の開発
(3)運転操作性の改善	・ISI機器の自動化
(4)その他技術開発	・CRTによる監視表示システムの採用
	・プレレスト・コンクリート製格納容器の実用化検討
第3次改良標準化(1981年度～1985年度)	
【目標】	【主な改良策】
(1)改良型PWR(APWR)の開発	・APWRの開発設計、試験、評価
(2)定期点検の改善	・定期検査工程の総合的検討
(3)廃棄物処理設備の標準化	・ツインプラント共用範囲の見直し
(4)建設工法の改良	・格納容器大型ブロック工法と機器配管のモジュール工法の採用
(5)計装の改良と運転性の向上	・デジタル制御監視システムの採用

していった。この第1世代のPWRは、第7回講座の第2表に示すように9基のプラントがあり、通産省の改良標準化が始まった1975年の時代までに5基のPWR(美浜1号機・2号機、高浜1号機・2号機、玄海1号機)が運転を開始している。初期のPWRでは、主としてSGと燃料でトラブルを経験し、その原因究明、再現試験による確認、再発防止の対策が必要になった。これらの初期トラブルに対する徹底的な追及が、その後の技術改良と設備の信頼性向上につながった。

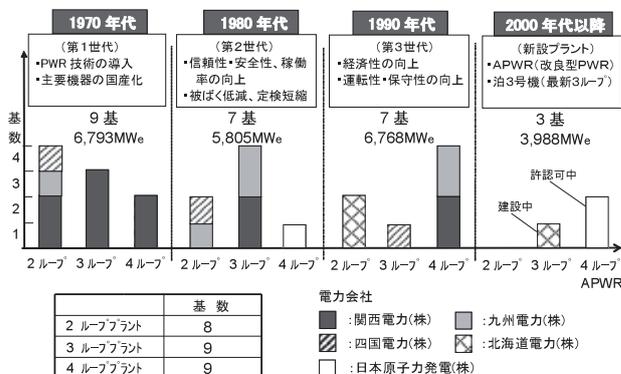
わが国の初期のPWRで経験したトラブルに対しては、通産省による改良標準化が始まる前から対処していたが、これらの技術改良の成果は1975年に始まった第1次改良標準化にも採り入れられた。第1次改良標準化の目標は、原子力発電をわが国の主要電源として定着させるため、信頼性および稼働率を向上させ、定期検査期間を短縮させ、保守・補修作業による従業員の被ばくを低減させることであった。電力会社とプラントメーカーは、これらの目標を達成するため、自主技術によるプラントの設計・建設・運転・検査のための技術の改良・改善に取り組んだ。

第2次改良標準化の目標は、第1次改良標準化の成果を基にして、機器と設備にさらに改良を加えることにより、原子力発電プラントの一層の信頼性を確保してトラブルの根絶を目指した。また同時に検査の効率化を図ることにより稼働率をさらに向上させていくこと、およびわが国の事情に合った合理的な耐震性を有するプラントに仕上げることも目標とした。従業員の被ばく低減につ

いても、第1次に引き続き積極的な改善を目指した。

第3次改良標準化の目標は、第2次改良標準化までの成果にさらなる改良を加え、併せて炉心性能の向上、システム・機器の斬新な技術の導入によるプラントの信頼性・安全性・運転操作性・経済性の飛躍的な向上を目指した改良型軽水炉プラント(APWRとABWR)を開発することであった。APWRの開発では、プラント出力の大型化によって立地効率の向上を図り、リードタイムを短縮した真の日本型PWRの確立を目指した。

これらの改良標準化の成果は、順次、建設され運転に入った第2世代(玄海2号機から敦賀2号機までの7プラント)と第3世代のPWR(泊1号機から玄海4号機までの7プラント)に採用されていった。その様子は第2図の三菱のPWR建設実績に示す通りである。



第2図 三菱のPWR建設実績

Ⅲ. 信頼性向上への取組み

1. 蒸気発生器(SG)の信頼性向上

(1) 伝熱管の減肉腐食対策

わが国のPWRで採用しているSGは、第3図に示すような縦置U字管式熱交換器であり、1次冷却ループで伝えられた炉心の熱エネルギーにより、2次側に蒸気を発生する装置である。伝熱管は約3,400本(SG型式により異なる)あり、この伝熱管の内側を1次冷却材が流れ、外側に熱を伝えて給水された水を蒸気に変換する。伝熱管はニッケル・クロム・鉄合金製で、外径約22mm、肉厚約1.3mmである。この伝熱管が破損すると放射能を含んだ1次冷却材が2次側の蒸気中に漏れ出ることになり、プラント外へ放射能が放出される可能性がある。したがって、伝熱管の腐食や割れが発生することがないようにすることが重要である。

伝熱管の材料にニッケル・クロム・鉄合金を選んだのは、PWRの開発段階で、米国のインコ社が開発したインコネル-600と呼ばれるこの合金(インコネルは商品名であるので、正式には“Alloy 600(日本語では600合金)”と称する)が当初採用していたステンレス鋼よりも耐食性が高かったためである。しかし、その後この材料も使

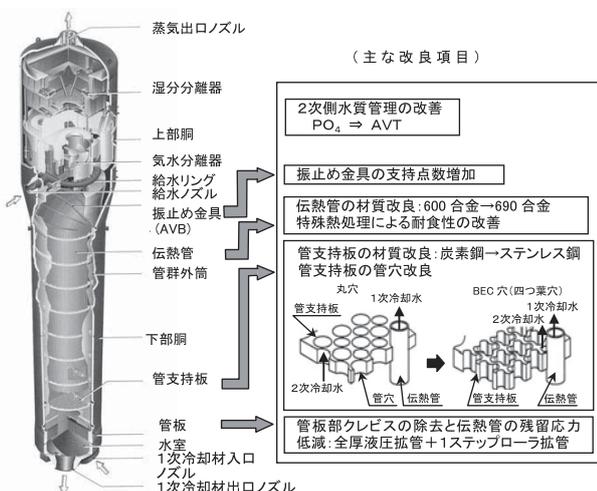
用環境によっては腐食することがわかり、さらに耐食性を高めるための熱処理方法の採用や材質変更(690合金の採用)を行っている。

初期のPWRにおける2次系水の水質管理では、2次系流路の防錆のためと、復水器からの海水の浸入に備えて、材料の腐食につながるナトリウムや塩素を駆除するために、火力発電プラントでも採用されていた“リン酸処理(あらかじめリン酸塩を注入しておく方法)”が採用されていた。これは人間が病気の予防のためにあらかじめ薬を飲んでおくようなものであるが、良かれと思って注入しておいたリン酸(PO_4)が局所的に濃縮されることによって、SGの伝熱管を減肉腐食する現象が発生した。

SGの管板の上部(2次側)には“スラッジ”(錆などの沈殿物)が堆積しやすく、その量が増えてくるとリン酸がその中で濃縮される可能性がある。また、SGの伝熱管を下部の管板に固定するのに、初期のSGの製作では、管板の各穴に伝熱管を差し込んだまま、最下部だけを拡管し溶接する方法であったため、管板の上部に近い部分では穴と伝熱管の外側との間に狭い隙間(“クレビス”と呼ばれる)ができていた。また伝熱管の直管部は管支持板に支持されているが、伝熱管との間にはクレビス部ができていた。

