

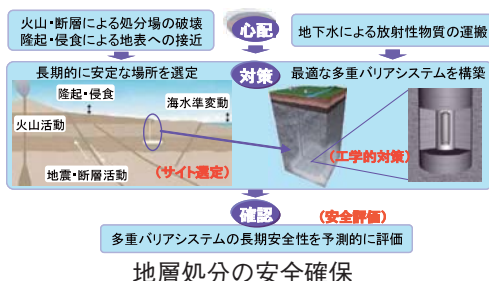
### シリーズ解説

我が国の最先端原子力研究開発

No. 9

## 15 高レベル放射性廃棄物の地層処分をめざして—トイレなきマンションから持続可能な社会へ

原子力発電により生じる高レベル放射性廃棄物は、何万年にもわたって放射能を持ち続ける。いつまでも人間が管理しておくわけにはいかない。世界は半世紀も前から、深地層への処分をめざして取り組んできた。日本は2030年代に処分を開始する計画だ。 清水和彦



### 解説

## 22 核兵器なき世界に向けて —グローバル・ゼロ軍縮会議

米国の核戦略に直接関与した元政府高官から、核兵器廃絶論が主張されるようになり、それをめざす国際会議も開かれた。その背景には、冷戦終えんと9.11事件後の安全保障環境の変化がある。 遠藤哲也

### 連載講座 軽水炉プラントの水化学(2)

## 35 水化学の基礎—腐食と電気化学

軽水炉を運転していくと、燃料被覆材や構造材と冷却材との相互作用により、腐食が進行していく。これを監視し、適切な水化学制御を実施するためには、腐食挙動を把握することが鍵となる。 原 信義

### 巻頭言

## 1 原子力は気候変動・エネルギー問題同時解決の切り札！ 柳井俊二

### 時論

## 2 日本型合意形成モデルの構築に向けて—スウェーデン・フランスにおける中立機関とその取り組み 松田美夜子

## 4 原子力政策を取り巻く現状と方向性

基幹電源の中で、CO<sub>2</sub>の排出が非常に少なくクリーンな電源は原子力だけであり、低炭素社会づくりの中核をなす。 高橋泰三

### 報告

## 26 韓国と東南アジア3カ国の原子力開発—第16回環太平洋原子力会議より

原子力開発で目覚ましい躍進を見せる韓国と、今後の導入拡大に強い関心をもつインドネシア、タイ、ベトナム。それらの国の状況を、青森で開催された環太平洋原子力会議でのまようをふまえて紹介する。 中杉秀夫, 松井一秋

## 31 原子力に対する不安とは？それにどう対処するのか—日本原子力学会シニアネットワーク連絡会シンポジウム報告

国民や社会の立場に立った視点で、不安の正体を明らかにした。これらを踏まえ教育現場やメディアには、適切に情報を提供することが必要だ。 林 勉, 金氏 顕, 石井正則

### 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(9)

## 40 壁が作る燃料をどうするのか

核融合炉では、D-T反応で発生する中性子によってトリチウムを発生させ、それをブランケット外で連続的に回収する。その増殖率を1以上にするためには、さまざまな工夫が必要となる。 深田 智, 小田卓司

### 表紙イラスト 中部電力の浜岡発電所

浜岡原子力発電所は、静岡市の南西に位置し約160万平方メートルの敷地を有する。お茶畑が広がる牧之原台地の背後に遠州灘に面した平坦な海岸地帯にある。展望室からは、豊富な緑に包まれた施設と、遠州灘を行き来する船を見ることができ、素晴らしい眺望を楽しむことができる。

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

## 解説

## 45 宇宙探査とエネルギー

—原子力エネルギー利用の歴史・現状・将来  
星野 健

宇宙開発の先進国である米国とロシアは、外惑星探査の電源などさまざまな用途に、原子力エネルギーを用いてきた。

## タイムカプセル記事

## 51 世界中で原子力が利用される未来へ

石渡祐樹

## 51 社会知識の質を上げるための責任

久郷明秀

## シニアの自論

## 52 マスコミを味方に原子力理解の促進を

小川博巳, 斎藤 修

## 53 学校教育充実への提言

浅井利治

## 談話室

## 54 高浜の温かい愛の証し

朴 榮先

## 私の主張

## 56 原子力立地地域のネットワークを!!

栗野明雄

## 会議報告

## 58 インドの聖地アラハバードの国際会議

澤田哲生

## 59 第7回核融合エネルギー連合講演会

—核融合は地球を救えるか 林 巧

## お知らせ

## 65 「2009年春の年会」の見どころ

## 訂正

前号目次に掲載したシリーズ解説「量子ビームが切り拓く未来(Ⅳ)」の紹介文に誤りがありましたので、以下の通り訂正いたします。

『光も重要な量子ビームの一つであり、今回はレーザーと放射光の利用技術開発の最前線について紹介する。』

## 6 NEWS

- IAEA 調査団、「柏崎刈羽の耐震性の高さ再確認」
- J-PARC 物質・生命科学実験施設の利用開始
- 浜岡1, 2号機を廃止し6号機新設か
- 原子力機構、「もんじゅ」の運転再開工程を見直し
- JNESが今後の安全規制とJNESの役割でシンポ
- 原産が高レベル放射性廃棄物処分でシンポ
- 原産、学生対象に原子力産業セミナー(下に写真)
- 海外ニュース



## 14 Nuclear News を見て

従来の常識を覆す機能性錯体(Pac-Man 分子)が拓く未来  
斎藤拓巳

## ジャーナリストの視点

## 62 手で触れ実感できる原子力発電を

水上 創

## 21 From Editors

## 60 新刊紹介

「原子力発電の歴史と展望」 澤田哲生

## 63 英文論文誌(Vol.46, No.3)目次,

和文論文誌(Vol.8, No.1)目次

## 70 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 新入会一覧,

平成20年度奨学生決定, 主要会務, 編集後記

## WEB アンケート

11月号のアンケート結果をお知らせします。(p.61)  
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.aesj.or.jp/atomos/>

# 原子力は気候変動・エネルギー問題 同時解決の切り札！



国際海洋法裁判所判事

柳井 俊二 (やない・しゅんじ)

東京大学法学部卒業。サンフランシスコ総領事，外務事務次官，駐米特命全権大使，中央大学法科大学院教授等を経て，現職。三菱電機取締役，外務省顧問等を兼ねる。

今日人類は地球存亡の危機に立っている。CO<sub>2</sub>等の大量排出で気候が変動し，このままでは取り返しがつかなくなる。北極の水が溶けて白熊の棲家が減り，南太平洋の島が沈没しかかるなど，海洋環境だけでも大変である。その上，中国とインドという10億を超える巨大な人口の国が高度経済成長をするという，史上はじめての事態が生じ，地球温暖化ガスの排出量はうなぎ昇りになる。石油供給の限界と長期的価格高騰は，無資源国日本にとって致命的である。

解決策として，水力，太陽光，風力，バイオ燃料等の自然エネルギーの活用が叫ばれ，そのための努力を倍化すべきことは当然であるが，それだけでは到底不十分で，根本的な解決にはならない。結論を先に言えば，温暖化ガスを排出しない原子力の活用以外に現実的な解決策はない。幸いなことに，フランスを除く先進諸国が長年にわたって原子力をなおざりにしてきた間も，我が国は技術を営々と磨き，国内的な困難にかかわらず着実に投資してきた。その結果我が国は，長年原子力から遠ざかっていた米国等の先進国との関係においても技術的な優位に立つことになった。特に，原子力ルネッサンスが国際的な流れになってきた今日，原子力の技術と経験は，我が国の貴重な資源となった。

このような中で昨年7月，洞爺湖G8サミット的首脳宣言が原子力の重要性を認め，その積極的推進を打ち出したことは画期的である。この首脳宣言は，次のことを明記している。第一に原子力を地球温暖化防止とエネルギー安全保障の不可欠の手段とみなす国が増えていること，第二に核不拡散のための保障措置(セーフガード)，原子力安全(セーフティー)及び核セキュリティの「3S」が原子力平和利用の根本原則であること，第三に日本の提案により，「3S」に立脚した原子力エネルギー基盤整備に関する国際的イニシアチブを開始すること，第四にこのプロセスにおいて国際原子力機関(IAEA)が役割を果たすこと。この「3S」は，日本のブランドである。私が座長を務めた「核不拡散問題検討会」は，昨年4月に「原子力平和利用推進と核不拡散強化のための提言—地球温暖化とエネルギー安全保障の同時解決に向けて—」を政府に提出したが，その中でも，IAEAの検証機能の強化，原子力供給グループとの連携及び核不拡散抵抗技術の開発，という3課題を掲げた。

原子力にとって順風が吹いてきたが，日本の越えるべきハードルは多い。前提条件の「3S」に関し，特に国内では，原子炉本体の安全性や災害対策の向上はもとより，周辺施設での事故防止に一層努力すべきである。些細な事故も反原子力の大合唱を引き起こす。また，原子力の弱点のひとつである放射性廃棄物処理にも一層真剣に取り組むべきである。これらの問題を解決して原子力に対する国民の信頼を回復し，原子力発電所の新設を進める必要があるが，目前の問題として，現在60%程度といわれる我が国原子力発電所の低い稼働率を上げることが急務である。我が国は，国内でこれらの施策を推進すると同時に，先進国と途上国，特に新興諸国に，優れた技術と製品を「3S」の根本原則の下で供給し，世界の気候変動・エネルギー問題の同時解決に貢献するとともに，輸出を振興すべきである。温暖化のピンチは，大きなビジネス・チャンスだ。

(2009年 1月14日 記)



## 日本型合意形成モデルの構築に向けて スウェーデン・フランスにおける中立機関と その取り組み



松田 美夜子(まつだ・みやこ)

原子力委員会 委員

奈良女子大学卒業。国の審議会の委員として、各種リサイクル法の制定に関わる。富士常葉大学環境防災学部教授を経て、07年から現職。専門は廃棄物政策・環境科学社会システム。

スウェーデンでは、いよいよ2009年秋に、高レベル放射性廃棄物の最終処分地が2自治体から1つに絞られてくる。ほぼ同じ時期、フランスではジュールの250 km<sup>2</sup> サイト適地から、建設候補地(30 km<sup>2</sup>)として3地区が決まる。両国とも政策スケジュール通り、着々と施策が推進しているように見える。なぜそのようにうまく進んでいくのか。国民との合意形成をどのように進めているのか。その最前線を把握するため2008年11月、両国を訪ねた。

### 1. スウェーデンの国民合意形成システム

この国では、5 機関 2 施設を訪問した。スウェーデンにおけるサイト選定・調査は1982年からスタートした。しかし、地元と協議することなく進められたため、1985年に住民の反対に会い、それ以来10年間計画は進まなかった。1990年代に入り、再びサイト選定を始めるにあたり、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(SKB)は、1980年代の反省から、まず市民との対話から始め、前段階の調査、本調査に進むというステップ・バイ・ステップの方針を取った。企業側だけで決めた内容を納得してもらうのではなく、市民と一緒に参加して考えてもらうという方針。自治体が専門家を雇い、勉強するための費用を原子力廃棄物基金(電気料金からの積み立て)から出すことにした。オスカーシャム自治体では、2008年は500万 SEK(約8,000万円)を基金から得ている。

今回、スウェーデンの面談者の一人、SKBの立地広報部長 Saida Engstrom さんの経歴はユニークだ。15年間、原子力発電検査機関(SKI)で規制側の仕事を経て現職。後述するフランスの情報公開に関係する2つの委員会(HCTISN と COESDIC)の海外招聘委員でもある。

Engström さんは、スウェーデンの使用済み燃料の最終処分地の選定について「1985年から1995年までの政府と企業の施策の進め方は、まさに幼稚園児の段階であった。政府は方針を示して、決定したことを伝えるだけ。これでは国民との間に対立が生まれるだけ。市民の理解を得ていくためには、透明性の確保は決定的要素。意見

は必ずしも一致しなくてもよく、継続的な取り組みで、知識をつけてもらうことが肝心。そのためには、人々の考えを受けとめ、根気よく耳を傾けていくことが大切」と語った。現場の体験を通して、スウェーデンでは情報の透明性を確保するため下記の体制が整えられていく。

### 原子力廃棄物評議会(政府が設置した中立機関)

1992年にスウェーデン政府は、学術的諮問機関として環境省に原子力廃棄物評議会を設置した。10名の委員は、技術や科学のみならず、倫理、心理学、法律、社会学などの分野の専門家から選任され、政府が任命。現在の委員長は、前オスカーシャム自治体首長。活動資金は原子力廃棄物基金より賄われており、2008年は620万 SEK(約9,900万円)。主な活動は、SKBの事業計画を独自に検討して国へ報告すること。自治体、政府機関、SKB、国会議員、環境団体との関係者間対話を進めている。決定権を持たないアドバイザー機関であるため、すべてのステークホルダーと中立の立場で対話が可能である。

### サイト選定の協議への環境 NGO の参加

スウェーデンでは、自治体を通じた形でサイト選定の協議に参加していた環境 NGO も、2004年から原子力廃棄物基金から活動資金を得て、協議に参加する資格をもつことになった。「原子力廃棄物レビュー事務局」(MKG)はその一つで、協議に参加していた NGO が共同して同年10月に設置したもの。スウェーデン自然保護協会(総会員数約18万人)も MKG に代表を送っている。スタッフは2人、アルバイト3人である。基金から年間200~250万 SEK(約3,200~4,000万円)の資金を得ている。半程度が人件費、残りが事務所費、交通費などの活動費。主な活動は、放射性廃棄物問題の公開討論会、セミナーなどに参加して発言すること。国会議員、政府機関、自治体、SKB、環境団体との対話を行い、環境 NGO の立場から政策の助言や監視をしていく役割を担っている。

## 2. フランスの国民合意形成システム

この国では6機関2施設を訪ねた。フランス政府は、1987年から4つの県で高レベル放射性廃棄物の処分地選定のための地質調査を開始した。しかし、事前の通知や協議を行わなかったため、地元の高い反対に会い、政策を白紙に戻した。その後、政府は議会科学技術選択評価委員会(OPECST)に反対運動の原因調査を委ね、OPECSTは、そのメンバーのバタイユ議員を委員長とする調査団を組織。その報告書が土台となり、公開・透明・民主的なプロセスを規定した「放射性廃棄物管理研究法」(15年の期限立法)が1991年に成立。2005年に同法に基づく管理研究方策等の評価が行われ、2006年に新しく「放射性廃棄物等管理計画法」が制定された。国民との対話は下記のシステムが整っている。

### 国家国民討論会の開催—国家科学技術選択評価委員会(OPECST)へ国家国民討論委員会(CNDP)が報告

フランス政府は、上述した2006年の新法制定に先立ち、2005年に国家公開討論会を各地で13回開催した。今回パリでお会いしたのは、この討論会で国民と直接対話をしたOPECSTの委員長 Claude Birraux氏(化学、科学博士。1978年に初当選以来約30年間国民議会議員)、国家公開討論委員会(CNDP)の委員長 Philippe Delansdes知事と同副委員長 George Mereadal氏の3名の方々である。フランスでは、社会経済、環境、交通対策など、国民生活に多大な影響を及ぼす事業には、国家国民討論会の開催が必須。OPECSTはCNDPにこの会議を付託した。

CNDPの委員は21名。委員長1名と副委員長2名は、大統領が任命。その他の委員はそれぞれの所属機関が選定。任期は5年。裁判官が4名、国民議会議員、元老院議員、州議会議長、州議会議員、県議会議長および県議会議員は各1名、市町村長および環境保護協会は各2名、消費者団体および経済界から各1名、有識者の委員から2名。CNDPの年間予算は約200万ユーロ。

CNDPはGeorge Mercadal氏を委員長とする特別委員会(CPDP)を設置して同放射性廃棄物の管理問題に関する国民対話を行った。6人の委員の専門分野は、技術・社会科学の専門家(大学教授)、保険問題・生命科学及び環境分野を専門とするジャーナリスト、マルセイユ行政裁判所名誉裁判長、化学及び放射線の専門家、核物理学の専門家(CNRS名誉研究主任)、ネットワークの調停・推進専門家である。今回の公開討論会及び展示会(見学者5.4万人)の経費は約240万ユーロ(約3.6億円)。この費用はプロジェクト推進者である政府の支出である。

半年にわたり3,000人が参加した国家国民討論会から政策者が感じたことは、「何をもって人々は国の政策を信じ、高レベル放射性廃棄物等の管理政策の安全性を信じるのか」、「どうすれば国は国民から信用してもらえるのか」である。また、討論会の目的には「100年間の再取

り出しの可能性の意味合いを国民と検討すること」も含まれていた。CNDPとCPDPの共同報告書でひときわ目立つ記述があるのでここに記す。

「1950～1960年は、専門家は高い位置にあり、その言葉は福音を告げる言葉として使われた。しかし、現在では、これらはすべて対話を通して行われ、決定するのは市民である。」

2006年に成立した関連法を見ると、国家国民討論会の結果が法律に反映されたことがわかる。再取り出しの条件に関する立法予告を盛り込み、従来より設置されていた放射性廃棄物管理に関する研究開発等の進捗評価を行う国家評価委員会(CNE)に加えて、情報の公開・透明性をめざす新たな中立機関の制定が明記されたのである。

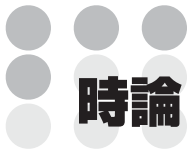
### 原子力安全の情報と透明性に関する高等委員会(HCTISN)—独立した中立機関

2006年の放射性廃棄物等管理計画法と同時期に制定された原子力安全・情報開示法は、HCTISNが原子力に関する情報の提供を行うとともに、政策の透明性を監視し、放射性廃棄物等の持続可能な管理に関する協議や討議を定期的に行うことを規定している。この委員会は2008年2月に発足。委員構成は、元老院議員、国民議会議員、地域情報委員会代表、環境保護団体代表、原子力施設操業者、事業者代表者、科学技術・社会科学等の専門家(OPECST議員から3名の選出)など。今回お会いしたClaude Gagnol委員は原子力発電所立地県出身の議員であり、現在OPECSTの副委員長という要職にある。地元での経験から、国民全体が原子力について正しく理解していくために、この委員会の必要性を特に感じていると語った。

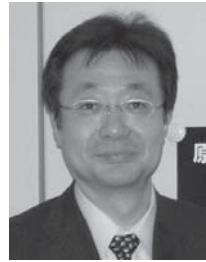
### 情報公開活動の評価とフォローアップを行う委員会(COESDIC)—実施事業者も中立機関を設置

フランスは、2013年に国家国民討論会を再び開催する。それに備えて処分事業の実施主体ANDRAは、情報公開活動の評価とフォローアップを行う委員会(COESDIC)を2007年に設置した。委員は5人、うち外国人の1人は、スウェーデンSKBのSaida Engstromさんである。社会学等の専門家による国際的な委員会である。

両国は、廃棄物処理サイト選定に1980年代に失敗し、その後この問題を解決するために、いろいろの施策を講じて、今やっとサイト選定のゴール直前に達した。「どうすれば国民は国を信用してくれるか」。両国は、国民の声を受けとめる中立機関を設立し、「透明性」を確保した。わが国でもこの言葉はよく使われているが、実際にそれを実現していく社会システムはまだない。日本型の合意形成システムはいかにすべきか。共に考えていきたい。(2009年1月23日記)



## 原子力政策を取り巻く現状と方向性



高橋 泰三(たかはし・たいぞう)

経済産業省資源エネルギー庁  
電力・ガス事業部原子力政策課  
東京大学法学部卒、原子力安全・保安院政  
策企画官、中小企業庁事業環境部財務課  
長、経済産業大臣秘書官、製造産業局産業  
機械課長などを経て、平成19年7月より現  
職。

世界的にエネルギーと地球環境問題に大きな関心が集まっている。昨年、世界は史上例を見ない原油価格の乱高下を経験した。今年になっても、欧州における天然ガス供給で様々な動きが生じている。資源を巡る国際情勢は大きな構造変化の時代を迎えていると言えよう。また、地球温暖化問題への対応も重要な課題となっている。

これらの一体的な解決を図り、資源・環境制約に屈しない強靱な経済構造を築き上げるため、「低炭素社会」の実現を目指す必要があるが、それには原子力発電が必要不可欠だ。基幹電源の中で、CO<sub>2</sub>の排出が非常に少なくクリーンな電源は原子力だけであり、低炭素社会づくりの中核をなす。以下、この原子力を取り巻く現状と政策の方向性について述べたい。

### 原子力を取り巻く現状

原子力を巡る構造的な変化がある。80年代までは、原子炉メーカーが数多くあったが、その後、スリーマイル島、チェルノブイリの事故を経験し、世界の新規建設は低迷した。一方、日本は歯を食いしばって新規建設を続けてきた。その結果、原子炉メーカーの再編が進み、東芝は米・WHを買収し、日立と米・GEはそれぞれ協力を強化し、三菱重工は仏・アレバと中型炉の共同開発をする一方、大型炉では競合する関係となった。ロシアは、政府主導でアトムエネルギープロムという、原子力発電所のみならず、ウラン鉱山、濃縮、再処理、核燃料加工を含めた垂直統合企業を設立し戦略的に原子力産業を育てている。この数グループが戦略的に競争と連携をしながら、グローバルな商戦に挑んでいく構図となっている。

原子力は、非常に長期的な計画と、巨大な初期投資が必要となる。また、核不拡散、原子炉の安全確保が前提であるため、政策の国際協調も非常に重要である。

ここで、各国の原子力を取り巻く現状を紹介しておく。米国は、104基と世界一原子力発電所を多く有する国だが、30年間新規着工がない。30基以上の新規建設計画・構想が発表され、建設許可申請も盛んだ。今一番の課題は巨額の建設資金調達だ。このため、建設コストの8割を上限にエネルギー省(DOE)が債務保証する制度に注目が集まっている。すでに申込みが始まっているが、金融危機が建設計画に与える影響を注視する必要がある。

あろう。

フランスは原子力に積極的で、国内電力供給の8割を原子力発電が担う。アレバは政府と一体となって世界市場の獲得を目指している。フィンランドでは現在新規建設中で、イギリスも新規建設へ政策を変更した。

中国は野心的な計画を有している。現在の11基、900万kWを、2020年までに7,000万kWにするとの報道もある。

インドも、エネルギー需要急増で大型の原子力発電所を作りたく、各国からの協力を欲している。原子力供給国グループ(NSG)での合意を受け、フランスを筆頭にインドへの協力合戦の様相を呈している状況だ。

日本は唯一の被爆国で、NPT非加盟のインドへの協力には慎重なスタンスである。他方で、日本の技術力を交渉の武器とし、インドに核不拡散の取組を強化するよう要求する、あるいはCO<sub>2</sub>の排出削減のコミットメントをさせるなどの日本型外交もあり得るが、難しい舵取りだ。

ロシアは、ウラン濃縮容量も大きく、日本にとって重要性が高い国で、官民含めて今後の協力関係が非常に重要になろう。

アジアでは、インドネシア、ベトナムが新規導入予定で、ベトナムではフィージビリティスタディの受注を日本が官民一体となってねらっている。この両国とは政府ベースでも原子力協力の覚書を結んでいる。

### 原子力政策の方向性

我が国の原子力政策の基本的な考え方は、(1)2030年以降も発電量の3割から4割を原子力発電所が担う、(2)使用済燃料を再処理し、プルトニウムを活用する核燃料サイクルを進める、(3)高速増殖炉の実用化を目指す、この3つである。2006年にまとめた「原子力立国計画」に基づき、具体的な施策を進めている。以下簡単に紹介する。

#### (新・増設の着実な実現、既設炉の有効活用)

現在、我が国では、3基が建設中で、10基の建設計画がある。原発は計画から操業に至るまで相当の時間を要する上、初期投資も多大となり、一時的に財務上重荷となる。特に、リプレースが本格化すると、初期投資負担と廃炉費用負担が相当重畳する可能性がある。

制度上の各種手当てを順次措置してきたが、中長期的

な事業環境整備に資する更なる取組の必要性について、事業者の取組も注視しつつ継続的な検討が必要である。

直近の取り組むべき課題は、既設炉の有効活用だ。設備利用率が欧米に比して低迷しており、2008年は中越沖地震による柏崎刈羽発電所の長期停止の影響もあって58%にまで低下した。我が国では、設備利用率を1%向上させるとCO<sub>2</sub>排出削減量は約300万トンとの試算もあり、早期の改善が必要である。既設炉の有効活用の観点から、欧米各国ですでに十分な実績がある出力向上も今後重要であろう。いずれも安全確保が大前提であり、安全で信頼性のある安定運転の実績を積み重ねていくことが何より重要である。

#### (ウラン資源確保)

世界的な原子力導入拡大の中で、核燃料の安定的な確保も大きな課題である。具体的には、ウラン資源や濃縮役務、さらにはその輸送ルートについて戦略的に手を打っていく必要がある。例えば、カザフスタンは豊富なウラン資源をただ売るのではなく、技術協力を取り付け、原子力産業を戦略的に育てようとしている。こうした国との関係は官民が連携しオールジャパンとして対応していくことが重要だ。

#### (核燃料サイクル)

核燃料サイクルは原子力政策の柱である。使用済燃料を再処理し、取り出したプルトニウムを、既存の原子力発電所で使う「プルサーマル計画」を進めている。将来的には高速増殖炉サイクルが有力な選択肢と言える。

高速増殖炉の原型炉「もんじゅ」は、運転再開に向けたプラント確認試験が進められており、補修改良や運営管理機能の強化などハード・ソフト両面にわたる所要の措置を確実に実施して、早期の運転再開を期待したい。

そして、高速増殖炉サイクル実用化に向けた研究開発を、関係者と緊密に連携しつつ、日本の総力を結集して着実に進めていく。また、我が国の実証炉計画を核とする互恵関係を根ざした国際協力を活用していく。

ウラン濃縮については、2010年度末から、開発中の新型の遠心分離機を導入していく。将来的には日本国内の需要の3割をまかなう予定だ。

青森県六ヶ所村の再処理施設が試験運転の最終段階である。世界を見回しても、非核兵器国で、再処理施設を有するのは日本だけで、平和利用の努力を積み重ねている証であると言えよう。六ヶ所再処理施設の次の第二再処理施設も検討の準備を進めているところだ。

この一連の核燃料サイクルを確立することが、将来の日本のエネルギー安全保障のために不可欠である。

#### (原子力産業の国際展開、導入国支援)

2030年頃には既設炉のリプレース需要が本格化すると見込まれるが、それまでの間、支援産業を含めた我が国原子力産業の人材や技術の厚みを維持・涵養することが課題である。そのためには積極的な国際展開を図ってい

くことが必要であり、世界標準を獲得し得る次世代軽水炉の開発を官民一体となってスタートした。我が国原子力産業の総力を結集し、その強みが国全体で最大限に活かされるよう推進していく必要がある。また、海外での原子力施設建設などの思い切った事業展開を推進していくためにも、原子力に係る技術に加え、マネジメント能力等のスキルを備えた優れた人材が必要となっている。このため、産官学の連携の下、大学・大学院等が行う原子力協力や基盤技術分野の研究活動を支援している。原子力を支える現場技能者についても、立地地域での雇用が進むよう、地域での研修を支援しているところである。

原子力先進国の我が国には、新規導入予定国から協力の期待が非常に高いものの、すべてに対応することは物理的に困難である。そこで、国際原子力機関(IAEA)に日本が通常予算とは別に予算を拠出し、IAEAから導入国へ専門家を派遣する制度を創設した。この事業を担当する職員をIAEAに派遣したところであり、日本の貢献が、世界的に評価をされていくことが重要である。

中国に対しては、安全規制等の研修を実施している。中国で原子力発電所事故が起こると、日本に影響が大きいので、可能な限り協力をを行っている。

ロシアは前述のとおり、潜在的には非常に戦略的に重要な国であり、今後様々な面で協力を進めていく。

#### (核不拡散への貢献)

世界的な原子力の平和利用の拡大と濃縮等の機微な技術の拡散を防止することの両立も大きな課題だ。下手をすれば日本の核燃料サイクル政策に海外から厳しい目を向けられかねない。新規導入国に燃料を供給する「核燃料供給保証構想」が議論されており、我が国は積極的に貢献していくことが重要だ。

#### (国民の理解増進、広聴・広報)

国内政策を進める上では、立地地域との対話が非常に重要である。国民理解、地元の理解が、原子力を進める上で非常に重要であり、地域振興や、地元説明会の実施などを今後も積み重ねていく。

#### (高レベル放射性廃棄物処分)

高レベル放射性廃棄物の処分も解決すべき課題だ。まずは、その土地の適正を調べる文献調査を進めていく必要がある。市町村に対して公募しているが、応募を待っているだけではなく、国から申し入れることも含め、文献調査を進めるべく努めていく。

以上、原子力政策の現状と方向性について述べてきた。原子力は、長期的な視点に立って、研究開発を進め、その成果を実施主体である民間電力会社に、橋渡しをしていくことが重要である。

開発のための開発となっては誰も使えない。研究者、電力、メーカー、政府といった多くの関係者が連携し進めていくというのが基本である。そして国がまず第一歩を踏み出すという姿勢で臨みたい。(2009年 1月9日記)



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

## IAEA 調査団、「柏崎刈羽の耐震性の高さ再確認」

IAEA(国際原子力機関)の柏崎刈羽原子力発電所の第2次フォローアップ調査団が2008年11月30日に来日、12月1日から5日までの日程で保安院との意見交換や現地視察を行った。5日に調査を終えた同調査団のA・ゴドイ団長は、同日の会見で、「柏崎刈羽の安全性の高さを再確認した」などと述べた。ゴドイ団長は「調査の成果に大変満足している」とした上で、今回は評価が進んでいる7号機を中心に調査したとし、「1年前の調査報告でも示したが、柏崎刈羽は地震に対し、安全性が高いレベルだったとい

うことを再度確認した」と述べた。新しい基準地震動の評価や補強工事等も調査しており、報告書は1か月程度以内に取りまとめる。

同調査団は、A・ゴドイ IAEA 原子力施設安全部技術安全課長代行を団長とする10名で、保安院からの要請で3回目の調査となった。12月1日から3日までと5日に保安院と意見交換、4日に現地視察を行った。同視察は断層などのグループと所内施設の改良工事などのグループに分かれ実施した。

(資料提供：日本原子力産業協会)

## J-PARC 物質・生命科学実験施設の利用がスタート

日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構が、平成13年度から茨城県東海村に建設を進めてきた大強度陽子加速器研究施設(J-PARC)の中核である物質・生命科学実験施設(MLF)がこのほど完成し、12月16日にMLF・いばらき量子ビーム研究センター・東海村研究交流プラザの合同記念式典が行われた。MLFは12月23日から利用開始、ナノテク・新材料・ライフサイエンスなど広い分野で技術開発の飛躍が期待される。

記念式典には、坂田東一・文部科学審議官、岡崎俊雄・原子力機構理事長、永宮正治・J-PARC センター長、橋本昌・茨城県知事ら約250人が出席。岡崎理事長は、「国内外から多数の研究者がこの世界最先端の施設を利用し、人類の発展に貢献する世界的研究成果が生み出されることを念願してやまない」と挨拶した。

23日から利用を開始したのは、最終的に合計23種類を設置する予定の中性子実験装置のうちの7装置および同じく4種類のミュオン実験装置のうちの1

装置。7装置のうちの2つは、茨城県が設置したタンパク質構造解析装置と材料構造解析装置で、北海道大学などが革新的原子炉用核データ研究用の中性子核反応測定装置、原子力機構と高エネ機構が高温超電導を解明する装置、超高分解能粉末中性子回折装置、工学材料回折装置などを設置している。

今年度の課題はミュオン8課題を含む合計98、平成21年2月末までは24時間運転する。

いばらき量子ビーム研究センターは、茨城県がMLFの産業利用促進などを目的に、12月1日に開設した施設。J-PARC センター、茨城大学、物質・材料研究機構、中性子産業利用協議会、東海村が多目的ホールなどを設置する東海村研究交流プラザ、東大大学院原子力専攻などが入る。

J-PARCは12月から50GeV シンクロトロン of 加速実験を開始、ハドロン実験施設は平成21年2月から、ニュートリノ実験施設も同4月から運転開始の予定。

(同)

## 浜岡 1, 2 号機を廃止し 6 号機新設か、中部電力が検討を表明

中部電力は平成20年12月15日、浜岡原子力発電所

1, 2 号機を廃炉とし、6 号機を新設する計画を検



討していることを明らかにした。最終判断していないが、経済性など総合的に検討中としている。

これは1, 2号機で耐震裕度向上工事を実施すると多額の費用が必要で、運転開始から30年を経過したことを考慮すれば、様々な観点から検討の必要があるとの判断による。すでに3~5号機では開放基盤表面で約1,000ガルの耐震裕度向上工事を実施し運転中だが、1基当たり数十億から100億円程度か

かった。

同社はこの件が12月13日に報道されたことから、15日に静岡県、御前崎市に対し、「検討しているが、具体的内容は答えられる段階になく、決定したら速やかにお伝えしたい」と説明した。静岡県の石川嘉延知事は16日の定例会見で同計画について、「検討に値するのではないか」と述べた。(同)

## 原子力機構、「もんじゅ」の運転再開工程を見直し

日本原子力研究開発機構は、高速増殖原型炉「もんじゅ」について、長期間停止している機器・設備



高速増殖原型炉「もんじゅ」

全体の健全性確認を行うプラント確認試験を実施しているが、平成20年9月に屋外排気ダクトの腐食孔が見つかったため、その状況調査および原因調査を実施、再発防止策を検討し、これらの結果を取りまとめ、平成21年1月9日、原子力安全・保安院および地元自治体に報告した。この屋外排気ダクトは安全上重要な設備であり、平成21年5月末を目途に補修を行うこととし、合わせて本年2月を予定していた性能試験開始(運転再開)を見直すこととした。今後の性能試験に係る工程は、関係省庁とも十分に協議した上で定めていく。

(参考：[http://www.jaea.go.jp/04/turuga/monju\\_site/index.html](http://www.jaea.go.jp/04/turuga/monju_site/index.html))

(資料提供：日本原子力研究開発機構)

## JNES が「2008シンポジウム—今後の安全規制と JNES の役割」を開催

原子力安全基盤機構(JNES)は平成20年12月18日、東京・有楽町の朝日ホールにおいて、「JNES 2008シンポジウム—今後の安全規制と JNES の役割」を開催した。地方自治体や電気事業者、原子力関係の研究機関、メディアなどから約500人を超える参加があった。

シンポジウムでは、成合英樹理事長が「JNES 設立5年を経て」と題し、JNES の5年間の活動成果と今後の展望について説明し、引き続き「新検査制度」、「安全評価技術」、「基準の整備」というテーマごとに、原子力安全・保安院(NISA)の前川之則氏並びに JNES 各部より発表を行った。

パネル討論では、東北大名誉教授の北村正晴氏を

コーディネーターに、「今後の JNES に期待すること」と題し、NISA の福島章氏、電事連の辻倉米蔵氏、東大の班目春樹氏、社会安全研究所の首藤由紀氏、JNES から曾我部捷洋理事がパネリストとして参加し、新検査制度導入に向けた JNES の役割、技術専門家集団としての説明責任、原子力界での人材確保や技術継承など個別分野での議論の後、規制機関である NISA の技術支援機関(TSO)としての JNES のあるべき方向性や、求められる役割などについて積極的な議論が交わされた。

