

### シリーズ解説

我が国の最先端原子力研究開発

No. 4

### 16 FBR サイクルの実用化を目指して(Ⅱ) 革新的技術の具体化に向けて課題を解決

FBR サイクルの実用化に向けて、革新的な技術開発の具体化を目指して進められているFaCTプロジェクト。今回は炉システムと燃料サイクルシステムにおける研究開発の最前線の状況を紹介します。

水田俊治, 近澤佳隆, 鷲谷忠博, 鈴木政浩

### 講演

### 32 社会と原子力の相互信頼を求めて どうする低迷状態から脱却するために!

緊急時の決断や情報発信に対する国の体制は、不十分だ。また地方自治体は自らのデータで住民の安全を確保する判断をせず、事業者は国や自治体への配慮を先行させる。報道では商業主義が優勢で、国民は国益より自分本位の風潮がある。

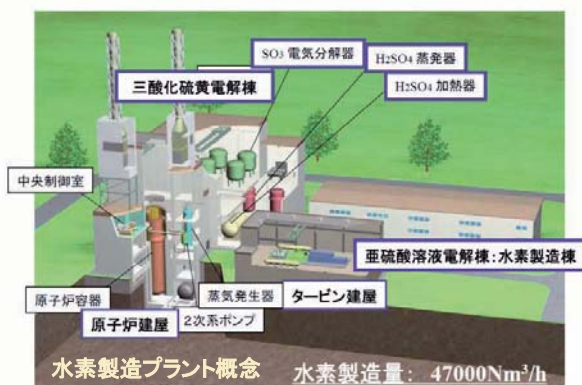
竹内哲夫

### 報告

### 36 高速増殖炉に適用可能な水素製造技術の開発—ハイブリッド熱化学法の開発

高速増殖炉で発生する熱と電気を利用して、水素を製造する—ハイブリッド熱化学法と呼ばれるこの技術の研究を、原子力機構が進めている。研究はどこまで進んだのか。これからの課題は何か。

中村俊男



表紙イラスト 新宿御苑 / 東京都/新宿区

都民の憩いの場となっている新宿御苑は、いつの季節訪れても家族連れなどで賑わっている。桜の季節、新緑の季節、そして紅葉の季節は、木々が色づきひと際美しさが映える。スケッチをする人の姿もあり、のんびりとした時間が流れていた。

### 巻頭言

### 1 日本の原子力界の真の実力を 発揮しよう

藤江孝夫

### 時論

### 2 低炭素社会を目指すエネルギー・ 原子力政策—洞爺湖サミットを超えて

セキュリティや経済性、環境適合性に優れる原子力を進めようとする動きが、世界中で活発化しはじめた。とりわけエネルギー自給率が低い日本では、原子力発電が果たす役割が極めて大きい。

加納時男

### 4 我が国の原子力俯瞰マップを 作りませんか

科学はどんどん専門化・細分化していくという宿命をもつ。原子力分野もその例外ではない。しかし技術の有用性は、ボトルネックが解消されているかどうかで決まる。我が国の原子力開発には今、何が足りないのだろうか。

班目春樹

### 解説

### 22 高度解析技術が原子力材料研究 に与えたインパクト—最新技術で ここまでわかってきた!

材料部会

原子力材料研究の進展が著しい。軽水炉圧力容器の高経年化に伴う材料挙動変化のメカニズムが次々と解明されてきている。それをもたらしたのは、材料研究者による解析技術の高度化だった。

木村晃彦

永井康介, 藤井克彦, 西山裕孝, 曾根田直樹

### 27 核データ活動における大学の役割 —原子力研究と基礎研究

原子炉等を設計する際に不可欠な、原子核の反応や物理的な特性に関するデータが、核データだ。この核データライブラリーの開発研究の現状と今後、大学が果たす役割について述べる。

馬場 護

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

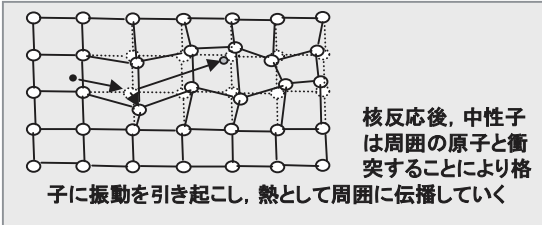
※前月号の表紙説明の訂正文を51ページに掲載しております。

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(5)

41 壁はどのくらい熱くなるか？

核融合炉内では中性子が原子核と衝突すると、その運動エネルギーおよび核反応で発生するエネルギーは格子の振動を介して熱エネルギーとして周囲に拡がる。その結果、壁がどれくらい熱くなるのかを、考察する。

真木 紘一、今野 力



連載講座 軽水炉プラント  
—その半世紀の進化のあゆみ(13)

46 日本の軽水炉開発(7)  
—PWRの改良標準化(その3)

三菱は昭和57年に、国の第3次改良標準化計画の一環として、電力5社と共同でAPWRの開発に着手。それまでのPWRプラント技術の集大成をめざした。そしてそれは、敦賀3,4号機や米国向けのUS-APWRとして、実用化されようとしている。 向井 卓、鈴木成光

談話室

54 原子力と地震に関する危機管理研修  
—日本滞在記 Manon PAPIN

56 最終処分地選定問題を考える—  
地層処分関連研究施設、「幌延計画」に  
果たした自治体の活動を振り返る  
坪谷隆夫

会議報告

59 アジア太平洋地域における核不拡散協  
力のための透明性技術に関するワー  
クショップ 久野祐輔、勝村聡一郎

日米欧学生交流

60 アルゴン国立研究所(ANL)  
滞在記 前川 陽

50 周年記念企画

原子力学会1959—2009

巻頭言アーカイブ

52 創刊の辞

茅 誠司

タイムカプセル記事

53 「夢と現実の間」 長谷川尚子  
「原子力への想い」 中村政雄

6 NEWS

- 洞爺湖サミットの環境合意文書「原子力は不可欠」
- 中越沖地震から1年で、甘利経産相が談話発表
- 柏崎刈羽原発の外観点検が全号機で終了
- 原燃、再処理工場のしゅん工時期を11月に変更
- 放射性廃棄物を低減できるコンクリート壁を開発
- 貯留水用の小型・可搬式水質浄化装置を開発
- ロシアで国際会議・展示会「ATOMCON 2008」
- 原産新聞が別冊特集「『低炭素革命』を世界へ」
- 海外ニュース

ジャーナリストの視点

63 「原子力界は情報公開に積極的か」

金木雄司

40 書評「誰も知らなかった小さな町の原子力戦争」  
金氏 顕

51 From Editors

58 支部便り 関東・甲越支部 荻野晴之

64 英文論文誌(Vol.45, No.10) 目次

65 「2009年春の年会」研究発表応募・参加事前登録案内

66 会報 原子力関係会議案内、人事公募、主要会務、  
編集後記

後付 入会案内

WEB WEBアンケート

6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://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/atomos/>

# 日本の原子力界の真の実力を発揮しよう



有限責任中間法人 日本原子力技術協会 理事長

**藤江 孝夫** (ふじえ・たかお)

京都大学工学部卒業後、日本原子力発電㈱に入社。企画部長、常務、副社長、フェローを経て、今年3月から現職。

米国・スリーマイル島2号機や旧ソ連・チェルノブイリ4号機の事故の後、欧米では新規の原子力発電所の建設がほとんどなくなってしまったのに対し、我が国では、改良標準化を進めつつ、発電所の建設を着実に継続してきた。また、運転管理の分野では、我が国の発電所の計画外停止率は非常に小さく、安全系機器の故障率も低いなど、世界のトップレベルの信頼性を維持している。

このように、我が国の原子力技術が、発電所の設計・建設や運転管理の分野で十分な実力を有していることは定評のあるところであり、昨今、原子力カルネサンスが叫ばれ、多くの新規の発電所の建設計画が発表される中、我が国に対する世界の期待は非常に大きい。しかも、我が国は、単なる機器の製造や発電所の建設のみならず、新たに原子力発電を始める国が必要とする法制度の整備から運転・維持管理までの体系的な原子力開発の展開にも幅広く協力できる総合力を備えている。

ところが、これらの実力が肝心の本家本元の国内において有効に発揮されているかとなると、これが甚だ疑問なのである。例えば、発電所の設備利用率と作業員の集団被ばく線量について、ここ10年間(1996～2005年)の推移を海外と比較してみると、世界の原子力主要国においては、いずれも数値が大幅に改善されている。これに対し、我が国においては、低い水準のままであるどころか、むしろ逆に悪くなっている。

世界では当たり前の原子炉出力向上も、原子力学会の委員会において技術検討評価を行った結果が活かされず、いまだに実現していない。また、現場においては、発電所員は検査対応等の日常業務をこなすのに汲々としており、安全性や性能向上のための現場に密着した取り組みが十分に行われているとはとても思えない状況にある。残念ながら、これまで永年かけて磨き上げてきた折角の実力が、国益としてほとんど活かされていないのが、今の我が国の現状なのである。

地球温暖化対策、エネルギー安全保障の「要」とされている原子力発電は、我が国の存立や国際社会への貢献という観点からも、その実力を十分に発揮する義務を負っている。国や事業者だけでなく、いわゆる「産・官・学」が課題を分かち合い、共に知恵を出し合い、我が国原子力界の発展に向けて、その総合力を発揮することが今ほど求められている時期はない。

このような状況のもと、日本原子力技術協会は、これまで「民間規格の整備」、「情報の収集・分析・活用」、そして「安全文化醸成活動の支援」を行ってきた。また、この4月から新たに「原子力技術者の育成・維持」に係る活動や電力が実施する保全活動の最適化を支援するため、電力共通のノウハウとなる「電力共通技術基盤(現場技術者ネットワーク、情報ライブラリー)の構築」に着手した。

原子力学会との関係においては、これまで、学会標準の策定・改定のみならず、各種の技術検討にも参加してきた。そして、今後、真に科学的・合理的な原子力利用を実現するためには、原子力技術者の育成をはじめとし、学会と協力し合いシナジー効果を発揮する余地がまだまだあると考えている。

日本の原子力界は今まさに正念場にあり、我々の真価が試されている。我が国の原子力がより健全で元気のある姿となるよう、我々も精一杯努力する決意でいるが、特に、将来のこの地球の運命を担う若い方々には、社会に対する責任を自覚して、誇りを持って更に大いなる健闘を期待したい。

(2008年 8月26日 記)



# 低炭素社会を目指すエネルギー・原子力政策—洞爺湖サミットを超えて



加納 時男(かのう・ときお)

参議院議員

東大法学部卒業後、東京電力に入社。平成9年に同社副社長を退任し、翌年に参議院議員(比例代表)に初当選。文部科学大臣政務官等を経て平成20年国土交通副大臣、現在に至る。著書は『エネルギー最前線』(NHK ブックス)など。

世界の原子力発電所の現状は、まさにルネッサンスだ。帰ってきた米国、目を覚ました欧州、活発なアジア、ロシアを中心に旧ソ連・東欧、中東・アフリカでも動きが激しい。米国の原子力発電は104基で電源構成では約20%もある。30年間、新規発注がなかったが、パフォーマンスを改善し、経済性や信頼性を向上している。約30基の建設計画が近々着工しそうだ。本年4月の世論調査では、原子力発電に賛成か反対か?の回答に、賛成63%で反対33%である。欧州ではしばらく新增設が停止していたが、セキュリティリスク、環境リスクなどから原子力回帰の動きがある。

アジアでは、中国は2020年までに40 GW 計画もあり、インドでも2020年までに20 GW 規模の新設計画がある。韓国は8基10 GW を建設・計画している。ベトナム、インドネシア、タイなどでも計画がある。

世界的に今なぜ原子力か。それはセキュリティ、経済性、環境適合性に原子力の利点があるからである。まずセキュリティについては、化石燃料の資源リスクがある。産油国の偏在、資源ナショナリズムの台頭、地政学的リスク、ピークオイル論はあるが、それ以上に心配なのは、日本のエネルギー自給率は極めて低いことだ。原子力を除くと4%だが、原子力を含んでも19%程度である。特に日本の原油中東依存度は世界的にみても異常異様である。わたしが思いついて計算(下記表を参照)してみたが、1次エネルギーの中東依存度は、日本が45%もあるのに、米国はわずか5%である。上記の課題を克服するには、原子力発電の役割が大きい。

経済性では、そもそも他の電源と比較して、原子力は原油価格高騰前の試算でも経済的だ。燃料費のウェイト

	石油/ 1次エネ	輸入石油/ 石油	中東石油/ 輸入石油	中東石油/ 1次エネ
日本	50%	100%	90%	45%
米国	40%	65%	20%	5%

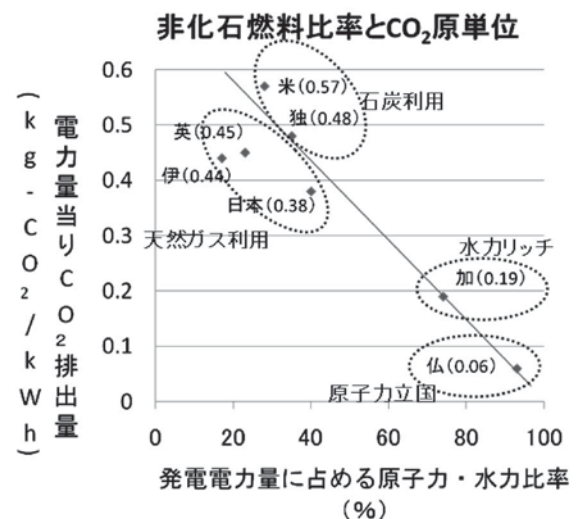
(注)最近5年間のデータ等から著者が推定した概数

も小さい(約28%)。しかも昨今の異常な原油価格高騰により、火力発電は燃料費の割合が大きいため、高騰の影響が大きく出る。

原子力の環境適合性では、運転段階ではCO<sub>2</sub>がゼロという素晴らしい特性もあるが、所要資源量が、他と比べて格段に低いことも重要だ。具体的には所要資源量で100万kWの発電所を1年間運転する時に、石炭は2,210,000トン、石油は1,460,000トン、天然ガスは930,000トンというところ、原子力発電の燃料となる濃縮ウランはわずか21トンである。

各国の電源構成の特徴が下図を見るとよくわかる。水力が豊富なカナダや原子力立国のフランスは電力量当たりの二酸化炭素排出量が少ない。米国やドイツは石炭利用が多く、英国やイタリアそして日本は天然ガスの利用が多いことが特徴である。

そこで翻って日本の現状をみてみよう。2007年7月16日、想定をはるかに超える地震の直撃で柏崎刈羽原子力発電所の7基すべてが停止した。この世界最大の原子力発電所は今も止まっている。基本的な原子炉安全は確保



筆者作図

2005年度、()内はCO<sub>2</sub>原単位

(止める、冷やす、閉じ込める)できたが、強固な岩盤以外の場所に建設された設備に被害が大きかった。加えて、初期対応に課題を残し、メディアの「一部過大報道」で国内外に虚報や誤解もあった。その後の対応では、まず被害状況の調査・公表が行われ、柏崎刈羽はもちろんのこと、全国の活断層が再評価され、すべての原子力発電所の基準地震動(Ss)の見直しが行われた。この基準地震動はもちろん、それぞれの立地点の特徴を綿密に調べ、それぞれのあるべき姿に見直された。

それにしても柏崎刈羽原子力発電所の停止の影響は大きい。電力需給はひっ迫し、収支は大幅に悪化、二酸化炭素は約30百万t/年のCO<sub>2</sub>が増加(日本の総排出量の約2.5%)した。停止したことにより交付金が減額となったことから、地域経済(自治体財政)への影響も出ている。

そこで日本の原子力発電所に関する今後の課題は何かを考えたい。まずは、地震による停止中の柏崎刈羽原子力発電所の万全な安全確認と地域住民の理解を得て、早

急な運転再開が望まれる。日本全国の原子力発電所では、規制の科学的合理的な新検査制度の導入が必要だろう。これは米国の成功例であり、状態監視保全・オンラインメンテナンスにより安全性を高度化させるものである。決して、安全をおろそかにするものではなく、むしろ逆である。そして、その結果としての稼働率向上が図れる。地元雇用対策も、ピークをなくし平準化するような仕組みで、常時、地元の雇用が確保できる利点もある。

原子力の持つ重要性は徐々に理解されつつある。現職の総理としては初めての公けのコメントになるが、福田総理は、平成20年4月15日の日本原子力産業協会(JAIF)年次大会において、次のコメントをしている。「発電過程で二酸化炭素を排出しない原子力発電所は地球温暖化対策の切り札でございます。」これまで原子力に携わったものとしては、嬉しいことだ。

(2008年 8月12日 記)



# 我が国の原子力俯瞰マップを 作りませんか



班目 春樹(まだらめ・はるき)

東大大学院原子力専攻 教授  
東京大学大学院工学系研究科修士課程  
修了。東京大学工学部助教授、教授を  
経て、平成17年から現職。総合資源エ  
ネルギー調査会原子力安全・保安部会  
検査の在り方に関する検討会委員長  
や、中越沖地震における原子力施設に  
関する調査・対策委員会委員長などを  
務める。

## 我が国の原子力開発にボトルネックはないか

科学はどんどん専門化・細分化していくという宿命をもっている。先端とされるところにリソースが集中することで発展していく。原子力も例外ではない。これはある意味では好ましいことである。たとえば熱流動の数値解析技術の発達は目を見張るものがある。複雑な相変化現象まできちんと記述することを可能とし、コード検証のモックアップ実験だけを行えば原子力機器の性能を把握できるまでにしている。

しかし、このように専門化していく研究者の自主性だけに任せておけば原子力開発全体がうまくいくわけではない。技術の有用性は一般に、研究の先端がどこまで達しているかではなく、ボトルネックが解消されているかどうかで決まる。この機会にいま一度、我が国の原子力開発を俯瞰し、何が足りないかの認識を共有することを提案したい。

## 例えば核不拡散政策研究

原子力学会声明「地球のためのクールエネルギー原子力」では、核不拡散と核セキュリティの確保が大きな課題だとしている。科学者・技術者として果敢に挑戦すべきとしている。しかし誰が挑戦してくれるのだろうか。

我が国は核保有国以外で唯一、ウラン濃縮、再処理というフルセットの原子力技術開発を許されている。その特殊性を原子力関係者はあまり理解していない。核拡散抵抗性を強化したサイクル技術の開発など、技術面の研究は多少行われているが、政策面での提言ができるような研究者は我が国にはほとんどいない。今、核燃料供給保証や多国間管理というような新たなフレームワーク構築が世界で模索されているが、我が国からは何も提案できないで、原子力の将来はあるのだろうか。

世界的な核不拡散政策の方向に興味を示さない原子力関係者は、国際政治などは誰か他人がうまくやってくれ

ると信じている楽道家である。国際平和の観点からは核燃料サイクル技術そのものが邪魔物と考えられていることを理解していない。核不拡散政策は保障措置技術や核不拡散抵抗性技術、透明性技術など技術と密接な関係にある。技術を理解している者でなければよい提案はできない。この分野に興味を持ち、世界に発信する研究者を一人でも増やすことは急務である。

## 例えば原子力法制研究

国内の問題に目を転じよう。最近、規制制度についての苦言をよく耳にする。それはそれで結構である。ただ、一方的に規制当局を責める姿勢には共感できない。「厳しすぎる規制はけしからん」という発言からは何も生まれない。そう発言する以上は、どういう規制制度にすべきかの提案も同時にするのが、責任ある態度である。

ハード面の安全研究がいくら進んでも、それだけでは原子力の安全は確保できない。どんな技術も使い方を誤れば災禍を招く可能性がある。安全を守るのは自律的に努力する原子力事業者であり、国民の負託を受けてそれを監査する規制当局であり、その枠組みとなる制度である。制度は天から与えられたものではない。技術が進歩するように、安全を守るための制度も我々が努力して、どんどん改善しなければいけない。

技術の利用に際しての安全を守る制度は技術の中身と不可分の関係にある。したがって原子力をよく知る関係者からの提案なくしてはこの改善は進まない。「大学や産業界で制度研究をしたところで、どうせ国は耳を貸さない、だからそんな無駄な努力はしたくない」という声も聞く。採用される約束がなければやらないという態度はあまりに傲慢である。その傲慢さのゆえに、残念ながら我が国の原子力法制度は欧米に比べ大きく立ち遅れている。「技術は一流、制度は三流」に甘んじてはいけ

### 例えば社会受容性の研究

原子力が社会に受け入れられないのは、人々が技術を十分理解していないからだとする原子力関係者はいまだに多い。しかし本当だろうか。

人々を推進派と反対派に二分し、自分たちは反対派に取り囲まれて不当に非難されているという被害者意識を持っている原子力関係者がいる。実際にはゴリゴリの推進派も反対派もごく少数であり、多くの人々は原子力の必要性を認めながらも安全の確保を強く願う、いわば中立派である。社会性の欠如した者が行った信頼を裏切る行為は、主体的に原子力を推進しようとする組織の周辺で原子力開発に協力している人々、例えば立地地域の地方自治体関係者などを苦境に立たせている。そのような社会構造の理解なくして、ただ声高に安全性を強調することは、周辺で努力している人々の努力を無駄にし、社会の反感を買うだけである。

社会は無理解だ、マスコミが悪い、といったことを主張する前に、社会の構造とかマスコミの影響とかについて調べていただきたい。我が国はこの分野では、明らかに諸外国に遅れをとっている。これは外国の知見を日本に直輸入すれば解決するというような問題ではない。地道な研究が必要である。

社会学や社会心理学の助けがいてこの社会受容性に関する研究も、また前述の核不拡散政策や法制研究も、工学部に籍を置く者には異端なテーマに見えるかもしれない。しかし工学は理学の亜流ではない。工学とは、人文社会科学の知見をも用いて、公共の安全・健康・福祉のために有用な事物や快適な環境を構築することを目的とする学問である。

### 例えば基盤技術分野の研究

中越沖地震が発生するまで、多くの原子力関係者は耐震工学の研究開発の現状など気にも留めていなかった。耐震工学など原子力工学の端っこか、他分野だとみなしていたと思われる。昔、耐震を専門としていた研究者は、すでに制震や免震の分野に移り、原子力は耐震工学もその重要部分として抱え込まなければならなくなっている。その事実気付くのが遅すぎて、いまあわてているのではなかろうか。

耐震工学だけではない。平成19年度開始の経済産業省公募事業「原子力の基盤技術分野強化プログラム」で、構造強度、材料強度、腐食・物性、溶接、熱・流体・振動、放射線安全の各分野への支援が行われているのは、そこが手薄と認識している産業界からの強い要望によるものである。ただ、これら基礎技術分野の研究開発すべてを

原子力界で抱え込むことはできないだろう。平成19年度設置の文部科学省・経済産業省共催会議「産学人材育成パートナーシップ」では、原子力以外に、化学、機械、材料、資源、情報処理、電気・電子、経営・管理人材、バイオの各分野についても検討を進めている。原子力界としてどこまで自前で育てる必要があるか、見極めることから始める必要がある。

自前で育てるとなると、どう分担するか議論となる。重要な研究開発を分担することを躊躇する研究機関があるはずがない。大学も、これまでは各校どこも似た分野を競争して研究してきた。これからはそれではいけない。他校が取り組んでいない分野に各校が取り組む。分担はうまくいくはず……ではあるが、さすがにこれは私自身、自信がない。

### 原子力学会で原子力俯瞰マップを

以上、思いつくままに、我が国の原子力開発のボトルネックを列挙してみた。これは私の狭い経験からのものに過ぎない。ほかにいくらかあるはずである。原子力学会会員みんなで原子力全体の俯瞰マップを作成、共有したらどうだろう。それは、分野ごとの研究開発ロードマップを作る以上に大切ではなからうか。それこそ、原子力の開発発展に寄与することを目的とする学会の使命の一つである。

学会の会員全員が原子力全体を俯瞰する能力を身に付けるべきだなどとは思わない。まして、足りない分野の研究に会員全員で取り組むべきだなどと主張する気もない。そんなことよりは、各自がその専門分野で努力することのほうが大切である。しかし、原子力の他分野の状況について簡単に情報が得られる手段、例えばロードマップ進捗状況表のようなものも、俯瞰マップとともに学会で整備してほしい。そうすれば、会員は原子力の全容に関する最低限の知見を共有できる。原子力の、そのまたごく狭い分野しか知らない専門家だけでは、原子力開発がうまくいくはずはない。

最近、原子力施設立地地域の市民や各種原子力関係者など、いろいろな方と対話する機会が増えた。そこで感じるのは、原子力関係者と一般市民との対話以上に足りないものがあることである。それは原子力関係者間の対話である。原子力関係者がそれぞれ専門分化し過ぎていて、話が通じなかったりする。原子力開発をより健全なものとするため、原子力関係者間の対話は今まで以上に必要になっていると思う。

(2008年 8月1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。

## 洞爺湖サミット環境合意文書で、原子力「不可欠な手段」 —経済と環境の両立強調

第34回目を迎えた主要国首脳会議 G8 サミットが北海道の洞爺湖で7月7日から9日まで開催された。今回の主要議題としては、世界経済、環境・気候変動問題、核不拡散を中心とする政治問題などが話し合われ、特に原油価格の高騰を含むエネルギー問題は地球温暖化問題と直結する主要議題の一つとして取り上げられた。エネルギー安全保障問題を大きく取り上げた2年前のロシアでのサンクトペテルブルク・サミットの流れをさらに推し進め、原子力発電が気候変動とエネルギー安全保障上、「不可欠な手段」と初めて盛り込み、その意義を高く評価する画期的なものとなった。9日には議長国の福田康夫首相が議長総括を発表し閉幕した。来年はイタリア開催。

焦点の G8 合意文書の一つ「環境・気候変動」では、気候変動問題と経済成長を両立させる枠組みの中で、「世界全体の温室効果ガスの濃度を安定化させる決意だ」と述べ、それはすべての主要経済国が「共通の決意を通してのみ可能」とした。

原子力については、「原子力計画への関心を示す国が増大していることを目の当たりにしている」と述べ、世界的な潮流に言及、原子力の果たす重要性を指摘している。平和利用のためには、保障措置(核不拡散)、原子力安全、核セキュリティの3Sが

根本原則であることを改めて表明した上で、「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イニシアティブが開始される」と述べ、国際原子力機関(IAEA)の場で新たなプロジェクトを計画していることを明らかにしている。

「政治問題」の合意文書では、核不拡散問題が多くを占め、2010年の核不拡散条約(NPT)運用検討会議の成功を目指すほかに、①効果的な輸出管理、②IAEA 保障措置の強化および追加議定書の普遍化、③放射線源の安全とセキュリティに関する IAEA 行動規範—などの重要性を強調した。

さらに、ウラン濃縮や再処理関連の機材、施設、技術の移転制限を強化するため、「原子力供給国グループ(NSG)」の役割を歓迎した。

最終日の議長総括では、各合意文書を取りまとめた内容を盛り込んだほか、インドとの民生用原子力協力について、核不拡散体制の強化に向けて、「インド、IAEA、NSG およびその他のパートナーとの取組みを期待する」と盛り込んだ。

洞爺湖サミットに臨み福田首相は、原産協会が今年4月に開いた年次大会に出席し、「原子力発電は地球温暖化対策の切り札」と初めて踏み込んだ発言を行っていた。

(資料提供：日本原子力産業協会)

## 「安全確保に万全期す」—中越沖地震から1年、甘利経産相が 談話発表

甘利明・経産相は7月15日、中越沖地震から1年を迎え、「徹底した原子力発電の安全確保」と題する談話を発表した。

柏崎刈羽原子力発電所については、変圧器火災が発生し、想定を大幅に上回る地震動が観測された

が、原子力安全の基本である「止める」「冷やす」「閉じ込める」の3機能は確保され、IAEAなど国際社会から高く評価されていると指摘。現在、同省は耐震安全性や設備健全性を厳しく確認し、東京電力は、耐震裕度向上の補強工事を実施しており、国民



の目に見える形で原子力施設の安全確保に万全を期すとした。

また、全国の原子力発電所について耐震安全性の再確認を進めており、厳格かつ早急に審査するよう改めて指示したとしている。

その上で、「原子力発電はエネルギー安全保障と温暖化対策の両面で、極めて優れたエネルギー源で、世界的にもこうした原子力発電の役割を再評価する動きが広がっている。その大前提として安全確

保に万全を期すことが不可欠。経済産業省としては引き続き、徹底した安全の確保に努め、その責務を果たす所存」とした。また日本原子力産業協会は7月16日、中越沖地震発生1年を経過して、「教訓を世界で共有し、原子力への期待の実現を」とする声明を発表した。国民の信頼を高め、原子力発電所の地域社会に安心感をもってもらうことの重要性を指摘、それが早期運転再開の道を開くことにつながるとしている。(同)

## 柏崎刈羽原発の外観点検が全号機で終了、耐震強化工事も順次開始

東京電力の高橋明男・柏崎刈羽原子力発電所長は7月10日、定例記者会見に臨み、中越沖地震の発生から約1年が経過したことについて、「これまでの1年間、安全を第一として、設備の点検・調査を着実に進めてきたが、現時点では、安全上重要な設備の機能に影響を与える損傷は見つかっていない。今後も、設備の点検・調査を一つ一つ積み重ねるとともに、防災や保安上の観点から必要な設備の復旧工事を鋭意実施していく」と述べた。

同所長は、7月3日には昨年11月から進めてきた燃料集合体と制御棒の外観点検が全プラントで終了し、地震による健全性への影響がないことを確認、「これにより、原子炉関係の主な外観点検については、全プラントにおいて、ひと通り終了したことになる」とした。

また同所長は、耐震性向上への取組みについて、耐震強化工事の当面の対応として、6、7号機の配管サポート、原子炉建屋の屋根トラス(屋根を支える

骨組み)、排気筒などに関して、「準備が整った部分から安全性向上のための工事を開始することとしている」と説明したほか、その他の工事については、「対象範囲を含めて現在検討中であり、開始時期は未定だ」と述べた。

7号機については、6月16日から配管サポートの強化工事を開始しており、14日からは原子炉建屋屋根トラスの強化工事を開始する。6号機についても7月4日から配管サポート強化を開始した。

東京電力では、中越沖地震での地下最下部に当たる原子炉建屋基礎版上での最大加速度の観測値(1号機)680ガルに対して、安全設計上の基準地震動  $S_s$  を1号機から4号機までは2,280ガルと規定し、その原子炉建屋基礎版上での応答加速度を最大829ガルと計算、実際の耐震補強工事では全7プラントとも1,000ガルの地震動にも耐えられるように補強することを決めている。(同)

## 日本原燃 再処理工場のしゅん工時期を11月に変更

日本原燃は7月30日、青森県六ヶ所村の再処理工場のしゅん工時期をこれまでの「08年7月」から「08年11月」に変更する旨を発表した。

同社は、2月14日からアクティブ試験(実際の使用済燃料を用いた試験)の最終段階である「第5ステップ」を実施しているが、ガラス溶融炉運転性能確認試験において、溶融炉内の温度が低めに推移し、ガラスの流下性が低下する事象が発生したた

め、昨年末に試験を中断し、その後、対策として運転方法を見直し、7月2日に再開したところであったが、溶融炉から容器への十分なガラスの流下が確認されなかったことから、翌3日、操作を停止した。

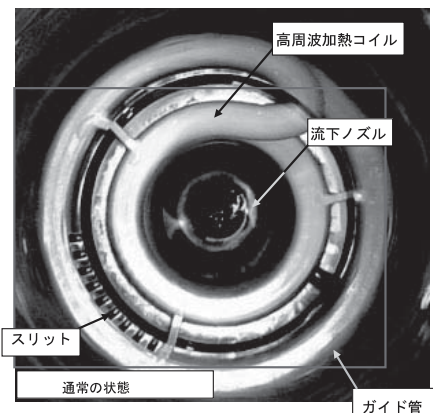
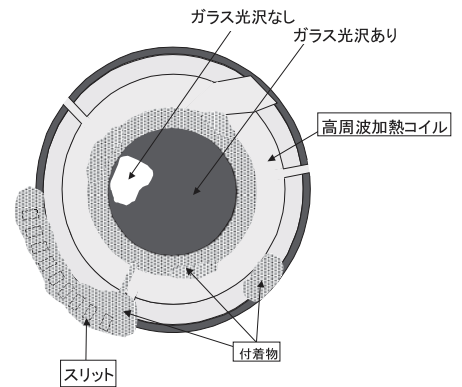
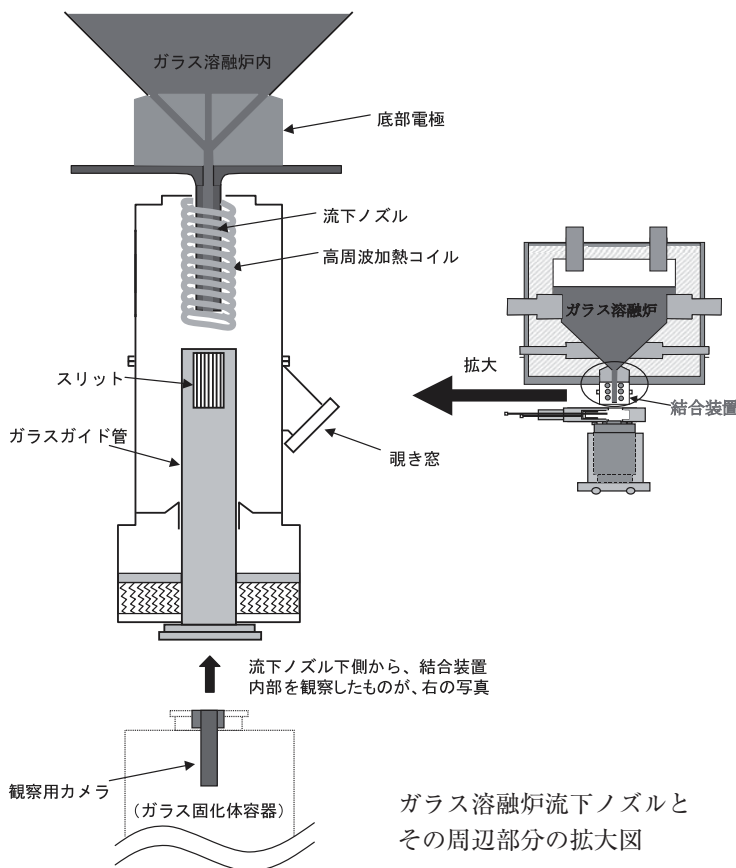
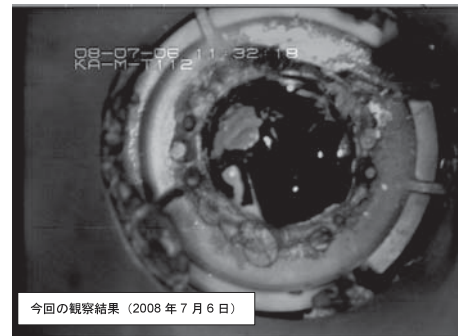
確認したところ、ガラス溶融炉本体の運転については予定通り行われたが、ガラス溶融炉から容器へガラスを流下させるためのノズル部の下部とその周辺に付着物があることがわかった。今後、ノズル部