このようなSGのクレビス部では、2次系水に含まれるリン酸が濃縮される可能性が高い。予防薬であるはずのリン酸も濃縮されると、伝熱管を腐食させ減肉させることになる。美浜1号機のSGが漏洩を起こした原因はまさにこの現象によるものであり、このトラブルの原因究明と対策立案には、三菱重工工業(株)の設計陣と研究所を総動員して昼夜を徹して対処した。美浜1号機のSGはコンバッションエンジニアリング社(CE社)が製作したものであったが、わが国としての早急な対策を求められたため、関西電力(株)と三菱重工工業(株)の技術陣が主導的役割を果たした。

美浜1号機で発生したリン酸によるSG伝熱管の減肉



第3図 蒸気発生器の改良

腐食の問題を防ぐため、リン酸による水質管理を止め、濃縮を起こさない揮発性薬品による水質管理(AVT: All Volatile Treatment)を採用し、また、スラッジが溜りにくく、スラッジの除去がしやすい構造にし、さらにクレビス部のできないSGを製作することとした。クレビス部のできないSGにするために採った方法は、伝熱管を管板に固定するのに、管板の厚さ全体にわたって伝熱管の固定部分を拡管して伝熱管の外壁を管板の穴に密着させることや、管支持板の管穴構造を伝熱管と接触面積を小さくするように改良することであった。

(2) 伝熱管の応力腐食割れ対策

管板部の拡管には、当初ローラで行う方法を採用したが、これでは伝熱管に残留応力が発生する。高い残留応力を有する伝熱管の部分で、伝熱管の2次側における残留アルカリなどによる応力腐食割れ(SCC)や1次側純水中での応力腐食割れ(PWSCC)が発生するようになり、残留応力をできるだけ抑える必要がでてきた。このため、管板部全厚を拡管するにあたり残留応力を生じない液圧拡管方法を採用し、ローラ拡管は伝熱管の保持力を持たせるために1ステップだけ実施するようになった。また初期の型式のSGでは、管支持板における水や蒸気が通過する穴と伝熱管が通る穴が別々で、伝熱管が通る穴では狭いクレビス部で蒸発と濡れを繰り返す“dry and wet”と呼ばれる現象が発生し、アルカリや不純物が濃縮されてSCCが発生した。これを解決するため、管支持板の穴形状を“BEC(Broached Egg Crate)”と呼ばれる特殊な形(四つ葉形)に改良し、伝熱管が通る穴にも水や蒸気を一緒に通過させて、アルカリや不純物の濃縮を起こさないようにした。

(3) その他のトラブル対策

SGの伝熱管には減肉腐食やSCCのほかにも、管支持板が炭素鋼製であったために腐食生成物が発生し、丸穴形状の管支持板部で伝熱管を圧迫して伝熱管に割れを生ずる現象(“デンティング(Denting)”)と呼ばれる)が発生した。これに対しては、前項に述べた穴形状を変更するとともに、管支持板の材料をステンレス鋼に変更した。また、伝熱管上部のUバンド部が蒸気流で振動するのを抑える目的で設置している振れ止め金具(AVB)が、十分な支持をしていなかったために、伝熱管と振れ止め金具が擦れあって摩擦(“フレットイング(Fretting)摩擦”)が生じて伝熱管を傷めた経験から、AVBの材質変更や支持点数を増加することで支持状態の改善を図る設計改良を行っている。

(4) SGに関する改良開発(さらなる信頼性向上と性能向上)

伝熱管の材料については、初期のトラブル発生後、常に研究が続けられており、その時点で最良と思われた熱処理法などを採用してきたが、その後の種々の確認試験により、現時点では、690合金(600合金よりもクロムの

含有量を増やした材料)を採用するとともに、特殊な熱処理を加えた材料(“TT 690合金”と呼ばれる)を採用し、SCCに対する耐食性を高めている。また、プラントの大容量化に向けて伝熱面積を増やすため、従来よりも細径の伝熱管を稠密に配置するとともに、気水分離器や湿分分離器の性能も高めている。これらの改良を加えたSGは、新規のプラントに採用されるほか、既設プラントの予防保全のための取替えSGとしても適用されており、国内ばかりでなく海外でもその優秀さが認められ、欧州と米国に輸出されている。現在建設中の北海道電力(株)泊3号機向けSGで、通算100基の製造を達成した(第4図)。



第4図 北海道電力(株)泊3号機蒸気発生器 (当社製造の通算100基を記念して)

2. 燃料の信頼性向上

(1) 燃料棒の曲がり対策

わが国のPWRで採用されている燃料は、第5図に示すようなキャンレス型の燃料集合体である。燃料棒の配列はプラント出力によって異なり、2ループプラントは14×14、初期の3ループプラントは15×15、後続の3ループプラントと4ループプラントでは17×17である(第2表)。海外では燃料が運転中に漏洩するトラブルが少なからず発生しているが、三菱が製作した燃料は、信頼性向上に向けた設計・製造の改良や徹底した品質管理により、漏洩した事例はごくわずかであり、その他の燃料のトラブルも初期のプラントで発生したのみである。

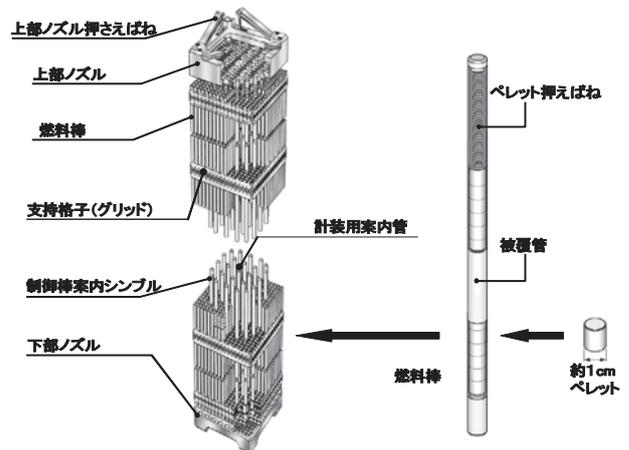
1973年、関西電力(株)の美浜2号機における第1回定期検査で、燃料棒の顕著な曲がりが見付かった。この“ボーイング(Bowing)”と呼ばれる現象は米国のPWRでも見付かっており、米国では炉心全体の健全性確保の観点から、1次冷却材喪失事故時等に燃料棒表面で生じる可能性のある“限界熱流束(DNB)”を評価することで燃料の健全性を確認することに重点が置かれたが、それに加えてわが国では、曲がりによって燃料棒同士が接触した場合の燃料棒の局所的な健全性にも考慮を払い、運転中に

燃料棒同士が接触するのを回避することにした。このため、燃料棒の曲がりを軽減することが、安全性の向上と資源の有効利用の両面から重大な課題となった。

このため発電所現地では原子炉から取り出した燃料集合体を検査して、燃料棒の曲がりの程度を調べるようになった。この検査データを基にして、運転期間、照射量等から燃料棒の曲がり予測曲線を作成し、次のサイクルで燃料棒同士の接触の可能性を評価することとした。一方で、燃料棒の曲がりを軽減する方策が検討され、燃料棒の伸びを自由にさせるために燃料棒の下端と下部ノズルの間に隙間を設ける、いわゆる“ボトムオフ”と呼ばれる方式を採用した。また、燃料集合体を構成するために設けているグリッドのスプリングが燃料棒の照射成長を拘束し、燃料棒の曲がりの原因になるため、スプリングによる燃料棒の拘束力を適正化することにした。被覆管の偏肉も燃料棒の曲げに寄与しているため、被覆管の偏肉値を厳しく管理することにした。さらに、燃料集合体のグリッドの数を増やし、グリッド間のスパン長を短くすることで燃料棒の曲がりを防ぐこととした。14×14型燃料集合体では初期の一部のプラントを除き、グリッド数を7段から8段に増加させ、17×17型燃料集合体にはグリッド数9段を採用した。