(参考：[http://www.jnes.go.jp/event/symposium\\_08/index.html](http://www.jnes.go.jp/event/symposium_08/index.html))

(資料提供：原子力安全基盤機構)



## 原産協会が高レベル放射性廃棄物処分でシンポジウム

日本原子力産業協会は平成20年12月9日、当協会の地方組織とともに国立がんセンター国際研究交流会館国際会議場にて、「高レベル放射性廃棄物処分シンポジウム—他施設から学ぶNIMBYからPIMBYへの転換」を開催した。本シンポジウムは、高レベル放射性廃棄物と同様に立地が難しいと考えられるPCB処理施設や産業廃棄物処分場の取組みの経験から学ぶという、新しい視点での議論を通して、今後の取組みの促進に資することを目的に開催したもので、関係者を中心に約160名が参加した。

今回は基調講演に、行政の立場から長年にわたりPCB廃棄物をはじめとする産業廃棄物やリサイクル問題に取り組んできた前環境省廃棄物・リサイクル対策部長の由田秀人氏、そして長野県の産業廃棄物処分場計画をめぐり、徹底した情報公開と住民参

加のもと、合意形成に尽力した東京工業大学教授の原科幸彦氏を迎えた。

続くパネルディスカッションでは、東北大学の青木先生、読売新聞の井川論説委員、中国新聞の宮田編集委員、そして大阪大学の八木先生が参加、元日本経済新聞社論説委員の鳥井議長が基調講演に対しての各パネリストの感想を踏まえて論点を抽出。地域が誇りを持って誘致できる仕組や環境整備のあり方等を中心に議論が行われた。地層処分においても戦略的段階における住民参加による検討会や全国知事会で処分問題を議論してもらう必要性が指摘されたほか、国やNUMOにおいてキーマンとなる人材育成の重要性等について、会場からの質疑も交えて活発な議論が行われた。

(資料提供：日本原子力産業協会)

## 原産協会が学生対象に「原子力産業セミナー2010」

原産協会は、平成20年12月13日に新宿エルタワー30階サンスカイルームで「原子力産業セミナー2010」を開催した(写真)。本セミナーは、学生向けに原子力産業のPRと、学生と企業の就職採用活動支援を

目的に開催している。第3回目となる今回は、45社の原子力に関わる企業・機関が参加。また当日は、前回は大きく上回る510名の学生が来場した(前回は約240名)。



会場では、参加企業・機関による採用活動ブースの出展、原子力産業を紹介するための原子炉や燃料棒模型の展示、原子力関連パフレットの配布などが実施された。来場学生と各企業・機関担当者との間

では、活発なコミュニケーションが行われていた。多くの学生に原子力産業に興味を持ってもらう良い機会となった。

◇ ◇ ◇

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

12月～1月の番組は以下の通り。

- ・「気候変動国際シンポジウム」「高レベル放射性廃棄物シンポジウム」レポート(平成20年12/22公開)
- ・「原子力新年の集い、原子力産業セミナー2010」(平成21年1月16日公開)

(同)

## 海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[欧州]

### 欧州委、原子力安全規制で EU 指令案を承認、EU レベルで域内の原子力安全確保へ

欧州連合(EU)の行政執行機関である欧州委員会(EC)は08年11月26日、加盟国における原子力発電所の安全性について規制枠組みの設定を提案する新たな EU 指令案を承認した。

EU 域内の原子力安全指令策定は、EU 加盟国の一般市民が域内で稼働する原子力発電所の安全な操業を欧州全体で規制するよう求めている声に応えたもの。加盟各国の規制当局の役割を強化しつつ、原子力安全に関する基本的な義務事項や一般的な原則を規定する内容になっており、最終的に欧州理事会で採択されれば、共通の安全要求項目と枠組み基準が EU レベルの規制として加盟各国の原子力安全システムに組み込まれ、要請に応じてさらに厳格な規則を盛り込む権利も保持されることになる。

原子力発電所事故の影響が国境を越えるリスクはよく知られているが、これまでのところ加盟国間における安全基準の標準化レベルは限られている。指令案では各国による安全性の改善努力を一層支援していくため、EU レベルでの統一規則が盛り込まれ

る予定。一般的な観点からの目的は、原子力の安全性を達成、維持し、さらなる改善を図るとともに、これを域内で規制すること。一方、指令案は安全性の確保はあくまでも各国の責任であり、EU における補完性の原理は遵守される内容となっており、各国の安全規制機関の役割、およびそれらが職務を遂行する上での独立性強化をも目指すとしている。

適用範囲は原子力施設の設計から、立地、建設、操業、補修、廃止措置に至るまでの全般的で、それらの安全確保を規制上および法的な枠組みにより各国に義務付けることになる。当然、各国が原子力を利用する、あるいはエネルギー供給構造に加えない権利は全面的に尊重される内容だ。

EU における原子力安全指令案は04年9月に最初に欧州理事会に上程されたが、発効には至らなかった。EC は今回の提案では、「原子力の安全に関する条約」および国際原子力機関の安全原則に基づいて内容を修正したとしており、この分野の専門家である欧州原子力規制当局(ENSREG)の上級者グループが規制当局者との協力活動の中心的役割を担い、特に新規原子炉の安全性要求項目の改善に貢献することになると強調している。

EC の計画では09年中にも指令案を発効させ、その後、2年以内に加盟各国の国内法に適用させていくとしている。

## 仏・アレバ・グループ、英国市場に らみ事業インフラ整備で2社と協定

フランスのアレバ・グループは08年12月4日、英国で今後20年間に建設される原子炉としてEPR(欧州加圧水型炉)を効率的に納入することを目指した産業行動計画を早急に策定し、これを実行に移すため、英国のロールス・ロイス社、およびロンドンに拠点を置く国際的なエンジニアリング・建設サービス・グループであるバルフォア・ピーティ社と産業パートナーシップ協定を結ぶことになったと発表した。最大で25GWとも予想される大規模な新規原子炉市場を前に、原子力ビジネスのための環境整備はいよいよ本格化の様相を呈してきた。

この行動計画の概要として、アレバ社は次のような点を挙げている。すなわち、(1)英国の2社とエンジニアリング、製造、および建設分野をカバーする協力で了解覚書(MOU)を締結する、(2)英国への多数のEPR納入を実現するため、英国の産業景観や技術力および資源を英国の2社とともに確認し、必要であれば技術力向上プログラムを策定する、(3)これらの取組みが画期的な節目となり、EPR納入計画を確実なものとする重要な進展が1年以内に見られるはず——などだ。

アレバ社はすでに08年4月、ドイツのE.ON社およびシーメンス社とも英国における160万kW級EPRの建設とさらなる原子力技術協力で同意書を締結。現在、E.ON社がアレバ社のEPR技術とシーメンス社のタービン発電機器技術により、英国に拠点を置いてEPRの立地を支援する共同スタッフ・チームの創設を進めており、英国で少なくとも2基のEPR建設を狙うとしている。

また、フランス電力(EDF)とのパートナーシップでは、EPRの包括的設計審査(GDA)手続きを実施。英国の特定のサイトにEPRの建設を申請する前に英国原子力規制当局による事前審査を受けるため、EPR設計の詳細情報を当局に提出済みとなっている。

アレバNP社のL・ウルセル社長によると、英国の新規原子炉計画は20~25GWの規模に達すると見込まれるという。同社長は「だからこそ、英国におけるEPR計画実現のために適切な人材、技術、そ

して産業インフラが確保できるような産業景観を今、構築し始める必要があるのだ」と述べ、今回の提携の意義を強調した。

一方、バルフォア・ピーティ社は、英国のサイズウェルBやハンターストンおよびトーンズ原子力発電所などの土木建築、機械・電気エンジニアリング、および建設工事に携わるなど、原子力関係の事業で過去50年間の実績がある。同社は早ければ2013年にも英国のサイトでEPRの建設を開始できると予測しており、アレバ社とともに効果的なサプライ・チェーンを整備できれば、今後25年間にわたって1万~1万5,000人分の雇用が維持されると見込んでいることを明らかにした。同社はまた、アレバ社との提携のほかに、フランスの建設会社であるVINCI建設とも50対50の比率で合弁企業を設立しており、英国でのEPR建設計画に対してプロジェクト管理や建設、土木エンジニアリング・インフラの面で支援が可能との見方を示している。

### [英国]

## 英国の鋳鍛造品製造企業、米市場 から鋳造品受注

英国の大型鋳鍛造品製造会社であるシェフィールド・フォージマスターズ・インターナショナル社(SFIL)は08年11月25日、米国の民生用原子力発電市場から初めて鋳造品の製造を受注したと発表した。

同社が獲得したのは米国の大手機器メーカーであるカーチス・ライトEMD社の発注による契約で、ウェスチングハウス社(WH)のAP1000に組み込まれるステンレス製原子炉冷却ポンプの第1ステージ鋳造品を16個製造するというもの。これらは現在、米国のプログレス・エナジー社がノースカロライナ州で計画しているシアロン・ハリス原子力発電所2,3号機、およびサウスカロライナ・エレクトリック&ガス社がサウスカロライナ州で計画しているVCサマー発電所2,3号機用の機器になる予定だ。

SFILの説明によると、同社はすでに、中国浙江省と山東省で建設されている三門原子力発電所(AP1000×2基)および海陽発電所(AP1000×2基)用のポンプ鋳造品19個の製造をカーチス・ライト社から

請け負っており、今回の契約はこの中国向け契約の延長で獲得したものの。中国向けの鋳造品製造が終わった段階で、10年から米国向け製品の製造を英国シェフィールドにあるブライトサイド・レーン工場を開始するとしている。

SFIL では、「AP1000用鋳造品の製造に成功したことにより、当社は米国の民生用原子力市場に初めて参入することができた。これこそ、北米および西欧における原子力カルネッサンスのスタート地点だ」とコメント。今回の受注が同社にとって非常に名誉なことであるとの見解を明らかにした。

### [スイス] 大手電力2社、リプレース炉建設で 包括認可申請

スイスの最大手電力会社である AXPO グループと BKW-FMB エネルギー社は08年12月4日、ベツナウ原子力発電所1, 2号機およびミューレベルク原子力発電所の3基のリプレース炉として、2基の原子炉を建設するための包括的な認可申請をスイス連邦エネルギー庁に提出したと発表した。

これら2サイトの原子炉は2020年頃に運転寿命を迎えるほか、フランスからの電力購入契約も2018年以降、徐々に期限切れとなる。スイスでは原子力で総電力需要量の4割を賄っており、両社は国内の将来の電力供給を確保するため、2020年以降の運転開始を念頭にリプレース炉の建設を決めたとしている。

具体的な炉型および原子炉メーカーなどの詳細は建設認可の申請段階で決定することになるが、両社は世界的に認知された技術を有するメーカーを1社選択し、出力は最大160万kWで全く同一の設計を想定。冷却塔は近代的なハイブリッド型を採用するという点で合意に達しており、温排水によって近隣河川に影響を及ぼすことが少なく、高さが従来型より低いいため周辺の景観を損なわず、蒸気が大量に立ち上ることもないという。

これら2基の建設計画は今後、地元および近隣の州政府や近隣諸国などから承認を得るため審査を受けることになるが、最終判断が下るまでには、この後、連邦参事会(内閣)と議会、国民投票により承認を得なければならない。現段階で両社は2012年～13

年頃に国民投票にかけたい考えたが、包括的な認可が下りた後は、さらに建設と操業についても所定の認可手続きを踏むことになっている。

スイスでは08年6月、電力会社である ATEL 社の子会社(ニーダーアムト社)がゲスゲン原子力発電所の隣接サイトに新規原子炉を建設する申請を政府に提出しており、今回の2基と合わせて合計3基の申請について審査が行われる見込み。これらの計画が認められれば、同国で約30年ぶりの新規原子炉建設に向けて動き出すことになる。

### [ヨルダン] ヨルダンと中国、原子力関係の協力 文書に署名

ヨルダン・ハシミテ王国政府関係の通信社によると、ヨルダンと中国は08年11月24日、ヨルダン首相府で原子力分野における両国間の協力に関する2種類の合意文書に署名した。

一つは中国がヨルダンに原子力関連の訓練システムを供給するための協定で、中国はこのほか、ヨルダンで原子力関係のエンジニアや専門家を育成するための訓練研究所をヨルダン科学技術大学内に設立する支援を行う。

もう一つは、08年8月に両国が調印した原子力協力協定案の実施議定書に相当するもの。ここでは、ヨルダン国内におけるウラン鉱採掘や人材育成、研究活動、研究炉の建設および発電炉の建設相談などに対する中国の協力内容がカバーされているとしている。

調印式には、ヨルダンの N・ザハビー首相兼国防大臣と中国の賈慶林・全国人民政治協商会議(CPPCC)主席が出席した。

### 韓国とヨルダン、原子力平和利用で 協定締結

韓国大統領府は08年12月1日、同国を訪れていたヨルダンのアブドラ2世国王が同国の李明博大統領と会談し、両国が原子力平和利用分野で協力協定を締結したと発表した。

これはヨルダン国内での原子力発電所建設も含め、同国経済および地域開発のための国家的な大型

インフラ整備プロジェクトの一環として結ばれたもの。他の中東諸国と異なり天然資源に乏しいヨルダンは、2040年までに国内の電力需要の3割までを原子力発電で賄うことを計画しており、アブドラ国王は専門的知見や技術で世界的に認知されている韓国企業が多数、このプロジェクトに参加してくれることを期待すると述べた。

なお、原子力分野の協力ではこの協定のほかに、韓国電力(KEPCO)とヨルダン原子力委員会(JAEC)が両者の今後の協力に関する了解覚書に調印している。

### [インド]

## ロシアとインド、原子炉と燃料の供給で協定 原子力貿易の関係強化

インドを公式訪問していたロシアのD・メドベージェフ大統領は08年12月5日、ニューデリーで同国のM・シン首相との会談後に声明を発表し、両国がインドの民生用原子力発電所の増設で新たな協力協定を締結したことを明らかにした。また、両国首脳の間で合意を受けて、ロシアの原子燃料企業であるТВЕЛ社は同日、インドの民生用原子力発電所向けに7億ドル相当の原子燃料を供給することでインド原子力発電公社(NPCIL)と議定書に調印した。

ロシア大統領府の発表によると、今回、両国政府が協力文書を取り交わした分野は宇宙開発や情報技術、軍事技術、バイオテクノロジーなど多岐にわたったが、その中でもエネルギー分野における協力関係の強化は最も優先順位が高いものの一つ。メドベージェフ大統領は具体的な成果として、インドのクダンクラム原子力発電所にロシア製の原子炉を2基増設することで協力協定の調印に至ったとしている。

インド半島最南端のタミル・ナードゥ州に立地するクダンクラム発電所では、2002年からすでにロシアのアトムストロイエクスポート社が主契約者となって、受動的安全性を備えた第3世代のVVER 1000(100万kW級のロシア型PWR)を1,2号機として建設中。インドへの原子力輸出が禁止されたのは1998年だが、これら2基の建設はそれ以前の旧ソ連時代に合意済みだったことから、輸出禁止の対象となっていなかった。

昨年2月に両国政府は同発電所に新たにVVER

を4基、共同建設することで合意文書案を作成。9月にはこの計画を進展させる条件の一つであった原子力供給国グループ(NSG)によるインドへの原子力機器の禁輸解除が実現したことなどから、両国間の民生用原子力協力も本格的に拡大することとなった。

実際の署名を行ったロシア原子力総合企業であるロスアトム社のS・キリエンコ総裁によると、クダンクラム・サイトでは7,8号機まで建設する可能性があるものの、現段階ではまだ確定していないという。それよりもインドのその他の原子力サイトでもロシア型原子炉を導入することになったことや、インドへの原子燃料供給で議定書に調印したことが重要との見解を表明した。

ТВЕЛ社は、燃料不足のために稼働率が50%を少し超える程度にとどまっているインドのタラプール原子力発電所(16万kWのBWR2基, 54万kWの重水炉2基)に酸化ウランペレットを供給するほか、重水炉が稼働するその他の発電所や、クダンクラム発電所が完成した際には同発電所にも燃料を供給する予定だ。

### [米国]

## DOE 長官、ユッカマウンテンで処分量の上限撤廃を勧告

米エネルギー省(DOE)のS・ポドマン長官は08年12月9日、「エネルギー省長官による第2処分場の必要性に関する大統領および議会に対する報告書」をG・ブッシュ大統領と連邦議会に提出し、国内の高レベル放射性廃棄物(HLW)および使用済み燃料(SF)の処分について、「ユッカマウンテン処分場の受入れ上限を撤廃し、第2処分場の建設について早急に検討を開始すべきだ」と勧告した。

これは米国の「放射性廃棄物政策法(NWPA)」の第161条に基づいて行われたもので、同長官は、「07年1月以降10年1月までに、第2処分場の必要性について大統領および連邦議会に報告する」よう義務付けられていた。

NWPAはまた、米国初のSFおよびHLWの処分場サイトとして議会と大統領が特定したネバダ州ユッカマウンテンについて、法定処分制限量を重金属換算で7万メトリックトン(MTHM)と定めてお

り、この制限は第2処分場が操業するまで有効としている。同長官の報告書は、米国で稼働する民生用原子力発電所からのSNが現在5万8,000MTHM貯蔵されており、今後も年率2,000MTHMで増加していくこと、および連邦政府からの軍事用SFが1万2,800MTHM存在すると明記。これらの総量はすでに、処分場の制限量7万MTHMを超えていることから、考えられる選択肢は次の3つであると指摘した。すなわち、(1)受入れ制限を撤廃して、すべてのSFとHLWをユッカマウンテンに処分、(2)第2処分場の建設手続きを出来るだけ早急に開始、(3)決定を保留し、SFとHLWはそれらを発生したそれぞれの敷地内に貯蔵しておく——である。

同報告書は、この処分制限量はもとより、ユッカマウンテンに関する技術的な考察に基づいたものではなく、複数の調査が「同処分場の設計であれば今の制限量の3倍以上の廃棄物を受け入れられるよう拡張が可能」と指摘している点に言及。そうなれば、既存の原子炉からのSFはもちろん、それらすべての運転寿命が60年まで認可延長されたとしても十分受入れ可能な容量となる。

ただし、今後、原子炉の基数が増えた場合は、やはり拡張したユッカマウンテンを超える第2処分場が必要になる可能性は否定できない。このため、DOE長官としては、「議会が早急に法的措置によってユッカマウンテンの制限量7万MTHMを撤廃し、それによって第2処分場に関する評価作業などに猶予期間が設けられるよう勧告する。この期間中に、第2処分場でどの程度の追加容量が必要であるかや、SFのリサイクルが適当か否か、あるいは追

加のSFに対してどのような管理方法が最も適切であるか、などの検討が可能になる」としている。

## オバマ次期大統領、DOE長官に物理学者のチュー氏指名

米国のB・オバマ次期大統領は08年12月15日、09年1月に発足する民主党新政権のエネルギー省(DOE)長官としてローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)のスティーブン・チュー所長を指名したと発表した。

カリフォルニア大バークレー校の物理学教授でもあるチュー所長は、レーザー光で原子を極低温に冷却・捕獲する方法の研究で1997年にノーベル物理学賞を受賞。78年から87年までAT&Tベル研究所の研究スタッフとして勤務した後、04年までスタンフォード大の応用物理学部で教授を務めた。その後、気候変動問題に関する造詣を深め、LBNLに入所。同研究所を代替・再生可能エネルギー研究の世界的な中心機関とすべく牽引していた。

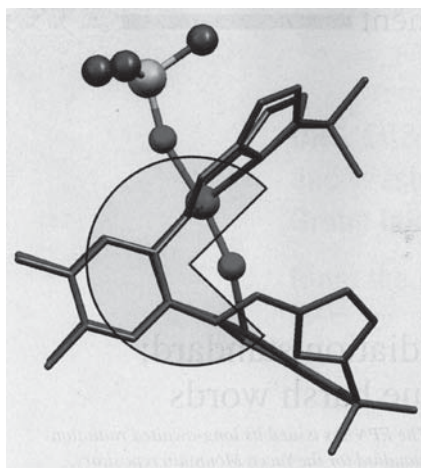
原子力発電について同氏は、過去のインタビューで「米国のエネルギー供給構成要素とすることに異論はない」とする一方、廃棄物の処分関連では「監視に要する期間を千年レベルまで減じることができれば、ユッカマウンテンは必要ない」と答えたとも伝えられている。

チュー氏の指名に関する声明の中でオバマ次期大統領は、「新政権が科学を重んじ、事実に基づいた判断を下すというメッセージだ」と強調している。

### 従来の常識を覆す機能性錯体(Pac-Man 分子)が拓く未来

金属イオンが示す多様な結合を積極的に利用した機能性金属錯体は、生体内のタンパク質活性中心としての役割に加え、今や、触媒、医薬等の様々な工業分野で利用されている。Nuclear News(以下、NN)2008年11月号で紹介されている"Pac-Man"分子も、特異な構造と反応性を有するそのような機能性錯体の一例といえる。エジンバラ大学の Jason Love と Polly Arnold が率いる研究グループによって合成されたその分子は、2つの環状配位子が単純な有機骨格でつながった"口"のような構造を有しており、その見た目が1980年代に流行したビデオゲーム"パックマン"に似ている(?)ことから、"Pac-Man"配位子と呼ばれている。そのキャッチーなニックネームとは裏腹に、"Pac-Man"配位子は高度に設計された配位子であり、特に、6価ウラン(ウラニル,  $UO_2^{2+}$ )を"上顎"に取り込んだその分子は、ウラニルの一方の酸素が"口"の中に留まり、もう一方の酸素が頭から突き出した構造をとる<sup>1)</sup>。さらに、"下顎"の環状配位子部位に他の金属イオンを配位させると、"口"の中のウラニル酸素との相互作用により、ウラニル結合全体が乱され、その結果、もう一方の酸素にルイス酸触媒としての活性を与えることが可能となる。実際、同研究グループは、嫌気性雰囲気において、金属イオンとしてカリウムを用いることで、"Pac-Man"配位子に取り込まれたウラニルがVI価からV価に還元され、一方のウラニル酸素を選択的にケイ素化することに成功している<sup>2)</sup>。

ウランからプルトニウムまでのアクチニド元素が高酸



Pac-Man 配位子

化数状態をとるジオキソ錯体( $AnO_2^{x+}$ ;  $An=U, Np, Pu$ ;  $x=1$  or  $2$ )の  $An=O$  結合は、 $An$  の f 軌道と  $O$  の p 軌道の混成による三重結合であり、一般的に、不活性と考えられている。ところが、Jason Love と Polly Arnold のグループは、ウラニル酸素の選択的な機能化に成功した。これは、従来、不活性と考えられてきた常識を覆す画期的なものであり、今後、様々な触媒としての利用が期待される。また、ウラン V 価に限られた条件でしか単離されていない非常に不安定な中間体であり、"Pac-Man"配位子が、その特異な配位環境により、この  $U(V)$  を安定化していることも注目値する。

NN 編集局とのインタビューの中で触れられているが、掲載記事のタイトル(The "Pac-Man" molecule and its potential link to nuclear waste cleanup)で謳われているような放射性廃棄物処分への直接的な貢献を"Pac-Man"配位子に期待することは時期尚早であろう。むしろ、上で述べた機能化された  $U=O$  結合を用いた触媒としての利用や"Pac-Man"配位子に取り込まれたウラニルを通じた  $An=O$  結合の性質の理解やアクチニド元素の還元メカニズムの理解への役割の方が期待できる。特に、後者は、放射性廃棄物の地層処分において、深部地下の還元的環境がアクチニド元素の移行を抑制し、バリアとして機能することを考えると重要なものである。また、鉱物や微生物によるアクチニド元素の還元メカニズムを理解し、地表付近の酸化性環境により可溶・可動化したアクチニド元素の再固定化という積極的な環境修復の可能性を考える上で有用なものである。そして、なによりも、不活性だと考えられてきたウラニル酸素に機能性を持たせようとした常識に捕らわれない姿勢は、同じ研究者として学ぶべきものである。同グループは、今後、ネプツニウムやプルトニウムへも研究を展開する予定であり、今後の成果が期待される。

(東京大学・斉藤拓巳, 2008年 12月20日 記)

#### —参考文献—

- 1) P. L. Arnold, D. Patel, A. J. Blake, C. Wilson, J. B. Love, *J. Am. Chem. Soc.* **128**, 9610 (2006).
- 2) P. L. Arnold, D. Patel, C. Wilson, J. B. Love, *Nature*, **451**, 315-U 3 (2008).



## 我が国の最先端原子力研究開発

## シリーズ解説 第9回

高レベル放射性廃棄物の地層処分をめざして  
トイレなきマンションから持続可能な社会へ

日本原子力研究開発機構 清水 和彦

原子力発電に伴って発生する高レベル放射性廃棄物は、何万年にもわたって放射能を持ち続ける。いつまでも人間が管理しておくわけにはいかない。「トイレなきマンション」と揶揄されるが、世界は半世紀も前から、深地層への埋設処分をめざして取り組んできた。日本でも1976年から研究開発を進めている。その成果を取りまとめた2000年レポートにより、日本における地層処分の成立性が確認され、日本の地層処分は事業段階に踏み出した。2002年から実施主体である原子力発電環境整備機構(NUMO)が候補地を募集しているが、まだ調査に入った地域はない。世界を見ても、高レベル放射性廃棄物の処分を開始した国はなく、計画の遅延や見直しを余儀なくされている国も少なくない。日本では、2030年代中頃に地層処分を開始する計画であり、まだ25～30年の猶予がある。ただし、そこに到達するためには、いまから候補地を確保し、段階的な調査に基づく意思決定のプロセスをたどっていく必要がある。正念場を迎えた日本の地層処分事業を推進していくため、国、NUMO、電気事業者が取り組みを強化している。研究開発が果たすべき役割も大きい。

## I. 高レベル放射性廃棄物の地層処分

原子力発電から発生する高レベル放射性廃棄物は、発生した直後の放射能レベルが高く、そのあとも長く放射能が持続する。そのため、何万年という超長期にわたって人間の生活環境から隔離しておく必要がある。その方法として、海洋底や南極氷床、宇宙への処分なども検討されたが、いまでは深地層への埋設処分(地層処分)が最も現実的な方法と考えられており、原子力発電を進める世界の各国が、その実現に向けて取り組んでいる。

## 1. 高レベル放射性廃棄物とは？

日本では、エネルギー資源を有効活用するため、原子力発電で使い終わった使用済み燃料を再処理し、使い残しのウランや新たに生成されるプルトニウムを回収してリサイクルする方針である。このリサイクルの過程で、放射能レベルの高い廃液(高レベル放射性廃液)が発生する。これを、ガラス原料に混ぜて高温で溶かし合わせた

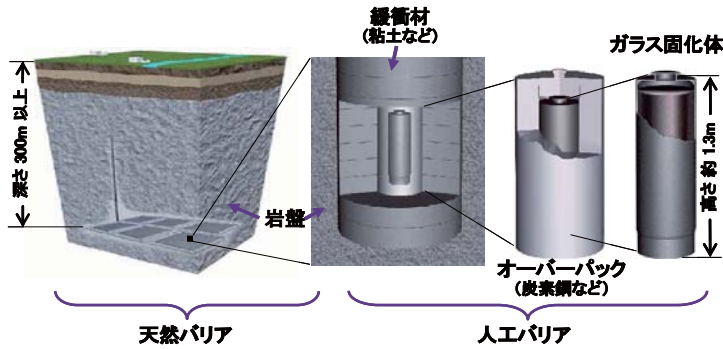
*Toward Implementing the Final Disposal of High-level Radioactive Waste : Kazuhiko SHIMIZU.*

(2009年 1月15日 受理)

うえで、ステンレス容器に流し込んで固める。これにより、高レベル放射性廃液は、物理的・化学的に安定なガラス固化体となる。直径約40 cm、高さ約130 cm、重さは約500 kgである。日本で高レベル放射性廃棄物といえば、このガラス固化体をさす(第1図)。

製造直後のガラス固化体は放射能が強く、人間が近寄れない状態であるが、時間の経過とともに放射能は減衰していく。千年後には製造直後の3千分の1くらいになり、さらに数万年経過すると、ウラン鉱床として自然界にあったときのレベルまで下がる(ガラス固化体1個分の放射能レベルが、そのもとになった燃料の製造に使われたウラン鉱石全量の放射能レベルと同程度となる)。

製造直後のガラス固化体は放射能とともに発熱量も高いので、30年から50年程度、地上で保管して冷ました後に地層処分する。現在、日本国内に保管されているガラス固化体は約1,600本(2008年4月末現在)であるが、すでに発生している使用済み燃料(ガラス固化体約2万本分に相当)と今後の原子力発電によって発生する使用済み燃料を足し合わせると、2021年頃にはガラス固化体に換算して約4万本となる見込みである。この4万本のガラス固化体をひとつの処分場に地層処分する計画であり、そのためには、地下に10 km<sup>2</sup>程度の広さの処分場が



第1図 地層処分システム

**天然の岩盤(天然バリア)と多層の人工バリアを組み合わせさせた多重バリアシステム**

多重バリアシステム { 人工バリア { ガラス固化体  
オーバーパック  
緩衝材 }  
天然バリア

- ガラス固化体**: 高レベル放射性廃液をガラス原料と高温で混ぜ合わせてステンレス容器の中で固めたもの。放射性物質をガラスと一体化して閉じ込める。
- オーバーパック**: ガラス固化体を封入する厚い金属製の容器。地下水とガラス固化体の接触を遮断する。
- 緩衝材**: オーバーパックを包み込んで岩盤との隙間をふさぐ粘土。地下水および放射性物質の移動を抑制する。力学的・化学的な緩衝機能を果たす。
- 天然バリア**: 天然の岩盤。拡散や吸着などにより地下水による放射性物質の移動を抑制する。金属の腐食や物質の溶解が起こり難い還元環境を提供する。

必要となる。

2. 地層処分とは？

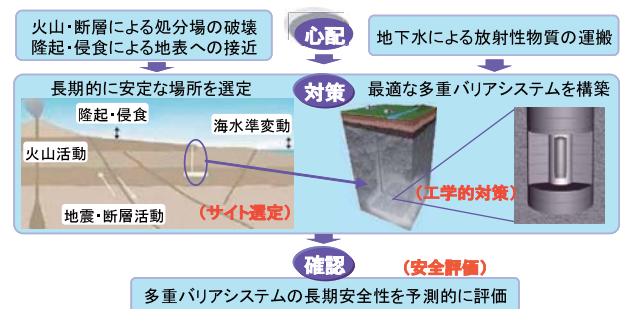
(1) 地層処分の方法

地上での保管が終了したガラス固化体は処分場に運ばれ、地下300 m よりも深い岩盤の中に地層処分される。まず、ガラス固化体をオーバーパックという厚さ20 cm ほどの金属製の容器の中に封入する。その回りを、さらに厚さ70 cm 程度の粘土を主成分とする緩衝材で包み込むようにして、岩盤の空洞の中に埋める。ガラス、金属、粘土からなる三重の工学的なバリア(人工バリア)と天然の岩盤(天然バリア)を組み合わせさせた多重バリアシステムによって、放射能を閉じ込め、人間の生活環境から隔離するのである(第1図)。

(2) 地層処分の安全確保

地層処分されるガラス固化体中の放射性物質は、色ガラスの色の成分のように、ガラスの分子構造の中に取り込まれており、ガラス自体が地下水に溶けない限り放射性物質が漏れ出すことはない。さらに、ガラス固化体は金属容器の中に封入されており、これが健全である限り、地下水がガラス固化体と接触することすらない。このような多重バリアシステムの構造に照らせば、地層処分の安全性は、長期にわたり「受動的に」維持されると思える。

しかし、地層処分に求められるのは、ガラス固化体中の放射能が十分に減衰するまでの、何万年という超長期にわたる安全性である。このような時間スケールにおいては、いずれ地下水がガラス固化体と接触し、ガラスとともに放射性物質が地下水に溶けて人間の生活環境に運ばれてくるのではないかと、火山や断層などの天然現象によって、処分場が破壊されたり、隔離したガラス固化体が地表に出てきたりするのではないかと、こんな心配が生まれる。そのため、地層処分においては、まず、天然現象による大きな影響を被らない安定な場所を選んだうえで、その場所の条件に応じた最適な多重バリアシステムを構築するという対策がとられる。そして、それらの対策によって、十分な安全性が確保できるかどうかを



第2図 地層処分の安全確保

安全評価によって確認する(第2図)。

安全評価の方法については次項で述べるが、地層処分では、一般の原子力施設のように実験的なプラントや試験運転などによって、システムの安全性を実証するといった方法はとれない。それに代わる方法が、地層処分システムの安全評価である。地層処分というシステムは本来的に、超長期の「時間」と天然の岩盤という不均質な「空間」に起因する不確実性を内包している。そんな目に見えない不確実性をとらえて、定量化して見せることが、安全評価の究極的な課題といえる。

(3) 地層処分の安全評価

地層処分の安全評価は、シナリオ、モデル、データによって構成される。まず、「もし処分場でこんなことが起こったらどうなるのか?」といった心配をすべて挙げて、筋道立てて記述する(この筋道がシナリオである)。そして、そのシナリオが起こったとしたら、どの程度の影響があり得るのかを、モデルとデータを用いたシミュレーションによって評価する。地下水の動き方や熱の伝わり方などの現象を表す理論的なモデルと、実験や調査で得られる実際のデータを使って、処分場の時間的な変化やそれに伴う放射性物質の動きなどをシミュレーションするのである。このシミュレーションは、将来の姿をいい当てるものではなく、あくまでも安全性を評価するための判断材料である。時間スケールと空間スケールにかかわる様々な不確実性を考慮し、その不確実性の幅を理にかなった範囲に限定することによって、導かれる結果を示すものである。結果だけで判断するのではない。

シナリオに漏れはないか？ モデルやデータは十分に信頼できるか？ 結果を導くに至った考え方やプロセスなど、すべてを総合的にみて、「不確実性を考慮しても、安全性に十分な余裕が見込めるか？」を判断するのである。

## Ⅱ. 地層処分をめざして半世紀

高レベル放射性廃棄物の問題は、原子力発電の恩恵を受けている私たちの世代が解決すべきであり、後世に「つけをまわす」べきではない。これが、国際的なコンセンサスである。その対策として、高レベル放射性廃棄物を地下深くに埋設して隔離するという地層処分の方法が提案されたのは、1950年代である。この方法は、海洋底、南極氷床、宇宙などへの処分に比べて、①自国内で実施できる、②必要な場合には回収できる、③現在の技術レベルで対応できる、といった点で実現性の高い方法として世界に受け入れられた。1960年代から70年代にかけて、原子力発電を進める欧米の各国が、地層処分をめざした研究開発に乗り出した。日本がその一員となったのは1976年である。

### 1. 世界の動き

1960年代から70年代にかけて、欧米の各国が鉱山の地下坑道などを利用して、地層処分の研究開発を開始した。とくに、1977年にスウェーデンのストリーパ鉱山で始まった、OECD/NEA(経済協力開発機構/原子力機関)による国際ストリーパ・プロジェクトには、欧米の主要国が参加して、地質環境データの取得や調査技術の開発などに取り組んだ。試行錯誤から始まった地層処分での初めての国際プロジェクトは、参加各国に技術開発の基盤とともに大きな自信をもたらした。