■施設の安全機能及び機器・設備の性能確認

第1ステップ	せん断・溶解施設のA系列でPWR燃料により確認	燃焼度 冷却期間	低～中 長～中	処理量 約30トン
第2ステップ	引き続き、A系列でPWR燃料により確認後、BWR燃料についても確認	燃焼度 冷却期間	低～中 長～短	処理量 約60トン
第3ステップ	第1、第2ステップで確認した事項を中心にB系列で確認	燃焼度 冷却期間	低～高 長～短	処理量 約70トン

■工場全体の安全機能および運転性能確認

第4ステップ	工場全体の処理性能等をPWR燃料により確認	燃焼度 冷却期間	高 中～短	処理量 約110トン
第5ステップ	工場全体の処理性能等をBWR燃料により確認	燃焼度 冷却期間	低～高 長～短	処理量 約160トン



分について詳細に調査を行うが、これにより、しゅん工時期をこれまでの「08年7月」から「08年11月」に変更することとした。

同日、会見を行った兒島伊佐美社長は、「付着物

の除去からガラス固化施設の性能確認試験終了までに3ヶ月程度、その後の国の評価期間などを考慮し、総合的に検討した結果」と、工程変更の理由について述べた。(資料提供：日本原燃)

## 放射性廃棄物を大幅に低減できるコンクリート壁の構造体を開発

日本原子力研究開発機構と(株)熊谷組は、低コストで中性子を効率よく遮へいするとともに、放射性廃

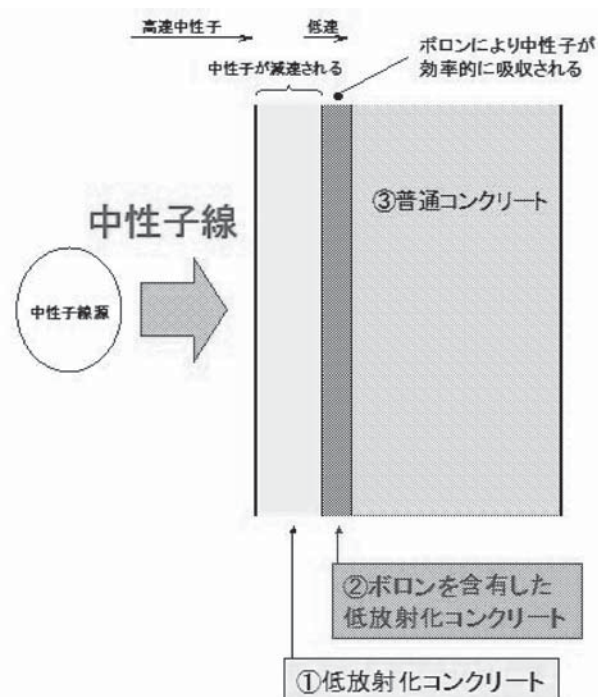
棄物の量を大幅に低減できるコンクリート壁の構造体を共同で開発した。

原子力発電所や粒子線加速器施設など中性子の発生する施設では、施設の構造体のコンクリートに中性子が当たるとコンクリート中に放射性物質が生成され、ガンマ線などの放射線を放出(放射化)するようになるので、作業員の被ばく線量管理のために施設メンテナンス前に長い冷却時間を置く必要が生じる。また、長期間にわたり中性子が当たり続け、コンクリート内部に放射性物質が蓄積されると、施設の解体時にコンクリートを放射性廃棄物として処理しなければならず、一般産業廃棄物として扱うのに比べ、多額な費用が必要になる。

従来、中性子発生施設において、遮へい効果や放射化特性を向上させるためのコンクリート技術として、低放射化コンクリートやボロンを含有した低放射化コンクリートなどが研究・開発されてきた。しかしながら、これらの低放射化コンクリート単体でコンクリート壁に用いると、経済性を含めた総合的な観点からは、一長一短があった。

今回、中性子の遮へい性能および経済性等から総合的に判断し、中性子線源側から順に、低放射化コンクリート層、ボロンを含有した低放射化コンクリート層、普通コンクリート層の3層構造を持つコンクリート壁の構造体を開発した。検証試験の結果、高価なボロン含有低放射化コンクリート層のみの単一構造体とした場合と比較して、性能は同等で、製作費は1/2から1/3に、また、普通コンクリートのみの単一構造体とした場合と比較して、放射性物質の生成量を約1/3に低減できることを確認した。

今回開発したコンクリート壁の構造体は、ボロンを含有した低放射化コンクリート板を型枠として用



放射線遮へいコンクリート壁の層構造

いて製作することにより生産性が向上するとともに、施設の解体時には放射能の高い領域の分離・廃棄を容易に実施することが可能となり、解体コストを大幅に削減することが可能である。今後、開発したコンクリートを原子力発電所や粒子線加速器施設、粒子線がん治療施設、PET診断施設、核融合炉施設等の中性子発生施設の建設に用いることにより、建設コストの削減、施設のメンテナンス作業開始までの冷却時間の短縮や施設解体時の放射性廃棄物発生量の低減などといった効果が見込まれる。(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press2008/p08070701/index.html>)

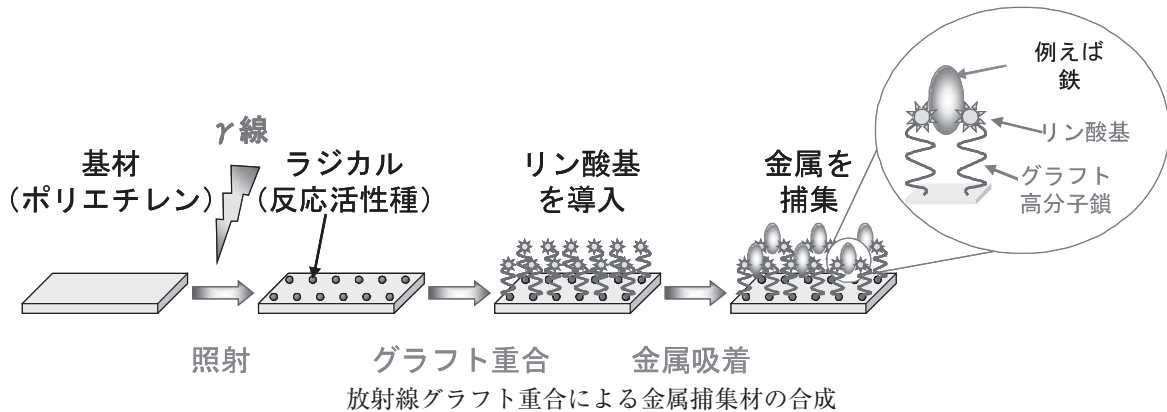
(資料提供：日本原子力研究開発機構)

## 空調設備の維持管理の切り札：貯留水用の「小型・可搬式水質浄化装置」を開発

### —放射線のモノづくりと水処理技術の融合

日本原子力研究開発機構と(株)第一テクノは、鉄などを効率よく吸着除去できる金属捕集材に、従来の空調用配管の浄化処理手法を組み合わせることで、設置スペースの限られた建家内でも空調運転を停止せずに貯留水を浄化できる小型・可搬式の水質浄化装置を開発した。

オフィスビルの空調設備は、地下貯留水槽の大量の水を冷却・加熱し、建家内の金属製空調用配管に循環させて冷暖房を行う。その際、空調配管から徐々に鉄や銅などの金属成分が溶出し、配管を腐食させたり、水中のカルシウムやマグネシウム成分と結合してスケール\*と呼ばれる塊となって配管内部に付



着する。このスケールは冷温水の循環障害や冷暖房の効率低下などの悪影響を及ぼす。

このような配管腐食やスケールの付着防止のため、従来、貯留水には薬剤が添加されてきた。しかし、環境負荷の低減や経費節減を図るため、薬剤を使わない効率の良い金属除去技術が求められていた。

このため、原子力機構のグラフト重合技術を用いて、金属成分を効率的に除去できる捕集材を製作し、第一テクノの持つスケール付着を防止する電磁場処理技術と組み合わせて、狭い場所でも持ち込め

る上、薬剤なしで空調用貯留水を効率よく処理できる水質浄化装置を開発した。また、試作機を作って、鉄成分を添加した井戸水の浄化試験を行った結果、鉄濃度を上水道の基準値以下まで低減でき、薬剤を使用することなく貯留水を処理できることが確かめられた。

(\*スケール：水中のカルシウムやマグネシウムが水温やpHの変動で析出した塊をいう。スケールは伝熱面や配管内壁などに付着し、空調・冷暖房効果を低下させ、エネルギーの損失を招くとともに、配管設備の寿命を縮める。) (同)

## ロシアで国際会議・展示会「ATOMCON 2008」開催， 原産協会は訪口団を派遣

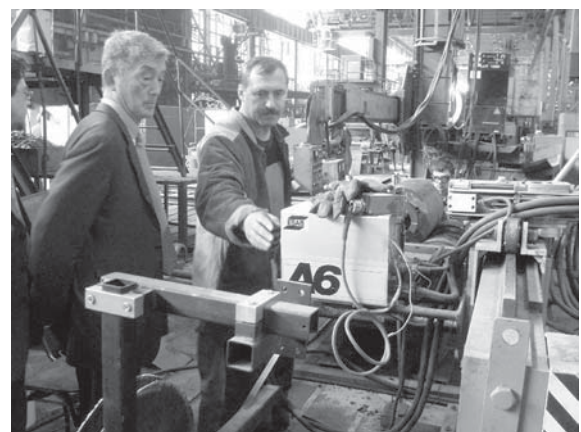
日本原子力産業協会と協力協定を有するロシア国営企業「ロスアトム」から、モスクワ市で2008年6月25～27日に開催された、第1回国際会議・展示会「ATOMCON2008」(主催：SBCD Expo, 後援：ロスアトム他)への招待を受け、当協会の服部理事長を団長として、メーカー、商社からなる同会議・展示会への参加団を派遣した。服部理事長は、会議初日の全体会議で、「日本の原子力エネルギー」と題し、講演した(写真)。

参加団は、ロシアの原子力関連機器製造施設や原子力関係機関も訪問し(写真)、ロシアの最近の原子力の開発の現状と展望、特に原子力機器製造産業の現状について把握し、同分野での協力の可能性について調査した。

ロシア訪問の様子は、動画配信「Jaif Tv」からご

覧になれます(<http://www.jaif.or.jp/>)。

(資料提供：日本原子力産業協会)



原子力機器工場を訪問

## 原産新聞別冊特集「『低炭素革命』を世界へ—リーダーが語る原子力」小冊子を発行

地球環境問題における原子力の役割への注目が高まる中、原産協会はこのほど、昨年後半から今年7月にかけて原子力産業新聞に掲載した、幅広い層のリーダー・識者との座談会やインタビューなどをまとめた小冊子を発行した。巻頭には、4月の原産年次大会における福田首相の所感、および今井会長の所信を収録している。

小冊子のPDF版は当協会HP (<http://www.jaif.or.jp/>) からご覧になれます。

また原産協会では、今年1月から原子力関係の情

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。

7～9月の番組(予定も含む)は以下の通り。

- ・特集「柏崎刈羽原子力発電所—新潟県中越沖地震から1年」(7/15公開)
- ・特集「変貌するロシアの原子力産業—服部理事長のロシア見聞録」(8/16公開)
- ・特集「世界原子力大学(WNU)の2008年夏季セミナー」(仮題, 9/15公開予定) (同)

### 海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

#### [カナダ]

### MDS ノルディオン社、RI 生産炉問題で AECL に損害賠償訴訟

世界最大の医療用アイソトープ(RI)生産企業であるMDS ノルディオン社は7月9日、カナダ原子力公社(AECL)およびカナダ連邦政府がRI生産用原子炉となるはずだったメープル炉の開発中止を5月に一方的に決めたとして、16億ドルの損害賠償を求める裁判を起こした。

MDS社の発表によると、同社の目的はAECLが2006年に締結した「医療用RIの中長期的な供給契約」に基づく義務を果たすこと。これについて同社は別途、AECLとの仲裁調停手続きを取ったことをAECL側に伝えているが、それが適わない場合には金銭的な補償の要求も辞さない考えで、AECLに対しては契約不履行と怠慢行為で、カナダ連邦政府については契約不履行を誘引し経済活動を妨害したとして総額16億ドルの支払いを求める裁判を同時に起こしたものの。

MDS社はこれらの訴訟を通じて、AECLが10年以上前からの契約—(1)老朽化した国立研究ユニバーサル(NRU)炉のリプレースとしてメープル原子炉を稼働させる、(2)医療用RIを必要とする世界中の患者達に今後40年間にわたってRIを供給する、を

実行するよう望んでいる。

MDS社は1996年にAECLと協定を結び、熱出力各1万kWのRI生産原子炉2基と関連処理施設を設計・開発・建設するというメープル・プロジェクトを開始。メープル炉は世界の医療用RI需要の50%を賄うNRU炉のリプレースとなる予定で、2000年に運転を開始するまでの期間はNRU炉が暫定的にRIを供給することで両者は合意していた。

しかし、2005年になってもプロジェクトは完了せず、1億4,500万ドルと想定していたMDS社の投資額は倍の3億5,000万ドルに膨れ上がった。このため、06年に両者が結んだ協定では、メープル炉の建設費用ごと同炉の所有権をAECLが取得。同炉は08年10月に運転開始することとし、MDS社には同炉が生産するRIが40年間にわたって供給されることになった。

それにもかかわらず、AECLとカナダ連邦政府は5月16日、MDS社への事前連絡なしでメープル・プロジェクトの中止を発表。NRU炉の運転認可が切れたあとは、認可の延長でRI需要に対応するとの見解を示している。

### オンタリオ・パワー社、リプレース設備をダーリントンに建設

カナダ・オンタリオ州の州営電力であるオンタリオ・パワー・ジェネレーション(OPG)社は6月16日、オンタリオ州政府が州内の既存原子力設備のり

リプレースとして検討している2基の原子炉について、OPGがダーラム地方で操業しているダーリントン原子力発電所サイト(CANDU炉4基、各93.4万kW)に建設することになったと発表した。この発表は同日、オンタリオ州政府およびカナダ連邦政府のG・フィリップス・エネルギー相による同様の発表の後に行われたもの。同社は今後、年内にも原子炉供給業者を決定し、2018年の運転開始を目指して、更なる手続きを進めていく。

オンタリオ州は2006年に「今後20年間のエネルギー計画」を策定し、原子力については現在の州内の設備容量である約1,400万kWを維持するとの方針を打ち出している。このため、今年3月には、リプレース用原子炉の建設に適切な原子炉供給業者を選定する目的で2段階構成の機器調達プロセスを公表。OPG、ブルース・パワー社、および関係2閣僚で構成される「機器調達管理チーム」が、国際的に認知されているメーカーの中から、①仏アレバ(USEPR)、②カナダ原子力公社(ACR1000)、③GE日立ニュークリア(GEH)社(ESBWR)、④ウェスチングハウス社(AP1000)の4社を、原子炉機器調達プロジェクトの設計提案(RFP)第1フェーズに招待した。その後4月に、GEH社はESBWRの米国設計認証取得に集中するため、このプロセスから脱退したが、「機器調達管理チーム」は5月に3社からの回答を受理。6月5日にはこれらの内容が満足のいくものであったとの評価を下すとともに、第2フェーズの「提案要請(RFP)」に参加を促していた。

今回、OPGはリプレース炉の立地点のほかに、このRFPの詳細を公開。それによると、①廃炉費まで含めた耐用年数全体の運転維持費や資本費、②2018年7月に送電開始という州の建設目標スケジュールに合わせる能力、③州内の機器供給業者に対する下請け発注レベル、などの比較に主眼を置くとしている。

このように、州政府は原子炉供給業者の選定も含めて資金調達、契約関係の交渉などを進めていく予定だが、OPGとしても、現在進めている環境影響調査や許認可手続きを加速していくことになる。

今後のスケジュールとしては、7～10月に供給業者ごとに個別の会合を重ねて原子炉設計の準備状況や商業的な側面について協議。10月を第2フェーズ

のRFP提出期限とし、11月末をめどに3社の回答の中から適切なものを選定。12月末までには契約を締結したいとしている。

### [米国]

## DOE 情報局が「世界エネルギー見通し」を発表、2030年に50%増予測

米エネルギー省・エネルギー情報局(DOE・EIA)は6月25日、2005年から2030年までを対象期間とした「2008年版世界エネルギー見通し(IEO2008)」を発表した。

それによると、世界のエネルギー消費量は基準ケースで2005年の462QBtuから2030年には695QBtuと、50%増加すると予想している。消費量の拡大が特に急速なのは非OECD諸国で、この期間の著しい経済成長や人口の増加などにより85%の伸びが見込まれると予測。一方、OECD諸国のエネルギー消費は19%の伸びにとどまるとしている。

原子力による発電電力量に関しては、IEOは2005年の2兆6,000億kWhから2030年には3兆8,000億kWhに拡大すると指摘した。理由としては、化石燃料価格の上昇やエネルギーの供給保証、温室効果ガス排出への懸念が新規原子力設備の開発を後押しすると説明している。また、多くの既存設備で高い設備利用率の達成が報告されていることから、OECD諸国およびユーラシア大陸の非OECD諸国では古い原子炉の運転寿命延長も期待されると指摘している。

## 米会計監査院が発電所火災で報告、防火対策を勧告

米国議会の調査機関である会計監査院(GAO)は6月30日、米原子力規制委員会(NRC)に対し「国内の商業炉では70年代の安全規制に則って防火対策が取られている」と指摘するとともに、新たな方式の対策を勧告する報告書を公表した。

1975年にアラバマ州のブラウンス・フェリー原子力発電所で原子炉の安全停止を脅かしかねない火災が発生した後、NRCは国内の商業炉に対して慣行に基づいた防火安全規則をしいたが、原子炉ごとに設計や稼働年数が異なることから、遵守が難しい場

合や、適用を逃れようとする例も見受けられた。このため、NRCは2004年以降、原子炉ごとの火災リスクを分析するリスク情報活用型の防火対策へ移行するよう、国内104基の原子炉に奨励する活動を開始している。

GAOも国内10カ所のサイトを訪問したほか、NRCの報告書および原子力発電所における火災関連の資料を審査。NRCや産業界の役員とも面談し、①1995年以降、原子力発電所で発生した火災の件数および原因、②NRCの防火安全規則の遵守状況、③リスク情報活用型規制への移行状況——について調査した。

GAOは今回、このような調査の結果を「NRCによるさらなる監視強化は可能」と題する報告書にまとめたもの。その中でGAOはまず、「原子力産業界による既存の防火規則遵守に影響を及ぼすような長年の課題をNRCは解決していない」と結論づけており、発電所における火災対策が防火バリアや自動的な火災の探知および鎮圧といった「パッシブ」な手段よりも、発電所員の手によるバルブやポンプの開閉などマニュアル操作に頼っていると指摘。NRCが規則の遵守状況に関する包括的なデータベースを保有していない点にも注意を喚起している。

GAOはまた、所員達が損害を受けた機器の修理や取替えよりも、主として火災監視活動などの暫定的な対処方法を長期間にわたって取っていると指摘。特に原子炉の安全な停止のために必要な、いくつかの電気ケーブル用防火カパー材については、その効果に疑問を呈している。また、安全系機器の不具合に直結して原子炉の停止を困難にする漏電や潤滑油等の発火による火災の影響緩和についても課題が残されていると強調した。

GAOによると、NRCは主に原子炉の複雑な認可システムを簡略化するために、リスク情報活用型の防火対策に移行するよう発電所に呼びかけているが、今年の4月時点でこの手法の採用を表明している原子炉は46基だった。しかし、学会や産業界と同様、NRCでも火災のリスク評価やモデリング技術、発電所ごとの専門知識に明るい人材が不足しているほか、コストもかかることから移行には時間がかかるとの懸念を表明している。

## 【英国】

### BE社、新規原発建設で住民公聴会開催

英国ブリティッシュ・エナジー(BE)社は6月9日、サイズウェルB原子力発電所サイトに新たな原子炉を設置する可能性について、近隣住民の意見を聴く会を7月から開催すると発表した。

これは、新規原子炉建設の判断を正式に下し、計画申請書を行政当局に提出する前に、地元サフォーク州の住民と対話の場を持ち、彼らの意見を十分に聴取する目的でBE社が実施するもの。4月にサイズウェルの社交クラブで100名の参加者を迎えて初回を開催したのに続き、7月には3週間にわたってレイストンやアルデボローなど6カ所で会を開催するとしている。サイズウェルB発電所のB・ダウズ所長は、「サイト近隣の住民が適切に情報を得られ、彼らの意見を述べるチャンスを持つことが重要だ」と強調した。

これらの一連の会合ではBE社による新規原子炉建設計画の最新版のほか、潜在的に可能性のあるサイトで実施している環境影響調査の概要が披露される。BE社はまた、今年後半には同様の会合をイングランド南部の3つの潜在的な立地点(エセックス州ブラッドウェル、ケント州ダンジネス、サマセット州ヒンクリー・ポイント)で計画していることを明らかにしている。

## 【フランス】

### 仏トリカスタン施設でウラン含有液が流出

7月7日から8日にかけて、仏アレバ社の子会社であるSOCATRI社が操業するウラン含有溶液処理施設(STEU)からウラン含有溶液が環境に漏れる事象が発生したが、従業員や近隣住民の健康に影響がなかったことから、フランス原子力安全局(ASN)は17日、同事象を国際原子力機関(IAEA)の原子力事象評価尺度で暫定的にレベル1に分類した。

STEUはトリカスタン原子力施設内にあるジョルジュ・ベス濃縮工場の溶液処理設備で、漏れは7日の22時以降の排水作業中に発生したと見られてい

る。貯蔵タンク下部に設置された漏洩水保持タンクに溶液が溜まり始め、数時間のうちに監視システムが保持タンク外に溶液が流れ出たことを検知。SOCATRI社は直ちに操業を停止し、さらなる流出を止める措置を取った。同社はまた、付近の土壌とガフィエール川のサンプル調査を実施しており、安全当局と地元ドローーム県に連絡したのは8日の午前7時過ぎだった。

10日にはASNおよび原子力安全防護研究所(IRSIN)の検査官が現地入りし、STEUを嚴重に調査。ガフィエール川への溶液流入が止まっていることを確認した。アレバ社によると、環境中に漏れた溶液は約30m<sup>3</sup>で、1リットルにつき12gの天然ウランが含有されていたが、数日のうちに濃度は通常レベルに戻ったとしている。SOCATRI社も、IRSINのモニタリングにより、世界保健機構の定める飲料水用の放射線基準を下回ったと述べた。

しかし、ASNは17日の発表で、「ほとんどすべての計測地点で土壌や地下水の濃度は通常レベルに戻ったと考えられる」としながらも、2ヵ所の計測値が基準を上回っていた点を指摘しており、ヴォークリューズ県では引き続き灌漑および飲料目的の使用を制限する考え。トリカスタン地元情報委員会もこの計測結果に関する公聴会を9月に開催する予定だ。

ASNとしては、原因は事故当時、近代化作業中だった漏洩水保持タンクの密閉機能に不具合が生じていたためと断定。アレバ社も、作業チームと操業チームの連携不足が事故発生の一因になったとしている。また、SOCATRI社が事故の処置に追われて、ASNへの連絡が3時間近く遅れたことも過失だったと指摘している。

## ATMEA 1の安全設計概念、IAEAのレビューが完了

仏アレバ・グループと三菱重工業の合併会社であるATMEA社は7月7日、同社が開発中の新型第3世代PWR「ATMEA 1」の安全設計概念について、国際原子力機関(IAEA)のレビューが完了したと発表した。このレビューは、IAEAの国際的な専門家チームがATMEA 1の概念設計について、IAEAの定める基本的な安全原則と設計・安全審査に関す

る主要な要求事項に対する適合性を評価。これらに完全かつ包括的に対処していることが確認されたとしている。

安全設計概念は、現在作業が進められている基本設計のベースとなるもので、今回、基本的な安全性能を満たしていることが国際的に確認された。建設には適用国ごとの許認可が必要となることから、ATMEA社は計画通り、2009年末までに設計認可の申請準備を完了する予定だ。

ATMEA 1は欧米や日本を始め、全世界の安全規制に適用可能となることを目指した110万kW級原子炉で、24ヵ月間の長期サイクル運転、全炉心へのMOX燃料装荷などを可能にする技術が盛り込まれる。炉心損傷や大量の放射性物質放出の確率は従来のPWRより1桁低くなる予定で、安全系と生産系は完全に分離。大型旅客機の衝突対策が施されるほか、シビア・アクシデントに対する格納容器の長期的な健全性も確保される設計になるという。

## サルコジ仏大統領「2基目のEPR建設を」

仏アレバ・グループは7月2日、フランスの原子力機器製造産業の中心地であるブルゴーニュ地方クルーゾー町で、N・サルコジ大統領の立会いの下、世界最大の鉄鋼メーカーであるアルセロール・ミッタル社と原子力鍛造機器の製造能力を拡大するための了解覚書(MOU)に署名したと発表した。

両者は具体的には、クルーゾー町に立地するインダスチール社(ミッタル社の子会社)における年間のインゴット生産量を、現在の3万5,000トンから2010年までに5万トンに増大させることを計画している。これにより、アレバは原子炉容器などEPR用の大型機器を同町で製造する能力が20%拡大すると見込んでいる。アレバはまた、子会社が所有するクルーゾー・フォージ社にも新たな投資を行い、原子炉圧力容器用や蒸気発生器用の大型鍛造物製造能力を増大させる考えだ。

なお、フランス電力公社の3日付けの発表によると、両者の合意に立ち会ったサルコジ大統領はクルーゾー町でクルーゾー・フォージ社とインダスチール社の工場を視察したあと演説を行い、フランス国内でフラマンビル3号機に次ぐ2基目のEPR



建設を検討していることを明らかにした。同町の地元紙の報道では、大統領は「アレバとミッタルの提携により、数年後にはEPRは100%フランス製になる」と発言。EPRならガス火力発電所で年間20億m<sup>3</sup>のガスを節約できるほか、石炭火力発電所からのCO<sub>2</sub>1,100トンの排出削減に貢献できると強調した。

## [IAEA]

### 「役割拡大で経営資源も増大を」 —IAEAの諮問委員会が報告書

国際原子力機関(IAEA)がIAEAの将来像を探るために、事務局長の諮問機関として昨年秋に設置した「国際賢人委員会」(委員長=E・セディジョ元メキシコ大統領)の報告書「平和と繁栄のための国際原子力秩序の強化—2020年までおよびそれ以降におけるIAEAの役割」がまとめられ、6月のIAEA理事会に提出された。2020年までにIAEA予算を倍増する必要性などを盛り込んだ同報告内容について、エルパラダイ事務局長は「IAEAの将来に関する決定を緊急に行う必要がある」として、9月理事会の検討議題に含める意向を示している。

同委員会は、IAEAが今後直面する多くの課題と機会を取り上げ、具体的な提言を取りまとめた。重要な業務分野の優先順位付け、財政的なオプションとアプローチなどについて検討した。委員には、ローベルジョン仏アレバ会長、ベリホフ・露クルチャトフ研究所総裁、シュッセル・オーストリア前首相、ナン米元上院議員、チダンバラム印元原子力委員長ら、日本からは吉川弘之・産業技術総合研究所理事長(元東京大学総長)が参画した。

報告書では、世界的な原子力利用の拡大に伴い、IAEAの業務・役割が増大すると指摘。原子力開発・利用、軍縮、核不拡散、安全確保、セキュリティー分野での増大する業務、新しいパートナーシップにおいて適切な役割を果たしていくためには、追加の権限、予算増加を含む経営資源、人材、および技術が必要だとしている。

主な提言としては、(1)今後数年間、毎年約5,000万ユーロ(約84億3,000万円)の通常予算の継続的増加(2020年までには倍増)、(2)保障措置分析研究所、事故緊急時対応センターの拡充・強化(一時負担金8,000万ユーロ=135億円)、(3)原子力利用の拡大が安全に行われ、核拡散に寄与しないことを確実にするために、国際協力の強化、(4)保障措置の強化、核燃料サイクル管理への新しいアプローチ、効果的な輸出入管理の推進、(5)供給保証メカニズム、国際サイクルセンター等の国際枠組み・制度の奨励・推進・寄与、(6)経済的で安全で、核拡散抵抗性のある中小型原子炉の設計研究の調整、(7)放射性廃棄物管理について安全で持続可能なアプローチの確立、(8)国際原子力安全基準の策定、(9)新しい原子炉モデルの認証プロセスの調和・推進——などを挙げている。

報告書では、「数百サイトにわたる数百トンの核物質を追跡・把握しなければならないIAEAが、ウィーン警察とほぼ同額の予算しかないということは遺憾だ」と指摘している。

IAEAの2008年度通常予算は4億7,000万ドル(約497億円)で、職員数は約2,300人。日本は今年度IAEA通常予算分担金(国連分担率に準じ、保障措置の負担額を調整)および原子力安全などの任意拠出金の合計で、約85億円を支出している。

## 我が国の最先端原子力研究開発

## シリーズ解説 第4回

## FBR サイクルの実用化を目指して(II)

## 革新的技術の具体化に向けて課題を解決

日本原子力研究開発機構 水田俊治, 近澤佳隆,  
鷺谷忠博, 鈴木政浩

前回の解説では、限りあるウラン資源を有効利用し地球環境保全にも適合し、持続的な社会を支える枢要技術である高速増殖炉(FBR)サイクル研究開発が、いよいよ具体化・実用化を目指した新たなフェーズに入り、わが国ではFaCTプロジェクトを開始したことを紹介した。本稿では、革新的技術開発の具体化に向けて進めているFaCTプロジェクトの最新の動向(炉システムの研究開発および燃料サイクルシステムの研究開発)と今後の展望について紹介する。

## I. 開発経緯

FBRサイクルの実用化を目指して1999年7月から2006年3月まで実施した実用化戦略調査研究では、炉型、再処理法、燃料製造法などのFBRサイクル技術に関する多様な選択肢を幅広く検討し、革新的な技術を取り入れつつ、競争力のある実用化候補概念の構築とその研究開発計画などの検討・策定を行った。国は、その研究成果を評価し、「ナトリウム冷却FBR」, 「先進湿式法再処理」, 「簡素化ペレット法燃料製造」の組合せを実用施設として実現性が最も高い実用システムの主概念とし、今後は実用化に集中した技術開発を行い、FBRサイクルの研究開発を加速すべきとした。また、技術的な知見を前倒しで蓄積していくことの重要性、研究開発資源の効率的利用などを考慮し、国は2050年頃までのロードマップを想定した。

日本原子力研究開発機構では、このロードマップに基づき2015年頃から技術の実証・実用化に移行できるよう、実用化戦略調査研究からステップを一步進め、FaCTプロジェクト(Fast Reactor Cycle System Technology Development Project)として主概念の実用化に集中した研究開発を開始した。

本稿では、この研究開発のうち、炉システムおよび燃

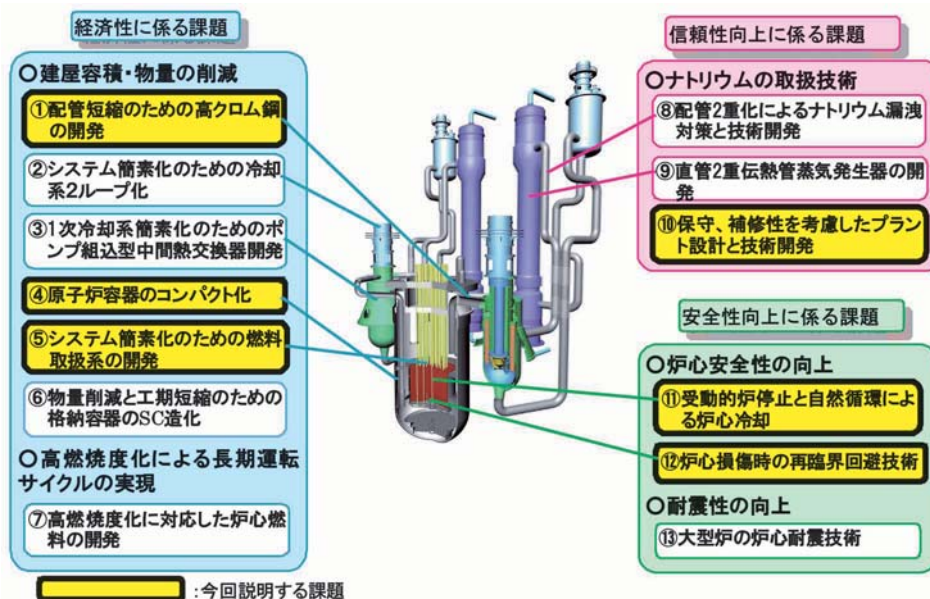
料サイクルシステムについて最先端の動向を紹介する。

## II. 炉システムの研究開発

FaCTプロジェクトでは、国の評価・方針に基づき「酸化燃料ナトリウム冷却FBR」の研究開発を進めている。FaCTプロジェクトで目指すFBRでは、革新的な技術を多数採用し、経済性、安全性、信頼性の高い目標を掲げた。この目標を達成するために、第1図に示すように、研究開発において実証すべき13課題について、研究開発を行っている。経済性の向上については、高クロム鋼などの新材料の採用、冷却系ループ数の削減、コンパクトな原子炉容器、ODS(酸化物分散強化型)鋼による炉心高燃焼度化等革新技術を採用するとともに機器の大型化を図ることで、従来概念よりもプラント物量や建屋容積を低減可能なプラント概念を構築している。また、安全性については、自然循環崩壊熱除去系、受動的炉停止機構、再臨界回避対策を考慮した燃料集合体構造を採用して実用炉に求められる安全性を追求している。概念の成立性に係る課題については、実用化戦略調査研究において、大口径配管水流動試験(第1図②)、ポンプ組込型中間熱交換器の1/4スケール試験(第1図③)、1/10スケール炉上部流動試験(第1図④)、2重管蒸気発生器(第1図⑨)、自己作動型炉停止機構(SASS)(第1図⑩)、再臨界回避技術(第1図⑫)等の研究開発が実施され、従来から積極的に報告されている<sup>1)</sup>。FaCTでは、より現実的に製作性および許認可性を考慮した検討が進められており、本章ではその進捗を踏まえ、最新の開発

*Toward Commercialization of FBR Cycle (II)*: Shunji MIZUTA, Yoshitaka CHIKAZAWA, Tadahiro WASHIYA, Masahiro SUZUKI.