(2) 燃料の損傷対策—炉内構造物の改良

1973年の美浜1号機の定期検査で、一部の燃料の被覆管が損傷しているのが見付かった。損傷は炉心周辺部の燃料集合体のものであり、炉心槽の炉心バップル(燃料



第5図 PWRの燃料集合体の構造

第2表 PWRの燃料集合体(型式/体数)

プラントの ループ数	2ループ		3ループ		4ループ
	初期	標準化	初期	標準化	初期/標準化
定格電気出力 (MWe)	340~ 500	559~ 579	826	870~ 890	1160~ 1,180
燃料 集合体	型式 14×14		15×15	17×17	
	体数 121		157	193	
対応プラント名	美浜 1.2	玄海 1.2 伊方 1.2 泊 1.2	高浜 1.2 美浜 3	川内 1.2 高浜 3.4 伊方 3	大飯 1.2 敦賀 2 大飯 3.4 玄海 3.4

集合体を固定するための囲い；第6図参照)の微細な隙間から炉心側に流れ込む水流による影響であることが判明した。当初の設計では、炉心槽と炉心バツフルの間を1次冷却水は下向きに流れ(ダウンフロー)、炉心バツフルの外側から炉心内に水流(“バツフルジェット”と呼ぶ)が発生したためである。これを根本的に解決するには、炉心槽と炉心バツフルの間を流れる1次冷却水を、炉心内と同じ上向きに流す方式(アップフロー)にすることが必要であるが、運転中のプラントでは改造することが困難なため、当初は炉心バツフルの継ぎ目の隙間を極力なくするために工具で叩く、いわゆるピーニングという方法をとった。隙間を測定したり、ピーニングを行ったりする作業は、遠隔からの水中作業になるため、特殊な工具が考案され、それがその後のロボット技術の基礎にもなった。その後、改良標準化でアップフローの設計を採用するとともに、既設プラントについてもアップフロー化の改造工事を行った。

(3) 燃料に関する改良開発(高燃焼度燃料とMOX燃料)

改良標準化後も燃料の不具合に対する原因究明と対策を着実にやってきた結果、三菱製燃料では1991年より約13年間、燃料の漏れがまったくないという非常に良好な実績を記録した。

その後の燃料に関する改良開発としては、高燃焼度化を段階的に図ることにより取替燃料体数を削減して燃料費の低減を達成し(第7図)、現状では取出燃焼度制限を55,000 MWd/tまで伸ばした燃料が実プラントに適用されている。また、これらの燃料には、中性子経済に優れ、使用済燃料の低減にもつながるジルカロイグリッドの適用、信頼性向上のための耐食性を向上させた新合金材料の被覆管の適用、さらに異物捕捉性能を向上させた異物

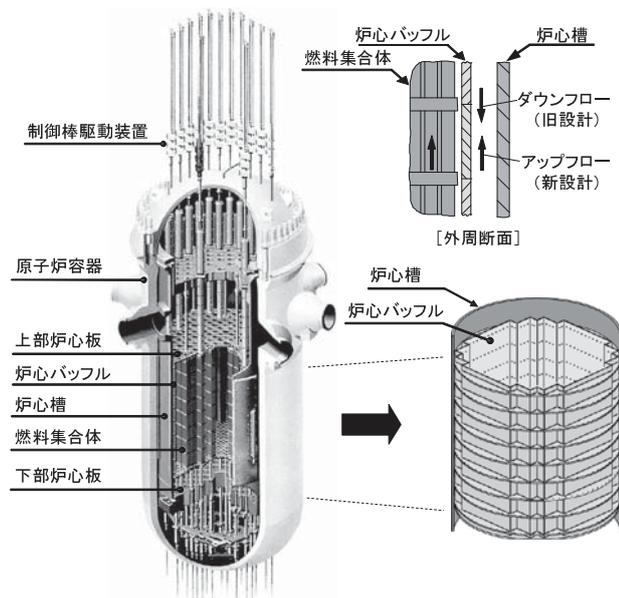
フィルタの適用などを採り入れ、信頼性と経済性の両面で優れた燃料になっている(第3表)。

今後の燃料に関する改良開発では、長サイクル運転や出力向上策に対応できる燃料や、さらなる高燃焼度化を目指した燃料の開発に取り組んでいる。このため、DNB性能の向上を図った高性能グリッドの開発や、さらなる耐食性改善を目指した燃料被覆管材料の開発を行っている。この耐食性を改善した被覆管はスペインのPWRプラントにおいて照射済であり、耐食性の大幅な改善効果が認められている。また、さらに耐食性の優れた被覆管材として、Zr-Nb系の新合金J-Alloy™の開発を国内の産業界が協力して実施しており、炉外試験およびスペインのPWRプラントにおける照射試験を実施中である。

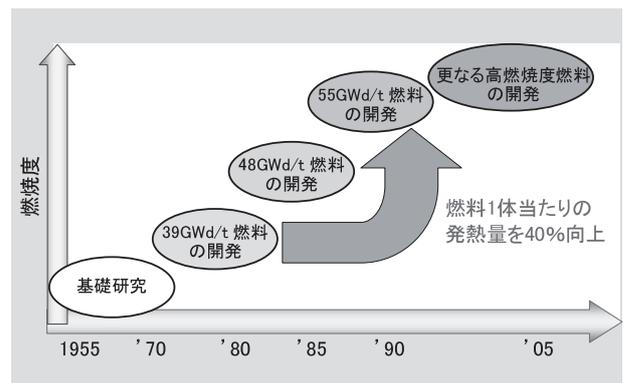
また、プルサーマルについては、海外のMOX燃料工場にて2007年より加工を開始しており、さらに、MOX燃料の高燃焼度利用に向けた照射試験も行っている。

IV. まとめ

今回の講座では改良標準化のうち、特にSGと燃料の信頼性向上に係わる取組みに焦点を当てて紹介した。このほかに、初期のプラントでは計測制御設備や特殊なポンプは輸入に頼っていたため、これらのトラブルがプラントの信頼性を損なっていた点もあり、順次、設計を改良した国産品に取り替えていった。SGと燃料の改良に加えて、計測制御設備、特殊ポンプの改良などにより、PWRの信頼性を向上させるとともに稼働率の改善につながっている。信頼性の指標であるPWRのプラント計画外停止回数は、米国に比べても、近年、良好な実績を



第6図 PWRの炉心構造



第7図 PWR燃料の高燃焼度化

第3表 55 GWd/t燃料における改良

改良開発案件	内容
ジルカロイグリッド (17×17型燃料)	グリッド材料をインコネルからジルカロイ-4に変更
耐食性を向上させた被覆管	ジルカロイ-4の合金成分を調整し、ニオブを添加したジルコニウム合金等を採用
異物フィルター	薄板を格子状に組み合わせた構造や下部ノズルの流路孔に薄板を埋め込んだ構造を採用

達成している(第8図)。

—参考文献—

- 1) 軽水炉改良標準化計画・総合資料集, 通産省・原子力発電課監修, (1985).
- 2) 三菱重工技報, 19〔6〕, (1982).
- 3) 三菱重工技報, 40〔1〕, (2003).
- 4) 荻野周雄, “三菱の原子力開発への取り組み”, 原子力eye, 2000年7月号.
- 5) 原子力施設運転管理年報(平成12~17年版), 原子力安全基盤機構, (2000-2005).
- 6) Power Reactor Status Report/Monthly Operating Report, NRC, (2000-2004).