1980年代には、ストリーパ・プロジェクトの経験を踏まえて、スウェーデンのほか、米国、ドイツ、スイス、カナダ、ベルギーなどが、専用の地下研究所を建設し、あるいは鉱山やトンネルなどを活用して、自前の研究開発を本格化していった。そして、地層処分の実現性は、研究者の確信へと高まっていった。1980年代後半から90年代にかけて、地層処分の事業化に向けた各国の動きは活発化し、IAEA(国際原子力機関)による安全規制の基本原則や基準の整備などが進められた。

しかし、技術の進歩とは裏腹に、地層処分の実施に向けた各国の動きは、社会の合意が十分でないという現実の前で、足踏みを余儀なくされた。20世紀半ばから、研究者たちが真剣に取り組んできた科学技術的なアプローチは、社会との接点で行き詰り、21世紀に向けて、技術的な安全から、社会的な安心と受容をめざす新たなフェーズへと転換していった。

社会の受容を促すには、各国それぞれの活動が重要と

なるが、国際的に認知された考え方に、「段階的アプローチ」がある。地層処分は何世代にもわたる事業なので、科学技術の進歩や社会情勢の変化などを踏まえて、段階的に意思決定しながら、その時点で利用できる最善の方法で進めていこうとする考え方である。この段階的な意思決定は、その前提として、判断の取消しや後戻りの可能性を含むことになる。そのため、地層処分計画の「可逆性」や廃棄体の「回収可能性」などをキーワードとして、「段階的アプローチ」の具体的な方法が各国において検討されている。地層処分は元来、必要な場合には回収できるという利点を持つ概念であるが、フランスでは、これを積極的に保証する「可逆性のある地層処分」が法制化されており、回収可能性に配慮した設計・埋め戻しプログラムの開発が進められている。またスウェーデンでは、試験的な地層処分を先行実施し、経過を確認したうえで本格段階に移行するといった手順が考えられている。処分場を埋め戻した後についても、一定期間にわたる監視(モニタリング)や目印の設置(マーカーやモニュメント)などが検討されている。

### 2. 日本の歩み

日本では、原子力委員会が1976年に、「高レベル放射性廃棄物対策については、地層処分に重点を置く」との方針を示したことを受けて、地層処分の研究開発がスタートした。ストリーパ・プロジェクトをはじめ、各国の地下研究プロジェクトに参加する一方で、地層処分の概念や候補岩種に関する検討が進められた。原子力委員会は1980年に、人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムの概念を提示し、1984年には、対象とする岩石の種類を特定せずに幅広く研究開発を進めるべきとする考え方を示した。1980年代後半からは、旧動力炉・核燃料開発事業団(現在の日本原子力研究開発機構)が、海外プロジェクトでの経験を踏まえて、岐阜県の東濃鉱山や岩手県の釜石鉱山の坑道を利用した地下研究に着手した。同時期に、茨城県東海村において、人工バリアや安全評価に関する実験室レベルでの研究を開始した。東海村では、1993年に様々な工学規模での試験を行うための地層処分基盤研究施設(エントリー：ENgineering scale Test and Research facilitY)が、また1999年には放射性物質を用いた試験が実施できる地層処分放射化学研究施設(クオリティ：QUantitative Assessment radionuclide migration experimental faciLITY)が始動した。

研究開発の主たる目的は、「日本で安全な地層処分が実現できるか？」を確認することにあった。研究開発をスタートした当時は、「地震や火山活動が活発で地下水が豊富な日本で、地層処分が成立するのか？」といった疑問もあった。そんな疑問に答えるため、四半世紀に及ぶ地道な研究開発が続けられた。その成果は、1999年11

月、研究開発の第2次取りまとめ(2000年レポート)<sup>1)</sup>として集大成された。2000年レポートは、それまでの研究開発に基づく科学的な根拠を積み重ねることにより、日本でも安全な地層処分が実現できること、すなわち、①日本にも地層処分に適した安定な場所が広く存在すること、②現状の技術レベルで実現可能な工学技術によって人工バリアや処分施設を設計・施工できること、③地層処分の長期にわたる安全性をシミュレーションにより予測的に確認できること、を示した。

2000年レポートは、ドラフト段階で何度も国内外の専門家によるレビューを受けたうえで、最終的には、原子力委員会が組織した専門家グループの評価により、技術的な信頼性が確認された。この2000年をターニングポイントとして、日本の地層処分は、成立性を確認する段階から、実施をめざした段階へと移行した。2000年には、地層処分事業の枠組みを定めた法律が成立して、実施主体である原子力発電環境整備機構(NUMO)が発足、一方で安全規制に向けた検討が始まった。

### 3. 事業段階における研究開発

#### (1) オールジャパンの体制

2000年レポートを技術的な拠り所として、日本の地層処分は事業段階に踏み出した。地層処分の事業は法律に基づき、3段階の立地選定プロセスを経て、処分場の建設、操業、閉鎖へと進む。候補地の選定から処分場の閉鎖に至るまで、百年にわたる長い事業である。

欧米諸国では、処分事業の実施主体が自ら必要とする研究開発を行うのが一般的であるが、日本では、国や関係機関に、事業と規制を支える研究開発を進める役割を与えている。原子力機構と資源エネルギー庁を中心とする国の基盤的な研究開発(基盤研究開発)である。長期にわたる国家的事業のすべてをNUMOに任せるのではなく、国の責任で継続的に技術基盤の強化を図り、地層処分の信頼を高めながら事業を推進していくことがねらいである。その背景には、処分事業と明確に区別することにより、研究開発の円滑な進展を図るという配慮がある。

基盤研究開発については、処分事業と安全規制のニーズを確認しながら、全体を効率的に舵取りしていくためのオールジャパンの協議体として、「地層処分基盤研究開発調整会議」が設置されている。2006年には、当面の5年程度を俯瞰した「基盤研究開発の全体計画」<sup>2)</sup>が策定されており、その全体計画に基づいて、参加各機関が連携・協力しながら研究開発を進めている。

#### (2) 研究開発の現状

2000年レポート以降の事業段階における研究開発には、地層処分技術の信頼性をさらに高め、事業と規制の段階的な進展に応じて必要となってくる技術の基盤を強化していくことが求められる。また、研究開発を通じて、

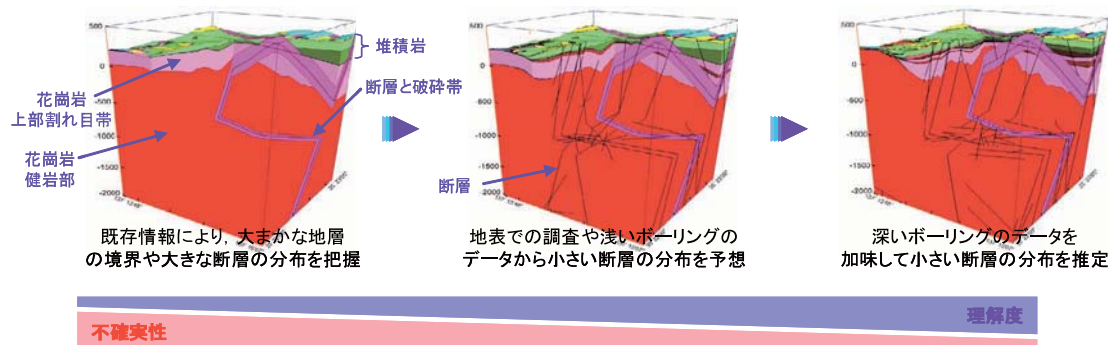
地層処分に対する国民の理解を深めていくことが期待される。研究開発の拠点となるのは、日本原子力研究開発機構(原子力機構)の3つの研究センターである(第3図)。各研究センターでは、関係機関と協力しながら、それぞれの特徴を活かした研究開発が進められている。

東濃地科学センターと幌延深地層研究センターでは、それぞれ結晶質岩と堆積岩を対象に、深地層の研究施設(地下研究所)を活用した研究が進められている。日本に分布する岩石は、地層処分の観点から、大きく結晶質岩(鉱物の結晶からなる岩石、マグマが冷え固まってできた花崗岩など)と堆積岩(泥や砂などの堆積物が固結してできた岩石)に区分され、両者は地下水の動きや岩盤の強度など、地層処分にとって重要な性質が異なる。2つの地下研究所は、このような日本の地質の分布と特性を踏まえたものである。地下研究所では、①地上からの調査研究、②坑道掘削時の調査研究、③地下施設での調査研究、と段階的に調査を進めながら、深地層の岩盤や地下水の状態を詳しく調べていく(第4図)。地層処分に関連する様々な技術を実際に使いながら、その信頼性や実用性を確認していくことが目的である。すでに、地上からの調査段階が終了しており、2007年には、その成果が報告書として公表された<sup>3,4)</sup>。現在は坑道を掘削しながら、地上からの調査で予測した地下の岩盤や地下水の状態を確認することを通じて、地上からの調査技術やモデル化手法の妥当性が評価されている。両センターでは、地質環境の長期的な安定性を評価するため、地下深部に潜んだマグマを探知する技術(第5図)や将来の地形変化を予測する技術など、天然現象に関する研究開発も進められている。

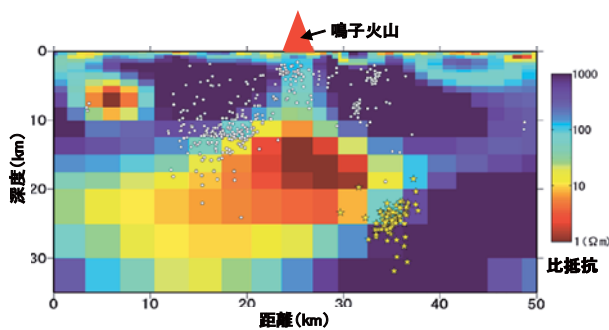
東海研究開発センターでは、地上の実験施設(エントリー、クオリティ)を使った人工バリアの性能や放射性物質の溶解・移行に関するデータの蓄積とモデルの高度化、地下研究所で得られる情報に基づく地層処分の工学技術や安全評価手法の適用性確認などが進められてい



第3図 研究開発の拠点



第4図 段階的な調査による地質環境モデルの進化(第1段階報告書<sup>3)</sup>より編集)



第5図 宮城県北西部における地下の比抵抗分布

マグマは、地殻を構成する岩石に比べて、電気伝導度が高いため、地下の比抵抗構造を調べることによって分布を推定できる。図の赤い部分(低比抵抗の領域)では地震(白丸)が発生していないことから、マグマが存在すると推定される。(平成17年取りまとめ<sup>5)</sup>分冊1より編集)

る。人工バリア材料の長期挙動については、考古学試料などを活用して、実験では得られない長期間にわたるデータも取得されている(第6図)。得られた成果は、処分場の設計や安全評価を行う際に必要となる各種データベース・モデル、評価支援ツールとして、インターネットなどを通じて公開されている。

現在、原子力機構では、地層処分の安全性を説明する論理の構造に沿って、研究開発の成果や関連する知見を体系的に管理していくため、知識マネジメントシステムの開発が進められている。2010年頃からプロトタイプとして公開される予定である。



第6図 ナチュラルアナログ研究の一例

処分場で想定される現象と自然界で実際に起こった現象との類似性(アナロジー)に着目した研究。写真は、出雲大社から出土した750年前の鉄製矢とそのX線CT画像。粘土層の中に埋もれ、酸素の少ない環境でほとんど錆びずに保存された。(平成17年取りまとめ<sup>5)</sup>分冊2より編集)

### Ⅲ. 事業の現状と今後の展開

地層処分の基本的な概念や安全確保の仕組みは万国共通であるが、具体的な方法や進め方には各国それぞれの独自性がみられる。日本のように、使用済み燃料を再処理したうえでガラス固化体として処分する国もあれば、使用済み燃料をそのまま処分することを考えている国もある。地層処分の対象となる岩種も各国の地質状況によって異なる。処分地の選定については、複数の候補地域を選んだうえで、地域の意向を確認しながら絞り込んでいくのが一般的であるが、日本のように実施主体が全国の市町村を対象に公募を行っている例はない。

#### 1. 地層処分事業の現状

##### (1) 世界の状況

まだ高レベル放射性廃棄物の地層処分を開始した国はないが、フィンランドと米国では処分場のサイトが決まっている。両国は、1980年代前半からサイトの選定作業を開始し、フィンランドは2001年にオルキオトという島を処分地を選び、米国は2002年にユッカマウンテンという砂漠地域を処分地に決めた。いずれも、2020年頃から操業を開始する予定であり、ユッカマウンテンでは処分場の建設認可申請が2008年に提出された。スウェーデンでも、すでに候補地が2箇所に絞られており、2009年には、どちらか一方が処分地に決まる予定である。

フィンランドとスウェーデンは、北欧に広く分布する古い花崗岩地帯に位置しており、地層処分の対象岩種はもとより花崗岩である。一方、米国のユッカマウンテンは堆積岩(凝灰岩層)を対象としている。砂漠地域であるため地下水面が深く、処分場は地下水面よりも上方に建設される。ユッカマウンテンへの立地に際しては、地元ネバダ州の反対を押し切る形で、連邦政府が最終決定を下した経緯がある。

フランスでは、ビュールという場所で、堆積岩(粘土層)を対象に地下研究所を使った調査が行われており、その結果が良好であれば、周辺地域の中から処分場が選定される見込みである。フランスは結晶質岩も候補岩種としているが、結晶質岩については地下研究所の場所を

確保できていない。スイスは当初、結晶質岩を対象に研究を進めていたが、1990年代に堆積岩の研究にも取りかかった。2008年にサイト選定の第1段階として、3ヶ所の候補地域が提案されたが、いずれも粘土層である。

一方、これらの国とともに、20世紀後半の研究開発を牽引したドイツやベルギー、カナダでは、原子力政策自体の見直しもあって、現在、地層処分の事業計画は白紙の状況である。1970年代に処分候補地とされたドイツのゴアレーベン(岩塩層)も、1998年の政権交代以来、凍結されている。カナダは2007年に、当面60年程度は地上施設で管理し、その後、地層処分するという「適応性のある段階的管理」の方針を採用した。逆に英国では、1980年代から調査が中断されていたが、2006年に地層処分の方針が確認され、実施主体が指名された。

なお、近年、地球温暖化問題を背景に原子力復興の気運が高まっており、エネルギーの安定供給と環境への負荷低減をめざして、燃料のリサイクルや新型原子炉の開発に取り組む動きも出ている。このような状況を背景に、各国の地層処分計画にも変化が現れるものと思われる。

## (2) 日本の状況

日本では、文献調査による概要調査地区の選定、概要調査による精密調査地区の選定、精密調査による処分施設建設地の選定という3段階の立地選定プロセスを経て、2030年代中頃に処分を開始する計画である。現在、最初の段階である文献調査を行う地域について、実施主体であるNUMOが、全国の市町村に対して公募による募集を行っている。これまでに10数箇所の地域で応募に関連した動きが報じられたが、実際の応募には至らなかった。唯一、高知県の東洋町が、2007年1月に町長の強い意思のもと、初めての応募に踏み切ったが、その3ヶ月後に町長の交代という事態を経て取り下げとってしまった。

このような状況を打開していくため、国レベルで、事業を推進するための課題や対策が協議され、①国民全般への広報の充実、②関係地域への広報・情報提供の拡充、③国が前面に立った取組み、④事業と共生する地域振興モデルの提示、⑤国民の理解に役立つ研究開発、⑥国、NUMO、電気事業者の体制・機能の強化、といった事業推進強化策が提言された<sup>6)</sup>。とくに、国が前面に立った取組みとして、NUMOによる公募方式に加え、国による申入れ方式を併用していく方針が打ち出された。

強化策の提言を受けて、資源エネルギー庁は全都道府県での説明会やNPOと連携した地域ワークショップなどの活動を精力的に進めるとともに、国民の理解に役立つ研究開発のあり方を議論するワーキンググループや地域振興プランを検討するための研究会を立ち上げた。NUMOや電気事業者も広報活動の強化や体制・設備の

拡充などを図っている。今後、こういった取組みのもと、地層処分の事業が着実に前進していくことが期待されるが、そのために研究開発機関が果たすべき役割も大きい。

## 2. 国民の目線にたった地層処分

2008年に改定された国の基本方針は、研究開発機関の役割として、地層処分の安全性・信頼性についてのわかりやすい情報発信と、研究施設や研究開発内容の積極的な公開を通じて、地層処分事業に関する国民との相互理解促進に貢献していくことを求めた。すでに原子力機構などでは、研究成果の発表・報告に加えて、地下研究所の施設見学や学生・市民を対象としたセミナー活動などが進められているが、今後はさらに、地層処分に対する国民の疑問に積極的に応えていく活動が期待される。

最も基本的な疑問は、「地層処分は安全か?」である。あえて乱暴ない方をすれば、研究開発によって地層処分の安全性が高まるのではない。安全性に対する確信が深まるのである。その確信は、研究者だけで共有されるのではなく、国民の理解・信頼となって、社会に還元されなければならない。そのためには、国民の目線にたつて、研究開発のあり方を考えていくことも必要である。資源エネルギー庁は2008年度から、地層処分のバーチャルシステムや人工バリアの実規模設備の開発に着手した。地層処分を可視化・実体化することにより、体感を通じて国民との相互理解をはかることがねらいである。

一方、倫理的側面のあいまった一般の感覚として、廃棄物を人間の管理から手離してしまうことや、長期の事業を決断してしまうことへの抵抗感がある。「取り返しがつかないのではないか?」との疑問である。これに配慮したのが、前章で述べた「段階的アプローチ」であり、日本が法律に定めている3段階の立地選定プロセスも、この段階的アプローチを実践したものである。立地選定後についても、処分場の建設や操業に伴う許認可だけではなく、操業期間を通じた定期的な安全レビューや閉鎖後のモニタリングなどの仕組みが検討されている。とくに、処分場を閉鎖する前には、その時点での最先端技術や操業期間中に得られた情報に基づいて、安全性を再評価することが法律に定められた。

現在の日本の地層処分概念は、2000年レポートを基本としている。2000年レポートは、人工バリアの仕様や処分場の概念を提示し、廃棄体を埋設した後は、再取出しや閉鎖後のモニタリングなどを要せずに、地層処分の安全性が確保できることを示した。これは、当時の技術レベルによって、日本で安全な地層処分が実現できることを例示したに過ぎない。技術レベルが進歩すれば処分場の仕様は合理化されるべきであり、社会の要請があれば応えていかなければならない。「段階的アプローチ」とは、単に判断を先送りすることではなく、技術の進歩や

社会情勢の変化に対して、判断を硬直化させないことである。

地層処分が社会に受容されるために必要なことは、「国民の理解」ではなく、「国民との相互理解」だといわれている。地層処分に対する国民の不安や不満を理解せずして、国民からの理解が得られるはずがないという道理である。また、地層処分は情報の非対称性が強い分野だともいわれる。専門家が日常を超える時空間に取り組んでいる一方で、一般国民には、そもそも電気を通じて廃棄物を発生しているという意識すらない。この非対称性を解消していく努力はもちろん大事であるが、一方で、情報の非対称性を前提としながら、相互理解を進めていく工夫が必要である。「国民の不安」の対称に据えるべきは、膨大な知識や情報ではなく、知識と経験に培われた「専門家の実感」である。国民の目線にたつて、「専門家の実感」と「国民の不安」との交流を進めながら、研究開発や事業のあり方を研鑽し、同時に、科学技術に対する国民の関心と思考を喚起していくことが大切だろう。

#### — 参考資料 —

- 1) 核燃料サイクル開発機構，わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ，JNC TN 1410 99-020-024, (1999).

- 2) 資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構，高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画，2006年12月。
- 3) 日本原子力研究開発機構，超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書，JAEA-Research 2007-043, (2007)。
- 4) 日本原子力研究開発機構，幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書，JAEA-Research 2007-044, 045, (2007)。
- 5) 核燃料サイクル開発機構，高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ，JNC TN 1400 2005-020, 014, 015, 016, (2005)。
- 6) 総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会，放射性廃棄物小委員会報告書中間とりまとめ—最終処分事業を推進するための取組の強化策について，平成19年11月1日。

#### 著者紹介

清水和彦(しみず・かずひこ)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野)高レベル放射性廃棄物の地層処分/特に地質環境

## From Editors 編集委員会からのお知らせ

○学会誌記事執筆者のための

テンプレートを用意しました  
執筆要領と合わせてご利用下さい



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

○「投稿の手引」「和文論文テンプレート」を改定しました。

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

— 最近の編集委員会の話題より —  
(2月6日 第7回編集幹事会)

#### 【学会誌関係】

- ・記事作成手順書を現状に合わせて見直し、修正したものをHPに掲載しています。記事中の図の文字の見易さなど執筆要領に注意を迫記することとした。
- ・Web アンケートの結果報告があり、学会誌が発行されるとすぐアンケートに答えたいという声が多いので、今後月初めにアンケートをお願いするように変更することとした。

した。

- ・連載講座は執筆者担当者により書き方の差が大きいため、新しく連載講座を開始する場合、連載講座の取纏者には事前に記事をレビューした上でレベルあわせをお願いすることとした。

#### 【論文誌関係】

- ・論文誌のインパクトファクター向上のために、Reviewを積極的に募集・掲載することとしました。
- ・論文の転載による掲載について検討し、これを認めないこととしました。
- ・「投稿の手引」「和文論文テンプレート」を改訂しました。ホームページを参照してください。
- ・著作権譲渡について検討し、ケースバイケースで対応することとしました。
- ・計算科学技術部会から要望のあった、論文審査区分の追加については、継続的に検討することとしました。

編集委員会連絡先 [hensyu@aesj.or.jp](mailto:hensyu@aesj.or.jp)

## 核兵器なき世界に向けて グローバル・ゼロ軍縮会議

日本国際問題研究所 シニアフェロー 遠藤 哲也  
元原子力委員会委員長代理

核兵器廃絶論は、古くから唯一の被爆国である日本、非同盟諸国、北欧、カナダ、豪、ニュージーランド等の非核兵器国から主張されてきたが、近年、米国から、それもかつて米国の核戦略に直接関与した元政府高官から主張されるようになったことは注目に値する。その議論は以前の核廃絶論が、一般的、情緒的であったのに比べ、冷戦終えん、9.11事件後の安全保障環境の変化を踏まえた核戦略論に基づくもので、かつ廃絶に至る具体的な道筋を提案している。それとともに、廃絶への過程に横たわる多くの政治的、技術的困難を指摘している。世界が核廃絶の途に踏み出すには、まずは米国の決断が必要なこと、核なき世界が米国にとっても世界の安全保障にとっても望ましいことを強論している。この軍縮会議はそういった議論の流れの一つである。

### I. 米国からの核廃絶論

筆者は2008年12月8、9の両日、パリで開かれたグローバル・ゼロ(Global Zero)と呼ばれる核兵器廃絶を目指す国際会議に出席した。この会議は米国のいくつかの民間基金がスポンサーする、いわゆるトラックIIの会議なので、現職の政府関係者はほとんど出席していなかったが、元政府高官をずらりと揃えていた。メディア受けしそうな人も少なくなかった。

ところで、近年、米ソ冷戦終えん後および特に2001年9・11の同時多発テロ以降、これまでのMAD(相互確証破壊)と抑止力を軸とする核戦略が、現状にあったものか否かについて疑問が呈され、しかもその疑問が米国から提起されるようになった。2007年と2008年1月の「ウォールストリート・ジャーナル」紙に掲載された「A World Free of Nuclear Weapons」と「Toward a Nuclear-Free World」と題する論文は、その共同執筆者が、キッシンジャー、シュルツ、ペリーおよびナンという元国務長官、国防長官、連邦上院軍事委員長という要職にあり、米国の核政策に直接に関係した人物であっただけに世界的に大きな反響を呼んだ。これに対し、退官した人の発言ではないか、米国の現政権は相変わらず従来からの核政策を踏襲しているのではないかなどと冷やかにみる向きもあるが、核廃絶論が非同盟諸国や非核兵器国からではなく、戦略論として米国から唱えられるようになったことは注目に値する。これをきっかけに、日豪共同主催の

核軍縮・核不拡散国際委員会が発足したり、今回のグローバル・ゼロのキャンペーンが始まった。また、核廃絶を見据えたアカデミックな論文、著書も出版されるようになってきている。最近 IISS(在ロンドン国際戦略問題研究所)から刊行された『Abolishing Nuclear Weapons』(G. Perkovich と J. Acton 共著)とかオックスフォード大学出版会の『Thinking about Nuclear Weapons—Principles, Problems, Prospect』(Michael Quinlan 著)などがそれである。筆者はかつて IISS の研究員を務めたことがあるが、NATO のシンク・タンクともいえるべき存在であった IISS から、このような論文が発表されるようになるとは思わなかった。

核軍縮は古くは核兵器出現の当初から唱えられ、そのための部分的、経過的な対応策として、多国間ベースでは、部分核停条約、非核兵器地帯構想、NPT、全面核実験禁止条約(未発効)などへと進んできた。二国間ベースでは、米露両国での核軍備管理条約の締結へとある程度は具体化してきた。だが、一方では核兵器保有国の増加、核兵器・ミサイルの近代化、精巧化と核軍縮とは反対の方向も顕著であり、また近年は核を巡っての非国家主体の暗躍がみられるようになってきている。核廃絶は国連を中心とする国際社会でも、また民間レベルでも大きくとりあげられたものの、極言すれば荒野の叫び声のようであった。その大きな理由の一つは、核廃絶の主張が時代の国際情勢からかけ離れていたこと、感情的、情緒的な議論が多かったことなどが挙げられよう。戦略論に基づいた理論的な核廃絶論が出て来たのはごく最近のことである。

*Toward a Nuclear Weapon Free World—Nuclear Disarmament Conference toward Global Zero* : Tetsuya ENDO.

(2009年 1月14日 受理)



## II. グローバル・ゼロ運動の理論的背景

グローバル・ゼロは、Mat Brown という若い米国の市民運動家が2年前位に始めたものの由だが、その後、超党派で識者をまきこみ、さらにその運動が全世界に広がっていった。この運動の有力な理論的根拠になっているのが、フォーリン・アフェアーズ誌2008年11/12月号の論文「The Logic of Zero—Toward a World without Nuclear Weapons」である。著書はブルッキングス研究所の上級研究員 Daalder 氏と元国防省高官、前アトランティック・カウンシルの所長であった J. Lodal 氏で、後者のロダール氏はパリ会議に出席していた。

この論文は、前述のキッシンジャーほか4賢人の論文を継承していて、ほぼ、軌を一にした内容で、それを発展させたものである。ここでは、グローバル・ゼロの核廃絶論の理論的背景としてフォーリン・アフェアーズ誌の論文の概要を紹介したい。

### 1. 論文の要旨

- (1) 冷戦中は核兵器が抑止力として米国および同盟国の安全保障のため不可欠であり、その役割を果たしてきたが、冷戦終えん後は大きく変わり、その役割は大きな報復力によって相手の核兵器の使用を阻止するだけになった。しかも右目的以外の核兵器の存在はかえって危険なものにさえなってきた。米国にとって現在の安全保障上の最大の脅威はテロであり、核拡散の結果、核兵器、核物質がテロリストの手に入ることである。もしテロリストが核を手に入れば、テロリストには抑止という概念はないので使用することを躊躇しないであろう。加えて、原子力技術が拡がるにつれて、その点からも核拡散のおそれが増えている。
- (2) 今や核のない世界を実現することが、安全保障にとって有益である。米国は過去の核政策(Nuclear Legacy)にとらわれることなく、核廃棄へのビジョンを核政策の柱として公式に打出し、それとあわせて核廃絶への戦略的な道筋を策定すべきである。過去においては、核は大量破壊兵器、大規模な通常兵器使用などを抑止する多様な役割を担っていたが、状況は変わった。それなのに、米国の核戦略は以前のままである。
- (3) その道筋として次の4点が上げられる。第1に、米国の核の目的を相手国の核の使用を抑止することに限定すべきで、その旨を公式に表明する。第2に、その目的のためだけならば核弾頭の総数は予備などを含めて1,000で充分であり、とりあえずその数まで削減する。第3に、現行のNPTをはるかに越える包括的かつ厳格な核兵器および核物質の管理・検証制度を確立する。第4に核廃絶に向けての米国は

外交努力を傾ける。

- (4) 冷戦時代には米国の核戦力はソ連の脅威に対抗するためであったが、今や米国の通常戦力は群を抜いて強力であり、通常戦力や生物・化学兵器による脅威には通常戦力で充分に対抗でき、核に頼る必要はない。他国が核を持っている限り、米国も安全保障のため核抑止力が必要だが、それには大量の核は不必要である。総数1,000もあれば十分すぎるくらいで、これだけあれば、相手に対する報復には充分である。地上発射ミサイルは不要であり、潜水艦発射と航空機搭載核でよい。
- (5) 核廃絶に向うには、厳格な核管理と検証体制が絶対に必要であり不可欠である。また、NPTの欠点の一つは、民生用であればウラン濃縮とプルトニウム抽出を認めたことであるが、技術の発達によってこれらは安易に手に入るものになっており、民生用から軍用に転用するのはいとも簡単である。燃料サイクルについては、国際管理が必要である。また、核管理・検証制度の包括化、厳格化によって核拡散、したがって核テロのリスクも減ずることができる。
- (6) 核廃絶とそれへの過程はすべての国に受け入れられる普遍的なものでなければならないが、どうやってこれを実現するか。これには米国の積極的な外交が必要であり、次のような点が指摘できよう。
  - ①まず、米国のイニシアティブ
  - ②第2のターゲットとして米国の同盟国(日本もこのカテゴリーに含まれる)
  - ③第3に国際社会で長年核軍縮を熱心に唱えてきた国(ブラジル、メキシコ、インドネシア、スウェーデン等)
  - ④核兵器保有国(英国はすでにその方向を示しているが、その他、中国、インド、フランス、パキスタン、イスラエル、ロシア)
  - ⑤イラン、北朝鮮問題の解決
- (7) くりかえし強調したいのは、何よりも米国の態度決定とそれを推進する決意である。

## III. パリ国際会議の概要

### 1. 出席者

政官界、軍関係などからの専門家の出席が多かった。100人くらいの出席であった。米国が音頭をとっている会議であるから、米国からの出席者が多かったのは当然として、英国からは元外相が2人も出席した。インド、パキスタンからの参加も多かった。他方、フランスからは開催地であるにもかかわらず、目立った出席者はなく、中国からもこれといった出席者はいなかった。これは偶然であったかもしれないが、あるいはそれぞれの国の核軍縮に対する態度を反映しているのかもしれない。

ロシアからはそこそこといった感じで、ある程度のプレゼンスは示していた。日本からの出席者は(財)日本国際問題研究所の佐藤理事長と同理事長の呼び掛けに応じた人達で、同研究所が3年前に組織した「核の新秩序に関するタスクフォース」から座長の筆者と伊藤中部電力顧問(原子力委員)、日豪が共催する核軍縮・核不拡散国際委員会の共同議長である川口元外相と高野前駐独大使という顔ぶれであったが、全体会議での演説や発言、夕食会でのスピーチ、分科会での議長役など、それなりのプレゼンスは示したといえよう。

著名な出席者は、例えば次のとおり。

米国：カーター元大統領

グラハム元 ACDA(米国軍備管理・軍縮庁)長官

ピッカリング元国連、インド大使

バート元 START 交渉代表

ブランソン Virgin Group 会長

英国：リフキンド元外相

ベケット元外相

豪： エバンス前外相

ロシア：マルシェロフ Russian Federation Council 外交委員長

その他：ヨルダン 前国王妃

インド パジパイ元外相

アルジェリア ブラヒニ元外相

国連 ダナバラ元国連軍縮担当次長

インド スプラマニヤム元国防研究所長

パキスタン カラマツト元参謀総長

## 2. 会議での注目すべき点など

会議での討議をリードし、実質的に仕切ったのは米国のリチャード・バート大使であった。バート大使は核廃絶に至るロードマップとして一応2009年から2035年までを限定し、この25年間を次の6段階に分けて核廃絶に向けての計画を提示した。もっともこの25年間というのは弾力的な数字で25-40年間かかるかもしれないとの但し書き付きであった。(第1図)

### (1) 第1段階(2009-2010)

- ・米露の核廃絶に対する共同宣言
- ・米露二国間核削減交渉の準備

### (2) 第2段階 (2010-2015)

- ・米露はすべての核弾頭を1,000まで削減
- ・米露以外の主要な第三国(核兵器国および非核兵器国)との協議開始
- ・核燃料サイクルの国際管理についての協議開始
- ・イランおよび北朝鮮核問題の解決

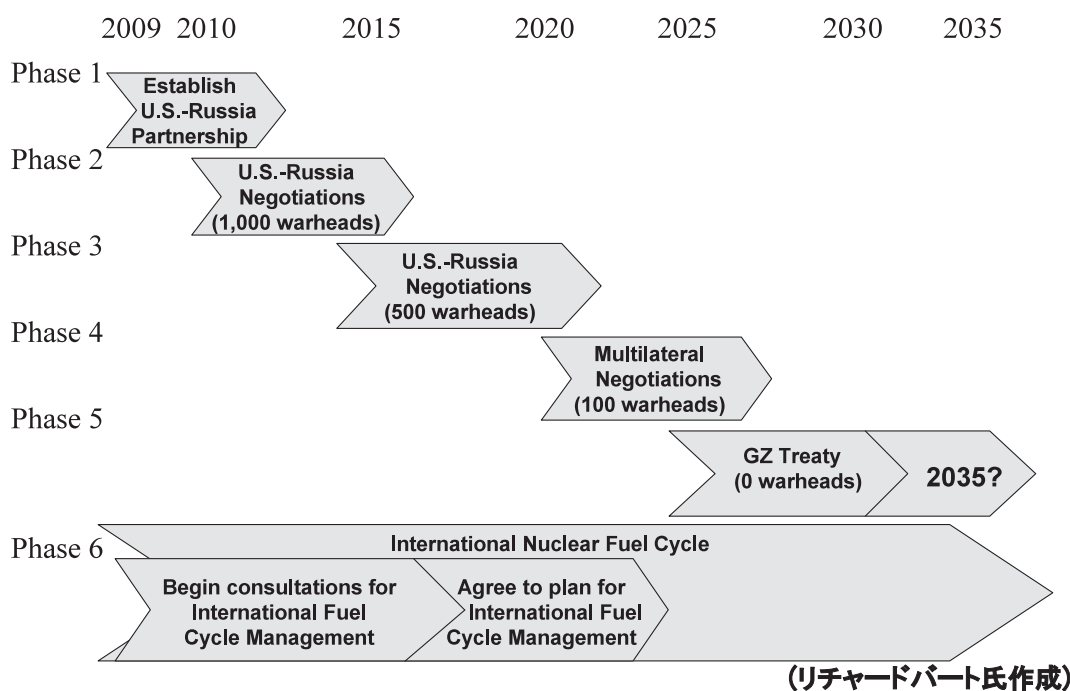
### (3) 第3段階(2015-2020)

- ・米露はすべての核弾頭を500まで削減
- ・米露以外の核兵器国との核削減・核管理交渉開始
- ・核燃料サイクルの国際管理合意

### (4) 第4段階(2020-2025)

- ・多数国間交渉により核兵器保有国はすべての核弾頭を100まで削減
- ・検証、履行(enforcement)制度合意

## Road Map to Global Zero Treaty



第1図 グローバル・ゼロ条約へのロードマップ

- ・グローバル・ゼロ条約署名
- (5) 第5段階(2025-2035?)
- ・核廃絶の実現
- (6) 第6段階(2035?-)
- ・核燃料サイクル国際管理制度の実現

#### IV. 会議の評価と気付きの点

この会議は今回が第1回目、最終的には2010年1月に次のNPT運用検討会議の前のタイミングで世界サミットともいえるべく大会議を開いて、打上げにしようとしているので、第1回をもってあれこれというのは時期尚早である。しかし、すでに述べたように核廃絶が米国から、しかも元政府高官筋から出てきていること、戦略論に基づいて主張されていることは十分注目に値する。今一つ注目すべきは、このキャンペーンが各国の指導者層に焦点をあてていることで、これまでの運動がどちらかというと大衆指向で感情に訴えようとするものであったのと違っている。

だが、このグローバル・ゼロが今後、米国政府の政策としてとりあげられるか否かについてはそう楽観視はできない。オバマ新大統領は選挙戦中「eventual elimination of all nuclear weapons」や新しい核兵器は開発しないなどの発言をしており、また、大統領府の科学技術補佐官にパグウォッシュの有力メンバーであるハーバード大学のホルドレン教授を任命するなど、核軍縮には前向きとみられる。しかし、現実の政策となると様々の圧力にさらされるし、また、肝心のロシアの最近の強引な外交姿勢、米露関係の成行きなどを考えるとそう簡単にはいかないだろう。

次に、仮に米国が核廃絶の方針を決断したとしても、他の核保有国を説得し、核廃絶を普遍化するのは決して容易なことではない。また、核廃絶の前提ともいえるべき検証、義務の履行の確保(enforcement)などが政治的にも技術的にも非常に難しいことは、前述のIISS刊行の論文などが指摘するところである。さらに、焦眉の急であるイラン、北朝鮮問題を片付けなければいくら大構想

を云々しても説得力がない。

このように核廃絶には前途に多くの難関が横たわっているが、追求に値する目標であり、特に日本にとってはそうである。唯一の被爆国であり、非核三原則を国是として堅持し、核廃絶を願う一方、現実の国際政治では米国の核の傘を受け入れざるを得ない難しい立場に置かれている日本として、グローバル・ゼロの考えは正にぴったりである。当面の間は核の傘は維持しつつ、世界の核戦力の水準を下げていって、ある時点では核そのものがなくなるという状況は日本にとって最も望ましいものである。筆者がグローバル・ゼロの趣旨に賛同しているのはそのような考えに基づくものである。

#### —参考資料—

- 1) G. Perkovich, J. M. Acton, *Abolishing Nuclear Weapons*, Adelphi paper 396 IISS, (2008).
- 2) M. Quinlan, *Thinking About Nuclear Weapons: — Principles, Problems, Prospects*, Oxford University Press, (2008).
- 3) I. Daalder, J. Lodal, “The Logic of Zero—Toward a World Without Nuclear Weapons”, *Foreign Affairs* Nov./Dec. 2008.
- 4) H. Kissinger, G. Shultz, W. Perry, S. Nunn, “A World Free of Nuclear Weapons” 4 January, 2007, *The Wall Street Journal*; “Toward a Nuclear Free World” 15 January, 2008, *The Wall Street Journal*.