(2008年 8月15日 受理)



第1図 炉システムの開発課題

内容を紹介します。

1. 経済性に係る課題

(1) 配管短縮のための高クロム鋼の開発(第1図①)

高温で強度が強く、熱膨張が小さい高クロム鋼を使用することで、配管短縮および機器のコンパクト化が可能になる。これまでに改良9Cr鋼を用いて蒸気発生器(SG)の主要構造である管板や伝熱管の製作性を確認するために極厚鍛鋼板試作のための砂型鋼塊凝固試験や薄肉小径管の試作等を行った。また、熱膨張を吸収する蛇腹状の構造であるCSEJ(Convulved Shell Expansion Joint)試験体の製作、溶接試験等を開始した(第2図)。あわせて、材料強度基準を整備するため、既存データを分析評価し、必要な試験を抽出した。これに基づき試験装置を整備し、データ取得を開始した。これらの試験に

より実機の製作性を見通すとともに、設計評価手法の策定を目指している。

(2) 原子炉容器のコンパクト化(第1図④)

配管や炉容器周辺機器のサイズやレイアウトだけでなく、原子炉容器のコンパクト化についても研究開発を進めている。高温のナトリウムという特殊な環境のFBRの原子炉容器では、従来の構造設計法を適用した場合、過度に保守的な設計となるため高温構造設計評価技術が求められる。「もんじゅ」の場合は液位を制御することにより、ナトリウム液面近傍の熱荷重の低減を図っているが、実用炉では特別な原子炉容器保護設備を設置せず、コンパクトな炉容器とする方針である。ここでは、熱荷重評価、構造解析、強度評価に関する最新の技術を取り入れて高温構造設計評価技術を高度化することにより、合理的な評価および設計基準の策定を目指している。これまでに熱流動と構造の一貫評価による熱荷重設定法、設計用の非弾性解析法、原子炉容器の負荷条件に合わせた高温強度評価法の開発を進めてきた。

(3) システム簡素化のための燃料取扱系の開発

(第1図⑤)

炉内燃料取扱では原子炉容器を小径化するため、スリット付き炉心上部機構により、スリットを介して燃料交換機を炉心に出し入れ可能な構造を検討している。このため、炉心上部機構を配置したままで燃料が交換でき、原子炉容器の小径化が可能になっている(これまで炉心上部機構を移動させるためのスペースが必要であった)。燃料交換機の実規模試験体が製作され、空气中試験および耐震評価を進めている。炉外燃料取扱では、短時間の燃料交換のための複数体移送ナトリウムポットの実規模ナトリウム試験、液体廃棄物低減を考慮した乾式洗浄システムのナトリウム試験、マイナーアク



第2図 蒸気発生器主要構造の9Cr鋼による試作<sup>2)</sup>

チニド(MA)含有新燃料取扱いを考慮した新燃料キャスクの除熱評価等を進めている。

## 2. 信頼性向上に係る課題

実用炉においては稼働率向上の観点から信頼性向上が重要となる。機器の信頼性を運転中に確認することを可能とするため、保守補修性を考慮したプラント設計に取り組んでいる。

### (1) 保守、補修性を考慮したプラント設計と技術開発(第1図⑩)

不透明なナトリウム下の保守補修を行うために、ナトリウム中目視検査装置を開発している。ナトリウム中目視検査装置は、超音波の反射波を検出・映像化しナトリウム中の機器・構造表面の様子を観察するものである。すでに、水中試験を終了し、0.2mmのスリットが目視可能であることを確認しており(第3図)、ナトリウム中においても目標精度0.3mmを達成する可能性がある。これまでに、従来の「圧電送信-圧電受信方式」と、受信に光ファイバを利用してセンサおよびケーブルを小型化した「圧電送信-光受信方式」を用いたセンサの最適化を行っており、今後はセンサを実際に製作しナトリウム中における性能確認を目指している。

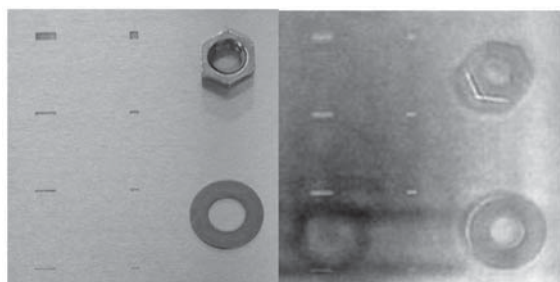
## 3. 安全性向上に係る課題

### (1) 受動的炉停止と自然循環による炉心冷却(第1図⑪)

実用炉では、受動安全性の向上のため完全自然循環式崩壊熱除去系を採用している。自然循環の場合、ポンプ等の動的機器に頼らないため、より確実に事故時の炉心冷却が可能と考えられる。原子炉容器内にDRACS(直接炉心冷却系)、各中間熱交換器にPRACS(1次系共用型炉心冷却系)熱交換器を設置する計画である。DRACSとPRACS間の熱的な干渉等の自然循環時の熱流動上課題を抽出し解決方を明らかにする必要がある。これまでに1次系全体と相似な1/10縮尺モデル水試験装置の製作を終了し、今後は自然循環試験により除熱特性を明らかにしていく。

### (2) 炉心損傷時の再臨界回避技術(第1図⑫)

確率論的安全評価は、軽水炉の分野においても現在盛



(ターゲット写真) (目視装置による可視化)

第3図 ナトリウム中目視装置の水中試験

んに検討が進められている新しい安全評価の手法である。確率論的安全評価は原子炉で発生しうる事故を広範囲に把握し、おのおのの事故の発生頻度と影響を定量評価することでリスクに応じてバランスのよい安全対策を可能にするものである。安全評価に確率論的手法を適用することを目標に、炉心損傷時の安全評価手法の開発を進めており、これまでに炉心損傷進展過程および放射性物質移行挙動評価数値解析コードの整備、核分裂生成物(FP)放出・構成成分反応試験を実施し、今後、デブリ・コンクリート小規模試験、解析コード検証を実施し、確率論的安全評価のイベントツリーの技術的根拠の整備を推進している。

## Ⅲ. 燃料サイクルシステムの研究開発

FaCTの燃料サイクルシステムは、先進湿式法による再処理技術および簡素化ペレット法による燃料製造技術の組合せである。

燃料サイクルシステムについては、システムとして既存の技術にない様々な革新的な技術が採用されており、12課題について、研究開発でプロセスと機器の両者の成立性を見極め実証すべきとされている。今回は第4図に示す研究開発の中から、一部について紹介する。

### 1. 先進湿式法による再処理技術

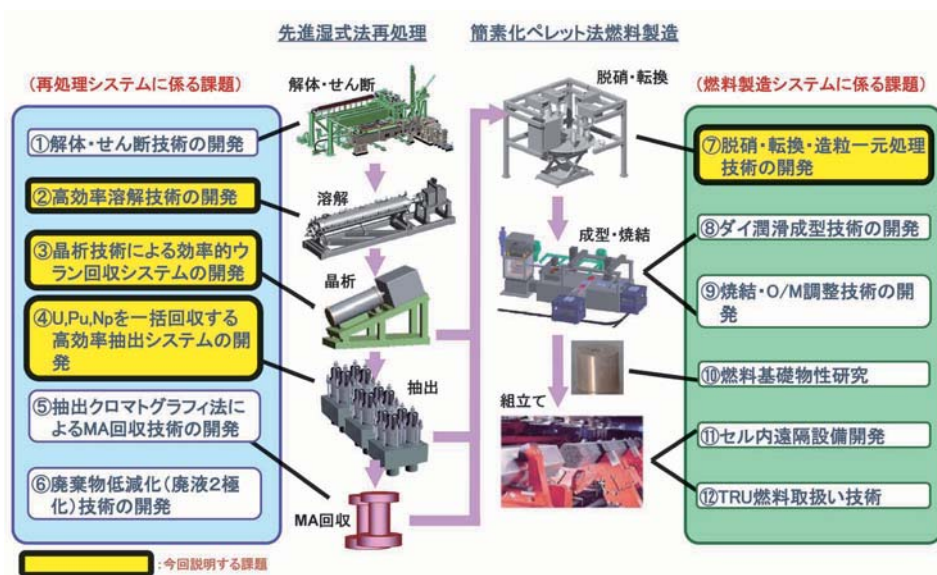
先進湿式法再処理は、従来の再処理技術である硝酸溶液への燃料溶解と溶媒抽出によるプルトニウム(Pu)等の除染・回収技術をベースに、経済性向上、環境負荷低減、核拡散抵抗性強化の観点から、プロセスおよび機器に革新的な技術を採用しており、本技術の確立に向けて開発を行っている。

#### (1) 高効率溶解技術の開発<sup>3)</sup>(第4図②)

運転時のオフガス発生量の平坦化、臨界安全管理を考慮した装置の小型化等の観点から、回転ドラム型連続溶解槽を対象とした開発を進め、これまでに溶解槽内部でのせん断片(ハル、ワイヤ等)の挙動や閉塞抑制のための内部構造の改良等を行っている。今後は高粉化せん断燃料の効率的な溶解方法、処理能力の向上を図る大型化を検討していく。また、清澄技術については、遠心清澄技術の開発を進めている。これまでに遠隔保守を考慮した基本構造を構築、模擬物質を用いた工学規模試験による基本特性を把握している。今後は加熱時あるいは静置時に生成が懸念される2次スラッジ(モリブデン酸ジルコニウム)の挙動評価、清澄装置等の高濃度化への対応を検討していく。

#### (2) 晶析技術による効率的ウラン回収システムの開発<sup>4)</sup>(第4図③)

晶析法は、溶解度差を利用した分離プロセスであり、燃料溶解液のウラン(U)、Pu濃度や冷却温度を制御す



第4図 燃料サイクルシステムの開発課題

ることによって溶液中の大部分のUを効率的に分離回収する技術であり、下流の抽出工程で取り扱う核物質質量が大幅に削減され、溶媒使用量の削減による経済性の向上、分配試薬の削減等が期待できる。これまでに照射済燃料を用いたホット基礎試験により、PuやFP元素の同伴挙動の把握、プロセス条件を評価するとともに結晶精製技術の検討にも着手している。また、機器開発では、臨界安全性、結晶ハンドリング性等の観点から、連続式回転キルン型晶析装置を選定し開発を進めている(第5図)。今後はホット基礎試験により、FP元素等の除染係数向上を図るとともに、ホット環境への機器の適用性評価などを実施してゆく。

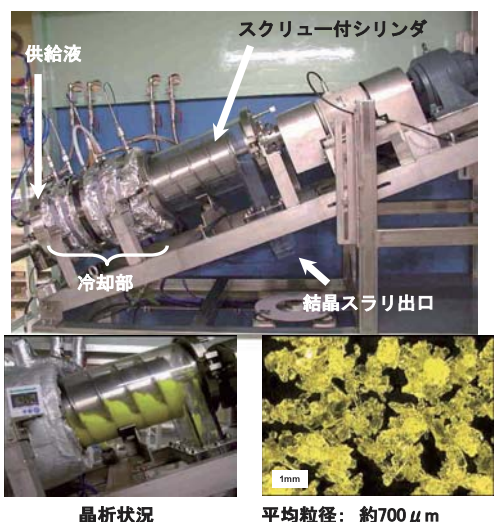
(3) U, Pu, Npを一括回収する高効率抽出システムの開発<sup>5)</sup>(第4図④)

抽出技術については、高レベル放射性研究施設(CPF)におけるホット基礎試験および抽出シミュレーション解

析により運転条件を最適化するためのフローシート研究、抽出器の高性能化として機器内滞留時間を短縮可能な遠心抽出器の開発を進めている。フローシート研究では、硝酸ヒドロキシルアミン(HAN)による還元分配やU, Pu, ネプツニウム(Np)の共回収技術、並びに晶析法と組み合わせた簡素化溶媒抽出法を開発している。簡素化溶媒抽出法は、抽出と逆抽出のみの単サイクル抽出技術であり、分配、U逆抽出、精製の各工程を省略することで溶媒抽出工程の取扱液量が最小化できる。また、遠心抽出器は、小型化、溶媒接触時間の短縮、起動停止の迅速化等の観点から、高燃焼度、高プルトニウム富化度燃料の処理に適している。これまでに工学規模試験(10 kg-HM/h)によるシステム特性等を把握し、耐久性、耐放射線性を評価するとともに、大型プラントへの適用性の向上のため、中性子吸収材内包型や磁気軸受型の開発にも着手している。今後、フローシート条件の最適化を進めるとともに、遠心抽出器の制御性の向上、スケールアップ検討等を実施していく。

2. 簡素化ペレット法燃料製造

簡素化ペレット法燃料製造は、溶液混合段階でのプルトニウム富化度調整や原料粉末の流動性改良に加え、ダイ潤滑成型技術を取り入れることで、従来のFBRの混合酸化物燃料製造における粉末取扱い工程等を合理化し、燃料製造設備の簡素化を目指したプロセスである。その一方で、マイナーアクチニド(MA)を含有する燃料を製造することから、遮蔽付セル内での製造が前提となり、そのための革新的な機器を開発することとしている。このため、おのおのの工程の成立性に係る課題のほか、遠隔操作、保守・補修に適した機器の開発を行う必要がある。今回は、この中から「脱硝転換・造粒一元処理技術の開発」について紹介する。



第5図 回転キルン型連続晶析試験装置(U試験用)

## (1) 脱硝・転換・造粒一元処理技術の開発

(第4図⑦)

脱硝・転換・造粒一元処理技術は、再処理の製品溶液を燃料製造用原料粉末に転換する処理工程において、次の4つの技術、①Pu 富化度調整技術、②マイクロ波脱硝技術、③焙焼還元技術、④粉末流動性改良(造粒技術)から成り立つものである。

簡素化ペレット法では、溶液の混合段階でPu 富化度を燃料仕様に調整(Pu 富化度調整)することにより、ペレット製造工程での粉末の混合処理工程を大幅に省くことが可能となり、燃料製造工程の簡素化が実現できるものである。また、ペレット成型用金型に原料粉末を充填し易くするために、原料粉末の流動性向上(粉末流動性改良)を図る方策として、脱硝・焙焼還元工程後に造粒処理を併せて行うものである。

Pu 富化度調整技術については、現状の送液設備に定量供給槽を追加することで、炉心燃料仕様上要求されるPu 富化度調整精度の目標値( $\pm 2.5\%$ 以下)を満足できる見通し(模擬溶液を用いた試験)を得た。MOX 粉末の機械混合に比べ、溶液段階での混合方式が粉末の均一性やPu スポット有無の観点からも非常に有利であることを確認した。

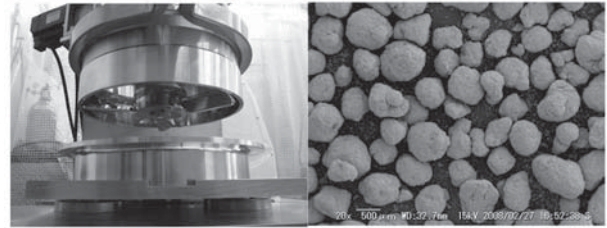
マイクロ波加熱脱硝技術については、2 kgMOX/バッチ規模で実証しており、量産化への開発を進める段階である<sup>6)</sup>。今回、脱硝容器として実績が豊富な浅皿容器と円筒容器について、マイクロ波加熱時の沸騰挙動、処理時間、得られる粉末の品質などを比較する小規模のウラン試験を実施した。この結果、得られる粉末の品質にはほとんど差はないが、円筒容器の場合はマイクロ波加熱時に発生する溶液の吹きこぼれを防止するために、容器高さが必要であることから、浅皿容器が有望と考えている。

粉末流動性改良については実験室規模(300 gMOX)の転動造粒法で、MOX 粉末を造粒することにより目標とする流動性の改良が可能であることを確認した。また、量産規模を目指した造粒試験では、粒度分布がシャープな造粒粉末を高収率で得るためには、造粒後に整粒することが有効であることがわかった。

また、微粉末の飛散防止に有効である粉末の移し替えを必要としない脱硝容器と造粒容器の共用化を図るため、攪拌羽根を容器上部から駆動する上部アクセス方式造粒機による小規模コールド試験で機器操作および顆粒性状が良好であることを確認した(第6図)。

## IV. 今後の展望

FaCT プロジェクトでは、これらの研究開発を進め、2010年にその開発成果を評価し、高い確度を持った見通しで革新技術の採否を判断する予定である。また、2015



上部アクセス型転動造粒機

造粒後のWO<sub>3</sub>粒子(左の造粒機使用)

第6図 上部アクセス型造粒機および造粒後粒子

年には主概念への採用可能性を判断できるところまで具体化させた革新技術を組み合わせ、開発目標・設計要求を満足する実用施設および実証施設の概念設計を研究開発の成果として取りまとめ、FBR サイクルの適切な実用化像を明確化することを目指す。この中で燃料・材料の開発は、高速実験炉「常陽」および高速増殖原型炉「もんじゅ」を活用しつつ進めていく。

特に、「もんじゅ」については、安全確保を前提に地元理解を得つつ、運転再開を慎重かつ着実に進め、その後の性能試験と本格運転を通じて、所期の目標である発電プラントとしての信頼性実証およびナトリウム取扱技術を確立していくことが課題である。また、得られたデータや運転経験は、設計手法の妥当性評価、プラント信頼性実証に活用するなどにより、FaCT プロジェクトおよび実用炉の設計研究に反映していく計画としている。

また、国際協力については、研究開発のリスクや資源負担の低減を図りつつ、わが国が進めている高速増殖炉サイクル研究開発の目標を諸外国と共有することで、わが国の技術が世界標準となることを目指していく。

最後に、FaCT プロジェクトでの成果を踏まえ、2025年に実証炉の運転開始、2050年より前の高速増殖炉の商業ベースでの導入を目指していく。

本報告は、経済産業省平成19年度発電用新型炉等技術開発事業、文部科学省原子力システム研究開発事業、電力共通研究の成果の一部を含みます。

## —参考資料—

- 1) S. Kotake, *et al.*, "Development of Advanced Loop-Type Fast Reactor in Japan(1)", ICAPP'08, Anaheim, CA, USA, June8-12, 2008.
- 2) 日本原子力研究開発機構, 平成19年度発電用新型炉等技術開発事業報告書, (2008).
- 3) Y.Sano, *et al.*, "Dissolution of Irradiated MOX Fuel for Highly Concentrated Solution", *Proc.Int.Conf. GLOBAL 2005*, Tsukuba, Oct. 9-13, 2005, No.259, (2005).
- 4) T.Washiya, *et al.*, "Development of Crystallizer for Advanced Aqueous Reprocessing Process", *Proc.Int.Conf. ICONE-14*, Miami, Florida, July 17-20, 2006 No.89292, (2006).

- 5) M. Nakahara, *et al.*, "Actinides Recovery by Solvent Extraction in NEXT Process", *Proc. Int. Conf. GLOBAL 2005*, Tsukuba, Oct9-13, 2005, No.262, (2005).
- 6) M.Suzuki, *et al.*, "Development of FR Fuel Cycle in Japan(3)", *Proc ICAPP'08*, 2036-2045, Anaheim, CA, USA, June8-12, 2008, in CD-ROM.

鷲谷忠博(わしや・ただひろ)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)燃料再処理

鈴木政浩(すずき・まさひろ)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)燃料開発, 電磁波応用/エネルギー戦略

### 著者紹介

水田俊治(みずた・しゅんじ)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)炉心材料, 照射効果/  
ナレッジマネジメント

近澤佳隆(ちかざわ・よしたか)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)高速炉プラントシステム設計/燃料取扱系設計

## 広告記事(PRのページ)新設と募集のお知らせ

### 1. 広告記事(PRのページ)の募集

学会誌では, 一般広告以外の広告記事(PRのページ)を新たに掲載することとしました

・掲載場所

- ① 従来の広告のページと同じ位置
- ② 「学会誌記事の最後で会報の前」(新規)

・掲載料金

- ① 従来の広告のページと同じ位置に掲載する場合は, 一般の広告料と同じ
- ② 学会誌記事の最後(会報の前)は80,000円/頁

・広告記事のページ数: 1~2頁(2頁の場合は「見開き」とする)

・掲載条件: 広告記事ページの右上に(広告記事)または(PRのページ)と記載する

### 2. 広告記事原稿の提供等

・版下は広告出稿主が提供する

・カラーの場合は出稿主がカラー印刷代を負担する

・生原稿の場合は一般広告と同じ(版下・フィルム制作費として20,000円, 版下支給の場合はフィルム制作費として5,000円を別途申し受けます)

(学会誌の広告記事としてふさわしくないと編集委員会が判断した場合は掲載をお断りする場合があります)

# 高度解析技術が原子力材料研究に与えたインパクト

—最新技術でここまでわかってきた！

日本原子力学会 材料部会

近年、原子力材料研究の進展が極めて著しい。それを可能にしたのは原子力材料研究者による高度解析技術の開発であり、その技術開発を支えたのが分析機器、観察装置および計算機の性能の向上である。本解説では、軽水炉压力容器鋼の照射脆化のメカニズムの理解に不可欠であったナノスケールの照射欠陥などの微細組織の同定やその発達過程の解明において、その解決が困難とされていた学問的課題が高度解析技術により、いかに解決されてきたか、また、そのことが照射脆化予測に与えるインパクトについて、例を示しながら解説する。

## I. はじめに

原子炉に限らず種々の構造物の機器材料の寿命を科学的な根拠に基づいて予測することは、機器構造物を高効率にしかも安全に運転するために不可欠である。機器構造材料は、いわゆる経年変化(劣化)を引き起こすことが知られている。一般に、材料の経年変化の本質は、材料を構成する原子が拡散(移動)することによるもので、拡散の駆動力は移動前後における原子の化学ポテンシャルの差で示される。一方、原子炉内、すなわち、照射下では、照射された粒子からのエネルギー付与による原子の弾き出しも直接的および間接的に原子の移動に寄与するため、照射促進あるいは照射誘起の原子移動に伴う経年変化が生じうる。これが、いわゆる照射効果である。

原子力材料の経年変化の中で、よく知られている現象が照射脆化である。この現象は、材料の硬化を伴う場合(硬化型)とそうでない場合(非硬化型)とがある。前者は、照射下での原子移動に伴い形成された「照射欠陥」が塑性変形の担い手となる転位の運動に対し抵抗を与え、鋼の格子を脆くさせることが原因であり、脆化量は硬化量に比例する。一方、後者は、照射下の原子移動によるある元素の「粒界偏析」が粒界強度を低下させることが原因であり、脆化量はその粒界偏析量に依存する。これまでの研究から、不純物の銅やリンが照射脆化を促進させることがわかっている。第1図は、照射脆化の要因となる「照射欠陥」や「粒界偏析」に関わる要素をまとめたもの

*Impact of Advanced Experimental Method on Nuclear Materials R&D—The Progress of Technology has Brought about a Deep Understanding!*: Division of Materials Science and Technology, Atomic Energy Society of Japan.

(2008年 7月10日 受理)

### 照射脆化

1. 硬化型脆化 ⇒ 照射硬化による脆化
  - 照射硬化の要因：照射欠陥の形成
  - 照射欠陥：
    - 1) マトリックス欠陥 (原子空孔や格子間原子等の点欠陥、マイクロボイドや転位ループ等の点欠陥集合体)
    - 2) 不純物銅のクラスター (銅の析出物)
    - 3) 銅以外のクラスター (他の溶質原子の析出物)
2. 非硬化型脆化 ⇒ 粒界強度の低下による脆化
  - 粒界強度低下の要因：不純物リン等の粒界偏析

第1図 照射脆化：本解説における用語とその関係

で、本解説の用語説明にもなっている。

経年変化を予測するためには、上記の「照射欠陥」や「粒界偏析」を同定し、それらの発達過程を明らかにする必要がある。しかし、実際に脆化を引き起こしうる照射欠陥のサイズや粒界偏析の程度が非常に小さく、その同定や発達過程については、未解決の課題が少なからず残っていた。しかし、近年、分析機器、観察装置あるいは計算機に性能の向上が見られ、それに伴い材料解析技術に大きな進歩があり、残されていた学問的課題が次々と解決されている。

そこで、本稿では、原子炉構造材料として軽水炉压力容器鋼(以下、压力容器鋼)に着目し、最近の高度解析技術の進歩が「照射欠陥」および「粒界偏析」の同定や発達過程の解明に果たした役割について紹介する。

## II. 照射硬化因子の追跡

### 1. 陽電子消滅法(PAS)における進歩とインパクト

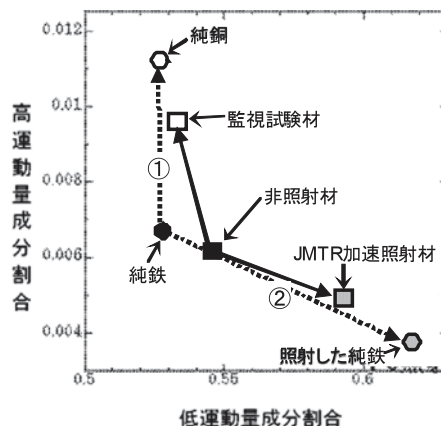
陽電子消滅法は、陽電子が消滅前に自らの好きな場所を探し出し、多くはその電子と消滅するという面白い性質を利用して、従来、陽電子の好きな場所として知ら



れている原子空孔型欠陥の敏感な検出法として使われてきた。しかし、最近、「同時計数ドップラー広がり法」という新しい測定法が開発され、陽電子の好きな場所の「元素分析」ができるようになった。この手法を利用して、陽電子が原子空孔型欠陥だけではなく圧力容器鋼中の銅クラスター(析出物)も好きな場所であることが発見され、ナノスケールの微小な銅クラスターの検出に威力を発揮することが示された。手法の詳細は文献<sup>1)</sup>を参照して頂きたい。

モデル合金を用いた多くの基礎的な研究をもとに、最近では実際の動力炉の監視試験材の解析が行われている。ここでは、「同時計数ドップラー広がり法」を用いて得られた重要な知見を2つ紹介する。

最初の例は、実炉監視試験材と加速照射材を用いた照射速度依存性に関するものである<sup>2)</sup>。第2図に、この監視試験材と同じ材料を材料試験炉(JMTR)で約4桁高い照射速度で加速照射した場合の照射硬化量を比較して示す。監視試験材の方が約1桁低い照射量から硬化が始まっていることがわかる。ほぼ同程度硬化した矢印の2つの試料について、上記のPAS「同時計数ドップラー広がり法」で調べた結果、硬化の原因が両者で異なることがわかった。第3図に、その結果を示す。ここで、縦軸と横軸は、それぞれ陽電子の高運動量および低運動量成分の割合であり、純鉄と純銅では高運動量成分の割合が大きく異なっている(点線①)。一方、照射した純鉄では低運動量成分の割合が大きくなる(点線②)。すなわち、①の方向への移動は銅クラスターの形成を意味し、②の方向への移動はマトリックス欠陥の形成を意味している。この解析法は、高運動量領域のノイズの大幅な低減によるもので、これにより照射によって形成される照射欠陥のうち、銅クラスターとマトリックス欠陥を直接観察法以外の方法で同時に識別することがはじめて可能となった。また、圧力容器鋼は強磁性であるため、微細なマトリックス欠陥や銅クラスターを透過電子顕微鏡で直



第3図 監視試験材と加速照射材の同時計数ドップラー広がり結果

接観察することが困難であることもこの解析法の重要さを強めている。第3図において、この圧力容器鋼材の照射前の成分割合は、■に位置している。この鋼材を監視試験材として照射した場合とJMTRで加速照射した場合とでは、照射後の成分割合が異なり、監視試験材では銅クラスターが主であるのに対して、加速照射試料では主としてマトリックス欠陥が形成されていることを意味している。すなわち、照射速度の低い監視試験材では、加速試験よりも、銅クラスターがより低い照射量から形成されることが判明した。

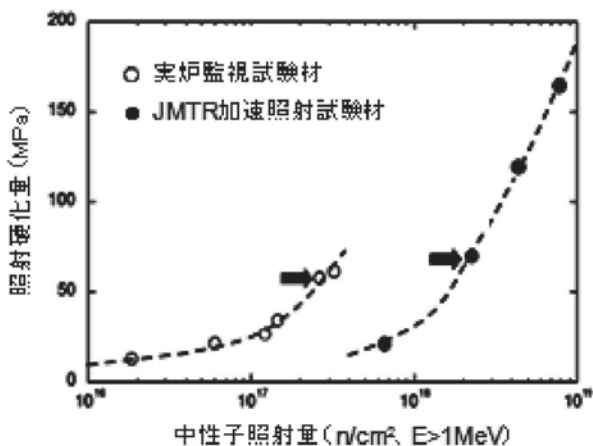
もう一つの例は、欧州の加圧水型炉(ベルギー Doel-2 炉)の監視試験に関するもので、第3図と同じ解析法で調べたところ、約3年間の照射では主として銅クラスターが形成されていたが、30年間の照射では、銅クラスターに加えて照射欠陥も多く検出された<sup>3)</sup>。このように、銅クラスターは照射の初期に形成され、その後、照射量の増大とともに照射欠陥が徐々に蓄積されていくことが実験的に証明されたのである。

このように、照射硬化の主役が照射速度や照射量により異なることを明確に示したことのインパクトは極めて大きく、照射脆化機構の科学的な根拠に基づいた理解が可能になってきた。

### 2. 3次元アトムプローブ法(3DAP)や透過電子顕微鏡法(TEM)による照射欠陥の直接観察

圧力容器の照射硬化を引き起こす要因となる照射による組織変化はナノメートルオーダーの変化であり、最新の分析機器を組み合わせることで次々とその詳細が明らかになっている。ここでは、まず3DAPによるナノスケールの溶質原子クラスターの直接観察について述べる。次に、TEMを用いた溶質原子クラスターの直接観察とマトリックス欠陥と呼ばれる点欠陥集合体の観察について述べ、それらが高照射領域で重要となる照射脆化因子の解明に与えたインパクトについて述べる。

最近の材料分析技術の進歩として、鋼材中の元素分布

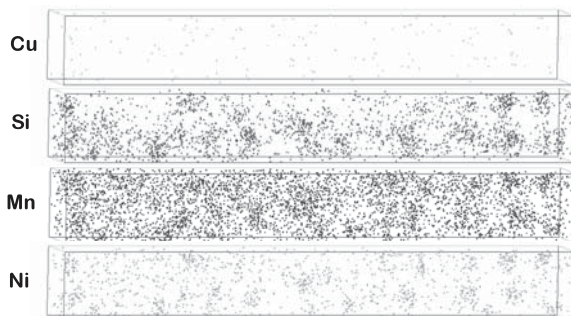


第2図 同一材料に対して照射速度が4桁異なる中性子照射をした場合の照射硬化の照射量依存症

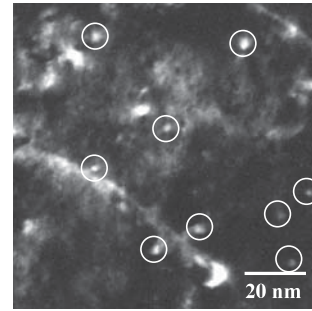
をほぼ原子サイズレベルの空間分解能により3次元的に可視化することのできる3DAP法の開発がある。3DAP分析では、検出された元素のすべての座標がデータとして取り込まれるため、原子マップを再構築して、直接的に材料中に埋め込まれた溶質原子クラスターを同定することが可能である。しかし、脆い材料では分析用試料の破壊が生じやすく、データ収集が非常に困難であることや一度に分析できる領域が微小であることなどの課題が残されていた。近年、原子のイオン化にレーザーを用いて分析試料の破壊を低減する技術や局部電極アトムプローブ(LEAP)と呼ばれる測定領域の拡大を可能にした3DAPなど、分析機器として実用性の高い装置が開発されている<sup>4,5)</sup>。また、集束イオンビーム加工(FIB)による分析試料の加工技術の進歩も見逃せない。

次に、TEM観察について述べる。TEMは照射欠陥を直接観察する装置として一般的なものであり、重要な役割を担ってきた。近年、FE-TEM(field emission TEM)に代表される電子顕微鏡の飛躍的な性能向上により、本来TEMのもつ高分解能像観察に加えて、ナノメートルオーダーの空間分解能での元素分析が可能になっている。このような進歩により、TEMによる照射欠陥のイメージ識別分解能は2 nm程度に到達している。一方、溶質原子クラスターの観察については、エネルギーフィルタ機構の付随したFE-TEMにより直径5 nm程度の銅クラスターを鉄中で検出できるようになっている。将来的には、2 nm以下まで検出できる性能向上が見込まれ、溶質原子や不純物銅のクラスターのサイズや密度分布を知る上で重要な観察方法になると期待される。

このような最新の分析手法を組み合わせることで、高照射領域で重要になる照射脆化因子が次第に明らかになってきた。まず第4図は、高照射された不純物銅の少ない圧力容器鋼に形成された溶質原子クラスターを3DAPで観察した結果の一例であり、第5図はマトリックス欠陥をFE-TEMで観察した一例である。第4図はそれぞれCu, Si, Mn, Niの元素マップであり、Mn-Ni-Siが集積した直径2~3 nmの溶質原子クラスターの形成が認められる。また、第5図ではマトリックス欠陥として直径2~3 nmの転位ループ(○囲み)が形成され



第4図 3DAPによる溶質原子クラスターの分析例  
12×12×100 nm



第5図 TEMによるマトリックス欠陥の観察例

ていることがわかる。

このような実機照射材やJMTR等の研究炉照射材、イオン照射等のシミュレーション照射材の分析を通じて、圧力容器鋼の重要な照射脆化因子は、これまでTEMでは観察不能とされていた数nmサイズの溶質原子クラスターの形成と転位ループを主としたマトリックス欠陥の形成であることがわかってきた。さらに、溶質原子クラスターはFe-Mn-Ni-Si-Cuからなっており、照射脆化の主因であること、その組成や大きさ、密度は鋼材の不純物銅の含有量に関係して変化することもわかってきた。

3DAP法やTEM法による照射欠陥の直接観察は、欠陥のサイズ分布や数密度の高精度の測定を可能にした。このインパクトは強く、照射硬化量をより正確に評価することを可能にしている。

