

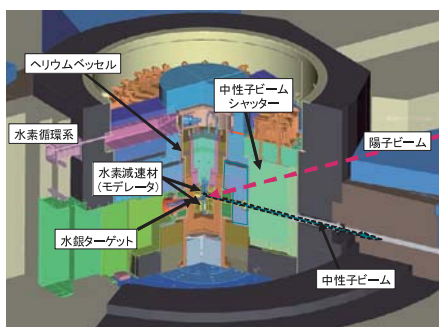
シリーズ解説

我が国の最先端原子力研究開発

No. 7

14 量子ビームが切り拓く未来(Ⅲ) 中性子利用研究の新展開

J-PARC がまもなく完成する。ここではその概要と、一足早く供用を始めるパルス中性子源と中性子実験装置について紹介するとともに、中性子利用の最新の成果と今後の展望を述べる。 大山幸夫, 池田裕二郎, 新井正敏, 森井幸生



パルス中性子源 JSNS の中心部分の構成

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(8)

32 核融合材料のメソスケールシミュレーション

核融合炉の構造材料は、中性子にさらされて劣化していく。その度合をシミュレートする手法が進展し、材料のミクロな変化をより正確に把握することが可能になってきた。

蕪木英雄, 鈴木知明, 板倉充洋

連載講座 軽水炉プラント —その半世紀の進化のあゆみ(16)

39 今後の軽水炉の開発(2) —導入計画中の軽水炉②

今回は前回に続きこれから導入が計画されている最新鋭の軽水炉を紹介する。US-APWR は、三菱が米国向けに開発したプラントだ。またアレバは、EPR を開発。そのほかにカナダや韓国でも、新型炉が導入されようとしている。

緒方善樹, 大久保努

巻頭言

1 「原子力」という言葉によせて

鷲田清一

時論

2 ITER の使命

—今世紀半ばの実用化を目指して

ITER はこれから10年かけて建設し、20年間運転する。核融合の実用化の目標は今世紀半ばだ。

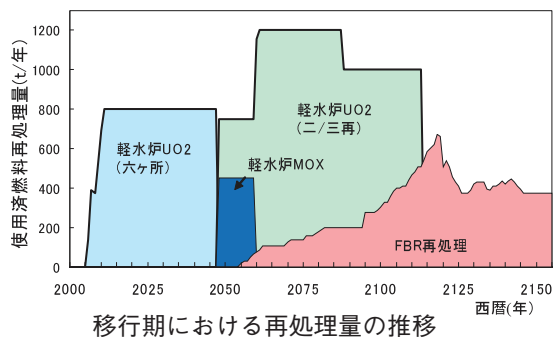
池田 要

解説

20 将来の再処理に適した技術の選定と開発方針—FBR 移行期サイクルに適した再処理プロセス技術の調査と開発方針の検討

高速炉が将来、導入されると、再処理は軽水炉と高速炉という二つの燃料を処理しなければならない。このような移行期に適した再処理技術にはどのようなものがあるのだろうか。

塚田毅志, 井上 正



移行期における再処理量の推移

26 社会に信頼される原子力を目指して—原子力と社会の共進化

社会技術の一つである原子力は、社会受容面でさまざまな課題をかかえている。技術と社会とをつなぐ回路をより広く深くし、共に進化する。この問題の解決の糸口を見出せないだろうか。

山野直樹, 藤井靖彦, 水尾順一, 鳥井弘之

表紙イラスト Split スプリト / クロアチア

スプリトはアドリア海に浮ぶリゾート島への拠点となる港町である。対岸のイタリアのアンコーナを結ぶフェリーも発着する。港に面したホテルから新年の日の出を見ることが出来たのでスケッチした。朝早く「ヤドロリニヤ」と船体に書かれた大型フェリーが接岸した。

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

アクティブ・フリートーク

44 実績を積み上げることが、信頼と社会的受容につながる—現役世代に、原子力についての想いを語っていただきました

原子力発電が安定した運転を続けてエネルギー供給面で貢献していくことが、社会からの高い評価につながる。

大井川宏之、谷川尚司、西崎崇徳
樋口奈津子（聞き手）
石橋すおみ



解説

50 安全な海上輸送の実現に向けて—海上技術安全研究所の取組み

海上技術安全研究所が行っている放射性物質等の海上輸送に係わる安全性向上のための研究や、海難事故再発防止に対する取り組みなどを紹介する。

谷澤克治、小田野直光

シニアの自論

56 第二の原子力時代に適合した原子力関係法規の整備を 宅間正夫

57 世界に飛躍するわが国原子力産業界への期待と提案 石井正則

公募記事

58 学会と共に歩む原子力研修センターの50年 杉本 純

59 発見後半世紀過ぎた人形石の近況 武藤 正

タイムカプセル記事

60 我々は今、何をなすべきか。黒木慎一
夢の原子炉の実現をめざして 堺 俊郎

談話室

61 核分裂は誰が発見したのか？(その2)—ベルリンでの化学的発見、クングエルブでの理論的解明 河田東海夫

63 地球温暖化の世紀に原子力が目指すもの 山崎亮吉

4 NEWS

- 日本原燃、MOX 燃料工場建設準備へ
- 上関原発が造成工事へ、県が埋め立て免許
- 中国電力が島根2プル計画許可書を受領
- 機械学会、震災対応で柏崎刈羽運転チーム表彰
- 放射性炭素を利用して、温暖化が土壌の炭素貯留能力に及ぼす影響を予測
- 日産と原子力機構、世界で初めてエンジン内部の潤滑オイル挙動の可視化技術開発を開始
- 肺の中にあるアスベストの種類を細胞レベルの元素分布画像から特定
- 原子力機構、第3回機構報告会を開催
- 原産がネットでエネルギー・原子力の意識調査
- 第16回環太平洋原子力会議を青森市で開催
- 向坊隆記念・国際人育成事業を創設
- 「原子力産業セミナー2010」を12月に開催
- 原産協会提供の動画番組のご案内
- 海外ニュース

会議報告

66 OECD/NEA-NSC 第9回加速器遮蔽
専門家会合 坂本幸夫、中村尚司

ジャーナリストの視点

68 北海道と原子力発電 西沢隆之

25 From Editors

31, 49 新刊紹介

「間違いだらけの原子力・再処理問題」

塩谷洋樹

「理科少年が仕事を変える、会社を救う」

笹平 朗

65 支部便り 「関東・甲越支部第3回原子力
オープンスクール」

69 英文論文誌(Vol.46, No.1)目次

70 会報 原子力関係会議案内、主要会務、編集後記

WEB
WEBアンケート

9月号のアンケート結果をお知らせします。(p.67)

学会誌記事の評価をお願いします。<http://genshiryoku.com/enq/>

学会誌ホームページが変わりました

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

「原子力」という言葉によせて



大阪大学 総長

鷺田 清一（わしだ・きよかず）

京都大学大学院文学研究科哲学専攻博士課程
単位取得満期退学，関西大学教授，大阪大学
教授を経て，07年8月から現職。専攻は臨床
哲学・倫理学。

「原子」という言葉はかつて、ときめいていた。物の原型はほとんど虚空と微小の原子からなりたっているというのがなにより衝撃だったし、「鉄腕アトム」の歌を知らないひとはいなかったし、原子爆弾もネガティブであれ「ただならぬもの」という意味でこころを騒がせるものだった。

あるときから「原子(の)力」は「発電所」という言葉と結びついて、そのイメージが大きく揺らぎだした。「潜水艦」という言葉とも結びついて、ちょっと無気味なイメージさえ漂うようになった。そしていま、放射能漏れへの恐怖とエネルギー資源としてへのそれへの依存という二極に、「原子力」のイメージは引き裂かれている……。

けれども、もっと別のときめきがいま、そこに訪れかけているようにおもう。

先年亡くなった鶴見良行さんに『バナナと日本人』(岩波新書)という名著がある。いまやこの国でももっともありふれた食べ物のひとつとなっているバナナ、フィリピン産のこの果物を取り上げ、それがわたしたちの口に届くまでの経路をたどってゆくなかで、米国を本拠とする多国籍企業の暴利やミンダナオ島の農園労働力のすさまじい搾取、フィリピンの戦後社会、列強による植民の歴史など、東アジアをめぐる現代史を、とりわけ政治・経済・文化が錯綜するその力学的構造を、立体的に浮かび上がらせたこの仕事は、〈フィールドの知〉の目の醒めるような仕事だった。そして、ごく身近なものから始め、そこからグローバルな現代史のコアへと議論を拡げてゆく、そうした眼差しと想像力のはたらかせ方は、これまで中高の社会科の教師のあいだで生徒たちの眼をぎらぎらさせるような授業の手法として活かされてきもした。

食の問題はいま、産地偽装や賞味期限の改竄など「安全性」の問題として語られることが多い。そのとき、ひとびとは消費者もしくは被害者として、その偽装工作を言いよどむことなしに責める。ちゃんと料金を払っている自分に咎があるはずはない、というわけだ。そうして思考はそこで停止する。

けれども、だれもが食の流通に無関心だったことそのことがこうした偽装を許してきたはずである。食の自給率ということもこのところよく話題にされるが、メディアからあるていど知識を得ながらも、だからといって食生活を変えるわけでもない。管理をきちっとしと行政に文句を言うばかりである。バナナの値段はだれが決めているのかという当初の疑問から、東アジアの現代政治の見えないしくみに自力でたどり着いた鶴見さんの仕事は、ここにうまく引き継がれていない。そのしくみに負ってみずからの食がなりたっているのに。

原子力発電も、おなじ種類の問題ではないかとおもう。ひとびとの多くはここでもみずからを消費者のようにおもい、エネルギー資源をこの先どうするかという問題を、「市民」としていかに引き受け、どのような仕組みに変えてゆくかを考える仕事を放棄している。わたくしも情けないことながらその少ない例外のひとりではまだない。

原子力発電をめぐるのはこれまで、コンセンサス会議やタウンミーティングをはじめ、みずからの問題としてそれを引き受けるような議論が、専門家と市民がともに当事者として対面しあうというかたちで、忍耐づよく試みられてきた。ここには、わたしたちがようやく「市民社会」の一員になれるかどうか懸かっている。その意味で、だれもがもっとときめいてよい問題であるとおもう。

(2008年 12月5日 記)



ITER の使命

今世紀半ばの実用化を目指して



池田 要(いけだ・かなめ)

ITER 機構長

東大工学部卒，科学技術庁科学審議官，宇宙開発事業団理事，駐クロアチア大使を経て，平成19年11月より現職。

「核融合は地球を救う」

今年6月，私は青森で開催された ITER 理事会の直後に開かれた原子力連合講演会に招かれた。「核融合は地球を救えるか？」というサブタイトルだったその会合では主催者が，エネルギー供給の担い手としての核融合の実現時期について，「政府としての公的な見解は2050年以降において可能性がある」ということを紹介されたので，私は「ずいぶんとのんびりしている」と思う旨を会場参加者に申し上げた。

私が役所に入った40年前は核融合の研究が世界的に始まって10年経ったところで，日本でも本格的に取り組みだして間もない時期であった。その後，JT-60の建設にいたって本格化し，エネルギー研究の一環として国際協力も進み，1985年には ITER の国際協力プロジェクトが提案された。それから20年以上の年月が経過しているが，この間に世界的にもトカマク方式のみならず，磁気閉じ込め方式による核融合研究は大きく進展しているにもかかわらず，その評価はあまり変わっていないように思えてならない。

特に実用化時期については，あいかわらず50年先のこととして，開発当初にいていたことと変わりが無いという状況では，応援団にも見放されてしまうという危機感を持つ必要がある。

現在のように地球温暖化による環境破壊が問題視され，その一方で，石油価格の高騰，化石資源の将来的な枯渇が議論されている状況にあって，代替エネルギー源として期待される核融合の研究者の側に緊張感がないとすれば不思議としかいえない。前述の青森におけるパネルでは，私のこうした疑問を提起する発言に会場から拍手があって少し救われた感じを覚えている。

この20年の間に，ITER は日本，EU，ロシアそして米国の4極によって構成した国際チームによって概念設計から工学設計へと進み，その結果をもとに，当初の4極に中国，韓国，インドの7極が建設に合意し，2006年11月には国際協定に署名している。2005年の6月には建

設サイトがフランスのカダラッシュに決まり，まだクロアチア大使を務めていた私が ITER 機構長に指名されたのはその年の秋であった。当時は長年設計や研究開発に携わってきた国際チームがドイツのガルヒンクと日本の那珂の2箇所にあって，いかにして継続性を保ちながら建設のための組織に組み込んでいくかが早速課題となった。

私は2006年の3月には大使の任を解いていただき，カダラッシュに赴任し，以来，サイトに隣接するフランス原子力庁の研究センターの一角に仮の事務所を構えて組織を立ち上げてきている。昨年の秋には ITER 協定の発効をもって正式に「ITER 国際核融合エネルギー機構」として発足し，また組織も国際チームからの移転を終了した後も職員募集活動を積極的に進め，現在では300名近い人員を擁する規模となった。一方，サイトの整備も着々と進み，設計のレビューも終了し，主要機器の製作発注段階へ進みつつある現在，日本が主要メンバーとしての役割を果たすこの国際協力プロジェクトへの理解を訴えたい。

ITER の特徴

ITER は熱エネルギー源としての核融合の科学技術を実証するために熱出力50万 kW の実験炉を10年間で建設し，20年間運転するプロジェクトである。燃料は重水素と三重水素(トリチウム)を使い，真空容器に閉じ込めるプラズマの容積は約840 m³。超伝導技術の進歩により，消費エネルギーの10倍以上の出力を目標としている。

トリチウムという放射性の物質を用いるため原子力施設としての法規制を受ける。立地するフランスの規制では「基礎的な研究施設」という分類になる。

ITER の建設費の当初見積もりは約5,000億円とされており，加盟各極はこのうち約9割に相当する投資を物納で提供する。

ITER の特徴は，このようなトカマク装置を構成する

真空容器、超伝導の磁場発生装置とこれを支える電源系統、冷却システムなど、主要な設備装置を各極が分担して製作納入するところにあるが、建設、運転する過程で得られる知識はすべて共有することになる。成果として、どの参加極も独自に ITER を建設する能力を有することになり、併行して行われる研究開発とあわせ、次の段階とされる実証プラントの建設にいかに進むかは各極の意欲次第ということである。

EU はホストとして建物のすべてを提供するというところで建設費全体の半分近くを負担する。ここで、特筆すべきは地元であるフランスの地域の貢献である。カダラッシュの所在する PACA 県は地中海に面するマルセユからツーロン、内陸のアヴィニオンなどをカバーするが、建設費の約 1 割、1 極に相当する負担は PACA 県が事業として担っている。

ITER の現状

立地条件、規制条件を反映し、かつ最近の知見を反映したデザインレビューをこれまでに終了したが、その結果を基に、原子力施設として設置・運転許可を得るための手続きも進めている。

また 2008 年に入りサイトの準備工事も本格化し、トカマク建屋を含め、20 棟ほどの建物が建設されるための長さ 1 km、幅約 500 m のプラットフォームを造成する工事も着実に進展している。来年にはトカマクの建屋の基礎工事も予定される。

各極が搬入する機器の輸送に備えた約 100 km に及ぶ運搬道路の拡幅強化工事も地元の PACA 県の貢献のもと進展している。

また、デザインレビューの結果を受けて設計の基本仕様を確定し、各極との連携を基に建設のスケジュールを確認したのは今年の 6 月に開催された青森の理事会でのことである。必要な資金を確保し、企業との製作契約を結び、実行する上でも事故なく、定めた時期どおりの納入ができることを前提としたもので、当面、2017 年までに建設を終了し、1 年間の調整を経て 2018 年 7 月のプラズマ点火を目標としている。

ITER 機構の職員はこれまでフランス原子力庁のカダラッシュ原子力研究センターの敷地内に設けられたプレハブの仮設建屋で仕事をしているが、この秋には一部が ITER サイトに建設された建屋に移転する。これも仮設ではあるが、本格的な管理棟が 2011 年に完成するまでの本部棟になる。

2008 年現在はすでにプロジェクトのすべての面で建設段階に入りつつある。

ITER の課題

ITER は実験炉に相当し、実用化に進むためには次のステップが必要である。このため、すでに日本と EU は共同して「幅広いアプローチ」として材料の耐久性に関する R&D などに着手している。ITER が建設を終えるころには次のデモプラントの建設へ進む決定がされ、早ければ、今から 30 年ほどの後には核融合による発電が行われていることも想定されている。

そして 2050 年頃には商業プラントがいくつか稼働していると考えられることに大きな意味がある。

まず、2050 年までに温室効果ガスの排出を半減しようとすれば、通常の原子力発電所だけでもそれまでに毎年、相当の規模で導入される必要がある。一方、地球上のどの地域でも必要な規模の原子力発電所が建設できるという状況にはない。したがって、核融合への期待は確実に大きなものがある。

また ITER 自体がプロジェクトの達成のために追加的な研究開発投資と人材の育成を必要としており、そのためには核融合をエネルギー源として実用化するまでのこのような将来を見据えた投資が行われなければならない。企業の側における R&D、設備投資そして大学教育も含めた人材の育成の必要性を考える時にも、社会において核融合を資源、環境の両面からぜひとも必要なエネルギー源として位置づける将来ビジョンが共有されていなければ、これは容易でない。

今世紀半ばの実用化を目指した貢献を

日本は半世紀にわたり着実に原子力開発利用に取り組んできており、核分裂による原子力発電の利用ではさらに FBR の開発に進もうとしている。日本は同時に、核融合についても研究開発を進め、ITER の国際協力が始められた当初から EU、ロシアそして米国と並び一翼を担ってきている。

2050 年は、はるか先ではない。地球規模のエネルギー資源問題、環境問題の解決に資するために世界中がエネルギー供給技術について幅広い選択肢を有し、地域の特性に合わせて適切に活用できる状況を作り出す必要がある。

核融合が核分裂と並んで利用される時代を予見し、むしろ「核融合は地球を救う」と確信して、その実現に向けて日本が大きく貢献することの重要性についてできるだけ多くの人々と認識を共有したいと考えている。

(2008 年 10 月 28 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。

日本原燃、MOX燃料工場建設準備へ 降雪期前に仮設道路整備など

日本原燃は10月15日、MOX燃料工場の建設準備工事を開始した。同工場は現在、原子力安全委員会が安全審査中だが、建設予定地の青森県・六ヶ所がまもなく本格的な降雪期に入るため、工事の安全確保と効率向上などを考慮した。本格着工時の基礎掘削工事に利用する200トンクレーンなどの大型重機が通行可能な仮設道路を設置するとともに、掘削工事に用いる鋼材の仮置き場を整備、鋼材も順次搬入する。工事期間は2か月程度を予定している。

同社の経産省への事業許可申請は05年4月、07年

7月に安全委員会に諮問された。その後、耐震安全性のバックチェックを実施、今月7日には再処理施設の評価報告書と併せて、同工場の申請書の一部を補正した。海上音波探査の結果を反映、一部断層を活断層へと変更し、横浜断層の再評価も追記した。基準地震動 S_s は変更していない。

なお同工場は現在、申請上は07年10月着工、12年10月竣工としているが、今後、安全委員会の審査の状況により、これらを見直すことになる。

(資料提供：日本原子力産業協会)

上関原発が造成工事へ、県が埋め立て免許

中国電力は10月22日、山口県から上関原子力発電所建設に向けた用地造成のための公有水面埋立て免許を受けた。同社は来春までに埋立て工事を開始、併せて国に原子炉設置許可申請を提出する見通し。

免許は県庁で、二井関成知事が山下隆社長に手交した。二井知事は多くの意見書への真摯な対応、安全確保、環境保全など6項目の要請書を提出。原子力への県民理解を得る努力とともに、事前の活断層調査、耐震安全設計に万全を期すことも求めた。県は、要請事項や免許条件への対応状況、環境保全対策などを調査・監視するため、監視チームを設置し

た。

上関原子力発電所の用地は約33万 m^2 、このうち国が所有する公共の公有水面は約14万 m^2 。免許申請は今年6月で、上関町は9月、埋立て同意の意見書を県に提出した。同社は陸域も森林法に基づく開発許可を申請済。上関町は同意し、県の審議会も了承を答申している。

上関は、1号機(ABWR, 137.3万kW)が10年度着工し15年度運開、2号機(同)が13年度着工し18年度運開の予定。

(同)