著者紹介

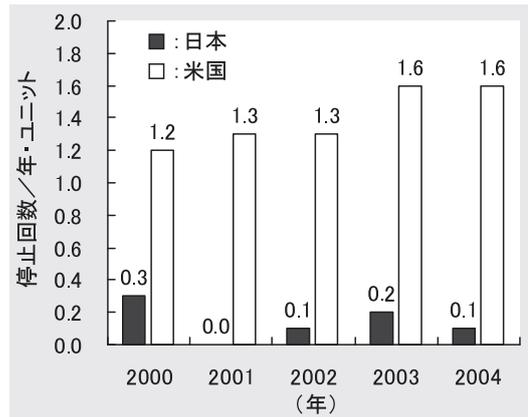
北村哲男(きたむら・てつお)



元三菱重工業(株), 元(株)エナジス
(専門分野/関心分野)原子力発電プラント
技術, 米国の原子力規制動向

鈴木成光(すずき・しげみつ)

本誌, 50〔4〕, pp.246(2008)参照。



第8図 PWRの計画外停止回数^{5,6)}



書評

放射線入門 第2版

鶴田隆雄著, 159 p. (2008.2), 通商産業研究社。
(定価1,680円) ISBN 978-4-86045-008-3 C3040

本書の第1版は2年ほど前に出版されており, この第2版ではより内容を充実したとのことである。本書は14章から構成されており, 以下のとおりである。

第1章 放射線と放射能, 第2章 原子核の壊変と放射線の発生, 第3章 放射能の減衰と半減期, 第4章 壊変系列と放射平衡, 第5章 放射線源, 第6章 放射線と物質の相互作用, 第7章 放射線の飛跡を見る, 第8章 放射線の測定, 第9章 放射線の量とその単位, 第10章 放射線の人体への影響, 第11章 放射線の被曝防止技術, 第12章 放射線防止のための法規制。第13, 14章では, 放射線を学習する際に必要な数学および物理学として, 関連のある数式や単位が, 10ページ程度にまとめられている。これに基本定数などが, 付録として添付されている。

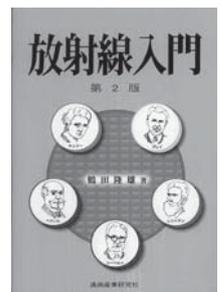
全体のページ数はそれほど多くはないが, 放射線に関する必要な事項が網羅されており, 表紙にも描かれているような

本分野で偉業を成した人たちの挿絵とともに原理や実験装置など, 多くの挿絵を用いてわかりやすく解説されている。はじめて放射線について勉強する人が, 放射線の基本的なことを学習するにはちょうど良い分量である。やさしい文章で表現されているので, 「ちょっと読んでみようかな」という気持ちにさせてくれるだろう。

また, 単に「読みやすい」だけではない。用語などは, 簡潔でありながら, 的確な言葉で表現されている。さらに, 第9章と第10章では, 昨年3月に国際放射線防護委員会で採択された2007年勧告について, いち早くその内容が盛り込まれており, 放射線防護に関する最新情報も知ることができる。これらは, 表として90年勧告と並べてまとめて記載されているので, 変更点も大変わかりやすい。

入門書としてはもちろんであるが, 放射線防護等に携わる専門家の方々が, 専門家ではない人たちや一般の人たちに説明する際に, 「どんな言葉で表現すればわかりやすくなるだろうか?」と悩んだ時, 本書を手にとって読んでいただければ大変参考になるのでないだろうか。

(藤田保健衛生大学・横山須美)



私の 主張

「原子力」は地球環境対策の決定打となり得るか トリウム熔融塩炉による増殖サイクルの提言

古川 和 男

1. はじめに

前世紀、人類は核兵器について発電用原子炉を手にした。いま地球環境対策の有効手段として見直されつつあるが、最近の IAEA 予測でも、世界の総電力中の原発分は現在の15%から2030年には13%に減るといふ。京都議定書においても、原子力は積極的に支持されていない。現在の原発技術では後述の諸困難のため、設備容量を全世界に飛躍的に増大させるのは無理である。来る洞爺湖サミットでもホスト国日本が提言できるのは主に省エネ技術であって、U-Pu サイクルの開発では、世界展開への貢献を強く提言できない現実がそれを示している。

温暖化対策は急を要し、当面あらゆる対策が総動員されるべきだが、開発途上国の急激な発展を考えると、中長期的には化石燃料依存の1次エネルギー構造からの脱却が不可欠である。期待される「太陽エネルギー依存技術」が10~20年以内に本格技術に改良できても、1次エネルギーの30~50%を占めるのは今世紀末である。したがって、基盤のある「原子力」を今世紀半ばまでに40~50%を占めるよう改善するほかに道はない。CO₂半減をいうのみでは無力である。

2. 原発産業の現状

現在の主力原発(軽水炉)は当面よく使命を果たしているが、50年前の未熟な原子力技術思想に基づいていて無理もないが、下記の諸問題を抱え、世界への大々的展開は困難なのが現実である：

- (a) 安全性不十分：余剰反応度の大きい固体燃料使用、照射損傷・材料腐食・高圧などの弱点
- (b) 核燃料サイクルの不備：増殖能力・再処理・核廃棄物・核資源問題などの困難
- (c) 核拡散・核テロ防止の困難：管理困難な Pu 問題など
- (d) 経済性の低下：上記が皆関与し、さらに低熱効率・小型化困難などの産業弱点

これらの根本原因は、「固体核燃料」と「U-Pu サイクル」への固執にある。「増殖核燃料サイクル」完成を目指したが、50年経っても実現しない。米国も GNEP 計画でそれを果たすといふ、日本やフランス政府も同調を約したが、本誌でも豊田氏などが厳しく批判[本誌, 49, 438 (2007)]を試み、その後、米科学アカデミーもその非現実性を指摘し、誰ももう「増殖」を口にしないかみえる。最近のフランスの高速原型炉計画も転換率1.0になっ

た[*Nucl. Fuels*, 31, Dec., 2007]。

3. 原発設計思想の改革

現存原発産業を維持しつつ、同時に上記諸問題を改善し、全世界に通用する「革新的原発体系」への円滑な「移行」が必須である。

それには、絶対視された過去の諸原則を改めることである：(1)固体核燃料を液体に替え、構造・運転の単純化、安全性・経済性の改良を計る。(2)U-Pu から Th-U サイクルに換え、鬼門 Pu を有効利用しつつ消滅させ、核廃棄物減少・核拡散防止に貢献させる。Th からの²³³U は実質的にガンマ線が強く、軍用にならない。(3)増殖発電炉は「理想」ではない。化石燃料からの脱却に必要な原発発電量の増殖時間は約10年であるが、核分裂反応は「発生中性子数が不足」でそのような潜在力はない¹⁾。核分裂に D/T 核融合を組み合わせた混成炉または共生炉が原理的に有望であるが、技術的・経済的に20~30年内の実現はありえない。次節の案を考えるべきである。