### III. 粒界強度が低下するのはなぜ？

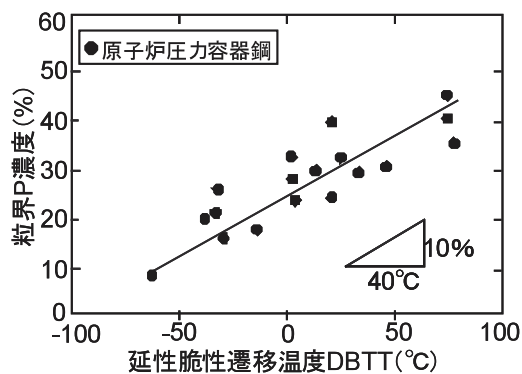
圧力容器の長期使用を見込む場合、硬化型照射脆化とは別に、熱、中性子照射により材料中の不純物元素であるリン(P)等が結晶粒界に偏析し、粒界強度が弱められて粒界破壊が生じることによる脆化、いわゆる非硬化型脆化(粒界脆化)を検討しておく必要がある。

ここでは、圧力容器鋼の粒界におけるP濃度と脆化の関係を示し、粒界に偏析している元素により粒界強度が低下するメカニズムを原子・電子レベルから第一原理計算によって明らかにした結果について紹介する。

#### 1. 粒界偏析が粒界破壊を招く

圧力容器の使用温度では、Pの拡散係数は小さく、熱のみの影響では60年間経過した後においても、粒界でのPの濃度はほとんど変化しないことが確認されている<sup>6)</sup>。しかし、中性子照射下では、Pと原子空孔あるいは格子間原子との相互作用により、Pの粒界偏析が促進あるいは誘起される可能性がある。

圧力容器鋼でオージェ電子分光分析によって測定した粒界でのPの濃度が10%増加すると、延性脆性遷移温度(DBTT)を40℃シフトさせることが報告されている<sup>6)</sup>(第6図)。重要な点は、粒界P濃度が低い場合には、脆性破壊の様式はほぼ全面へき開破壊であるのに対し、P濃度の増加とともにDBTTが上昇し、破壊様式は粒

第6図 粒界P濃度と $\Delta$ DBTTの関係

界破壊へと変化することである。

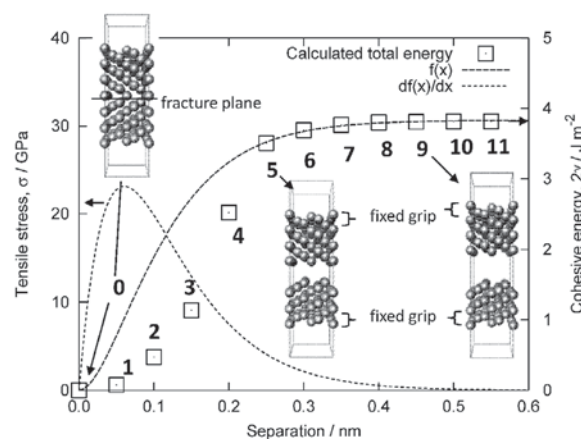
では、なぜPの粒界偏析は粒界強度を低下させるのだろうか？

## 2. 第一原理計算による粒界脆化メカニズムの解明

第一原理計算とは、量子力学の基本方程式であるシュレーディンガー方程式を解いて物質の電子構造を求める計算のことである。物質の性質は電子の振舞いに帰着し、電子の振舞いはシュレーディンガー方程式によって記述できるので、この方程式の解が物性を与えると考えられる。しかしながら数個の原子からなる系に対しても膨大な計算量を必要とするためになかなか適用範囲が広がらなかった。ところが近年の計算機と計算コードの双方の進歩により、100原子程度の系を計算対象にできるようになり、以下で紹介するような粒界偏析を模擬した計算が可能になってきた。

実際上は、溶質原子が粒内から粒界へ移動して粒界にトラップされ、粒界偏析していく様子を動力学的に計算できればいいのだが、そのような計算は時間がかかりすぎてできない。そこで、まず偏析するP原子は「手で」動かして各偏析原子配置における偏析エネルギー(P原子が粒内にあるときと粒界にあるときのエネルギー差)を計算し、そのエネルギーが大きければその配置は実現しやすいと考えることで、粒界偏析を模擬した。次に、得られた偏析原子配置に対して、第7図に示すような擬似的な引張試験計算を行い、粒界強度の指標である粒界凝集エネルギー( $2\gamma$ )を計算した。

以上のような計算を、Pのほか、一般的な偏析元素として知られているボロン(B)、炭素(C)およびイオウ(S)に対しても行い、偏析濃度上昇に対する粒界凝集エネルギーの変化( $\Delta 2\gamma$ )を求めた<sup>7)</sup>。その結果、PとSは粒界よりも表面で安定化するために粒界凝集エネルギーを下げ、BとCは逆に表面よりも粒界で安定化するために粒界凝集エネルギーを上げることがわかった。これは、PとSが粒界脆化元素、BとCが粒界強化元素であることを示唆しており、実験事実と一致する。また、粒界凝集エネルギーの変化( $\Delta 2\gamma$ )を高純度鉄において測定されたDBTTの変化と比較すると、両者は非常によく



第7図 擬似的な引張試験計算の概念図

対応しており、粒界凝集エネルギーの変化が粒界偏析による粒界強度の低下と強い相関のあることがわかった。

以上のように、オージェ電子分光分析に代表されるような粒界の分析技術と、原子・電子レベルから理論的根拠を与える計算科学的手法は、補完し合うことで有力な研究手段になる。これ以外にも計算科学的アプローチが功を奏した例を以下に示す。

## IV. 計算科学的アプローチ

分子動力学法、モンテカルロ法、転位動力学法などの計算科学的アプローチは照射欠陥の発達過程の解明において、多くのインパクトを与えてきた。压力容器鋼の照射脆化研究においても、上記を含む計算科学研究からの知見は脆化メカニズムの理解に大きく貢献している。本章では特に、照射脆化予測にとって重要な知見をもたらした2つの例を紹介する。

PAS法や3DAP法によって明瞭に観察されているように、不純物の銅を多く含む鋼材では銅クラスターが形成される。この主な駆動力は鉄中での銅の固溶限(銅原子が一様に溶解していられる限界の濃度)が非常に低いという熱力学的な要因によっている。実際、銅を非常に多く含むモデル合金等では、温度を上げて銅の拡散を促すと容易に銅クラスターが形成される。ここで疑問となるのは、銅クラスターの形成への中性子照射の影響は何か？換言すれば、中性子照射の影響は高温と同じように原子空孔を供給するだけのものか？ということである。

キネティック・ラティス・モンテカルロ(KLMC)法では、照射によって形成される照射欠陥をすべて粒子として扱い、照射による粒子の形成と蓄積、拡散、分解(集合体の場合)、消滅など、結晶内で生じるすべての事象をシミュレートする。Soissonらは、KLMC法を用いて、鉄-銅2元合金における高温下の照射欠陥形成のシミュレーション法を開発した。これを受けてWirthらは、変位カスケードによって形成された原子空孔の分布が照射欠陥の形成に及ぼす影響をKLMC法により調べた。

原子空孔の分布としては分子動力学(MD)法による変位カスケードの計算結果が用いられた。MD計算によれば、照射の直後には、数10 nm 程度の範囲に高密度に形成された原子空孔とその周囲の銅原子が集合してそれぞれ複数個含んだ複合クラスターが容易に形成されることがわかった。さらに十分な時間の経過とともに、複合クラスターから原子空孔が離脱し銅クラスターが残されることが示された。これは中性子の衝突が原子空孔の供給だけでなく、その場で銅クラスターの核形成に直接寄与することを示唆している。さらに、照射により原子空孔と同時に形成される格子間原子も銅と相互作用して複合体を形成することが示されている。このように計算科学的アプローチにより、銅のクラスターリングの新たなプロセスの存在が認識されたのである。また、これらの機構は前述のPAS等によって実験的にも示されている。

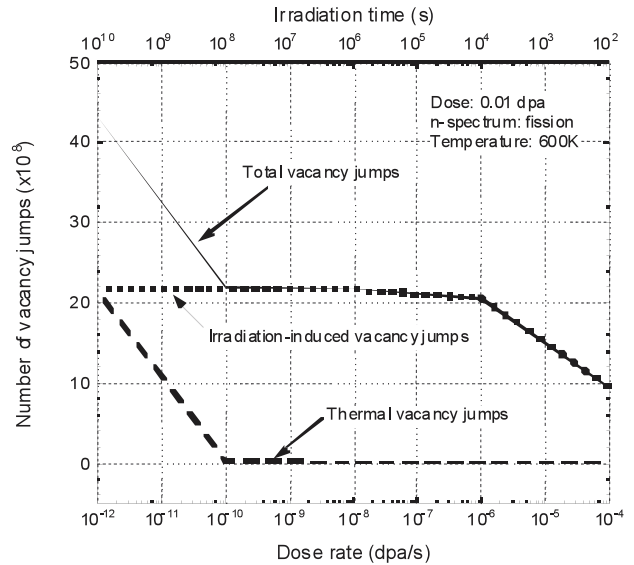
計算科学的アプローチによって得られたもう一つの重要な知見は、照射速度の影響のメカニズムである。銅を多く含む材料では照射速度が脆化に影響を与え、一般に低照射速度で脆化が大きくなる傾向を示す。照射速度が変わると、異なる変位カスケードで形成された原子空孔や格子間原子の相互作用に影響を与えるが、原子空孔や格子間原子の相互作用はすでに蓄積されている照射欠陥の影響も受けるため照射量の関数でもあり、現象としては非常に複雑である。

Sonedaら<sup>8)</sup>は中性子照射された純鉄のKMC計算を行い、異なる照射速度で所定の照射量まで照射した時の原子空孔のジャンプ数を調べた。原子空孔のジャンプ数は銅の拡散の指標となり得る。この結果、照射速度が速い場合には、異なる変位カスケードで形成された原子空孔や格子間原子の相互作用(カスケード間相互作用)により原子空孔のジャンプ数が減少するが、照射速度が遅い場合にはカスケード間相互作用がほとんど生じないため、原子空孔のジャンプ数が変化しないことがわかった(第8図)。しかし、一方で、高照射速度での短時間照射では無視できた熱平衡原子空孔のジャンプ数が、低照射速度での長時間照射では無視できない数となることもわかった。実機の非常に照射速度の低い領域では、照射由来の原子空孔と熱平衡原子空孔の両方による拡散が重畳して照射速度の影響が生じる可能性のあることがわかった。

これらの計算科学的アプローチが照射欠陥生成プロセスの理解に与えたインパクトは大きく、その成果は最近策定された国内脆化予測法<sup>9)</sup>に取り入れられている。

## V. おわりに

高経年原子炉機器装置の保守点検や維持、そして補修を高効率に行うためには、使用されている材料の経年変



第8図 照射速度の影響のKMC解析の結果

化を理解することが不可欠である。圧力容器鋼においては照射脆化が問題とされ、「照射欠陥」や「粒界偏析」がその原因となっている。照射脆化評価は照射硬化や粒界脆化の発現を実験的に認識することであり、照射脆化予測は、それらの変化の過程を科学的根拠に基づいて理論的に外挿することである。高度解析技術の開発は、照射下における材料挙動のメカニズムの解明に大きなインパクトを与え、その理解が急速に進んでいる。これらの成果は、経年変化(照射脆化)を高精度に予測する手法の実用化に利用され始めたところである。

今後、これらの高度解析技術を相補的に利用することにより、学問的理解が深まり、さらに高精度の予測式が開発されると期待される。原子力エネルギーの高効率安全利用に向けて、これらの研究成果をプラントの維持基準に迅速に、かつ効果的に反映させることが肝要である。

(執筆者: 木村晃彦(主査), 永井康介, 藤井克彦, 西山裕孝, 曾根田直樹)

## — 参考資料 —

- 1) 金属, 73(2003)の特集.
- 2) Y. Nagai, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 261920(2005).
- 3) T. Toyama, et al., *Acta Materialia*, **55**, 6852(2007).
- 4) A. Cerezo, et al., *Microscopy Microanal.*, **13**, 408(2007).
- 5) T.F. Kelly, et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **78**, 031101(2007).
- 6) Y. Nishiyama, et al., *J. ASTM Int.*, **4**[8], Paper ID JAI 100690, (2007).
- 7) 山口正剛, 日本金属学会誌, **72**[9], (2008)出版予定.
- 8) N. Soneda, et al., *J. Nucl. Mater.*, **323**, 169(2003).
- 9) 日本電気協会, 原子炉構造材の監視試験法, JEAC 4201-2007, (2007).

# 核データ活動における大学の役割

## —原子力研究と基礎研究

東北大学 馬場 護

原子力における基礎研究の重要性について、核データライブラリーの開発研究と大学の役割を題材に述べる。核データファイルは膨大な内容を有する国家的データベースであり、その開発・維持は mission oriented なものであるが、大学における基礎的、innovative な研究活動とタイアップすることによって初めて可能であることを示し、原子力における大学の役割を論じる。

### I. はじめに

#### 1. 核データとは？

原子炉を設計するには、原子炉内での核反応を制御し、臨界を達成するとともに、受動的安全性を確保し外部への放射線の漏洩を防止する、増殖炉の場合には適切な増殖比を達成する、などが必要である。さらには、材料の放射線損傷や燃料核種の核変換等も正しく予測することが必要である。それには、原子炉における中性子の空間的・エネルギー的振舞いを正しく予測し、核反応データを使って種々の核反応率を求め、その時間的、空間的变化を追跡することが課題となる。そのため、中性子による核分裂、捕獲、散乱、等の断面積とその温度依存性、核分裂即発中性子数、同遅発中性子数等、中性子と原子の相互作用に関する核反応データおよび原子、原子核の物理的諸特性に関するデータが高い精度で必要とされる。それらのデータを集大成しファイル化したものが、いわゆる核データライブラリーまたは核データファイルであり、放射線輸送コードや各種計算コードとともに、原子炉、核融合炉、核燃料施設、加速器施設等の設計と運転に不可欠なものである<sup>1)</sup>。

このような核データの原子力エネルギーにおける重要性に加えて軍事面での必要性もからみ、欧米各国、旧ソ連等において独自のデータファイルの整備が国家的施策として進められてきた。冷戦構造の崩壊後も、エネルギーセキュリティーの面から、各国は ENDF (米国)、BROND (ロシア)、JEF (欧州)、JENDL (日本) 等、独自の核データファイルを整備し維持してきた。一方、核データは原子力平和利用の象徴的な存在でもあり、国際協力が

IAEA (国際原子力機関) を中心に早くから展開されてきた分野でもある。

#### 2. 核データの現状と課題

核データへの要求精度はデータの種類によって異なるが、最も高い精度が要求されるのが臨界性に直結する核分裂断面積と核分裂即発中性子数であり、後者の場合には 1% 以下と極めて高い<sup>1)</sup>。この高い精度や広範なデータをカバーするには組織的で高度な活動が不可欠であり、多くの人的資源と資金が投入されてきた。

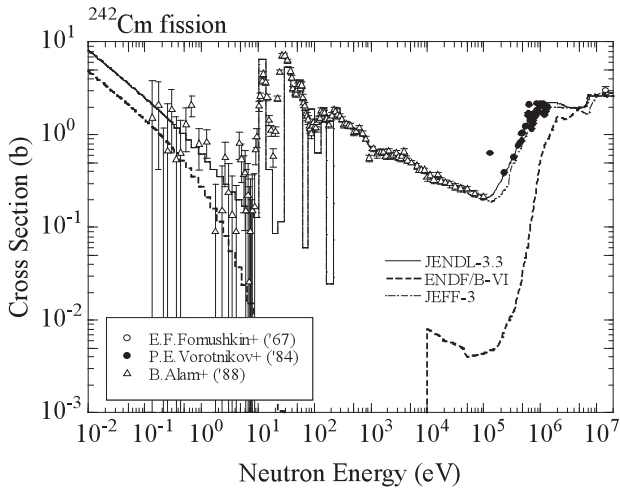
このような努力によって、在来型の原子炉や核融合炉に関しては、核データファイルの精度は基本的な要求を満たすレベルに達してきたが、さらにバランスのとれた高精度の設計や高燃焼度化への対応、ネプツニウム、アメリカシウム等、いわゆるマイナーアクチニドの利用と核変換・燃焼などのためには、まだまだ多くの課題が残されている。核データの誤差は、設計余裕につながるため経済性や資源の利用効率等にも影響するので、その正しい推定と低減が非常に重要である。第 1 図に<sup>242</sup>Cm の核分裂断面積データの現状<sup>2)</sup>を示すが、ライブラリー間に大きな差異がある。

また、大型加速器と未臨界炉を組み合わせた加速器駆動システム (ADS)、医療応用を含む加速器利用、中性子による電子デバイスの誤動作や損傷等、中性子の関係する応用分野が拡大し、それらへの応用にも核データが要求されるようになってきている。

上に述べたことから、核データ活動は優れて mission oriented なものといえるが、従来、基礎研究と innovative な活動を使命とする大学が果たしてきた役割は大きく、他の原子力分野と同様、それは今後も変わらないであろうと考えられる。本稿では、核データ活動における大学の果たすべき役割について私見を基に述べる。

*Role of Universities in Nuclear Data Activity—Nuclear Energy and Basic Research* : Mamoru BABA.

(2008年 6月26日 受理)

第1図  $^{242}\text{Cm}$  核分裂断面積データの現状

## II. 核データ活動と大学の役割

上で述べたことから、核データファイルには、核種や同位体、エネルギー範囲、反応の種類、物理量等において必要な内容を網羅していること(完備性と呼ぶ)、およびそれらのデータが要求精度を満たしていることが要求される。これには上述のように組織的で継続的な活動が必要であり、各国とも国立研究所がその中心的な役割を担ってきた。日本では日本原子力研究開発機構(旧、日本原子力研究所)が、米国では Brookhaven 研究所がそうである。こうした傾向は原子力のような巨大科学技術の場合には、多かれ少なかれ各分野に存在するであろう。

その意味では核データ活動の主役は国立研究所であり、大学の役割は脇役に過ぎないという言い方もできる。しかし実際には、日本の核データ: JENDL の開発整備において大学が果たしてきた役割には実に大きなものがあり、それなくして現在の内容と質を備えた核データファイルは不可能であったといえよう。

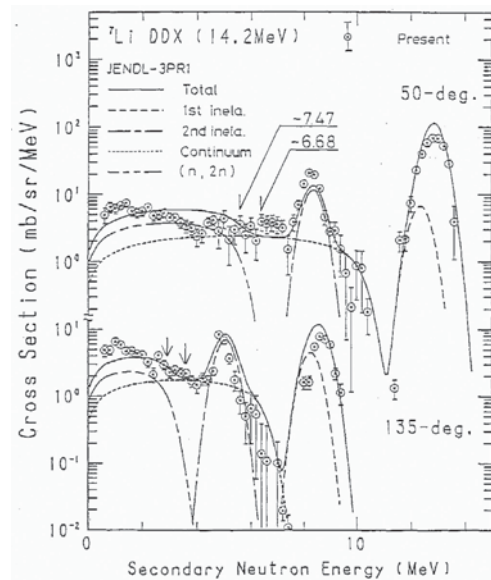
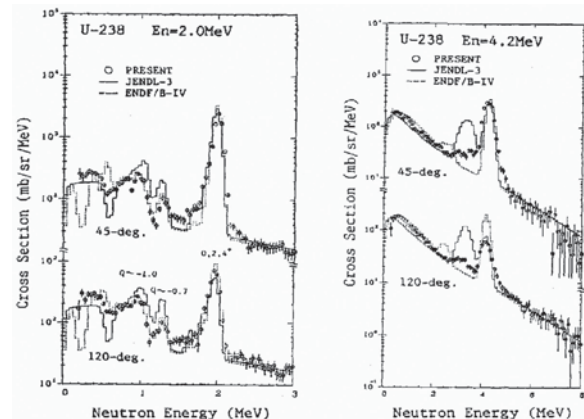
具体的には、大学の果たしてきた役割として、①核データファイルの基礎となる新しい実験データの提供、②理論計算・評価手法の開発が挙げられる。なお、「評価」とは「実験データと理論計算を基礎に“正しい”データを推定する作業」であり、核データライブラリー整備における中心的な活動である。データへの要求精度は理論計算の精度を大幅に上回っているのが通常であり、評価においては実験データが重要な役割を演じる<sup>1)</sup>。

### 1. 実験分野における成果

原子力開発の初期から1970年代まで、日本は catch up の時期にあり、実験データも欧米とソ連に負うところが大きかった。80年代に入って、大学、原研に加速器中性子源が相次いで設置され、「核融合特定研究」の科学研究費による後押しなどと相まって、核データ測定が大学で

非常に活発になり、国産核データファイル JENDL の高度化に大きく寄与した。

その例として、最初に大阪大学と東北大学における中性子生成二重微分断面積の実験<sup>1,3,4)</sup>を挙げる。それまでは、熱中性子炉や高速炉を主な対象としたため、中性子散乱については、2次中性子のエネルギー分布を角度に独立なものとして扱っていた。しかし、核融合炉や高速炉で重要となる $\sim 10$  MeV以上の領域や $^6\text{Li}$ 、 $^9\text{Be}$ 、C等の軽核の場合には、エネルギー分布が角度に強く依存するようになり、これを直接的に考慮したエネルギー角度二重微分断面積(Double-differential cross section: DDX)が必要となってきた。第2図に $^7\text{Li}$ のDDXの例<sup>3)</sup>を示すが、広い2次中性子エネルギー範囲にわたる測定が必要であり、中性子源や測定系の強化が必要であった。阪大と東北大でこれらの取組みがなされ、世界をリードするデータが次々と生み出された<sup>1,3,4)</sup>。それ以前もDDXデータがなかったわけではないが、これらのデータは質的にそれらと一線を画すものであった。このよう

(a)  $^7\text{Li}$ , 14.2 MeV(b)  $^{238}\text{U}$ , 2.0 MeV(c)  $^{238}\text{U}$ , 4.2 MeV第2図  $^7\text{Li}$ (上)、 $^{238}\text{U}$ (下)に関する中性子二重微分断面積データ

なデータはモデル開発や評価にも刺激を与え、活発な時代が形成された。

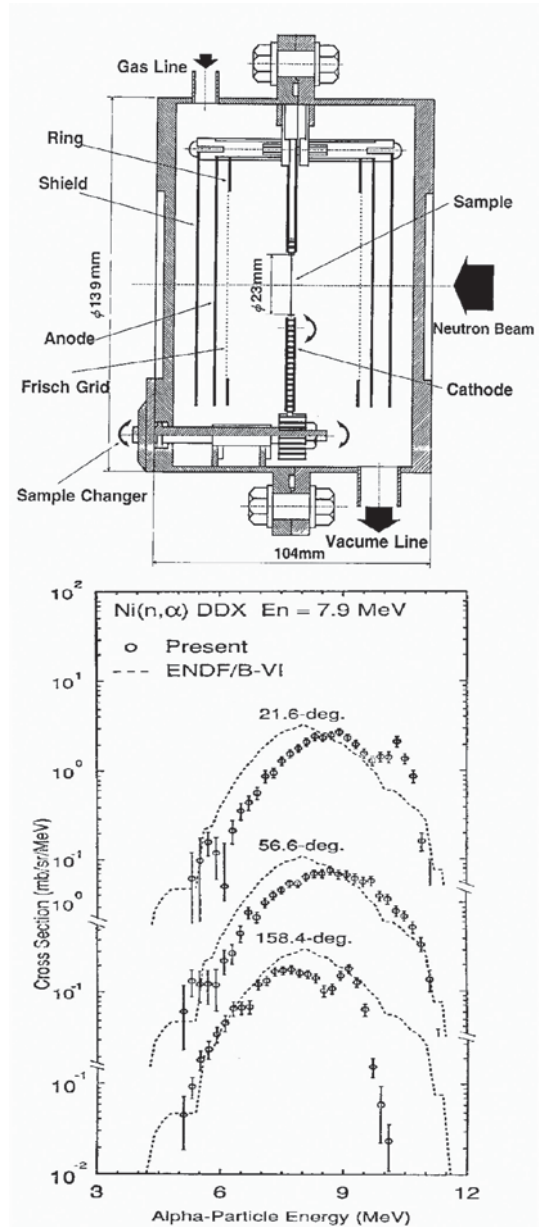
上に述べたように、中性子源建設や科学研究費などいくつかの幸運が重なってはいるが、大学における活動の典型としてあげることができる。これらの成果は核データ整備にも反映され、JENDLは、軽核の中性子散乱や中性子 DDX に関して世界の先端を行くファイルとなった。第2図に $^{238}\text{U}$ の例<sup>4)</sup>も示すが、このデータも非弾性散乱断面積と中性子スペクトルデータの評価に大いに貢献した。中性子生成 DDX の測定は、GeV および数10~100MeV領域における九州大学の系統的实验、数10MeV領域で東北大サイクロトロンでの実験に引き継がれ、日本における特徴的な実験と位置づけてよいものと思う。

もう一つ、東北大におけるグリッド電離箱を用いたヘリウム生成二重微分断面積測定<sup>5)</sup>の例を挙げる。これは、検出器として第3図に示す $4\pi$ 型のグリッド電離箱を用い、20 MeVまでの $\alpha$ 粒子を止める阻止能の達成、中性子照射に伴うバックグラウンドの抑制、 $\alpha$ 粒子と陽子の識別などに工夫を凝らし、従来の測定法に比べて50倍以上の高い効率で $\alpha$ 粒子のDDX測定を可能としたものであり、Fe, Ni, Cr, Cuなどの主要構造材核種についてのヘリウム生成断面積データを与えた<sup>1,5)</sup>。

東京工業大学においては捕獲断面積、捕獲 $\gamma$ 線スペクトルに関する系統的实验が行われ、宇宙における元素合成に関連する軽核の捕獲断面積などについて、常識を書き換えるような成果が挙げられたが、これも中性子源から測定系までにわたって行われたさまざまな工夫によるところが大きい。また、京都大学原子炉実験所の電子ライナックと鉛スペクトロメータを用いて行われたマイナーアクチニドについての一連の实验も、不確かさの原因究明を含めて、日本の寄与が少なかったアクチニド核種に関して非常に重要な成果を挙げた。これらの实验も大学の特色を生かした研究であり、JENDLを最も優れたデータファイルに押し上げることに貢献した。このほかにも、大学において、荷電粒子生成、放射化、核分裂等に関する一連の成果が挙げられてきた<sup>1)</sup>。

## 2. 計算・評価手法分野における成果

過去の核データ評価は、主として実験値と計算値にらみながら評価者の心眼によって評価を行うという、古典的なやり方で行われてきたようであるが、臨界性やサンプル反応度、中性子透過率など積分的な実験データからのフィードバックを可能にして、より客観性を高めるには、核データと積分量との感度係数を用い、数理工学的手法による評価が必要となる。JENDL-3の評価で、ウラン、プルトニウムなど重核に対して行われた同時評価は、このような先進的な評価の例として挙げられる。アクチニド核種データの場合、核分裂や捕獲断面積に関しては共通の標準データを用いている場合が多く、個々



第3図 グリッド電離箱とNi(n,  $\alpha$ )二重微分断面積の測定結果<sup>5)</sup>

に評価するよりは、複数のデータを同時に考慮して評価を行う(同時評価)のが効率的であり合理的である。この手法の基礎付けと道具の開発は九大が中心になって進められた<sup>6-8)</sup>。このような原理の整理や手法の開発はまさに大学が指向すべき活動の一つと考えられる。共分散は、データの誤差の尺度として、設計余裕を決定する重要なものであるが、JENDL-3.3は共分散データが世界で最もよく整備されたデータファイルとなっている。

また、大学が果たしてきた役割として、核反応モデルやモデルパラメータの検討がある。多段階統計モデルの開発、光学模型ポテンシャルの検討、簡易型歪曲波ボルン近似、軽核 DDX のモデル化などが九大、東北大、阪大等で行われ、JENDLの評価にも利用された。最近、九大で行われている半導体のソフトエラー解析や検出器

効率コードの開発も大学における研究として今後の発展が期待される。

### III. 核データの今後の役割

環境問題の深刻化とともに世界的に原子力の復調が進み、それに対応すべく核データの高度化も重要課題となっており、日本においては JENDL-4 計画が進められている。JENDL-4 においては、高燃焼度の達成や核変換、GEN-IV、ADS などの次世代型原子力システムと、さらに多面的な応用分野への対応等も要求されることになると考えられる。

#### (1) JENDL-4用データ

従来の核データがそうであったように、JENDL-4 の最も重要な顧客はエネルギー分野であり、原子力エネルギーの高度化と拡大に必要なデータの充実、具体的には重要核種についてのさらなる精度向上と従来不確かさの大きかったマイナーアクチニド、および高燃焼度化や核変換に伴って重要となる核種のデータが主な課題になると考えられる。

#### (2) 放射線利用分野への応用

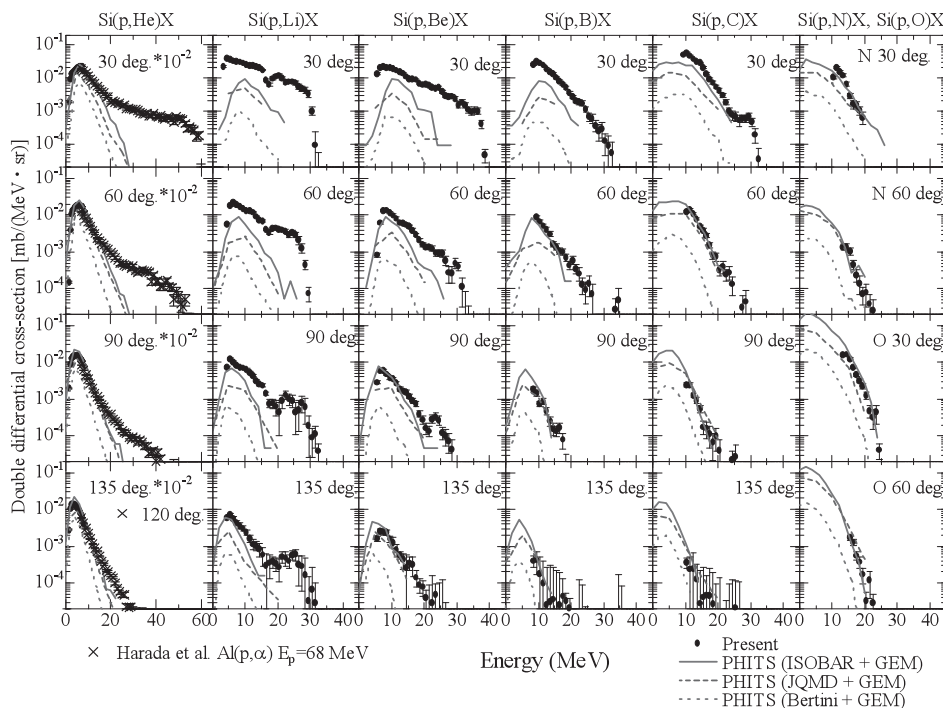
放射線利用あるいは核データ利用の面では、元素生成を明らかにしようとする宇宙核物理への寄与と連携、放射線診断と治療に関連した医学・ライフサイエンス関連分野、半導体ソフトエラー・材料損傷など放射線影響分野、有用アイソトープ製造に関連する分野等が挙げられよう。これら新しいデータニーズに対しては、実験および計算・評価両面にわたって新たな開発的な取り組みが必要と考えられる。

### 1. 実験分野での展望

実験の面では、マイナーアクチニドなどの強放射能試料や微量試料に対する測定、不安定核に対する実験、 $\alpha$  より重い荷電粒子(フラグメント)の生成反応に関する実験等が挙げられる。いずれも、強い中性子源と高度な測定手法を必要とするもので、まさに大学が開発課題として取り組むべき課題と考えられる。強力中性子源としては年内に利用可能となる予定の J-PARC 減速大強度ビームや東北大サイクロトロンでの  ${}^7\text{Li}(p,n)$  疑似中性子源等が利用できる。また、東工大、京大炉の中性子源を用いた実験においても、サンプルや実験手法の工夫によってこれらの課題への取り組みが期待される。

大学の施設における実験は、落ち着いて工夫をしながら取り組める点で、教育あるいは人材育成の面でも重要と考えられる。このような環境は、下記に述べる大型施設におけるものと相補的なものとして、今後もぜひ確保すべきものとする。

数10 MeV 以上の中高エネルギーの領域では、中性子のみならず陽子に対するデータも重要で有効である。この面で、阪大核物理センター(RCNP)や理化学研究所サイクロトロンの実験装置を利用した実験の可能性が伝えられていることは幸いであり、その利用を積極的に考えるべき時期と思われる。RCNP については、九大グループがすでに荷電粒子生成の実験の実績を有しており、これを発展させて、例えば第4図のようなフラグメント生成実験<sup>9)</sup>なども含むような形に拡張することが一つの現実的なアプローチと思われる。また、理研の RI ビームファクトリーでは不安定核に対する実験が期待され、宇宙核物理や核変換関連データにぜひ利用されることを期



第4図 70 MeV 陽子による Si からの 2 次重荷電粒子生成二重微分断面積<sup>9)</sup>。



待したい。

また、J-PARC は中間エネルギー中性子ビームの供給源としても期待され<sup>10)</sup>、核データや放射線工学への応用も大いに検討する価値があるものと考えられる。

平成14年頃から進められている核データに関する電源特会事業は、大学と原子力機構の共同研究の形で進められてきた。今後予想される研究規模の大型化によってこの傾向が強まり、大学と原子力機構等々の境界が薄まることは考えられるが、教育や人材育成、基礎的で innovative な研究という大学に期待される役割自体には変わりがないものと考えてよいであろう。

## 2. 計算・評価分野での展望

計算・評価の分野においても、マイナーアクチニド核種、不安定核種、中高エネルギー領域、核変換関連データ、放射線利用関連データ等、今後の重要課題の中で、大学に期待されるのはやはり新しい手法の開発とこれを通じた人材の育成であろうと考えられる。評価対象核種やエネルギー範囲の拡大には、新しいアプローチが必要であり、欧米で進められているような原子核物理グループとの協力が期待される。また、さらなる精度向上には、積分データを用いた断面積調整(積分データと矛盾しないよう核データを修正)も不可避のように思われ、その手法の整備と感度解析等の分野において、大学の貢献が期待されるのではないだろうか。

## IV. 大学を巡る現状と今後の課題

以上、大学における核データ活動への期待を述べた。

このように、今後の核データ活動において大学が果たすべき役割には多くのものが挙げられるが、一方、大学においては世代交代に伴う人材の減少、国立大学法人化に伴う成果主義の強化等、核データ分野にとって厳しい事態も進行している。成果主義それ自体は否定されるべきものではないが、現実には目先の成果が強調される傾向が見られ、核データのような長期的なスパンで評価させるべき分野にとっては問題となる。これに対しては基本的インフラとしての重要性を強調しつつ、具体的な応

用への取組みを強め、その重要性を PR する努力も必要であろうと思う。そのためには、医療、宇宙、原子力材料、遮蔽・放射線影響など放射線利用や放射線工学分野との協調を強め、具体的な成果を上げ、それを PR することが重要と思われる。

ここで述べた大学の役割は核データに限らず、広く原子力分野あるいは科学・工学全般についていえることのようにも思われるが、基礎的、基盤的観点からの手法開発、新しい手法の開発と解析、データの提供とそれを通じた人材の育成とまとめられよう。

### —参考資料—

- 1) 吉田 正, 他, “講座「核データ」”, 日本原子力学会誌, 43 [5-7], (2001).
- 2) T. Nakagawa, O. Iwamoto, JAERI-Data/Code 2002-025, (2003).
- 3) S. Chiba, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **22**, 771-787 (1985),
- 4) M. Baba, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **27**[7], 601-616 (1990).
- 5) N. Ito, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, **A 337**, 474-485 (1994).
- 6) Y. Kanda, *et al.*, *Proc. Jot. Conf. Nuclear Data for Basic and Applied Science*, Santa Fe. 1985, p.1567 (1986).
- 7) T. Kawano, *et al.*, JAERI-Research 2000-004, (2000).
- 8) T. Kawano, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **37**, 327 (2000)
- 9) M. Hagiwara, *et al.*, Radiation protection dosimetry, doi: 10.1093/rpd/ncm 022
- 10) 鬼柳善明, 他, “大強度陽子加速器施設(J-PARC)で期待される原子力科学”, 日本原子力学会誌, 46[3], 173-197 (2004).