中国電力が島根2プル計画許可書を受領

中国電力は10月28日、経済産業省から島根原子力発電所2号機のプルサーマル実施の原子炉設置変更許可を受けた。

経済産業省で薦田康久・保安院長が、同社の末廣恵雄・副社長電源事業本部長に許可文書を手交した。薦田院長は、「引続き安全に万全を期し、計画

を進めてほしい」と要請。末廣副社長は、「安全第一に、地元の理解を得ながら進めたい」と応えた。

中国電力は許可について、地元自治体に説明するとともに、「環境が整い次第、MOX燃料製造の準備を進めたい」(末廣副社長)としている。

(同)

機械学会，震災対応で柏崎刈羽運転チーム表彰

日本機械学会の動力エネルギーシステム部門(部門長=佐藤幹夫・電力中央研究所エネルギー技術研究所研究参事)は10月24日、横浜市内で年次セミナーを開催し、あわせて永年にわたる功績や社会的貢献のあった個人・団体に対する表彰を行った。今回は、昨年の中越沖地震時にプラントの冷温停止操作を完遂した東京電力・柏崎刈羽原子力発電所の運転チーム、秋山守・東京大学名誉教授らが受賞の栄誉に輝いた。

本年度は、動力エネルギーシステム分野での顕著な貢献を讃える「部門一般表彰・貢献表彰」を柏崎刈羽2, 3, 4, 7号機の運転当直・点検チームが受賞

した。

地震発生時に運転中または起動中だった4基のうち、4号機に携わっていた入沢善孝・柏崎刈羽発電所当直長は、「『ガツン』という強い衝撃を受け、すぐ『スクラム』を感じた」と、あの日のすさまじい揺れを思い起こした。その後の所内一同の連携により、プラントの冷温停止を達成したことについては、情報を共有し、正しく伝えるコミュニケーションの重要性を学んだとして、これら震災で得た教訓を「肝に銘じて任務に当たっていく」と所感を述べた。(同)

放射性炭素を利用して，温暖化が土壤の炭素貯留能力に及ぼす影響を予測—より高精度の地球温暖化予測手法の確立に期待

日本原子力研究開発機構(原子力機構)と森林総合研究所は、アジアフラックスネットワークの観測地の一つである岩手県安比森林気象試験地で、土壤中の有機炭素に含まれる放射性炭素の割合(同位体比)から冷温帯ブナ林土壤の炭素貯留能力を推定し、地球温暖化により、現在は主要なCO₂放出源ではない比較的滞留時間の長い土壤有機物からの炭素消失が促進される可能性があることを明らかにした。

土壤には、大気や地上植物の数倍に及ぶ炭素が蓄積されている。一方、地球温暖化が微生物による土壤中の有機炭素の分解を促進させ、土壤からのより一層のCO₂放出と、それに伴うさらなる温暖化の加速の可能性が危惧されているものの、これまで長期的な温度上昇に対する土壤の応答については解明されていなかった。

本研究は、土壤中の滞留時間が数百年～数千年の有機炭素は宇宙線起源の放射性炭素の同位体比で、また、数年～百年程度のそれは1960年代に行われた核実験起源の放射性炭素の同位体比で特徴づけられることに着目し、土壤有機物の放射性炭素同位体比を測定した結果、冷温帯ブナ林土壤が様々な炭素貯留能力を持つ有機物の複合体であることを解明した。

さらに、各複合体の温度変化に対する応答予測の

結果から、21世紀末までに予想される地球温暖化の進行に伴い、全土壤有機炭素の約50%を占める滞留時間が数十年～二百年程度の土壤有機物からの炭素消失が促進され、CO₂放出量の増大に重要な役割を果たす可能性があることを明らかにした。

このことは、土壤中での滞留時間が数十年～二百年程度の有機炭素の蓄積量を地球規模で算定することにより、将来の地球温暖化に対する土壤の応答の規模と時期をより正確に予測できることを示唆するものである。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press2008/p08102101/index.html>)

(資料提供：森林総合研究所、日本原子力研究開発機構)



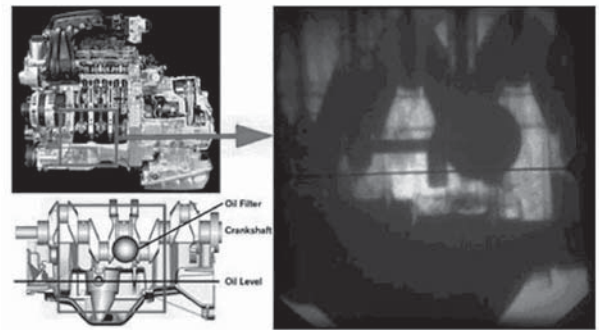
岩手県安比森林気象試験地での土壤採取

日産自動車と原子力機構，世界で初めてエンジン内部の潤滑オイル挙動の高速可視化技術共同開発を開始—CO₂排出量削減に向け，低燃費エンジン開発を加速

日産自動車(株)(日産)と原子力機構は，車の低燃費化によるCO₂排出量の削減に向けて，エンジンや駆動系部品内部の潤滑オイルの挙動を可視化する技術の共同開発を開始した。

自動車のエンジンにとって，潤滑オイルの挙動によるフリクション(摩擦)ロスを低減することは，CO₂排出量削減のための重要な課題である。これまでは高速回転するエンジン内部の潤滑オイルの複雑な動きを可視化計測，あるいはシミュレーションする技術がなかったため，フリクションロスの要因を明確にすることができなかった。今回の共同開発に先駆けて，両者はエンジン内部の潤滑オイル挙動の高速撮影に関する技術的検討を行った。その結果，「高速撮影中性子ラジオグラフィ」という，軽金属製容器内部の水やオイルの流動を中性子で透過し，スローモーションで観察・計測する高速可視化計測・解析技術を応用することにより，エンジン内部の潤滑オイルの挙動も可視化できることを確認した。

今回の共同開発では，世界で初めて高速で運転するエンジン内部の潤滑オイル挙動解析を実現するための撮像システムと解析手法の開発を進めていく。原子力機構は原子力分野での中性子計測のノウハウ



エンジン内部の潤滑オイル挙動の高速撮影(例)

中性子ラジオグラフィで撮影したエンジン内部の様子

を生かし，エンジンに適した撮像システムの検討と流体挙動解析手法の開発を，日産はエンジン撮像システムの製作と実際のエンジンを用いた可視化実験を行い，エンジン開発・設計への技術適用を，共に原子力機構東海研究開発センター原子力科学研究所の研究用原子炉 JRR-3 を活用し，進めていく。両者の連携により，最適なオイル循環設計を可能とし，低フリクション設計の最適化による低燃費化を加速させ，CO₂排出量の削減を目指す方針である。(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press2008/p08111001/index.html>)

(資料提供:日産自動車(株),日本原子力研究開発機構)

肺の中にあるアスベストの種類を細胞レベルの元素分布画像から特定—アスベスト肺の早期診断に途

群馬大学と原子力機構は，原子力機構が開発した大気マイクロPIXE分析技術を応用して，外科的な手術を必要としない気管支鏡などで採取できる極微量(数mg)の肺組織内の多種の元素の2次元分布を，1 μ mの解像度で画像化する分析法を開発し，肺組織内のケイ素，鉄，マグネシウムの量や分布に，アスベストの吸入の有無による明確な違いが認められることを初めて明らかにした。今回開発した分析法は，わずかな肺組織を用い，肺組織内のアスベストに含まれる元素の種類や量を正確に分析可能であ

ることを特長としている。

アスベストは，肺線維症や肺ガンの原因物質で，発病までの潜伏期間が数十年と長いことから，「静かな時限爆弾」ともいわれているが，吸い込んだアスベストの種類や量，肺の中での分布，組織への取り込まれ方などを特定するためには，これまで外科的な手術により約5gの肺組織の採取を必要としていた。

今回，様々な元素の分布とその量を調べることができる大気マイクロPIXE技術を応用し，極微量の

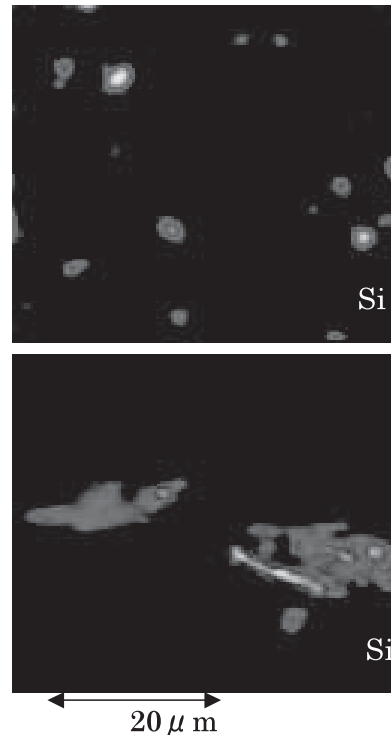
肺組織の中の微小なアスベストの可視化に挑戦した。アスベストの主成分であるケイ素、マグネシウム、鉄のそれぞれについて、組織内の元素分布を計測・解析することにより、微量組織内にある数 μm のアスベスト繊維の位置や形態を画像化することに成功した。さらに、各元素の比率から、アスベストの種類を同定できることも確認しており、アスベストが原因となる病気の早期の診断に途を開いた。

これと並行して、同じ肺の組織を大気マイクロPIXE法と免疫組織染色法で調べる研究をも進めた結果、アスベストの主成分であるケイ素の分布と、肺線維症の発病に関係すると考えられているFasタンパク質の分布との相関が明らかになりつつあるなど、病因の解明にも期待が寄せられている。

本研究は、群馬大学21世紀COEプログラム「加速器テクノロジーによる医学・生物学研究」の一環として、群馬大学と原子力機構との共同研究で実施した。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press2008/p08111101/index.html>)

(資料提供：群馬大学、日本原子力研究開発機構)



元素分析により画像化したケイ素(Si)の分布
正常な肺(上)では分散しているが、アスベストを吸い込んだ肺(下)では塊状になっている。

原子力機構、第3回機構報告会を開催

原子力機構は平成20年11月5日、東京・有楽町の朝日ホールにおいて、「第3回原子力機構報告会—未来につなぐ原子力」を開催した。約600名を超える多数の参加者で、盛況であった。

報告会では、岡崎俊雄理事長の開会挨拶に続いて、中島一郎理事が、「我が国の将来を支えるエネルギー研究開発」と題して、原子力機構の事業についての基調報告を行った。その後、三代真彰理事から、「放射性廃棄物の着実な処理・処分」と題して、岡田漱平理事から、「量子ビームが拓く新しい世界」と題して、それぞれの活動状況と今後の計画について報告した。

特別講演は、(株)東レ経営研究所の佐々木常夫代表取締役社長から、「私にとっての会社・仕事・家族」をテーマに、経営戦略としてのワーク・ライフ・マネジメント、タイムマネジメントのあり方や、仕事と家族の両立などについて、ご自身の体験に基づ



報告会の様子

き話され、職業人・組織人にとって示唆に富む講演となった。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/news2008/081112/index.html>)

(資料提供：日本原子力研究開発機構)

原産協会がネットでエネルギー・原子力の意識調査、立地地域では原子力に高い理解

日本原子力産業協会は10月28日、全国と立地市町村を対象に行った「エネルギー意識調査」の概要を発表した。

インターネットで質問を送付し、9月下旬の6日間に2,235人のサンプルを回収。比較のための補充調査として、別に原子力発電所の立地市町村を対象に243人からも回答を得た。分析は男女別、年代別に行った。

関心のある社会問題について聞いたところ、高い順に、(1)食品の安全性71%、(2)原油価格の高騰64%、(3)地球温暖化62%、(4)年金・社会福祉60%、(5)凶悪犯罪46%、(6)消費税45%、(7)地震43%、(8)ゴミ・廃棄物42%、(9)少子高齢化38%、(10)エネルギー安定供給30%、(11)原子力発電18%、(12)人口増加9%。「エネルギー安定供給」と「原子力発電」については、全国的にかなり関心が少ないことが浮き彫りとなった。しかし全国ベースと原発立地市町村を比較すると、「原子力発電」に対する関心では、全国が18%に対し、立地市町村では43%と高まっている。「身近

な問題」について尋ねた場合も、「原子力発電」との答えは、全国が6%に対し、立地地域では41%と高い。「今後も原子力発電が必要」とする人は、全国で53%に対し、立地地域では62%に上る。

今後10年に期待する電力供給源については、全国で高い順に①太陽光86%、②風力55%、③水力32%、④原子力27%、⑤バイオマス26%、⑥天然ガス19%、⑦石油4%、⑧石炭2%——の順だが、原発立地市町村では「原子力」が41%と高くなった。

一方、トラブル時のマスコミ報道について、「不安をあおっている」と回答した人は、「そう思う」と「ややそう思う」を足すと60%と過半数を超えた。

今回の世論調査は、政策提言活動や地域対話集会のための基礎資料とする目的で行ったもので、今後、さらに詳細に分析・検討することになっている。また、今後とも「定点観測」的に同様の意識調査を継続する予定である。

(資料提供：日本原子力産業協会)

第16回環太平洋原子力会議(16PBNC)を青森市で開催

原産協会は日本原子力学会とともに、10月13～18日の5日間、「持続可能な原子力の将来に向けた環太平洋協力」をテーマに、第16回環太平洋原子力会議(16PBNC)を青森市で開催した。

日本、米国、韓国、中国、台湾など19か国・地域から約800人が参加し、400編のペーパーが発表され、18社がブース出展した。青森の産業や観光を知ってもらおうと、県庁職員の方々による青森ブースも

展開され、県内の原子力施設ツアーも実施した。

公開セッションでは、京都大学の山名教授が「これからの環境・エネルギーと再処理工場」と題して講演。また、東通村の伝統芸能「能舞」、津軽三味線の演奏なども披露された。

PBNCは2年ごとに開催されるが、次回は、2010年にメキシコのカンクーンで開催の予定。

(同)

向坊隆記念・国際人育成事業を創設、WNU 夏期研修への参加を支援

東大総長、原子力委員会委員長代理、日本原子力産業会議(現：原産協会)会長などを歴任した故向坊隆氏の遺功を後世に託すため、原産協会は、原子力分野において国際的な視野を持ち、国内外で活躍・

貢献できる若手リーダーの育成を目指し、「向坊隆記念国際人育成事業」を創設した。今後10年間にわたり、国内外派遣支援、奨学金、研究費助成、論文表彰などの人材育成支援事業を展開していく予定。

本事業の初年度の活動として、世界原子力大学 (World Nuclear University: WNU) が実施する来年

の夏季研修 (Summer Institute) への日本人受講生派遣を支援する。
(同)

「原子力産業セミナー2010」を12月に開催

原産協会は12月13日、原子力産業の理解促進、企業の新人採用支援を目的に、大学生、大学院生、高等専門学校生を対象とした合同企業説明会方式の「原子力産業セミナー2010」を東京・新宿エルタワー30階「サンスカイルーム」にて開催する。

本セミナーは、今回で3回目の開催となり、原子

力カルネッサンスに伴う世界的な人材の需要増加を反映して、東芝、日立、三菱などの国内主要メーカーに加え、アレバ(仏)、テネックス(露)などの大手海外メーカーなど、45社の国内外の原子力に関わる企業・機関が出展等を行う。
(同)

原産協会提供の動画番組のご案内

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。

10～11月の番組は以下の通り。

・第52回国際原子力機関(IAEA)総会レポート

(10/17公開)

・第16回 PBNC 環太平洋原子力会議レポート

(10/31公開)

・「マキシマラソン in Japan」(11/17公開)

(同)

海外情報

(情報提供：日本原子力産業協会)

[国際]

IAEA 総会開催 国際的期待の中で権限、組織強化が課題

国際原子力機関(IAEA)は9月29日よりオーストリアのウィーンで第52回通常総会を開催した。あわせて、「IAEAの将来の役割」をテーマに2日間の科学フォーラムも開催した。総会は10月4日まで開催される。

M・エルバラダイ事務局長は、「岐路に立つIAEA」と題してスピーチし、原子力発電、原子力安全、および核不拡散、保障措置、核セキュリティの3S問題などあらゆる分野で、IAEAが厳しい決断を迫られていると指摘。IAEAに、より強い権限、最新の技術力、関連情報へのアクセス権、十分な資金と人材を供給するよう、加盟各国に協力を要請した。

また同事務局長は、「2030年までに原子力発電設備容量は現状の2倍に拡大するが、総発電電力量に占める原子力の割合は14%に留まる」と指摘。その

一方で、あらゆる国は平等に原子力発電を利用する権利があるとした上で、「今後は原子力導入を検討する途上国に対する支援の機会がますます増える」との見通しを示した。

また、原子力発電利用の拡大に伴い、使用済み燃料管理や放射性廃棄物処分への対応が重要な課題になると指摘し、「地層処分は技術面で完成されているものの、実際に地層処分場の操業が開始しない限り、世論の理解を得ることは難しい」と述べ、「地層処分分野の先進国から後進国への情報提供にあたっては、IAEAが重要な役割を担う」と、両者の橋渡しとしての役割を強調した。

日本からは松田岩夫参院議員(元内閣府特命担当大臣)が政府代表として出席。講演の中で、「世界的な原子力カルネッサンスの潮流にあるが、3Sに基づく環境整備が肝要だ」と強調した。また松田代表は、IAEA次期事務局長への天野大使擁立を改めて強調し、広く各国の支持を求めた。

IAEA 耐震安全活動の中心として 国際耐震安全センター設置

国際原子力機関(IAEA)は10月3日、原子力関連施設を地震の影響から防護するための対策調整組織として、「国際耐震安全センター(ISSC)」をウィーンのIAEA本部・原子力安全局内に正式に設置したと発表した。

昨年7月、世界最大の原子力発電所である日本の柏崎刈羽発電所が設計地震動を超える地震により被害を被ったことから、IAEAでは国際的な連携・調整によって世界中の原子力施設を地震の影響から防護する必要性を痛感。同時に、原子力施設の構造上の耐久性に国際的な関心が集まったことを強く認識した。こうしたことからIAEAは、各国が強力な地震による原子力発電所への影響を緩和し、災害評価するのを支援するため、耐震安全性に関する諸活動の中心組織としてISSCの設置を決めたとしている。

ISSCの主な役割は、(1)原子力施設に対する大地震の影響を緩和、回避するための知見を国際的なコミュニティ間で共有できるよう促す、(2)助言サービスや訓練コースの提供を通じて加盟各国を支援する、(3)加盟国における過去の地震経験を活用して耐震安全性を強化する——など。

これらを果たすために、ハイ・レベルな専門家達が世界中の学界や産業界、および原子力安全当局から集められ、科学者委員会としてISSCのプログラム活動をサポート。彼らの専門分野は構造地質学や地震学、地震動評価、地質工学、構造工学、原子力設備工学、地震リスク——などとなっているが、IAEAからも7名の職員が加わってISSCを構成している。また、日本と米国はセンターの創設に必要な初期基金の特別拠出を行った。

ISSCのリーダーを務めるIAEAのA・ゴドイ工学安全課・課長代行は、「安全性を最優先事項に世界中から得られるだけの専門的知見を蓄え、原子力施設の運転員や規制当局者が大型地震に適切に対処できるよう支援することは極めて重要なこと」と強調。ISSCの創設は、加盟国に対する最新の安全基準策定とその適用に関わる支援を通じて、IAEAが30年にわたり実施してきたアクティブな諸活動の集

大成、との認識を表明した。

[英国] 原子力開発室を設置 英国・ビジネス規制改革省内に

英国・ビジネス規制改革省(BERR)のJ・ハットン大臣は9月17日、英国政府が新設した「原子力開発フォーラム」第1回会合の席上で、英国において一刻も早く新たな原子力発電所の建設が可能になるよう全力を尽くすとの見解を表明するとともに、その一環として、BERR内に原子力開発室(OND)を設置したことを明らかにした。

「原子力開発フォーラム」は、英国原子力産業界のリーダーや政府の重要人物を集めた協議の場で、BERRの大臣自らが座長を務める。主な役割としては、英国において可能な限り早急に新規原子力発電所を建設するため、国内のサプライ・チェーンや電気事業者および製造業者とも連携。ONDが適切な環境作りをしていく上で必要となる支援や助言を提供していくとしている。

初会合でハットン大臣は、「原油やガスの輸入依存を軽減し、温室効果ガスの排出を抑えるには、新たな原子力発電設備がなんとしても必要だ」と断言。英国内に一刻も早く新規の原子力発電所を建設するためにはあらゆる努力を惜しまぬ覚悟であると宣言した。

また、国内の製造業者が新規原子力発電所の建設需要で契約を獲得する絶好のチャンスである点にも言及し、民間部門で新たに約200億ポンドの投資と10万人分の雇用創出が見込まれるとの予測を明らかにした。