4. 革新的トリウム熔融塩発電炉の開発

前節の思想に基づいて具体策を40年以上探求してきたが、次のものが最適であるとの結論に達した。(詳細は文献^{2,3)}参照。IAEA: TU 2007でも発表)

その体系を「トリウム熔融塩核エネルギー協働システム：THORIMS-NES」と名づけているが、これは次の三基本原則に従う：(I)液体の熔融フッ化物塩燃料使用、(II)Th-U サイクル利用、(III)増殖機能を発電炉と分離した共生系にする。発電炉(FUJI と命名)は単純構造だが核燃料自給自足型熔融塩炉で、炉規模自由である。増殖は、ターゲット/ブランケット兼用熔融塩による核破砕反応加速器熔融塩増殖施設(AMSB)によるが、この全増殖システムを循環するのは単純な「フリーベ系熔融塩核燃料(LiF-BeF₂-ThF₄主体)一液相のみ」で、増殖サイクルを完成できる。

加速器本体以外に大きな技術課題はなく、開発体制と資金が整えば全体系の完成には25年で充分と考えられるが、核冷戦終結で事情は大きく改善された。厄介者の Pu を初期核燃料にして消滅処理を引き受ければ、当面は AMSB が不要となる。

使用済み固体核燃料からの Pu 回収は容易で、ほぼ開発済みの乾式フッ素化熔融塩法で「Pu 含有フッ化物熔融塩燃料」が準備できる。固体燃料の再生不要で「再処理問題」が解決し、FUJI-Pu 炉で Pu は有効利用/消滅でき

る。超ウラン元素を実質的に生産せず、難問の「核廃棄物」「核拡散」対策としても最良(佐藤栄作賞受賞[本誌 News, 48, 545(2006)])である。

これによれば、上記諸問題[(a)~(d)]すべてを次のように決定的に改善できる：

- a) 燃料は照射損傷なく、常圧・化学的不活性で、重大事故は原理的におきない。
- b) 消費核燃料を自給自足でき、化学処理・核消滅処理が単純化され、超ウラン元素ができず核廃棄物が激減する。
- c) 超ウラン元素(Puを含む)を消滅でき、監視検知管理容易で、核拡散抵抗性が強い。
- d) Th資源は普遍豊富で独占不能、濃縮不要、固体燃料体の製作取替え輸送不要、炉構造・運転単純で負荷追従容易、高熱効率、高温熱利用・水素製造に有利、小型化に有利、安全性高く電力需要地に近接立地可能など、で大きく経済性が向上できる。

この熔融塩炉は米国で炉技術の基盤開発を終えたが、増殖発電炉(MSBR)を目指して挫折した。われわれは、その連続化学処理・炉心黒鉛交換をやめて単純小型化し、燃料自給自足可能な理想的原発構想FUJIにまとめた。すでに、露政府は共同開発を希望し、米政府も高く評価している。ORNL, 仏EDFなども過去に共同開発を提案してきた。OECD/IAEAも合同で開発推薦を行ってくれた。チェコも全面的協力を提案している。

それは、話題になっている革新原発諸炉型のなかで、唯一実験炉段階を終えたといつてよいからでもある。日本が先導して将来の世界的な巨大平和産業に国際共同開発すべきである。

5. 研究開発の手法

すでに標準的小型原発：16万kW FUJIの概念設計を終えているが、完成にはまず“miniFUJI”：7,000kW 発電の pilot-plant を建設運転すべきである。これにより、米ORNLで4年間見事に無事故運転された実験炉(MSRE)により整えられた優れた技術基盤を、有効に復活させるのである。両者はほぼ同規模であるが、発電系

の実証まで行う。より単純化した技術復活だから開発リスクは小さく、経費はわずかでよい。国際共同により約7年後に運転開始できよう。

続いて、わずかの経費と期間(十数年)でFUJIが完成できる。(これには同じ高温融体炉である「Na高速炉」技術が大いに流用できる)『世界のエネルギー環境・貧困問題打開に役立つ最適の炉型』であるのを知っていただきたく社会人向け解説書³⁾をまとめたが、その後の進歩も含め、詳細な開発戦略ロードマップを国内外17名の同志共著で昨年のICENES, Istanbulに報告し、まもなく出版される²⁾。

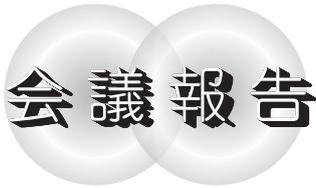
核冷戦激化で核兵器に向かない「トリウム」は教科書から消され、「液体核燃料概念」⁴⁾さえ知らない一般核専門家が增えた。しかし本方式でまずPu消滅用の小型FUJI-Pu炉を展開し、次に次第に大中小のFUJI-U 233炉に置きかえ、AMSBを加えて“新トリウム時代”を拓いてゆく。こうして現原発路線の成果を全面的に改革しながら広く世界に展開し、原発産業界そして地球の繁栄を支えたいものである。

6. 終りに

世界は環境負荷の小さい「巨大基幹エネルギー産業の出現」を熱望している。原発革新の好機である。日本にはその能力がある。自らのためにも世界を先導すべきで、特に若者たちの奮起を期待したい。(国際トリウム熔融塩研究所)

—参考文献—

- 1) A. A. Harms, M. Heindler, *Nucl. Ene. Synerg.*, Plenum, (1982); ハームズ・ハインドラー, 核エネルギー協働システム概論, 古川和男監訳, 培風館, (1986).
- 2) K. Furukawa, *et al.*, “Road Map, Th breeding fuel cycle”, *Energy Convers. Manage.* (2008), in press.
- 3) 古川和男, 「原発」革命, 文春新書, 文芸春秋社, (2001, 8).
- 4) 古川和男, 液体燃料, 「原子炉工学講座第4巻」, 培風館, p.77(1971).



高レベル放射性廃棄物の地層処分事業の推進に向けて NUMO 技術開発成果報告会

NUMO R&D Forum 2008

2008年1月17日(東京国際交流館)

原子力発電環境整備機構(NUMO)は、技術開発に対する取組み状況を広く一般の方々にご理解いただくとともに、幅広くご意見をいただくため、1月17日(木)、東京国際交流館において技術開発成果報告会を開催し、300名を超える方が参加した。

報告会は、①技術開発成果等の報告、②ポスターセッション、③基調講演、④パネル討論という4つの内容で構成された。

技術開発成果等の報告では、NUMOが主に2004年以降取り組んできた技術開発の成果と今後の技術開発の進め方等を紹介した。技術開発の全体概要の紹介に対しては、事業推進における意思決定のしくみ等について質疑がなされた。

続いて主要な技術開発分野ごとに、(a)地質環境の調査技術・評価手法、(b)処分技術・性能評価手法、(c)安全確保・信頼構築方策等に関する技術開発成果について報告した。これらに対し、沿岸部における地質環境調査のバリエーション、処分場の設計オプショ

ンの評価・判断基準、環境保全への取組み方等について会場の参加者との活発な質疑が行われた。

ロビーでのポスターセッションでは、文献調査を円滑に進めるための支援ツールの開発、地震・断層活動・火成活動に関する調査技術・評価手法の検討、要件管理基本システムの開発、設計オプションの多様性を考慮した性能評価手法の検討、具体的な設計・性能評価の試行、環境配慮や対話活動支援に関する検討など、実施主体として事業を推進する上で極めて重要なテーマに関する検討内容をポスターで紹介し、多くの参加者と意見交換がなされた。