### 著者紹介

馬場 護(ばば・まもる)



東北大学名誉教授  
東北大工学研究科, 同サイクロトロン・RI  
センターにて, 加速器を用いた核データ・  
放射線工学の研究に従事

## 講演

# 社会と原子力の相互信頼を求めて どうする 低迷状態から脱却するために！

竹内 哲夫

供給安定性と地球温暖化対策に優れたエネルギーの必要性から、各国で原子力に回帰しつつある。わが国でも「原子力立国計画」が策定され、様々な政策が進められている。その一方、社会の不信、不安感が原子力の健全な発展の阻害要因となっている。関係機関は縦割組織の制約を乗り越えて、大所高所から判断すべき時がきた。国民も真に大切なことを見極めなければならない。メディアにも改めて「木鐸」の役割を期待したい。他国の良い点も学び、原子力が再びエネルギー・環境問題に貢献できるようになることを期待する。

本稿は2008年3月4日、「原子力コミュニケーションのあり方を問う・社会と原子力界の相互信頼を求めて」と題して行った、シニアネットワーク連絡会第7回シンポジウムにおける講演と討論の結果をまとめたものである。



## I. 原子力を巡る世界の情勢・ 世界の原子力政策は！

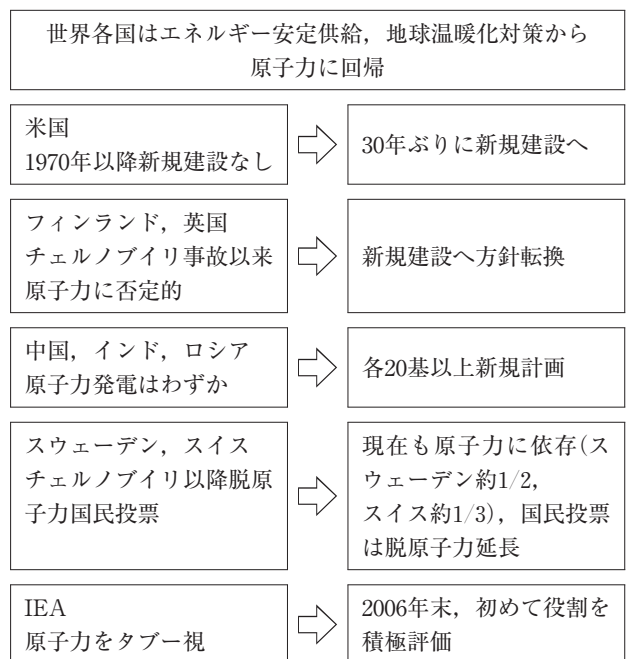
世界は厳しい「資源獲得競争」の時代に入った。中国には世界の石油が吸い寄せられている。原油価格はこの4年で4倍以上、1バレル100ドルを超えるに至っている。このような原油価格の急激な高騰にもかかわらず、電気料金は、最近では若干の上昇傾向はあるものの安定しており、平成6年度の約19円/kWhから平成19年度には約16円/kWh(電灯・電力計)に下がった。この理由は、石油から原子力と天然ガスへの転換によるものである。

また、原子力は発電に伴うCO<sub>2</sub>の排出がない。燃料の製造や建設に伴う排出を含めても、CO<sub>2</sub>排出量は極めて低く、地球温暖化抑制にも貢献している。太陽光、風力発電などの自然エネルギーは、安定性や経済性の問題があり、化石燃料を代替できる範囲は限定的である。

このようなことから、世界各国はエネルギー供給の安定性と地球温暖化対策に優れた原子力に回帰しつつある。米国における30年ぶりの新規発電所建設計画推進、フィンランドや英国における原子力発電所建設への方針転換、中国、インド、ロシアにおける大規模な建設計画などである(第1図)。

*How to Establish Reliable Relationship between Japanese Societies and Nuclear Industry* : Tetsuo TAKEUCHI.

(2008年 6月21日 受理)



第1図 世界の原子力政策



## II. わが国の原子力政策は！

わが国では、「原子力政策大綱」が2005年10月に閣議決定され、2006年8月には「原子力立国計画」が策定された(第1表)。基幹エネルギー資源である原子力を、2030年以降も30~40%以上とすることとし、さらに核燃料サイクルの推進と高速増殖炉の実用化を目指し、様々な政策が進められている。これらのことから、原子力政策は大きく前進し、核燃サイクル施策も具体化しつつある。

その一方で、原子力に対する社会の不信、不安感の増大は、原子力の健全な発展の阻害要因となっており、そ

第1表 わが国の原子力政策

原子力政策大綱(2005年10月閣議決定)	
(1)	2030年以降も発電電力量の30~40%以上
(2)	核燃料サイクルを推進
(3)	高速増殖炉の実用化を目指す
原子力立国計画(2006年8月策定)	
(1)	電力自由化時代の原発の新・増設実現
(2)	安全確保を大前提とした既設炉の活用
(3)	資源確保戦略の展開
(4)	核燃料サイクルの指針と関連産業の戦略的強化
(5)	高速増殖炉サイクルの早期実用化
(6)	次世代を支える技術・人材の厚みの確保
(7)	わが国の原子力産業の国際展開支援
(8)	原子力発電拡大と核不拡散の両立にむけた国際的な枠組みへの積極的関与
(9)	国と地域の信頼強化、きめの細かい公聴・広報
(10)	放射性廃棄物対策の強化

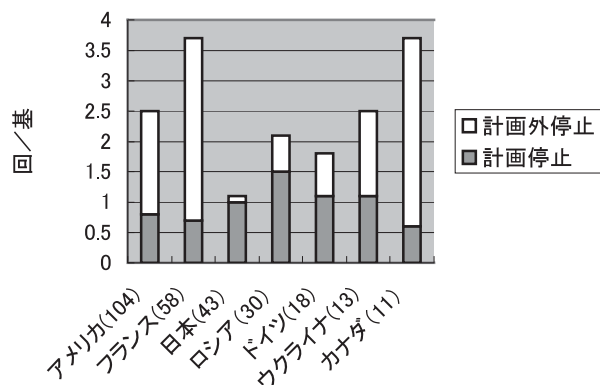
の要因を厳しく見極めて、的確に対応していくことが求められている。

1. 低迷する設備利用率・失われた10年と発電所現場のなやみ

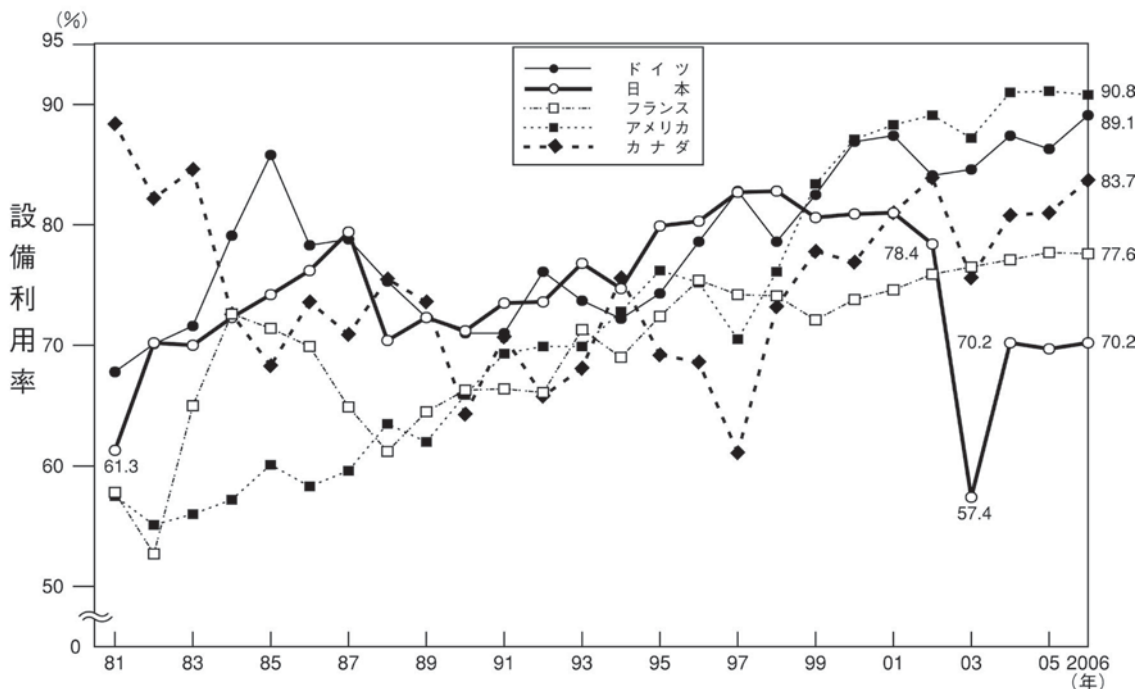
既設原子力発電所は電力会社の虚偽報告以降、健全な運営が行われていない状況が続いている。これらの結果、原子力の現場が「いじめ教室」を体験、活力が失われて失速し、「失われた10年」となった。さらに中越沖地震に追い討ちをかけられ、いまや低迷する稼働率の回復には緊急の措置が必要となっている。

発電所の現場では規制制度の面での課題も多い。わが国の原子力プラントの信頼性・安全性は停止率の低さに見るように、世界トップクラス(第2図)にある。それにもかかわらず、国民にはトラブル報道のみが伝えられている。この結果、現在設備利用率は70%以下に落ち込み低迷しているが(第3図)、諸外国の事例から勘案すると90%は十分出せる実力がある。設備利用率を1%上げるとわが国のCO<sub>2</sub>排出量を0.3%削減するので、設備利用率向上の効果は実に大きい。これを活用せずに、海外から排出権を購入し、100ドルを越す驚異的な高値の燃料を火力で焼き増しすることは、国家的な損失であり、国際的地位の失墜にもなる。

今の原子力発電所の現場は元気がない。服務規程のようなものまで審査の対象にして、そこに品質保証という概念を入れよとの指導もある。認証業務が膨大となり、



(出典 資源エネルギー庁ホームページを再編集)  
第2図 主要国の原子力発電所停止率



出典：原子力施設運転管理年報 他

第3図 主要国の原子力発電所設備利用率

技術者がデスクワークに埋もれている。言葉は似ているが、かつて日本の発展を支えてきた総合的品質管理「TQC」では、トップと現場が一体になって課題に挑戦し、改善効果を発揮してきた。現場に元気を取り戻すのが喫緊の課題で、これには、書類審査や監査に対応する姿でなく、現場で汗にまみれて改善する姿が見られることこそが望まれる。

## 2. 中越沖地震の反省

中越沖地震直後の産・官トップの初期行動には反省すべき点が多い。

フランスのルモンド紙は、原子炉が安全停止したこと、火災は初期に鎮火したこと、および漏洩放射性物質の影響がないことを報道した。これに対し、わが国のマスコミは連日、火災の報道をする一方、安全に停止したことはほとんど報道せず、いたずらに不安を煽る映像や記事の連続であった。極めて残念なことである。

## 3. 今なお続く「5すくみ」状態

永年抱えてきた問題点に対し、関係組織や報道、国民の「5すくみ」状態が依然として続いている。

国は国民の安全の責任を負っているが、緊急時の決断や情報発信に対する体制もなく、勇気も欠けている。地方自治体は自らのデータで住民の安全を確保する判断をせず、いつも被害者意識が先行する。事業者からは、国や自治体への配慮が先行、原子炉の安全や住民安全の観点からの、自主的かつタイムリーでわかり易い情報発信がない。報道は商業主義で不安煽動が先行し、社会的責任感が希薄である。国民も国益より自分本位で、最後には自らに降りかかる問題にもかかわらず鈍感であり、「ソナノ関係ナイ」の風潮である。

## 4. 海外から学ぶ—米国とフランスの好事例

これらを打破するためには、海外、特に米国とフランスから学ぶべきことが多い。

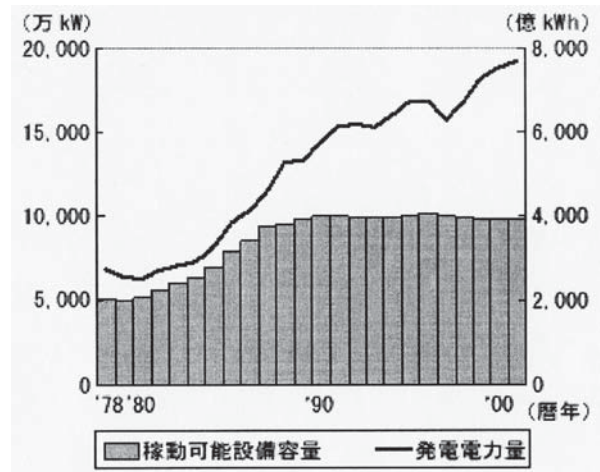
高稼働率、高支持率の米国からは、電力マンの現場技術力アップ、事業者と規制側の率直な対話、国の検査官のレベル向上などを、国をあげて学ぶ必要がある(第4、5図)。

事故が少なく、メディアとの関係の良好なフランスからは、緊急時における産と官の役割分担の明確さ、情報の透明性、迅速性とわかり易さ、メディア対応者の訓練と養成を通じた産と官に対するメディアからの高い信頼など、学ぶべきところが多い(第2表)。

## 5. どうすればよくなる・関係者への期待

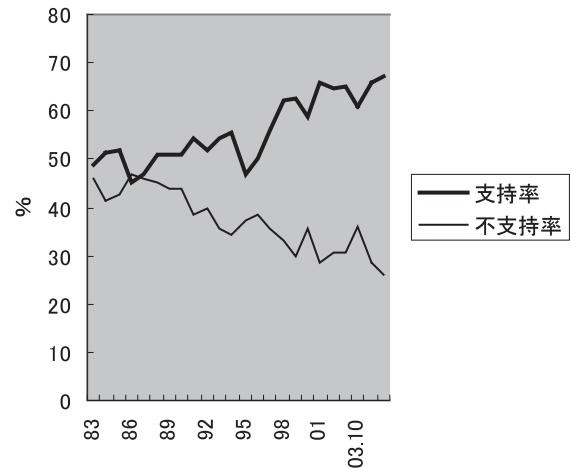
「5すくみ」状態の解消が焦眉の急である。このためには、それぞれの関係者に次の事項を望みたい。

国に対して望む改善事項は、「原子力立国計画」推進軸



(出典 DOE)

第4図 米国原子力発電所の発電量



(出典 NEI)

第5図 米国の原子力発電支持率の推移

第2表 フランスに学ぶ  
メディアとの信頼関係の構築と緊急時対応

### メディアとの信頼関係の構築

- ・各機関でプレス会議、プレス見学会、研究者とのインタビュー等の実施
- ・コミュニケーションは国、地方の双方で
- ・国民に浸透を図るには、地方議員、学校、諸団体、地方情報局等を通じ多角的に実施
- ・真実がわかりやすい正確な情報を、継続的に発信していくことが重要

### 緊急時対応(電力会社の例)

- ・透明性、迅速、真実、正確が求められる。不正確でも迅速性を優先、後で修正
- ・情報は単純でわかりやすいことが肝要
- ・権威者による解説も利用
- ・緊急時管理体制の構築が重要

国レベル、各発電所レベルの体制を構築

緊急時対応チームの役割分担が明確

全体マネジメント、問合せ受付、メディアの受入れ、技術者との連絡、スポークスマン等

の明確化、一般災害時を含めたオフサイトセンターの有効利用、国益を意識した情報の国内外への発信、緊急時の報道官の必要性などである。

自治体に対しては、国や事業者との役割分担を明確にし、責任の所在をハッキリさせることを望む。また地域放射線モニターをネットで積極広報し、風評被害を減らす努力をすべきである。

事業者に対しては、自主責任に基づく自主保安の徹底と信頼の醸成、緊急時の広報スポークスマンの設置、事故の時に適切な相場観を伝えることによるメディアとの信頼関係の構築に対し、一層の改善を望む。六ヶ所「再処理施設」における日本原燃と、再開「もんじゅ」における日本原子力研究開発機構の、試運転に対処した「トラブル事例集」は、その好事例といえよう。

報道機関は、テレビにおける賛否両論の公平な扱い、温暖化と資源問題解決への正しい国民的理解を促す報道、事故時の扇動的記事や見出しを慎むなどについて改善していただきたい。また、135万kWの化石燃料発電所を原子力発電に置き換えることにより、CO<sub>2</sub>の排出量を1%削減できることなども含め、ぜひとも具体的でわかりやすい報道をしてもらいたい。

これからは国民参加の政策決定の時代である。国民も自己啓発が必要で、資源、食糧および人口問題など、すべてが近未来に自分と子孫に降りかかる。これらに対する特效薬は省エネと原子力である。

## 6. 「原子力110番システム」の構築を

社会と原子力界の接点である報道に関しては、これまでも様々な問題を指摘してきたが、中越沖地震の反省にもあるように、緊急時に国民に的確な情報を提供する役割は極めて高い。とりわけ、メディアの速報取材班には原子力の素人が多い。これらの方々にタイムリーに的確な情報を提供することが、極めて重要である。この目的で「原子力110番システム」を国(原子力安全委員会)に設けることを提案する<sup>a)</sup>。反対派にはこのようなことができていないのに、国民の安全を守りながら推進する立場にあるものが、それをできないのはおかしい。

<sup>a)</sup>原子力委員会の決定を受けて、原子力学会は今年の秋を目標に「原子力安全情報システム(仮称)」を立ち上げるべく検討中。



## Ⅲ. ま と め

エネルギー資源と環境問題から、原子力をエネルギーの選択肢から外すことはできない。関係機関はそれぞれの立場からの主張から脱却し、縦割りを超えて大所高所から判断すべき時がきた。国民も心配の大合唱から脱却し、些事にこだわらず、真に大切なことを見極めなければならない。「木鐸」という語は死語になっているかもしれないが、メディアには改めて「木鐸」の役割を期待したい。

わが国は原子力の運営では今や劣等国になってしまったが、かつてやってきたように他国の良い点を学び、再び世界のエネルギー・環境問題に貢献できるようになることを期待している。

シニアも協力を惜しまない。

### 補足 座長のまとめより

原子力が再び世界的に1つの、しかし不可欠の選択肢と見られてきている。原子力界から見れば「原子力カルネサンス」の到来である。

しかしながら、原子力を取り巻くこれからの半世紀の社会環境は、消費者論理の時代、市民と生活者が社会の進展に重きをなす時代となった。「隠されることへの不安」が一層高まり、市民の「コミュニケーションする権利」が尊重されなければならない社会である。これからは、「原子力界が社会を理解する」時代である。そこではコミュニケーション・ダイアログが、人と人を通じた信頼と安心へのスタート台となる。

このシンポジウムでは、原子力の専門家・関係者がどのように変わればよいか、また、市民・生活者が自分のこととして考え、判断する時代における専門家との「コミュニケーション」について、貴重な示唆を得ることができた。

(座長：日本原子力産業協会顧問・宅間正夫氏、  
本項シンポジウム事務局補足)

### 著者紹介

竹内哲夫(たけうち・てつお)



シニアネットワーク連絡会会長、元原子力委員  
(専門/関心分野)エネルギー・環境・原子力の推進に対する社会の理解促進と若手技術者の育成



# 高速増殖炉に適用可能な水素製造技術の開発

## ハイブリッド熱化学法の開発

日本原子力研究開発機構 中桐 俊男

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構と略記する)では、高速増殖炉の多目的利用研究の一環として、高速増殖炉で発生する熱と電気を利用し、水を水素発生原料として使用するハイブリッド熱化学法と呼ばれる水素製造技術を提案し、研究開発を進めてきた。

原子力機構では、ハイブリッド熱化学法による水素発生が可能であること、および、システムの制御性・装置耐久性を確認するために、実験室規模で水素製造実験を実施するとともに、大型化・高効率化を目指した研究開発を進めている。本報では、研究開発の現状および今後の計画について報告する。

### I. 緒 言

近い将来、水素は電気とともに中心的な2次エネルギーとしての利用が期待されており、利用に向けた基盤施設整備とともに長期間安定供給が可能な技術開発が求められている。また、地球環境適合性およびわが国の乏しい化石・鉱物資源を考慮した場合、水のみを原料とした水素製造方法と1次エネルギー供給技術として原子力の組合せは重要なオプションの一つとなる。

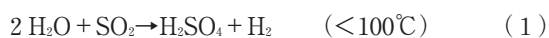
なかでも、天然ウランの有効利用、プルトニウム(Pu)サイクルにより長期に安定な準国産エネルギー供給が可能な高速増殖炉(FBR)は、これら「長期間安定なエネルギーの供給」、「地球環境適合性」、「エネルギー自給率の向上」の3つの要件を満たす有望技術である。

原子力機構では、従来約800℃以上の高温が必要とされた硫酸の分解・合成反応を組み合わせた熱化学法をFBRで取り出し可能な約500℃まで低温化する方法を提案し、この方法をハイブリッド熱化学法と名付けて実用化に向けた研究開発を実施している。

### II. ハイブリッド熱化学法の概要

#### 1. ハイブリッド熱化学法の原理<sup>1)</sup>

ハイブリッド熱化学法は、米国のWestinghouse社により開発された硫酸の生成、分解反応を組み合わせたプロセス<sup>2)</sup>をベースとしており、(1)~(3)式に示されるように、硫酸の生成反応で水素が、硫酸分解反応で酸素が発生する。(1)式および(3)式の反応は電気分解反応であり、(2)式は熱分解反応である。



(1)式の理論電解電圧の値は文献によって異なるが、0.17~0.28 Vとされ、実際のセル印加電圧は電流密度によって異なるが、おおよそ0.5 V以上となっている。

ハイブリッド熱化学法では、最も高温を必要とする(3)式のSO<sub>3</sub>分解反応をFBRの冷却材温度の550℃以下でも可能とするため、酸素イオン伝導性の固体電解質を使用した電気分解を適用している。(3)式の電気分解に必要な理論電解電圧は、(4)式により計算され、500℃で0.13 Vとなる。

$$E_G = \Delta_r G / (nF) \quad (4)$$

(4)式中で、 $E_G$ は電解電圧、 $\Delta_r G$ は(3)式の反応のギブス自由エネルギー変化、 $n$ は反応に関与する電子数((3)式では2個)、 $F$ はファラデー定数である。

また、(1)式と(3)式の理論電解電圧の合計は約0.3 Vとなり、約500℃で水蒸気を直接電気分解する場合の約1 Vに比べ非常に低い電解電圧で水の分解が可能となる。これまで、固体酸化物燃料電池(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell)で使用される酸素イオン伝導性固体電解質である8 mol%イットリア安定化ジルコニア(8 mol%YSZ: Yttria Stabilized Zirconia)を用いたSO<sub>3</sub>電解実験を実施し、低い印加電圧で電流値にほぼ対応する酸素発生を確認している<sup>3)</sup>。

#### 2. ハイブリッド熱化学法の特徴

##### (1) 高い熱利用効率<sup>1)</sup>

FBRプラントで発生する熱エネルギーを電気エネルギーに変換する効率(発電効率)は約40%であり、水を直接電気分解する際の熱利用効率は発電効率を上回ることではない。しかし、ハイブリッド熱化学法プロセスでは、電気エネルギー消費量( $\Delta_r G$ )を水の直接電気分解の1/2以下に減らし、残りを熱( $T\Delta_r S$ )で供給することで、発電時の熱利用効率低下の影響を小さくし、総合的な熱利

Development of a New Thermochemical and Electrolytic Hybrid Hydrogen Production Process for FBR: Toshio NAKAGIRI.

(2008年 3月31日 受理)

用効率を発電効率以上とすることが期待できる。理論的な計算では、水素製造量 1 mol に対し 500℃ の熱エネルギーが 242.1 kJ/mol 供給されれば、必要な電気エネルギー量は 113.3 kJ/mol とすることが可能で、発電効率 40% の FBR プラントの熱利用効率 ( $\eta$ ) は、(5) 式のように 54% と計算される。この計算では 113.3 kJ/mol の電気エネルギーを発生するために、 $113.3 \text{ kJ/mol} / 0.4 = 283.3 \text{ kJ/mol}$  の熱エネルギーが必要と考えている。

$$\begin{aligned} \eta &= \text{水素の燃焼熱(高発熱量: } H_{\text{HHV}} = 285.8 \text{ kJ/mol)} \\ &\quad / \text{FBR からの総熱エネルギー供給量} \\ &= H_{\text{HHV}} / (\text{電気エネルギー供給量} / \text{発電効率} + \text{熱エネルギー供給量}) \\ &= 285.5 \text{ kJ/mol} / (113.3 \text{ kJ/mol} / 0.4 + 242.1 \text{ kJ/mol}) \\ &= 0.544 (54.4\%) \end{aligned} \quad (5)$$

ハイブリッド熱化学法でこのような高効率水素製造を実現するためには、(2) 式の熱分解反応で投入する熱エネルギー、(1) 式および (3) 式の電気分解反応で投入する電気エネルギーをできるだけ少なくすることが必要である。投入熱エネルギーを減らすためには、必要以上の硫酸を循環させず、硫酸濃度をできるだけ高くすることが必要である。また、電気エネルギーの損失を減らすためには、(1) 式および (3) 式の電気分解における電圧損失・電流損失を極力小さくすることが必要である。

(2) プロセス構成上のメリット

ハイブリッド熱化学法と同様な硫酸の合成・分解反応を組み合わせた水素製造プロセスとして、硫酸に加えヨウ素を使用する IS プロセス、臭素を使用する sulfur-bromine プロセスなどがある。これらのプロセスでは、生成する HI, HBr の分離、分解等の操作が必要となり、プロセス構成が複雑となるが、ハイブリッド熱化学法では硫酸のみを使用することから、より簡素なプロセス構成が可能である。また、ハイブリッド熱化学法では、IS プロセス、sulfur-bromine プロセスで発生する HI, HBr のような腐食性の高い物質を使用しないことに加え、プロセス全体が低温化されることから、プラント構成材料の腐食の低減が期待できる。

(3) 高い安全性

FBR プラント等、原子力施設に適用する場合には、安全およびコスト上の観点から、原子炉プラントと水素製造プラントの隔離に対する要請が高い。

ハイブリッド熱化学法では、(1) 式の水素生成反応は 100℃ 以下の低温で行われるため、原子力プラント内で行う必要はなく、原子力プラントとの系統分離も可能である。また、生成した水素と酸素が共存しないため、水素爆発の危険性は、潜在的に低く、水素が高温で生成しないことから自然発火の危険性も排除できる。

III. ハイブリッド熱化学法の開発現状

これまでハイブリッド熱化学法により、水を分解して

水素・酸素を生成することが可能であることを実証するための実験に成功するとともに<sup>3)</sup>、さらに大型の 1 NI/h 規模実験装置を製作して、大型化に伴う課題抽出や水素製造効率評価に取り組んでいる<sup>4)</sup>。

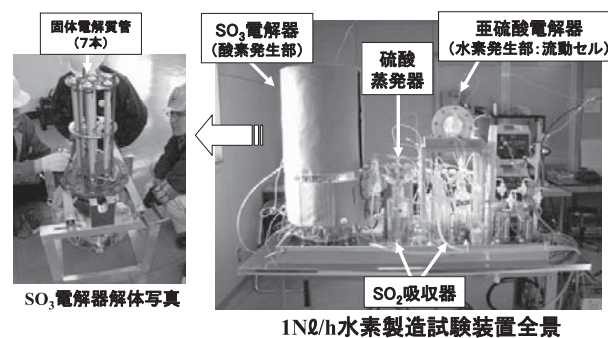
第 1 図に 1 NI/h 規模実験装置の図を、第 1 表に実験条件を示す。実験装置を構成する主要機器は、亜硫酸電解器、硫酸加熱器、SO<sub>3</sub>電解器、SO<sub>2</sub>吸収器である。高温で使用される SO<sub>3</sub>電解部には前述の 8 molYSZ を使用しており、亜硫酸電解器では固体高分子型燃料電池 (PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell) で使用されるプロトン伝導性陽イオン交換膜のナフィオン (Nafion 117) を使用している。

実験において測定された電流値の経時変化の一例を第 2 図に示す。約 5 時間の実験中はほぼ安定して水素および酸素が発生しているが、亜硫酸電解器の陰極液中(水素発生側)で第 3 図に示すような固体硫黄の析出が起こった。この固体硫黄は、第 4 図に示すように、亜硫酸電解器の陽極側に供給された亜硫酸が陽イオン交換膜を通して陰極液中に移行し、陰極側での下記の反応により析出したものと考えられる。



この固体硫黄の析出のため、現状装置では数時間以上連続して運転することが困難となっており、亜硫酸の陽極液から陰極液中へのクロスオーバー量を低減可能な電解器の開発が長時間運転のために必須である。

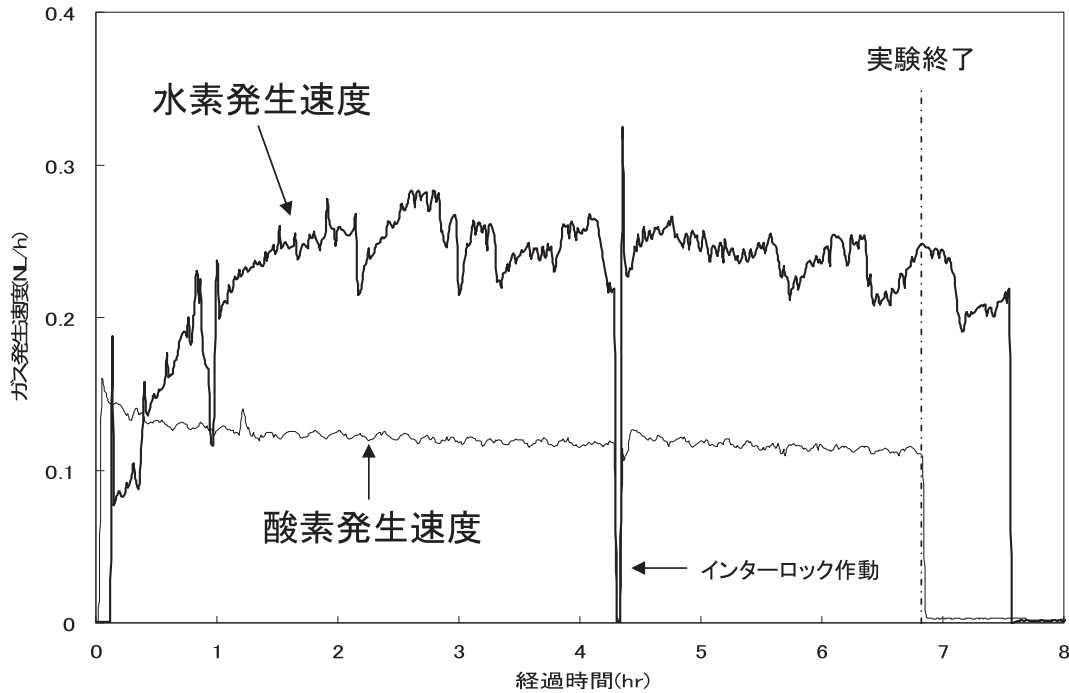
また、第 1 表の実験条件からわかるように、現在の装置では、SO<sub>3</sub>電解器および亜硫酸電解器では電圧損失が大きく、それぞれ理論電解電圧の数倍の電圧で運転している。高効率水素製造を実現するためには、これらの電圧損失を低減し、より低電圧かつ高電流密度が得られる電解器の開発が必要である。



第 1 図 1 NI/h 試験装置全体写真

第 1 表 水素製造実験条件

機器等	運転条件
硫酸循環量	1 ml/min
硫酸加熱器	650℃
SO <sub>3</sub> 電解器	550℃, 0.85 V
SO <sub>2</sub> 吸収器	8℃
亜硫酸電解器	常温, 0.95~1.0 V

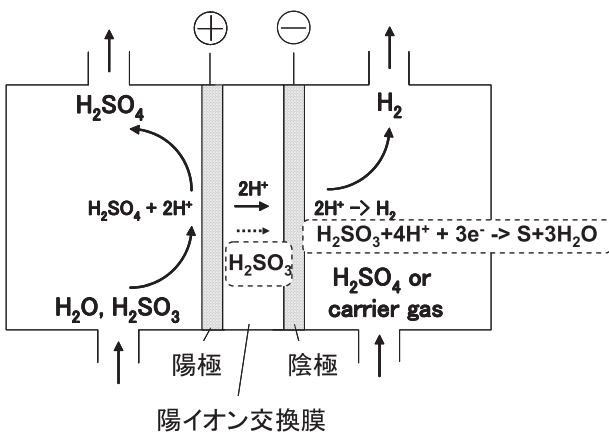


第2図 水素製造実験時のガス発生履歴



陰極液(硫酸)