一方、大規模な原子力開発を計画している国々との競争激化という点については、英国の強力なサプライ・チェーンが必要な技術力と高性能な機器の提供という点で理想的な立場を占めることになると指摘。ただし、英国内および世界の原子力ルネサンスに乗じて国内のサプライ・チェーンが一層付加価値の高い事業活動を展開し、世界市場における競争力を高められるようにするには、さらなる支援と努力が必要との考えを提示した。

ONDについては、BERR内既存の原子力部門における現在の業務を足場に、これを保持しつつ関連

部門から新たなスタッフを投入、総勢40名ほどに統合した。議長および実質的な責任を担う行政官の下に、①新規原子炉、②原子力政策、③核不拡散政策、④原子力戦略の4部署を設置。「原子力開発フォーラム」の事務局は④の所属になる。

ONDの主な役割の一つである「英国における原子力投資の促進」に関しては、具体的に、次のような課題に取り組むとしている。すなわち、(1)事業者が早急に新規の原子力発電所を建設・操業できるよう、また、それらの発電所が公的な補助金を使わずにフルに性能を発揮できるよう支援する、(2)原子力関係企業にとって英国が世界でも最良の市場となるよう努める、(3)英国を含めた全世界の原子力開発計画に対して、付加価値の高い事業活動を提供できるよう、世界レベルで競争力のあるサプライ・チェーンを創出・支援する——など。

[フランス]

フランス電力、英国原子力市場での台頭狙い BE社を125億ポンドで買収

フランス電力(EDF)は9月24日、長期間にわたって難航した交渉の末、英国のブリティッシュ・エナジー(BE)社を125億ポンド(1株当たり774ペンス)で買収することで両社が最終的な合意に達したと発表した。

これにより、英国の8サイトで稼働する軽水炉1基とガス冷却炉14基がEDFの所有となるほか、新規原子炉の建設に適したサイトの所有権も同社に移ることになった。ただし、実際的な買収はEDFの100%子会社であるレイク・アクイジションズ社を通じて実施される予定で、レイク社はブリティッシュ・ガス社の親会社であるセントリカ社にBE社株の25%を売却することで了解覚書(MOU)に署名。セントリカ社は英国で新たに建設される原子力発電所から25%の電力を受け取ることになる。

また、BE社株の36%を「原子力債務基金」で保有していた英国政府は、その売却益である44億ポンドが同基金に還流されるとしたほか、その他のBE株の売却益を加えれば既存の発電所の廃止措置債務を賄うことも可能だとしている。

一方、EDFは買収交渉が頓挫した場合の予備計

画として入手していたウィルファ・サイト近郊の土地の売却に合意。このほか、すでに原子炉が閉鎖されたエセックス州のブラッドウェルやケント州のダンジネス・サイトの土地も、新規原子炉の建設用としてドイツのE.ON社やRWE社などの企業に売却している。また、これらの売却が済んだ段階で、EDFはサマセット州のヒンクリーポイント・サイトとサフォーク州のサイズウェル・サイトに各2基、合計4基のEPR(欧州加圧水型炉)を建設・操業すると発表しており、初号機の完成は2017年になる計画だ。

今回の買収交渉を支援してきた英国ビジネス規制改革省(BERR)のJ・ハットン大臣は、「原子力発電所の操業経験が豊富で、新規原子炉を建設する財力にも恵まれたEDFに売却が決まり非常に喜んで」とコメント。新規原子力発電所の建設や操業、廃止事業が国内の原子力供給業者の活性化や英国の原子力発電シェアの拡大につながることへの期待を表明した。

仏アレバ社と米ノースロップ・グラマン社 米で大型機器の製造施設

仏アレバ社は10月23日、米国の新規原子力発電所向けの大型機器を製造するため、米国最大の造船企業であるノースロップ・グラマン社・シップビルディング部門と共同で、世界最大規模の原子力機器製造・エンジニアリング施設をバージニア州ニューポート・ニューズ市に建設することになったと発表した。30年ぶりに原子力発電所新設に舵を切った米国を舞台に、既存の枠組みを越えた新たな原子力サプライ・チェーンが構築されつつある。

この施設はアレバ社が開発した第3世代+の原子炉設計であるUS-EPR(米国の規制に合わせた欧州加圧水型炉)用の主要大型機器を製造するためのもの。同社は過去30年以上にわたって、フランス・シャロンのサン・マルセル工場で世界の原子力発電所向けの大型機器を製造してきた。今後はノースロップ・グラマン社の技術と経験を活用することによって、米国内においてもUS-EPRの製造サプライ・チェーンを確保し、米国に安全でクリーンな電力を安価でもたらすようなエネルギー供給構造の多様化に貢献していく考えだ。

新たな製造施設建設のために、アレバ社はノースロップ・グラマン社と67対33の出資比率で「アレバ・ニューポート・ニューズLLC」を設立。ニューポート・ニューズ市のノースロップ・グラマン社に隣接する30万平方フィートの敷地に、今後、35年間に米国で新設される原子炉のための圧力容器や蒸気発生器、加圧器などの主要機器を供給できるフル・スケールの製造施設を3億6,000万ドル以上の資金を投じて建設する。建設工事は来年前半にも開始される見込みで、完成すれば地元バージニア州に常勤・非常勤を含めて500人分の雇用が創出されるとしている。具体的な完成予定年は公表されていないが、非公式には2011年になると伝えられている。

[イタリア] イタリア 規制局設置で法案審議 2013年までに新規原子炉の着工目指す

イタリアのC・スカヨラ経済開発相は10月16日、経済協力開発機構・原子力機関(OECD/NEA)の設立50周年記念特別会議で演説し、「2013年までにイタリアで新規原子力発電所の建設を開始し、2030年には電力需要の25%を原子力で賄いたい」との抱負を表明。4月に発足したS・ベルルスコーニ政権がすでに原子力安全規制機関を設立するための法案審議を始めていることを明らかにした。

演説の中でスカヨラ経済相はまず、①エネルギーの供給保証、②競争力のあるエネルギー源の確保、③地球環境保全、という3つの課題解決に大きく貢献できるエネルギー戦略として、イタリアの現政権が原子力開発利用の再開を決定したことを改めて明言。同国で1987年の国民投票後、国内の原子炉4基すべてを閉鎖したことは直接経費、間接経費を含めて500億ユーロの出費につながるなど「恐るべき誤り」だったとの見解を示した。

同相によると、イタリアの近年の発電コストは欧州の多くの国々と比較して3割増しとなっており、エネルギー・ミックスの6割以上を輸入天然ガスに頼っている。このため、同相は原子力こそコスト高と輸入依存の軽減、そしてCO₂の排出抑制という問題を同時に解決可能な方法ととらえており、2013年までに新規原子炉の建設を開始できるよう、現議会の

の任期中に規制上、技術上の諸条件を整えることをベルルスコーニ政権の最初の目標とする考えであることを明らかにした。

イタリアではこの演説に先立つ14日、すでに議会上院の生産活動委員会が国の原子力安全規制機関の設置条項を含む法案を承認。同法案は今後、下院や上院で審議されることになるが、スカヨラ経済相はこの機関の具体的な機能として、建設サイトや適切な技術を選択するための基準制定、認可手続きの簡素化、土地収用に伴う住民への補償の枠組みの制定、廃棄物管理および廃止措置に関する戦略の策定——などを挙げている。

[カナダ] キーン安全委員が辞意表明

今年1月にカナダ原子力安全委員会(CNSC)の委員長職から常勤委員への降格を命じられていたL・キーン委員は9月23日、CNSCからの辞意を表明した。

同委員は昨年、CNSC委員長としての権限でカナダ原子力公社・チョークリバー原子力研究所で停止中だったNRU炉の運転再開を、安全上の理由から差し止めていた。しかし、同炉の停止長期化は医療用アイソトープの深刻な不足を招く事態となったため、カナダ議会は昨年12月、緊急時立法によって同炉の運転を再開。G・ルン天然資源相はキーン委員長が職務を誠実に果たしていないとの理由で降格処分に付していたもの。

すでに処分撤回を政府に求める訴訟を起こしているキーン委員は、辞意の理由をS・ハーバー首相に宛てた書簡の中で明示。「係争中の身である私が、政府も私の能力に疑問を呈しているなかで、人為的に作られたようなポストで職務を遂行することは適当とは思えない」と説明している。

ウラン転換工場の操業を再開 加・カメコ社

大手ウラン生産業者であるカナダのカメコ社は9月30日、昨年7月のウラン漏洩事象によりオンタリオ州ポートホープで停止中だった6フッ化ウラン(UF₆)生産(転換)工場の操業を再開したと発表し

た。

同社では事象発生後、漏れ出たウランおよび生産に付随する化学物質を回収したほか、地下水管理対策や工場施設の改修により、さらなる流出を防止する対策も整ったと説明している。

同転換工場は現在、通常より低い生産能力で操業されているが、UF₆の生産に必要なフッ化水素酸(HF)の長期供給契約が供給会社側の都合により打ち切られたため、操業の継続は差し当たり1か月程度にとどまる見通した。カメコ社によると、このHF供給業者がこれまでよりも高い金額による供給再開を提案しているため、他の供給会社を探しているところだとしている。

[米国]

米議会 対印協力協定承認 原子力協力新時代へ 仏も協力協定に署名、積極参入

G・ブッシュ大統領は10月8日、米国とインドの原子力平和利用協力協定を承認するための法案(HR7081号)に署名し、米印原子力協力協定は10日にも発効の運びとなった。米議会上院は1日の本会議で同法案を86対13の大差で可決、下院も9月27日に2/3以上の賛成で承認していた。一方、仏印も9月30日、原子力協力協定に署名し、ロシアを交えた対印原子力協力は一段と国際的に多角化することになる。(3面に仏印原子力協定署名の記事)

1974年のインドによる核実験を契機に、米国は原子力輸出を規制する原子力供給国グループ(NSG)の設立を働きかけ、核不拡散条約(NPT)に未加盟で国際原子力機関(IAEA)の包括的保障措施を受け入れないインドへの禁輸を実施。しかし三十余年を経て、米国はインドへの原子力機器や核燃料の輸出を可能にする協定の締結によって禁輸措置を解除し、同国との関係修復、双方の経済成長を促す戦略的パートナーシップの構築に踏み出した。

2005年7月にブッシュ米大統領とインドのシン首相の共同声明で提唱された米印原子力協力協定

は、06年に成立した「ヘンリー・ハイド米印原子力平和利用協力法」によって、米国の原子力法・第123条に明記されている「相手国の包括的な保障措施受け入れと遵守」の適用から除外した。ハイド法ではこのほか、同協定締結の条件としてNSGがインドを例外扱いとし、規制品目の輸出規制を解除することなどを提示。これは9月6日のNSG臨時総会で承認されるなど、米国側の課題点が徐々にクリアされていく一方で、インド側ではシン首相の連立与党内での対立が生じるなど、協定成立への条件整備は難航した。

最後のハードルとなった米議会の承認では、「原子力協力協定の承認、および原子力平和利用に関わる米国核不拡散法の強化」を主題とするHR7081号法案が審議された。同法案は、(1)「ブッシュ大統領が約束した燃料の供給保障は政治的なものであり法的拘束力を持たない」などとする捉え方を含めて、同協定は米国の条項解釈に基づいて承認される、(2)米国は米国以外のNSG加盟国およびその他の国がインドに原子力機器、材料、技術などを移転しないよう努める。さらに本法案は、同協定の承認がインドによる核兵器の生産を支援・助長することはないというNPT上の米国の義務と一致している点を検証するよう大統領に要請する、(3)米国議会はインドが早急にIAEAの追加議定書に署名・遵守するよう促す、(4)本法案は、インドが保障措施の適用を受ける民生用原子力施設のリストを早急にIAEAに提出し、同保障措施が発効することを要求する——など。

ブッシュ大統領は、「世界の核不拡散に向けた努力が強化され、環境保全や雇用の創出に貢献するだけでなく、インドが責任ある方法でエネルギー需要の増大に対処する一助となるだろう」と述べ、その意義を強調した。

C・ライス国務長官も、同協定によって世界の核不拡散体制強化に向けた努力が加速されると同時に、国際的な枠組みによる恩恵、それを維持・強化し守っていくという義務を分け合うための共通責任を強く反映したものだ指摘した。

我が国の最先端原子力研究開発

シリーズ解説 第7回

量子ビームが切り拓く未来(Ⅲ)

中性子利用研究の新展開

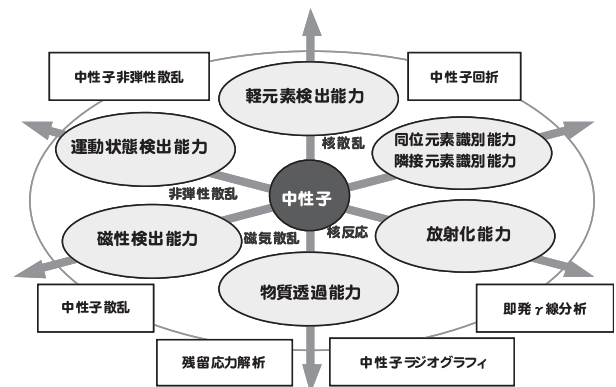
日本原子力研究開発機構 大山幸夫, 池田裕二郎, 新井正敏, 森井幸生

平成13年度から建設に着手した J-PARC 施設が平成20年度末の完成を目指して, ビーム試験が行われている。J-PARC の実験施設群の中でも, 特に世界最高性能のパルス中性子源は中性子利用研究の新時代を拓くものである。本解説では, J-PARC の概要と平成20年12月に供用を開始するパルス中性子源およびそこに整備されつつある中性子実験装置について紹介する。また, 量子ビームテクノロジーの一つの柱である中性子利用について, 稼働中の JRR-3原子炉での利用を含め, J-PARC 利用開始で幅広い展開が予想される生命科学研究, 物質科学研究, 産業利用への貢献など, 最新の中性子利用研究の成果と今後の展望を述べる。

I. はじめに

「量子ビーム」の一つである中性子は, 「粒子」の性質を持つとともに「波」の性質を持っている。池の水面を進んできた波が, 水面から頭を出している杭に当たるとその後ろに独特の波紋を描くのと同じように, 多数の中性子粒子からなる中性子波が多数の原子からなる物質に当たると, その後ろには物質中の原子の種類, 配列, 運動状態を反映した独特の波紋(中性子が散乱されるパターン)が現れる。この中性子の散乱パターンを正確に測定することによって, 物質中の原子の種類, 配列状況, 運動状況などを間接的に観測することができる。つまり, 物質の成り立ちを原子レベルまで観測することができる。中性子ビームは, 特に水素を中心とする軽元素検出能力を利用した合金や誘電体の構造や相転移の研究, その「ミクロ」な磁石としての能力を利用した磁気散乱による磁性体の研究などにおいて, 先端的な計測手法として注目される。

中性子利用は, 散乱現象だけでなく, 透過現象を利用した物質透過イメージング解析, 核励起現象を利用した微量元素分析, 核変換現象を利用した医療用アイソトープ生産や半導体生産などもあるが, 本稿では取り扱わない。第1図に量子ビームとしての中性子が有する様々な



第1図 量子ビームとしての中性子の様々な性質

性質を示す。

中性子の利用に関しては, これまでは原子炉が中心であったが, 高出力の中性子ビームが利用できる施設として, 加速器による中性子源の可能性に世界的に期待が高まっている。その中で, 日本原子力研究開発機構(原子力機構)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)は共同で, 大強度の高エネルギー陽子ビームを得ることのできる大強度陽子加速器施設: J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)を茨城県東海村の原子力機構・原子力科学研究所の敷地内で建設中である。本稿では, 特に原子力機構が中心になって開発・建設を担ってきた1 MW 出力の J-PARC パルス中性子源施設の基本パラメータとその世界最高性能の実現を可能にする概念や先進技術, さらには, 現在整備が進められている先端的な中性子実験装置群を概観する。

Quantum Beams Open up the Future(Ⅲ): Yukio OHYAMA, Yujiro IKEDA, Masatoshi ARAL, Yukio MORII.

(2008年 11月25日 受理)

一方、原子炉からの定常中性子を用いた研究は、物理、化学、高分子、生物、鉱物、工学、農学など広範な分野における基礎研究、応用研究のみならず、産業・医療利用にまで広がっている。本稿では、誌面の制約上、最近の研究例をいくつか紹介するに留める。

Ⅱ. 大強度陽子加速器施設(J-PARC)

1. 大強度陽子加速器施設計画の概要

原子力機構にとって大強度陽子加速器施設計画は、1988年(昭和63年)に原子力委員会の下に「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」(通称オメガ計画)が進められ、旧日本原子力研究所(現、原子力機構)と電力中央研究所や動力炉・核燃料開発事業団(現、原子力機構)とが共に参画して、主に加速器駆動消滅処理(核変換)システムや大強度陽子加速器の概念の検討を行ったのがその出発点である¹⁾。オメガ計画の下では、加速器駆動核変換処理プラントの工学試験を行うために、陽子ビーム1.5 GeV、10 mAの性能を有する工学試験用加速器(ETA: Engineering Test Accelerator)の実現に向けた10 MeV、10 mAの技術開発用加速器(BTA: Basic Test Accelerator)の要素技術開発として高輝度イオン源、100 mAの2 MeV RFQ(Radio Frequency Quadrupole Linac: 高周波4重極型リニアック)、およびDTL(Drift Tube Linac: ドリフトチューブリニアック)モデル試験などの加速器技術開発が行われ、多目的の加速器基盤施設である陽子工学センター建設構想へと発展した。

その後、1990年代後半には、中性子利用を中心とする基礎研究も視野に入れた中性子科学研究計画へと拡がり、さらに当時KEKが中心となって提案していた大型ハドロン計画(JHF)と統合した大強度陽子加速器施設計画として共同提案した結果²⁾、2001年にその建設着手が認められたのがその経緯である。特に、中心施設である大強度パルス中性子源は世界的にも、米国SNS(Spallation Neutron Source)計画や欧州ESS(European Spallation Source)計画と並ぶ次世代中性子源のアジア地区拠点施設としてその建設が求められていたものであり、我が国ではJRR-3原子炉に頼っていた中性子利用研究を一気に拡大させる施設として期待されている。

J-PARCはその名の通り、大強度の陽子を最大50 GeVの高エネルギーまで加速する加速器施設であり、その目的は、さまざまな2次粒子(陽子が原子核と反応して生成される中性子やK中間子といった寿命の短い粒子、そしてパイ中間子がさらに崩壊して生成されるミュオンやニュートリノなど)を発生させ、それをビームとして使い、基礎科学から産業応用までの幅広い分野の研究を行うことにある。

J-PARCでは、高エネルギーの陽子を原子核に衝突させて核破砕反応を起こし、その反応生成物として大強度

の2次粒子ビームを発生させる。そこで、それぞれの2次粒子の生成に適したエネルギーの陽子を得るために、陽子加速器はリニアック、3 GeVシンクロトロン、および50 GeVシンクロトロンの3段構成としている。これらの加速器からの陽子ビームを用いて得られる、中性子、ミュオン、ニュートリノ、K中間子などの量子ビームを多種の研究領域で利用する。実験研究施設としては、原子核・素粒子実験施設(ハドロン実験施設)、ニュートリノ実験施設、物質・生命科学実験施設(ミュオンおよび中性子実験施設)、核変換実験施設がある(第2図の概観写真)。

このうち、核変換実験施設は第Ⅱ期計画とされており、現在は施設検討を進めている段階である。原子力発電所からは高レベル放射性廃棄物が排出されるが、その中に含まれる長寿命放射性核種を核変換処理するための技術は未開発である。その技術の基礎的な開発研究をこの実験施設では計画している。原子力機構では、量子ビームテクノロジーの展開として、主に中性子利用研究および核変換技術開発の2分野にわたって、J-PARCにその基盤研究施設としての役割を期待している。

J-PARCは多岐にわたる科学技術分野の研究や技術開発の基盤的研究施設として計画されており、多目的研究施設として世界的にもほとんど例のないユニークな研究施設である。また、同様の陽子加速器施設として最近完成した米国オークリッジ研究所のSNS施設があるが、これは加速器中性子源施設として計画されたもので、原子核・素粒子はもちろん、ミュオン利用も含まれていない単目的の施設である。J-PARCでは物質・生命科学実験施設の中性子源がこれに相当している。さらに、中性子源に限って言えば、J-PARCでは後述するように、平均中性子強度では若干SNS施設に劣るものの、世界一を誇るパルス強度性能にその優位性を持っている。