#### 著者紹介

遠藤哲也(えんどう・てつや)



1958年東京大学法学部卒、外務省入省。89年在ウィーン国際機関日本政府代表部大使、93年日朝国交正常化交渉日本政府代表、94年朝鮮半島エネルギー開発機構(KEDO)担当大使、96年駐ニュージーランド大使、98年原子力委員、委員長代理、2004年外務省参与、07年日本国際問題研究所シニア・フェロー。



## 韓国と東南アジア 3 カ国の原子力開発 第16回環太平洋原子力会議(16 PBNC)より

日本原子力産業協会 中杉 秀夫,  
エネルギー総合工学研究所 松井 一秋

第16回環太平洋原子力会議(Pacific Basin Nuclear Conference, 通称 PBNC)は天候にも恵まれた2008年10月13日からほぼ1週間にわたって、青森市の文化会館を中心にして、関係者を含めおよそ1千名の参加を得て盛大に開催された。

環太平洋原子力会議(PBNC)は1976年、米国原子力学会の主導によりホノルルで第1回会議が開催された後、ほぼ2年ごとに環太平洋諸国間の回り持ちで開催され、原子力の研究開発や平和利用の推進に関わる情報を交換、共有する場となっている。日本は、これまで、第2回(1978年、東京)、第10回(1996年、神戸)会議を開催した。前回第15回 PBNC は2006年10月、オーストラリアのシドニーで開催した。次回第17回 PBNC は2010年10月、メキシコのカンクーンで開催予定である。

PBNC の開催が定常化した後、環太平洋地域における原子力科学・技術およびその利用に関する情報交換と協力の促進を目的として、1988年、原子力学会ベースの「環太平洋原子力協議会(Pacific Nuclear Council:PNC)」が設立された。PNC は、日本、米国、カナダ、韓国、中国、台湾、ロシア、ブラジル、メキシコ、オーストラリア、インドネシアの原子力学会、協会や産業団体からなる。ほかに、マレーシア、タイ、ベトナムがオブザーバー参加している。日本は、日本原子力学会と日本原子力産業協会がメンバーで今回の PBNC の主催者である。

本会議の青森への誘致に当たっては、テーマを「持続可能な原子力の将来に向けた環太平洋協力」とした。核燃料サイクル関係施設が集中している青森で開催ということで、地元に対しては、これら核燃料サイクル計画は国際的にも評価の高い事業であること、国際的には平和目的の開かれた事業であることを広くアピールすることを狙ったものである。それに沿った各種のプログラム、講演、技術ならびに公開セッション、見学会、展示などを企画した。

本大会のテーマである「持続可能な原子力の将来に向けた環太平洋協力」と題したプレナリーならびに関連の

キーノートおよび技術セッションの中から、本稿では、躍進目覚しい韓国の原子力開発と、原子力の平和利用開始を望む東南アジア 3 カ国の状況を筆者らの私見も取り混ぜて以下に紹介する。

### I. 国際展開に意欲を示す韓国の原子力産業

韓国は2008年に入り、韓国電力技術(KOPEC)のウェスチングハウス社(WEC)の米国市場での AP 1000への設計参加(4月)、ハン・スンス首相のウズベキスタン訪問によるウラン購入契約(5月)、斗山重工業株(DOOSAN)の WEC への(中国三門、海陽用や米国内への)蒸気発生器等の原発機器納入契約(5月、7月と8月)、韓国電力公社(KEPCO)と露ウラン採鉱会社アトムレドメトゾラト社(ARMZ)の提携(9月)、KEPCO のフィリピンの原子力発電コンサルタントへの応募(10月)、韓国・ヨルダン原子力発電協力協定(12月)等、国際展開で矢継早な動きを示している。

また8月に、李明博政権が「第1次国家エネルギー基本計画(2008~2030)」で原子力の活用拡大と輸出産業化を明示した。

これらもあり、今回 PBNC には韓国から原子力界首脳が大挙参加し、以下のように活動と技術水準をアピールした。(そのプレゼンテーションの内容の概略を以下にまとめるが、16 PBNC のホームページからダウンロードできるものもあるし、プロシーディングスの CD は原子力学会から入手可能である。)

- (1) 韓国の原子力発電の2030年ビジョン(パク・キョ Chol 韓国水力原子力発電[KHNP] 上席副社長)
  - ・「国家エネルギー基本計画」は、エネルギー安全保障、経済効率、環境保護の「3E」を目標に以下を達成する。
    - 原子力発電設備容量：現在1,772万 kW (26.0%)  
→2030年4,277万 kW (40.6%)
    - 原子力発電量比率：現在35.5%→2030年59.0%
    - 原子力発電約10基を新設、次世代炉計画も3年繰り上げて2012年までに完了
  - ・原子力発電所は建設中6基、計画中2基だが、「第4次電力需給基本計画(2017~2022)」で4~5基追加の見込み。

*Nuclear Developments in Korea and South East Asian Countries—From Presentations at 16 PBNC*: Hideo NAKA-SUGI, Kazuaki MATSUI

(2009年 1月9日 受理)

- \*執筆注：2008年12月28日，知識経済部(MKE)は「第4次電力需給基本計画」を公表，その中で既存の8基に加えて，新古里5・6，新蔚珍3・4の4基の新設を明示した。
- ・2007年の原子力発電稼働率は世界78%，韓国91%（2000年以降90%以上を継続）。
  - ・2007年末の韓国の発電コスト（ウォン/kWh）は石油116.5，石炭40.9，原子力は39.4。
  - ・最近では，国民の90%以上が原子力発電の必要性を認めている。
  - ・海外ウラン探鉱や濃縮サービス確保が急務となっている。
  - ・ベトナム，インドネシア，タイ，ルーマニアへの原子力発電協力を展開中。
  - ・新月城の最適炉(OPR 1000)では建設期間47ヶ月が目標。
- (2) 先進型原子力発電プラントの設計と韓国での建設（同上 KHNP パク氏）
- ・OPR 1000の炉心損傷確率 $6.6 \times 10^{-6}$ は，米国電力中央研究所(EPRI)の先進軽水炉要求基準 $1 \times 10^{-5}$ より34%も低い。韓国標準型原子炉(KSNP)より運転性や保守作業性も向上。1次系配管の自動溶接等技術も高度化。
  - ・第3世代炉(APR 1400)では，炉心熱裕度10%増大，蒸気発生器(SG)細管へのインコネル690採用等で，設計耐用年数60年，運転サイクル18ヵ月以上，炉心損傷確率 $10^{-5}$ /炉年以下，従業員被ばく1人・Sv/年以下をめざす。
- (3) 韓国原子力産業：今日と明日（パク・ソクビン DOOSAN 原子力発電所設計担当副社長）
- ・DOOSANは1980年代半ばから，海外技術を消化し，高度化を達成。WECから中国(三門)や米国(パロバルデ，TVAのセコヤ)向けの炉容器(RV)，SGを受注。RV蓋，SG上部胴等は，鍛造品として一体成型で製造している。
- \*執筆注：大型の鍛造品は，世界でも日本製鋼所や日本鋳鍛鋼のみにしかないとされていた。2008年4月には，DOOSANが中国黒龍江省の第一重型機械集団に，この技術の移転を図っているとの報道ほか，日米仏で設備の増強整備が取りざたされている。
- (4) 韓国の中長期原子力研究開発プログラム：現状と見通し（ヤン・ミュンセウン韓国原子力研究所[KAERI]理事長）
- ・2007年の韓国の原子力関係輸出額は4億ドルを超えた。
  - ・原子力の国内市場振興と固有技術の輸出促進を「Nu-Tech 2015」としてMKEが策定。2015年までに総計8.22億ドルを投入。輸出用基幹技術の開発，原子

力発電運転技術の高度化，環境に清浄な技術開発が目標。KHNPの「中長期原子力技術開発計画」でも国際展開を重視。

- ・10万人規模都市への電気・水供給用のシステム一体型・先進モジュラー炉(SMART)は，2012年の標準設計認可をめざしている。
- ・ナトリウム冷却高速炉(SFR)は，2009年に炉心・燃料・システムの概念を確立，2011年にコンピュータコード検証を予定。
- ・APR 1400改良型「APR+」の中核技術を2009年に開発，詳細設計は2010年から実施。

(5) KAERIが，韓国の悲願である再処理技術を米国に認めてもらう布石といわれる先進燃料サイクルプロセス「パイロシステム」の開発状況を，またソウル大学教授が，韓国の原子力産業従事者20,784人の現状，課題，産学協力プログラムを紹介。このほか，技術セッションでも多数の発表が韓国からされた。

韓国は，中国や日本との本格的提携を忌避。政府の主導下，各業種の最強企業のみ残す方式で産業を統合。1980年代には海外技術を吸収，国産化を達成。1990年頃から技術高度化に併せて，主にKAERIがフィージビリティスタディ(FS)やコンサルタント業務を突破口にして海外(トルコ，中国，インドネシア，ルーマニア等)進出を図った。

しかし国内完結型で独自の進化を遂げた韓国の原発技術は，結果的には世界の先進企業グループ系列化の動きから取り残され，新技術開発投資の負担も大きい(日本の経済規模と比べると1/4くらいであるが，同じようなことをやろうとしている)。安全性実証体制(OPR開発時には，国内で安全性実証ができず米国のアイダホ研究所に協力を求めた)も十分ではない。かつてABBコンバッション社(後WECに統合)と開発したOPRやAPR 1400の技術は，2001年のWECとの合意で韓国外での建設にはWECの事前同意が必要といわれている。韓国の原子力産業は，発電所稼働率等では，日本のはるか上をいっているが，こういった実証や輸出に関わる原子力産業基盤の確保では大きな問題を抱えている。軽水炉では，これまでの技術習熟性からはWECの傘下に入るのが一番現実的と思われるが，AREVAとの提携に新しい道を見出す，あるいは長期的観点から露・中・印・ブラジル等との連衡を探る方法もあろう。さらには軽水炉以降に活路を求める選択もある。現状では，SFR，超高温炉(VHTR)，超臨界圧水冷却炉(SCWR)，核融合炉まですべての開発に限られた資源を注入しているが，国際的なパートナーを探して，効率的な開発を行う時期であろう。

2008年12月末に，原子力委員会が次の方針を打ち出した。

- ・2020年までに，前述のSMART炉10基余りを輸出

する。

- ・トルコ・アラブ首長国連邦(UAE)等, 4カ国への原発輸出を図り, 2012年までに基幹技術を国産化する。

しかし, SMART 開発では, インドネシアに原型炉を無償提供し, インドネシア/IAEA との共同実証開発を提唱したが, うまく行かなかった経緯や, トルコでは唯一の応札者ロシアのアトムストロイエクスポルト(ASE)社が交渉先に選ばれていること, UAE は経済危機に直面しているなどから, この原子力委員会の方針も見通しは明るくない。大きな希望としては, 2008年10月の韓国・ヨルダン原子力発電協力覚書締結時にヨルダン原子力委員会(JAEC)のトウカン委員長が, 「今後10年間でヨルダンに導入する原子炉4基のうち, 1~2基は韓国型原子炉になるだろう」と述べたと報道されていることで, 2009年11月のフセイン国王の訪韓時に李大統領と両国原子力協力協定署名が予定されている。

## II. 東南アジア3カ国の状況

16 PBNC では, 東南アジア途上国からの参加を促す目的で国際原子力機関(IAEA)の資金援助を得た。この枠内で, インドネシア, タイ, ベトナムの専門家が参加, 講演し, 自国のエネルギー政策における原子力発電導入の積極的な計画を明らかにした。

### <インドネシア>

バンドン工科大のスウド教授が元原子力庁(BATAN)長官のスプキ氏との連名で, インドネシアにおける原子力発電開発をめぐる経緯と今後の展望と期待を述べた。現状, 化石燃料中心の発電燃料は, 石油やガスの枯渇, 輸出への振り向けにより, ますます石炭依存に傾斜せざるを得ない。政府, 関係者は原子力発電導入の必要性を認めているところ。現在3,300万 kW の発電設備容量を2025年には10,000万 kW と想定し, 100万 kW の原子力発電所4基の完成を考えている。国内的には議論は進んでいるが, 政府決定は2010年ごろになると考えられる。

インドネシアは東南アジア諸国の中では最大の人口, 日本の倍の2億人を持ち, 全体としては資源大国で, 工業化, 科学技術振興には熱心かつ親日的な国といえる。クラカトウの製鉄, スラバヤの造船, バンドンの航空機製造産業などは, 自前ですべてのパーツが製造できるかの問題はあるものの ASEAN の盟主の誇りから発した先駆的な投資であった。同様に, 一説によるとわが国のつくば学園都市を参考にしたといわれる「科学基盤都市(Science Based City; SBC)をジャカルタ西方のスルボンに建設した。この中にはドイツの協力で作ったアジア最大の30 MWt の研究炉もあり, その建設と研究活動には当時の日本原子力研究所も指導, 協力していた。この研究炉に近接して, 燃料, RI 製造, 放射性廃棄物処理研究などの施設が林立していた。また BATAN の若手

ないしは入所予定者を積極的に海外, 特に日本の大学に送り込んでいた。この費用は, 当時の科学技術担当大臣であったハビビ氏が世界銀行, 後, 日本政府から借りて, インドネシアの負担で派遣していることは注目に値する。同氏はドイツ留学後, メッサーシュミット社の副社長からスハルト大統領の招聘で呼び戻されたもので, 前述のバンドンの航空機製造産業も起業した人物で, スハルト失脚後に大統領に就任した。

このようにハビビが, スハルトの腹心として科学技術立国政策の布石を次から次へと打っていた時代, 1997年ごろまでは途上国の中でいち早く原子力発電を手に入れる国と目されていた。ジャワ島中部のムリア半島に原子力発電所を建設するというフィージビリティスタディ(FS)に対して, わが国は当時の輸銀融資を与え, 関西電力系列のニュージェック社が中心になり調査を行い, 三菱重工も各種の技術セミナー開催等で協力していたことを覚えている方もおられよう。

ハビビ政権の崩壊やアジア経済危機もあって一時原子力開発はほとんど中断していたが, その間にも原子力規制庁(BAPETEN)が設立されていたように流れは保たれていたといえる。ここへ来て原子力発電のけん引役はBATAN からエネルギー・資源省に移り, 導入促進のためのキャンペーンを始めている。2006年に公表された国家エネルギー計画によると, 2025年における1次エネルギー構成は, 石油20%以下, ガス30%以上, 石炭33%以上を目標とし, バイオ燃料, 地熱, 原子力を含む新・再生可能エネルギーをそれぞれ5%以上, 石炭液化油も2%以上を目標としている。自国産の石油は低硫黄の軽質油が多いが油田が小さく, 減耗しつつあり, 増産は見込めず, 片やガソリンを中心として国内需要は急増, 原油はシンガポールに出して製品を輸入しており, 2004年に実質上, 石油輸入国に転じている。化石燃料資源はできれば輸出して外貨を稼ぎ, 発電は原子力, 地熱を含む再生可能エネルギーに期待したいところであろう。その意味で, 2016~17年に100万 kW 2基, 2023~24年に同2基の原子力発電を導入するという計画は理解できる。

将来の核燃料供給の安全保障を考えると, 高転換炉や高速炉も検討対象としているが, 環太平洋の地域核燃料サイクル構想に関心を示している。すなわち自国での濃縮, 再処理を念頭においていない。またインドネシアは島嶼が多く, 国土も特に東西に広がっており, 燃料交換頻度の低い小型炉にも関心がある。ロシアの船用炉 KLT-40にはカリマンタンとスラウェシの州に関心を示しているとのことである。ジャワ島東部の大都市スラバヤに隣接するマドゥーラ島は水不足が深刻で, 前述のように, 韓国の SMART を利用した海水淡水化計画が IAEA の支援のもとで計画されたこともある。これらの計画について, BAPETEN は懸念を示しているようで, 少なくとも70%以上の稼働率で2年以上の実績のあるものの

導入に限るとしている。

一昨年11月にバンドンで開催されたバンドン工科大学主催の国際会議で筆者の一人、松井はプレゼンテーションの後で次のような質問を受けた。「どうしたらインドネシアに原子力発電を導入できるか?」「技術は金でも買えるが、人は育てなければいけない。特にあなた方には第2のハビビが要る」といったとき満場から喝采があがった。強力な政府と有能な指導者を必要としていることを国民はわかっているのだ。

#### <タイ>

元チュラロンコン大学のタチャイ・スミトラ先生からタイの原子力発電導入準備状況について報告があった。タイでも過去には導入計画があり、1979年にはGE社に60万kW級BWRの発注内示直前まで行っていたが、シャム湾で天然ガスの発見があり、また米国でのTMI事故が起こったことなどで頓挫した。今回は2020年ごろに400万kWの原子力発電所の導入を前提に、導入準備委員会による検討、エネルギー省に原子力発電計画開発室を設置してきている。しかし最近の政治的混乱により先の展望は不透明である。

タイはこの東南アジア3カ国の中でもっとも豊かな国、つまり国民1人当たりのGDPが高い(タイ8,000ドル、インドネシア3,600ドル、ベトナム2,600ドル)が、化石燃料資源はシャム湾のガスと北部の褐炭ぐらいで、隣国ミャンマーからの天然ガスと、同じく隣国ラオス、カンボジアとの水力開発による電力輸入がたよりである。発電設備としては複合サイクルとガスタービン発電でおおよそ5割、燃料としてはガス依存度が7割弱である。2007年の電源開発計画では、2020年に100万kW2基、2021年に同2基の原子力発電導入を推奨していて、同年、政府は承認している。

この計画に基づいて、政府内に原子力発電基盤準備委員会が設置され、同年、原子力発電基盤整備計画を作成、承認された。今度はこの計画に基づいて原子力発電プラ

ント開発室がエネルギー省内に設置され、3年間で約60億円の予算が割り当てられ、国民参加計画、法規制整備、種々のFSを実施することになっている。

タイの原子力行政を束ねる原子力庁は「平和のための原子力室: Office of Atom for Peace(OAP)」という名前で、これから2年ほど前に分離した原子力技術研究所(TINT)はOAPの施設に古い実験炉をもっている。現在、新しい研究炉をバンコク郊外のオンガラック地区に建設中であるが、GA社との契約の仕切り直しから、作業が中断していると伝えられている。

なお、スミトラ先生はタイ名門大学であるチュラロンコン大学にて原子力工学科を設立し、オンガラック炉の安全審査などを担当している。当時、「タイ日本技術移転計画(TJTTP)」というチュラロンコン大学の理工系の先生方と設備の能力強化計画プロジェクトの中で、東京工業大学原子炉研究所との協力関係構築以来、多くの知己を持つ。

#### <ベトナム>

ベトナムは、1990年代まではこの東南アジア3カ国の中で原子力利用については出遅れていて、インフラも乏しいと見られていたが、2003年頃以降は、最も現実味のある計画を持つとみなされている。2020年に2基、21年にさらに2基の100万kW級を運転開始の予定で、サイトも決まっている。将来的には、2030年に1,000万kW、2040年に2,000万kWとしている。

「2020年までのエネルギー開発国家戦略ならびに2050年ビジョン」が2007年12月に首相によって承認され、原子力発電のシェアを15~20%にするという目標を掲げた。2008年6月には原子力法を制定し、9月には原子力発電プラント建設のための国家評価委員会の設置を決定している。「ニン・トゥアン原子力発電プラント」プロジェクトは前述の4基の100万kWであるが、ニン・トゥアン県の2つのサイトに2基ずつ建設する予定で、プロジェクトのプレFSは本年5月の議会で審議される

第1表 2008年の各国・地域基礎データ比較表

(2009年1月6日作成)

	面積 (万km <sup>2</sup> )	人口 (万人)	実質GDP (億米ドル)*	1人当たり GDP(米ドル)*	実質経済 成長率 (%)*	電力状況		
						総発電設備容量 (万kW)**	総発電電力量 (億kWh)	1人当たり年間 電力使用量(kWh)
中国(大陸のみ)	959.7	133,004	70,990	5,400	11.9	44,238	32,560*	2,150*
インド	328.8	114,800	29,660	2,600	9.0	13,758	6,653*	580*
インドネシア	191.9	23,751	8,437	3,600	6.3	2,324	1,258**	530**
日本	37.8	12,729	42,720	33,500	2.0	24,795	10,820*	8,500*
韓国	9.8	4,838	12,060	25,000	5.0	6,223	4,127*	8,530
タイ	51.4	6,549	5,215	8,000	4.8	2,591	1,307*	1,996*
ベトナム	33.0	8,612	2,211	2,600	8.5	1,130	610*	708*

出典：(総発電設備容量以外) 米国CIAのThe World Factbook(2009年1月6日時点)(\*は2007年値,\*\*は2006年値)

(総発電設備容量) 米国Energy Information Administrationの国際エネルギー統計2005(\*\*\*)は2005年値)

予定との事。その後、FSの実施、許認可手続き、入札とEPC契約(エンジニアリング・機器発注・建設)を経て2015年から2020年の建設期間を予定している。

法制度、人材などのインフラ整備も計画の中にあるが、進展度合いから上述のような開発計画は尚早ではないかという意見も国内にはあるようだ。

これら3国はそれぞれ国情も原子力開発の歴史も異なるが、おのおのおおむね2020年ごろには400万kW程度の導入を考えている。単にプラント輸出ということにとどまらず、人材育成、必要な制度、インフラ整備を含め、わが国のなすべき貢献の総合的戦略が求められる所以である。なお参考として、東アジアの主要国の最近の人口、国土、富み並び電力関係の基礎指標を第1表に示す。

天候にも恵まれた第16回PBNCは、多くの関係者の献身と多数の参加者、賛助くださった機関、会社のおかげで無事終了した。しかし本大会のメッセージである「持続可能な原子力の将来に向けた環太平洋協力」に照らしてアジアの原子力先進国を自負するわが国原子力産業界が、このテーマに即した地域への貢献やリーダーシップについての路線作りに大きな一歩を踏み出したのかを考えると、残念ながら心もとない。主催者である日本側からの強いメッセージと意気込みが不十分と感じる。再処理、高速炉とも本質的なこと以外に翻弄されており計画が大幅に遅れている。また、低迷する原子力発電所の稼働率など足元がぐらついているのではないか？もう一度日本が果たすべき責務から、自らの技術と経営を見直して、太平洋を含むアジアと向き合うべきである。

#### —参考文献—

- 1) “第16回環太平洋原子力会議から”, エネルギーレビュー, 336[1], (2009).
- 2) “東南アジア3国が原子力に期待”, エネルギーレビュー, 336[1], (2009).
- 3) Kee-Cheol Park, “2030 Vision for Korea's Nuclear Power”, 16 PBNC, Plenary1-1, 2008.
- 4) Myung seung Yang, “The mid- and long-term nuclear R&D program in Korea”, 16 PBNC, Plenary2-2, 2008.
- 5) Iyos Subki, Zaki Su'ud, “Nuclear Energy Development Program in Indonesia”, 16 PBNC, Plenary2-3, 2008.
- 6) Tatchai Sumitra, “Preparing for Nuclear Power in Thailand”, 16 PBNC, Plenary2-3, 2008.
- 7) Tran Huu Phat, “The Status of the Vietnam Nuclear Power Program”, 16 PBNC, Plenary2-3, 2008.

#### 著者紹介

中杉秀夫(なかすぎ・ひでお)



日本原子力産業協会  
(専門分野・関心分野)アジアとの原子力協力, 原子力産業国際分業, 原発支援請負方式

松井一秋(まつい・かずあき)



エネルギー総合工学研究所  
(専門分野・関心分野)エネルギー分析・研究開発, 原子力エネルギー利用など



## 報告

## 原子力に対する不安とは？—それにどう対処するのか

日本原子力学会シニアネットワーク連絡会(SNW)第9回シンポジウム報告

シニアネットワーク連絡会 林 勉, 金氏 顕, 石井正則

世界が原子力推進の方向に大きく動き出している。わが国でも、原子力立国計画を確立し、推進の方向は打ち出しているが、社会のコンセンサスは必ずしも十分ではない。SNWはこれまでに、社会と原子力界とのコミュニケーションのあり方などへの認識を深めるための活動を進めてきた。第9回シンポジウムではこれを掘り下げて“国民は原子力の何に不安と思っているのか”を明らかにし、それらにどう対処すべきかについて討論した。シンポジウムでは多くの視点から、様々な不安要因と対応策が具体的に示され、これらを解決するには、社会システムとして総合的な取組みが必要なことを提起した。

## まえがき

環境とエネルギー資源問題の解決には、原子力への依存が必須である。世界は原子力カルネッサンスを迎えており、わが国でも原子力立国計画の推進に本腰をいれて取り組むことが必要となっている。原子力の推進には国民の支持が不可欠であり、そのための国民の不安を可能な限り少なくすることが必要である。

国民の不安を軽減するためには、国民の不安の要因を正確に理解することが欠かせない。このため、シニアネットワーク連絡会(SNW)は2008年8月8日(金)、「原子力に対する不安とは？—それにどう対処するのか」のテーマでシンポジウム(於 東京大学武田先端知ビル)を開催した<sup>a)</sup>。

シンポジウムの第1部では、一般市民の不安感、原子力に対する不安の正体、およびそれらに起因する問題点を明らかにし、第2部では、パネル討論を通して、放射線と地震の事例から不安感を軽減するための対応策を示すことをねらいとした。

第1部の中村功氏(東洋大学教授)の「原子力と日本人の安心観」と題した基調講演については、別号で紹介の予定である。石川迪夫氏(日本原子力技術協会最高顧問)からは「原子力不安の正体」と題した基調講演で、JCOトラブルや中越沖地震の事例を分析、行政の対応が不安解消の役割を果たさなかったことや、経済的ゆとりができ、「安心立命」を求める風潮が背景にあることなどが指摘された。金氏顕(SNW代表幹事)からは「一般国民に原子力を安心して頂くための課題」と題した基調講演

*Symposium Report: What are anxieties about nuclear power and how to deal with them: Tutomu HAYASHI, Akira KANEUJI, Masanori ISHII.*

(2008年12月7日受理)

<sup>a)</sup> エネルギー問題に発言する会、エネルギー戦略研究会(EEE会議)と共催、日本原子力技術協会、日本原子力産業協会、日本原子力文化振興財団後援



会場風景

で、わが国の原子力発電は世界有数の品質を誇っているにもかかわらず稼働率が低いこと、エネルギーの安全保障政策の貧困さ、および社会的受容性の問題を指摘した。さらに、国民に開かれた透明性の高い原子力界とすることがなにより望まれ、一般国民の受容性を高めるカギを握っている関係者が、双方向のコミュニケーションを高める必要性も指摘した。

本稿では、これらの基調講演をもとに、第2部で行われた「放射線と地震に関する国民の不安にどう対処するか」に関するパネル討論の概要を報告する。

パネル討論には、消費者、地元住民、耐震技術者、メディア、事業者を代表し、それぞれ碧海西葵氏(ウイメンズ・エナジー・ネットワーク(WEN)会員、消費生活アドバイザー)、新野良子氏(柏崎市民、柏崎刈羽原子力発電所の透明性を確保する地域の会会長)、落合兼寛氏(日本原子力技術協会テクニカルアドバイザー、元日立、耐震設計技術者)、東嶋和子氏(ジャーナリスト)、武藤栄氏(東京電力常務取締役)に参加いただき、林 勉(エネルギー問題に発言する会代表幹事)を座長として進めた。

各パネリストの講演と討論を参考にし、不安感や対応策を以下に紹介する。



パネリスト

## I. パネリストの基調講演から

### 1. 放射線に対する女性(20~70代)の不安と関心

原子力には放射線への不安感があるが、放射線の利用はほとんど知られていない。アンケート調査によると、「放射線」という言葉にはほとんどの人達が「怖い」というイメージをもっている。なお、テロ、地震、ダイオキシンなど、その時々ニュースに左右されるものが、放射線より「怖い」と感じる比率が高い。「怖い」と感じる理由は自分の力で防げないもの、健康への悪影響の恐れ、被害の規模の大きさなどがあげられる。

一方、略語表記をやめることによって認知度が大きく変わる。一般市民(とりわけ女性)に対しては略語の使用をやめたうえ、魅力あるコミュニケーションをすることが望まれる。(パネリスト・碧海西葵氏の講演から)

### 2. 透明性の評価—住民の視点から

柏崎市の「地域の会」は、賛成、反対、中立の立場の住民が情報を共有することをめざしてスタートした。自治体、国、事業者への提言や住民への情報提供を行っており、その結果、情報公開や検査制度の改善などが進み、「地域の会」でも冷静な議論ができるようになってきた。情報公開・透明性の確保は、原因や結果の公表だけでなく経過を伝えること、安心・安全は信頼しあえることが前提である。メディアにはその影響の大きさを認識し、信頼に足る報道が求められる。信頼を取り戻すことが第一で、原子力の安心確保には時間がかかる。

新潟県中越沖地震では、事業者・国・自治体等の連携した姿が見えるようにする必要性が明らかになった。国のわかりやすい説明も重要である。さらに一歩進んで、法律にも住民の提案を取り入れることが望まれる。

また子供たちにも原子力の基本を学ばせ、情報をきちんと判断できる住民を育てていくことも必要である。

(パネリスト・新野良子氏の講演から)

### 3. 地震に関する国民の不安にどう対処するか

昨年の中越沖地震は想定を上回っていたが、柏崎刈羽原子力発電所の主要設備は壊れなかった。この地震で大きな加速度の原因となった周期の長いパルス波は建物内で緩和され、大きな影響を及ぼさなかったからである。

これに対し、屋外では地盤で増幅され厳しい荷重条件となった。このことから、技術者は原子炉建屋内の設備の健全性について「安心」できるが、この「安心」を一般市民に説明するのは難しい。用語の難しさと技術分野の広範さのほか、技術者は解明されていない現象を経験で補完していることにもある。

耐震安全の余裕は、これまでは「設備にどのくらい余裕があるか」ではなく、「余裕をもった地震動」の大きさを設定し、それに耐えることを評価してきた。安全の理解を得るにはこのような手法でなく、地震という不確かさに対し設備がもつ「ロバストさ(強靱さ)」をきちんと説明し、理解してもらうことが必要であろう。

そのうえで一般市民に安心してもらうには、専門家としての信頼がどのようにして得られるかが課題となる。このためには、継続的で真摯な努力、迅速な対応とともに、専門家間の見解の統一が必要である。

(パネリスト・落合兼寛氏の講演から)

### 4. 放射線と地震に対する国民の不安にどう対処するか

国民は、放射能温泉のような体に良いといわれる放射能はお金を払ってでも手に入れる。山梨の増富温泉では、浴用で0.012ミリシーベルト(mSv)の外部被曝があり、飲用・吸入で0.015 mSvの内部被曝がある。これに対し、漏れた放射性物質が放射能泉の影響よりはるかに少ない量であっても、受け入れられていない。

原子力発電所では放射能が外部に放出されないよう、重要度をつけて耐震設計を行っている。被害を受けた施設は重要度が低いものであったことをきちんと説明すべきである。中越沖地震で漏洩した放射能は、人体に影響がない程度の極めて「微量」であった。これを放射能温泉での被曝量と比較すれば、漏れた放射能の「微量」さが理解できたであろう。

自然放射線(バックグラウンド)すら知らない国民が多いので、放射能温泉のような、一般市民の体験に則した例を使った説明が重要である。放射能・放射線以外のリスクとの比較も重要である。産業、農業、医療用のような放射線利用の現状にも言及すべきである。

(パネリスト・東嶋和子氏の講演から)

### 5. 柏崎刈羽原子力発電所における新潟県中越沖地震後の取組みと現状

中越沖地震により、柏崎刈羽原子力発電所では3号機所内変圧器火災、6号機使用済燃料プール水の電線管を通じた非管理区域への滴下と海中放出、7号機復水器の滞留ヨウ素と粒子状放射性物質の大気放出などの被害があった。