第3図 亜硫酸電解器陰極液中に析出した固体硫黄



第4図 亜硫酸クロスオーバーメカニズム

さらに、現在はプロセス内を循環する硫酸量が1 ml/min と非常にわずかではあるが、この量は1 Nl/hの水素を発生させるのに必要な量の数十倍であり、ハイブリッド熱化学法が本来もっている高い水素製造効率の実証が困難となっている。高効率の実証のためには、硫酸

循環量は現状のままで、水素製造量が現状の数十倍規模 (~100 Nl/h)の水素製造試験装置を製作し、水素製造効率に関するデータを取得することが必要であると考えている。

#### IV. FBR プラントへの適用検討<sup>5)</sup>

ハイブリッド熱化学法を小型 FBR へ適用した原子力水素プラントの概念設計例を実施した。評価対象とした FBR プラントの諸元を第2表に、検討した水素製造プラントの系統概念図を第5図に示す。

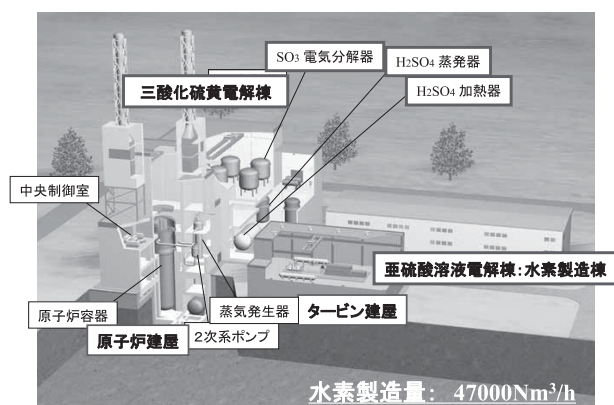
2次ナトリウム冷却系の500℃以上の高温領域(熱出力の45%)に熱エネルギーが必要な硫酸蒸発部およびSO<sub>3</sub>電解部を配置し、ハイブリッド熱化学法で必要となるSO<sub>3</sub>電解部および亜硫酸溶液(H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>)電解部の2箇所の電気分解器へは、500℃以下の領域(熱出力の55%)に配した蒸気タービンを用いて発電する電力を供給する構成とした。なお、この検討では、上記プラント諸元の電気出力は電気分解および所内負荷としてすべてプラント内で消費することとしている。

基本的なプロセスは硫酸を利用した閉プロセスであり、硫酸蒸発器で蒸発したSO<sub>3</sub>を電気分解して二酸化硫

第2表 FBR プラント諸元

項目	条件
熱出力	395 MWt
原子炉型式	ナトリウム冷却高速炉
1次系温度	550/395℃
2次系温度	540/350℃
電気出力	82 MWe





第5図 水素製造プラント概念

黄( $\text{SO}_2$ )を生成し、さらに $\text{SO}_2$ を原料である水に溶解させた後、亜硫酸溶液を電気分解して $\text{H}_2\text{SO}_4$ に戻す過程で水素を製造する。硫酸濃度95 wt%とし、両電解部の効率を $\text{SO}_2$ 電気分解効率85%、亜硫酸電気分解効率90%とした場合、対象としたFBRプラントの水素製造量は約47,000  $\text{Nm}^3/\text{h}$ 、水素製造効率は高発熱量基準で42%と評価された。この値は現状の常温水電気分解の場合の38% (発電効率42%×電気分解効率90%)と比較して高い効率である。また、設計検討を通し、他の熱化学法で問題となる高温部の構造物材料腐食が、比較的低温のプロセスであるため軽減できる可能性が示されている。

## V. 今後の研究開発計画

高速炉とハイブリッド熱化学法システムの組合せによる水素製造を実用化するため、これまでに明らかとなった技術課題を解決するための研究開発を、国内大学、研究機関、ベンチャー企業等と協力して実施している。

### 1. 亜硫酸電解器開発

前述のように、現状では亜硫酸のクロスオーバーにより固体硫黄が発生して、長時間連続運転を困難としている。現在、原子力機構の量子ビーム応用部門で開発された高電流密度と低亜硫酸クロスオーバー量を両立可能な架橋イオン交換膜について性能確認実験を進めており、Nafion 117に比べ数分の1以下にクロスオーバー量を低減可能であることが実験的に確認されている<sup>6)</sup>。また、電解電圧を低減可能な電極触媒材料についても調査を横浜国立大学大学院工学研究院と共同で進めており、金触媒では従来の白金触媒よりも電圧を低減可能であることも確認されている<sup>7)</sup>。さらに、二酸化硫黄( $\text{SO}_2$ )ガスを水に溶解させず直接亜硫酸電解器内に供給する方法を用いることで、クロスオーバー量の低減と電流密度の向上が両立可能な電解セルの開発も進めている。

### 2. $\text{SO}_2$ 電解器開発

$\text{SO}_2$ ガス電気分解器における電気分解は $\text{SO}_2$ 溶液電気

分解器と比較して消費電力が少なく、ロスした熱を回収することが容易であるため水素製造効率への影響は少ないが<sup>5)</sup>、高効率の水素製造を達成するためには約550°Cにおいて実用的な効率で運転可能なセルの開発が必要である。現状では目標の1/100程度の約10  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 電流密度が得られているのみであるが、最も性能に影響を与えるのは電極表面反応であることがわかっており<sup>8)</sup>、より高い電流密度が得られる電極・電解質構造、高性能電解質の検討を(独)産業技術総合研究所エネルギー技術部門、福井大学工学部と協力して進めるとともに、第一原理計算を利用した $\text{SO}_2$ 電解メカニズムの調査にも取り組んでいる<sup>9)</sup>。また一方で、現状で安定した性能を得られているYSZセルを小型化し、高密度に配置したコンパクトな電解セルの検討も進めている。

### 3. 効率実証用試験装置開発

既述のように、現状の1  $\text{Ni}/\text{h}$ 規模の試験装置では、プロセス内を循環させる硫酸流量が約1  $\text{ml}/\text{min}$ と少ないにもかかわらず、1  $\text{Ni}/\text{h}$ 相当の水素製造に必要な硫酸量の数十倍となっており、ハイブリッド熱化学法が本来持つと考えられる高い水素製造効率の実証が困難である。硫酸循環量は現状のままで水素製造量が現状の数十倍以上規模(～100  $\text{Ni}/\text{h}$ )の水素製造装置を開発し、水素製造効率に関するデータを取得することが必要である。また、試験装置はさらなる大型化を想定して金属製機器・配管で構成することが必要であると考えられ、これまで候補材料の腐食試験を実施してきている<sup>10)</sup>。今後は、これまでの研究成果を基に必要な機器開発を開始する予定である。

これらの研究開発活動に加え、第4世代原子炉開発プロジェクト(GIF: Generation IV International Forum)の超高温ガス炉開発/水素製造プロジェクトに参加するとともに、国際原子力機関(IAEA: International Atomic Energy Agency)、経済協力開発機構(OECD: Organization for Economic Co-operation and Development)等の原子力水素製造関連の国際会議等にも参加して、欧米等における研究開発動向の調査・情報交換を行っている。今後とも国外・国内における研究協力を進め、効率的な研究開発を進める所存である。

### —参考文献—

- 1) 中桐俊男, 他, “高速炉を用いた熱・電気併用による水素製造技術”, 日本原子力学会和文論文誌, **13**, [1], 88-94(2004).
- 2) W. Weirich, *et al.*, “Thermochemical processes for water splitting-Status and outlook”, *Nucl. Eng. Des.*, **78**, 285-291(1984).
- 3) T. Nakagiri, *et al.*, “Development of a New Thermochemical and Electrolytic Hybrid Hydrogen

- Production System for Sodium Cooled FBR”, *JSME Int. J. Ser. B*, **49**(2), 302-308(2006).
- 4) T. Takai, *et al.*, “Development of a New Thermochemical and Electrolytic Hybrid Hydrogen Production Process Utilizing the Heat from Medium Temperature Heat Source—Development of the 1 NL/h Hydrogen Production Experimental Apparatus”, *Proc. Hydrogen and Fuel Cells 2007*, Vancouver, p.233-242(2007).
- 5) Y. Chikazawa, *et al.*, “A System Design of a Fast Breeder Reactor Hydrogen Production Plant using Thermochemical and Electrolytic Hybrid Process”, *Nucl. Technol.*, **155**, 340-349(2006).
- 6) 中桐俊男, 他, “二酸化硫黄ガスを利用した水電解水素製造装置の開発”, 日本原子力学会和文論文誌, **7**(1), 58-65(2008).
- 7) 植田浩史, 他, “硫酸中での亜硫酸電解反応における金及び白金電極触媒”, 第31回電解技術討論会—ソーダ工業技術討論会, 2007.
- 8) C. Suzuki, *et al.*, “The refinement of the rate determining process in sulfur trioxide electrolysis using the electrolysis cell”, *Int. J. Hydrogen Energy*, **32**, 1771-1781(2007).
- 9) C. Suzuki, *et al.*, “Clarification of the Mechanism of Sulfur Trioxide Electrolysis—Evaluation of SO<sub>3</sub> and O Atom Adsorbed on Pt Surface”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **45**(1), 1-9(2008).
- 10) 高橋 亨, 他, “ハイブリッド熱化学法水素製造プラント用構造材料の腐食試験”, 日本原子力学会和文論文誌, **5**(4), 347-357(2006).

### 著 者 紹 介

中桐俊男(なかぎり・としお)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)高速炉水素製造, 高速炉用構造材料など。



## 書 評

### 誰も知らなかった小さな町の原子力戦争

田嶋裕起(前東洋町長), 233 p(2008.3), WAC(ワック).  
(価格1,500円, 税別) ISBN 978-4-89831-119-6

高レベル放射性廃棄物地層処分の調査候補に名乗りを上げなかったら誰も知らなかった, 四国の南の小さな町が全国に一躍有名になった。

2006年3月, 10年以上もこの町の町長を務めた田嶋裕起氏が町の財政改革に悪戦苦闘していたところに交付金を町の行政に活用でき, かつわが国のエネルギー政策にも貢献できると勉強を始めた。そして2007年1月に文献調査応募, 町民の意思を問うために2007年4月に自らの意思で町長を辞任し, 4月22日の町長選に賭けた。そして田嶋氏は, 「反核」の嵐に包まれて「落選を覚悟していた」というとおりの惨敗であった。

この本は, その田嶋氏自身が, その1年余りの間の出来事の一部始終を語ったものである。

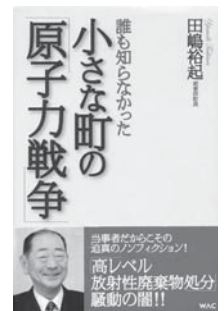
勉強を始めると, 「反核派」が乗り込んできて「誘致反対署名運動」など妨害運動を大々的にはじめ, マスコミもそれを

大きく報道し始め, 平穏だった町, 町民はその嵐の中に巻き込まれて, 「反核派」は町長の個人的なデマ, 誹謗, 中傷まで流し, 長年の連帯感, 信頼感もズタズタにされ, マスコミも事実の検証をせずに報道し, 橋本大二郎高知県知事の誘致反対をすることで有名になろうとする“パフォーマンス”にも足をすくわれてしまう。これらの当事者ならではの实话には驚くばかりである。

この東洋町の“小さな戦争”が契機となって, 国や事業者, そしてNUMO(原子力発電環境整備機構)がこの応募方式の改善に取り組み始めており, 田嶋前町長の敗戦は決して無駄ではなかったといえる。

高レベル放射性廃棄物地層処分立地がフィンランドに続きフランスでも実現しようとしているが, 世界3位の原子力発電国であるわが国は全くといってよいほど目処が立ってなく, 「反核派」の原子力反対の唯一最大の理由にまでされている。“小さな町”から我が国のエネルギー, 原子力の行く末を憂う原子力界必読の書である。

(三菱重工業・金氏 顕)



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5回 V. 壁はどのくらい熱くなるか？

(株)IU 真木 紘一，日本原子力研究開発機構 今野 力

## V. 壁はどのくらい熱くなるか？

前章では、核融合反応で発生した中性子が核融合装置を構成する材料と核的な相互作用しながら引き起こす挙動を概観してきた。

核融合反応で生成される中性子は、ダイバータや第一壁、ブランケット等を構成している材料と相互作用して、2次中性子や荷電粒子、ガンマ線を発生する。このような中性子との相互作用では、標的原子核は反跳を受ける。反跳を受けた原子核と生成された荷電粒子は、その運動エネルギーを最終的には熱エネルギーとして放出する。これを格子原子的なミクロな視野で見ると、反跳エネルギーが格子の拘束エネルギーより大きい場合には、反跳を受けた原子核は格子配列を乱し、材料の損傷を引き起こす。

そこで、この章では、もう少し核反応の現場まで近づいて、核的な相互作用がどのようなメカニズムで、熱エネルギーとなって放出され、また材料に放射線損傷を与えるかを眺めてみよう。

## 1. 熱エネルギーとは

中性子やガンマ線のエネルギーが熱エネルギーとして放出されるのであるから、まず熱エネルギーとは何かについて簡単に触れておこう。

熱や温度という言葉は日常的に用いられているが、皮膚の熱感だけでそれを理解しようとする、熱現象を深く理解できない。そこで、分子運動の原点に戻って概観してみよう。温度とは物質を構成する分子あるいは原子の一つ一つの平均的な運動エネルギーを表す概念で、熱エネルギーとは、その運動エネルギーの総和である。動いていない物体でも、分子レベルで見れば、四方八方に

動いたり、振動したりしており、その物質構成粒子の微視的な分子の熱運動の平均エネルギーを表す尺度が温度である。単に「熱」という概念は、温度差のある物体間の熱エネルギーの流れの現象を意味している。

この熱運動の程度により、固体、液体、気体という相が現れるのである。

- (1) 固体：個々の分子がそれぞれの安定した位置を中心に、狭い範囲で不規則な振動を行っている状態
- (2) 液体：分子の熱運動が固体より激しく、固体のように分子間の安定した位置はないが、その間隔はあまり変化しない程度の運動を行っている状態
- (3) 気体：分子の熱運動がさらに激しくなって、分子間の間隔が大きくなり、分子は自由に不規則で活発な運動を行っている状態

分子の熱運動の平均エネルギーを表す尺度が温度であるから、分子が動かなくなった状態が最低の温度で、これが絶対零度(−273.15℃)である。

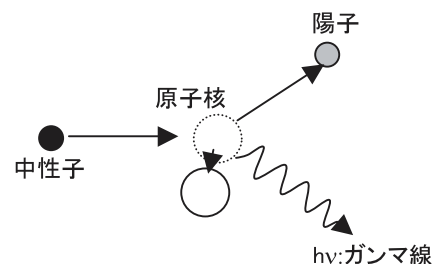
## 2. 核反応で発生したエネルギーの熱化

それでは、核反応で発生したエネルギーは、どのようにして熱エネルギーになるのかを考えてみよう。

第V-1図に示すように、中性子が物質に入射して、物質の格子を構成している原子の原子核と反応し、陽子とガンマ線を放出する場合を考えてみる。

陽子は運動エネルギーを持って放出され、原子核は反跳を受ける。この様子を物質の格子の中で眺めて見たのが第V-2図である。

反跳した原子核は格子の振動を引き起こし、その運動エネルギーを熱エネルギーに変える。また、陽子は格子を構成している原子と衝突し運動エネルギーを失ってい



第V-1図 中性子が原子核と反応し、陽子とガンマ線を放出する核反応の概念図

*The Fusion Reactor Wall is Getting Hot!—A Challenge towards the Future for Numerical Modelling (5): Chap.V How hot does the wall get? :Koichi MAKI, Chikara KONNO.*

(2008年 7月14日 受理)

各回タイトル

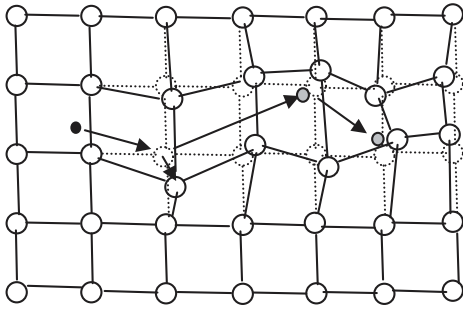
第1回 I. はじめに

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V-2図 核反応後、周囲の原子と衝突することにより格子に振動を引き起こし、熱として周囲に伝播する概念を示す図

く。衝突された格子の原子は格子間力で束縛されているので、他の格子原子を巻き添えにしながら格子振動，すなわち、陽子から受け取ったエネルギーを熱エネルギーとして周囲に拡散する。なお、発生したガンマ線は、物質との相互作用に伴う反応エネルギーとして中性子の核反応とは別に考慮する。

このように、核反応によって発生したエネルギーは、原子核の反跳や核反応で発生する粒子の運動エネルギーとして放出され、物質の中で格子振動という形で熱エネルギーに変換される。その結果、中性子の照射を受けた物質は、いわゆる‘熱い’という状態になる。それでは、どれくらい熱くなるのかを次の節で考察してみる。

### 3. 核反応で発生する熱エネルギーによる壁の温度

「壁がどれくらい熱くなるか？」に答えるためには、核反応で発生する熱エネルギーがどのくらいで、発生した熱が物質中のどの程度の領域まで広がるのかを見積もらなければならない。この節では、最初に、核反応で発生する熱エネルギーを算出する方法を紹介し、次に、代表的な国際熱核融合実験炉 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)<sup>1)</sup>クラスの第一壁で過渡的にどの程度の温度になるのか、定常運転時にはどのような制約条件から熱設計によって決められるのかを眺めてみよう。

#### (1) KERMA ファクタ

核反応で発生する熱エネルギーは、一般に「核発熱」と呼ばれているので、ここでも、以下、「核発熱」と記すことにする。核発熱には、大きく分けて、中性子入射による核発熱とガンマ線入射による核発熱がある。

中性子入射の単位時間当たり単位体積当たりの核発熱率は、中性子のエネルギーごとに、

$$\begin{aligned} & \text{[中性子による核発熱率 (J/cm}^3\cdot\text{s)]} \\ & = \text{[核反応を起こす標的原子核の原子数密度 (個/cm}^3\text{)]} \\ & \quad \times \text{[核反応で発生する熱エネルギー (eV)]} \\ & \quad \times \text{[エネルギー変換係数 (J/eV)]} \\ & \quad \times \text{[核反応の断面積 (cm}^2\text{)]} \end{aligned}$$

$$\times \text{[中性子フラックス (個/cm}^2\cdot\text{s)]} \quad (1)$$

を計算し、すべての核反応、すべての中性子エネルギー、すべての標的原子核について和をとることにより計算できる。ガンマ線入射の場合も中性子核反応の代わりに、電子対生成、エネルギー吸収、コンプトン散乱、光電効果の全過程の反応ごとのエネルギーの出入りを考慮することによって、中性子核反応の場合と同様に計算できる。

(1)式の核反応に関する部分、

$$\begin{aligned} & \text{[KERMA ファクタ (eV barn (1 barn = 10}^{-24}\text{cm}^2\text{))]} \\ & = \text{[核反応で発生する熱エネルギー (eV)]} \\ & \quad \times \text{[核反応の断面積 (cm}^2\text{)]} \end{aligned} \quad (2)$$

をある標的原子核で起こるすべての核反応について和をとったものをその標的原子核のKERMA (Kinetic Energy Release in Materials) ファクタと定義し、中性子入射の場合は中性子 KERMA ファクタ、ガンマ線入射の場合はガンマ線 KERMA ファクタと呼んでいる。KERMA ファクタの単位は(2)式からもわかるようにエネルギーと面積の積で、eV-barn (1 barn = 10<sup>-24</sup>cm<sup>2</sup>)で表される。第IV章で述べた放射線輸送計算コードを用いた数値シミュレーションで中性子フラックスが求まっていれば、中性子入射の核発熱率は、中性子フラックスに中性子 KERMA ファクタと標的原子核の原子数密度を乗じて、すべての中性子エネルギーについて和をとることにより簡単に計算できる。ガンマ線入射の場合もガンマ線 KERMA とガンマ線フラックスを用いれば、中性子入射の場合と同様である。

ここまでは KERMA ファクタがすでにわかっているように述べてきたが、KERMA ファクタを計算するのは簡単ではない。KERMA ファクタは(2)式で計算できるために、核反応のデータベースである核データライブラリーから算出するのが一般的であり、その方法として2通りの方法がある。一つは、エネルギーバランス法で、もう一つは直接法と呼ばれる方法である。以下、中性子 KERMA ファクタの場合についてそれぞれの方法について説明しよう。

エネルギーバランス法とは、入射中性子のエネルギーと核反応で発生したエネルギーの和から、核反応が起こった領域ではエネルギーを放出しない中性子とガンマ線のエネルギーの和を差し引いたものが発生する熱エネルギーである、つまり、

$$\begin{aligned} & \text{[発生する熱エネルギー]} \\ & = \text{[入射中性子のエネルギー + 核反応で発生したエネルギー]} \\ & \quad - \text{[放出中性子のエネルギー + 放出ガンマ線のエネルギー]} \end{aligned} \quad (3)$$

とし、すべての核反応の種類について和をとって中性子 KERMA ファクタを算出する方法である。ここで、核反応で発生したエネルギーというのは、一般に  $Q$  値と呼ばれる量で、核反応の前後での物質の質量の差をエネルギー単位で表したものである。例えば、核融合炉で利用する重陽子とトリチウムの核反応では、発生するエネルギー17.6 MeV がこの核反応の  $Q$  値である。

(3)式の核反応で発生したエネルギー、放出中性子のエネルギー、放出ガンマ線のエネルギーはすべて核データライブラリーに含まれているので、中性子 KERMA ファクタを算出することができる。ただし、この方法は、物理的には問題ないが、(3)式のように、大きな数値の差として与えられるため、核データライブラリーに含まれているデータの精度が問題となる。例えば、鉄などの中性子 KERMA ファクタを計算する場合には、 $Q$  値は  $\sim 10$  MeV と大きい、(3)式で発生する熱エネルギーはその数%以下となる。古い核データライブラリーでは核反応の前後でエネルギーが保存されていないことが多く、中性子 KERMA ファクタが中性子エネルギーによってその精度が大きく変動したり、負の値になってしまうことがしばしば起こり問題になっていた<sup>2)</sup>。

これに対して、直接法では、熱エネルギーとなる核反応での標的原子核の反跳エネルギーや陽子等の荷電粒子のエネルギーを運動量保存則とエネルギー保存則を用いて計算し、それらのエネルギーの総和に核データライブラリーの核反応断面積を乗じて中性子 KERMA ファクタを導出するため、中性子 KERMA ファクタが、中性子エネルギーによってその精度が大きく変動したり、負の数になることは原理的に起こらない。真木ら<sup>3)</sup>は、1990年代に核融合炉の核設計のために日本の核データライブラリー JENDL-3.1<sup>4)</sup>からこの手法で KERMA ファクタを計算し、公開している。ただし、直接法では核データライブラリーに含まれていない生成荷電粒子のエネルギースペクトルのデータが必要なため、他のコードを用いて荷電粒子のエネルギースペクトルを別途計算しなければならない。

最近の核データライブラリーでは、核反応の前後でエネルギーが保存されるように評価が行われるようになってきているため、世界中で広く使われている核データライブラリー処理コード NJOY<sup>5)</sup>では、KERMA ファクタを計算するのにエネルギーバランス法を採用している。このコードを用いて小迫ら<sup>6)</sup>が、日本の最新の核データライブラリー JENDL-3.3<sup>7)</sup>から KERMA ファクタを計算している。ただし、一部の原子核では核反応の前後でエネルギーが保存されていないものがあり、その場合は、NJOY のオプションとして組み込まれている直接法<sup>a)</sup>で計算された KERMA ファクタが入っている。中性子 KERMA ファクタの一例として、JENDL-3.3の<sup>56</sup>Fe データを NJOY のエネルギーバランス法で計算した<sup>56</sup>Fe の

中性子 KERMA ファクタを第V-3図に示す。

## (2) 壁の温度は?

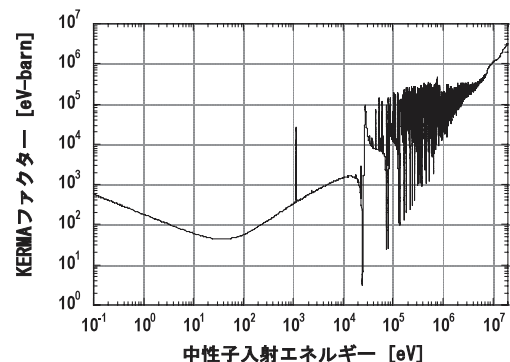
それでは、実際に壁はどの程度熱くなるのかを概算してみよう。最初に考察したように、温度とは物質を構成する分子あるいは原子の一つ一つの平均的な運動エネルギーを表す概念である。平均的な運動エネルギーといっても、どの程度の時間で考えるかによって、すなわち、エネルギーが発生した直後の過渡的な温度を考慮するのか、熱が十分行き渡ってからの状態を考慮するのかで温度がまるで異なる。ここでは、両者を考察してみる。

温度を算出するには問題とする領域に発生する熱エネルギーを求め、それを分子あるいは原子で平均化する必要がある。熱エネルギーはある領域に留まっておらず、振動として振動の激しいところから振動の少ないところへ伝播し移動していく。定常の発熱率であれば、伝播して逃げるエネルギーとバランスするところで、ある領域の定常的な温度を考慮することができる。平均化する際にはマクロな物理量として熱容量を用いる。

まず核反応で発生した荷電粒子が格子原子に衝突し、その平均自由行程程度の範囲、代表長が $\sim 10$  nm 程度の領域(代表長が格子原子的なミクロな視野の数千倍の領域)に熱エネルギーが与えられ、過渡的な短い時間の間は断熱近似が成り立つとして温度を求める。ここで、“短い時間”とは、熱エネルギーが拡散する速さから求まる10 nm の領域に広がる時間のことで、フォノンの伝播速度、すなわち音速程度、材料をステンレス鋼とすると、音速は $\sim 5,000$  m/s 程度なので、

$$10^{-8}/5,000 \sim 10^{-12} \text{s}$$

となる。一方、核反応の時間が $10^{-15}$  s 以下で、荷電粒子の衝突時間はさらに短い。したがって、“短い時間”が衝突時間に比べて十分長いので断熱近似が成り立つ。1回の反応で100 keV のエネルギーが発生するとして、ステンレス鋼の熱容量 $0.5 \text{ J/K}\cdot\text{g}$ を用いて、衝突の平均自由行程の領域の体積は、



第V-3図 <sup>56</sup>Fe の中性子 KERMA ファクタ

<sup>a)</sup>NJOY コードの直接法では、反跳原子核のエネルギー等を物理的に最大になる値を使って KERMA ファクタを計算しているため、正確にいうと、KERMA ファクタの上限値を算出している。

体積 =  $4/3 \cdot \pi (0.5 \times 10^{-6})^3 \text{ cm}^3 \approx 5 \times 10^{-19} \text{ cm}^3$   
 となり、密度 =  $8 \text{ g/cm}^3$  を適用すると、温度は、

$$T = \frac{100 \times 10^3 \times 1.6 \times 10^{-19}}{0.5 \times 8 \times 5 \times 10^{-19}} \approx 8,000 \text{ K}$$

となる。すなわち、代表長が格子原子的なマイクロな視野の数千倍の領域であるマクロな視野で見ると、ステンレス鋼は局所的にかつ短時間の間、溶融していることを意味している。その後、フォノンの速度で振動が伝わり、すなわち熱エネルギーが広がり、中性子束に応じた発熱密度として材料が加熱される。このときの温度は、その物体の発熱密度と質量による総発熱率と冷却による除熱率によって決まる。

実際の設計では、材料によって使用温度の上限があり、それを超えないように熱設計をする。代表的な核融合実験炉である ITER<sup>1)</sup> では、第一壁中性子負荷  $1 \text{ MW/m}^2$  で運転するとして、このときの第一壁近傍の核発熱率は  $10 \text{ W/cm}^3$  である。ITER での第一壁や遮蔽ブランケット、増殖ブランケット領域の温度は、構造材の使用温度条件や生成したトリチウムの回収可能な温度となるように熱設計によって決定されるものである。第一壁にアーマ材<sup>b)</sup>としてベリリウムを用いている ITER では、第一壁の表面最高温度を  $700^\circ\text{C}$  としている(もっとも第一壁の表面は、核発熱だけではなく、プラズマからの直接の熱負荷によって決まる)<sup>1)</sup>。また、トリチウム増殖をしない遮蔽ブランケットでは、熱源は核発熱のみで、冷却材の温度を入口で  $100^\circ\text{C}$ 、出口で  $148^\circ\text{C}$  とし、遮蔽ブランケットの最高温度が  $340^\circ\text{C}$  程度になるように設計している<sup>1)</sup>。第 X 章「壁の熱をどうするか?」の章で別途詳しく解説されているので、その章を参照されたし。

#### 4. 核反応による原子の弾き出し

V-2 節で述べたように、格子原子的なマイクロな視野で見ると、中性子入射の核反応によって標的原子核は反跳を受ける。V-3 節では、これを反跳による格子振動である熱エネルギーとしてとらえた。これを熱化する以前の極短時間現象として眺めると、材料の照射損傷という現象が見えてくる。

反跳エネルギーが弾き出しエネルギーより大きい場合には、原子は格子から弾き出される。最初に弾き出された原子を第 1 次ノックオン原子 (PKA: Primary Knock-on Atom) と呼び、第 1 次ノックオン原子のエネルギーが弾き出しエネルギーよりも十分大きいと、2 次、3 次等の弾き出しが連鎖的に引き起こされる。この現象をカスケード損傷と呼んでいる。ほとんどのカスケード損傷は極短時間で消滅するが、一部は空孔の集合体等の格子欠陥が残る。これらの集合した空孔はボイドを形成し

<sup>b)</sup> アーマとは鎧のことで、核融合炉では第一壁をプラズマからの荷電粒子の照射から防護するための保護板を表す用語である。

エリングを引き起こし、ヘリウム生成とともに材料を劣化させる。さらに周囲がイオン化されることによっても材料が劣化する。このような反跳原子核による材料の劣化を評価する物理的指標として、Lindhard<sup>8)</sup>、Robinson<sup>9)</sup>らにより原子当たりの弾き出し数 dpa (displacements per atom) が導入された。

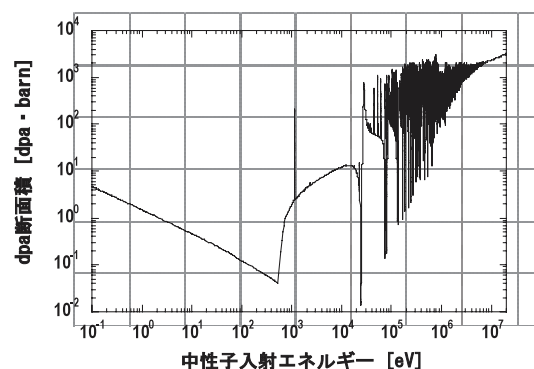
dpa は、弾き出し断面積  $\sigma_{\text{dpa}}$  に中性子フラックスを乗じて時間積分することによって計算できる。入射中性子エネルギー  $E_n$  による弾き出し断面積  $\sigma_{\text{dpa}}$  は、格子原子の弾き出しに有効に使われるエネルギーを  $T_d(E_n)$  で表すと、

$$\sigma_{\text{dpa}}(E_n) = \frac{0.82}{\varepsilon_d} \overline{T_d(E_n)} \overline{\sigma}(E_n) \quad (4)$$

となる。ここで、 $\varepsilon_d$  は原子の弾き出しエネルギーで、鉄では通常  $40 \text{ eV}$  が使われている。 $\overline{T_d(E_n)}$  は、反跳原子核の運動エネルギーから、Lindhard<sup>8)</sup>、Robinson<sup>9)</sup>らの電子スクリーニング理論により計算される因子を、核反応断面積で重み付けして反跳エネルギーと反跳角で平均し、核反応の種類について和をとった格子原子の弾き出しに有効に使われるエネルギーである。また、 $\overline{\sigma}(E_n)$  は、中性子エネルギー  $E_n$  により核反応で生ずる標的原子核の反跳エネルギーと反跳角で積分し、核反応の種類について和をとった核反応断面積である。KERMA ファクタの算出と同様にして、反跳原子核の運動エネルギーは、核データライブラリーを用いて計算することができる。計算の詳細については、文献 10) が詳しい。

弾き出し断面積  $\sigma_{\text{dpa}}$  についても、真木ら<sup>10)</sup> が 1990 年代に核融合炉の核設計のために核データライブラリー JENDL-3.1 から弾き出し断面積  $\sigma_{\text{dpa}}$  計算し、公開している。また、NJOY コードでも弾き出し断面積  $\sigma_{\text{dpa}}$  を算出することができ、小迫ら<sup>6)</sup> が日本の最新の核データライブラリー JENDL-3.3 から弾き出し断面積  $\sigma_{\text{dpa}}$  を計算している。弾き出し断面積  $\sigma_{\text{dpa}}$  の一例として JENDL-3.3 の  $^{56}\text{Fe}$  データを NJOY で処理して作成した  $^{56}\text{Fe}$  の弾き出し断面積を第 V-4 図に示す。

代表的な例として、国際熱核融合実験炉 ITER<sup>1)</sup> の設計で、構造材として使用されている SUS 316 と、第一壁



第 V-4 図  $^{56}\text{Fe}$  の弾き出し断面積

やダイバータの冷却管材である銅の dpa を算出する。ITER において第一壁中性子フルエンス  $1 \text{ MWa/m}^2$  で運転後の SUS 316 と銅の dpa は 10 dpa, 13 dpa である。ここで、10 dpa とは、中性子の照射を受けているある期間中に格子原子核が 10 回弾き出されることを意味している。SUS 316 の場合には、10 回程度の弾き出しを受けると、材料としての使用限界に達する。

放射線照射による材料劣化の指標として、dpa は歴史的経緯があるが、いろいろな線種やエネルギーの照射による材料劣化を必ずしも統一的にかつ精度よく評価していないことは多くの人が認めるところである。指標が有効であるためには、照射損傷の基礎過程の深い理解に基づくものでなければならない。これまで、dpa に代わる指標として、いろいろな損傷過程やモデルが提唱されてきた<sup>11)</sup>。例えば、V-3(2)項で述べたように、カスケード損傷を引き起こしていると考えられている照射中心部は、溶融状態にあることが推測されることから、カスケード損傷の極短時間の消滅というモデルとは、全く別の損傷過程が想定される。すなわち、溶融状態から極短時間に冷却が起り、固化状態に移行する過程で収縮が起こると内部に空洞が生じ、これが欠陥となる、というモデルでは、Lindhard や Robinson らが想定していたモデルとは全く別の過程を示唆している。

しかし、Lindhard や Robinson らが想定していたモデルを格子原子的なミクロな視野からとらえたモデルであると考え、代表長がその数千倍の領域というマクロな視野でとらえたのが溶融から冷却へのモデルと見ると、両者は視野の大きさが異なるだけで、同じ現象を異なる視野の大きさからとらえていると考えられる。すなわち、数十格子間にわたって弾き出された多数の格子原子をマクロ的に見れば溶融状態にあり、ほとんどのカスケード損傷が極短時間で消滅する過程は冷却過程であると考えられる。

汎用的な新たな指標を見出すことに期待があるものの、長年 dpa を指標として利用し、多くの照射データが中性子照射の dpa をベースに議論され蓄積されている現在、これに替わる新たな指標を見出すのは、困難であるといわざるを得ない。

## 5. まとめ

核融合炉で使用される材料について、以上述べたような方法に従って算出された KERMA ファクタが用意されている。この KERMA ファクタを用いれば、核融合炉の第一壁やブランケット等で発生する核発熱を容易に算出することができる。

原子当たりの弾き出し数 dpa は照射損傷を評価する物理量として、Lindhard, Robinson らにより導入され

たものであり、以上概観したように、弾き出し断面積が用意されているので、照射損傷の指標として dpa を用いることができる。しかし、同じ dpa 値でも線種やエネルギーによって損傷が異なる等の問題点も指摘されている。このような点から、新たな照射損傷評価指標が求められている。

## —参考文献—

- 1) 下村安夫, 他, “ITER 工学設計”, プラズマ・核融合学会誌, 78, 増刊, (2002).
- 2) 相良明男, 他, 日本原子力学会「昭51年会要旨集」, A 18 (1976); Y. Seki, JAERI-M 6726, 20 (1976).
- 3) 真木紘一, 他, 核発熱定数 KERMA ライブラリーの作成—核融合群定数セット FUSION-J 3 用核発熱定数ライブラリー, JAERI-M 91-073, (1991).
- 4) K. Shibata, et al. (Ed.), *Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version 3-JENDL-3*, JAERI 1319, (1990).
- 5) R.E. MacFarlane, D.W. Muir, *The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91*, LA-12740-M, (1995).
- 6) K. Kosako, et al., “The Libraries FSXLIB and MATXSLLIB based on JENDL-3.3”, JAERI-Data/Code 2003-011, (2003).
- 7) K. Shibata, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* **39**, 1125 (2002).
- 8) J. Lindhard, V. Nielsen, M. Scharff, P. V. Thomsen, *Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Mat.-fys. Medd.*, **33**[10], (1963).
- 9) M. T. Robinson, “Energy Dependence of Neutron Irradiation Damage in Solids,” *Proc. BNES Nuclear Fusion Reactor, Conf.*, British Nuclear Energy Society, London, p 364 (1970).
- 10) K. Maki, et al., *Development of Displacement Cross Section Set for Evaluating Radiation Damage by Neutron Irradiation in Materials Used for Fusion Reactors*, JAERI-Data/Code 97-002, (1997).
- 11) 室賀健夫, プラズマ・核融合学会誌, **74**[1], 9 (1998).