施設建設は2001年に始まり、すでにニュートリノ施設を除いて建物は完成している。加速器のビーム試験も3 GeVシンクロトロンの加速まで成功し、50 GeVシンク



第2図 J-PARC 上空写真

ロトロンでのビーム入射試験にも成功した。特に、2008年5月には、物質・生命科学実験施設中性子源標的への陽子ビーム入射と減速された冷中性子ビームの取出しに成功した。今後、12月には中性子実験装置の利用者への供用を開始し、さらに2009年の春には、ハドロンおよびニュートリノ実験施設を含めた当初の第I期計画部分が完成する予定である。

2. J-PARC のパルス中性子源

物質・生命科学実験施設(MLF: Materials and Life Science Experimental Facility)にミュオン源とともに設置される1 MW パルス中性子源は、学術から産業応用にいたる物質・材料科学を中心とした幅広い分野での新たな中性子利用研究の展開を目的とするJ-PARCの中心的利用施設である。1990年代に世界的な課題とされた次世代中性子源への要望に基づき、米国では1.4 MWのパルス中性子源SNSを、英国ではパルス中性子源ISISに新たに第2ステーション(TS2)を建設するプロジェクトが開始されるなど、国際的競争の中でJ-PARCはその完成が注目されてきた。

(1) J-PARC パルス中性子源の基本構造

J-PARC 中性子源は、3 GeV 陽子シンクロトロンから出射される25 Hz のパルス状陽子ビームを、循環する水銀ターゲットに入射して、核破砕反応により中性子を発生する。その中性子を超臨界液体水素の減速材(モデレータ)で実験に適した冷中性子エネルギーまで減速し、ビーム状に引き出し中性子散乱実験等の利用に供する。J-PARC では、パルス中性子源の最も重要な性能であるパルスのピーク強度と時間分解能を、1 MW の高出力の条件の下で最大にするために、膨大なシミュレーション計算により構成機器すべての材料とその幾何学的配置を最適化した。第3図に中性子源中心部の3次元構造を示す。加速器側との真空境界は、3 GeV 陽子ビームが中性子源に入射する部分に設置される陽子ビーム窓によって形成した。中心の水銀ターゲットの上下に3台

の超臨界液体水素減速材を配置し、その周辺をベリリウム反射体で覆うことで効率よく中性子を減速材に集める。ターゲット、減速材、反射体は、ヘリウムを充填されたベッセル内に取め、空気の放射化を防ぐと同時に放射能閉じ込め領域とし、その外側にさらに鉄および重コンクリートの生体遮蔽体を置いて放射線遮蔽を行っている。

減速材で減速された中性子ビームは、中心から放射状に23本のビーム孔(コリメータ)を通して取り出される。また、各ビーム孔のビームのオンオフは、生体遮蔽体領域に置かれたシャッタの開閉で独立して行うことができる。ビーム孔からは真空の中性子導管が伸び、その内部にはスーパーミラー、各種チョッパ、偏極装置などが、中性子実験装置が求める性能に合わせて配置されている。

(2) 先進的な J-PARC 中性子源

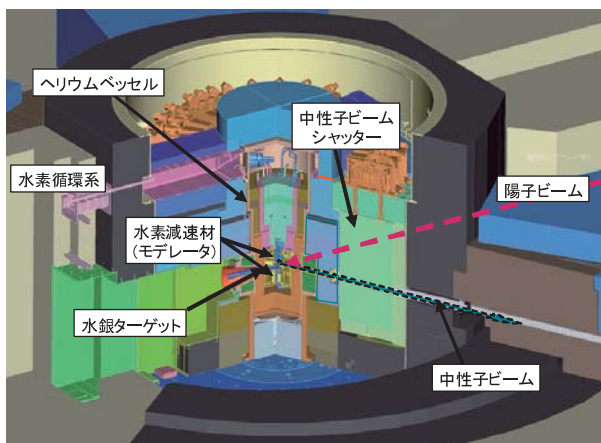
1 MW のパワーで最大に性能を引き出すための設計としての最大の特徴は水銀ターゲットの採用である。水銀は、核破砕反応で高い中性子収率を持つ重金属であり、固体ターゲットの場合に問題となる照射損傷や繰返し熱応力による破壊の問題がなく、自らの流動による冷却が可能である、などの優れた利点があるものの、取扱い経験が乏しく、パルス陽子ビーム入射による水銀の膨張圧力波の問題や流動安定性など、熱的・機械的健全性に関する多くの技術的課題があった。ターゲットでは、ビーム入射方向に垂直な水銀の流れの形成によるターゲット内での熱付与分布に合わせた流動設計、高度に放射化する水銀を2重容器によって閉じ込める機構の開発などの先進設計を採用した。一方、減速材では、1 MW の熱負荷および高放射線場に耐え、かつ、減速効率の高い超臨界液体水素の採用、減速効率を高めるための前置水減速材、中性子パルス幅を短縮するための耐放射線性に優れた新しいエネルギーカットオフ被覆材(銀-インジウム-カドミウム合金)の採用など、これらの課題に対しても種々の先進的なアイデアを導入した。特に、液体水素をすべてパラ分子状態に保つ循環系の開発により、中性子減速効率が飛躍的に向上した。

これら多くの先進的工夫の導入により、先行する米国のSNS(1.4 MW 出力)と比べて出力は1 MW と劣るが、時間積分強度では1.4倍高い性能が期待でき、パルス強度でも、繰返しがJ-PARCでは25 HzでSNSの60 Hzより低いことも合わせて、3倍以上高いパルスピーク強度が期待できる中性子源の設計が実現できた。

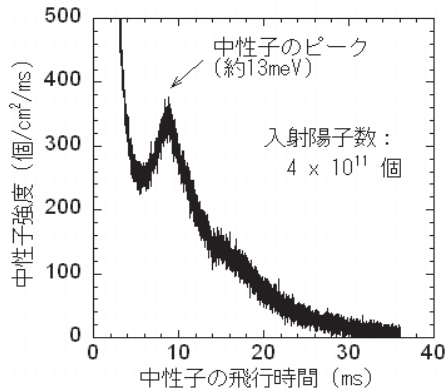
この設計性能の結果は、平成20年5月に行った実際の陽子ビーム入射による中性子測定結果で実証された(第4図)。

(3) 実験装置と実験室レイアウトの最適化

中性子源の性能を最大にするための仕上げは、中性子の実験装置である。利用できる中性子ビームラインの総



第3図 パルス中性子源 JSNS の中心部分の構成



第4図 最初の陽子パルス入射と同時に特性試験装置で観測した非結合モデレータから引き出された中性子飛行時間スペクトル

数23本であり、現在、14本を整備中である(第5図)。23本のビームラインの中で、強度を重視する結合型モデレータを見込む本数の重視がJ-PARCの大きな特徴である。また、外国に比べて非弾性散乱実験装置を重視した配置も特徴である。また、茨城県が2本のビームラインを、地元産業振興を目指して整備している。競争的資金では核変換システムに必要な核データの取得を目的とした装置などの整備が進んでいる。これらの装置の一部は、平成20年12月に利用実験を開始することになっている³⁾。

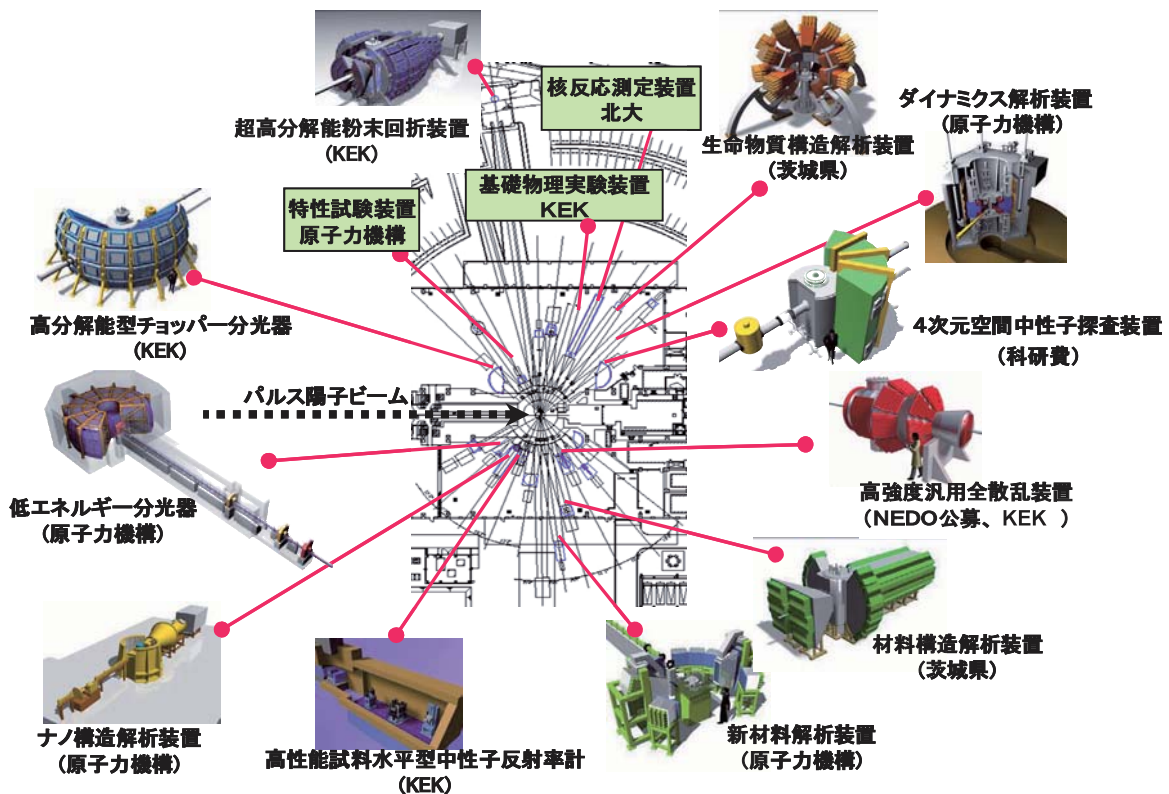
Ⅲ. 中性子利用研究の現状と展望

1. 原子炉を用いた中性子利用研究

米国や英国では、すでに1940年代に原子炉が建設され、中性子回折実験が始まっていた。さらに、1950年代に入ると、より高中性子束の原子炉も建設され、非弾性散乱による原子の運動状態の観測が可能になり、結晶構造をもつ物質の格子振動が測定できることが示され、固体物理の研究分野に強烈なインパクトを与えた。わが国では、1960年代に日本原子力研究所(現、原子力機構)に建設された研究用原子炉 JRR-2によって中性子散乱実験が開始し、次いで JRR-3(現、原子力機構)、KUR(京都大学)も加わった。

このような背景と研究の進展によって、より高中性子束の中性子源建設を要望する声が高まった。これに応えるかたちで、中性子の高フラックス化ならびにビームポートの大幅な増大、冷中性子源の新設を可能にする JRR-3の改造が行われ、1990年より稼動を始めた。こうして世界的にもトップレベルの高性能な中性子利用施設がわが国に整備された(第6図)。

JRR-3は現在、国内で稼動中の唯一の中性子利用施設であるが、近年、その利用競争率(実験申請ビームタイム/実験可能ビームタイム)は平均1.6倍にも達し、利用は逼迫しており、J-PARCでの中性子利用に大きな期待が寄せられているところである。



第5図 建設中の中性子実験装置の配置



第6図 研究用原子炉 JRR-3の外観

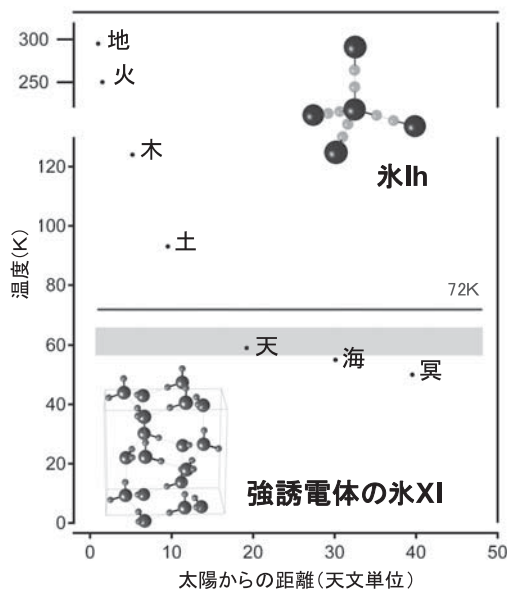
2. 中性子利用研究の最近の成果

以下, JRR-3において中性子をプローブとして利用した最近の研究例を紹介する。

(1) 宇宙環境における強誘電性氷の存在⁴⁾

中性子を用いた粉末構造回折実験によって水中の水分子の位置と向きを正確に決定し, 第7図に示すように, 常温常圧では水分子の向きが不揃いの氷Ih相が安定であるが, 天王星以遠の宇宙環境では, 水分子の向きが整然と揃う強誘電性の氷XI相が安定であることを示唆する結果を得た。この成果は, そのような条件下にある惑星の形成過程において, 重力よりもはるかに強い静電的な相互作用が寄与していることを示唆しており, 惑星形成が加速されるメカニズムを提唱するものとして大きな反響を呼んでいる。

(2) 水素分子活性化酵素モデル錯体の構造解析⁵⁾



第7図 中性子回折実験で明らかになった太陽系において「氷XI」相が安定に存在する領域(帯状の領域)酸素と水素を大, 小の球で表し, 氷Ihと氷XI(強誘電体)の分子の構造を示す。地, 火, …は惑星の頭文字。

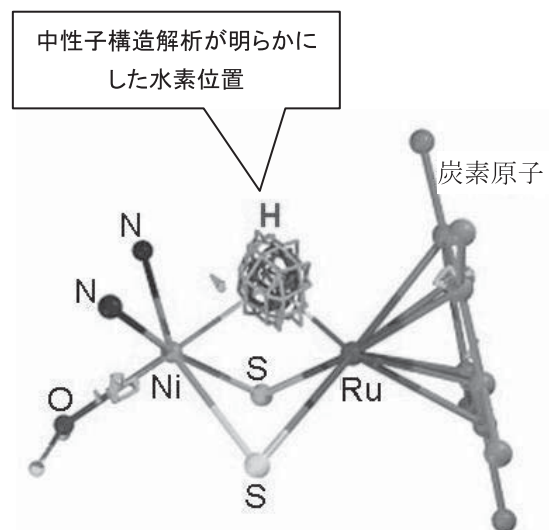
分子状水素(H_2)の分解による H^+ および H^- の生成反応や, その逆反応を触媒するタンパク質を総称してヒドロゲナーゼという。このタンパク質の触媒機構解明は, 次世代のクリーンエネルギーの一つである水素ガスを安価に製造する技術に繋がることから, エネルギー分野で特に注目されている。しかし, ヒドロゲナーゼの活性機構の鍵となる水素原子の位置は不明とされてきた。これを決定するために, 九州大学や原子力機構などの研究グループは, $[NiFe]$ ヒドロゲナーゼの活性化状態の構造を模擬した $[NiRu]$ 二核金属錯体に対して, 中性子の水素検出能力を活かして結晶構造解析を行った。その結果, 第8図に示すように, この模擬錯体がNiとRuの間を水素原子が架橋したNi-H-Ru構造を持つことを証明することに成功した。

(3) 中性子の産業利用

上述した例のほかに, 中性子の高い物質透過能力を活かしたラジオグラフィ技術や中性子回折に基づく残留応力解析などの手法は, 非破壊・非接触での材料内部の観察に適した方法として, 産業界からのニーズは高い。特に, ここ数年, 文部科学省の中性子利用技術移転推進プログラム(通称「トライアルユース」)など, 中性子の産業利用促進を目指した各種のプログラムにより, 利用者層はさらに広がる傾向にある。

3. 今後の展望

時間積分強度と大照射場を有する点で有利な原子炉中性子源と, ピーク強度で圧倒的に有利な加速器中性子源を相補的に利用することが可能な研究開発拠点が間もなく東海村に誕生する。このような同一拠点における先進的な中性子利用は, 他に米国のオークリッジ国立研究所(HFIR原子炉とSNS加速器パルス中性子源)に見られるのみである。



第8図 中性子によって観測されたヒドロゲナーゼモデル化合物におけるNi-Ru間の水素原子

J-PARC に整備される中性子実験装置(第5図参照)は、単に研究用原子炉で充足できないマシンタイムを補填するだけでなく、従来装置にない性能・機能を有することでこれらの装置を補完し、物質・材料科学、生命科学・バイオ技術、環境・エネルギー分野などでの学術利用や産業利用をいっそう促進するものと期待されている。例えば、超高分解能粉末回折装置や材料構造解析装置を使った粉末または多結晶状の材料の結晶構造解析による新機能発現機構の解明、生命物質構造解析装置を使ったタンパク質単結晶構造解析による創薬関連タンパク質の機能解明、4次元空間中性子探査装置や低エネルギー分光器による高温超伝導発現機構や磁気相互作用の解明などに期待が集まっている。また、産学官から多くの研究者を受け入れるための課題採択システム、利用支援体制なども整備されつつある。

—参考文献—

- 1) “特集 高レベル廃棄物の消滅処理研究開発”, 日本原子力学会誌, 37(3), 159(1995).
- 2) 共同推進チーム, 大強度陽子加速器計画, JAERI-Tech, 2000-003または KEK Report, 99-5, (2000).
- 3) “連載記事 いよいよ動き出す J-PARC”, 原子力 eye, 54 [5~11], (2008).
- 4) H. Fukazawa, *et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, **652**, L 57 (2006).
- 5) S. Ogo, *et al.*, *Science*, **316**, 585(2007).