漏洩した放射性物質の線量は、周辺監視区域境界外の線量限度(1.0 mSv)、発電所周辺の線量目標値(0.05

mSv)に比べ、極めて微量であった。設備の健全性については、原子力安全・保安院の指示による点検・評価計画に基づき、点検や地震応答解析を実施中である。

基準地震動(Ss)に対する耐震安全性向上のため、地質調査を実施し、その結果に基づき規準地震動と建屋の揺れを設定、配管サポートの追加など、耐震設計で安全性の向上を図っている。災害に強い発電所に向けた対策として、主に耐震クラスの低い設備に対しても、耐震性を強化している。例えば、消火設備の損傷対策(地上化、フレキシブルジョイントの採用、水源多様化等)や自衛消防体制の強化などである。

さらに、放射線管理の強化、情報の透明性確保などの活動を通し、より災害に強い発電所にする取組みがなされている。また、今回の地震により得られた知見や教訓の共有も図られている。

(パネリスト・武藤栄氏の講演から)

## II. パネリストとフロアとの討論から

フロアからの質問や意見の主なものを紹介する。

(1) 風評被害や微量放射能漏れへどう対処したらよいか？

Q 風評被害の回避や実害ない微量放射能漏れ事象等へ適切に対処するための、放射線の正しい知識の普及が必要であるが、どのような方法がよいか？

A 小学校から放射線教育を行うべきであり、フランスではこれがうまく行われている。なお、このような教育は上からの押し付けでないようにする必要がある。

(2) 女性への説明—男性から説明でも受け入れられるか？

Q 女性に対する説明は、女性からの説明の方が受け入れられやすいか？また、どのような説明が受け入れられやすいか？

A 一般的には女性の説明の方が受け入れられやすいが、必ずしも女性にこだわる必要はない。男性が説明する場合、女性の思考のアプローチを理解したうえで、複合的な視点からの説明が望ましい。

(3) 事故時の速報の発信—事業者の情報は信頼されるか？

Q 事故時の情報を事業者が発信する場合、地域住民の信頼が得られるか？

A 事業者は過去の改ざん問題等からの信頼回復途上にあり、信頼が得られるかどうか疑問である。複数の住民側(地方自治体等)からの情報発信が望ましい。また、災害時には地元行政は対応で手詰まりになるので、国や県がキチンとした情報をタイムリーに出す必要がある。

(4) 専門家とメディアの説明のギャップは埋められるか？

Q 例えばフランスでは、科学的な記事を書く記者は基礎的素養のある人に限定されていると聞いているが、日本では原子力のバックグラウンドのない記者も記事を書いている。このような状態で、専門家とメディアの説明のギャップは解消できるのか？特に社会部記者による報道は正しく伝わらないのではないか？

A メディアは専門家のいうことをそのまま伝えるのではないため、当然ながらギャップは生じる。また、メディア側にもテレビや新聞等、それぞれの限界があるので、情報を受ける側もリテラシーが必要である。

一方、必ずしもバックグラウンドのある人だけが書いているわけではないので、そのような記者の取材に対しても正しい情報を提供する必要があることや、オフサイトセンターの有効利用、さらには事業者も社会部の記者に対応できる体制を考えていることが紹介された。

(5) 微量放射線の影響を判断しない県や国の行政の改善策はあるか？

Q 県や国の行政専門家は、微量の放射線レベルの事象であっても安全についての判断を行わない。緊急時の県や国の判断は重要である。どのようにしたらよいか？

A 生のデータを出したうえ、その数値はどの程度の影響を与えるのか評価を加えることが必要である。例えば、柏崎の火災の映像に対しては、原子力安全委員長等が、安全上問題ない旨発言するべきであったとの意見が出された。

また、事業者のモニタの数値は県に連絡が届かなかったが、県は近くのモニタのデータを持っていた。しかしそのデータは一度しか流されなかった。データはどこでも出せるところから繰り返し出すことが重要である。

なお、フロアから行政のかかわりに関して、今の安全規制は事業者を規制しているところに潜在的な問題があることも指摘された。事業者を規制する規制と同時に、国民の安全を守る規制が必要な時代になったとの意見がだされた。

(6) 耐震設計の教科書が必要、また設計者のパワーの強化も必要！

Q 耐震設計の考え方は非常にわかりにくい。なぜ適切な教科書がないのか、また設計者のパワー強化策はあるのか？

A 耐震設計の基準を作った時に考えをまとめて教科書にすると良かったが、機械学会で議論された当時は、教科書を作ることへの関心が薄かったのも原因であろう。

耐震設計の人材に関しては、原子力発電所の建設

が少なく、構造技術のような地味な分野への人材投入が難しくなっている。特に指導者が少ないことが問題で、原子力界全体で人材を育成、活用してゆく必要があるとの意見が出された

(7) 柏崎原子力発電所の運転再開は！

Q 柏崎原子力発電所は安全停止し、問題となるような放射能漏れもなかったにもかかわらず、修理に1年以上も要している。これは行政の指導なのか、あるいは世間の評判を気にしているのか？

A 安全を確認すべき事項はたくさんあり、現在、着実に遂行している。設計を超える地震で、原子力災害に直接影響する機器は大丈夫であったが、それら以外には壊れたものもあり、直す必要があること、どこまで用心深くやるのかを踏まえて、耐震設計が見直されていることが説明された。

なお、原子力学会がもっと横断的に評価する必要があること、リスクの議論ばかりでベネフィットの議論が欠如していること、およびこの分野に維持基準の観点がないことが指摘された。

(8) 原子力発電所の集中設置やミサイル攻撃に対する危険性！

Q 原子力発電所の集中設置にはリスクがあり、分散した方がよいのではないかと。また、外国からのミサイル攻撃に対する防護策は？

A 人材や運転・保全などの知見を共有できることなど、まとめて設置する方が効率が良いこともあるとの見解が示された。

またミサイル防護は、国全体の外交努力でなされるべきものであるとの見解が示された。なお、原子力発電所をミサイル攻撃すると、その国は世界から抹殺されるとの指摘もあった。

(9) 高放射能に対する不合理な恐怖に対し、きちんとした説明が必要ではないか？

Q 低レベルの放射能はラドン温泉などとの比較で安心してもらえらるとしても、チェルノブイリ事故などで放出された高レベル放射性廃棄物の危険性に対しては、どのように説明すれば？

A チェルノブイリと日本の発電所の炉型の違いとともに、数値の意味についても正確に説明する必要がある。

## ま と め

本シンポジウムでは、基調講演や後半の討論で様々な問題が提起された。これらを整理すると、以下の5点に要約される。

1点目は、原子力界の関係者は、これまで原子力村の視点からしか見てこなかったのではないかと反省をし、もっと国民や社会の視点を加える必要があること、2点目は、関係機関がそれぞれの自己目的で動いて、総合的視点が不足していたのではないと思われること、3点目は、放射線や耐震問題は社会がもっと知りたいと思っており、どう説明するかが技術者に課せられた課題であること、4点目は知りたい情報をわかりやすく迅速に提供すること、5点目は国民から見て信頼される技術者、スピーカーが見えていないこと、である。

原子力は、国民、政府、自治体、事業者など様々な構成員からなる社会システムであることを認識しなければならない。システムにはそれぞれの目的があるが、原子力社会システムの目的は、国民の最大利益を追求することであろう。そういう視点に立って、関係機関が自らのあり方を考え、この社会システムを再構築することが、国民の不安軽減に役立つことになるのでなかろうか。

シンポジウム終了後のアンケートでは、約8割の参加者から満足との回答が寄せられたが、同時に、小中学校教員への原子力や放射線教育と、メディアへの適切な情報提供などに対する、SNWへの期待が寄せられた。

今日の議論や参加者のアンケートの結果を踏まえ、この思いを伝えていく必要を強く感じた。

## 著 者 紹 介

### 林 勉(はやし・つとむ)



元(株)日立製作所  
(専門・関心分野)リタイア後「エネルギー問題に発言する会」を結成、原子力の社会的受容性向上に注力

### 金氏 顕(かねうじ・あきら)



三菱重工業(株)  
(専門・関心分野)SNW 代表幹事として原子力シニアの社会貢献活動の開拓・推進に注力。

### 石井正則(いしい・まさのり)



元(株)IHI  
(専門・関心分野)一般市民、教員志望学生等に対する原子力の理解促進活動に注力

連載  
講座

## 軽水炉プラントの水化学

## 第2回 水化学の基礎—腐食と電気化学

東北大学 原 信義

## I. はじめに

我が国で軽水炉発電プラントが導入されてからすでに30年以上が経過しており、プラントの高経年化対策が必要不可欠となっている。この場合、冷却水と燃料被覆材および構造材との相互作用による腐食を監視、制御することは極めて重要である。そのためには、冷却水である高温高压水中の腐食現象を理解し、適切な水化学制御を実施することが必要である。高温高压水中の腐食といえども基本的には通常の水溶液腐食と変わることがなく、腐食挙動を理解するために局部電池モデル、電位-pH図、混成電位理論(分極曲線の重ね合わせの原理)などが役立つ。本稿ではまず、腐食の電気化学的基礎について解説した後、沸騰水型軽水炉(BWR)の冷却水環境におけるステンレス鋼の腐食電位に及ぼす溶存酸素および溶存水素の影響を、混成電位理論を用いることによって説明できることなどを示す。

## II. 腐食の電気化学的基礎

## 1. 腐食の局部電池モデル

水溶液腐食の機構を説明するために“局部電池”モデルが用いられる。第1図に示すように、腐食している金属表面には1次電池の負極に相当するアノードと正極に相当するカソードの部分が存在し、電池が構成されていると考えるモデルである。アノードでは金属(M)が酸化されて金属イオン( $M^{z+}$ )となって溶出するか、あるいは酸化物、水酸化物の皮膜を形成する反応(アノード反応)が起こる。カソードでは溶液中の酸化体(Ox)が還元体(Red)に還元される反応(カソード反応)が起こる。

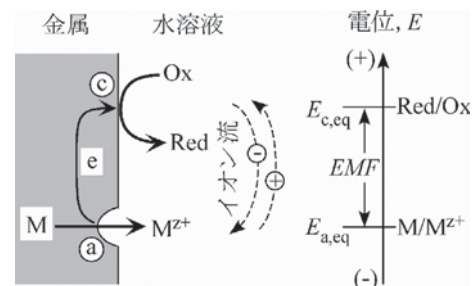
塩酸や硫酸などの非酸化性の酸の中に鉄を浸けたときの水素発生型の腐食を例にすると、腐食の局部電池反応は次式で表される。

*Water Chemistry of LWR-Plants(2); Fundamental of Water Chemistry—Corrosion and Electrochemistry*: Nobuyoshi HARA.

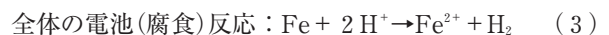
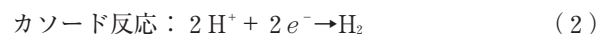
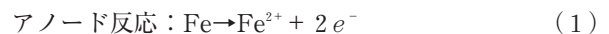
(2008年 8月4日 受理)

各回タイトル

第1回 軽水炉プラントにおける水の役割と水化学制御



第1図 腐食の局部電池モデル



中性およびアルカリ性溶液では $\text{H}^+$ イオンが少ないため、水の還元による水素発生が起こる。



これはアルカリ溶液中でアルミニウムが腐食するときのカソード反応である。淡水や海水などの中性溶液中における鉄の腐食のカソード反応は、溶存酸素の還元反応である。



アノード反応は(1)式と同じであるが、 $\text{Fe}^{2+}$ の加水分解によって $\text{Fe}(\text{OH})_2$ が生成する。これがさらに溶存酸素によって酸化されると褐色の $\text{FeOOH}$ となる。これが錆である。

金属表面にアノードおよびカソードとして働く部分が均一に分布し、かつその位置が時々刻々と変化するときには全面が均一に腐食する。これが全面腐食あるいは均一腐食と呼ばれる腐食である。一方、アノード部とカソード部がマクロ的に分離された状態ではアノード部のみが選択的に腐食する。これが局部腐食あるいは不均一腐食である。このような局部腐食の代表例として、孔食、すきま腐食、粒界腐食、異種金属接触腐食(ガルバニック腐食)などが挙げられる。

## 2. 腐食反応の熱力学

## (1) 平衡電位

1次電池において起電力が生じるのは、正極と負極の間に電位差があるからであり、これは2つの電極反応の平衡電位の差に起因している。(5)式の電気化学反応に対する平衡電位 $E_{eq}$ は(6)式のNernstの式によって与えられる<sup>1)</sup>。



$$E_{\text{eq}} = E^0 + \frac{RT}{zF} \ln \left( \frac{a_{\text{A}}^{\nu} \cdot a_{\text{B}}^{\nu}}{a_{\text{C}}^{\nu} \cdot a_{\text{D}}^{\nu}} \right) \quad (6)$$

ここで、 $E^0$ は標準電極電位と呼ばれ、反応に関与する化学種が標準状態にある時の電位である。また、 $R$ は気体定数、 $T$ は絶対温度、 $z$ は反応に関与する電子の数、 $F$ はFaraday定数、 $a$ は化学種の活量である。

標準電極電位の大小関係を示したのが電気化学系列であり、金属の溶解・析出反応を中心にまとめたものを第1表に示す。この表の下から上に向う序列がイオン化傾向の大小の順序に対応している。開回路状態にある電池の起電力EMFは正極および負極の平衡電位( $E_{\text{c,eq}}$ および $E_{\text{a,eq}}$ )の差で与えられ、これと電池反応のGibbs自由エネルギー変化 $\Delta G$ との間には次式の関係が成り立つ。

$$EMF = E_{\text{c,eq}} - E_{\text{a,eq}} = -\Delta G / zF \quad (7)$$

1次電池では $EMF > 0$ であるから $\Delta G < 0$ であり、電池反応が自発的に起こる熱力学的条件が整っている。 $EMF > 0$ の条件は、第1表において $E^0$ が高い反応および低い反応をそれぞれ正極および負極反応として組み合わせることにより成立する。水素発生反応( $E^0 = 0.00 \text{ V}$ )を正極反応とした場合、 $E^0 < 0 \text{ V}$ の亜鉛、アルミニウム、鉄などの溶解反応は負極反応になるから、これらの金属は非酸化性の酸中で局部電池を構成して水素発生型の腐食を生じることになる。

## (2) 電位-pH図

(1)式のような金属の単純な溶解・析出反応には $\text{H}^+$ イオンは関与しないから、その平衡電位はpHに依存しない。しかし、水素発生反応((2')、(2)式)や溶存酸素還元反応((4)式)には $\text{H}^+$ あるいは $\text{OH}^-$ イオンが関与するので、平衡電位は $\text{pH} (= -\log a_{\text{H}^+})$ に依存して変化する。

第1表 電気化学系列(25℃における標準電極電位 $E^0$ )

電極反応	$E^0/\text{V vs. SHE}$
$\text{Au}^{3+} + 3e = \text{Au}$	1.50
$\text{Pt}^{2+} + 2e = \text{Pt}$	1.118
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e = 2\text{H}_2\text{O}$	1.229
$\text{NO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2e = \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	0.934
$\text{Ag}^+ + e = \text{Ag}$	0.799
$\text{Hg}_2^{2+} + 2e = \text{Hg}_2$	0.799
$\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu}$	0.337
$2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_2(\text{SHE})$	0.000
$\text{Pb}^{2+} + 2e = \text{Pb}$	-0.126
$\text{Sn}^{2+} + 2e = \text{Sn}$	-0.136
$\text{Ni}^{2+} + 2e = \text{Ni}$	-0.250
$\text{Fe}^{2+} + 2e = \text{Fe}$	-0.440
$\text{Zn}^{2+} + 2e = \text{Zn}$	-0.763
$\text{Al}^{3+} + 3e = \text{Al}$	-1.662
$\text{Mg}^{2+} + 2e = \text{Mg}$	-2.363
$\text{Na}^+ + e = \text{Na}$	-2.714
$\text{Ca}^{2+} + 2e = \text{Ca}$	-2.866
$\text{K}^+ + e = \text{K}$	-2.925
$\text{Li}^+ + e = \text{Li}$	-3.045

金属が水によって酸化されて酸化物や水酸化物になる反応も、同様にしてpH依存性を持つ。したがって、腐食の可能性を議論したり、腐食生成物を推定する時には電位のみならず、溶液のpHを考慮に入れることが必要である。

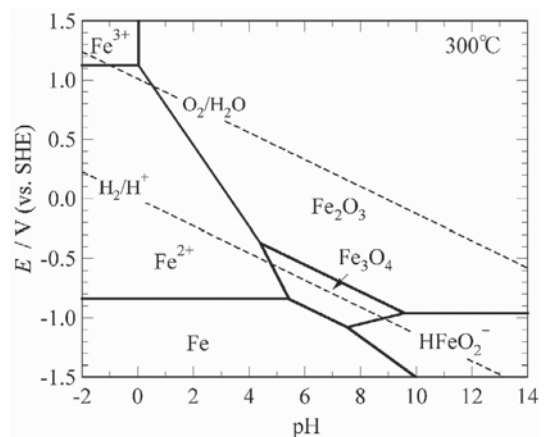
このような考え方にに基づき、金属と水との反応によって生成する化学種が熱力学的に安定に存在する範囲を図示したものが電位-pH図である。常温では、熱力学データに基づいてほとんど金属の電位-pH図が作成されている<sup>2)</sup>。一方、高温ではイオン種の熱力学的データが少ないため、適当な方法を用いて推算することが必要である。そのためにCriss-Cobbleのエントロピー対応原理と改良HKF(Helgeson-Kirkham-Flower)モデルが用いられている<sup>3)</sup>。第2図に、改良HKFモデルに基づいたソフトウェアパッケージSUPCRT 92<sup>4)</sup>を用いて計算した温度300℃(飽和蒸気圧8.59 MPa)におけるFe-H<sub>2</sub>O系の電位-pH図を示す。図中の直線で囲まれた領域は、各物質が安定に存在する領域を表しており、金属(Fe)が安定な領域は不感性感、金属イオン種( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{HFeO}_2^-$ )が安定な領域は腐食域、金属酸化物( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )が安定な領域は不働態域と呼ばれている。第2図から、純水(温度300℃でpH 5.7)中の鉄は $\text{Fe}_3\text{O}_4$ の形成によって自発的に不働態化することが推察される。このようにして電位-pH図は、与えられた環境条件(電位とpH)における金属の腐食挙動を推定するための腐食状態図として利用することができる。

## 3. 水溶液腐食反応の速度論

熱力学的には腐食反応が起こる可能性があっても、その速度が極めて小さければ腐食は観察されない。腐食速度を知るためには電極反応の速度論を理解することが必要である。

### (1) 単一電極反応の速度

腐食の局部電池は、金属を導線として常に短絡されているから起電力はゼロである。したがって、局部電池における正極および負極の実際の電位を $E_c$ および $E_a$ とす



第2図 300℃におけるFe-H<sub>2</sub>O系の電位-pH図  
(イオン種の活量:  $10^{-6}$ )

れば  $E_c = E_a$  であり、これは2つの反応の平衡電位 ( $E_{c,eq}$  と  $E_{a,eq}$ ) の間に位置する。このように、各電極の実際の電位が平衡状態からずれることを分極、平衡電位と分極時の電位との差  $\eta (=E - E_{eq})$  を過電圧と呼ぶ。そして、電極反応の駆動力である過電圧とその速度である電流との関係を表したものが分極曲線(電流-電位曲線)である。

電極反応に関与する化学種の濃度が十分に高いときには、熱活性化過程が反応の律速段階となり、(8)式のような単一電極反応の電流  $i$  は(9)式の Butler-Volmer の式で与えられる<sup>1)</sup>。

$$M^{z+} + ze \xrightleftharpoons[i_a]{i_c} M \quad (8)$$

$$i = i_a + i_c = i_0 \left[ \exp\left(\frac{\alpha zF}{RT} \eta\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha)zF}{RT} \eta\right) \right] \eta \quad (9)$$

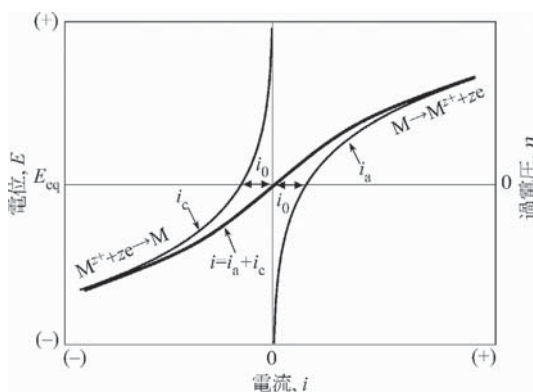
ここで、 $i_a$  は部分アノード電流(正符号)、 $i_c$  は部分カソード電流(負符号)である。 $i_0$  は交換電流であり、(8)式におけるアノード反応とカソード反応の速度が等しい時の反応速度を表す。 $\alpha$  は対象因子あるいは移動係数と呼ばれ、多くの場合、0.3~0.7の間の値をとる。(9)式を図示すると第3図のようになる。過電圧が大きい時には(9)式の第1項もしくは第2項だけを考えればよく、過電圧と電流の関係は次式の Tafel の式で表される<sup>1)</sup>。

$$\eta = a + b \log i \quad (10)$$

ここで、 $a$  と  $b$  は定数である。Tafel 勾配  $b$  は通常 0.06 ~ 0.24 (V/decade) の間の値をとる。

(2) 複合電極反応の速度

酸中の鉄の腐食では、アノードおよびカソードサイトで(1)および(2)式の異なる2つの電極反応が同時に起っている。この2つの反応の分極曲線を重ねて表示すると第4図のようになる。この図は、電流の絶対値の対数を横軸にとり、アノードおよびカソード反応の電流値を同一方向に表示しており、Evans の分極図と呼ばれている<sup>1)</sup>。2つの Tafel 直線の交点(A)の電位と電流がそれぞれ腐食電位  $E_{corr}$  と腐食電流  $i_{corr}$  を与えるので、腐食を考える場合に都合の良い図である。例えば、第4図



第3図 単一電極反応の分極曲線

において、水素発生反応の交換電流密度  $i_0$ 、 $c$  が大きいと、カソード分極曲線は高電流側にシフトするので、腐食速度は増加すること(A→B点)が予想される。このようにして、酸中の鉄の腐食速度が不純物の種類と量によって変化する現象を説明することができる。また、溶液の pH を高くしたとき、水素発生反応の平衡電位が低くなるためカソード分極曲線は低電位側にシフトし、腐食速度は低下すること(A→C点)も容易に理解できる。このように分極曲線の重ね合わせ理論(混成電位理論)は、混成電位である腐食電位と腐食電流の変化を考える上で有用である。

中性溶液中で鉄が腐食する際のカソード反応である溶存酸素の還元反応((4)式)は、反応速度が大きくなると、溶液の沖合から金属表面への酸素の拡散過程によって支配されるようになる。このような拡散支配の反応における電流と過電圧の関係は、拡散限界電流  $i_l$  を用いて次式で表される。

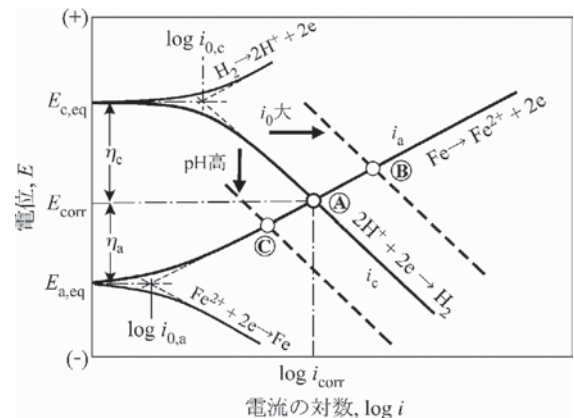
$$1 - \frac{i}{i_l} = \exp\left(-\frac{zF}{RT} \eta\right) \quad (11)$$

$$i_l = zFD_k \frac{C_k}{\delta} \quad (12)$$

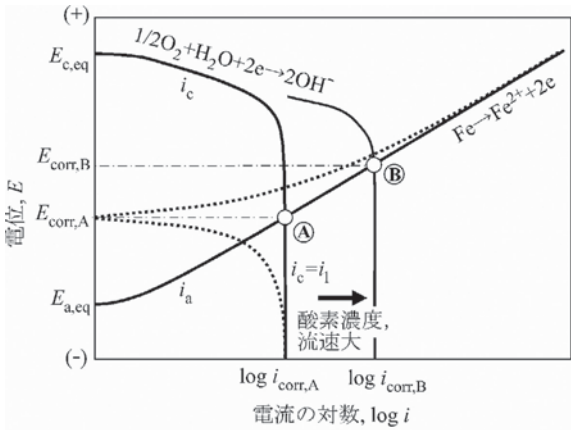
ここで、 $D_k$  と  $C_k$  とは拡散種  $K$  の拡散定数と溶液沖合での濃度、 $\delta$  は拡散層の厚さである。(11)式で過電圧が十分大きいときには  $i = i_l$  で一定となる。第5図に示すように、鉄の溶解域は拡散限界電流領域にあるので、腐食電流は限界電流に等しくなる(A点)。拡散限界電流は電極表面に供給される酸素濃度に比例するので、溶存酸素濃度あるいは流速の増大によって増加し、その結果、腐食速度は速くなる(B点)。

4. 不動態

鉄は希硝酸中では不動態化しないが、濃硝酸中では不動態化することは古くから知られている。このことを説明するための分極図を第6図に模式的に示す。鉄を非酸化性の酸中でアノード分極すると、電流は Tafel の式に従って増加し、数百 mA/cm<sup>2</sup>に達するとほぼ一定とな



第4図 酸中の鉄の腐食反応(水素発生型腐食)の分極図



第5図 中性溶液中における鉄の腐食反応(酸素消費型腐食)の分極図 (点線は実測される外部分極曲線を示す)

るが、ある電位を境として数  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  まで急激に減少する。これが不働態化現象である。希硝酸中で不働態化しないのはカソード反応である硝酸の還元による電流が小さく、そのためアノードおよびカソード分極曲線の交点が活性溶解する領域内(A点)にとどまるからである。硝酸濃度が高くなり、その還元電流がアノード溶解のピーク電流を超えると、2つの分極曲線の交点は不働態領域内(B点)に入るので、自発的な不働態化が起こる。鉄に13%以上のクロムを添加した合金であるステンレス鋼は、第6図中に示したように、鉄に比べると活性溶解のピーク電流が何桁も低いから、希硝酸のように酸化力が比較的弱い環境でも容易に不働態化する(C点)。

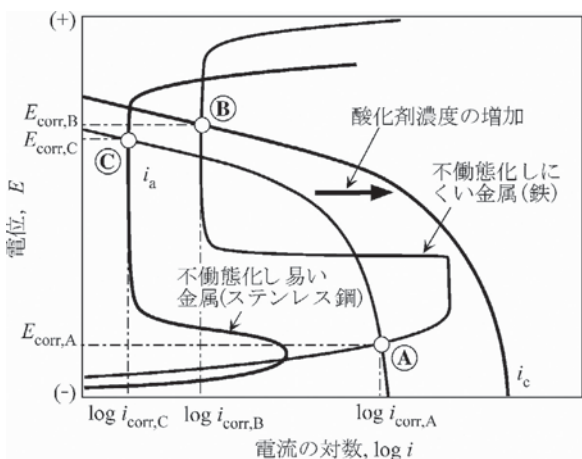
5. 軽水炉における構造材と燃料被覆材の腐食の電気化学

(1) ステンレス鋼の腐食電位の分極図による解釈  
BWRにおけるオーステナイトステンレス鋼の応力腐食割れ(SCC)感受性は電位に強く依存し、Type 304鋼では、電位が $-0.23\text{ V}$ (vs. SHE)以上になるとクラック伝播速度が急速に増加する。したがって、SCCを抑制

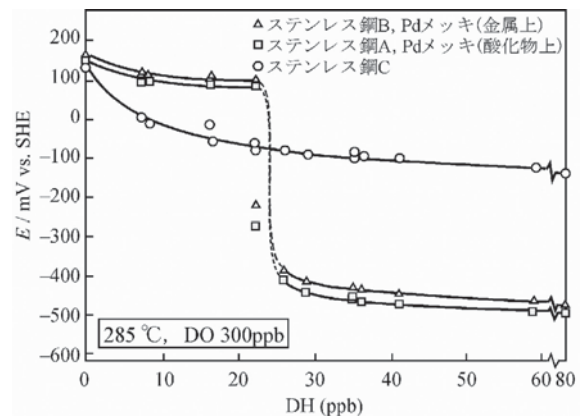
するために腐食電位を臨界電位( $-0.23\text{ V}$ )以下に保持することが有効であり、そのために給水に水素を注入する方法が採用されるようになってきた。この場合、ステンレス鋼の表面に貴金属をコーティングしておく、化学量論量もしくはこれより少ない水素の注入で腐食電位をSCCの臨界電位以下に下げることが可能である<sup>5,6)</sup>。このような貴金属のコーティングの効果は分極図を用いることによって説明することができる。

第7図に、温度 $285^\circ\text{C}$ 、溶存酸素(DO)濃度300 ppbの純水中におけるType 316ステンレス鋼およびPdメッキした316鋼の腐食電位に及ぼす溶存水素(DH)濃度の影響を示す<sup>5,6)</sup>。初期状態(DH=0)の腐食電位は150 mV付近にある。DHを増加させるとステンレス鋼の電位は低下するが、再結合に必要な化学量論濃度(37.5 ppb)を超えても $-100\text{ mV}$ 以下には下らず、SCCの臨界電位以下にするためには過剰の $\text{H}_2$ が必要である。これに対して、Pdコーティングしたステンレス鋼では、DH濃度が24 ppbになった時に電位は100 mVから $-400\text{ mV}$ 以下まで急激に低下している。触媒金属を使うと、少ない水素注入量で電位を希望するレベルまで低下させることができる。

第7図で見られる腐食電位の変化は第8図に示す分極図を用いて説明することができる<sup>5,6)</sup>。ここでは、腐食電位を決定しているアノード反応はステンレス鋼の活性溶解・不働態化反応と溶存水素の酸化反応であり、カソード反応は水の還元による水素発生反応((2')式)と溶存酸素の還元反応((4)式)であると考えている。ステンレス鋼の活性溶解電流は小さいこと、 $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ および $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 系の酸化還元反応の交換電流密度 $i_0$ はステンレス鋼上では小さく、Pd上では大きいこと、ならびに $\text{O}_2$ 還元反応は拡散律速であることを仮定している。初期状態はDH濃度ゼロであるので、ステンレス鋼の腐食電位は鋼のアノード分極曲線と鋼上の $\text{O}_2$ 還元反応のTafel直線の交点で与えられる( $E_i$ )。この状態で水素を注入したとき、ステンレス鋼上での再結合が不完全で溶存 $\text{O}_2$ 還元

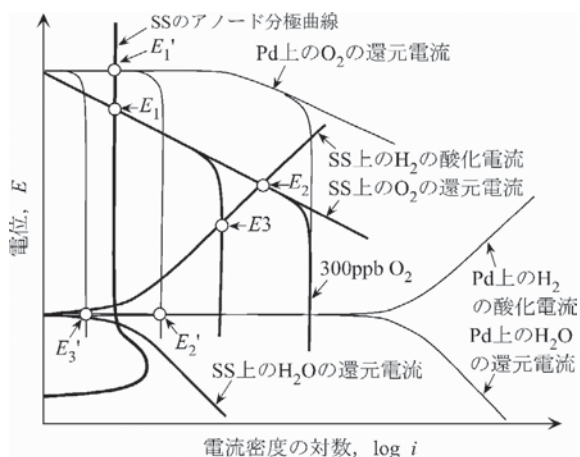


第6図 不働態化現象を示す金属の分極図



第7図  $285^\circ\text{C}$ 、DO濃度300 ppbの純水中におけるType 316ステンレス鋼およびPdコーティングしたステンレス鋼の腐食電位に及ぼすDH濃度の影響<sup>5,6)</sup>





第8図 DH濃度による腐食電位の変化を説明するための分極図(Niedrachら<sup>5,6)</sup>らが提案した模式図を改良

反応の限界電流が流れ続けると、これとH<sub>2</sub>酸化反応のTafel直線との交点が腐食電位となり、E<sub>1</sub>よりやや低下する(E<sub>2</sub>)。時間の経過によって、DO濃度は徐々に減少するので腐食電位も次第に低下する(E<sub>2</sub>→E<sub>3</sub>)。Pdメッキしたステンレス鋼では、O<sub>2</sub>還元反応の交換電流が大きいので、初期の腐食電位はやや高いところに位置する(E<sub>1</sub>')。また注入H<sub>2</sub>はO<sub>2</sub>との再結合によって容易に消費されるため、DH濃度が低い間は水素電極反応は起こりにくく、電位はE<sub>1</sub>'付近に停滞することになる。DH濃度が高くなり、O<sub>2</sub>のほとんどが再結合で除去され、残りのH<sub>2</sub>によって水素電極反応の電流が流れるようになると、電位は急激に水素電極反応の平衡電位付近まで低下して一定となる(E<sub>2</sub>', E<sub>3</sub>')。

(2) ジルコニウム合金の腐食の電気化学的機構

燃料被覆管として用いられているジルコニウム合金の酸化は、母材/酸化物および酸化物/水界面における以下の局部電池反応によると考えることができる。

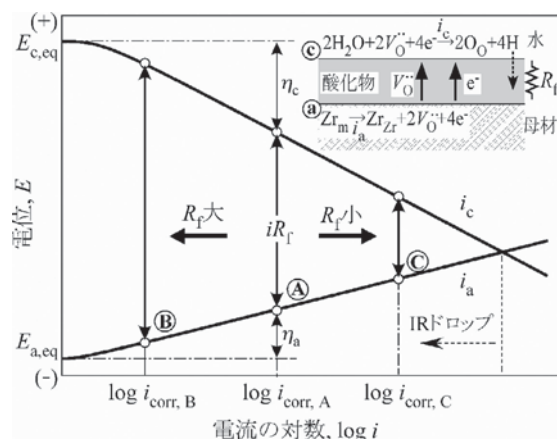
母材/酸化物界面(アノード)：



酸化物/水界面(カソード)：



ここで、Zr<sub>m</sub>は合金中のZr原子、Zr<sub>z</sub>とO<sub>o</sub>は酸化物ZrO<sub>2</sub>の正規の格子位置を占めるZrとO原子、V<sub>o</sub>は酸素イオン空孔を示す。酸化皮膜中では、酸素イオン空孔と電子が母材側から水側に向かって移動するので、酸化皮膜は第1図の局部電池における水溶液(イオン伝導体)と金属(電子伝導体、電極を結ぶ導線)の両方の働きを兼ねることになる。ただし、ZrO<sub>2</sub>中の電子と酸素イオン空孔の移動速度は遅いため、酸化皮膜中に電子とイオン移動に対する抵抗R<sub>f</sub>が存在することになり、電流が流れるとアノードとカソードの間にオーム降下(IRドロップ)を生ずる。このような場合の分極図を第9図に示す。IRドロップがあると、その分だけ(13)、(14)式の反応の過電圧η<sub>a</sub>、η<sub>c</sub>が減少するので、IRドロップがない場合に比べて腐食速度は小さくなる(A点)。このように



第9図 高温水中のジルコニウムの腐食反応の分極図

分極図を用いると、皮膜抵抗R<sub>f</sub>の大小による腐食速度の増減(B, C点)を理解することができる。実際の酸化皮膜は緻密で薄い内層(バリア層)と多孔質で厚い外層からなるので、その酸化過程は複雑であるが、酸化皮膜の抵抗が反応速度を支配する重要な因子であることは変わらない。ノジュラー腐食やシャドー腐食などの局部腐食も電気化学的な機構で説明される場合がある。

IV. おわりに

腐食の局部電池モデルに始まり、腐食反応の熱力学と速度論の基礎を解説した。混成電位は分極図を用いて考えることができ、これによって軽水炉の冷却水環境におけるステンレス鋼の腐食電位に及ぼす溶存水素の影響を説明できることを示した。本稿が水化学に携わる技術者および科学者に役立つ、水化学制御の発展につながれば幸いである。

—参考文献—

- 1) 杉本克久, 材料電子化学, 日本金属学会, (2006).
- 2) M. Pourbaix, *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*, NACE, Houston, (1974).
- 3) 日本原子力学会編, 原子炉水化学ハンドブック, コロナ社, (2000).
- 4) J. W. Johnson, E. H. Oelkers, H.C. Helgeson, *Comp. Geosci.*, **18**, 899(1992).
- 5) L. W. Niedrach, *Corrosion*, **47**, 162(1991).
- 6) Y.-J. Kim, L. W. Niedrach, M. E. Indig, P. L. Andresen, *JOM*, **44**, 14(1992).