## 著者紹介

真木 紘一 (まき・こういち)



(株)IUU

(専門分野/関心分野) 原子力分野の電磁診断技術の研究開発、核融合炉放射線工学  
原子力および医療等の放射線利用分野の放射線遮蔽工学

今野 力 (こんの・ちから)

本誌, 50[9], pp.579 (2008) 参照。

連載  
講座軽水炉プラント  
—その半世紀の進化のあゆみ第13回 日本の軽水炉開発(7)  
—PWRの改良標準化③

エンジニアリング開発(株) 向井 卓, 三菱重工業(株) 鈴木成光

## I. はじめに

日本の軽水炉開発(PWR)については、これまで、第7回講座では、国内PWR初号機の建設から始まる海外技術の導入とその後の国産化/自主化の歩みを、また、第9回と第11回講座では、信頼性向上や運転保守性の向上など導入期の運転経験に基づく技術の改良並びにその後の経済性向上や稼働率向上など、電力会社のニーズに沿ったプラントの諸性能を向上させるための技術改良の取り組みを紹介してきた。

今回の講座では、軽水炉改良標準化計画の第3次のプログラムとして、国の支援の下、電力会社と共同で開発し、その後の技術の進歩や国内外の運転保守経験などを反映し高度化を図った改良型PWR(APWR)について、開発の経緯、技術的特徴などについて紹介する。また、最後に、日本の軽水炉開発(PWR)のまとめとして、国、産業界が一体となって進めてきた改良標準化活動の成果であるPWRの改良技術を、どのように海外の原子力発

*LWR-Plants - Their Evolutionary Progress in the Last Half-Century—(13): Light Water Reactors Development in Japan⑦; Improvement Standardization Program for Light Water Reactors—PWR③: Hiroshi MUKAI, Shigetsugu SUZUKI.*

(2008年 7月14日 受理)

各回タイトル

- 第1回 原子力発電前史
- 第2回 軽水型発電炉の誕生
- 第3回 日本の研究用原子炉の始まり
- 第4回 日本の原子力発電の始まり
- 第5回 米国および日本の軽水炉の改良研究(PWR)  
— SHIPPINGPORTから美浜1号機まで
- 第6回 軽水炉の改良研究(BWR)  
— ドレスデンから敦賀1号機まで
- 第7回 日本の軽水炉開発(1)—軽水炉の導入(PWR)
- 第8回 日本の軽水炉開発(2)—軽水炉の導入(BWR)
- 第9回 日本の軽水炉開発(3)—PWRの改良標準化①
- 第10回 日本の軽水炉開発(4)  
— 第1次改良標準化計画(BWR)
- 第11回 日本の軽水炉開発(5)—PWRの改良標準化②
- 第12回 日本の軽水炉開発(6)  
— 第2次改良標準化計画(BWR)

電の発展に活用すべきかの視点も含めて総括する。

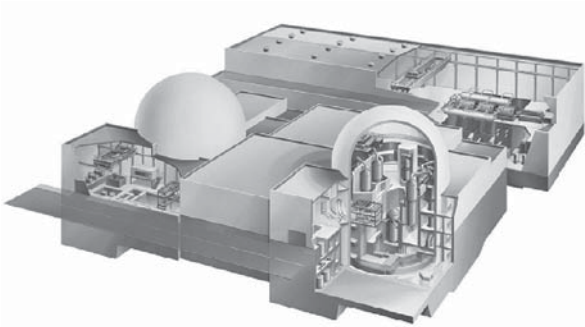
## II. APWRの開発経緯

## 1. 第3次改良標準化計画

三菱にとっては第2世代PWRに分類される九州電力(株)の玄海2号機が運転を開始した翌年の1982年(昭和57年)1月、三菱にAPWR開発事務所を設置し、APWRの開発に着手した。石油危機による原子力への期待の高まりや米国のTMI原子力発電所での事故の教訓として、日本のPWR技術の自主化が強く求められていた時期でもあった。また、国際的標準も目指す観点から、ウェスチングハウス社(WH社)と共同開発体制で行った。このAPWRの開発は、国の第3次改良標準化計画の一環として、電力会社5社(北海道電力、関西電力、四国電力、九州電力、日本原子力発電)と三菱重工、WH社の7社による国際共同開発体制の下で進められた。開発の狙いは、運転期間の延長や定検合理化などによる稼働率の向上、建設費や燃料サイクルコストの低減、135万kW級プラントによる立地の拡大と効率化、運転保守性の改善、安全性の向上など、次の世代の軽水炉に要求される諸性能の改善・向上を図り、これまでのPWR原子力発電プラントの設計、建設、運転を通じて得られた貴重な経験に基づく技術を集大成することであり、日本版の次世代加圧水型軽水炉の確立を目指した。

このAPWRの開発は、電力会社による積極的な支援と適切な指導の下、国の委託による試験の実施も含め、5年の歳月を経て、1987年(昭和62年)3月に終了した。開発完了時点でのAPWRのプラントの主要な仕様と特徴は、①プラント出力1,350 MWe(52インチ翼低圧蒸気タービン)、②炉心熱出力3,823 MWt(炉心には減速材調整制御棒とステンレス鋼製中性子反射体を採用)、③主要機器の大型化(伝熱面積6,040 m<sup>2</sup>の大型SGと100 A型RCPの採用)、④安全防護設備の改良(4サブシステムの安全系、原子炉格納容器内燃料取替用水ピットなどの採用)、⑤計測制御設備の改良(デジタル方式の計測制御設備と改良型中央制御盤の採用)であった。このプラ





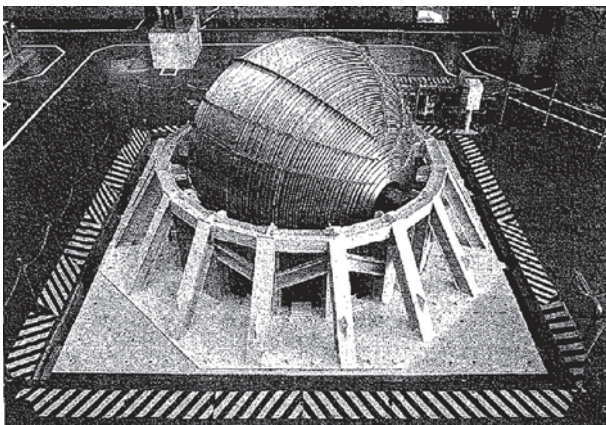
第1図 APWRプラントの概念図

ント設備は、第3次改良標準化をベースにその後の運転経験や技術の進歩を反映して、改良を積み重ねた現在のAPWRに至るためのベースとなっている。(第1図)

改良標準化計画の第1次、第2次は、既存の発電所の信頼性や性能の向上のために、単体の機器、サブシステム、またはそれらの組合せなど、いわゆるプラントの「部分」や「要素」に対する改良の取組であったが、第3次においては、新規の炉型開発という、部分や要素の改良に加えて、それらを最適な「全体」へ統合し、新しいプラントの概念を構築、創造するという機会が与えられたことになり、三菱の技術陣にとっては、大きな励みとなった。また、これまでのPWRの標準設計を発展させ、炉心設計にも斬新なアイデアを導入するという高い開発目標であったことから、新設計の機器の開発確証作業を通じて、炉内の流況や流動振動、SGの熱流動や流動振動の挙動を模擬した解析コードの整備と拡充を行うことができた。これらの経験や知見は、その後の自主技術を主体とした現在のAPWRプラントシステムの確立や既設プラントの信頼性の向上などに大きく寄与している。(第2図は、SG伝熱管のU字管群の耐震性を確認した試験の図である。)

## 2. 高度化への取組み

日本原子力発電(株)は敦賀3、4号機増設計画の事前了解願いを、平成12年2月に福井県並びに敦賀市に対して



第2図 SG伝熱管群振動試験

提出、その後、平成16年3月に原子炉設置許可申請書を提出した。第3次改良標準化計画の終了から数えて10数年、その開発成果をベースに、その後の運転経験で培った改良技術や最新技術を取り入れてブラッシュアップしたAPWRが建設に向けて大きな一歩を踏み出したことになる。

APWRの開発は、第3次改良標準化として一たん終了していたが、その後、長期にわたって原子力発電の中核を担うと考えられる軽水炉については、現状に甘んじることなく時代のニーズに応じた一層の高度化を推進すべきとする国の施策や電力会社の要請もあり、これに後押しされる形で、実機に向けた設計としての完成度を高める取組みを継続するとともに、運転や保守の経験の蓄積を積極的に活用し、新しい知見と技術を取り入れていくための改良開発にも注力した。これらの開発の取組みは、三菱の社内の研究開発、電力会社との共同研究や委託研究を通じて実施された。特に、新しい設計を採用する場合の安全性や信頼性の確証・実証試験については、APWRの標準設計を確立する観点から、引き続き電力会社から多くの指導と支援を受けることになった。(第3図は、炉内構造物の流動振動に対する健全性を確認した試験の図である。)

改良標準化以降の敦賀3、4号機に向けた改良開発の主要なポイントは、(1)運転保守の経験を踏まえた炉心構造の簡素化と出力の増大：減速材調整制御棒は採用を見送り、簡素な中性子反射体構造を採用し、通常の炉心・燃料構造とすることで燃料棒線出力密度に余裕を生じさせ、出力は135万kWから約150万kWまで増大、(2)新技術の活用：次世代中小型炉向けに開発を進めていた2段階流量切替えが可能な高性能蓄圧タンクを非常用炉心冷却系(ECCS)に導入し、ECCSを簡素化、(3)設計の精緻化：プレストレスコンクリート製原子炉格納容器(PCCV)、高性能SG湿水分離器、54インチ翼低圧タービン、最新のデジタル制御保護設備および新型中央制御盤の採用などであった。

さらに、この敦賀3、4号機向けのAPWRとともに、



第3図 炉内構造物総合流動試験

これをベースにして SG 伝熱性能やタービン性能をさらに向上した約160万 kW や約170万 kW の APWR も含めて、APWR は経済性の優れた大容量の PWR 標準プラントとして確立された。

### Ⅲ. APWR の概要と技術的特徴

上述の通り、第3次改良標準化から高度化への取組みにより、今後の三菱 PWR の標準プラントとしての APWR を確立したが、本章では、敦賀3,4号機に採用される APWR の技術的特徴を従来型4ループプラントとの比較で紹介する。

#### 1. APWR(敦賀3,4号機)の概要

APWR(敦賀3,4号機)は現行の120万 kW 級の4ループ PWR から炉心の大容量化によりウラン装荷量を約30%増加させるとともに、1次冷却材ポンプ、SG およびタービンを高性能・大型化することで約153万 kW 級への大出力化を達成している。また、経済性、安全性、信頼性、運転保守性などの諸性能の徹底的な改善を図ったプラントであり、従来型4ループ PWR との比較でのプラント基本仕様を第1表に示す。

APWR に採用した技術のうち、新型中央制御盤や54インチ翼低圧タービンなどは、炉型に関わらない共通的な要素技術であり、すでに、泊3号機などに先行適用されているので、ここでは、APWR の炉型に固有な改良技術として、高性能で信頼性の高い原子炉構造、大容量でコンパクトな SG、簡素で信頼性と安全性の高い ECCS について、その特徴を紹介する

#### 2. 炉心・燃料と原子炉構造物

炉心は、257体の改良型17×17燃料集合体の大容量炉心である。MOX 炉心や高燃焼度化など運転の多様化のニーズにも柔軟な対応が可能のように、MOX 燃料の装荷規模に応じて制御棒体数を設定できるようにした。また、ウラン資源の節約の観点から、ジルカロイグリッド燃料集合体を採用(現行プラントにも適用済)するととも

第1表 APWR(敦賀3,4号機)の基本仕様

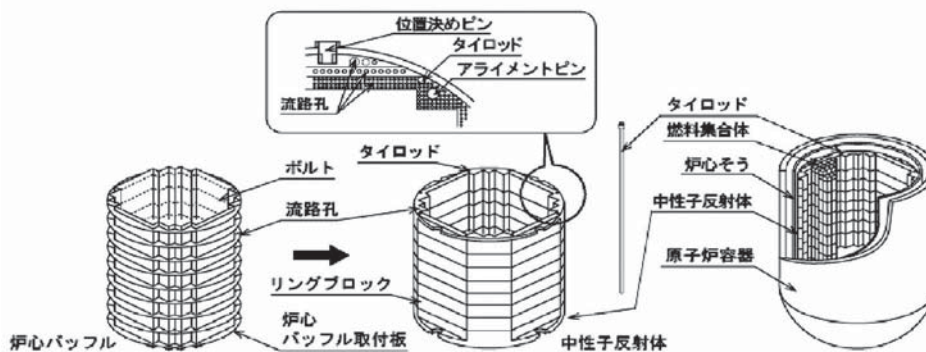
項目	従来型 4ループ	APWR
電気出力(MW)	1,180	1,538
原子炉熱出力(MW)	3,423	4,466
原子炉		
燃料集合体数(体)	193	257
燃料棒配列	17×17	17×17
炉心有効長(m)	約3.7	約3.7
ウラン燃料装荷量(tU)	89	121
原子炉冷却系		
ループ数	4	4
1次冷却材流量(m <sup>3</sup> /h/ループ)	2.01×104	2.58×104
蒸気発生器 型式	52 F 型	70 F-1型
台数	4	4
蒸気圧力(MPa)	6.13	6.13
1次冷却材ポンプ 型式	93 A-1型	100 A 型
台数	4	4
電動機軸動力(kW)	約4,480	約6,000
タービン 型式	TC6F 44型	TC6F 54型
湿分離加熱器	2段再熱	2段再熱
発電機 容量(MVA)	1,310	1,715

に、炉心周りにステンレス鋼製の中性子反射体を採用した。(第4図参照)

この中性子反射体は、炉外へ漏出し、従来は核反応に寄与しなかった中性子を炉心に反射し、中性子の有効利用を促進することで燃料サイクルコスト低減に寄与している。また、従来の PWR がステンレス鋼板を多数のボルトで組み上げる炉心バッフル構造であったのに対し、溶接線がなくボルト結合が少ないステンレス鋼のリングブロックを積み重ねた簡素な構造としており、原子炉容器への中性子照射量を約1/3に低減でき、原子炉容器の信頼性が一層向上する設計となっている。

#### 3. 蒸気発生器(SG)

SG は、炉心の大容量化に対応して伝熱面積を現行プラントの約5,000 m<sup>2</sup>から約6,500 m<sup>2</sup>へ増加した大型タイ



第4図 中性子反射体

プ(70 F-1)を採用した。一方で、大容量化に伴う機器の外形の増加を極力抑えるため、伝熱管の口径を従来の7/8インチから3/4インチに小口径化して胴部の外径増加を抑え、また、従来よりも性能向上を図った湿分離器を採用して設置段数を低減することにより、高さ方向の増加を抑えた設計としている。これらの工夫によって、SGの重量は、従来の設計思想のままで大型化するのに比べて約10%以上低減することができている。伝熱管のU字管部に設置する振れ止め金具については、支持点数を既設の最新プラントの6点から9点に増やして信頼性の向上を図っている。

#### 4. 非常用炉心冷却系(ECCS)

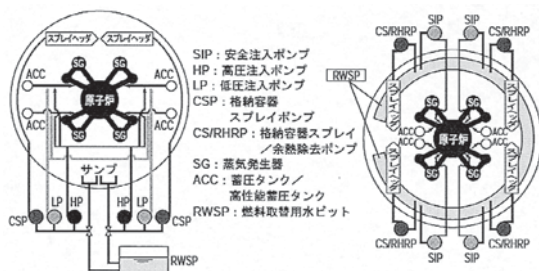
安全性の向上を図るため、ECCSの機械設備を従来の2系列構成(2×100%容量)から4系列構成(4×50%容量)とし、事故時の機器作動に対する信頼性を向上させた。各系列の設備をそれぞれのループの近傍に設置することで、配管物量を削減するとともに配置上の分離・独立性も強化した。

また、従来は原子炉格納容器の外に設置していた燃料取替用水ピットを原子炉格納容器内の底部に設置し、これを1次冷却材喪失事故(LOCA)時などのECCSの水源にする設計とした。これにより、事故時に炉心に注入された冷却水が水源であるピットに回収されることとなり、炉心冷却水の水源の切替を不要として安全性の向上を図る設計とした。(第5図参照)

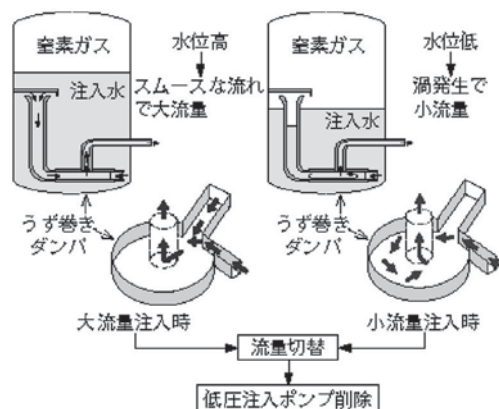
さらに、ECCSに新技術である高性能蓄圧タンクを採用した。高性能蓄圧タンクは、LOCA時の初期に炉心冷却に必要な大流量注入と、その後の炉心水位維持に必要な小流量注入を、タンク内の流路構造を工夫することで外部からの動力を用いずに切り替えることができる設備である。これにより、従来の低压注入系の機能を蓄圧注入系に統合し、低压注入ポンプを削除することでECCSの系統構成の簡素化を図っている。(第6図参照)

### Ⅳ. 日本のPWR発電技術を世界へ

国内PWRの初号機である美浜1号機が、初めて大阪万博に電気を送り出して以来、早いもので40年近い歳月が経過した。今や軽水炉プラントが国内の電力の約1/3



第5図 非常用炉心冷却系



第6図 高性能蓄圧タンクの注入のしくみ

を供給する基幹電源としての役割を果たしており、また、計画外停止率も世界レベルに比べて抜きん出た成績を示している。発電所の建設期間が短く、世界のトップレベルの信頼性と品質の高い技術を提供できる総合的な技術力を実現できるように至ったのも、国、電力会社、メーカーなど多くの関係者が、原子力発電技術の定着化と発展に長期的な視点から一体となって取り組んできたことの成果といえよう。

このような国内の軽水炉技術の改良発展の歩みは、日本独特のものであり、海外(特に米国)と比較してどのような差異があったのか、また、今後、この技術をどのように、世界の原子力発電の発展に活用し、還元していくべきかについて、PWRメーカーの視点から考察してみたい。

#### 1. 日本における原子力技術発展の特徴

欧米においては、原子力発電所の建設を行う場合、電力会社の下に、A/Eと呼ばれるエンジニアリング会社、原子力の主要機器と設備の供給会社、その他の機器や配管等の供給会社、建設業者など異なる企業による分業を行う例が多く、日本のように、プラント総合メーカーが全体を取りまとめるケースは少ない。三菱の場合は、原子力発電の草創期の一部を除き、原子炉設備、タービン発電設備などの本体は、建築設計も含めて、すべての供給責任を負う。いわゆる“単一の一括責任(single responsibility)”の契約形態で、プラントの建設に携わってきた。このような形態が可能であった要因は、原子力エンジニアリングを担当する技術者集団の組織化(現在は三菱重工業に合併されているかつての三菱原子力工業株)と、火力プラント、化学プラント、船舶、機械、橋梁など一般産業における設計、製造、建設の技術基盤を有する拠点の存在(神戸造船所、高砂製作所、三菱電機)であったと考える。これはまた、原子力発電の定着と安定した推進を求める国や電力会社のニーズに沿うものであった。このことは、メーカーにとって、設計、製造、

建設、運転保守に関わる総合的な技術基盤を確立し、長期的な視点に立ってそれを強化、向上させていく大きな原動力にもなった。

また、もう一つの側面として、原子力発電プラントの継続的な建設に恵まれたことも大きい。米国の場合は当初、100基を超える原子力発電プラントの建設が集中的に行われたが、その後、許認可に伴う工程遅延のリスクやスリーマイルアイランド原子力発電所の事故などの問題もあり、30年間近くにわたり、新規プラントの建設は行われていない。一方、三菱は、これまで5つの電力会社に対して、2, 3, 4ループの3炉型のPWRを、8つのサイトで、合計24基建設する工事に間断なく携わってきた。このことで、原子力発電プラントの建設に関わる技術基盤を維持するとともに、新技術、新知見による改良技術を新設プラントに反映する機会が継続的に与えられることとなった。また、とりわけ電力会社の適切な指導の下に、サイト条件や運用ニーズなどにきめ細かく対応して設計をまとめ上げる技術力(安全性、信頼性、運転保守性、経済性をバランスよくまとめる総合技術力)に磨きをかけることができたことも、新設プラントへの対応能力の観点から有意義な経験であった。

## 2. 日本の技術の海外への展開

### (1) 運転中プラント

三菱は国内PWRの実績をベースに、これまでも建設プラントの原子炉容器、運転中プラントの取替用の蒸気発生器や上部原子炉容器など、信頼性の高い大型機器の海外への輸出を行ってきた。特筆すべきは、2002年に発生した米国デービスベッセ原子力発電所の上部原子炉容器の腐食問題に対応する米国の取替工事で、三菱製のものが数多く採用されたことである。デービスベッセ原子力発電所で上部原子炉容器が、制御棒駆動装置(CRDM)管台からのホウ酸水の漏洩により外部から大きく腐食していることが見つかり、その後、米国の他のプラントでも、上部原子炉容器の取替が進んだが、この問題については、国内でも早い時点で予防保全の必要性が議論され、材料、設計、溶接工法などに改良を加えた新しい取替用の上部原子炉容器構造物を開発し、すでに、実機の適用を行っていた。米国の取替工事で三菱製のものが数多く採用されたのは、このような経緯によるところが大きい。この開発に当たっては、CRDMの構造を漏洩のない構造のものに変えるという設計改良に取り組んだが、こうした新設計の採用を積極的に後押しし、指導いただいた日本のPWR電力会社の役割も大きかったと理解している。(第7図は、取替用上部原子炉容器を米国に航空機輸送する積込み風景である。)

同様に、国内では、予防保全や運転保守性の向上の観点から、炉内構造物や中央制御盤を新しい設計のものに取り替えることを世界に先駆けて実施しているが、いず



第7図 上部原子炉容器の輸送

れ、この経験が、海外の運転中プラントに活かされる時期が来るものと信じている。

### (2) 新設プラント

米国での新設プラントの建設が途絶えて久しいことは先に述べた通りであるが、この間、米国エネルギー省(DOE)による原子力支援策の一環としての“改良型軽水炉(ALWR: Advanced Light Water Reactor)プログラム”で、新しいプラントのあるべき姿を具体的に定義した米国電力研究所(EPRI)の“電力会社の要求事項についての図書(URD: Utility Requirement Document)”の策定やALWRとしてのAP600, AP1000の開発など、米国メーカーに対する開発支援が行われてきた。これは、日本では、第3次改良標準化並びに高度化によるAPWRの開発に相当するものであるが、米国との違いは、日本の電力会社が、実機の建設を想定し、より深いかたちで、メーカーとの共同開発に参画いただいたということであろう。その結果、現在のAPWRは、電力会社の建設や運転保守の観点からの詳細な検討の結果が反映されており、ある意味で、日本版のURDとそれに基づくプラントシステムが確立できたといえる。

2008年2月29日、“米国向けAPWR(US-APWR)の設計認証(DC)申請が米国原子力委員会(NRC)に受理されたが、日本の電力会社の厳しい検討結果が反映されたAPWRの米国版であるUS-APWRは、実証性、安全性、運転保守性、経済性などの優れたプラントであり、今後は、米国の電力会社から、より幅広い支持を得られるであろうことを確信している。

## I. おわりに

このシリーズを通じて、日本におけるPWRの改良標準化の歴史について、メーカーの視点から紹介してきた。とりわけ、改良標準化計画の集大成であるAPWRは、運転保守性、信頼性/安全性、経済性に優れた大容量のPWR標準プラントとして確立され、今後、国内外

において、大きな役割を果たすことが期待されている。世界の資源問題、環境問題は深刻であり、今後、世界的に一層、原子力発電の役割が重要視されることになる。原子力発電プラントの新規建設の凍結状態が解除されたときには、早期の実用に応えられる技術が求められることは論をまたない。国と産業界が一体となって培ってきた日本のPWR技術をプラント設備も含めて海外に展開することは、世界のエネルギー問題の解決に対する日本の貢献という観点からも重要であろう。米国や欧州における原子力発電の規模の大きさや長期サイクル運転や出力向上運転などの積極的な取組みなど、欧米が優れている部分も多い。世界の状況を観察する冷静沈着さも併せ持った上で、今、積極的かつ果敢に世界に出て行くことが求められている。

## —参考文献—

- 1) 軽水炉改良標準化計画・総合資料集、通産省・原子力発電課監修、(1985)。
- 2) 三菱重工技報、29〔3〕、(1992)。
- 3) 三菱重工技報、40〔1〕、(2003)。
- 4) 三菱重工技報、43〔4〕、(2006)。

## 著者紹介

向井 卓(むかい・ひろし)



エンジニアリング開発(株)、元三菱重工(株)  
(専門分野)原子力プラント技術全般

鈴木成光(すずき・しげみつ)

本誌、50〔4〕、pp.246(2008)参照。

## 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.soc.nii.ac.jp/aesj/atomos/mokuji.html>

## —最近の編集委員会の話題より—

(9月1日 第3回編集幹事会)

## 【学会誌関係】

- ・学会創立50周年記念の企画として、「ヤング・フリートーク」、「アクティブ・フリートーク」を12月号、1月号に掲載することとした。
- ・高知工科大学にて開催の「秋の大会」から、特別報告会、総合講演・報告等の記事掲載について検討した。一部は編集委員会の取材記事とする。
- ・学会創立50周年記念号と通常号の記念記事の進捗状況について説明があり、記念号の祝辞執筆者を検討した。
- ・記事提案書を変更し、提案者には内容が把握できる程度に記入し、主張、論点、結論を明確にさせていただくこととした。
- ・学会誌の会員外購読を拡張するため、今後全国の関係機関について購読勧誘を進めることとした。
- ・学会HPにATOMOSの内容がわかるように、表紙、目次、巻頭言、時論等を掲載し、PRすることとした。

## 【論文誌関係】

- ・論文賞候補編集委員会推薦について決定した。
- ・新審査システム進捗状況について説明があり、今後編集委員・事務局によるシステムの検証を経て2008年1月中旬の公開を目指す。
- ・目安箱へ審査遅滞に対する苦情があり、調査の結果、査読遅れ等によるもので、編集長より著者へ事情説明をした。
- ・査読者都合により査読が大幅に遅れる場合は、規定の日数で査読論文を引き上げるルールについて、各委員に周知することとした。
- ・和文論文誌の投稿論文用テンプレートを作り直すこととした。

## 【お詫びと訂正】

6月号の表紙の説明文に誤りがありました。お詫びして訂正します。

6月号表紙の絵の正しい説明文

『Provence プロヴァンスの窓辺/フランス・プロヴァンス地方』

「古い建物にたてつけの悪そうな窓。しかしそんな建物をいつまでも大切に使うという精神は、我々とは少し違うところだ。蔦が絡まった窓辺は絵になる。中へ一歩入ると、とても近代的で設備は最新だったりする。」

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

本誌では学会誌50周年記念企画の一つとして今月号より、創刊まもないころの学会誌の巻頭言を数本掲載します。これらの記事からは、日本の原子力の、いわば草創期を形づくった当時の人たちが原子力に対して、どのような思いを持っていたかということ、うかがい知ることができるかもしれません。今月号では、学会誌創刊号(1959年発行)に掲載された「創刊の辞」を掲載します。

日本原子力学会誌

Journal of the Atomic  
Energy Society of Japan

1959年1月(創刊号)

## 創刊の辞

会長 茅 誠 司

およそ原子力といわれるものほど、広い範囲の学問を包括しているものはあるまい。原子核の理論や実験の分野から始まって、工学のあらゆる分野にわたるばかりでなく、医学から社会科学の面まで及んでいる。これら広汎な分野にわたる研究が総合されてはじめて、原子力の平和利用が完全に実施されるものであることは申すまでもない。1954年に原子力研究の国家予算が通過して以来5年を過ぎたばかりであるが、この間に法律や制度の面では関係方面の努力によってある程度まで整備されてきた。

一方、研究の面ではどうであろうか。日本学術会議の原子力特別委員会が過去3回にわたって実施した原子力シンポジウムにあっては、数多くの研究論文が発表されたが、これを過渡的なものとして原子力学会が関係者によって組織され、これを中心として将来は発表が行なわれるものと考えられてきた。この線にそってさる2月14日に日本原子力学会が発足したが、ここに新らしく「日本原子力学会誌」を創刊することになった。

関係方面が広いだけにこの会誌の編集は困難な面が多いことと思われるが、会員諸君の協力によって健全な発展を期待してやまない。この学会、したがって本「会誌」は他の学会とくらべて、学界のみならず産業界からの協力を期待するところが大きい。それゆえ、この「会誌」がただ徒らにアカデミックにはしることをせず、またあまりに通俗に過ぎないように慎重に編集されることを期するものである。

## 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

## 夢と現実の間

電力中央研究所 社会経済研究所 長谷川尚子

日本原子力学会が設立されて50年。一般に「一世代30年」といわれるから、50年ならば約二世代分の年月を経たところであろう。大別すれば、原子力が「夢のエネルギー」といわれていた世代と、大事故(スリーマイルやチェルノブイリの事故)が度重なって原子力発電が危険視された後の世代、であろうか。

「夢」が「現実」に変わると、社会がそれに向ける視線も一変する。これは原子力発電に限らず、航空機などでも同様であろう。人間にとって空を飛ぶことは、世代を継ぐ壮大な「夢」であり、ダ・ヴィンチからライト兄弟に至るまで様々な試行錯誤や失敗があった。しかし航空機で空を飛ぶことが当たり前、すなわち「現実」となってしまうと、失敗はもはや許されなくなる。そこには、リスクを許容する視点から、リスクを制御し高品質の維持を求める視点への転換がある。

「夢」を希求した世代はリスクに寛容でも、「現実」しか知らない世代はリスクの存在を良しとしない。しかしリスクの存在を否定すれば、トラブル隠しが起こったり、

“安全と安心”をめぐる議論も空回りに終わってしまう。「われわれの日々の営みにはリスクが存在する」ということを、事業者は事業者なりに、社会は社会なりに認めていかなければ、皆がリスクについて正直に話せる環境は整わないであろう。

「リスクははらんでいるが、この技術をなんとかうまく制御して使っていこう。」清濁併せ呑み、曖昧な現実とどれだけ向き合っていけるかが、“原子力”という船を乗りこなしていくのに必要な覚悟と思われる。そしてこれは、原子力にかかわる人間に限らず、広く一般社会も含めた現代人に突きつけられた課題でもあろう。

とはいえ、人間、現実のことばかり考えていたのでは、心が塞がるばかり。画期的な技術開発に夢を抱くか、「リスクを制御し、今の技術を高品質に維持することは地球との共生につながる」と、「現実」を「夢」と置き換えるか……。いずれにせよ、10年後に始まる第三の世代が、夢と現実のベストミックスを希求する世代となることを祈る。  
(2008年 8月6日 記)