著者紹介

大山幸夫(おおやま・ゆきお)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)中性子工学, 中性子源工学, 加速器利用, 核融合

池田裕二郎(いけだ・ゆうじろう)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)中性子源工学, 中性子利用, 核データ

新井正敏(あらい・まさとし)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)中性子散乱, 固体物理

森井幸生(もりい・ゆきお)



日本原子力研究開発機構, 現(株)ひたちなかテクノセンター
(専門分野/関心分野)中性子産業利用推進

将来の再処理に適した技術の選定と開発方針 FBR 移行期サイクルに適した再処理プロセス技術 の調査と開発方針の検討

(財)電力中央研究所 塚田 毅志, 井上 正

原子燃料の再処理技術としてこれまでにさまざまな方法が開発されてきたが、実用化まで到達した技術は、今のところ軽水炉燃料を対象とする PUREX 法のみである。一方、次世代技術として、2050年からの商業炉導入が謳われている高速炉の燃料を対象とした再処理技術の検討が開始されている。しかし、高速炉が導入された後も最低でも数十年間は軽水炉との併用期間が続き、次世代再処理技術では、軽水炉燃料ならびに高速炉燃料と種類の異なった燃料を処理しなければならない。このような移行期に適した技術の検討や選定を行うために、開発段階にあるものからすでに商業規模で採用されている技術まで幅広く再処理技術を調査した。これらの情報をもとに、分離工程に関する技術選定を試みるとともに、今後の技術開発方針を提案した¹⁾。

I. 再処理プロセス技術の調査

1. 調査対象とした再処理プロセス

これまでに開発されてきた主な再処理プロセスの16個を選択し、以下の6種類に分類した。(1)比較の基準としてほぼ完成した PUREX 法プロセス、(2)PUREX 法をベースとした改良プロセス、(3)PUREX 法と同じく TBP を用いるが、追加技術(U を先取りするなど)が付加されているプロセス、(4)TBP 以外の新たな溶媒を用いる技術、(5)基礎的な開発から行われているプロセス、(6)乾式法再処理プロセス。各分類には、(1)PUREX 法、(2)COEX 法、単サイクル PUREX 法、Co-Processing 法、(3)NEX T 法、UREX 法、UREX + 法、(4)GANEX 法、モノアミド抽出法、ジアミド抽出法、(5)NCP 沈殿法、イオン交換法、超臨界直接抽出法(TBP を用いる)、(6)電解還元+金属電解法、酸化電解法、FLUOREX 法(後半は TBP を用いる湿式)の各再処理プロセスが相当する。なお、(4)の GANEX 法は分離パターン概念であり、モノアミド、ジアミド抽出法と同じであると理解できる。

2. 分離工程の評価

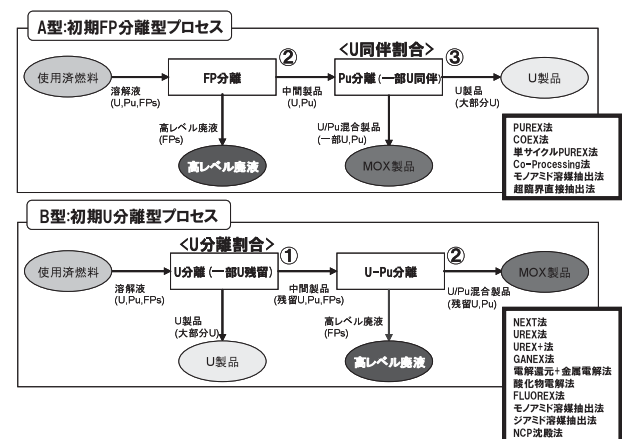
再処理プロセス内でウラン(U)およびプルトニウム(Pu)が分離される場所に注目すると、第1図に示すように、最初に FP 元素を分離するプロセス(A 型)と、最

初に U をあらかじめ取り出すプロセス(B 型)の2つに大きく分けられる。調査した16個の再処理プロセスがどちらに分類できるかも第1図に示す。さらに、これらのプロセスを構成している分離技術は、

- (1) U 分離技術(U を先取りする)
- (2) U-Pu 分離技術(U と Pu を同時に FP と分離し回収する)
- (3) Pu 分離技術(Pu に U および Np を混合して回収する)

に分けられる。各再処理プロセスで採用されている分離技術を、(1)~(3)の分離技術ごとに第1表に示す。

再処理プロセスの評価では、採用されている分離技術にまで工程を分解し、第1表の例で示した除染係数(DF)や回収率、さらに、その他必要な情報を比較することが



第1図 再処理プロセスの分離パターンの分類

Selection of Technology and Direction of Development for Future Reprocessing: Takeshi TSUKADA, Tadashi INOUE. (2008年 10月24日 受理)

第1表 各再処理プロセスで用いられている分離技術

①U分離技術 (Uを先取りする技術)

プロセス	NEXT法	UREX法 UREX+法	モノアミド抽出法 ジアミド抽出法 GANEX法	NCP沈殿法	電解還元 +金属電解法	酸化物電解法	FLUOREX法	
分離技術	晶析法	UREX法	モノアミド抽出法 (Uのみ抽出)	選択的沈殿法 (低配位性沈殿剤)	電解精製法 (固体陰極)	同時電解法	フッ化物揮発法	
性能	DF	DF=100(開発目標)	DF=10 ⁵	DF=10 ⁵ 程度と評価	DF=100	DF=60~100	不明	DF=10 ⁷
	回収率	80%	90%	90%以上価と評価	70%	99%	不明	90-98%

②U-Pu分離技術 (UとPuを同時に回収する技術)

プロセス	PUREX法, COEX法 単サイクルPUREX法 Co-Processing法 NEXT法, FLUOREX法 超臨界直接抽出法	モノアミド抽出法	ジアミド抽出法 GANEX法	NCP沈殿法	電解還元 +金属電解法	酸化物電解法	
分離技術	TBP抽出法 (共除染/共抽出)	モノアミド抽出法 (U+Puを同時に抽出)	ジアミド抽出法	沈殿法 (高配位性沈殿剤)	電解精製法 (液体Cd陰極)	MOX共析法	
性能	DF	DF=10 ⁵	DF=10 ⁵ 程度と評価	DF=10 ⁵ 程度と評価	DF=100	DF=100	不明
	回収率	ほぼ100%	90%以上価と評価	90%以上価と評価	99%	99%	不明

③Pu分離技術 (PuにUおよびNpを混合して回収する技術)

プロセス	PUREX法, COEX法, 単サイクルPUREX法 Co-Processing法, FLUOREX法 超臨界直接抽出法	UREX+法	モノアミド抽出法	
分離技術	TBP抽出法 (U/Pu分配)	NPEX法	モノアミド抽出法 (Puの逆抽出)	
性能	DF	DF=10 ⁵	燃料製造が可能なDF	DF=10 ⁵
	回収率	ほぼ100%	99%	不明

大切である。

3. プロセス溶液の再生工程の評価

再処理プロセスでは、使用済燃料中の U, Pu および FP 元素は、アニオン(硝酸基など)と結合することにより溶液へ溶解し、その状態で有機溶媒へ抽出される。最終的な製品は、溶解している U や Pu からアニオンを取り除き、酸化物として回収する。さらに、U および Pu を取り除いた後の溶液や、有機溶媒、あるいは FP 元素を適切に処理した後の溶液は、再び溶液(プロセス溶液)として利用する。そのため、溶媒劣化物の除去やアニオン濃度を高めるための回収工程および再生工程が設けられている。

再処理プロセスは、U や Pu を回収する裏側で、アニオンや有機溶媒をリサイクルするプロセスでもある。そこで、調査したすべての再処理プロセスに対し、プロセス溶液を中心としたフロー図を描き、プロセス溶液の取扱量などを以下の方法で評価した。

年間に処理する使用済燃料の量(1,200 t/yr)、燃料に含まれる U 量(95 wt%)、Pu 量(1 wt%)、および FP 元素量(4 wt%)と工場の年間稼働日数(200 d/yr)を仮定し、単位時間あたり処理される U, Pu および FP 元素の量(それぞれ、237.5, 2.5, 10.0 kg/h)を求める。さらに、文献等からプロセス溶液中での U, Pu および FP 元素の濃度(g/l)が明らかとなれば、その値で上の単位時間当りに処理すべき量を割ることにより、必要となるプロセス溶液の取扱量(l/h)が評価できる。

各再処理プロセスで用いられる硝酸溶液量を比較した

第2表 硝酸溶液使用量および廃棄物(蒸発液)発生量の比較

プロセス	高レベル廃液			U回収 ^(a)			U+Pu回収 ^(a)			廃液発生量 (t/年)
	FP濃度 (g/l)	濃度(N)	流量 (l/h)	U濃度 (g/l)	濃度(N)	流量 (l/h)	U+Pu濃度 (g/l)	濃度(N)	流量 (l/h)	
PUREX法	10	2.5	1000	60	0.1	3545	6	1.8	523	78701
				70	0.08	3393	17	1.0	147	
COEX法	10	2.5	1000	60	0.1	3545	6	1.8	523	36141
単サイクルPUREX法	10	2.5	1000	60	0.1	3545	6	1.8	523	36288
							17	1.0	147	
Co-Processing法	10	2.5	1000	60	0.1	3545	6	1.8	523	36141
NEXT法	不明	不明	不明	—	—	—	不明	不明	不明	不明
UREX法	8	0.75	1250	70	0.5	3393	—	—	—	8453
UREX+法	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
モノアミド溶媒抽出法	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
ジアミド溶媒抽出法	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
NCP沈殿法	10 ^(b)	3	1000	—	—	—	—	—	—	333
イオン交換法	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
超臨界直接抽出法	—	—	—	—	—	—	120	1.2	1979 ^(c)	1649
FLUOREX法	10	2.5	750 ^(d)	—	—	—	不明	不明	不明	不明

(a)2段あるものうち、上段(回収系)、下段(精製系)、(b)供給液のU濃度(1mol/L)より推定、(c)U+Pu逆抽出法の組成より推定、(d)25%のPPはフッ化物となる推定

結果を第2表に示す。たとえば、PUREX法の場合、回収されるUは60 gU/lの溶液で得られるため、この工程では、約3,500 l/hの溶液を扱っていると評価できる。

PUREX法から精製系を省略した改良プロセスでは硝酸溶液使用量が半減し、また、固体で製品を回収する沈殿法や燃料を溶解しない超臨界法において使用量がかなり少ないことが、第2表の結果(それぞれの流量)から定量的に比較できる。

同様に、有機相中のUおよびPu濃度(g/l)を調べ、その値を用いて、プロセス全体で取り扱う有機溶媒量を評価した結果(流量)を第3表に示す。従来のPUREX法から精製工程を削除したCOEX法などのプロセスでは、溶媒使用量が半減し、NEXT法やFLUOREX法のようなUを先取りする技術に有機溶媒を用いないプロセスでは、有機溶媒の使用量が大きく減少している。

4. プロセス溶液から発生する廃棄物量の評価

プロセス溶液の取扱量の評価結果より、発生する廃液量の比較ができる。酸回収工程から発生する蒸発液(低レベル廃液となる)の液量評価では、濃い硝酸溶液に比べ薄い溶液の方が蒸発液の発生量が増加するとし、工程で取り扱う溶液量をその硝酸濃度で割った値により比較した。この値は、回収される硝酸1当量分が含まれていた溶液の体積となる。硝酸溶液使用量を評価した第2表の結果から廃液発生量を比較した結果を同じく第2表に示す。

有機溶媒から発生する廃棄物(廃溶媒)に関しては、第3表に示す。使用している有機溶媒の体積に比例する(仮に0.1 vol%とする)と仮定して評価し、その結果を同じく第3表に示す。沈殿法やイオン交換法は、有機溶媒を用いないため有機溶媒からの廃棄物は発生しない。

第2表および第3表では、「不明」が多いが、今後の再処理プロセスの調査においては、これらのデータに注目して調査をすることが大切となる。

II. 移行期サイクルに適した再処理プロセス技術の検討

1. 移行期サイクル評価の前提

検討の前提となる燃料サイクルシナリオを設定した。ここでは、総発電量は、現行の48 GWe から増加し、2030年ごろに58 GWe で一定となり、高速炉の導入については、2050年以降に寿命(60年)を迎える軽水炉のリプレースとして順次導入すると仮定した。その場合における必要な使用済燃料再処理量を第2図に示す。

さらに、移行期に発生する各種使用済燃料の特性を、燃料1t当りのPu量、全放射能、発熱および α 放射能で検討した。従来の UO_2 燃料と比較して、軽水炉MOX燃料、高速炉MOX燃料(炉心+ブランケット混合)ともに、全放射能、発熱の増加は2倍ほどであるが、Pu量と α 放射能はかなり増加し、軽水炉MOXで、Pu量が5倍、 α 放射能が9倍、高速炉では、11倍、9倍とそれぞれが増加する。

2. 移行期に適した再処理技術に関する検討項目

高速炉燃料再処理技術を中心に、工場建設コストの大幅な削減が期待できる新しい技術がいくつか開発されてきている。これら技術の経済性を評価した最近の結果²⁾では、建設コストの半減が期待できる技術はあるものの、不確定要素が多く、大幅な建設コストの削減が確実に期待できる技術は今のところ見当たらないのが現状である。

そのため、2050年頃からの操業が予定されている再処理工場に採用されるプロセスを検討するにあたり、新しい技術の開発に期待しつつも、現行のPUREX法をベースとした改良を中心とする技術開発を行うことがきわめ

て現実的であると判断した。新しい技術に関しては、移行期以降の高速炉平衡期に適用することを主な目的とした開発を続けるべきであり、そのための開発期間は十分にとれると思われる。

そこで、移行期に適した再処理技術に関して、以下の項目を検討した。

- (1) 軽水炉MOX燃料および高速炉燃料を現行軽水炉燃料再処理技術で処理する可能性の検討として2項目、
 - (1)-1 通常PUREX法プロセスでの軽水炉MOX燃料再処理の可能性
 - (1)-2 軽水炉MOX燃料および高速炉MOX燃料と通常軽水炉 UO_2 燃料の混合再処理の可能性
- (2) 軽水炉使用済燃料よりUを先に取り除き、U/Pu比を高速炉使用済燃料と同等とする技術の検討
- (3) 使用済燃料から直接新燃料と同等の組成とする技術の検討
- (4) 精製工程やMA回収工程が要求に応じて付加できるプロセスの検討

3. 検討結果

- (1) 軽水炉MOX燃料および高速炉燃料を現行軽水炉燃料再処理技術で処理する可能性の検討

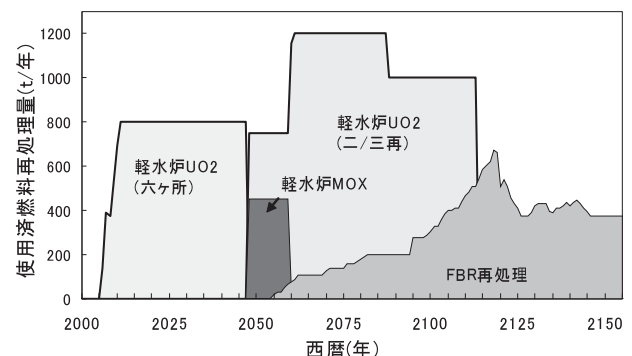
- (1)-1 通常PUREX法プロセスでの軽水炉MOX燃料再処理の可能性

軽水炉MOX燃料を再処理する場合、使用済燃料の特

第3表 有機溶媒使用量および廃棄物(廃溶媒)発生量の比較

プロセス	U先取り工程		U/Pu分離工程		精製工程 ^(a)		廃溶媒発生量(t/a)
	U濃度(g/l)	溶媒流量(l/h)	U/Pu濃度(g/l)	溶媒流量(l/h)	U濃度(g/l)	溶媒流量(l/h)	
PUREX法	-	-	80	3000	75	3167	6.42
COEX法	-	-	80	3000	-	-	3.0
単サイクルPUREX法	-	-	80	3000	-	-	3.25
Co-Processing法	-	-	80	3000	-	-	3.0
NEXT法	-	-	80	922 ^(b)	-	-	0.92
UREX法	66	3599	-	-	-	-	3.60
UREX+法	不明	不明	不明	不明	-	-	不明
モ/アミド溶媒抽出法	-	-	不明	不明	-	-	不明
ジアミド溶媒抽出法	不明	不明	不明	不明	-	-	不明
超臨界直接抽出法	65	3654 ^(c)	-	-	-	-	0.52
FLUOREX法	-	-	80	625 ^(d)	-	-	0.63

(a)2段あるものうち、上段(U精製工程)、下段(Pu精製工程)、(b)70%のUを先取り、(c)TBP:0.52mol/L-scfの溶媒、(d)80%のUを先取り



第2図 移行期における再処理量の推移

性などから、以下のような課題が挙げられる。

- ・燃料の溶解特性
- ・Pu 濃度の増加(約 5 倍)によるプロセス上の影響
- ・ α 放射能の増加(約 9 倍)による溶媒劣化の増加

実用規模のプロセス設計や機器・施設設計を行いながら、現行 PUREX 法プロセスにおいて上記の課題が解決でき、軽水炉 MOX 燃料の再処理が可能か評価する。可能であると判断されれば、必要な開発課題を抽出し速やかに開発に着手するべきである。

(1)-2 軽水炉 MOX 燃料および高速炉 MOX 燃料と通常軽水炉 UO_2 燃料の混合再処理の可能性

軽水炉 MOX および高速炉 MOX 使用済燃料と通常軽水炉 UO_2 燃料を混合し、Pu 濃度や α 放射エネルギーを緩和しながら再処理する場合を想定した。特に、移行期において、第 2 図に示すような各燃料の再処理量に対し、混合処理が可能か検討した。発生した軽水炉 MOX 使用済燃料および初期の高速炉使用済燃料の全量を、軽水炉 UO_2 燃料と混合し、総再処理量を 1,200 t/yr として処理する場合を想定した。ただし、高速炉導入初期には、3 種類の燃料が存在するため、軽水炉 MOX 燃料の再処理が終了する(5 年後)まで高速炉燃料の再処理を遅らせることとした。さらに、高速炉使用済燃料発生量が 200 t/yr を越えた後は、高速炉燃料専用の再処理工場を導入することとした。高速炉燃料と軽水炉 UO_2 燃料を混合処理する期間は 27 年間程度となる。

この場合、処理される燃料中の Pu 濃度と α 放射エネルギーは第 3 図のように推移する。この結果から、軽水炉燃料 MOX 燃料を混合処理する期間では、Pu 濃度は約 2.5 wt%， α 放射エネルギーは通常 UO_2 燃料と比較して 4 倍程度増加する。後半の高速炉燃料 MOX と混合する場合は、Pu 濃度は最大で 2.4 wt%程度、 α 放射エネルギーは 2 倍程度の増加となる。

この結果から、移行期における高速炉燃料混合処理では、軽水炉 MOX 燃料を単独で処理した場合よりも条件が緩和されることがわかる(Pu 濃度の増加: 約 5 倍 \rightarrow 2.4 倍、 α 放射エネルギーの増加: 約 9 倍 \rightarrow 2 倍)。このことから、軽水炉 MOX 燃料を単独で処理できるプラントを設計しておけば、移行期初期の高速炉 MOX 燃料は再処理可能である。

ただし、集合体解体・せん断方式、あるいは混合方式(溶解前に固体で混合、あるいは別々に溶解し溶液で混合)などの検討が必要となる。

(2) 軽水炉使用済燃料より U を先に取り除き U/Pu 比を高速炉使用済燃料と同等とする技術の検討

移行期終盤などで、軽水炉使用済燃料を高速炉燃料再処理プロセスで処理する場合を想定する。その場合、軽水炉燃料のほとんどは U であるため、最初に U をあらかじめ取り除き、高速炉使用済燃料と同等な組成とした後に再処理プロセスへ供給することが望ましい。

高速炉使用済燃料中の U/Pu 比は約 6.5 であり、軽水炉 UO_2 燃料の場合は U 全体の 93%を、軽水炉 MOX 燃料の場合は U 全体の 58%を先取りする必要がある。この基準に合うような U の先取技術、すなわち U 分離技術の評価を行った。第 1 表の①に示した U 分離技術から、回収率を基準に評価すると、軽水炉 UO_2 燃料に対しては、晶析法や沈殿法は回収率が不十分ではあるが、軽水炉 MOX に対してはどの U 分離技術も適応可能であると評価できる。

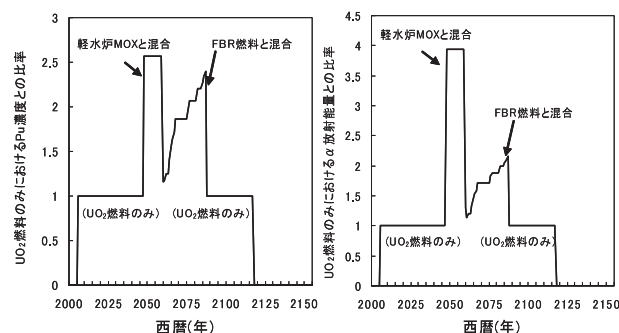
(3) 使用済燃料から直接新燃料と同等の組成とする技術の検討

分離工程において、新燃料の製造に適した U/Pu 組成比を持つ製品を直接得ることができれば、効率の良い再処理プロセスとすることが期待できる。使用済燃料と新燃料の組合せとして以下の 5 種類のケースを想定し、適した分離技術を検討した。なお、軽水炉燃料を製造するためには、DF も満足する必要がある。

- (1) 軽水炉 UO_2 (U:Pu=94:1) \rightarrow FBR 炉心 (U:Pu=70:30)
- (2) 軽水炉 UO_2 (U:Pu=94:1) \rightarrow 軽水炉 MOX (U:Pu=90:10)
- (3) 軽水炉 MOX (U:Pu=91:5) \rightarrow FBR 炉心 (U:Pu=70:30)
- (4) 軽水炉 MOX (U:Pu=91:5) \rightarrow 軽水炉 MOX (U:Pu=90:10)
- (5) FBR [炉心+ブランケット混合] (U:Pu=78:12) \rightarrow FBR 炉心 (U:Pu=70:30)

分離技術の選定をする場合に、先に示した A 型と B 型の分離パターンに分けて考察した。技術評価のポイントとしては、A 型(初期 FP 分離型プロセス)では Pu 分離技術の <U 同伴割合>、B 型(初期 U 分離型プロセス)では U 分離技術の <U 分離割合>が評価ポイントとなる(第 1 図参照)。

軽水炉 UO_2 使用済燃料から、FBR 炉心新燃料を製造する場合(5 種類のうち(1)のケース)の例を第 4 図に示す。軽水炉 UO_2 (U:Pu=94:1)から、FBR-炉心(U:Pu=70:30)を製造する場合には、A 型分離では Pu 分配工程において <U の 2.4%を同伴>させ、また、B 型分離



第 3 図 移行期における混合処理の可能性の評価

ではU分離工程において<Uの97.6%を分離>する必要がある。

同様な評価をすべてのケースで行い、必要な、A型分離におけるU同伴割合とB型分離におけるU分離割合を計算した。これらの要求を満たす分離技術の評価し、結果を第4表に示す。同表の上がA型のPu分離技術の評価結果、下がB型のU分離技術の評価結果である。このような方法で、最適なプロセスを選定していくこととなると思われる。