また、チャールズ・マッコンビー博士(arius 社社長)による「日本の地層処分計画の国際的位置づけ」と題した基調講演では、地層処分事業における重要な課題として処分場の建設に必要な研究開発と処分場立地の2つに焦点が当てられた。技術開発に当たって、NUMOは日本の関係機関との連携を密接にすること、立地に関しては、

NUMOが進める公募方式は世界の最先端を行くが、正式な応募に至る前の段階で双方向の対話ステップを細かくすること、つまり応募の地域と十分なコミュニケーションをとることが重要であるとの説明があった。

パネル討論では、マッコンビー博士、大江俊昭教授(東海大学)、トーマス・アイザック氏(米国ローレンス・リバモア国立安全保障局)、マーガレット・チュー博士(元米国エネルギー省民間放射性廃棄物管理局長)、リンダ・ウォレン教授(英国アペリストウイス大学)の国内外の専門家を交えて「社会とのコミュニケーションや信頼構築に向けた技術開発」、「持続的な人材育成の必要性」をテーマとして意見を交換した。説明する人に能力・実績があること、意志決定する人が相手(例えば立地地域)のことをよく考えることが信頼構築にとって重要である。安全であることの理解を得るには、実験にて実際に見せることがよい。住民の意見が反映される研究開発プログラムの仕組み作りが大切であり、それにより信頼性が向上するなどといった議論がなされ、会場との活発な質疑も行われた。

当日の発表・配布資料の詳細については、NUMOのホームページ <http://www.numo.or.jp> の What's new で紹介している。

(原子力発電環境整備機構・土 宏之、
2008年2月25日記)



基調講演(チャールズ・マッコンビー博士)



パネル討論

08年春の年会 倫理委員会セッション

学会内における倫理活動のありかた

3月26日午後、桜の蕾が色づき始めた千里丘陵の大阪大学キャンパスの年会N会場で、「学会における倫理活動のありかた」と題して、倫理委員会企画セッションが開催された。

昨年までの、建築、食品などの偽装問題から、生命科学の分野にまで広がった不正問題、そして技術倫理、組織倫理への関心を持つ会員を中心に約40名が参加した。

今回のセッションは、倫理委員会の最近の活動を紹介すること、および他の学術研究分野における論文投稿等の研究倫理に関する不正の実態、そして国際機関における倫理に関する活動状況について、識者の見解を紹介することを目的として開催された。

座長の大場恭子氏(倫理委員会副委員長;金沢工大)の開会挨拶に続き、3件の講演が行われた。まず、班目春樹氏(倫理委員会幹事;東大)から倫理委員会の第3期の活動状況について報告があった。2007年版倫理規程の改正では、労働安全と地球環境への調和が新たに取り入れられたこと、事例集「倫理ケースブック」4,000冊を発行し完売したこと、および昨年春に明らかになった原子力発電所の過去の不正・不適切行為について倫理委員会独自の視点で評価作業を行っていること等が説明された。今年度発足した第4期の倫理委員会においても引き続きこれらの活動を進めていくことが表明された。また、倫

理委員会が過去に行った関西電力美浜3号機事故に対するフォロー状況についても説明があった。

続いて、科学界における研究倫理に早くから取り組んでおられ、多数の著書がある山崎茂明氏(愛知淑徳大)から、「近年の科学界における不正行為の現状と防止について」と題して、大学を中心とした学術研究機関における最近の不正行為の状況についての講演があった。1991年の大学設置基準の改訂に始まる大学の成果主義への転換が、研究者の不正行為への関わり方の制度的一因と考えられること、そしてこれらの不正行為を防止するため、学生や若手研究者への倫理教育が大学において必須なことが述べられた。また原子力研究では、国家のエネルギー政策や公的な視点から、誤りや不正の存在を認めるところから始め、より透明性を確保することの重要性が指摘された。

次に北村正晴氏(倫理委員長;東北大)から、海外の技術者倫理活動の一つとして、2007年11月に開催されたIAEA技術倫理専門家会議の内容が紹介された。会議はIAEAの主導で呼びかけられ、原子力施設のパフォーマンス向上のために、組織が技術倫理に関して作成すべき文書について議論がなされたこと、そして倫理規程導入を組織に納得させるためには事例集の作成等が有効であること、および安全文化と技術倫理がカバーすべき行動規範の明示化などが議論されたこと等が報告された。また、同会議に原子力学会倫理規程の英語版が議論の材料として提供されたことも紹介された。

講演の後、フロアからの質問に講演者が答える形でディスカッションが行われた。質疑応答は、不正をなくすための動機付けとしてどのような方策が考えられるか、原子力と他の学術分野との共通点、また研究費制度の現状の問題等に及び、会場の使用時間限度一杯まで活発な議論が行われた。昨年度に明らかになった電気事業者の過去の不正・不適切行為を踏まえて、技術倫理に関する社会の関心が高まっている昨今においては、本セッションの議論は会員および倫理委員会にとっても有意義な成果となった。

(原子力安全・保安院 辻 政俊, 2008年 4月10日 記)



企画セッション会場の参加者

会議報告

原子力青年ネットワーク連絡会・学生連絡会共催 「学生と若手社会人の対話 in 大阪」 高い双方向性・独自性を目指した対話

昨年(2007年)12月12日に開催した「学生と若手社会人の対話」について報告する。昨年9月の「2007年秋の大会」の際、YGNに今回の企画について意見をうかがったのがきっかけである。YGNは2006年に学生とYGNの交流会を実施していたのでスムーズに開催することができた。

対話当日は、講演者、開催大学の先生方および学生にご協力いただき、参加者にとって楽しく終えることができた。

密なコミュニケーション枠組み—学生と若手社会人の対話

本対話は、若手社会人の講演、ディスカッションおよび懇親会の3部構成である。原子力関連組織所属の社会人7名に講演いただき、学生と社会人で(実際には社会人数名と学生10数名の2班、YGNに話の皮切り役をお願い)学生の素朴な疑問、社会人から学生へのメッセージを聞いていただいた。時間が足りず、45分延長してしましたが、学生と社会人の間で円滑なコミュニケーションが実現できた。

真剣！—班分け後のディスカッション

本対話全体を通して、仕事のやりがいやどのようにして仕事を行っているのかなど就職に関する話題や、我が国における過去の原子力開発が現在の原子力にどのように生かされているのか、現場での仕事がどのように行われているのかなど、様々な話題が出た。

班分けの際、電力、メーカー、研究職の方が各班に入るようにした。そのことによって多様な観点からの問答を可能とし、白熱した。私個人は単なる就職説明会にならないか不安であった。異なる独自性を今回の対話では表すことができたと考えている。

また学生より若手社会人の発言が多かったように思われた。学生からのコメントを十分に引き出すことができたか懸念している。



有用性を示した「AESJ-NEWS」—原子力学会ニュース

対話開催呼びかけを原子力学会ニュース「AESJ-NEWS」に依頼し、功を奏した。参加者は最初、スポットを当てていた大阪大学だけではなく、近畿大学、神戸大学の学生も参加した。Webによる広報活動の有用性を明らかにできたと考えている。

白熱の議論—懇親会

その後、場所を移動し、学生、社会人合わせて21名で2時間懇親会を行った。懇親会で学生は社会人の話を熱心に聴いていた。一方、社会人は学生と対話することが楽しいようで、熱い対話を実現できた。私個人としては「盛会」になったと考えている。