## 原子力への想い

科学ジャーナリスト 中村 政雄

わが国の原子力発電はつぶれるのではないかと、思えた時期があった。原子炉の配管などに正体不明なクラックや腐食が起きたからである。全国の原子力発電所の平均稼働率は40%近くに落ちた。修理の合間に、ときどき動くという状態であった。

原因は放射線のせいかと考えて、放射線に強い材料を選ぶと、腐食に弱い。腐食に強い材料は放射線に弱い。放射線と腐食の両方に耐える材料が見つからなかった。

その時、神風が吹いた。1973年10月のオイル・ショックという神風である。

1バレル2ドル以下だった原油価格が、いきなり8ドルに上がった。やや割高だった原子力発電は、これで火力発電に対し一気に優位に立った。このため、材料の開発に思い切った研究費を投入することができた。日本の技術陣は難問を解決、ピンチを乗り越えた。このあと原発建設ブームが生まれ、原子力発電は黄金時代に入った。

わが国の原子力開発は、茨城県東海村の日本原子力研究所で始まった。初期には笑い話のようなことがあった。研究2号炉を組み立てたあと、洗浄した炉内を乾かすのに、パーマ用のドライヤーを購入して会計検査院にみつかり、ひどく叱られた。このような揺らん期を経て、日本の原子力発電は、運転管理技術で世界のトップに立つようになった。

今はその運転管理技術に綻びが目立つ。稼働率が世界最低に近くなった。安全への信用も低下した。高速増殖炉「もんじゅ」は、2次系のナトリウムが少し漏出しただけで、13年間も運転中止する破目になった。東京電力柏崎刈羽原子力発電所は昨年7月地震に襲われたが、原子炉は無傷で、世界の専門家が見て感心するほど見事な耐震性を示したのに、運転再開のメドが立たない。

不安と不信という妖怪に取りつかれているからだ。この妖怪を退治できるかどうか、今後の原子力利用の明暗がかかっている。  
(2008年 7月13日 記)

# 談話室

## 原子力と地震に関する危機管理研修：日本滞在記

フランス国立モンペリエ・ポール・ヴァレリー大学院生 Manon PAPIN  
(マノン・パパン)

フランス南部出身の私は、高校卒業後、2004年にモンペリエ・ポール・ヴァレリー大学に入学し、2007年には「環境」をテーマに地理学の学士号を取得した。現在は修士課程の1年目で「災害危機管理」を学んでいる。

この課程は、技術的手法、ツール(地理情報システム、地図など)、管理の法律的側面に重点を置き、社会、国土という尺度で、また地理学的な観点から災害危機管理を学ぶものである。この教育は、防災計画や地方保全計画、災害防止情報、建築・危険防止基準などを適用するために(沿岸地域の保全、護岸、斜面の安定化など)、地方自治体、複数の自治体にまたがる各種団体、国(県設備局、地方環境局、国家林野局、県農林局などの地方に分散した機関を通じて)の職員が必要とする教育である。

修士2年目の課程を始める際に、学生は自分で選択したテーマで研究報告を作成しなくてはならない。そのテーマとして私は日本の地震災害を扱いたいと思った。フランスと違い地震という自然災害にさらされている国でどのような措置が講じられているのかを知りたかったからである。恐らくこの分野で最先端の研究が行われている日本で、地震の危険と工学的危険について、それら2種類の危機を「同時に」管理するためにどのような対策がとられているのかを学ぶ機会が与えられたのは幸せであった。

私は、2008年2月25日から5月1日まで日本での研修ができるようにして下さった日本原子力産業協会(原産協会)の服部理事長に深く感謝している。原産協会は、私が選んだテーマに関して様々な情報が入手できるように援助し、様々な機関の方々と会見を企画して下さいました。これらの会見はすべて非常に興味深く、学ぶことが多かった。研修中に様々な方々にお目にかかることができたが、皆、日本における危機管理について私が理解するのを真剣に支援して下さいました。対応して下さいました方々が皆、真剣に質問に答えて下さり、資料や地図を使って細心の注意を払って情報を提供して下さいましたことにとっても感動した。訪問した先々で私が受けた温かいもてなしは決して忘れることができないものである。

まず、2007年7月16日に発生した中越沖地震に関する、2008年2月26日、27日の柏崎での「原子力発電所の

耐震安全性・信頼性に関する国際シンポジウム」並びに2月29日の「安全研究フォーラム2008—原子力施設の耐震安全と安全研究」に参加した。これらの講演は内容が豊富で、地震の際に何が起きたのか、また東京電力がどのようにして原子力発電所の危機を管理し、どのような教訓を得たのかをよく理解できるものであった。

3月11日は原子力安全技術センター、3月13日には東海村の日本原子力研究開発機構、さらに東京電力、東海村役場、茨城県原子力オフサイトセンター、刈羽村役場(村長)などを訪問した。そこで会った方々から(実際に災害を体験した方々からも)、防災、危機管理(地震と同時に原子力に関して)についてたくさんのことを教えていただいた。例えば、原子力事故が発生した際に保護する地域を限定することができる SPEEDI システムについて学ぶことができた。また、原子力施設周辺には、オフサイトセンターが設置されており、何か起こった時にはそこに様々な機関から専門家が派遣され、各自の知識を共有して最適な方法で危機管理ができることを学んだ。

それらの合間に、東京消防庁本所防災館に行った。ここでは、消火器の操作、けが人への応急手当、火災の際にすぐに反応して移動する方法など地震防災について様々なことを勉強した。また地震体験コーナーでは安全のための注意事項(どのように身を守るか、安全なところに身を置く)を学んだ。4月25日には気象庁を訪問することができ、気象庁が作成する地図や日本全国に散在



刈羽村品田村長訪問



している地震観測所で得られたデータからどのように住民に警告を出すかなどについて教わった。さらに研修の最終時期にあたる4月15日と16日に東京で第41回原産年次大会に参加する榮譽に浴した。これは私にとって非常に貴重な経験で、このような機会をつくって下さった原産協会に感謝している。その際いくつかの講演を聞くことができたが、それぞれの招待国の講演は興味深いものであった。

今回は私にとって2回目の日本滞在であった。2005年の夏に2ヶ月滞在したのが1回目である。その時に初めてこの国の文化に触れ、それがとても気に入った。日本人は連帯精神および一体感をもって、西洋人とはまったく異なった考え方をすることがわかった気がする。道に迷った時など何度となく日本人のやさしさに触れる機会があった。また一般的に日本人が環境に気を遣い、美しい伝統を守っていることも理解した。例えば、家の中に人形を飾るひな祭りがその例であり、それを自分の目で見ることができた。文化面でも、以前から日本の寺院が好きで、東京では近代的な街並みと古い寺院の見事なコントラストに強い印象を受けた。日本に住んでいる親類のお陰で東京でいろいろな発見をした。日本料理、築地の魚市場、桜の花、日本特有の米屋、畳屋、それと同時に素晴らしいデザイン、曲線の巨大ビルに代表される近代的な日本、それらを発見することができた。また帰国前に京都に行くことができ、初めて舞妓さんに会った。

仕事の面ではしばしば西洋とは違う日本の仕事の仕方を理解することができた。日本人がとても真面目で余り休暇も取らずに、規律正しく仕事をする様子を見ることができた。私は、責任ある地位の方々が年度末の仕事の



鎌倉の大仏

忙しい時期に、ただの学生である私を親切に迎え入れ、貴重な時間を割いて私の研修に関心をもって下さったことに感謝する。

今回の研修は、私にとって、勉強の面でも個人的な面でも非常に貴重なまたとない経験だった。研修によって、地震、台風、地滑りなど、日本人が直面しなくてはならないあらゆる種類の自然災害に対する日本人の姿勢が理解できた。「しょうがない」という言葉の意味を学んだ。日本人は運命論者であきらめが早いのだろうか。それともそれは教育の結果なのだろうか。

私は、この研修中に私を支え、助けて下さったすべての方に心からの感謝の意を伝えたい。その方々のお陰で大変有意義な研修をすることができた。

(2008年 5月13日 記)

# 談話室

## 最終処分地選定問題を考える

### —地層処分関連研究施設、「幌延計画」に果たした自治体の活動を振り返る

原環センター(元動燃事業団理事) 坪谷 隆夫

今、高レベル放射性廃棄物の最終処分地選定が大きな社会的・政治的な課題になっている。最終処分地選定には最終処分事業を委ねられている当事者の努力が大事なことは論をまたないが、その受け手となる自治体の取組み方も問われるところである。

わが国の原子力関係者、とりわけ放射性廃棄物の処分分野の関係者の間で上山さんの名前を知らない人はいないだろう。その自治体側として動燃(サイクル機構を経て現・原子力機構)の地層処分関連研究施設、いわゆる「幌延計画」に重要な役割を果たした前幌延町長の上山利勝さんが2008年5月7日未明に亡くなった。享年82歳だった。上山さんは、1986年から四期16年にわたり北海道幌延町長として幌延計画の実現に心血を注がれた。

ここに貯蔵工学センターに始まり、幌延深地層研究センターの立地にいたる幌延計画の経緯について、町長在任中の上山さんの活動を重ねあわせて振り返ってみたい。

上山さんの葬儀は、上山さんの退任後2002年12月から町政を預かる宮本明幌延町長が葬儀委員長を務めて、5月10日に「幌延町葬」としてしめやかに行われた。宮本町長は弔辞の中で「上山さんの地方自治に果たした功績で特筆すべきは、全道的な反対の中で動燃の放射性廃棄物研究・貯蔵施設を誘致し、今日の「幌延深地層研究センター」の立地を実現させたこと。卓越した先見性、確固たる信念と行動力をもって国のエネルギー政策と地域振興を両立させ、幌延町の人口減少に歯止めをかけた」と述べ、上山町政をたたえた。また、友人代表の岡本一夫さんは故人をしのびつつ「幌延町を世界の HORONOBE にした」とした。

上山さんが幌延町長に就任したのは1986年12月。それに先立つ84年7月に幌延町議会が「貯蔵工学センター」の誘致を決議し、直ちに横路孝弘北海道知事が「誘致する考えはない」ことを表明し、さらに8月に動燃が「貯蔵工学センター計画の概要」を公表していた。85年6月には動燃は横路知事と北海道議会に現地調査を申し入れたが、知事は「調査の実施を受け入れる状況にない」との意向を表明。しかし、10月に道議会が調査決議をしたことを受けて、11月に動燃は現地で地質環境調査に着手した。86年11月には機動隊に守られて、深さ1,000 m に達する深

層ボーリングを実施するための資材がヘリコプターで搬入されていた。このように社会的にも政治的にも騒然としたなかで上山町長が誕生した。

緊迫した現地において調査が進められ、88年4月に動燃は「計画を進めていく上で支障となる点は見い出されなかった」とする地質環境調査の取りまとめ概要を公表した。その間、幌延町からは調査に対する揺るぎない協力が継続されたが、上山さんは町議会および幌延町民を見事にまとめ上げられていた。反対もしくは冷ややかな周辺の自治体はもとより、中央政界や関係省庁にもしばしば足を運び「国のエネルギー政策と地域振興の両立」を訴え続けた。

今でこそ、原子力発電を継続していく上で高レベル放射性廃棄物の地層処分が重要であるとの理解が深まりつつあるが、今から20年前においてはようやく動燃を中心として地層処分研究が進み出した頃である。その地層処分の安全性を支えるわが国の地質環境の理解が重要で、そのためには深地層研究施設を整備することが必要であるとの認識は一部の専門家の間にとどまっていた。貯蔵工学センター計画は、地上にガラス固化体を保管する中間貯蔵施設など、そして地下深部に深地層研究施設を建設する構想であった。しかし、ガラス固化体を持ち込み貯蔵することに対する懸念や反対に加えて、将来なし崩し的に最終処分場になるのではないかとする北海道内外の労働組合中心の厳しい反対行動が繰り返されていた。

上山さんは、貯蔵工学センター計画が国のエネルギー政策に貢献する事業であることをいち早く見抜いていた。相撲取りを思わせる六尺豊かな体躯と腹から絞り出されるような大きな声、誰もが引き込まれる説得力のある話しぶりで貯蔵工学センターの早期立地を訴えて回った。

88年に動燃の調査が一段落し、計画の推進が足踏み状態になったあとも上山さんは、中央政界、関係省庁への陳情の傍ら東京赤坂にあった動燃本社を訪れて私どもを叱咤激励された。90年7月には知事与党多数の道議会が反対決議し、横路知事が科技庁、動燃に計画の白紙撤回を申し入れた。その後、94年3月江田五月科技庁長官、9月五十嵐孝三官房長官が相次いで計画の見直しを発言す

るなかで、12月に町長3選を果たした上山さんのたゆみない活動が継続された。

95年4月に「幌延計画は白紙に戻すことを国に求める。なお、改めて国から放射性廃棄物を持ち込まない研究施設計画の提示があれば検討する」との公約を掲げて、堀達也氏が北海道知事に初当選を果たし、幌延問題は貯蔵工学センター計画を公表して以来10年を経たこの時期に大きな転回点に達した。

動燃は、95年12月に高速原型炉「もんじゅ」、97年3月に東海村のアスファルト固化処理施設で事故が続き、さらに、事故後の社会対応などへの批判が高まり業務運営が困難になっていた。

この時期に上山さんは「残念だが、このまま何も進まないよりは新たな研究施設計画だけでもやむを得ない」との政治的な決断を下された。98年10月に新法人「核燃料サイクル開発機構」が設立され、それまでは本業に付帯する業務とされていた高レベル放射性廃棄物の地層処分研究は、喫緊の政策課題として新法人の中核事業と位置づけられた。すでに95年12月に岐阜県・梶原拓知事、瑞浪市・高嶋芳男市長などに計画を認めて頂いていた瑞浪超深地層研究所計画において結晶質岩系の研究が具体化していた。幌延町における新たな構想に基づく深地層研究施設計画は、わが国を代表するもう一つの地層である堆積岩系の研究を促進するとともに、全国の人々が地層処分について理解を深める体験学習の場を提供することが念頭におかれていた。

動燃改革のさなかの98年2月に、「先の貯蔵工学センターを取りやめて幌延町において深地層試験を推進したい」とする申入れが科学技術庁・加藤康宏原子力局長から堀知事に行われた。申入れと同時に動燃では、見学者や国内外の研究者が利用しやすい開かれた研究施設とする深地層研究施設計画を公表した。それまで、貯蔵工学センター計画に批判的な報道が目立った北海道最大の読者数を誇る北海道新聞も新たな計画を98年2月26日付けの1面トップで好意的に報じた。

発足もないサイクル機構は、それまでにまとめ上げた計画を「深地層研究所計画」として正式に北海道知事および幌延町長に申し入れた。建設費約310億円(貯蔵工学センターは約800億円)、年間研究費35億円、人員約160

名(貯蔵工学センターは約250名)などの数字を見て上山町長は、いろいろ考えてもらってはいるが貯蔵工学センター計画に比べると地域振興の点で十分ではない。しかし、計画が具体化することは結構なことだと、新たな深地層研究施設計画にご理解を頂けた。99年11月に北海道は真田俊一副知事のもとに検討会を立ち上げ、深地層研究所の受入れを判断するために放射性廃棄物が持ち込まれることのない担保措置を求めるとする北海道知事の公約に沿って検討を進めた結果、道議会において2000年10月に北海道内への高レベル放射性廃棄物の持込みを受け入れがたいとする条例を制定するとともに、11月にサイクル機構と協定を締結した。84年の貯蔵工学センター計画の公表以来17年を経て幌延町への深地層研究所の立地が正式に決まった。

まさに、この期間は、上山さんの幌延町長在任期間と重なっている。この計画実現の背景には、幌延町長である上山さんの幌延町民を愛する気持ち、先見性、信念、行動力など、自治体側の強力なリーダーシップの存在が浮び上がる。

ところで、北海道が深地層研究所の受入れの是非を検討した99年から2000年は、最終処分法の制定時期と重なる。真田副知事の検討会においては、幌延町の研究施設が最終処分場になるのではないかと懸念を払拭させるとの視点から、最終処分地選定にあたって地元の意志が反映される法律の整備を求めている。このような自治体側の動きが、世界でもあまり例を見ない透明性の高い処分地選定制度を持つ最終処分法の整備に反映されたのではないかと考えている。

幌延計画に果たした自治体の活動は、地域社会の安全安心に重い責任を持つ自治体が最終処分問題に積極的に関わる重要性を示唆している。

幌延深地層研究センターは、深地層研究施設の建設が進むなか、2007年6月に広報施設「夢地創館」がオープンした。今後、国際交流施設の建設も予定され、地域振興を伴う波及効果が期待される。また、財団法人「幌延地圏環境研究所」が設立され、サロベツ湿原保全などの研究事業も開始されている。幌延町が人口増加に転ずる日も近いのではないかと思う。

(2008年 6月27日 記)

## 支部便り

### 関東・甲越支部「電気の史料館見学会および講演会」実施報告

2008年7月1日(東京電力(株) 電気の史料館)

「明治時代より引き継がれてきた電気作りの精神を現代に伝え、次の時代に語り継いでいくこと」を基本コンセプトとする電気の史料館では、歴史的意義のある実物や実機が数多く展示されており、日本の電気事業の120年の歴史を語る貴重な空間が広がっている。

関東・甲越支部では、原子力に関する最新のトピックスについて学ぶ機会を提供することを目的として、「電気の史料館見学会および講演会」を毎年開催している。6回目を迎えた今年の見学会および講演会は、シニアネットワークやエネルギー問題に発言する会の諸先輩方にもご参加いただき、45名の参加者となり盛況であった。

講演会では、「ヒューマンファクターに関する最近の研究紹介」と題したテーマで、東京電力(株)技術開発研究所ヒューマンファクターグループマネージャーの坂井秀夫氏から講演を頂戴した(写真)。講演では、第一線職場における作業手順や機器操作やベテランのノウハウ等を効果的に表現・伝達するための技術継承支援ツール「K-SHOW」、社内事故・災害の体系的な原因分析や対策立案を支援し再発防止を目指す事例分析手法「SAFER」が、デモを交えて紹介された。会場からは活発な質問が出され、ヒューマンファクターに関する参加

者の興味と関心の深さがうかがえた。

講演会に引き続いて行われた見学会では、参加者45名が2グループに分かれ、1890年頃に製造されたエジソン式直流発電機、1957年当時の最新鋭機であり国内最大であった旧千葉火力発電所1号タービン発電機(写真)、第2次世界大戦中に高速魚雷艇用のエンジンとして開発された国産発電用1号ガスタービン、1942年に世界最初の原子炉シカゴ・パイル1号の減速材として実際に用いられた黒鉛ブロックなどを見学し、参加者全員が電気事業・技術の歴史を肌で感じる事ができた。なお見学会に同行していただいたツアーアシスタントからは限られた時間の中で内容の濃い説明をしていただき、参加者との間で活発な質疑応答がなされた。見学会終了後はJR川崎駅で解散し、講演会および見学会は盛会のうちに幕を閉じた。

関東・甲越支部では来年度以降も引き続き電気の史料館見学会を予定しているため、本学会誌をお読みの方で電気の史料館をまだ訪ねたことのない方には、ぜひ本機会をご活用していただきたい。

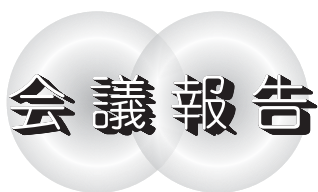
(荻野晴之、関東・甲越支部事務局/電中研、  
2008年7月30日記)



ヒューマンファクター講演会の様子



旧千葉火力発電所タービン発電機見学の様子



## アジア太平洋地域における核不拡散協力のための 透明性技術に関するワークショップ

Workshop on Transparency Technology for Nonproliferation Cooperation in the Asia Pacific

2008年2月20～22日(東京大学本郷キャンパス, 山上会館)

温室効果ガスの排出量削減やエネルギー需要の増大から、今後アジア地域を中心に原子力平和利用の大幅な拡大が予想される。原子力推進に当たっては関係国がその透明性を高め、核不拡散に関する国際的な信頼を築いていくことが重要になる。日本原子力研究開発機構核不拡散科学技術センターと東京大学グローバルCOEプログラム「世界を先導する原子力教育研究イニシアチブ」(GoNERI)の共催により、平成20年2月20～22日に東京大学本郷キャンパスにおいて「アジア太平洋地域における核不拡散協力のための透明性技術に関するワークショップ」(副題：地域での信頼醸成に向けたリモートモニタリングと安全性の高い通信の適用)が開催された。

ワークショップの目的は、核不拡散に関連する透明性について、その定義を議論するとともに、透明性、技術、および地域的信頼醸成の間の相関関係を解明すること、また透明性技術の技術的応用を促進するために必要な共有できる方向性を探ること、さらに、学生のこの分野における積極的な参加とリーダーシップの養成を目指すことであった。初日の全体セッションでは透明性全般の議論を行い、2日目および3日目は技術セッションで技術・適用性など具体的な議論を行った。

第1日目の全体セッション(発表およびパネル討論)は約60人の参加があった。全体セッションでは核不拡散に関連する信頼性・透明性に関して7件の発表があり、各国およびアジア地域、IAEAにおける取組みの現状と将来の展望が紹介された。またパネル討論において透明性の定義、役割、タイプ、手段、地域協力の適用について議論された。

第2日目の技術セッションIでは専門家および学生に

よる約30人の参加があり、9件の発表および技術の実証例とグループ討論があった。透明性の手法、必要性、リモートモニタリングや監視など技術的手法の現状と課題が議論され、実施手法の概観、実際のおよび技術的課題の抽出と解決法が発表された。またグループ討論によって、透明性を実施する際の目標、利益関係者、アプローチおよび技術について議論が行われた。

第3日目の技術セッションIIでは、専門家および学生による約30人の参加があった。学生セッションとして、東京大学、東京工業大学、早稲田大学の大学院生と学部学生から、3件の発表があった。これらの発表では、仮想的な地域的透明性ネットワーク(国内、二国間、多国間)に関する新しくかつ斬新なアイデア(双方向の情報発信、TVおよびインターネット、ロボットの活用など)が提案され、各国およびIAEA専門家から多くの意見・コメントが述べられた。まとめのセッションでは、透明性の役割、現状、問題点と今後の進め方について議論が要約された。

本ワークショップにより、アジア太平洋地域における透明性協力の現状と課題が明らかになった。ボランティアベースによる透明性向上は、国内、二国間、多国間における原子力推進にとって、IAEA 保障措置を補完する有力な手段であることが認識された。学生セッションは、ユニークなアイデアが示され、学生の教育にとって有益であった。また学生セッションについては、日本の学生ばかりでなく、アジア太平洋地域の学生も今後参加するとよいという意見もあがり盛況に幕を閉じた。

(東京大学・原子力機構 久野祐輔,

原子力機構 勝村聡一郎, 2008年 6月20日 記)



全体セッションでのパネル討論



全体集合写真

## 日米欧原子力国際学生交流事業派遣学生レポート

## ANL 滞在記

東京大学大学院原子力国際専攻  
上坂研究室 博士課程2年

前川 陽

本事業は、日本原子力学会と米国原子力学会シカゴ支部(アルゴンヌ国立研究所)の間で1979年に開始されました。その後、米欧全域へと派遣先が拡張され、現在に至っています。交換留学生の公募は毎年行われていますので、詳しくは、<http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/gakuseikouryu/index.html> をご覧ください。

私は今回、日本原子力学会の平成19年度日米欧国際交流留学生として、2008年1月から3月まで10週間の間、米国のアルゴンヌ国立研究所(Argonne National Laboratory; ANL)に滞在し、研究を行いました。滞在中は High Energy Physics(HEP) Division の Dr. Wei Gai (Wei) のグループの実験に参加し、特に日々の研究では Dr. John Power (John) の指導の下で研究を行いました。

滞在中は、ピコ秒のチタンサファイアレーザーのパルス幅計測を行いました。Wei のグループでは AWA (Argonne Wakefield Accelerator) という線形電子加速器の研究を主に行っており、その中で AWA のフォトカソードに用いるレーザーパルス幅の計測も重要なウェートを占めています。私は John の指導の下でシングルショットオートコリレータ(SSA)とストリークカメラを用いてパルス幅計測を行いました。私はチタンサファイアレーザーを用いた実験の経験はあったのですが、パルス幅計測はほとんど行ったことがなく、実験の原理やデータ処理の方法などで疑問があると、その都度 John に質問をぶつけ、議論を行いました。John は傍から見ていても大変忙しそうでしたが、私の未熟な英語にも根気よく付き合ってくれ、身振り手振りや数式・図を交えながら指導・議論を行ってくれました。John との議論はとても楽しく、また John の研究に対する姿勢を学ぶことができたのは非常に貴重な経験でした。

SSA の実験では、Fermi National Laboratory の Dr. Jinhao Ruan (Jinhao) もたびたび ANL に来て共に実験を行いました。Jinhao はレーザーの専門家ということでレーザーや SSA にとっても詳しく、そしてとても気さくで、SSA についてほとんど知らない私の質問にもいろいろ答えてもらいました。John と Jinhao との議論、そして John が私に実験を任せてくれたこともあり、10週間という短い時間でしたが非常に充実した研究生活を送ることができました。

ANL での生活面については、とにかく寒かったです。シカゴの風の強さは有名だそうです、2月の晴れた日の風の冷たさは尋常ではありませんでした。2月は日中でも $-20^{\circ}\text{C}$ 程度のときもあり、むしろ雪が降っているときの方が暖かいと感じました。ある時、同じグループの研究者がシカゴで住みやすいのは5月と10月だけだと冗

談をいっていましたが、冗談ではなかったのかもしれませんが。

10週間の滞在期間中、私は ANL 内のロッジに滞在していました。写真はロッジ周辺を写したものです。これは2月下旬に撮ったもので、雪はそんなに積もってはいませんが、寒さはまだまだ厳しいものでした。本来、このロッジは何人かでシェアするタイプのものでしたが、厳しい寒さのためか、他にロッジを使用している学生はほとんどおらず、一人で生活することとなりました。様々な国の学生との交流という点では非常に残念でした。今後 ANL に行かれる人は、可能な限り1月から3月の時期は外した方がいいと思います。ただ一方で、Wei がレンタカーの手配をしてくれたこともあり、買い物など生活面で困ることはありませんでした。Wei には直接研究指導をしてもらうことはありませんでしたが、生活面で問題はないかとよく声をかけてもらいました。それ以外でも、昼食の際には同じグループの研究者の人に外に連れて行ってもらうたりするなど、とても親切にしてもらいました。初めての米国生活ということで緊張していた私には、非常にありがたかったです。

最後に、10週間という短い期間ではありましたが快く受け入れてくれた Wei と John には改めて感謝したいと思います。そして、このような貴重な機会を与えて下さった日本原子力学会および本国際交流事業の関係者の皆様方に深く感謝いたします。

(2008年 4月16日 記)



ロッジ周辺の風景

# 「異端は異教より憎し」に共感の声

相互に相手を認め、協力していく姿勢が大事(6月号のWebアンケート結果)

「原子力学会誌」6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110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。6月号で高く評価された記事について、「内容」、「書き方」に分けてそれぞれ上位4件をご紹介します。

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	巻頭言	課題先進国日本のエネルギー政策	4.02
2	ジャーナリストの視点	負の発想を変える時期	3.90
3	「春の年会」セッション報告	地震による設備の健全性への影響などを議論—学会が柏崎刈羽発電所と中越沖地震で特別セッション	3.86
4	学会声明	地球のためのクールエネルギー原子力	3.81

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	巻頭言	課題先進国日本のエネルギー政策	3.87
2	ジャーナリストの視点	負の発想を変える時期	3.82
3	学会声明	地球のためのクールエネルギー原子力	3.80
4	連載講座	軽水炉プラント—その半世紀の進化のあゆみ(8) 日本の軽水炉開発(3) —PWRの改良標準化①	3.58

「異端は異教より憎し」と書かれた小宮山宏東大総長の巻頭言が「内容」、「書き方」ともトップでした。

## 2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 「会報」の欄の内容は、Webページへ移すことのできるページが多いように思う。
- (2) 「表紙」に関して、「クリスマスのリース」は、6月号の表紙に相応しくないのでは。
- (3) 「学会声明」に関して、学会がこのような声明を出

されたことは喜ばしい。しかし、洞爺湖サミットでどのように取り上げられたのかは、福田総理の洞爺湖サミットの報告ではわからない。ぜひ、この声明文がどのように扱われたかを学会として調査し、結果を学会誌に載せてほしい。

- (4) 「巻頭言」に関して、幅広い観点で、エネルギーバランスを考えていかななくてはならないことを痛感させられた。
- (5) 「核融合炉の連載講座」に関して、核融合炉で問題となっている壁周辺の問題がよく書かれている。欲をいえば、これから、核融合炉に若手を呼び込むために、たんたんとでなく、夢を持たせる表現も交えてほしい。

## 3. 編集委員会からの回答

- (1) 上記(2)のコメントに関して、ご指摘ありがとうございます。これはクリスマスの頃の絵でなく、説明文の取り違いによるミスです。正しくは、

「この絵は、Provence プロヴァンスの窓辺/フランス・プロヴァンス地方  
古い建物にたてつけの悪そうな窓。しかしそんな建物をいつまでも大切に使うという精神は、我々とは少し違うところだ。蔦が絡まった窓辺は絵になる。中へ一歩入るととても近代的で設備は最新だったりする。」

という説明が入るところ、絵と説明文を取り違えて掲載してしまいました。よく見ると、確かにクリスマスリースではないですね。今後、編集の過程で絵と文の取り違いを見落とすことのないようお詫びし、訂正いたします。

- (2) 上記(3)のコメントに関して、広報情報委員長より以下の回答が寄せられています。

「今回の学会声明は、洞爺湖サミットで、原子力発電を正当に評価すべきだと学会の考えをアピールしたもの。河原前学会長が、春の年会で正式に発表した直後と、サミット開催の2週間前にもプレスリリースを行なった。新聞の反応は、初めのプレスリリース後、北海道新聞で取り上げられた。そのほか、エネルギー関連委員会に所属する国会議員約160名、原子力委員、原子力安全委員に手持ちと郵送で

配付した。この声明発表がどのように作用したかは定かではないが、サミットの首脳声明には、しっかりと原子力発電が温暖化抑制の重要技術として位置づけられていることを見ると、一定の効果を上げたのではないかと考える。」

- (3) 上記(5)のコメントに関して、夢を持たせる表現も交えてほしいというコメントがあったことを、連載講座担当の編集委員に伝えました。

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。

### 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。



## ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

### 「原子力界は情報公開に積極的か」

月刊エネルギーレビュー 金木 雄司

「国民が原子力に懐疑心を抱くのは、マスコミが原子力について偏向した考え方をもち、正しく報道していないからだ」

これは、原子力関係者からちよくちよく聞かれる言葉である。かつてそうであったように、今日も原子力界では、この見方が大勢を占めているのだろうか。原子力学会に社会・環境部会が発足し、同部会での活動を通してマスコミ関係者との交流の場も増えたと聞く。しかし、原子力界には、まだまだマスコミの報道の仕方に不満を持っている人たちが多くと思う。

筆者もかつて原子力情報を提供する側に籍を置き、マスコミの報道姿勢に不満を持ったこともある。しかし、今ではメディアの立場でエネルギー・原子力関係取材の経験を積み重ねている中で、情報を提供する側が常に考えていなければならない課題が多いことも見えてきた。

要は、メディア媒体を介して情報が正しく一般に伝わらなければ意味をなさないわけで、情報提供者側は常に「地道な努力」と「謙虚さ」を持って対応することが求められていると思う。

「マスコミは話した通りのことを書いてくれない」。よく耳にする情報提供者側からのクレームだ。しかし、一步引いて振り返ってみてほしい。話の内容が難しかったのではないか、説明はわかりやすくしていたか、原子力の専門用語を連発していたのではないか、記者の意図に答えるような中身のある話だったか。

「話し言葉」は「書き言葉」とは違い、得てして話しの前後の脈絡が支離滅裂になっていることが多い。この差によって、あの人は話し方が上手だ、いや下手だ、と評価されることになる。取材側からすれば、説明を受ける際に説明内容に関連した「書き綴った」手持ち資料の有無も、報道の正確さを大いに左右することになる。

取材する側の記者の資質も様々である。情報提供者側には、相手の記者の資質を見抜く能力を持ち合わせることが求められるのではないか。原子力に素人か、ほどほどの理解者か、玄人の記者か、の見極めである。一度しか会わないかもしれない記者もいる中で、その資質を短時間に把握するのは無理かもしれないが、原子力界の広報担当には、その能力をぜひ備えてほしいものだ。

ある電力会社の経営幹部に取材した際、「広報は普通の仕事とは違う。世の中には物事に賛成、反対、批判するなど様々な人たちがいる。広報担当者は、社会には多様な意見があることを受け止めて、謙虚な姿勢を持つことが必要である」との言葉を聞いた。この姿勢が、原子力界の情報提供者のすみずみまで浸透しているとよいのだが、現実はいかがだろうか。

21世紀に入って、原子力界における過去の不祥事が内部から公にされた。これを受けて、原子力関係者はこぞって、国民からの信頼を取り戻すために物事を進めるのに透明性を高める、情報公開を進める、説明責任を果たす、と異口同音に語っている。しかし、実態はどうだろうか。筆者の取材経験からいうと、原子力界のすみずみまで浸透しているとは理解できない、というのが実感である。

2001年9月11日の米国同時多発テロ事件後から7年、国が指導するテロ防止対策の名の下に、原子力施設等の見学には制約が多くなり、原子力情報の入手も以前にはなかった制約が課されるようになった気がしてならない。原子力関係者は当初、一時的な措置だといっていたが、最近の成り行きだと半恒久的な措置に向かっているように思う。筆者がある原子力機器製造現場を取材した際に、今流行りのIT機器を使用した説明を受け、その中の1枚の資料提供を求めたのだが、拒否されてしまった。内容は公にしても差し障りのない情報である。

今の原子力界は情報提供に積極的というわけではなく、社会的責任を世間から問われ、それに介在するマスコミからの糾弾をできるだけ避けるために、今日、わが国産業全般にみられつつある事なかれ主義に向かっているように思うが、いかがだろうか。

金木雄司(かねき・ゆうじ)



月刊エネルギーレビュー編集長

1971年東京理科大学卒業後、日本原子力産業会議に入社。企画情報部長、開発部長を歴任して99年退社後、エネルギー専門雑誌の月刊エネルギーレビューの編集長を務める傍ら、エネルギーコンサルタントとしての活動を展開している。