著者紹介

原 信義(はら・のぶよし)



東北大学大学院工学研究科  
(専門分野/関心分野)材料電子化学, 腐食防食学

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9回 VIII. 壁が作る燃料をどうするのか

九州大学 深田 智, 東京大学 小田卓司

## I. 壁内の燃料製造に関する因子

D-T 燃焼を当面の目標にする D-T 核融合炉では、燃料トリチウム(T)を燃焼させながら、炉心を取り巻くブランケットで熱中性子領域の ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ 、高エネルギー中性子領域の ${}^7\text{Li}(n, \alpha')\text{T}$ 反応により製造し、ブランケット外で連続的に回収する。 $\beta$ 線放出核種のトリチウムは天然にはほとんど存在しないので、D-T反応で発生する1個の中性子により、1個のトリチウムを発生回収しないと持続的D-T燃焼はできない。ブランケット外での損失を考慮に入れると、1以上の増殖率維持が常に必要である。設計上の局所増殖率を1以上にすることは可能であっても、炉燃焼維持のため加熱その他設備用の窓も多く、1個の核分裂反応から2.4個の中性子が放出される核分裂炉の場合と違って、現実問題として核融合炉全体の実質トリチウム増殖率を1以上にするためには、中性子増倍材のBeを入れるとともに、適切効率的なブランケット設計が必要である。ブランケットは多様な役割を課されており、ITER(イーター)のテストブランケットモジュール(TBM)で参加各国いくつかの様式が提案され、鋭意研究されている<sup>1)</sup>。

ブランケットは、トリチウム製造とともに、熱回収、 $\gamma$ 線遮蔽等の重要な役割をなし、マクロな観点で考える装置設計のためには、熱、物質(T)、粒子線の収支式を連立して解く必要がある。ミクロな観点で考えると、物理的形状により固体ブランケット( $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{SiO}_4$ ,

$\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ ,  $\text{LiAlO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ 等)と液体ブランケット(Li-Pb共融合金,  $\text{LiF-BeF}_2$ 溶融塩混合物(Flibeと通常呼ばれる), Li等)に分類した上で、多くの関係因子を考慮した計算が必要である。

例えば、セラミック固体ブランケット内での燃料トリチウム発生と回収をシミュレーションするため、必要な情報や考慮に入れるべき点は次の通りである。

- (1) 中性子照射下で格子欠陥を含む多結晶構造である
  - (2) 1 nm程度のサブミクロ細孔から1 mm程度までのマクロ細孔構造をしている
  - (3) 水素-酸素反応に起因して、ブランケットを構成する化合物の酸素組成が整数比からずれる、いわゆる酸素不定比性が生じる
  - (4) 水素化学種、水蒸気化学種、それ以外の化学種が同時に気流中に存在し、水素同位体原子が交換する
  - (5) 水素、水蒸気の吸着、吸収、反応が進行する
  - (6) Li核反応によるLi含有率が減少する
  - (7) 微量トリチウムと不純物との相互作用がある
- 液体ブランケットでは、(1)~(3)の固体ブランケット固有の問題はないが、新たに、
- (8) ブランケットに敷設される各種加熱機器を含む3次元空間構造内の流動が存在する
- ことの考慮が必要である。さらにトリチウム回収にまで目を移すと固液ブランケット共通に、
- (9) トリチウム回収装置内の熱、物質、運動量輸送による変化

を検討する必要がある。

その他特殊課題として、

- (10) プラズマ燃焼運転パターンの非定常性
  - (11) 熱その他の応力変形
- 等がある。

現状では、これらすべてを考慮した計算は存在しないし、また実際上のトリチウム生産と回収を研究目標にする場合、未確定要素も多く、すべてを考慮し時間をかけて厳密に求めることに現在のところはそれほど意味があるとも思えない。重要なのは実験されていない領域を補完し、未知領域の予測性能を向上させるための数値解析手段の構築である。

まず次の第VIII-II節で、照射下にあるブランケット材とトリチウムとの微細相互作用、特にトリチウム拡散挙

*The Fusion Reactor Wall is Getting Hot!—A Challenge towards the Future for Numerical Modelling* (9):

Chap. VIII How is the Fuel made up on the Wall: Satoshi FUKADA, Takuji ODA.

(2008年12月9日受理)

各回タイトル

第1回 I. はじめに

II-1 壁の前で何が起きているか?(物理モデル)

第2回 II-2 壁の前で何が起きているか?(プラズマの攻撃)

第3回 III. 壁の表面で何が起きているか

第4回 IV. 壁の中で何が起きているか

第5回 V. 壁はどのくらい熱くなるか

第6回 VI-1 壁の中は傷まないか(放射線の照射によって受ける壁材料のダメージ)

第7回 VI-2 壁の中は傷まないか(放射線の照射によって受ける壁材料のダメージをいかに予測するか)

第8回 VII. 核融合材料のメソスケールシミュレーション

動を直接求めるため、原子スケールの第一原理で現象を把握する試みについて  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  と  $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$  を例として紹介する。

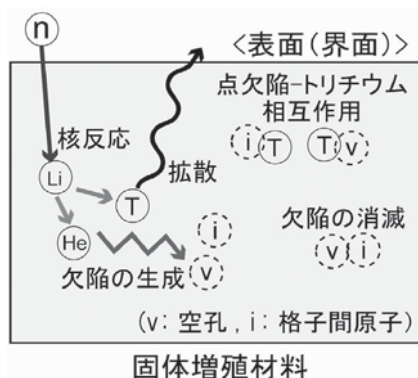
さらに第VIII-III節で、もう少し大きなスケールの視野から、固体ブランケットでは、マイクロ細孔、マクロ細孔内のトリチウム輸送現象の計算例を示す。液体ブランケットでは、 $2\text{LiF} + \text{BeF}_2$  溶融塩混合物 (Flibe) を例として、トリチウム拡散と同位体交換現象を取り扱うため、材料-トリチウム相互作用を物理モデルに基づいた整理式に置き換え、輸送方程式にわき出し項、各種物性値変化、局所界面平衡、同位体交換速度の関係式に置き換えて解いた結果を紹介する。

最後の第VIII-VI節では、さらに大きなスケールとして、ブランケット外でのトリチウム回収装置設計のための解析手段例を説明する。

## II. 増殖材料中におけるトリチウム挙動の原子スケールでの解析

### 1. 固体増殖材料中のトリチウム

固体増殖材料 (Li 酸化物) 中でのトリチウム挙動の概要を第1図に示す。まず、固体増殖材料に到達した中性子の一部が Li と核反応を起こし、トリチウム (T) が生成される。この T や、T 生成時に同時に生じる He、材料に進入した中性子が、それぞれ MeV オーダーの高エネルギーを持つために、材料中に多量の照射欠陥が形成される。そして、その照射欠陥がトリチウムの拡散挙動や放出挙動に影響を及ぼす。さらに、照射欠陥自身も集合、複合化、回復等の挙動を示すため、照射欠陥がトリチウムに与える影響は時々刻々と変化する。よって、実験で評価可能な短時間/低 Li 燃焼度の結果を、実炉で想定される長時間/高 Li 燃焼度の予測に適用することの妥当性については、十分な注意が必要である。この妥当性を保証する一つの手段として、現象を原子スケールで詳細に理解し、その理解に立脚してモデルを構築することは、有力である。



固体増殖材料

第1図 固体増殖材料におけるトリチウム生成、拡散挙動の概要

水素同位体は、Li 酸化物中で多様な化学状態をとりうる。その一つが  $\text{T}^+$  であり、Li 酸化物を構成する酸素イオン ( $\text{O}^{2-}$ ) に結合することで、水酸基 ( $-\text{OT}^+$ ) として材料中に存在する。特に、照射欠陥が存在しない系においては支配的な化学状態である。一方、照射欠陥が存在する環境下では、 $\text{T}^+$  に加えて  $\text{T}^-$  として存在するトリチウムの割合も無視できなくなる。ただし、 $\text{T}^+$  として存在するトリチウムの割合の方が一般的に多い。

量子力学計算の結果によれば、Li 酸化物中の  $\text{T}^+$  は、Li 空孔近傍で水酸基を形成する場合、つまり  $\text{Li}^+$  置換型  $\text{T}^+$  として存在する場合の方が、格子間型  $\text{T}^+$  として水酸基を形成する場合に比べてエンタルピーで 1~数 eV 程度安定である<sup>2)</sup>。実炉環境では、Li が T 生成の際に消費されるため、エントロピーの観点からも、格子間型  $\text{T}^+$  に比べて  $\text{Li}^+$  置換型  $\text{T}^+$  がより有利になると考えられる。以下では、 $\text{Li}^+$  置換型  $\text{T}^+$  として存在するトリチウムの拡散について、主要な固体増殖材料候補である  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  の場合を例に、詳しく見ていく。

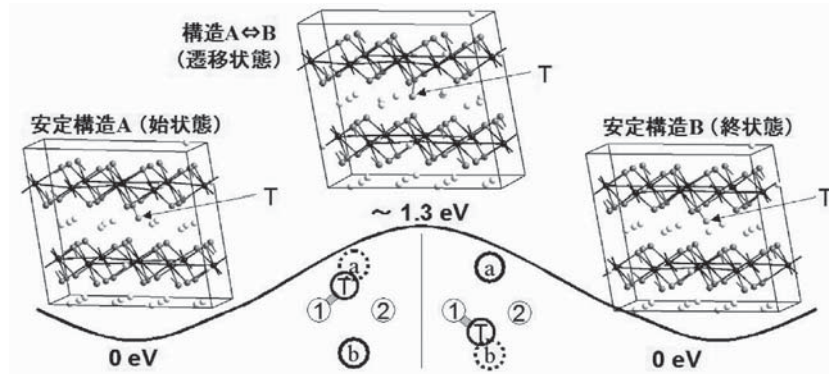
$\text{Li}_2\text{TiO}_3$  の結晶構造は複雑であるため、その中の  $\text{Li}^+$  置換型  $\text{T}^+$  の存在状態や拡散挙動も多様なものとなる。しかし、拡散に関連する基本的な動きは、以下の2つに大別できる：(1) 特定の  $\text{O}^{2-}$  との結合を維持したまま、隣接する  $\text{Li}^+$  と位置を交換する動き (結合している  $\text{O}^{2-}$  を中心とした回転に近い運動)、(2) 配向している Li 空孔を変えずに、結合相手を他の隣接  $\text{O}^{2-}$  に変える動き (隣接する  $\text{O}^{2-}$  へのジャンプに近い運動)。そして、この2つの過程の組合せで、 $\text{Li}^+$  置換型  $\text{T}^+$  の拡散は進行する。

過程(1)について、量子力学計算を用いて拡散の経路とエネルギー障壁を評価<sup>3)</sup>した結果を第2図に示す。移動の始状態 (構造 A)、終状態 (構造 B)、および状態間の移行の遷移状態 (構造 A $\leftrightarrow$ B) と、そのエネルギーを示した。計算は固体材料の量子力学計算で広く利用されている VASP コードを用いて行った。結果として、この過程(1)の場合、トリチウムの移動に要するエネルギー障壁は約 1.3 eV であることが明らかになった。同様に、計算した過程(2)のエネルギー障壁は 0.6 eV 程度であったため、トリチウム拡散の見かけの活性化エネルギーは、過程(1)のエネルギー障壁に相当する 1.3 eV 程度になると考えられる。この値は、実験で観察されている  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  中でのトリチウム拡散の見かけの活性化エネルギー (1.08 eV<sup>4)</sup>) と同程度であり、量子力学計算により良好なモデル化が行われていると考えられる。

さらに、トリチウムの拡散定数や滞留量についても、種々の計算理論<sup>5)</sup>が整備されており、必要な計算量は増大するが、量子力学計算を用いた評価が可能である。

### 2. 液体増殖材料中のトリチウム

液体増殖材料 (金属 Li, リチウム鉛, Flibe など) では照射欠陥の影響を考慮する必要がないため、トリチウム



第2図  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ におけるトリチウム拡散の経路とそのエネルギー障壁

図中の白色球はLi, 黒色球はTi, 灰色球はOを表している。酸素1に結合しているトリチウム(T)が, その結合状態を維持したまま, 隣接するリチウムbとその位置を交換している。

挙動に関連した素過程の数は, 固体増殖材料の場合と比べて少なくなる。しかし, 分光実験等を容易に適用可能な固体材料と比べて, 高温溶融状態にある液体材料では, トリチウム挙動の詳細を実験により直接的に観察することは困難である。そのため, 計算シミュレーションが果たすべき役割は大きい。シミュレーションにおいて溶融状態を再現するためには, 0 Kでの静的な計算(分子力学計算, molecular statics)ではなく, 有限温度での動的な計算(分子動力学計算, molecular dynamics)が必要となる。

第3図に, 第一原理分子動力学計算(量子力学計算により評価したエネルギーや力を用いて行う動力学計算)により, 液体Li-Pbにおける水素同位体の挙動を分析した結果を示す。900 Kにおいて, 系の原子数, エネルギー, 体積を保存した条件(NEV アンサンブル)の下で,  $\text{Li}_6\text{Pb}_{30}\text{H}$ 中でのH-Li原子間距離の変化を調べた結果である。便宜上, 系に存在する6個のLi原子に対して, ①~⑥の番号を振っている。時間ステップは1 fs(フェムト秒,  $10^{-15}\text{s}$ )とし, 合計1,500 fsのシミュレーションを行った。 $\text{Li}_6\text{Pb}_{30}$ は $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ のモデル材料である。拡散に要する時間を低減するために, トリチウムよりも軽い

軽水素を用いて, トリチウムの挙動を模擬した。

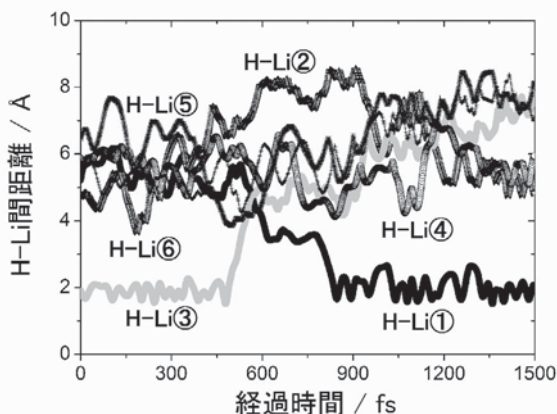
第3図から, Hは約500 fsまではLi③と結合し, その後それとの結合を切り, 約800 fsからはLi①に再結合していることがわかる。また, HがLiに近接した場合に, 水素の電荷状態は $\text{H}^-$ に近づき, 水素化リチウム分子におけるLi-H結合に類似した相互作用が生じていることも, 量子力学計算により示唆された。

以上の結果から,  $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ 中のトリチウムは, 基本的にはLi-T結合を形成することにより材料中で安定化するが, ある頻度でLi-T結合を切り, そして隣接する他のLiにジャンプして再結合することで, 拡散していくと考えられる。この液体 $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ 中のLi-T結合は, 気体LiT分子のLi-T結合ほどは強くなく, 900 K程度の高い温度ではその切断は比較的容易に起こると考えられる。

### Ⅲ. ブランケット材からのトリチウム放出計算

#### 1. ミクロ-マクロ細孔内輸送現象の数値計算

nmスケールの第Ⅷ-II節の解析から,  $\mu\text{m}\sim\text{mm}$ スケールの範囲へと視点を移す。固体ブランケット材微細結晶粒子を集めた多孔質凝集ペレット内でのトリチウム輸送現象を把握するには, 少なくとも中性子, 熱, トリチウム収支式を多孔質構造に基づいて解く必要がある。しかし, 現状では時間の制約と収支式を横断する結合因子が小さいため, 同時同等に連立して解かれていない。熱とトリチウム収支式では, まず $\mu\text{m}$ 以下のスケールのミクロ細孔(あるいは微細結晶粒子)内はその領域内で閉じた形で解き, それをメゾあるいはマクロ細孔構造をなす領域の熱とトリチウムの収支式において, いわゆるわき出し項として保存式に組み入れることでほぼ正確に挙動が求められる。熱, 物質の輸送方程式は, 関連する書籍<sup>6)</sup>等に示されている。



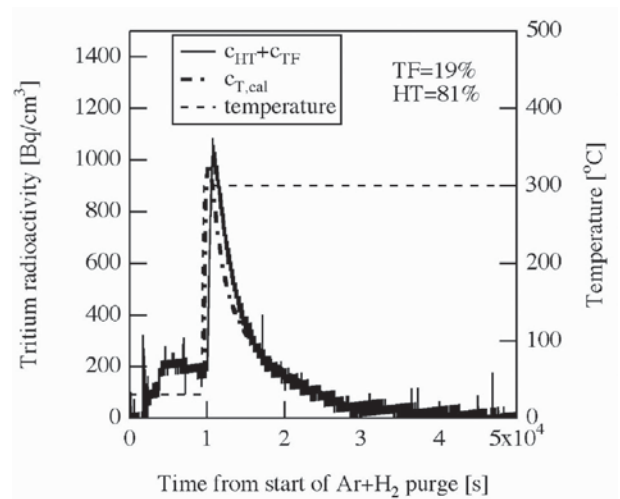
第3図 液体 $\text{Li}_6\text{Pb}_{30}\text{H}$ モデルにおけるH-Li間距離の時間変化

具体的に説明すると、マイクロ-マクロ二重細孔構造<sup>7,8)</sup>を持つ多孔質ペレット内マイクロ孔では、収支式中の対流移動に関する項を考慮する必要はない。収支式におけるわき出し項は、中性子輸送方程式から計算されるトリチウム発生率と減速に伴う発熱項で記述できる。さらに拡散係数や熱伝導率を中性子照射量や温度の関数として経験的に求め、計算系に組み入れる。このようにして求めたマイクロ孔境界での熱とトリチウム輸送量は、マクロ孔内の保存式中の発生項として現れ、再度、マクロ孔内輸送方程式をペレット外部境界条件で求める。このように入れ子型の保存式を順次解き、全体の熱とトリチウムの輸送量を求める。この際、VII-II節で考えた原子スケールでの挙動は、照射に伴う物性値の位置変化として考慮することができる。

固体ブランケット材料からのトリチウム回収設計のために必要な情報として固体多孔質ペレットからのトリチウム放出挙動がある。H<sub>2</sub>あるいはH<sub>2</sub>Oを含むHeパージガス条件下で、トリチウム輸送に関係する分子種はHTとHTOである。固体内で生成したトリチウム原子は、セラミック多孔質内を拡散し、直接再結合反応で脱離するほか、 $T(s) + H_2(g) = H(s) + HT(g)$ 、あるいは $T(s) + H_2O(g) = H(s) + HTO(g)$ の同位体交換反応、表面酸化物の酸素-金属原子比が決められた組成比から変化すること(不定比性変化)によって、 $O(s) + HT(g) = HTO(g)$ の水分生成反応、等が関与する。いくつかのブランケット材からのトリチウム放出率の実験値と計算値の比較を第4図に示す<sup>9)</sup>。

## 2. 液体ブランケット材からのトリチウム放出計算

液体ブランケット材候補材として、リチウム、Li-Pb共融合金、Flibeがある。その一つのFlibeは、溶融塩中でTFあるいはT<sub>2</sub>として存在し、この比はFlibeの酸化還元状態により変化する<sup>10)</sup>。Heパージガス中にH<sub>2</sub>を含ませると、TFで拡散するトリチウムがFlibe-He界面で $TF + H_2 = HF + HT$ 、もし微量のH<sub>2</sub>Oが含まれてい



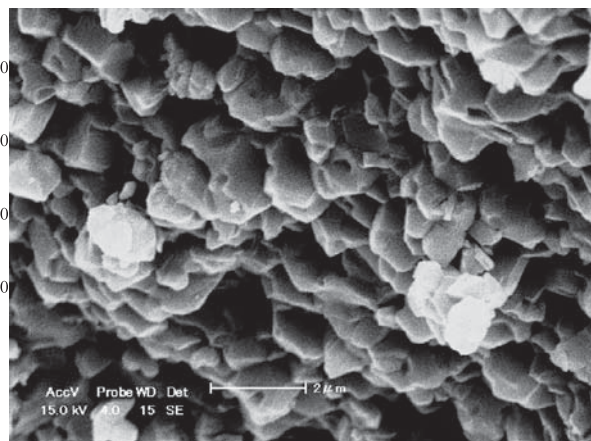
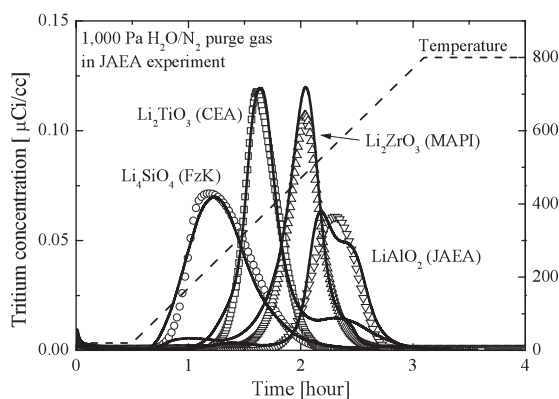
第5図 Flibe 溶融塩からのトリチウム放出実験と計算

るとき、 $TF + H_2O = HTO + HF$ 、の同位体交換反応が進行する。さらにH<sub>2</sub>Oは、 $BeF_2 + H_2O = BeO + 2 HF$ の反応により気流中でHFを生じ、このHFとTF(s)の同位体交換が進行する可能性もある。トリチウム放出率実験値と計算値との比較例を第5図に示す。小さい体系での実験ではあるが、既存の拡散係数や同位体交換速度定数、酸化還元反応の反応率等のデータより求めた予測値は精度よく実測値を説明している。

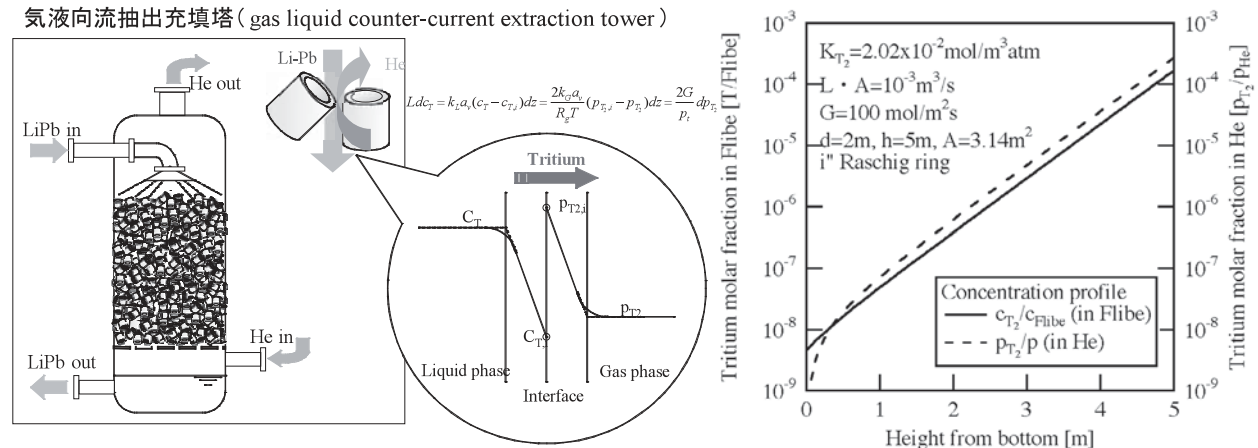
さらに大規模に、3次元構造物内の熱、流動、拡散の計算が、各種概念設計活動の中で始められている<sup>12)</sup>。ITER-TBMの具体性が高まるほど、モンテカルロシミュレーションあるいは格子ボルツマン法で、複雑な体系でもわき出し項を適切に組み入れることにより、詳細に計算されるものと考えられる。特に熱流動に関する最新の研究成果が次回以降のこの連載講座で説明される。

## IV. トリチウム回収装置の設計計算

炉壁で作られたトリチウムは、炉外の回収装置で連続的に回収される。例えば、1GW核融合熱出力を温度差



第4図 各種固体ブランケット材料からのトリチウム放出挙動の実測値と解析モデルの比較(a)とLi<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>ペブル表面のSEM写真(b)



第6図 トリチウム回収装置内概略図と Flibe と He パージガス中の T 濃度の塔高さ方向変化

100℃の Flibe で回収するためには2.3 m<sup>3</sup>/sの冷却材流量を保持し、実質トリチウム増殖比 TBR = 1の維持に、160 g-T/dの T生産率がブランケット内で必要であり、このとき自己冷却 Flibe 中の T濃度は1.2 × 10<sup>-8</sup> mol-T/mol-Flibeとなる。熱回収の巨大さに比べてトリチウム濃度の低さが際立ち、ブランケット材あるいはヘリウム冷却材からトリチウム回収のための装置設計は最大の課題である。気液向流抽出装置、膜分離装置等がトリチウム回収に考えられているが<sup>13)</sup>、装置の規模を考えるための設計が必要である。第6図は Flibe 自己冷却ブランケットのトリチウム回収装置概略図と計算例であり、設計式は化学工学の単位操作の教科書にも記述され<sup>6)</sup>、回収装置内の濃度勾配を流体の主流れ方向の1次元方向のみに仮定し、気液界面のトリチウム輸送を物質移動係数と、静的条件で求められている気液平衡関係で置き換えると、閉じた形で解析計算できる。この際、装置内の流動の影響を、物質移動係数に押し込める手法<sup>6)</sup>は、実際的に化学回収装置の規模を的確に表すのに成功している。大量の Flibe を流すと回収装置の規模が巨大になるため、計算例では、バイパス率を1%とし、T濃度を上昇させている。T濃度の上昇は、配管からのT濃度を増加させるので、T透過漏洩を抑制する安全設計のためには、この程度のバイパス率が限度である。

#### — 参考文献 —

- 1) 関昌弘編, 核融合炉工学概論, 日刊工業新聞社, (2001).
- 2) R. Shah, A. D. Vita, V. Heine, M. C. Payne, *Phys. Rev. B*, **538**, 257-8261 (1996).
- 3) G. Mills, H. Jonsson, G. K. Schenter, *Surf. Sci.*, **324**, 305-337 (1995).
- 4) T. Tanifuji, D. Yamaki, S. Nasu, K. Noda, *J. Nucl. Mater.*, **258-263**, 543-548 (1998).
- 5) G. H. Vineyard, *J. Phys. Chem. Solids*, **3**, 121-127 (1957).
- 6) R. B. Bird, W. E. Steward, E. N. Lightfoot, *Transport*

*Phenomena 2<sup>nd</sup> ed.*, John Wiley and Sons, (2002).

- 7) D. M. Ruthven, *Principles of Adsorption and Adsorption Process*, John Wiley & Sons, (1984).
- 8) L. B. McCusker, F. Liebau, G. Engelhard, "Nomenclature of structural and compositional characteristics of ordered microporous and mesoporous materials with inorganic hosts (IUPAC Recommendation 2001)", *Pure Appl. Chem.*, **73**, 381-394 (2001).
- 9) T. Kinjyo, M. Nishikawa, T. Tanifuji, *Fusion Eng. Des.*, **81**, 573-577 (2006).
- 10) S. Fukada, M. F. Simpson, R. A. Anderl, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **367-370**, 1190-1196 (2007).
- 11) Y. Edao, S. Fukada, H. Noguchi, *Fusion Sci. Technol.*, **55**, (No. 2), 140-151 (2009).
- 12) A. Sagara, O. Mitarai, T. Tanaka, *et al.*, *Fusion Eng. Des.*, **83**, 1690-1695 (2008).
- 13) S. Fukada, M. Nishikawa, A. Sagara, *Fusion Sci. Technol.*, **39**, 1073-1077 (2001).

#### 著者紹介

深田 智(ふかだ・さとし)



九州大学総合理工学府  
(専門分野/関心分野)エネルギー化学工学/  
特にトリチウムプロセス開発

小田卓司(おだ・たくじ)



東京大学大学院工学系研究科  
(専門分野/関心分野)原子力材料工学/核不  
拡散

これまでの原子力、これからの原子力

## 解説

# 宇宙探査とエネルギー

## 原子力エネルギー利用の歴史・現状・将来

宇宙航空研究開発機構 星野 健

宇宙開発の初期段階から、主に米国とロシア(旧ソ連)は、太陽光強度が弱く太陽電池の使用が困難な木星以遠などの深宇宙探査機の電源や、夜が2週間にわたって継続する月面での機器の保温等に原子力エネルギーを用いてきた。しかし、我が国では、なじみのない分野となっていると思われる。そこで、本稿では、これらの歴史と現状および将来動向を概説する。

### I. はじめに

2004年1月にブッシュ大統領が明らかにした新宇宙探査計画「Vision for Space Exploration」をきっかけとして、月の有人探査が再び計画されているといったニュースを耳にされた方もおられることと思う。これらの宇宙探査をめぐる話題では、新しいロケットや宇宙船といった「乗り物」が注目されることが多い。

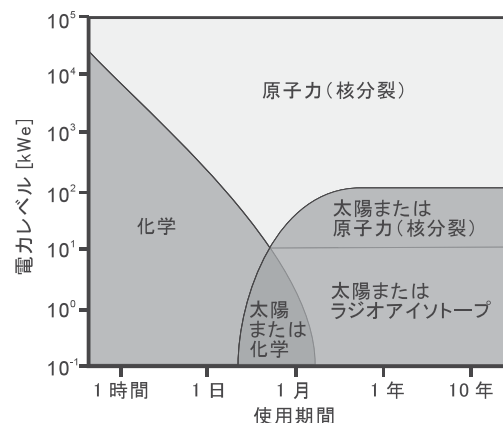
一方、もうひとつ重要なものは「エネルギー」である。人間でもロボットでも何らかの活動を行うには、エネルギー源が必要である。したがって、エネルギー源を持っていくか、あるいは、周辺環境からエネルギーを確保する必要がある。また、利用可能なエネルギーの量と質によって、できることが左右される。これらは地上でも宇宙でも同じであり、輸送系技術とならびエネルギー技術は、宇宙探査の可能性(どこまで行けるか、何ができるか)を左右する重要な技術であるといえる。

これまでの宇宙探査では、その用途や規模によってさまざまなエネルギー源が用いられてきた。原子力もエネルギー源のひとつとして利用されている。

### II. 宇宙活動に必要なエネルギー源

#### 1. 電力規模

まず、宇宙活動で使うことのできるエネルギー源について考えてみる。第1図は、必要とされる電力レベルとその使用期間に適したエネルギー源を示したものである。短時間ではかなり大きなエネルギーレベルまで化学エネルギーが有利である(宇宙の場合「有利である」とい

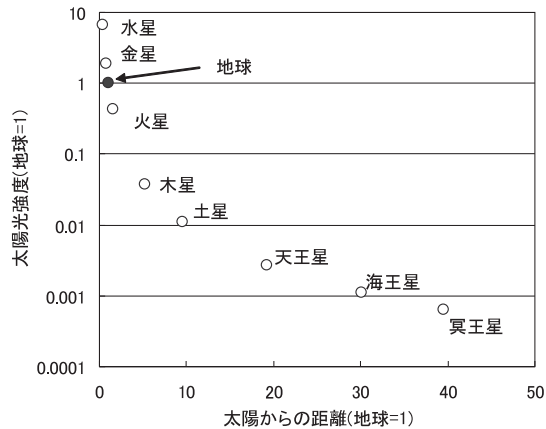


第1図 エネルギー源の分類

う言葉は、ほとんどの場合「質量が小さい」を意味する)。例えば、スペースシャトルの燃料電池が良い例である。しかし、1ヶ月から年単位の長期間になると、化学エネルギーではなく太陽電池発電が有利となってくる。現在のほとんどの宇宙機のエネルギー源は太陽電池発電である。しかし、太陽光の利用が難しい外惑星探査機などの場合は、ラジオアイソトープを用いた発電が行われている。必要電力が100 kWを超える規模となってくると、原子炉が最も有利になるといわれているが、現在までのところ、この規模で実際に原子力発電を行った宇宙機はない。また、この図から長期間の宇宙活動において利用可能な1次エネルギー源は、原子力エネルギーか太陽エネルギー(太陽エネルギーも核融合による原子力エネルギーではあるが)であるといえる。

#### 2. 太陽エネルギーの限界

一方、第2図もよく用いられる図であるが、太陽からの距離と太陽光強度の関係である。火星軌道付近では地



第2図 太陽からの距離と太陽光強度

球のおよそ半分であり、木星となると1/25となってしまう。木星までは太陽電池を工夫することによって、太陽エネルギーの利用は可能であり、JAXAでも太陽光(光子)の運動量を利用した推進と太陽電池で駆動する電気推進を組み合わせて航行するソーラー電力セイルなどが検討されている。しかし、それ以遠となるとかなり厳しいといわざるを得ない。したがって、太陽エネルギーの利用が非常に困難な場合は、原子力エネルギーに頼らざるを得ない。そのため、木星以遠の深宇宙探査等には、ラジオアイソトープ電源などの原子力エネルギーが利用されてきた。

### Ⅲ. 原子力エネルギーの応用

#### 1. 概要

次に、実際にはどのような例があるかを述べる。まず、大きくラジオアイソトープの崩壊熱を用いたものと、核分裂エネルギーを用いたものに分けられる。

ラジオアイソトープの崩壊熱を用いたものには、崩壊熱そのものを保温用熱源として利用するラジオアイソトープ熱源RHU(Radioisotope Heater Unit)があり、深宇宙探査機などにしばしば用いられる。崩壊熱で熱発電を行い、電源として用いるものはRPS(Radioisotope Power Source)と呼ばれており、RTG(Radioisotope Thermoelectric Generator)が代表的である。原子力電池と呼ぶこともある。ラジオアイソトープとしては $^{238}\text{Pu}$ が用いられる。これは、 $\alpha$ 崩壊で遮蔽が容易であることと、半減期が87.7年と長いためである。 $^{210}\text{Po}$ も用いられるが、半減期が0.38年と短いため使用例は多くない。