今後に期待したい

今回の開催がきっかけで今後、若手社会人であるYGNおよび学生会員の組織である学生連絡会でより密接な関係を築くことを期待している。

(岡本将典(2007年度学生連絡会会長・元神戸大,
2008年 3月3日記)

さまざまな人が、いろいろな視点から語ります ■ ■ Diversity Relay Essay

「東海村の研究所から」

願

まもなく新しい年度の始まるこの時期は、昼休みに林の中を歩むと、小徑に積もった昨年の秋からの落ち葉が、足元で静かな音を立てる。そこかしこに新たな草が姿を見せ、木々の緑も柔らかな色合いになってきた。茨城県東海村にある日本原子力研究開発機構・原子力科学研究所(旧日本原子力研究所・東海研究所)の敷地は、ほぼ南北に2km東西に1kmあり、多くの研究施設が建てられているが、一部とはいえ、草木の中の散策ができる場所があるのはありがたい。

日本最初の原子炉であるJRR-1の記念展示館の碑には、「……昭和32年8月 全国民の期待と注視のなかで はじめて原子の火をともした……」と記されている。初期の頃には、大学、産業界からも多くの人々が、ここ東海村の研究所に集まり、日本の原子力研究を共に拓いていった。また、大学に転出した人たちが、産業界に戻った人たちが、重要な役割の一端を担って、今日の原子力の研究と産業の礎が築かれた。

その後、長い年月が流れて、当研究所と大学の間は緊密さを保ってきたが、将来のための研究に重きを置いてきた当研究所と、現時点で社会に役立つ仕事を主とする産業界との関係は、やや疎くなったようにも見える。

思いがけず、原子炉メーカーから、発足したばかりの日本原子力研究開発機構に移って2年半が過ぎた。設計現場で長く仕事をしてきた私にとっては、最初に入った研究部門では周りの人の多くが科学者という環境は強い刺激であり、半年前から担当することになった原子力科学研究所は前提条件などで民間の企業とは異なることが多い。今も、戸惑いと興奮は続いている。周囲の人にもおそらくは戸惑いがあるだろうが、日常の業務を実によく支えてくださる。

世界的に原子力への期待が高まる中で、原子力研究発祥の地で仕事ができることに感謝しつつ、産官学と当研究所の間で、原子力事始めの頃のように、強い連帯が進むように願っている。

次を、京都大学の佐々木隆之先生にお願いします。

小山田 修(日本原子力研究開発機構)

「コミュニケーションがつなぐ想い」

絆

ある休日、私はふらりと一軒のお店に入り、久しぶりにのんびりランチを楽しんでいました。そんな私のすぐ隣の席で、小学生くらいの女の子と両親が楽しそうに会話をしながら食事をしていました。親子は食事を終えると、「ご馳走様」と両親が挨拶。そして、お母さんは女の子にも挨拶するよう声をかけると、女の子は笑顔で、「ご馳走様でした」と挨拶をし、その親子はお店を出て行きました。お店の人も笑顔で「ありがとうございます」と親子を見送りました。見ている私も思わず笑みがこぼれ、心がホット温かくなる光景でした。

「給食は義務教育だから、給食費は払う必要がない」とか、「給食費を払っているのだから「頂きます、ご馳走様」をいうのはおかしい」なんて、ちょっと私には理解しがたい話を耳にしたことがあります。「頂きます」、「ご馳走様」は食べ物や食事を作ってくれた人への感謝の気持ちを伝える言葉であり、言葉を通じて人と人とのコミュニケーション=心の通い合いがあるのではないかと思います。そんなコミュニケーションの大切さを、いろいろな場面で感じるがあります。私は仕事柄、日々の暮らしの中ではまだまだ身近な話題としては捉えにくい放射線について話をするがあります。PA(パブリック・アクセプタンス)の業務に携わってき人とコミュニケーションをとることが多いのですが、話しかけるタイミングも大切だと実感することがあります。仕事といえども人間ですから、時には「ちょっと話しかけづらいなあ」と思うこともあります。全く初対面の人に声をかけるのは実に勇気のいることです。相手に関する情報を何一つ持たないところから、話すきっかけを作り、伝えたいことをその人に興味を持って聞いてもらえるように探っていく作業は、実に生ライブそのものです。

コミュニケーションをとる中で私が大切にしていることとして、3つの‘C’があります。Chance(機会)、Challenge(挑戦)、Continuation(継続)。一生懸命な人の言葉にはひきつけられ、また心動かされるものです。感動を共感できる人や仲間がいることの素敵な日々感謝して、コミュニケーション力に磨きをかけたいと思っています。コミュニケーションがつないでゆく、人から人への伝えたい想いをまだ私が出会ったことのない未来のこれから出会う多くの人達のために。

長須真由美(放射線計測協会)



From Editors 編集委員会からのお知らせ

○学会誌ホームページに、
解説記事、連載講座、
会議報告用の
Word テンプレートを掲載



—最近の編集委員会の話題より—
(5月9日 第11回幹事会)

— ホームページ更新情報 —

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/> (5/10 現在)

- ・学会誌ホームページに、解説記事、連載講座、会議報告用のWordテンプレートを掲載しました。記事執筆の際にご利用いただき、規定頁数に収まるよう、あらかじめ頁数の見積をお願いいたします。
(<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/atomos/index.htm>)。
- ・英文論文誌について、全通過論文に対する英文 Editorial Correction (素読校閲：主として文法上のミス of the 修正や冠詞・接続詞などのチェック) を実施中です。詳しくは、<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/publication/071001suyomikosei.html> をご覧ください。

【論文誌関係】

- ・論文誌投稿規程・手引きについて、Web を用いた審査化に伴う改定案が幹事会で検討されています。同審査システムは、現在全体的なチェックを行っており、近々運用開始の予定です。
- ・次年度編集委員については、各分野の要望を考慮し、委員案がほぼ決定しました。

【学会誌関係】

- ・洞爺湖サミットに向けての学会声明を本号に掲載しました。
- ・6月の総会で決定する新会長のインタビュー記事を8月号へ掲載予定です。
- ・原子力学会50周年記念号(2009年4月号)および通常号(2008年8月号～2009年3月号)に掲載する企画記事案の説明と記事募集の方法について議論しました。
- ・各編集グループより最近の活動状況と次年度活動計画について報告があり、次年度グループ員についても引き続き検討することとしました。
- ・お知らせ：学会誌の執筆者紹介について
(学会誌HP記事作成手順一覧、⑫執筆者の記載方法)

現在、学会誌記事のほとんどは編集委員会の企画記事で構成されています。読まれる記事を掲載するため、編集委員会として執筆はその分野の第一線で活躍されている方をお願いする一方で、若い会員が積極的に執筆できるように配慮しています。そのため、巻頭言、時論、学会員以外の著者を除いて、経歴は掲載していません。

なお、編集委員会では全記事についてWebアンケートで評価をしていますが、この結果からも、記事は内容が第一で、執筆者の経歴とは無関係であることが分ります。

編集委員会連絡先 hensyu@aesj.or.jp

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、2006年4月から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下さい。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://genshiryoku.com/enq/>)をお開きください。
- 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、要望などを記入できる画面が表示されます。ご回答はご意見のある記事のみで結構です。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。

また、個別の記事について、意見や要望を記入していただけるページも用意しております。⑤の画面で『さらに詳しく答える』を選択していただくと、記入画面が表示されます。こちらにもご回答いただければ、学会誌の方向づけに役立つことができると編集委員会では考えています。