(4) 精製工程やMA回収工程が要求に応じて付加できるプロセスの検討

移行期に導入される再処理工場で分離された製品は、主に高速炉用燃料の製造に用いられることが予想される。除染係数が低い(DF=100程度)製品やMAを回収して燃料に混合するには、ホットセル内の遠隔装置で燃料を製造することや、それらのハンドリング技術も不可欠となる。しかし、高速炉燃料においても、燃料製造をグローブボックス内で行う場合には、最新の重遮蔽グローブボックスを用いても、DF=10⁶程度が必要となる。さらに、得られた製品を軽水炉で利用する場合、特に、軽水炉UO₂使用済燃料から回収したUを再濃縮して利用する時には、DF=10⁷程度が必要である。また、将来の要求として、再処理プロセスにおいてマイナーアクチニド(MA)元素を回収することが求められることも考えられる。

これから開発する再処理プロセスや再処理工場では、燃料サイクル情勢の変化や技術開発の進展に合わせ、精製工程やMA回収プロセスなどの他の機能や新しい技術を、工場の運開した後からでも容易に追加できるような設計にしておくことが重要である。

Ⅲ. 移行期に向けた再処理技術に必要な研究開発の方針

2050年ごろに導入が予定されている次期再処理工場に向けた研究開発の方針について、以下に取りまとめた。

(1) 軽水炉 MOX 燃料が再処理可能な PUREX 法プロセスの設計

現行のPUREX法において、プロセスを大きく変更することなく軽水炉MOX燃料の再処理が可能か見極める必要がある。この場合、プロセスで扱うことのできる最大Pu濃度が最も重要な評価点となる。検討結果を基にプロセスの構築と施設設計を行い、必要な技術開発や確認すべき試験を早急に実施すべきである。

(2) 軽水炉 MOX 燃料が再処理可能な PUREX 法

プロセスを用いた高速炉燃料再処理技術の開発

(1)で設計した再処理工場を用い、高速炉から発生する使用済燃料を、軽水炉UO₂使用済燃料と混合しながら処理する技術の検討を行う。これらの検討は、(1)と並行して行い、(1)での再処理工場の設計に反映させることが重

要である。

(3) 軽水炉燃料よりUを先取りする技術の開発

軽水炉燃料からUのみを先に取り除き、UとPuの比を高速炉使用済燃料程度に調整できれば、軽水炉使用済燃料を高速炉燃料再処理プロセスで適切に処理することができる。さらに、使用済燃料からUを先取りし、直接、新燃料に必要なUとPuの組成とすることができれば、より簡便な再処理プロセスとなることが期待できる。このように、Uのみを先に取り除く技術は、各種の燃料再処理に対し柔軟性を持たせる意味で重要である。これまでに様々な技術が開発されているが、対象とする使用済燃料と必要な製品の関係を考慮し、適切な技術を選定することとなる。

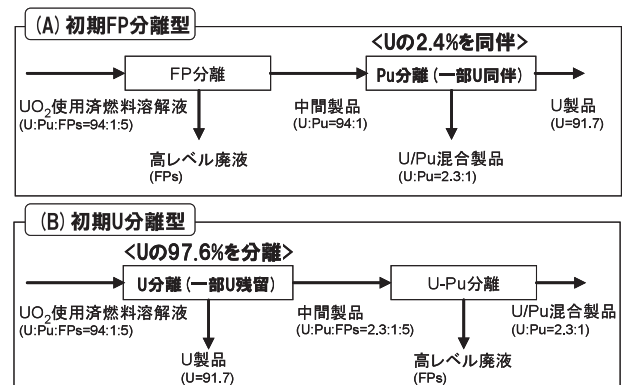
(4) 精製プロセスおよびMA回収プロセスが追加可能なプロセスの設計

今後設計する再処理プロセスは、分離工程において回収されたUやPuをさらに精製する工程や、高レベル廃液からMA元素を回収する工程などの将来必要となると予想される工程が付加できるプロセス設計としておくことが大切である。

第4表 使用済燃料を新燃料組成にするための分離技術の評価

使用済燃料と新燃料の組み合わせ (使用済燃料中のUとPuの比率から、新燃料に必要な比率とすると)					
使用済燃料	軽水炉UO ₂ U:Pu:FP=94:1:5	軽水炉UO ₂ U:Pu:FP=94:1:5	軽水炉MOX U:Pu:FP=91:5:4	軽水炉MOX U:Pu:FP=91:5:4	FBR(混合) U:Pu:FP=78:12:10
新燃料	FBR-炉心 U:Pu=70:30 低除染	軽水炉MOX U:Pu=90:10 高除染	FBR-炉心 U:Pu=70:30 低除染	軽水炉MOX U:Pu=90:10 高除染	FBR-炉心 U:Pu=70:30 低除染
A型分離によるプロセス (使用済燃料中のPu量に対して同伴させるUの割合で評価)					
Pu分離工程でのU同伴割合 (%)	2.4	9.6	12.9	49.6	35.9
Pu分離技術	A	A	A	B U同伴割合が高い	C Pu濃度が高いため、U同伴が困難
モ/プ/ド抽出法 (Pu選別抽出法)	A	A	A	B U同伴割合が高い	C Pu濃度が高いため、U同伴が困難
B型分離によるプロセス (使用済燃料から先取りするUの割合で評価)					
U分離工程でのU分離割合 (%)	97.6	90.4	87.1	50.5	64.1
U分離技術	C 回収率が不適	C 回収率、DF共に不適	B 回収率が不十分	C DFが不適	A
最新法	A	A	A	A	A
UREX法	A	A	A	A	A
モ/プ/ド抽出法	A	A	A	A	A
MCP法	C 回収率が不適	C 回収率、DF共に不適	C 回収率が不適	C DFが不適	A
フッ化法	A	A	A	B 回収率が低すぎる	B 回収率が低すぎる

A:適用可能性大、B:適用可能性中、C:適用可能性小



第4図 軽水炉UO₂使用済燃料からFBR炉心新燃料の製造

—参考資料—

- 1) 塚田毅志, 井上 正, “FBR 移行期サイクルに適した再処理プロセス技術の調査と開発方針の検討”, 電中研調査報告, L07014, (2008)
- 2) 日本原子力研究開発機構, 日本原子力発電, “高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究; フェーズII最終報告書”, JAEA-Evaluation 2006-002, (2006)

—著者紹介—

塚田毅志(つかだ・たけし)



電力中央研究所
(専門分野/関心分野)原子力化学工学/湿式
および乾式再処理技術, 廃棄物固化技術お
よび固化体性能評価

井上 正(いのうえ・ただし)



電力中央研究所
(専門分野/関心分野)燃料物性, 乾式再処
理/燃料サイクル

From Editors 編集委員会からのお知らせ

- 学会誌記事執筆者のための
テンプレートを用意しました
執筆要領と合わせてご利用下さい



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

- 和文論文誌の執筆用テンプレートを
改定しました。
<http://www.aesj.or.jp/publication/ronbunshi.htm>

—最近の編集委員会の話題より—
(12月5日 第6回編集幹事会)

【論文誌関係】

- Web 利用論文審査システムは、今年度中の運用開始に向けて最終的なチェックを進めることとしました。
- 理事会運営ボードにおいて、論文誌の編集全般についてこれまでの経過と方針を報告し、意見交換を行いました。
- 学会誌12月号に、論文審査側から見た解説記事「なぜ掲載否と判定されるのか」を掲載した。掲載否となった論

文によく見られる問題点と、完成度と信頼性の高い論文を執筆するためのポイントが列挙されていますので、ご一読ください。また、論文誌のホームページに関連記事を掲載しましたので、そちらも参考にしてください。

【学会誌関係】

- 創立50周年記念号(4月号)掲載予定の部会・連絡会の記事は、17部会5連絡会より原稿の提出があり、一部は既に入稿済み。2部会が未提出。
- 創立50周年記念号の表紙デザインを決定し、副題は「原子力の道程：轍の先に」としました。
- 共同研究のニュース記事は関係機関名を併記することとしました。
- Web アンケートの結果のまとめを月号掲載していますが、内容をもう少し詳しく掲載することとしました。

編集委員会連絡先 hensyu@aesj.or.jp

社会に信頼される原子力を目指して —原子力と社会の共進化

東京工業大学 山野直樹, 藤井靖彦, 水尾順一,
科学技術振興機構 鳥井弘之

エネルギー安全保障と地球温暖化対策の観点より, G8 洞爺湖サミットにおいても世界の持続的発展に貢献する原子力が改めて期待されている。しかし, 足元を見ると, 不確実性が議論となる処分地選定問題など, 原子力への不安・不信感に対する課題は未解決のままである。

東京工業大学では, 5年間の21世紀 COE プログラム「世界の持続的発展を支える革新的原子力」において原子力の社会受容に関する研究を実施した。平成20年3月に終了した COE 活動のうち, 「原子力と社会の共進化」研究および関連した教育研究活動の成果を紹介するとともに, 得られた知見から, 社会に信頼される原子力を目指すための今後の取組みについて述べる。

I. はじめに

原子力技術はエネルギー安全保障と地球温暖化問題を解決する技術であるとともに, 放射線利用を含めると, 今や社会の隅々まで浸透している社会技術である。しかし, 技術側も社会側もこの意味を正確に認識しておらず, 十分に適応しているわけではない。過去の事故・事象, さらにそれらの隠蔽や虚偽報告が報道され, 放射能・放射線に対する漠然とした恐怖感や原子力に対する忌避感が一般社会の潜在意識下に沈着し, 原子力は社会と乖離したままである。

この乖離の解決のため, 筆者らは次章で示す「共進化」という概念を提唱した。その「共進化」を進めるに当たっては, 「社会的責任」(Social Responsibility: SR)の理念を明らかにし, 原子力に携わる組織や人の問題を解決し, 社会に受け入れられるための新たな仕組みを構築することが重要であると考えた。

この「共進化」を実現する仕組みを構築するために, 筆者らは次の考えに基づいた活動を行った。

- (1) まず科学技術専門家とその組織が社会の信頼を得なければならない。このために原子力の社会的責任を定義し, 自らに課す SR 実践研究を行った。

*Aiming for Nuclear trusted by the General Public—
Co-evolution of Nuclear Technology and Society*: Naoki YAMANO, Yasuhiko FUJII, Jun-ichi MIZUO, Hiroyuki TORII.

(2008年 10月15日 受理)

^{a)}「合理的無知」とは, 知識を得るメリットが, それを得るために必要な費用や努力よりも小さいならば, 合理的に考えて, その知識を得ることを放棄すること。

- (2) 科学技術者が一般市民との対話の重要性を認識することが必要である。これを教育研究として取り上げ, 地域市民フォーラムを実施した。
- (3) 技術側が社会のニーズに敏感でなければならない。これまでの原子力ユーザーとは全く異なる地域社会や企業体と共に原子力技術利用を考える, 大洗フィールドワークや化学コンビナート企業を対象とした原子力利用検討会を実施した。
- (4) 技術と社会の相互作用を強めるには, 技術に対する社会の意識を分析することが重要である。そのために原子力に対する社会の意識調査を行った。

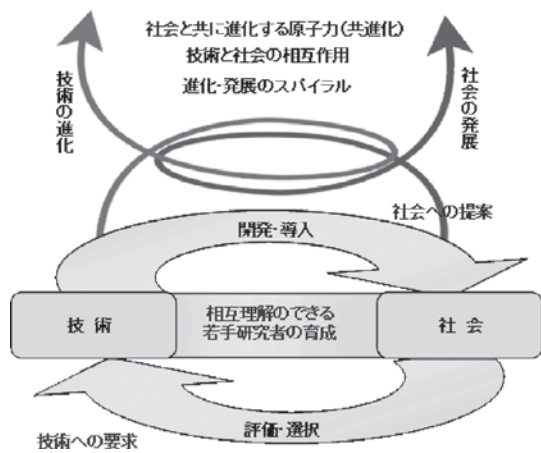
本稿では, 上記の研究教育活動を概説し, 社会に信頼される原子力を目指すための取組みについて述べる。

II. 「原子力と社会の共進化」概念と実践^{1,2)}

産業革命以降, 技術と社会は共に影響を及ぼしあって発展してきた。「共進化」の概念は, 技術と社会が共に進化(共進化)する観点に立脚した取組みである。単なる「共存」や「共棲」ではなく, 相互に影響し合って変化することが「共進化」の概念である。技術推進側は, 一般社会の意識や意向をよく理解したうえで技術の開発に携わることが求められる。また, 一般社会側も「利害共有者」としての認識, 合理的無知^{a)}からの脱却, 様々な「知」を活用する方法, 技術のリスクや不確実性に起因する問題への対処について考えていくことが求められる。この「共進化」の概念を第1図に示す。

筆者らは原子力と社会の共進化を実現する仕組みとして, SRに立脚した手法を提唱し, その共進化の持続的発展の条件を明らかにした。

そのうえで社会との健全な関係構築に向けて取り組む



第1図 技術と社会の共進化の概念

ことは、次の3つである。

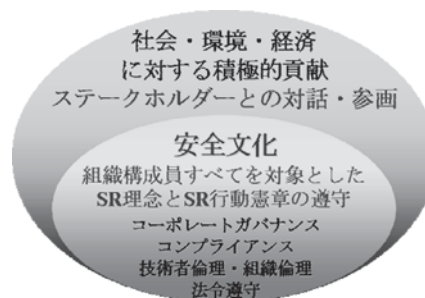
- (1) 一般社会に対する説明責任を果たす。原子力がつりリスクのみならず、科学技術のもつ不確実性についても誠実に説明する。
- (2) 透明性を保証^{b)}した情報公開を行う。一般社会に理解できる情報公開を行うことはもとより、意思決定プロセスの各段階について透明性を保証する。
- (3) 一般社会との価値観の共有を図るために、社会の意識や意向に耳を傾けながら、それを指針とする。すなわち公衆参画(Public Involvement)の仕組みを取り入れることが極めて大切である。

Ⅲ. 原子力の社会的責任の重要性²⁾

企業の社会的責任(CSR)をより一般化したSRは、国際規格ISO 26000として2010年末の発効に向けた準備が進んでいる。法令遵守から組織倫理までを含む広義のコンプライアンスから環境保護、人権保護、男女共同参画に至るまで、組織の社会的責任を包括したSRは今後企業のみならず、病院、行政、学校など広い範囲の組織に適用されるであろう。原子力は、人と同様に、組織も倫理に裏打ちされ、社会に信頼されることが求められる。原子力は正にSRを率先して果たすべき分野である。

原子力の社会的責任(Nuclear Social Responsibility: NSR)は、狭義と広義の2つの考え方でとらえることができる。狭義は原子力の安全性、平和利用など、原子力そのものが果たすべき社会的責任である。一方、広義では、組織や構成員の行動まで拡大した社会的責任を意味し、これには組織の行動理念・行動憲章の策定をもとに安全文化の構築、さらには人権、環境や社会貢献活動などを含めた多様な視点からの取り組みが包含される。筆者らはNSRを広義にとらえ、「持続可能な社会の発展を目的として、原子力組織における事故や不祥事の発生を未然に防ぐための安全文化を構築するとともに、社会・経

^{b)}「透明性の保証」とは、可能な限り情報を提供するだけでなく、手続きそのものも透明化し、説明を求められた場合、意味のある対応を保証することを意味する。



第2図 原子力SR(Nuclear Social Responsibility)の概念

済・環境に対して積極的に貢献していくために、組織の内外に働きかける制度的義務または主体的取組みの責任」と定義した。

NSRは、第2図に示すように、コンプライアンス(法令遵守、技術者倫理、組織倫理を含む)とコーポレート・ガバナンス(組織統治)を基盤として、原子力安全文化を構築し、さらにステークホルダー(利害共有者)参画を通して、トリプル・ボトムラインといわれる、社会・環境・経済への積極的貢献を行う組織活動によって果たされる。

筆者らはCOEの中核専攻を擁する東工大原子炉工学研究所を対象としたステークホルダーの概念を第3図に示すように明確にした。すなわち、中心的なコア・ステークホルダーとして、国民(未来世代を含む)、地域住民、学生、行政(文科省含む)、教職員、地球環境の6者、それを取り巻くマルチ・ステークホルダーとして、取引先(協力業者)、マスメディア、原子力に関わる企業・研究機関・大学、NPO/NGO、原子力反対派、国際社会の6者で合計12者となる。

NSR活動を実践し、外部に向けた啓発を行うために、まずSR理念・行動憲章の制定が必要となる。原子炉工学研究所では、教職員が参画するボトムアップの全員参加型審議で、このSR理念・行動憲章を「SRイニシアチブ」として2007年7月に制定した³⁾。

原子炉工学研究所のSRイニシアチブは、「暗黙知」を「形式知」に変換し、組織内にSRの浸透・定着を促進する対話、すなわちSRコミュニケーション機能を高める



第3図 ステークホルダーの概念

重要な意義がある。組織は個人の集合体であるので、組織倫理の醸成は、その根底となる個人の誠実性(Integrity)が基礎となる。一方では、組織倫理が個人倫理に影響を与えることも事実であり、その組織倫理の根底には組織の風土がある。日本の組織には、暗黙知といわれる風土が存在するが、組織によっては、暗黙知の価値が伝達・共有されずに、非倫理的行為に直面したときに結果的に議論を避ける「コミュニケーション障壁」につながることもある。今後はSRコミュニケーションを通して、日本固有の「伝統的な禁忌」の悪しき風習を打破しなければならない。

NSRを築き上げるには、ともに働く仲間たちの共感が求められることから、トップダウンによるSR推進とともに、草の根的なボトムアップ活動を取り入れることが重要となる。つまり、組織風土に倫理的価値観を吹き込むためには、仲間たちが主体的に取り組む「意思」を注入しなければならず、そのレベルの高さが安全文化の浸透・定着を通じて社会貢献の深化につながる。さらには、環境との調和、経済業績、社会貢献というトリプル・ボトムラインのバランスある実現に結びつくための積極的貢献としてのSRコミュニケーションを生み出すのである。

その意味から、東工大原子炉工学研究所で制定したSRイニシアチブは、原子力研究教育組織として世界で初めての試みであり、またその策定過程もステークホルダー参画の視点から示唆を与えるものである。

SRイニシアチブの内容は原子炉工学研究所内にポスター掲示するとともにホームページに公開した[○]。所属する教職員、研究員、支援・補佐員(アルバイト含む)および学生に周知するため、SRイニシアチブカード(日本語版/英語版)を全員に配布した。

IV. 地域市民フォーラム研究活動²⁾

「地域市民フォーラム」は、SRの観点によるステークホルダー対話を通じた合意形成に関する知見を得るための社会実験である。このフォーラムは教育研究としてもとらえ、COEのResearch Assistant(RA)として採用した本学の博士課程学生(以下RA学生と呼ぶ)を主体とする実践的な対話の場を設計した。東工大岡山キャンパス周辺に在住する地域市民を含むステークホルダーの協力を得て、平成17～19年度の3年間で計14回の地域市民フォーラムを開催した。

地域市民フォーラムの目的は、ステークホルダーと博士課程学生の対話により、原子力の課題を発見的に可視化[△]し、コミュニケーション・ダイアログによって原子力の課題がフォーラム参加者に共通認識・共有化さ

れ、解決に向けての議論が進められるかを検証することにある。対話主体を専門家ではなく博士課程学生としたのは、フォーラム参加者と類似の視点・観点を持つ学生が対話することによる相互理解の進み方・心理的距離を観察し、かつ一般市民との対話の重要性を博士課程学生に認識させる教育的観点による。

ステークホルダーは、参加希望者のうち、国民(生活者・消費者)、地域住民、学生、行政(政策立案担当者)、原子力関連企業関係者、マスコミ関係者、国民(起業家)にお願いし、学生はRA学生内で公募して希望者を選定した。1回のフォーラムは10名以内とし、途中休憩を挟んで2～3時間実施し、COE研究員が進行役(ファシリテーター)を務めた。地域市民フォーラムの活動風景を第4図に示す。

対話には、事前にテーマを通知し、原子力知識がなくても円滑に対話できるように、またテーマ以外には特に制約を設けず自由に発言できるように配慮した。内容は、原子、原子核、放射線などの基礎から世界のエネルギー需要、世界の発電比率、各発電方法の特徴、日本人と原子力の歴史、国・企業と原子力、放射線利用、原子炉と原爆の違い、核物質、核融合、廃棄物、原子力のキャリアデザイン、原子力広報、不祥事の原因・責任・対策、規制、関係法規、倫理、マスコミ報道されたニュース、革新的原子力技術まで話題が広範囲となった。