次に核分裂を用いたものには、地上と同じく原子炉を用いて発電する宇宙用原子炉がある。用途としては、大電力を必要とする場合の電源が考えられる。また、電力規模は小さいが、発電した電力でイオンエンジンなどを駆動して推進するNEP(Nuclear Electric Propulsion)は有望な用途のひとつであり、米国などで研究されている。イオンエンジンに代表される電気推進は、絶対的推

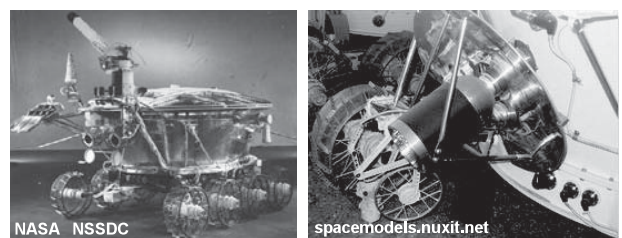
力は小さいものの比推力(1 kgの推進剤で1 Nの推力を何秒出すことができるかを表す値で、大きいほど性能が良い)が、化学推進、例えば液体水素-液体酸素エンジンなどの約450 sと比較して、5,000 s以上と桁違いに大きい。そのため、宇宙機に搭載する推進剤が1/10以下と圧倒的に少なくすむというメリットがある。その他、発電を行わず、炉心に水素などの推進剤を注入・加熱し噴射することにより推進力を得る熱核推進NTP(Nuclear Thermal Propulsion)と呼ばれる利用方法もあり、原子力ロケットと呼ばれることが多い。これも、NEPと同じく比推力が1,000 s程度と大きく、かつ1 MNクラスの大推力を得ることができるため、将来の火星有人探査などへの適用が米国などで検討されている。では、それぞれの歴史と現状、将来動向を次に述べる。

#### 2. ラジオアイソトープ熱源(RHU)

RHUは宇宙探査の初期段階から利用されてきた。一例として、月での保温用熱源として利用した旧ソ連の月面ローバ ルノホート(Lunokhod 1, Lunokhod 2)がある。これらは、Luna 17(1970)とLuna 21(1973)にそれぞれ搭載され打ち上げられた。ご存知のように、月の1日は地球のほぼ1ヶ月に相当し、夜は350時間以上続く。このため、夜の月の表面温度は $-160^{\circ}\text{C}$ 以下となり、機器を保温する必要がある。電池を使ってヒータで暖めればよいと思われるかもしれないが、これはなかなか難しい。例えば、保温に100 W必要だとすると、軽量なりチウムイオン電池を用いたとしても300 kg以上となってしまう。

Lunokhodの電源は太陽電池であり、夜間は活動しないが、 $^{210}\text{Po}$ を用いたRHUを搭載しており、必要な部分の保温が行われていた。設計寿命は3回の昼間の活動であったが、Lunokhod 1は1970年11月17日の軟着陸以来、1971年9月14日に最後の通信を行うまで、11回の昼間の活動を行った。また、Lunokhod 2はこれよりも短いものの、1973年1月15日の軟着陸から、5月ごろまで(公式発表は1973年6月4日のミッション終了)正常に機能した。(第3図)

一方、米国もRHUを宇宙探査に多用してきた。米国のRHUは、 $^{238}\text{Pu}$ が1.91 g( $\text{PuO}_2$  2.7 g)封入されており、1 Wの熱出力で重量は40 gである。火星ローバのSpiritやOpportunityの撮影した火星表面の写真等を目



第3図 Lunokhodと搭載されたRHU





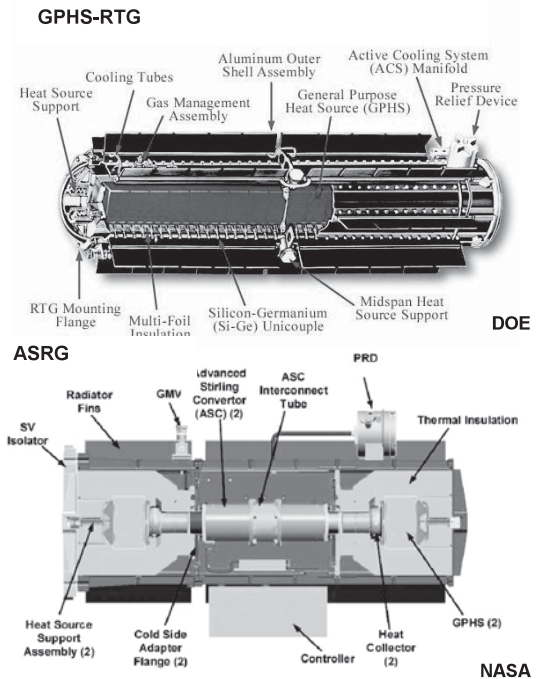
第4図 火星ローバと搭載されたRHU

にされたこともあるかと思う。これらの探査ロボットも Lunokhod と同様に、太陽電池が電源であるが、保温のために3個のRHUがそれぞれ搭載されている(第4図)。また、土星探査機 Cassini には117個が搭載された。このように、RHUは非常に軽量の熱源として、利用されてきた。

### 3. ラジオアイソトープ電源(RPS)

RTGはRPSの代表的なものである。RTGの歴史も非常に古く、1961年のTransit 4 Aに搭載されたSNAP-3B7を皮切りに、特に米国において多用されてきた。米国では、これまでに26機の宇宙機に45個のRTGを搭載し、打上げを実施してきた。RTGを搭載した23機の宇宙機が現存し、惑星間軌道に8機(Pioneer, Voyager, Galileo, Ulysses, Cassini, New Horizons), 地球軌道に8機(Transit, Nimbus, LES), 月に5機(Apollo ALSEP), 火星に2機(Viking)が存在する。打上げ数と現存の差の3機は打上げ失敗2機と大気圏に再突入したものの1機(Apollo 13のALSEP)である。1964年に打上げ失敗したRTG(SNAP-9A)を搭載したTransit 5BN-3は、上空120 kmで焼失し、<sup>238</sup>Puを大気中に放出する事故を起こした。このため、打上げ失敗でもRTGが焼失せず、地上で回収できるように設計が改められた。1968年に打上げに失敗したNimbus Bは、2個のRTG(SNAP-19B2)を搭載していたが、RTG自体は海底から回収され、Nimbus 3に搭載され、翌年に再度打ち上げられた。Apollo 13は危機的状況であったが、ALSEPが突入後そのまま深海に沈むよう軌道制御を行っている。旧ソ連も、数は少ないがRTGを3機の宇宙機に搭載して打ち上げた。そのうちの1機は、打上げに失敗したMars 96であり、搭載されていたRTGは、いまだに見られていない。

米国の代表的なRPSは、第5図に示すようなGPHS(General Purpose Heat Source)-RTGである。<sup>238</sup>Puを用いた熱源GPHSを18個使い、SiGe系の熱電素子で発電を行っている。その変換効率は6.8%で、出力および出力密度は、290 We, 5.2 We/kgである。現在は、寿命などの信頼性を確保したまま、性能、多目的性などの向上を目指したMM(Multi Mission)RTGとASRG(Advanced Stirling Radioisotope Generator)の研究開発が行われている。



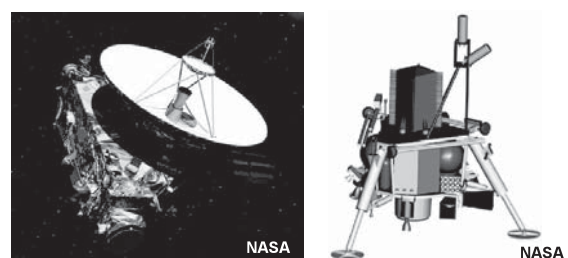
第5図 米国のRPS

MMRTGは8個のGPHSを熱源として、熱電素子を高効率なものに変更し、発生電力としては約120 Weで寿命は14年である。また、大気のある火星などでの動作を可能としている。一方、ASRGはフリーピストンスターリングエンジンによって発電を行うもので、目標寿命は同様に14年である。熱電素子と比較してスターリングエンジンは大幅に高効率であるため、必要なGPHSが2個ですむという大きな特徴がある。

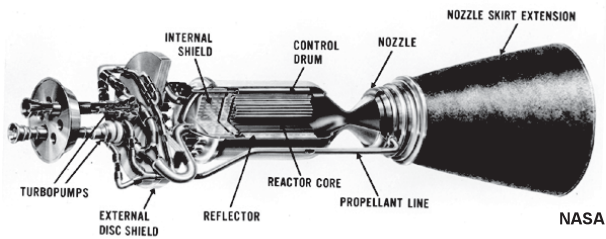
これらのRPSを用いた、最近の例では、2006年に打ち上げられた冥王星探査機 New Horizon がある。また、将来計画としては、国際的な月の協調科学観測を行うILN(International Lunar Network)計画の月着陸機にASRGの派生型の利用が検討されている。(第6図)

### 4. 熱核推進(NTP)

NTPは、炉心に水素などの推進剤を注入・加熱しノズルから噴射して推進する方式である。1960年代には高い比推力と大きな推力を同時に達成できることから有力視され、米国のRover/NERVAプロジェクトなどにより、推力1 MNを超える実機を用いた地上試験も行われ



第6図 New Horizon とILN ランダー

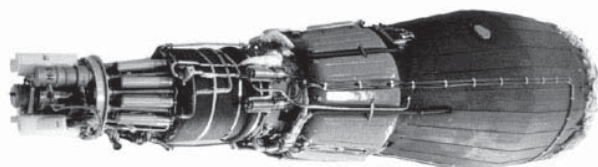
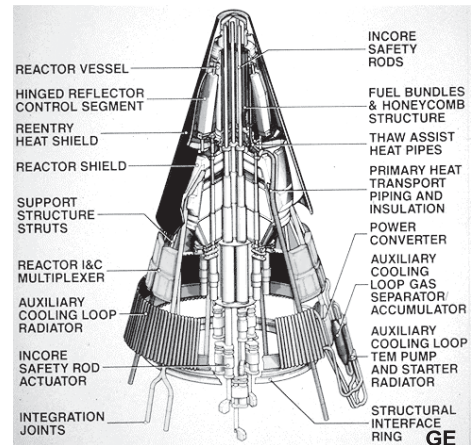


第7図 NERVA 計画で作られたエンジン

てきた。現在は、実験は行われずに、机上検討が行われている。これは、推進剤が、コーティングで覆われているとはいえ燃料表面を流れる構造上、核分裂生成物を推進剤と一緒に噴出してしまふ可能性があるためである。将来の有人火星探査には必要な技術とする研究者もあり、主に米国において検討は続けられている。(第7図)

### 5. 宇宙用原子炉

次に、発電用原子炉についてはどうであろうか。現在のところ、実際に利用されている宇宙用原子炉は存在しない。宇宙用原子炉はRPSと異なり、旧ソ連が打ち上げたものがほとんどである。これらは、主にレーダなどに大電力を要する軍事衛星として利用された。旧ソ連は1960年代にROMASHKAと呼ばれるSiGe系の熱電素子を用いた出力460~475 Weの原子炉を開発した。設計寿命は15,000時間、燃料は<sup>235</sup>Uであり、重量は450 kgほどであった。その後、この原子炉を元に、出力3 kWeの宇宙炉BUKが開発され、32機打ち上げられている。発電は同様に熱電素子であり、重量はおよそ930 kgである。また、これとは別にCosmos 1818と1867は、TOPAZと呼ばれる熱電子発電を用いた原子炉を搭載しており、出力は5 kWe、重量はおよそ980 kgである。(第8図)Cosmos 1867の軌道上での動作時間は7,000時間ほどであった。旧ソ連では1970年のCosmos 367から始まり、1988年のCosmos 1932まで、34機の原子炉を搭載した宇宙機を打ち上げている。このうち、1機(Cosmos 556)は打上げに失敗、また、Cosmos 954と1402は大気圏に再突入し、いずれも放射性物質を大気中に放出する事故を起こしている。特に、カナダに落下したCosmos 954は、後で述べるが、国際的に大きな問題となった。この後、TOPAZ-2と呼ばれる6 kWeの原子炉が開発されたが打ち上げられていない。

第8図 TOPAZ 原子炉<sup>2)</sup>

第9図 SP-100

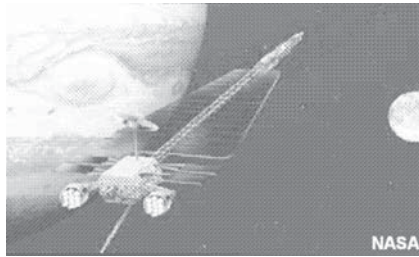
米国がこれまでに打ち上げた唯一の宇宙用原子炉は、1965年のSNAP-10Aである。これは熱電素子により5~600 Weの発電を行うNaK冷却の熱中性子炉で、設計寿命は1年であった。しかし、43日間の発電後、誤った信号を受信し原子炉が停止した。その後、1980年代になると、出力100 kWeを目指したSP-100の開発に着手し、1990年代の中ごろまで開発が続けられた。これはリチウム冷却の高速炉であり、設計寿命は7年である。原子炉システムの重量は4,600 kgとされており、比出力は20 We/kgを超えるものとなる予定であった。(第9図)

その後、NEP用のSAFE-400や火星ローバ用のHOMER-15の研究が行われた。SAFE-400は熱出力400 kWtのNaヒートパイプ冷却高速炉で100 kWeを発電する。目標寿命は10年であり、遮蔽等を除いたシステムの重量は512 kgを目標としていた。一方、HOMER-15は熱出力15 kWtで同様にNaヒートパイプ冷却炉である。こちらはスターリングエンジンにより3 kWeを発電する計画であり、炉心部の寸法は直径、高さとも40 cm強で、重量は214 kgを目標としており、非常にコンパクトで軽量である。

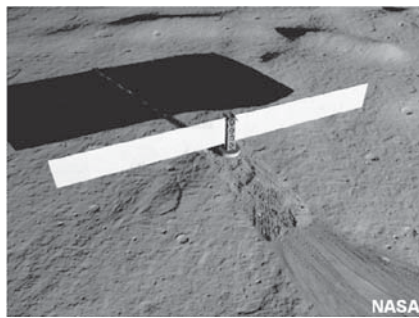
最近では、ブッシュ大統領による2004年の新宇宙政策以降、宇宙用原子炉の研究開発が活気付いた。

Prometheus計画では、電気出力50~250 kWe、比出力25~35 kg/kWe、10年以上の寿命を有するNEPの研究が進められ、木星の衛星を探索するJIMO(Jupiter Icy Moon Orbiter)計画への搭載を目指していた。(第10図)しかし、その実現性と巨額の費用面から議論を呼び、2005年に原子力推進から月面等での原子力発電の検討にシフトした。第11図は、最近NASAの発表した月面拠点用の原子炉で、発電出力が40 kWeである。発電にはスターリングとブレイトンの2通りが考えられている。

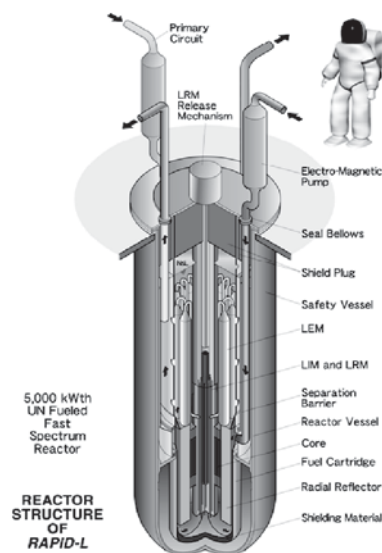
一方、日本でも電力中央研究所を中心に制御棒を備えず、完全自動運転が可能な200 kWe級の月面用高速炉RAPID-Lが研究されている。(第12図)



第10図 JIMO 計画



第11図 NASA の検討している月面炉

第12図 RAPID-L<sup>3)</sup>

### Ⅲ. 法規制と安全性

#### 1. 法的枠組

ここで、原子力エネルギーの宇宙利用に関連した法的枠組について述べる。現在のところ、原子力の利用は禁止されているわけではないが、さまざまな制限が存在する。先に述べた Cosmos 954 の墜落事故は、宇宙での原子力利用の大きな転換点となった。この事故を契機に、国連において、「宇宙空間における原子力電源 (NPS) の使用に関する原則」(1992年12月14日第47回会期国際連合総会決議第47/68号) が決議された。これにより、宇宙空間における原子力の使用は、原子力以外によっては合理的に行うことができない宇宙ミッションに制限されて

いる(第3原則)。また、原子炉には<sup>235</sup>Uのみを燃料として使用することや、原子力を使用できるミッションや空間的範囲を具体的に規定している(例えば地球の重力場から離れるミッションには利用できる等)。これに先立ち国内では、「原子力衛星規制に関する決議」(1978年2月28日衆院本会議, 3月1日参院本会議)によって、同様な事故の再発による放射能汚染被害を防止するための適切な国際的措置が講ぜられるよう最善の努力を払うべきとされた(本決議によって原子力エネルギーの宇宙利用を禁じられていると誤解されている場合が多いが、禁止されているわけではない)。

現在は、国連の科学技術小委員会(STSC)の宇宙平和利用委員会(COPUOS)と国際原子力機関(IAEA)と協同で専門家によるワーキンググループを組織し、技術的安全基準「Safety Framework for Nuclear Power Source Applications in Outer Space」が検討されており、2010年の出版を目指している。

#### 2. 安全性

次に難しい問題であるが、安全性である。原子力エネルギーの宇宙利用にとって避けて通ることのできない最大の問題は、打上げ時の安全性の確保である。打上げには安全なロケットが必要であるが、安全性が高い有人ロケットでも、残念ながら成功確率は100%ではない。したがって、打上げ失敗に備えた対策が必須である。

原子炉稼働前の新燃料の<sup>235</sup>Uの放射能レベルは、RPSの熱源である<sup>238</sup>Puに比べて7桁低い。また、エネルギー密度も格段に高く、SP-100の例をとると、100 kWeの出力で<sup>235</sup>Uの質量は140 kgである。同じ出力100 kWeをGPHS-RTGで得る場合、5.4 tの<sup>238</sup>Puが必要となる。したがって、出力あたりの放射能という観点から見ると、RPSと比較して原子炉は安全性が桁違いに高いといえる。

では、なぜ多数のRPSが使われてきたのであろうか。これは、原理的にどんなに小さなRPSでも作ることは可能であるが、原子炉の場合は燃料の臨界質量があり、ある程度の質量はどうしても必要になってしまうためである。また、可動部の有無も寿命や信頼性上問題となる。

次に、なぜ、<sup>238</sup>Pu以外のラジオアイソトープがRPSの熱源に使われてこなかったのであろうか。ラジオアイソトープを発熱源として使用する場合、遮蔽の重量の観点から、 $\alpha$ 線のみを放射する核種が現実的解となる。そのため、<sup>238</sup>Pu以外に<sup>210</sup>Poが当てはまる。しかし、<sup>210</sup>Poは、半減期が0.38年と短く、長期間動作することが望まれる探査用の電源に用いるには不適である。短期間のミッションに利用する場合でも、例えば、打上げが半年遅れてしまったような場合は使い物にならなくなってしまふ。よって<sup>238</sup>Puのみが現実的な解として残ることになった。したがって、RPSの場合、事故時の<sup>238</sup>Puの飛

散防止が最重要となっており、安全対策がとられている。

一方、原子炉の場合、未臨界では放射能レベルは低いものの、いったん臨界に達すると、核分裂生成物が生じ放射能レベルは非常に高くなる。そのため、当然ながら原子炉は未臨界状態で打ち上げ、安全な軌道に乗ってから臨界にさせる必要がある。また、水没、地面への激突、火災などどのような事故があっても、臨界にならない設計が最重要である。

#### IV. 終わりに

ここまでは、歴史と現状を述べてきた。今後は、諸外国はどのような方向に進むのであろうか。個人的な見方であるが、安全性の観点から、RPSの大型化に進むことはあり得ず、ASRGに見られるような小型で発電効率の高いRPSの開発、また、超小型で長期運転可能な原子炉の開発に進むのではないかと考えている。超小型の原子炉を電気推進と組み合わせて、小惑星、あるいは外惑星とその衛星を次々と訪れるような探査も検討され、学会等で発表されている。また、超小型の原子炉は、月や火星など地球以外の天体で生活するという人類にとって大きなステップの実現に役立つであろう。

原子力エネルギー技術は、日本が世界に誇る優位技術であり、超小型炉など研究されていると聞く。しかし、原子力エネルギーの宇宙利用は、安全性確保等の問題もあり、我が国では実施していないのが現状である。

原子力と宇宙は、軍事利用と結び付けて語られることもあるが、我が国は、両者とも本格的に推進しつつ平和利用に限定している唯一の国であり、誇るべきことである。これからも、両者の研究開発は人類のフロンティアの拡大に貢献し、科学技術先進国として、また平和国家としてのアピールにつながっていくと考えている。

#### —参考資料—

- 1) G. Schmidt, "Radioisotope Power: A Key Technology for Deep Space Exploration", *Proc. IECEC 2008*, AIAA Paper 2008-5640, (2008).
- 2) N. N. Ponomarev-Stepnoi, *et al.*, "Russian Space Nuclear Power and Nuclear Thermal Propulsion Systems", *Nucl. News*, Dec. (2000).
- 3) 神戸 満, "完全自動運転の月面用リチウム冷却高速炉 RAPID-L および地上用ナトリウム冷却高速炉 RAPID", *日本原子力学会誌*, 46〔6〕, 387(2004).

#### 著者紹介

星野 健(ほしの・たけし)



宇宙航空研究開発機構 月・惑星探査プログラムグループ  
(専門分野/関心分野) 月着陸探査の研究開発に従事。月・惑星探査に関連する技術、エネルギー変換技術の研究に取り組んできた。

## タイムカプセル記事

この企画では、さまざまなジャンルのさまざまな年代の方に、原子力に対する思いを語っていただきます。

これまでの原子力、これからの原子力

## 世界中で原子力が利用される未来へ

東京大学 石渡 祐樹

原子力が世界中で利用される未来を切に願う。技術、制度、公衆理解およびそれらを支える人材が重要と考える。

原子力は不幸にも軍事利用から始まったが、核分裂が発見されてから20年足らずで平和利用の基礎が築かれたのも事実である。それから50年、安全性、信頼性、経済性は着実に高まり、原子力は役割を拡大させてきた。先人達の努力に心から敬意を表する。先進国では、安いエネルギーの大量・安定供給、化石燃料の輸入量低減による国富流出の抑制など、恩恵を享受してきた。

20世紀後半に顕在化した、地球環境・エネルギー・経済発展のいわゆるトリレンマは、世界人口の多くを占める途上国の急速な経済発展に伴い、近年ますます深刻化している。21世紀は、原子力がこのトリレンマを解消することを切に願う。言い換えれば、原子力が世界中どこでも利用可能になるよう願う。

期待される役割に応じて多種多様な技術を維持発展させていくべきである。例えば、経済的な大規模集中電源としての次世代軽水炉、ウラン資源の有効利用や廃棄物低減に資する各種高速炉、水素製造や製鉄など原子力の

利用形態を広げる高温ガス炉、分散電源として期待される中小型炉などが挙げられる。原子力を長期にわたって安全かつ効率よく利用するための運用・保全技術や使用済み燃料の処理処分に関する技術も重要である。原子力利用国は政府が安全規制に責任を持つのが原則であり、今後の利用国拡大の重要な課題の一つであろう。核不拡散体制の堅持も必須である。各国が長期的にどのようなエネルギー源を選ぶかは、一般公衆および公衆に選ばれた政府が決める。原子力の役割が過小に評価されず正当に評価されるための努力を続けていく必要がある。

このように原子力利用を拡大していくには技術、制度、公衆理解の3点が特に重要であり、それらを支えるのは人材である。自分たちの世代が原子力の将来を担うという強い意志を持ち、国内外の若手研究者・技術者と切磋琢磨していきたい。原子力利用国の拡大に伴い、現在とは比較にならないほど多くの人材が必要になる。原子力先進国の大学に身を置く一人として、国内外の人材育成に貢献して行きたい。

(2008年 12月24日 記)

## 社会知識の質を上げるための責任

関西電力(株) 久郷 明秀

オバマ大統領は就任演説の中で、米国民に対して新たな時代の責任として「国民の一人ひとりが自分自身、自分の国、そして世界に対して義務を負うという認識が必要」と訴えています。これを聴いて、社会技術に対するリスク認知と社会協力意識を研究課題とする自分は、原子力発電に伴い排出される高レベル放射性廃棄物の処分先を求めて無為に時が経過する日本社会の現状に思いを巡らせてしまいました。

この課題を解く責任は、オバマ大統領の言葉に込められた意図と同様に、政治や行政あるいは事業者だけではなく、潤沢なエネルギーの恩恵を享受する国民一人ひとりが意識すべきことだと思います。我々に課せられたこの命題に立ち向かうには、強い指導力とこれを支える周囲からの尊敬を涵養することが必要です。

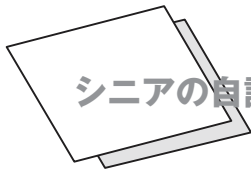
実際に市民の声を聞くと、一般論として意義は認めているのに、メディアからは眼前の局所利益を求める姿とそれを批判する声だけが断片的に伝わります。安全を説明され、それを納得しても、人は眼前の受益(必要性)がなければあえてリスクを犯そうとはしないものです。だ

とすれば、計画が進まないのは多くの人々が受益(必要性)を実感できないからなのか、あるいは科学技術で説明される安全という「事実」をよく知らないから躊躇するのでしょうか？

もし後者が理由だとすれば、その責任は研究者や技術者等の専門家にもあります。今日の責任を未来にまで展開すべしと主張した倫理学者のH・ヨナスは著書『責任という原理』の中で、科学技術の探求は探求能力を備えた認識主体にとって権利、かつ崇高な義務でもあるが、その認識主体が個人の精神から知識を蓄積する社会の集団精神になりつつあることの脆弱性を指摘しています。つまり社会知識の質が専門領域化によって断片化し、社会が総合的知識を持ち合わせていないという代償が現在の状況を作り出しているのかもしれない。

「科学技術の探求から生まれた放射性廃棄物処分方法を活かすために、総合化された社会知識の確立という義務と責任を自分自身はどう果たすべきか？」を考えるこの頃です。

(2009年 1月26日 記)



シニアの自論—原子力新時代を迎えシニアはかく提言する

これまでの原子力、これからの原子力

## マスコミを味方に原子力理解の促進を

シニアネットワーク 小川博巳，斎藤 修

このコーナーは、シニアの方々10人に連載で、現役時代とは別の視点から、原子力に対するそれぞれの思いを自由に語っていただくものです。

### 原子力に手厳しい日本のマスディア

ある大学の先生は、「日本の原子力への風向きが変わったのは、1981年の敦賀発電所の廃液漏れからだ」と説明していたが、私の記憶では1974年の原子力船「むつ」の放射線漏れが、世間を大きく騒がせた始まりであるように思う。

この2つの事件には、いずれも事業者とマスコミ双方に、反省すべき点、改善を要する点がいくつかある。原子力船「むつ」では、(1)漁民の反対を押し切って、嵐にまぎれて出港した事実、(2)放射線漏れという事象を、マスコミが理解できるように説明したか。放射能が漏れたのではなく放射線が出ただけなので、原子炉を止めれば放射線はすぐに下がること、遮蔽設計を見直せば問題ないこと、などわかり易く説明すべきであった、(3)政府が事態を冷静に説明すべきであったにもかかわらず、「徹底究明を指示」など騒ぎを大きくするような態度をとったこと、(4)マスコミが、「原子力船計画暗礁に」などと書き、騒ぎをあおる報道をしたこと、などが挙げられる。

敦賀発電所の廃液漏れでは (1)当時の通産省課長が、異例の早朝5時にプレス発表した。これが結果的に、緊急事態が発生したとの強烈な印象を植え付けた、(2)数か月前に事業者が認可を得ないで工事をやっていたこと、(3)施設外への意図しない放射能漏れが初めて起きたこと、(4)調査した結果、直前に施設内で廃液がタンクから漏れていたことが判明した、などが挙げられる。

なぜこんな古い事例を持ち出したのか？それは、事業者もマスコミも事態の正確な把握と、情報の受け手に対する配慮の欠如を指摘したいからだ。この貴重な反省が活かされなかったことが、同じような事例を招いたといえまいか。これは中越沖地震にも当てはまる。

事業者は、ホームページに状況を正確に開示していたが、一般市民にわかり易く「原子炉の停止・冷却・漏えい防止の機能は完璧に作動し、安心できる状況にある」ことを、いち早く宣言すべきであった。テレビは変圧器火災の映像を繰り返し放映し、週刊誌はオドロオドロしい特集記事で市民の恐怖をあおり、結果的に大きな風評被害を招いた。国は状況を正確に説明して事態を鎮静化するのではなく、いたずらに小言を並べていたことを反省したい。

事態の改善なくして、明るい未来は望めない

課題は事業者・国・自治体・マスコミそれぞれにあるが、中でもマスコミの果たす役割は極めて大きい。国も事業者も、マスコミの手厳しさと商業主義的な報道を批

判するのみではなく、マスコミを味方にすることが肝要である。原子力関係者は、マスコミの強大な情報伝達力と影響力を活かすことに、疎かでなかったか。マスコミの力を借り、彼らとの協調なくして、原子力の明るい未来は望めまい。

マスコミを味方にするための方策は、以前より検討されてはいるが、あえて一例を示し、あらためて注意を喚起したい。以下に主として事業者を対象に述べる。

- ・事業者とマスコミ関係者は、平常時から施設の見学会・説明会あるいは情報交換会など、友好関係の構築が肝要だ。オープンな情報提供の姿勢や原則的なフィロソフィーなど、日頃の交流の中で理解を深めあいたいものだ。疑念が介在した取材では、正確な情報伝達や市民が安心できる報道は望めない。
- ・特別な事態の発生時は、迅速な情報開示が原則だが、初期段階でわからないことは、言い訳をせずにわからないと明言し、調査結果を踏まえて、逐次追加情報を提供するのが誠意というものだ。情報発信者の都合と発想とを反省したい。
- ・情報の受け手であるマスコミ、さらには一般市民の意識と目線に配慮したい。いつ、どこで、誰が、どのように、など具体的に記者が書けるプレス発表と、説明資料・解説図はそのまま報道に活用できる配慮が求められる。
- ・発生トラブルの重要性あるいは安全問題の評価は、客観的な表現に加えて、市民になじみ易い比較表現を添えたい。
- ・マスコミ対応の施設・要員配備・訓練など、マスコミ対応の経験を活かして、日頃から対応訓練を重ねておきたい。
- ・映像情報は視聴者に鮮明な印象を与えるので、対応者の表情・態度・使用する解説略図などにも配慮したい。必要に応じ放送済み映像への追加説明資料なども、あらかじめ備えたい。
- ・緊急事態の発生時には、社会部の記者や他部門からの応援記者が、専門領域を超えた取材に当たる場合が多いので、記者に誤解を与えないための特段の配慮が求められる。
- ・情報発信に際しての伝達ミス、あるいは信頼関係を損なうようなささいなことが、思わぬ展開を招き、取り返しが付かない事態に至った過去の事例を、この際よく噛みしめたい。原子力関係者は、マスコミ対応にあらためて心したいものだ。(2008年 11月10日 記)

## 学校教育充実への提言 先生の地位向上と感動を伝える授業

シニアネットワーク 荒井 利治

このコーナーは、シニアの方々10人に連載で、現役時代とは別の視点から、原子力に対するそれぞれの思いを自由に語っていただくものです。

本年、先生方のバイブルともいえる「学習指導要領」が改訂された。かねて環境、エネルギー、中でも原子力について学校教育を充実してほしいと念願してきた一員として、大きな期待で関連項目を調べた。放射線に関する記述を始めとして全体に大きな進展が見られ、関係者のご努力に心から敬意を表したい。これで「お母さん、私たちの体からも放射線が出てるの知ってる？」という子供の声が聞けるのもそう遠くないと思える。

戦後60年余、2世代が過ぎ去り、学校の状況はあまりにも変貌した。生徒の学力の低下、特に、かつて世界のトップレベルだった理数系の下降は、大学での理工学離れに重なって深刻だ。さらに先生への尊敬の希薄化、学級崩壊、いじめなど事態を知るたびに胸が痛む。しかし考えてみると、子は親の鏡で、日本が高度成長を遂げた陰で、教育問題を後送りにしてきた付けが今、回って来たと考えるのが自然であろう。その責めは大人たちすべてが負わねばならない。

では改革はどこから手をつければよいか。日本の教育が知識の詰め込みに偏り、自分で考える力が不足といわれて久しい。これは教育界を中心に社会全体で取り組むべき課題である。まずは先生の質の向上である。それには先生の地位、環境を尊敬に値するものに高めることが必須である。高、中、小学校のどこから始めるか。これは鉄は熱いうちに打ての原理で小学校からと考える。

次は何を目標に、どこまでどう教えるかが重要である。新指導要領には確かに教えるべき項目が網羅されていて、その狙いもある程度記述されている。しかし何か欠けている気がする。近年、教育に関連し私に強い感動を与えた書物が2冊あった。

1冊目は3年ほど前に邦訳された『総てのアメリカ人のための科学—科学、数学、技術におけるリテラシー目標に関するプロジェクト2061の報告書』である。これは1980年代、米国の生徒が科学、数学で国際水準をはるかに下回っていると判明したことに端を発している。直ちに「全米科学技術教育評議会」が設立され、著名な物理学者ラザフォード博士の強力なリーダーシップで、3年の

歳月と延べ600人余の教育者、科学者によりこの改革プロジェクトがまとめられた。まさに米国の叡智の結集といえる。圧巻は科学リテラシーの必要性を説いた第I部「変化する将来に備える教育」で、子供たちを科学リテラシーを持った人に育てない限り米国の、いや人類の将来はないとの思いが伝わる。科学技術教育に携わる人の必読の1冊だと思う。

2冊目は今年10月に読んだ吉野源三郎の『君たちはどう生きるか』(岩波文庫)である。昭和10年、山本有三は、当時、日ごとに高まる軍国主義の中で、次の時代を背負う少年少女に、人類が築いてきた豊かな文化や科学の進歩を正しく伝えたいとの信念から「日本少国民文庫」全16巻を創刊した。その第1回配本は「心に太陽を持って」で当時評判になり、私も小学生で読んだ。その第16回配本が本書で、当初、山本自身が執筆するつもりだったが、病を得てかなわず、吉野に依頼した。吉野は山本の信念の具現化に心を砕き、中学2年の主人公コペル君が叔父さんに見守られながら自らの思考と体験によって、人生いかに生きべきかを体得していく物語によって見事にその責めを果たした。この本の素晴らしさは70年後の現在、なお、版を重ねていることから自明である。これら2冊に共通しているのは次の世代に正しいことを伝えたいとの激しい情熱である。これが私に感動を与えたのである。生きた教育とは、先生の感動を生徒に伝えることではないだろうか。

教育界の事情を知らない門外漢であるがゆえに、岡目八目の効果を期待し、科学技術教育の充実のための提言を以下にさせていただく。

提言1：先生の地位、環境の向上(まず小学校から)

- ・先生の収入を生徒の親が尊敬に値するものにする
- ・先生の雑用を排除、授業に専念できるようにする

提言2：感動を伝える授業の創出

- ・先生がそれぞれの人生で感動されたことを収集する
- ・これら感動の共有化を図り、有効に授業で活用する

(2008年12月6日記)