社会との関連記事が好評

「世界にメッセージを出すべき」に共感の声(2月号の Web アンケート結果)

「原子力学会誌」2月号に対して寄せられた Web アンケートの結果をご紹介します。今回は153名の方から、回答がありました。

1. 高く評価された記事

Web アンケートでは、各記事の内容および書き方について、それぞれ5段階で評価していただいています。2月号で高く評価された記事について、「内容」、「書き方」に分けてそれぞれ上位4件をご紹介します。

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	巻頭言	地球温暖化時代の原子力	3.82
1	連載講座	軽水炉プラント—その半世紀の進化のあゆみ(5) 米国および日本の軽水炉の改良研究(PWR)— SHIPPING レポートから美浜1号機まで	3.82
3	ジャーナリストの視点	住民の安心と科学	3.80
4	インタビュー	オープンな姿勢が信頼につながる	3.73

第2表 「書き方」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (書き方)
1	Short Report	制御棒引き抜け報告会に思う	3.63
2	連載講座	軽水炉プラント—その半世紀の進化のあゆみ(5) 米国および日本の軽水炉の改良研究(PWR)— SHIPPING レポートから美浜1号機まで	3.60
3	連載講座	高速炉の変遷と現状(7) 日本の高速炉開発の歴史(II)	3.56
4	巻頭言	地球温暖化時代の原子力	3.55

今月も、先月に引き続き、巻頭言が好評でした。

2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 今月号は、原子力関係者と一般の人の考え方の違いと、その違いを埋めることのできる可能性について考えさせられる記事が多く、興味深く読めた。
- (2) 社会と原子力発電との関わりについて述べられた記事が多く、大変参考になった。
- (3) 「Short Report」に関して、予定通り運転し続けられたことを考えると、現場の判断は間違っていないと思うが、ぜひとも、「当時の現場の判断の根拠、基準」を知りたい。
- (4) 「チェルノブイリ新シェルター」の記事は、事故の概要を知っていることを前提に書かれているが、事故当時のことを全く経験していない世代を考えると、簡単な事故の概要・影響の説明を補足的に掲載しても良いのでは。
- (5) 「Web アンケート結果」に関して、評点の順位付けは、点数が近いので、あまり意味がないのではないかと。

3. 編集委員会からの回答

- (1) 上記(3)、(4)のコメントに関しては、今後、このような記事を執筆される方にご配慮願いたいと思います。
- (2) 上記(5)のコメントに関して、評点の高い順に上位4件のみを公表していますので、この4件の中では点数が近い場合もありますが、記事全体としては、評点に有意な差があり、いろいろな面で編集企画の参考としています。

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

「負の発想を変える時期」

北國新聞社 吉田 仁

2007年3月、北陸電力志賀原発1号機で発覚した臨界事故隠しは、地元石川県、志賀町の関係者にとって衝撃だった。もちろん、地元マスコミにとっても衝撃は大きく、連日のように紙面をにぎわせた。

その取材過程で、地元の住民たちに原発に対する思いを聞いたところ、要約すれば二つの言葉に収れんできたような気がする。一つは「漠然とした不安」、もう一つは「迷惑施設という意識」である。

前者の「漠然とした不安」というのは、ある住民の言葉を借りれば、こういうことである。

「原発がどんなに立派な設備でも、天災もあればヒューマンエラーもある。テロもあるかもしれない。万が一でも、原発で何かが起き、放射能が漏れれば、我々の土地が汚染され、命の危険もあるかもしれない。言いようのない不安はいくら説明されようが、頭の片隅から消えることはない」

住民でないと、本当に理解するのは難しい感覚かもしれない。この「漠然とした不安」は、完全に払拭できず、しかも手の打ちようがないだけに厄介である。

しかし、不安を和らげるヒントは、臨界事故隠しに伴う北陸電力の再発防止対策にある。多岐にわたる対策の中で、石川県など行政サイドは、原発で起きた異常事象を細大漏らさず公表する「隠さない企業風土づくり」という点を評価し、その徹底を求めている。だが、志賀町の住民たちがそれ以上に評価したのが、原子力本部の志賀町移転である。

原子力本部の移転により、志賀町には、本部長(副社長)をはじめ250人以上もの北陸電力社員が実際に住み、町民として生活を始めた。志賀町の住民からは「電力の人が地域行事に参加してくれるようになった」「朝、犬の散歩をしている本部長を見かけ、立ち話をするようになった」といった声を聞く。

北陸電力の社員が志賀町に移り住むという行為は、原発の立地地域と文字通り「運命共同体」になるということだ。まさに「地域と一体になる努力」そのものであり、そこに、住民は電力会社の誠意を感じるとともに、漠然とした不安を共有する「同志」の感情も芽生えるようなのだ。最近、企業や経済団体の取材をしていると、よく「企業市民」や「地域密着」という言葉を聞くが、その精神を体現していると言ってもいいだろう。

次に、原発は「迷惑施設という意識」だが、これは表現こそ悪いが、ゴミ処理場などと同じ認識ということだ。逆説的かもしれないが、地元で補助金もたらされるからこそ、「何かリスクがあり、その見返りが補助金だろう」という意識が働く。

だが、原発は本当に迷惑施設なのか。世界的にみると、原子力政策を取り巻く環境はここ数年で随分と変わった。二酸化炭素(CO₂)を排出しないクリーンエネルギーとして原発が再び脚光を浴び、凍結していたドイツ、イギリスなど欧州各国が、むしろ積極的に推進しようという空気になっている。

地球温暖化に伴う異常気象の弊害は、だれもが身近に実感し、だからこそ環境意識が急速に広がっている。こうした中で、原発を受け入れている地域は「我々は地球環境を守る一翼を担っている」という誇りを持ち、もっと声高に叫んでもいいはずだ。それなのに、日本では、いまだに原発は迷惑施設という意識が強く残っている。経済的な見返りを求めて原発を受け入れたというマイナスの発想ではなく、環境保護の前線施設というプラスの発想に、そろそろ転換することがあっても良いのではないかと。

だが、我々マスコミの努力不足もあるが、こうした認識は、地元住民にさほど広がっていない。原子力学会に注文をつけるなら、こうした世界の情勢、最新の情報をもっと発信してもらいたい。それも中央だけでなく、地方に対してよりきめ細かく。もちろん、その際には、できるだけ平易な言葉でお願いしたい。科学技術の本質の部分については、どうしても専門的にならざるを得ないだろう。本来、それをわかりやすく、かみ砕いて一般の人に伝えるのがマスコミの役割である。

原子力政策については、電力会社や国、県がいくら説明しようが、当事者の都合のいい解釈としか受け取れないケースが往々にしてある。だからこそ、第三者である学会やマスコミが原子力の本質、意義を伝えることが重要になってくる。原子力に対する理解を一般の人にも広げていく上で、学会がマスコミ向けにもっと情報を発信し、マスコミがそれを広く伝えていくというプラスの循環が必要ではないかと思う。それが、原発立地の地域住民らが抱く「漠然とした不安」「迷惑施設という意識」を、徐々にではあるが氷解させる鍵であろう。



吉田 仁(よしだ・ひとし)
北國新聞社 編集局経済部長

金沢市生まれ。1986年立教大学社会学部卒。北國新聞社入社後、社会部、経済部、政治部などで原子力・エネルギー問題取材。東京報道部長、社会部長を経て、2006年1月から経済部長。