フォーラムを通じて、様々な価値観や経験を背景とする一般市民にとって、未知であった原子力、エネルギー、科学技術に対する関心が自然に高まり、相互理解が促進されることを検証した。RA学生には、積極的に自己開示のうへで対話し、対話内容についても日々の生活や暮らしの中から材料を引き出す工夫を行わせることにより、相互の心理的距離が縮まり、信頼が増すことを測定した。

平成19年度は、対話だけでなく、誰もが《共に考える》「原子力・エネルギーの現状把握と未来の期待度を測るツール」を学生が作成し、ステークホルダーが参画する仕組みを考案した。この試みから、《共に対話する》から《共に行動する》ことが可能であることが示唆された。本フォーラムを通じて、合意形成にはまず相互理解と心理的距離を縮めることによる信頼の醸成が必須であることを検証した。教育効果としては、14回のフォーラ



第4図 地域市民フォーラム活動風景(2007年度)

[○]<http://www.nr.titech.ac.jp/Japanese/Overview/sr.html>

[△]「可視化」とは、潜在している本質的な問題点を顕在化すること。

ム実践によって博士課程学生のコミュニケーション能力が飛躍的に向上するとともに、一般市民との対話の重要性を学生に的確に理解させることができた。

V. 地域フィールドワーク研究活動

「地域フィールドワーク」は、地域社会や一般企業との原子力技術の共進化に対する社会実験である。地域社会として、茨城県大洗町、一般企業として化学コンビナート企業を対象とし、これらの地域・企業が共進化できる原子力技術のあり方を研究した。

1. 大洗フィールドワーク¹⁾

町民憲章に「原子の火を育て…」を標榜する大洗町は、原子力による町の振興を進める意向である。しかし、原子力が大洗町民すべてになじみ深いわけではない。大洗町と原子力の共進化には、まず町民にエネルギーについて考えてもらうことから始め、徐々に原子力技術が何であるかを理解してもらい、町民が考える町の将来像の中で原子力を位置づけてもらう必要がある。筆者らは平成17年度に大洗町の各産業におけるエネルギー消費の実態調査から着手した。本学の教員とRA学生が現地に出向き、観光業、漁業、水産加工業、農業などのエネルギー消費構造や町の将来像を面談調査した。平成18～19年度は、年間400万人を超える観光客が訪れる観光の町の特性を生かし、観光客も調査対象として、水族館、科学館および地域住民の憩いの場である町営温泉や浜の市場を対象に対話型アンケート調査を実施した。

毎年、8月以降の土日に、教員・RA学生の数名のチームが大洗町を訪問し、調査票(アンケート用紙)を用いてインタビュー形式の調査を実施した。調査風景を第5図に示す。各年度400以上の回答票を回収し、市民の意識および原子力エネルギーへの期待や問題点などを分析した。回答者の属性は男女ほぼ同数で、年齢層は10代～60代にわたりほぼ均等な分布が得られた。分析はクロス集計、残差分析および数量化Ⅲ類などの統計手法を用いた。

分析結果の詳細は省略するが、大洗町に原子炉が存在していることが観光産業に与える影響は見られなかった。これは原子力利用にあまり好意的でない層でも同じであった。県外の観光客など大洗町と離れた居住者ほど、大洗町に原子力施設があることを知っている割合は低くなるが、今回の調査では、原子力施設の存在を知っ



第5図 大洗フィールドワーク調査風景(2007年度)

たことで大洗町の印象を悪くする傾向は見られなかった。これは、原子力をテーマとする体験型アトラクションが大洗町観光に有効であることを示唆するものである。

本フィールドワークには博士課程学生を各年度8～10名参加させた。参加学生は、アンケート調査を行った経験は全くなく、大洗町についても住民と対話する機会や経験を持っていなかった。学生には事前に本研究の目的と調査方法についてブリーフィングを行い、インタビュー調査におけるいくつかの基本的な注意点のみを説明した。市民に話しかけるタイミングや具体的な対話方法については特に指示をせず、学生自身の判断に任せた。これは、あらかじめ用意されたマニュアルに従って対話をするのではなく、実践的な経験を積ませることにより、学生自らが創意工夫して自分の言葉による対話方法を習得することにより、コミュニケーション能力を高めてもらうための教育的配慮である。

調査開始当初は、学生は住民に話しかける方法がわからず調査票の回収率は悪かった。しかしながら、観光施設のスタッフの方々に親切にご対応頂き、調査に適した場所や客層を教えてもらったり、教員が住民に話しかけるタイミングや対話方法を参考にしながら、効率よい方法や話しかけるきっかけなどを独自に考案するようになった。調査終了後には宿泊先で反省会を開き、好ましい対話方法や態度などについて教員を含め議論した。その結果、2回目以降の調査においては、学生自らが意識改革を行い、積極的に住民に話しかけるなどの著しい進歩が見られた。

参加学生からは体験談を聴取し、日頃の研究生生活とは全く異なった経験をしたこと、地域市民と率直に話ができるようになったこと、観光施設の職員の方々をはじめ大洗町民との交流ができたことは新鮮であった、などいづれも好意的な感想が得られた。時には住民より、原子力に対する厳しいご意見をうかがう場合もあり、座学や模擬的なディベート演習等では決して得られない実践的な教育効果が得られた。

2. 化学コンビナート対象の原子力検討会²⁾

原子力がエネルギー多消費産業と共進化する可能性を検討するため、化学コンビナートを対象とした共進化実験を平成17年度から3年間実施した。検討は以下のように行った。(1)化学コンビナートにおけるエネルギー利用や規模についてのヒアリング協力企業を「A社」とし、A社の要求仕様をヒアリングによって作成する。(2)高速炉、軽水炉、革新炉等の専門家が、この要求仕様を満足する原子力技術の提案を行う。(3)A社を含めて要求仕様を満足する原子力技術についてのシミュレーションを検討会メンバー全員で行い、共進化のための要件や課題について検討する。

化学コンビナートは、安価でCO₂削減可能な電力源の安定供給が今後確保できなくなるのであれば、海外に工場を移転せざるを得ず、地域は衰退する。現在の電力供給状況では、日本で生き残れる産業は限られる。原子力で200℃程度の蒸気を生産し、高温蒸気は石炭火力で加熱して製造する原子力と石炭火力のハイブリッド発電といった考え方も有効である。自家発電用に適した小型原子炉の研究を今後進めるには、エネルギーコストと温度・圧力、材料の関係について検討するとともに、化学コンビナートが原子力を利用するための社会的・制度的制約条件にどう対処するかなどの検討が必要である。

ここでは、化学コンビナートA社という仮想的な企業を考えたが、「社会のニーズに合致した原子力技術の開発はいかに進めるべきか」という問いに対する認識を深め、視野を広げることが期待できる点で本検討会は意義深いと考えられる。

VI. 社会と原子力の関係に関する社会調査⁵⁾

一般社会が原子力を受け入れにくい要因には、原子力の進め方に対する合意形成や意思決定過程の不透明性に起因する課題もある。そのため、原子力利用に対する一般社会の意識調査を実施した。

意識調査は、予備調査と本調査を行い、本調査は平成18年11～12月に、首都圏40 km 範囲に在住する一般市民2,500名を無作為抽出で選定し郵送法で実施した。

質問項目は、原子力利用に関する意識(11問)、価値観、社会生活を営む意識、科学技術と生活に関する事項、エネルギー・環境問題への意識、自身に不利益となる決定事項に対する対応、科学技術に関わる国や地域レベルでの決定過程への参画意欲などに関する意識(17問)を個人属性と合わせて尋ねた。原子力利用の賛否結果と他の様々な質問の回答傾向との関連を前述した統計手法を用いて分析した。

分析結果より慎重に進める層(52%)と現状維持層(13%)には、「弱い賛成－賛成的」と「弱い賛成－反対」の両者が混在していることがわかった。これらの層は、原子力利用に興味・関心が低く、自身への関わり意識が低ければ、国や地域レベルの政策決定に対する参画意欲も低く、“沈黙・曖昧”な態度を示す。しかしながら、なんらかの参画が可能で、関与したうえで決定事項であれば納得する傾向が示された。

VII. 今後の取組み

「原子力と社会の共進化」研究によって、社会受容に対する本質的な課題はかなり明確になった。NSRの推進や透明性を保証した公衆参画による意思決定過程の公共政策への適用などが求められる。しかし、その解決に向けた取組みは道半ばである。

NSRの実践には、その実践に向けてのシステム構築

および種々のNSR実践ツールを開発しなければならない。「SRイニシアチブ」に立脚した、NSR教育・訓練、推進体制、コミュニケーション啓発活動に取り組む必要がある。

公衆参画による意思決定過程については、参画方法や透明性を保証する公正な手続きの仕組みの研究が必要である。「共進化」の概念に基づいた、これらの手法を発展させ、合意形成を図る仕組みを考究し「原子力合意形成学」として体系化していきたい。

筆者らは共進化研究と教育を有機的に組み合わせ、博士課程学生のコミュニケーション・ダイアログを涵養する実践教育を行った。「地域市民フォーラム」や「大洗フィールドワーク」は効果的な教育方法であり、学生には社会に対する見識を身につけるよい機会となった。社会とのコミュニケーション力育成のための実践教育は他大学にも広く普及することを期待する。

人材育成は長期的視野に立ち、改良を加えながら継続的なプログラムとして実施することが肝要である。しかしながら、COEプログラムは博士後期課程学生を支援する時限的枠組みであり、修士課程以下は対象外である。社会と対話できる人材育成は学部学生や修士課程学生にも極めて重要である。社会に信頼される原子力を目指す、技術と社会の分野横断的な学際研究や実践教育に対する経済支援は非常に少なく、これらの研究と教育に対する読者諸兄のご理解とご協力をお願いしたい。

地域市民フォーラムでは、多数の地域市民のご協力を頂戴しました。大洗フィールドワークでは、大洗町長の小谷隆亮氏はじめ町役場職員の方々、観光業、漁業、水産加工業、農業、観光施設の皆様のご協力を頂きましたことに感謝します。

—参考文献—

- 1) 鳥井弘之, 科学技術文明再生論, 日本経済新聞出版社, ISBN 978-4-532-16579-6, (2007).
- 2) 世界の持続的発展を支える革新的原子力 研究・教育活動成果報告書 最終成果報告, 東京工業大学, ISBN 978-4-903054-23-0, (2008).
- 3) 有富正憲, 矢野豊彦, 水尾順一, 藤井靖彦, 赤塚 洋, 山野直樹, 鳥井弘之, 関本 博, “東工大原子炉工学研究所のSRイニシアチブ”, 日本原子力学会「2007年秋の大会」予稿集, A 03(2007).
- 4) 大洗フィールドワーク調査報告書, 東京工業大学, ISBN 978-4-903054-22-3, (2008).
- 5) 社会と原子力の関係に関する社会調査報告書, 東京工業大学, ISBN 978-4-903054-17-9, (2007).

著者紹介

山野直樹(やまの・なおき)



東京工業大学
(専門分野/関心分野)原子力の社会的責任, 原子力と社会の共進化, 核データ評価・積分検証, 放射線利用, 放射線遮蔽工学

藤井靖彦(ふじい・やすひこ)



東京工業大学
(専門分野/関心分野)同位体化学, 分離と分析, 無機化学, イオン交換/原子力教育と人材育成, 原子力と国際関係

水尾順一(みずお・じゅんいち)



東京工業大学/駿河台大学
(専門分野/関心分野)企業の社会的責任, 原子力の社会的責任, コンプライアンス, コーポレート・ガバナンス, コーポレート・ブランド

鳥井弘之(とりい・ひろゆき)



科学技術振興機構
(専門分野/関心分野)社会と科学技術の相互作用が関心分野で, 両者が相互に影響しながらダイナミックに変化する共進化を提唱

新刊紹介

間違いだらけの原子力・再処理問題

山名 元著, 203 p. (2008.5.), WAC BUNKO 81.
(価格945円, 税込) ISBN-13:978-4898315811

六ヶ所再処理施設の安全性に関する公衆の不安は, 近年の岩手県議会での請願採択からもうかがわれる。また, 一部の出版物では, 印象に基づいて原子力への反対が主張されている。本書は, これらの動きに対し, 「原子力や再処理をもっと理性的に議論しよう」という著者からの誘いである。

著者は, 旧動力炉・核燃料開発事業団(現原子力機構)の東海再処理施設や先進リサイクルに関する開発に携わった後, 現在は京都大学原子炉実験所の教授として, 核燃料サイクル分野のオピニオンリーダーと目されている。

本書の前半である1~3章では, 再処理施設の安全性を採りあげている。1章では, 放射能と放射線影響の違いを解説し, 2章では, 放出核種が異なることによる周辺影響の相違について, 特に炭素14, トリチウム, クリプトン85, ヨウ素を中心に説明している。3章では, 原子力発電所からの放出放射能による周辺影響と対比しながら, リスクとハザードの違いやリスク認知などを解説しており, 前半を通読すると放出放射能によるリスクが十分低く抑制されていることがわか

る。後半の4~5章では, 再処理や原子力の必要性を採りあげている。4章では, 再処理施設の基本的機能を説明した後, リスクと効用の多面的な比較を通じてその必要性や意義を示し, 5章では, 国際情勢を踏まえて原子力発電の優位性を述べている。

本書には一見センセーショナルなタイトルが冠せられているが, 短絡的な記述を排した丁寧な解説から再処理にまつわる誤解を解きほぐそうという著者の熱意が伝わってくる。特に, 一般書籍であるにもかかわらず, 1~3章で再処理施設からの放出放射能影響について, わかりやすい技術的な説明のあることが, 本書の大きな特長となっている。4~5章では, 原子力政策大綱策定時に実施された総合的な比較評価を踏まえ, 「群盲象を撫でる」の例えを引きながら再処理の必要性を解説しており, 原子力政策に関する貴重な教材ともなるだろう。2章を除く各章では, 再処理に関するトピックス・批判について誤解を含めて提示してから著者の解説が続くという形式を取っており, じっくり読むと, 再処理問題の本質を理解できるという, 価値ある書物である。

(原子力機構・塩谷洋樹)



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8回 VII. 核融合材料のメソスケールシミュレーション

日本原子力開発機構 蕪木英雄, 鈴木知明, 板倉充洋

I. はじめに

一般的に、放射線照射下での構造材料は、硬化や脆化などが起こり寿命が短くなる。照射が構造材料に及ぼす影響の研究についてはすでに長い歴史があるが、核融合炉の実現に向けてさらなる技術の飛躍が必要である。核融合炉が照射という観点から決定的に軽水炉と異なるのは中性子のエネルギーである。DT核融合炉では約14 MeVの中性子が生成され、プラズマに直接接触する核融合炉ブランケットの第一壁部分は高速中性子にさらされることになる。したがって、まず候補材として低放射化材であることが望まれる。現在、日本ではF82H、ヨーロッパではEUROFERと呼ばれるフェライト/マルテンサイト鋼の候補材が開発され、それぞれ試験研究が行われている。しかしながら、フェライト/マルテンサイト鋼の中性子照射に関しては、まだ多くのことがわかっていない。特に、核融合炉と同じような条件の照射実験を多数行い、データを蓄積するには、多くの時間と費用を必要とする。このような観点から、計算科学または計算機シミュレーションに対して、現象のメカニズム解明とモデル化により実験データを補間、拡張する役割が期待されている¹⁾。

金属が、電子、陽子、イオン、中性子等の高エネルギー粒子の照射を受けると、結晶格子中の原子は正常な位置からはじき出されて損傷を受ける。電子のような軽い粒子による照射の場合では、格子位置からはじき出された

原子が格子間に入った格子間原子ともとの格子位置に空孔が発生する(第1図)。これらをフレンケル対と呼ぶ。重イオンや中性子による照射の場合では、原子のはじき出しが次々と発生して、より複雑な衝突カスケードを形成する。衝突カスケードでは、フレンケル対だけではなく、格子間原子や空孔が集まってクラスタが形成される。はじき出された格子間原子の大部分は空孔と再結合して元に戻る。材料の温度、格子間原子を吸収するシンクの存在にも依存するが、はじき出された原子の一部は、格子間原子、空孔同士から構成される大きな欠陥クラスタに成長する。特に衝突カスケード中では、欠陥の分布に非一様な空間的な相関をもたらし、マイクロ組織の変化を生じ得る。

第1図において、空孔や格子間原子のような欠陥は、その形状から点欠陥と呼ばれ、点欠陥の集合体をクラスタという。それに対して、材料の塑性を担う線状の格子欠陥を転位と呼ぶ。転位は、結晶中のある面ですべりが生じたとき、すべりが生じた部分とすべっていない部分との線状の境界を構成する欠陥である。転位の運動は、材料の塑性変形のマイクロな表現である。一般的に、転位は点欠陥を吸収する。この吸収の強さをシンクの強さと呼ぶ。転位の格子間原子に対するシンクの強さは空孔に対するそれよりも一般的に大きい。フレンケル対としてできた同数の空孔と格子間原子のうち、格子間原子が多く転位に吸収されるので、バルク中には空孔が余ることになり、再結合できなくなる。このようなシンクの強さの差が引き起こす効果を、一般にバイアス効果と呼んでい

The Fusion Reactor Wall is Getting Hot!—A Challenge towards the Future for Numerical Modelling (8):

Chap. VII Mesoscale Simulations of Irradiated Materials: Hideo KABURAKI, Tomoaki SUZUDO, Mitsuhiro ITAKURA.

(2008年 11月5日 受理)

各回タイトル

第1回 I. はじめに

II-1 壁の前で何が起きているか？(物理モデル)

第2回 II-2 壁の前で何が起きているか？(プラズマの攻撃)

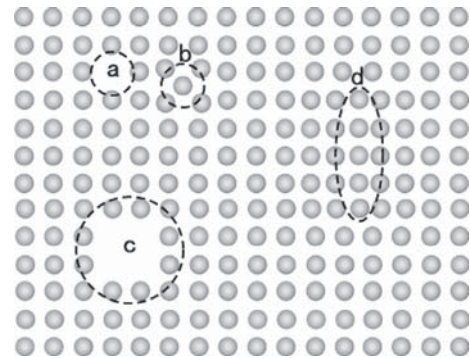
第3回 III. 壁の表面で何が起きているか

第4回 IV. 壁の中で何が起きているか

第5回 V. 壁はどのくらい熱くなるか

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

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



第1図 照射によって生成される様々な格子欠陥、空孔(a)、格子間原子(b)、空孔クラスタ(c)、格子間原子クラスタ(d)

る。バイアス効果は空孔クラスタの形成および成長を促進する。このシンクの強さの差はわずかであることがわかっているが、そのわずかな差が、照射環境に長時間さらされ欠陥が蓄積されて、材料の機械的性質に大きな影響を及ぼす。例えば、体積変化で10%程度のスエリング(膨張)が起ると、構造材としては大変使いにくくなる。核融合炉材料として照射量100 dpa(dpaは、照射によりはじき出された格子原子数の照射領域に存在する全格子原子数に対する比)を想定した場合、スエリングを10%以下に抑えるためには、はじき出された格子間原子の99.9%が空孔と再結合しなければならないと評価される²⁾。この値からも、核融合材料研究がいかにチャレンジングであることがわかる。

II. マルチスケールモデリングにおけるメソスケールの計算科学研究手法

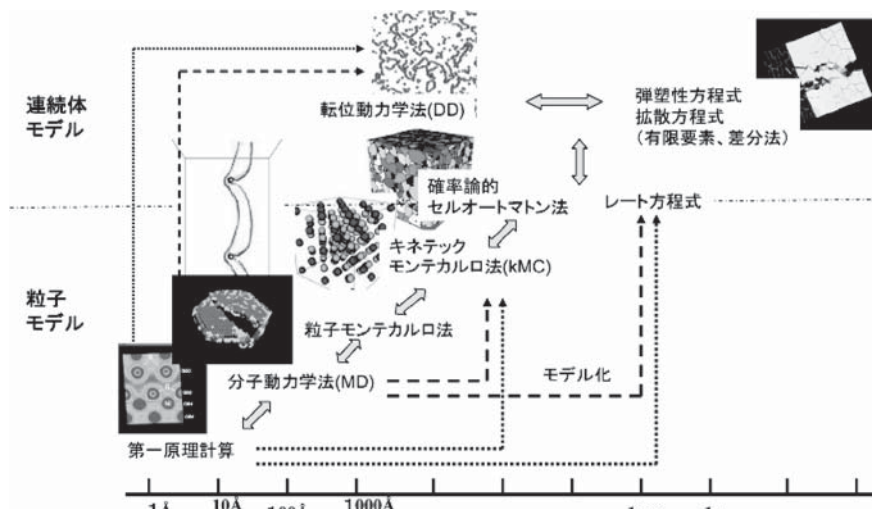
計算科学の照射損傷への応用はどのようにして行われているのであろうか? 上述のように、照射損傷は原子レベルの事象であり、それを物理的に記述するには量子力学的なモデリングが必要になる。このスケールで開発された計算方法は、基本的にどのような原子およびそれらを組み合わせた体系に対してもあいまいな仮定を用いることなく適用できるので、第一原理計算法と呼ばれ、上記で議論した欠陥に関連したエネルギーなどを最も正確に求めることができる。しかしながら、現在の最高速の計算機でもこれらの計算に使用できる原子数は100個程度で、それは1辺が1.3 nm程度の鉄の立方体にすぎず、大きく複雑な欠陥への適用は困難である。また、計算コストも膨大であり、原子配置の緩和計算によりエネルギー最小の体系を見つけることは可能であるが、現状では原子の時間変化を追う計算は困難である。