# 談話室

## 高浜の温かい愛の証し

高浜町国際交流員 朴 榮先(パク・ヨンソン)

### 国際交流員へのチャレンジ

ヨロブン、アンニョンハセヨ！(皆さん、こんにちは！)

私は、国際交流員として2007年4月から福井県高浜町に住んでいます。韓国の文化を町民の皆さんに教え、日本の文化を楽しく習っています。今回 ATOMOS を通じて皆さんに出会えることを凄く嬉しく思います。

私の家族は、韓国で高校の教師をしている主人と高校3年生の長男、小学校3年生の長女の4人家族です。子供たちも、将来、日韓友好に寄与できる立派な大人になってほしいと願い、私と一緒に高浜町に来て、地元の学校で学びながら小さな国際交流員として頑張っています。

私は日本で国際交流員をされている他の韓国人の方々とは少々違ったキャリアをもっています。韓国では、18年間、ピアノ学院の教師として仕事をしておりました。普段から少しずつ日本の文化や日本語の勉強、日韓友好事業のボランティアに参加するなど、将来、機会があれば日本の伝統文化が残っている田舎の町で生活したいという信念にも似た希望を持ち続けていました。

今は、そんな希望が叶い、町民の皆さんや学校の子供たちと様々な交流をし、毎日がとても充実しています。

高浜町とは、以前から音楽交流を通じたご縁があり、保寧(ポリョン)市音楽親善大使の実績もあり、国際交流員として採用されることになりました。

それまでと全然違う仕事に踏み出したのです。これは私にとってとても大きなチャレンジでした。大変な不安もありましたが勇気を持って決断して来日しました。夫や子供の理解が大きな支えでした。しかし、学校で習ったことがない独学の下手な日本語です。1時間でできるような仕事に4時間も5時間もかかったこともありました。今は、いい思い出になっていますが、その当時は本当に国際交流員がうまく務まるか心配になり、日本語の猛勉強を徹夜でしました。

これまで2年間で実にいろんな体験をしました。感動と感謝に満ちて、思い返すと喜びが溢れます。生涯忘れられない記憶です。そんななかでも、子供達の教育や交流活動の様子や日韓交流の課題について想いを話します。

### 子供たちが慣れるまでの学校の愛と関心

外国での生活や文化の異質感について、いろんな不安と緊張で来日後の1ヶ月間は眠れぬ日々の連続でした。

それは、やはり親として、子供達へのいじめはないか、学校の生活には馴染めているかなどの心配です。日本は隣の国ですが、歴史背景等は複雑な面もあります。子供達がどのように迎えられるかは予想もつかなかったのです。

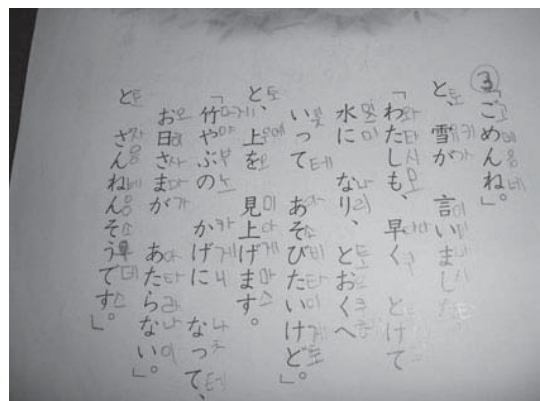
子供達の日本語は、最初は簡単なあいさつができる程度で苦労したようです。しかし、学校の先生や友達にとっても優しくしていただき、今は友達もいっぱい出来、学校に通うのを楽しみにしています。校長先生を始め、先生方の変わらない愛と関心の結果だと考えています。

子供達が日に日に日本語を覚え、生活環境に慣れていった様子を今思い返すと、感謝の気持ちで涙が止まらないです。学校の友達が一つ一つ教える字を韓国語のハングルで一字一字教科書に書きながら日本語を勉強した過程があるからです。それは自分一人ではできないことです。皆さんの協力があって始めてできることです。国を越えて先生や友達を得ることの大切さを考える素敵な体験でした。子供達が高浜へ来て初めに使った国語(日本語)の教科書は、今も大事に保管しています。子供が大人になり結婚してもいつまでも宝になるでしょう！

私は、教育は‘何を教えるか’よりも‘どのように教えるか’が鍵だと思っていました。そのような教育の現場を娘が通う高浜小学校で見えています。学校の責任ある態度に安心できます。安心して任せられるので信頼が生まれます。これは実際に相手のなかに入っていくまではわからないことです。新鮮な感動で胸がいっぱいです。

### 日韓交流の課題

高浜町は、海と山に囲まれ自然がいっぱいの素敵な町



ハングルが書き込まれた国語の教科書



です。町民の皆様も親切で、仕事や生活のことなどいろいろと助けていただいています。

例えば、2年間住んで1回もお米を買ったことがありませんでした。町の皆さんが作ったお米をいただいたのです。さらに、車がない私達のために、皆さんは雨が降ったら傘になり、足になっていただきました。温かい気持ちでいっぱいです。

現在、日本と韓国は歴史問題などいろんな課題がありますが、私たちがもらった温かい愛と関心は一生忘れることができない友好の証しです。様々な仕事で一番嬉しかったことは、「パク・ヨンソンの高浜見聞録」を毎月広報高浜に掲載できたことです。この見聞録は、韓国へ帰って韓国語に翻訳して出版し、日本での生活や町民皆さんの温かい心を韓国の人々へ伝えます。

この前、竹島(韓国名：独島)問題によって日韓関係が損傷を被り、高浜でも韓国の訪問団の来日が取り消されることが起こりました。全国的な現象でした。両国間に領土および教科書問題によって緊張から対立の様相が起こる最大の理由の一つは、歴史認識の差だと思っています。すなわち、韓国は36年間の植民地被害者という観点で始めるから、日本ではその致命的な痛みを理解することができないと思っています。しかし、民間交流を通じて親密になり、お互いの文化と歴史を共有して見ると相互理解の幅が広がって、いつか解答が出ると信じています。

実際に、町民向けの公民館講座や国際理解教育というタイトルで町内の各小・中学校を巡回する時には、韓国語講座はもちろん、韓国の文化・伝統・料理(キムチ教室)・音楽・遊びなどを素材に講演しています。私は高浜での国際交流活動の中で、子供達との交流が一番大事にしています。それは韓国の文化を思いきり紹介することができるし、日本の将来の世代達は韓国に対する親近感を持ってくれるようになるからです。

私の韓国の故郷である保寧市は、高浜町と2007年10月に友好都市締結をしました。私が参加した民間の音楽交流がその端緒になったのです。私の胸に誇らしいこととして刻印されています。そんな縁から、昨年(2008年)保寧火力発電所の所長を含んだ5人のマラソン走者が来日し、日本ではじめて開催された「第13回マキシマソン

大会」に参加しました。短い期間でしたが、伝統的な高浜の田舎風景と高浜小学校での交流について素敵な体験だったと感動のメッセージが届きました。そのようにして、海をまたいで両国間にまだか弱いけれども新たな「架け橋」ができていくのを実感しました。

韓半島と若狭、一衣帯水をはさんで

若狭と韓半島は目と鼻の先の近さです。異国生活の難しさと家族と離れて暮す痛みも持続していますが、高浜町と町民皆さんの惜しみなき声援と思いやりが私を強くしています。高浜は私の第2の故郷になりました。

こうして平凡な主婦で、ピアノ教師だった私が日本で活動することができたのは、夢があったからです。私が去る1月の成人式で“夢は必ずかなう”というタイトルで講演したことも、一生忘れることができません。そして、最初は言葉も十分に話せなかった私達を温かく迎え入れて下さった高浜町民の皆さんの愛がなかったら不可能でした。愛の能力には限りがないということを2年間の経験から実感しました。貴い果実だと思っています。

高浜町には有名な古刹がいくつもあります。日本海(韓国名：東海)側はかつて裏日本と呼ばれていました。でも地元の方は、本当はこっちが表だったのだと言います。大陸の文化や人が韓半島から海を渡り若狭に上陸し、奈良や京都の都に伝わりました。そんな交流の要所であったこの地に住んで、日韓の歴史と風土を実感しています。

これからの私の大きな夢は、韓半島と縁がある若狭の高浜に「日韓交流センター」を作ることです。2年間の交流が今こそ新しい姿で実を結べるようにお祈りしながら、最後に、その間、黙々と“外助”してくれた愛する夫とママの仕事を理解してくれた息子のスンモや娘のダヨンに感謝の気持ちを伝えます。

お仕事などで高浜町に来られる皆さん、ぜひ国際交流員朴の所にもお立ち寄りくださいね。

カムサハムニダ！(ありがとうございます！)

(2008年12月21日記)



韓国の伝統衣装で琴を奏でる



韓国の自宅の庭で家族そろって

# 私の 主張

## 原子力立地地域のネットワークを!!

福井県高浜町町議会議員 栗野 明雄

### 異様な雰囲気

1999年秋、福井県高浜町は異様な雰囲気に包まれた。モックス燃料の搬入、住民投票の署名、町内には賛成、反対のピラがまかれ、町民の間でも議論が活発になった。結果はご存じの通り関西電力の不行き届きということで、モックス燃料は装荷されることはなく、後に英国へ返された。

私はこのとき、高浜発電所で、日本で初めてプルサーマルを実現しようという立場で、最前線に立った。

当時の経験を踏まえ感じたことは、反対派は全国ネットというよりも、グリーンピースなど世界中のネットワークを使って活動を繰り返している。かたや推進しようとするものは、事業者、行政関係者、このことに理解を示す地元の住民である。世界中の情報が入る反対派住民と比べ、地元の発電所の担当者情報だけの賛成派住民である。情報量に格段の差がある。支援力の差も歴然だ。私たちは孤立している。これではだめだと思い、せめて住民の全国ネットを作り情報交換をしたいと思った。

ある国会議員に相談した。ところが、住民という言葉だけで原子力の反対派のことかと間違われた。そこに住んでいる人が住民であるのに、反対派が抗議をするときは住民という言葉で、すべての人が反対のように装う。同じ住民といっても、大多数が理解を示し、現在では日本のエネルギー事情に貢献しているということも立地住民は理解している。不安を持つ人も、よくわからない人も、すべて住民である。新聞などで住民訴訟などとよく書いてあるが、ごく一部の人だと多くの人は理解しているだろう。

### 模索のとき

プルサーマル騒動が終わって、しばらく経ったとき、ある雑誌の対談に出てくれないかと請われ、東京に向かった。相手は、同じ原子力立地点の柏崎の品田氏である。その場でいろいろ話しをしたところ、同じような意見を持ち、同じような悩みを抱えていることがわかった。その後、何とか原子力の立地の住民の全国ネットができないかと模索が始まった。最初は関西原子力懇談会の会合に、誰か良い講師がいないかと問われたとき、彼を講師として推薦し交流を計り、毎年参加をしていただけるようお願いもした。同じ思いでいろいろと、西と東で、推進派の全国ネットができないか模索をした。

品田さんもいろいろ模索をされた。そのような彼の努力の結果、紆余曲折ありコアメンバー会議というグルー

プができた。全国の原子力関連の立地から、消費地の原子力を理解しようという活動団体から、お集まりいただき意見交換をする場所ができた。これには事務局の大きな努力があり、また、足で稼ぎ汗を流して築きあげられたものである。最初はごちなかつたが、回を重ねるうちに人間関係が円滑になり、何でも話せる雰囲気も出てきた。こうなると原子力の立地の悩み、問題点の共有もできる。最初は原子力の広報、広聴を課題に話し合い、現在は地域振興などの課題で話しをしている。このような会合の中で、人の和をつなぐことはそこから無限のものが生じる可能性を秘めていることを感じる。

このことは現在進行中であるが、原子力立地地域が原子力発電所を容認して共存したことにより、原子力だけでなく他の産業も活発になったという実績を作ることができれば、これからの立地は進むと思う。そのためには事業者や、国に頼りすぎず、自分たちの町は自分たちで作っていく気概が必要である。町づくりはそこに住んでいる人がするものだから。このようなネットワークのグループから町づくりに欠くことのできない人材が育っていくことを切に願っている。

### 若狭地域での取組み

若狭高浜で行われている地域共生活動の一端をご紹介します。原子力平和利用協議会高浜支部では、毎年夏にサマースクールという行事を行っている。これは発電所の若手職員が高浜中学校の生徒に勉強を教えるものである。受験の体験談を話した後、数学や理科といった教科の課題を与え、その後、寺子屋か塾のような感じで、数人に一人社員が付き、和気あいあいのうちに勉強をしている。これは大変好評で、学校も年中行事に組み入れて、今年はどうのような問題を用意しようか先生方も準備をしている。この行事はもう18回を数えた。私は大きな地域共生だと自負している。これは教師と発電所社員の交流



サマースクールのひとこま

も生んだ。学校のパソコンのLANを組むときに、このようなことに慣れている電力社員に連絡をして、アドバイスを受けたそうである。また、発電所の社員が中学校の外部講師として、授業を行ったとも聞いている。このように毎年、生徒の前に社員が顔を見せるのであるから、発電所のどんな人が運転をしているのか、顔が見え、肌で感じることができる。立地地域ではこのような地道な努力の積み重ねがあって、少しずつ少しずつ発電所への信頼ができていくものだと思っている。

このような事例もコアメンバー会議では話しをするチャンスがあり、地域共生活動の参考事例が発表され、交流が行われるのである。

原子力関係者と地域の交流の試みとして、2008年11月3～5日にマキシマソンというイベントが行われた。これは世界原子力従事者評議会が主催をして、世界各国を回っているものである。内容は、ジョギングのようなスピードで、駅伝形式で、また、グループを組んで、長い距離を走るものである。今年は、13回目で京都四条大宮から高浜町の城山公園までの、約100キロの西の鯖街道といわれるコースを走った。私は実行委員となりこのことに携わった。最初はこの計画はどうなるのだろうと思ったが、終わってみると誰もが大変良かったという感想だった。高浜町は海外から来られたお客さんを受け入れたわけであるが、町内の高浜小学校では、国際理解教育の指定校になっていることもあり、大変積極的に受け入れてくれた。校長に根回しをし、教育長にお願いをしてこのようなことは実現するわけである。後で話をうかがうと、職員一人一人がこのようにしようというアイデアを出し、計画を練ったという。当日は町の職員はもちろん、地域の重鎮から若手、婦人会などが総出で受け入

れた。ランナー側もいろいろ用意をされていたようである。後で父兄に聞いたのは、スイスのチョコレートが児童一人に一粒ずつ配られたようだ。その父兄の話ではこんなことは一生の思い出になる、との話を聞いた。実行委員になり忙しい思いをした甲斐があったというものがある。そして、このイベントに関わり、推進派住民ネットワークも世界に根を広げられる可能性があると感じた。

“なにを伝えていくのか”

最後に私の思いを少し述べたい。

知恩、感恩、報恩という言葉がある。恩を知り恩を感じ恩に報いるという意味である。原子力発電所は、立地するときのいろいろな反対運動をはじめ、様々な障害を乗り越えて作られてきたものと理解している。

ある原子力発電所の責任ある立場の方に、「〇〇さんのところへお尋ねになっていますか」と聞いた。答は、「〇〇さんて誰ですか?」だった。私は愕然とした。〇〇さんは、その発電所の受入れに最大の功績のある方で、初期から地元対応をしていた所員の方は、「当社にとって神様みたいな方です」と語っていた。10年ほど前までは、黒塗りの車が〇〇さん宅の前にたびたび止まっていたのを記憶している。きちんと報告をされていたものと理解している。技術伝承には会社を挙げて取り組まれているが、このような歴史の伝承、人と人の心の伝承は途絶えてしまったのかと嘆きたい。

どこの家でも仏壇があり、自分が存在する命の源のご先祖に感謝をしている。世界中どこへ行ってもお墓は存在する。先祖に感謝するのは万国共通というよりも、人として当然の行為である。当町のある経営者は、「恩は石に刻め、恨みは水に書け。」と私に教えてくれた。恩人の名前も知らない責任者で感謝の心があるといっても誰も信じようがないだろう。これでは都会の住民が「電気はどこから来ていますか?」という問いに、「コンセントです」といった話を笑えないと思う。自分も同じことなのだから。悲しいかな事業者の体質というか風土なのかもしれないが、目先のことばかりに心を奪われ、保身に走る。このようなことのない素晴らしい職員もたくさんいるが、上記のような人が表に立つと、会社の体質だということになりかねない。会社の規模もそこに働く職員の器も大きいことで、信頼と安心が得られる。

心の伝承がなおざりにされているから、ことさら安心を!と叫ばれるのではないだろうか。

(2008年 12月22日 記)



マキシマソンの模様

ランナーに伴走する中学生、婦人や杖の老人が見守る。

# 会議報告

## インドの聖地アラハバードの国際会議 Emerging Challenges in Science and Technology

2008年11月13～15日(アラハバード市, インド)

### 聖地アラハバード

インドの聖地アラハバードで、科学・技術の新しい挑戦と題する国際会議に参加した。医療、環境浄化、エネルギー、原子力、癒しの科学などがテーマにあがった。米国、フランス、ロシア、イラン等のほか、極東アジアからは韓国と日本が参加した。日本は東工大から2名が参加(もう1名は松本義久氏)。主催は、アラハバードに拠点を置く United Institute of Technology (UIT) である。工学、医学、薬学などの連合体。学長はインド放射線医学会会長やバーバ研究所放射線生物学医療科学部長を務めた K. P. Mishra 教授。彼が会議のホストである。

会議は、初日はプレス発表とレセプション、2日目は基調講演、分科会、パネル、3日目はテクニカルツアーであった。参加者は、学生を含めて約200名。

### 野良牛のサスティナビリティ

朝、ゲストハウスから大学まで小一時間ほど車で通う。インドの雑踏は朝から夜まで凄まじい。人、牛、犬、自転車、バイク、車がうごめく。路傍のメシ屋の脇のごみ捨て場では、野良牛がものうげにごみを漁っている。そして、しばらくいくとアウトカーストのおばちゃん達が路肩で、かき集めた牛糞を成形し天日に干している。ヒンドゥーでは、牛糞は非常に聖なる賜物で、燃料としては火力もあり重宝されている。神聖な牛がごみを食べて糞という価値を新たに生む。牛は持続性のエンジン。

会議の始めに重要参加者が、開会式を行う(写真)。トーチに5カ所から火を灯す。なかなか厳かな空気に包まれた。会議は医療と生化学系の話題が多くを占めた。会議中には頻繁にお茶の時間がある。とにかくお茶をよく飲む。学生達は遠来のゲストが珍しいようで、すり寄って

来ては、“お話を”, “一緒に写真を”, “サインを”と迫る。皆、ハイカーストの子弟である。

夕方5時半頃に会議はおわり、ゲストハウスに戻ると、軽食(ナンとカレー)に酒(スコッチ)が用意されていた。外国人を中心に20人くらいで歓談した。

### 意外なテクニカルツアー

翌朝、朝もやのなかをテクニカルツアーにとのホストの案内で出発。どこへ行くのかと思いきや、着いたのはだだっ広い河原。そこら中に野良牛がいる。人もいっぱいいる。そして、サドゥ。サドゥはヒンドゥーの聖者のことで、仙人のオリジナルといわれる。しかし、インド通の友人によれば、観光地で見かけるサドゥはほとんどが『観光サドゥ』。平たくいえば、自称サドゥの物乞い。「しかし、まったく見分けがつかないよ」と。サドゥは本物も自称も皆アウトカーストである。

アラハバードは、サンガム、つまり河の合流点にある。ヒンズーは“交わり”を尊ぶので、神聖さにおいて旅行者に人気のヴァラナシ(ベナレス)に勝る。ガンガー(黒)とヤムナー(白)の合流に加え、伝説の河サラスヴァティーの実在も最近明らかになった。この河は地下伏流水がこの地で湧き出し合流する。舟を漕ぎ、聖花を流した。

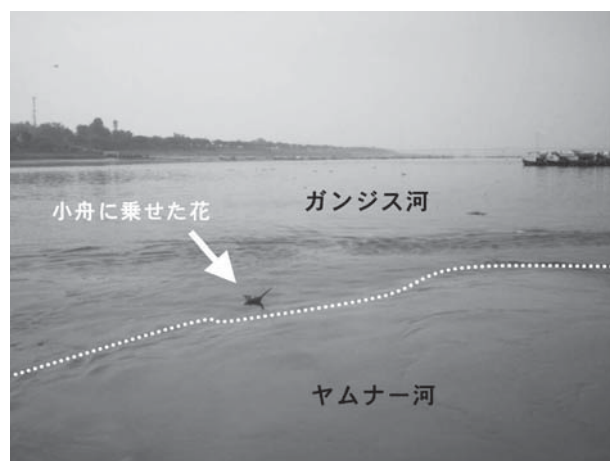
### サンガム、カースト、テクノロジー

インドの科学・技術になかなか底知れない活力と実力があることが会議を通じてわかった。そして、外を歩けば野良牛、サドゥ、サンガムにカースト。これらがどうもじっくり相容れない。しかし、そこにテクノロジーの未来があるのかも知れない、と感じた。

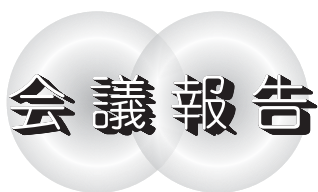
(東京工業大学・澤田哲生, 2008年12月1日記)



トーチ点灯の儀式



サンガム(手前がヤムナー, 向こうがガンガー)に小舟の聖花を手向ける(矢印)



## 第7回核融合エネルギー連合講演会 核融合は地球を救えるか

2008年6月19～21日(青森市民ホール&アウガ(5F)AV多機能ホール)

1995年以来、隔年開催され第7回目となる核融合エネルギー連合講演会は、「幅広いアプローチ」実施サイトの一つ青森県六ヶ所村にほど近い青森市民ホールおよびアウガAV多機能ホールを会場とし、当学会が核融合工学部会を中心としてプラズマ・核融合学会と共同主催したものである。炉心プラズマ・炉工学を始めとする広範な関連研究分野の成果を検証し、併せて今後の研究の進め方、基礎科学への寄与、技術的波及など幅広く議論を展開する貴重な機会として、我が国の核融合研究の進展に重要な役割を果たしてきた。前回以降、我が国の核融合研究開発を取り巻く状況に一つの大きな変化が生じており、建設サイトがフランスのカダラッシュに決定された実験炉ITERに関連して、2007年春にITERを補強補完して原型炉への道をより確かなものとする「幅広いアプローチ」活動が日欧間で合意された。

一方、エネルギー問題と強く関連する地球環境問題は、気象や生態系の激変が実感として意識されるに至り、エネルギー資源の枯渇の懸念も予想されるなど、近代文明の行く手に少なからぬ不安の影が見え隠れするようになってきた。制御された核融合エネルギーを実現するという研究者の使命は、文明史的な意味でその重要性を増したとあって過言ではない。その中で、「核融合は地球を救えるか」という主題が示すように、学術研究に留まらない人類・社会への貢献について研究者自らが問い応える場として重いテーマを設定し、今回の連合講演会が企画された。

本講演会は、組織委員長の清水昭比古九州大学教授の主催者挨拶、三村中吾青森県知事の来賓挨拶で始まり、まず、池田要ITER機構長より「建設段階に入ったITER」(写真参照)、松尾泰樹研究開発戦略官(文部科学省研究開発局)より「ITER, BAを始めとする我が国の核融合研究の現状」と題する2つの招待講演を頂いた。



次に、エネルギーと社会、環境の視点から、C.L.スミス英国カラム科学センター所長・欧州核融合諮問会議議長より「Energy, Sustainability and Development」、佐和隆光立命館大学教授より「低炭素社会2050：革新的技術の役割」、田中知東京大学教授より「核融合はサステナブルなエネルギー源たりうるか—軽水炉、高速増殖炉との比較」と題する3つの招待講演を頂いた。これらの講演を踏まえて、主唱テーマである「核融合が地球を救えるか?」について、パネルディスカッション(座長：小西哲之京都大学教授、蝦名武青森県副知事、招待講演者の池田氏、松尾氏、佐和氏、田中氏および松田慎三郎日本原子力研究開発機構執行役)を実施した。会場からの質疑をへて、座長より「核融合が地球を救わなければならないこと、そのメッセージを研究者自身が出すべきこと」がまとめられた。

また、特別講演として、本島修核融合科学研究所所長より「核融合研究の基盤」、奥村義和日本原子力研究開発機構副部門長より「ITER・BAへの取り組み」と題する2つの講演を頂いた。シンポジウム講演は、I. DEMOに向けた工学の展望、II. ITERと大型装置、III. 磁気リコネクション研究における核融合と宇宙科学の連携、IV. 若手セッション：DEMO世代からみた原型炉開発課題、V. プラズマ物理の展開—炉心プラズマの制御を目指して、VI. 原型炉に向けた開発計画の6つが企画された。それぞれ時宜を得た最新の話題、研究課題について専門家による講演と活発な質疑が展開された。

ポスター講演は、炉心プラズマ：磁場、炉心プラズマ：慣性・ドライバ、加熱電流駆動、プラズマ計測、核融合工学：超伝導・第一壁、炉材料、トリチウム・ブランケット、炉システム設計、プラズマ基礎・応用、理論・シミュレーション、関連研究、ITER/BAの12のカテゴリーで一般募集した。それぞれ発表者と参加者との熱心な討論が活発に行われ、その中から専門家の厳正な審査を経て特に優秀と認められた9名に優秀発表賞が贈られた。

最終的に、参加者総数358名(会員一般253名、学生105名)、ポスター講演総数約280件。今回、会期を1日増やして企画した、テクニカルツアー「六ヶ所村内にあるITER-BAサイトおよび日本原燃(株)再処理関連施設」と、高校生を会場に招いての「霧箱実験授業」および高校への「出張授業」には、128名のツアー参加と五所川原、八戸、弘前工業の3高校合計で約140名の高校生の参加を得て、盛況であった。

(日本原子力研究開発機構・林 巧, 2008年12月4日記)

## 新刊紹介

### 原子力発電の歴史と展望

豊田正敏著, 203 p. (2008.10), 東京図書出版会,  
(定価1,300円+税) ISBN 978-4-86223-283-0

本書は、日本の原子力発電事業のひとつの歴史書である。著者は、昭和30年代初期の黎明期から、東京電力を主な舞台として、原子力事業に広く深く関与してきた。本書には、そのような歴史の証左ともいえるべき興味深いエピソードの記載が随所にある。いくつかを拾ってみよう。

わが国第一号の発電炉であるコールダーホール改良型炉(東海1号炉)の導入時には、事故時の放射性物質の拡散式に関し、英国気象庁の式(サットンの式)の有効性を、実際にヨウ化銀を放出する拡散実験に基づいて検証した。福島1号炉を沸騰水型にするのか、加圧型にするのか。その決定の経緯はあまりにも単純だった。福島の第二立地選定での地元対策。そこには初期の広報の実像が語られる。地元民とのやり取りが目に浮かぶようである。応力腐食割れ(SCC)への根治的対策の立案の苦勞。沸騰水型軽水炉の改良標準化への道。そして、カーター政権時の国際核燃料サイクル評価(INFCE)への関与についても紙面が割かれる。興味深いのは、再処理コストの評価値は現在では当時の約10倍になっている点であ

る(p.135, 表4)。その他、核不拡散への国際的核管理への取組みの重要性や低線量被ばくに関するICRPの2007年勧告への言及もある。

そして、最終的には、国際的な日本の位置づけを十分認識のもとに、高速炉、再処理、核廃棄物処分、そして核拡散防止対策をいかに進めていくか、長年の実務経験に基づく筆者の信念が語られる。とりわけ近未来の高速炉実用化への提言が8項目にわたってまとめられる。同時に、著者の年来の持論であるトリウムサイクルへの思いも綴られる。

原子力の研究や事業の渦中にあった人物が、自らの視点でその歴史を語る書籍は少ない。本書は、そのすべてではないにしても、日本の原子力事業の歴史を知る上で貴重な資料になっている。未来に対する提言にはやや辛口の意見も含まれている。原子力が地球温暖化の防止とエネルギー安全保障の本命になるための課題は多い。歴史を担ってきたという自負が、世の中、とりわけこれからの原子力界を担う指導者に問いかけ、警鐘を鳴らしている。同様の書、つまり一人称で語る歴史と展望の書が、もっと多く世に問われても良いのではないだろうか。

(東工大・澤田哲生)



### 学会誌アンケートシステムのご案内

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

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

#### <アンケートの回答方法>

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

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

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

# 日本独自の技術は、どのように活用されているか

## 自国の技術をアピールする記事が好評(11月号の Web アンケート結果)

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

### 1. 高く評価された記事

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

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	報告	地震直後の現場での対応は、冷静で適切なものだった	3.94
2	巻頭言 アーカイブ	優れた人材の養成こそ急務である	3.88
3	解説	ロシア余剰核兵器解体プルトニウム処分の現状と日本の協力—ハイパック MOX 燃料協力の10年を振り返って	3.82
4	解説	気候変動対策の制度設計に向けて	3.80

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	報告	地震直後の現場での対応は、冷静で適切なものだった	3.67
2	NEWS	NEWS	3.63
3	連載 講座	軽水炉プラント—その半世紀の進化のあゆみ(14)	3.59
4	巻頭言	原子力安全への思い	3.56

今月は、「内容」、「書き方」とも、中越沖地震後の対応に関する報告が第1位でした。

### 2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 学会のホームページが11月から変更されたが、表紙に反映されていない。
- (2) 中越地震に関する多角的な意見が載せられていて非常に良かった。
- (3) 「連載講座」に関して、原子炉が日本に輸入されたのち、日本人の手で、コンパクトで、効率のよい原子炉に改良された ABWR は、まさに日本らしい改良である。
- (4) 今後、掲載を希望する記事として、日本独自に開発してきた技術が、どのように現在の原子力発電や再処理工場で活かされているかに関連する記事あるとうれしい。

### 3. 編集委員会からの回答

- (1) 上記(1)のコメントに関して、変更のタイミングが悪くて申し訳ありませんでした。現在は表紙にも反映されています。
- (2) 上記(3)、(4)のコメントに関して、このような日本独自の技術の活用については、学会誌だけではなく、社会にもっと PR していく必要があると思います。建設的なご意見をありがとうございます。

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。

## ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

### 手で触れ実感できる原子力発電を

産経新聞 水上 創

徐々に埋まってきていたという感覚は、木っ端微塵に吹き飛んだ。新潟県中越沖地震をめぐる地上波テレビの第一報を聞いた瞬間。ヘリコプターから映る現場を見て、一部の報道番組のメインキャスター(MC)は「旧ソ連のチェルノブイリの事故のときのような黒煙が出ています。大丈夫でしょうか」とコメント。原発の仕組みを知っている人なら即座に管理区域外からの黒煙と気付く。「黒い煙は原子炉のある建物から出ていません。状況をよく見守りたいと思います」とコメントすれば、どれほどの国民が安心したか。「第一報を報じる人に知識がなければならぬ」。啞然とした。

トラブルが起きたとき、国民やジャーナリストが意識することと、原子力発電所にかかわる人々が意識することとの差を埋めるのは、永遠の課題とされる。漏えいした放射線の量をはじめ、あらゆる情報の広報をと主張する国民やジャーナリストの意識に対し、「冷やす、止める、閉じこめる」の3原則が守られているか、原子炉の溶解がないかを最重点に広報する担当者との意識の差は確かに乖離していた。その差は徐々に埋まってきていた。トラブル報道を長く手がけ、詳しい知識を持つ社会部や科学部の記者は増えている。広報担当者も社内に意識改革を訴え、即発臨界隠しの発覚以降、大きく空気は変わってきている。だからMCの言葉は空しい。

それならば、MCへの理解を深める努力をすべきか。必要ではあろう。もっとも、多メディア時代。CS放送に「日テレNEWS24」などがあるし、地元にはCATVも流れる。ましてやインターネットで誰もが発信できるのだから、きりが無い。ここは一つ、アイデアと費用対効果で革新的事案に取り組んではいかかだろうか。

そう思うのは、私自身が原子力発電所を見たりPRセンターや勉強会、本などで学んだりしても、どうにも原子力発電の仕組みがわかったようできて、イマイチわからないと感じるからである。だから、もっと機械に触れ実感したいという欲求にかられる。

そこで、まずアイデア。原子力発電所が建設される段取りの撮影を提案したい。特に①人類が生み出した「第三の火」を強調し核分裂の構図がどうなっているか②「冷やす、止める、閉じこめる」の3原則③系統にどう流れ家庭の電気が点灯するのか④シーベルトとは何か一などがわかるよう力を注いでいただきたい。幸い東京電力・東通やJパワー・大間が建設に入る。ぜひ商業映画か記録映画にして国民に提供していただきたい。映像が世に出ればテロリストに攻撃材料を与えるという意見もあろう。そこは学会はじめ関係者が知恵を絞って工夫してもらいたい。だからこそ、アイデア

と名づけたゆえんである。高層ビルが続々登場したころ、国民の多くが恐いと思わなかったのは、映画「超高層のあけぼの」(1969年)が公開された影響が大きかったと私は思っている。

次に費用対効果。これは原子力発電所のプラモデルを提唱したい。核分裂や系統から家庭の電気が点灯する回路のようなものにまでしていただければ、ものすごくわかりやすくなると思う。素人の見る機会がまずないタービンも入れてほしい。商業ベースに乗らないなら、これまた関係者の知恵と支援で実施してもらいたい。

日本は高学歴社会になったといわれる。私が大学に進んだころ38.4%(1975年)だった大学進学率は、2006年で52.4%にも上昇している。確かに国民は賢くなったのだろうが、頭でっかちに成りすぎていないか。私は小学生のとき、学研の「科学」で豆電球を光らせ心が躍った。ゲルマニウムラジオが完成したとき体全体が震えた感動は筆舌に尽くしがたい。車のプラモデルを作り部品を壊してしまい、泣きながら購入店へ行ったら「もう一回作ってみなさい」と無料で同じものをくれた優しい店主の顔は今も忘れない。

難しい仕組みも模型を作り映像で目を見張ることによって理解できる。それでこそ、大衆と原子力関係者の意識の差は埋まる。諸外国に比べ日本で科学に興味を持つ子供が少ないといわれるのも、私のような体験をした子供が減ったからではないか。

もちろん関係者の絶えまざる努力には敬意を表す。特に文科省の「原子力発電施設の模型の整備」に対する都道府県への教育支援事業交付金や簡易放射線測定器の貸し出しは評価される。ただ、模型は計器類が多く、子供にわかりやすいとはいえない。こうした努力を今一步、子供の立場に立って進めてほしい。

映画を見たりプラモデルを買ったりする人がいるのか？ その質問には必ずいると保証する。少なくとも、私が見たり買ったりするからである。



水上 創(みずかみ・はじめ)

産経新聞東京本社 編集局経済本部編集委員

1978年成蹊大学法学部法律学科卒。出版社勤務を経て、産経新聞社入社。宇都宮支局、社会部、東京・大阪両本社経済部を経て千葉総局・社会部・経済部各次長。長野支局長、フジサンケイビジネスアイ企画担当部長の後、06年8月から「月刊エネルギー」編集長、08年7月から現職兼務。