もう一つの計算科学で多用される代表的な方法論は分子動力学(MD:molecular dynamics)法である。これはあらかじめ与えられた原子間ポテンシャルを用いて一つの原子の古典的運動方程式を解いていく方法である。良い経験ポテンシャルができれば、この方法では体系の時間発展や温度の効果などの計算が期待できる。現状の計算機で取り扱える粒子数は単純な系なら数100万から1,000万個程度は可能である。この方法は、例えば、高速中性子を材料に入射した場合に生成される欠陥の種類やその数を評価するのに用いることができる。しかしながら、MD法での時間発展の長さは1 psから高々1 ns程度であり、空孔クラスタが熱的に移動して欠陥クラスタが成長するような長時間の時間発展計算には使えない。また、はじき出しカスケードのシミュレーションでは、入射粒子の方向についてのアンサンブル平均をとることなどの統計処理が重要であり、多くの計算機資源を必要とする。空間的な制約から実際の損傷状態を大域的

に再現するのではなく、ある注目すべき事象を取り出してそのシミュレーションを行うという使い方がされる。

このように、原子・分子レベルで正確なクラスタ形成・成長計算を行おうとすれば、時間的、空間的な制約は厳しくなる。しかしながら、実際の核融合炉構造材料は長時間にわたる様々な損傷の積み重ねにより劣化していく。このギャップは計算機技術の進展のみで簡単に埋められるようなものではない。以下で紹介するキネティック・モンテカルロ(kMC:kinetic Monte Carlo)法と反応速度論の方法は、いずれも近似の導入によってそのような制約をかなり軽減することが可能である。これらはメソ(ミクロとマクロスケールの中間のスケールのこと)からマクロスケールの現象に適用可能であり、従来から用いられてきた手法であるが、最近、ミクロからマクロスケールまでの手法を全体としてとらえるマルチスケールモデリングの立場から位置付けることにより新たな展開を見せている。メソからマクロの手法では、空間、時間的に平均した量を扱うため、経験的なパラメータが入ってくることは避けることができない。従来はミクロの手法が発達していなかったため、現象の素過程を正確に把握することができず、誤ったメカニズムに基づいた議論もなされてきた。現在は第一原理計算、分子動力学法等の原子論的手法による原子、欠陥等の運動に関する新たな知見に基づき、これらをメソ、マクロの手法と結合させて現象を予測し、従来の実験結果の解釈を見直すことも行われている(第2図)。

以上のようなマルチスケールモデリングの考え方は、電子、原子のミクロレベルの科学的計算とマクロレベルの連続体近似による工学的計算を同じスケール上で位置づけ、現象のモデル化という観点から、各スケールの計算手法を結合して工学的計算の予測精度を向上することを目的としている。マルチスケールモデリングを実施する際、構造物と電子、原子レベルの間のスケール比は 10^{10} を越すことや各スケールにおける計算手法の適用範囲の制約等から、特にメソスケールの領域に大きなギャップが存在している。このギャップを埋めるために、現在では精密な実験を用いてモデルの検証を行っていくことが行われている。マルチスケールモデリングの観点から照射材料を見たとき、大きくは2つの過程がある。一つは、照射欠陥クラスタの発達によるミクロ組織の変化を予測すること、次に、これらミクロ組織の変化から材料の機械的性質の変化を導出することである。照射現象の数値シミュレーションは主に前者の領域で実施されている。後者の領域では、MD法、転位動力学法、連続体の方法等による試みはあるが、引っ張り試験や破壊靱性試験の結果を直接再現するほどの手法が確立されているわけではない。しかし、マルチスケールの見方を通して、実験データの原子レベルからの機構論的理解が深まってい



第2図 マルチスケールモデリングによる計算科学手法

ることは確かである。

1. キネティック・モンテカルロ法

核融合炉材料においては、中性子照射によるはじき出しによって生成した格子間原子(以下 I と略記)や空孔(以下 V と略記)、および核変換により生成した He 原子等の一部が時間の経過とともに集合してクラスタを作り、それが材料の機械的性質を変化させる。長時間照射を受けた場合のこのようなクラスタの形成をシミュレーションする手法としてよく使われるのがキネティック(動的)モンテカルロ法(kinetic Monte Carlo), 略して kMC 法と呼ばれる手法である。格子欠陥の移動プロセスは MD 法の時間スケールに比べるとかなり遅い。この移動プロセスは通常は単純な熱活性過程であり、欠陥がとなりの場所に移動するためのエネルギー障壁を乗り越えた場合に移動が起こり、その頻度はエネルギー障壁の高さで決定される。このプロセスには欠陥のごく近傍の原子のみが係わっているので、他の原子すべての運動も計算するのは効率が悪い。そこで、格子欠陥のみに注目して、その移動頻度等の基本的性質を入力データとして他の方法で得て、それに基づいて格子欠陥の移動や反応を計算する kMC 法を用いる。

kMC 法と MD 法を比較した場合の大きな違いは、MD が時間を常に一定の割合で進めてその間に起こる過程をすべて計算する「タイムドリブン」な手法であるのに対し、kMC ではまず何が起こるかを先に決定してそのあとでそのような事象(イベント)が起こるためにはどの程度の時間経過が妥当かを計算して、それに基づいて時間を進める「イベントドリブン」な手法である点である。格子欠陥の移動は、MD の時間スケールで見ると非常にまれなイベントなので、長時間計算しても何も起こらない可能性があるが、kMC の場合では起こりうるあらゆるイベントをまずすべて列挙する。具体的には、すべての

格子欠陥について移動可能なすべての方向への移動を別々のイベントとして扱う。他にもイベントの種類があるがそれは後述する。

こうしてすべてのイベントのリストを作り、そのどれかが起こるまで時間を強制的に進める。それぞれのイベントの単位時間あたりの発生確率を P_i とおく。ただし、 $P_i \ll 1$ であるとする。時間 t の経過の後に「どのイベントも起こらない」という確率は $\exp(-\sum_i P_i t)$ と書ける。ここで、 $P_i \ll 1$ を使って近似した。このような確率分布は乱数を使って再現可能であり、0 から 1 まで一様に分布する乱数 r を用いて、「何かが起こる」までの時間を $-\log(r)/\sum_i P_i$ と決定することができる。具体的に、どのイベントが起きるのかも乱数を用いて決定する。各イベントが起こる確率は P_i に比例するから、区間 $0-1$ を P_i に比例した幅で分割して時間を決めた乱数とは別の乱数を置き、それが入った区間に対応するイベントを選ぶ。イベントを選んだら実際にそのイベントを起こし、格子欠陥の位置などを更新する。

一般的に、金属の場合、 I の移動障壁は 0.3 eV 程度、 V の移動障壁は 0.7-1.0 eV 程度で圧倒的に I が速く拡散する。一定の時間を経過させるための計算量は一番速く移動する欠陥の個数に比例し、通常は I の個数に比例する。 I と V の対消滅などによって I の数が減ってくると、今度は V の個数に比例した計算コストとなる。移動の計算に必要な移動頻度は、MD や第一原理計算により求める。必要となるデータは、欠陥がそのような移動を試みる頻度 J_0 と移動障壁エネルギー E_m であり、これらから移動頻度は $P_i = J_0 \exp(-E_m/kT)$ と計算できる。ここで、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。 J_0 は欠陥が安定状態のまわりで振動している振動数で置き換えることができる。障壁エネルギーは MD でも第一原理計算でも、移動の前後の状態の配置がわかっているならば、その間の峠点でのエネルギーを計算する手法がいろ

いる開発されている。イベントとしては、こうした欠陥の移動のほかに欠陥自体を生成するはじき出し過程も含める必要があり、新たに生成した I や V をはじき出しが起こった点の周辺にばらまいておく。

こうして生成した I , V , Heが拡散して別の欠陥と出会う。 I と V が出会うと対消滅して消え、 I 同士、 V 同士が出会えばそこで欠陥が合体しクラスタを作る。また、Heは V と出会うと空隙に入り込み安定化する。これにさらに V やHeが合体すると大きな空間にHeが複数含まれている「バブル」となる。 I が2つ結合したものを I_2 などと書くことにする。一般的に、対消滅やクラスタ形成はエネルギーが下がるので熱活性過程ではなく、出会うと瞬間的に起こるイベントである。したがって、 I , V , Heの移動イベントを1回発生させたら、近くに反応できる相手がいないか調べて、いた場合はすぐにその反応を起こす。具体的には、例えば I が移動した場合、移動先に V があれば両方消滅させる。 V のクラスタ V_n があれば I を消滅させ V_n を V_{n-1} に変化させる。移動先に別の I や I のクラスタ I_n がいた場合、合体して I_2 や I_{n+1} を作る。

このような計算を繰り返すことで、はじき出しによってHeバブルや I_n , V_n といった欠陥の集合体のうち、どれがどの程度の密度で形成するかを知ることができる。 I_n や V_n は転位の運動を阻害するので材料を硬化、脆化させる。そうした欠陥の密度と硬化、脆化の度合の関係を転位動力学などで見積もることで、材料の機械的性質の変化を予測することが可能となる。またHeバブルが粒界面にできると粒界面の結合力を低下させ、粒界脆化を引き起こすので、計算された粒界He濃度をもとに粒界脆化の度合を予測することができる。ただし、こうした見積りには、kMCの入力データを計算するMD, kMC, およびその結果を硬化、脆化に結びつけるモデルの3つの手法を組み合わせることが必要であり、正確な値を出すのはチャレンジングな課題である。

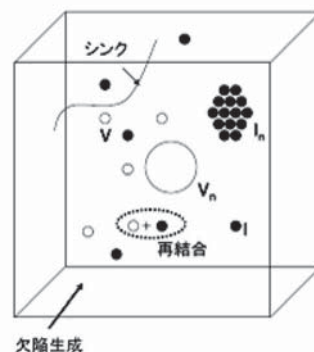
2. 反応速度論の方法

上記で見てきたように、kMC法は各照射欠陥間の反応に対応するイベントの発生確率をもとに、現象の時間変化を計算する方法である。この方法では起こりうるイベントをあらかじめ決めることによりMD法に比較して負荷を小さくすることができるが、原子レベルの過程の計算が残されているため、計算可能な領域、時間は大きな制限を受ける。実際の実験および原子力機器に対応した高照射量、長時間の時効現象を予測するには、少なくとも最大 10^6 個を越す原子から構成されるクラスタの形成、発展を記述しなければならない。そのため、原子レベルのモデルをより平均化した手法を用いる必要がある。はじき出しにより生成された格子間原子および原子空隙は拡散、再結合し、並行していろいろな大きさのク

ラスタが形成されるが、大きなクラスタに対しては平均場近似を用い、空間的に平均化した密度を求める。これらいろいろな大きさのクラスタそれぞれについて、密度の時間発展を記述する拡散-反応連立レート方程式を数値的に解くことが行われている。このような平均場近似を用いて照射欠陥クラスタ、ソース、シンク項の分布の時間、空間平均およびマイクロ組織の空間平均を埋め込んだ有効媒質を考えることにより、基本的にどのような欠陥の密度でも取り扱うことが可能になる。もちろん、平均化操作をすることにより、カスケード照射等による欠陥生成時の空間、時間相関等特定の情報が無視されることになる。これらの過程は多成分系における化学反応と同様の定式化が可能である³⁾。

いろいろな大きさの点欠陥が混在する系を考える(第3図)。照射により発生する欠陥としては、基本的には格子間原子 I と空隙 V 、およびそれらが n 個集合したクラスタ I_n , V_n がある。これらが、それぞれ相互に反応しあう体系を考える。今、種類 A と B の欠陥が反応して種類 C の欠陥ができる過程、およびその逆の反応過程 $A+B \rightleftharpoons C$ を考える。右方向に進む正の反応割合を表す速度定数を k^+ 、左方向に進む負の反応の速度定数を k^- とする。この系に存在する欠陥の種類 A, B, C の密度 C_A, C_B, C_C を定義する。ここで、欠陥が移動しない場合は全体系で一様に密度を定義し、移動する場合は局所的な密度分布を考える。一般的に、 I, V や小さなクラスタは拡散により移動し、大きなクラスタは移動しないと仮定することが行われている。上記反応式において、正と負方向に対応する反応の割合の差は $GR = k^+C_A C_B - k^-C_C$ となる。ここで、正の形成反応の速度定数は、各欠陥 A, B がある距離以内に近づいたとき反応が起こるように決める。逆に、負の解離反応の速度定数は、平衡条件($GR = 0$)を使い熱活性化過程として決める。

欠陥間の反応は、基本的に空隙 V と格子間原子 I の組み換えである。ここで想定する反応は、kMC法で考察したイベントと共通したモデルから導出する。空隙 V と格子間原子 I の数が変化するのは、初期条件における照射による欠陥の生成、空隙 V と格子間原子 I の反応



第3図 欠陥クラスタのモデリング

による消滅($I+V \rightarrow 0$)および転位等欠陥を吸収するシンクへの消滅による。これら生成、消滅過程以外は、 I 、 V の数は保存されるので、各種 A 、 B 、 C に対する連続の式、すなわち質量保存則を求めればよい。

以上のように、反応速度論の方法はkMC法と同じような運動論的モデルであり、取り扱うシミュレーション範囲も重なる領域があり、かつクラスタ反応の素過程のモデル化も共通している。しかし、これら2つの手法は基本的な相違がある。前者は決定論的であるのに対し、後者では確率論的である。また、クラスタの密度に対しては、前者では空間で平均化した有効媒質を用いるのに対して、後者は空間依存を持っている。最近、これら2つの手法を同じ領域、条件下で詳細に比較することが行われている⁴⁾。

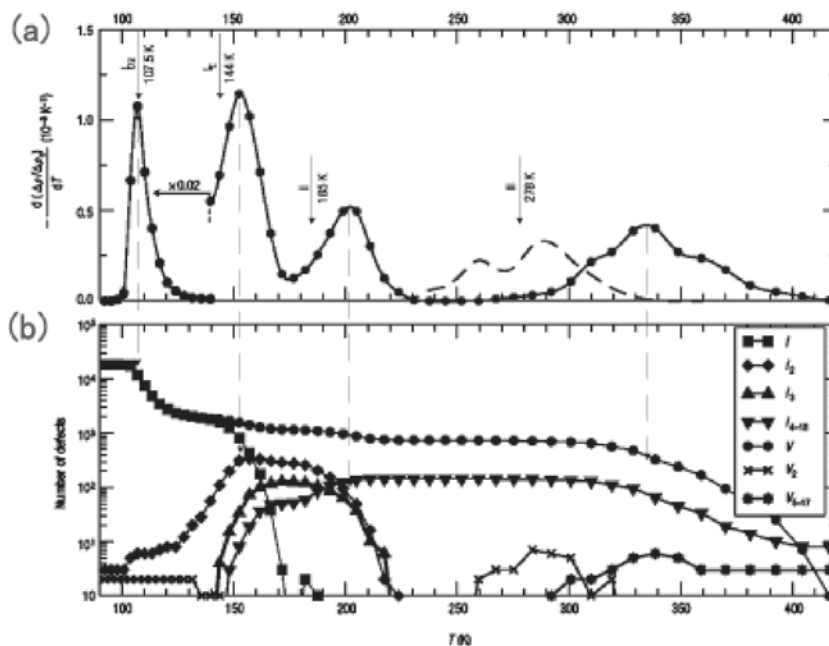
Ⅲ. メソ、マクロスケール領域における最近の計算科学研究

以上紹介してきたメソスケールの方法では大幅な近似が用いられているため、モデルの検証は重要である。この検証は同様の条件で行われた実験結果と照合することが最も望ましい。しかし、実際には実験と計算の詳細な比較は困難であることが多い。以下では、実験と計算との比較や計算における異なるメソスケール手法間の比較をした最近の代表的研究を紹介する。

最初の研究は、FuらのkMC法による照射欠陥クラスタの発達過程の研究である⁵⁾。この研究は、高純度 α 鉄の電子照射(照射量 $\sim 2-200 \times 10^{-6}$ dpa)後、アニーリ

ング時における電気抵抗測定結果⁶⁾をkMC法により再現することを試みたものである。この研究の一番の特徴は、第一原理計算により、 I 、 I_2 、 I_3 、 V 、 V_2 、 V_3 、 V_4 の欠陥の安定な配置、可能な移動メカニズムおよび結合エネルギーを定量的に決定し、それらの値をもとにkMC法における欠陥挙動のモデル化を行っていることである。材料中の格子欠陥は電気抵抗を増加させるので、電気抵抗を測定することによって格子欠陥の状態を推測することができる。実験では、低温で照射をして、一定の昇温速度で徐々に温度を上げていく。そうすると突然抵抗値が回復する温度があるが、これはある特定の種類の欠陥がこの温度で消滅することを示している。実験で得られた回復ステージは第4図中に矢印で示してある。それらは、 I_{D2} (107.5 K)； I_E (122-144 K)； II (164-185 K)； III (220-278 K)等であり、それぞれ I ； V の相関および非相関再結合、 I_2 の移動、 V の移動に原因すると解釈されていた。今まで行われてきた経験ポテンシャルによる鉄中照射欠陥の研究結果からは、 I_E や II のステージを合理的に説明することができなかった。第一原理計算により、これら照射欠陥の性質の計算が行われ、実験結果を新たな描像により解釈することが可能になった。実験では、マクロ量である抵抗値が得られるだけであるが、kMC法では、ミクロ量である欠陥の種類とその数の変化を得ることができる。以上のように、kMC法は、実験結果の解釈を検証、補足することができる。

ここで、対象とした照射は電子照射であるので欠陥の種類も比較的単純である。しかしながら、高速中性子照射の場合には、照射で生成される欠陥は一様に分布した



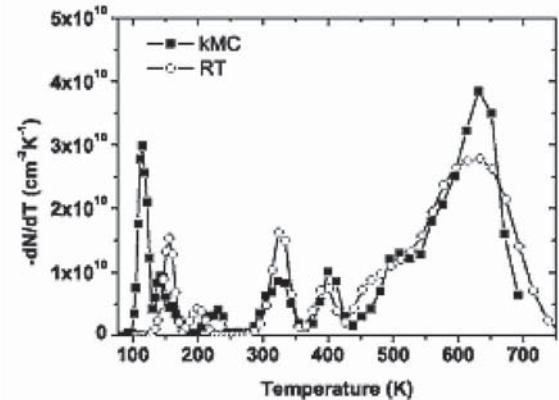
第4図 電子線照射による回復過程(電気抵抗の温度に対する微分値)(a)と格子欠陥(空孔, 格子間原子, 空孔クラスタおよび格子間原子クラスタ)数の変化(b)(文献5)より引用)

フレンケル対ではなく、カスケード損傷と呼ばれる非一様な欠陥分布になるため、例えば、MD法によって照射損傷データを構築する必要がある。また、すでに述べたようにHe原子を含めてモデリングする必要がある。さらに、上の例ではアニールによる回復現象を対象としたが、照射による変化をkMC法で行うにはまだ時間的な制約があり、せいぜい実際の核融合炉材料の寿命の1/1,000程度までしかシミュレーションできない。上の例では、欠陥の量についてはあまり問題にされていないが、スエリング現象ではVやVクラスタの量を正しく予測する必要がある。しかし、欠陥が転位や粒界で消滅する確率を正しく見積もらなければ欠陥の量を正しく評価することはできず、それは容易なことではない。ちなみに上の応用例ではそれらの消滅効果は無視されている。高速中性子照射のkMCシミュレーションについては、現在いくつかの研究がある^{7,8)}。このように、kMC法は単純な照射損傷過程に対しては強力であるが、計算領域で取り扱える欠陥の数密度に限界が存在するため、実際の原子炉環境に対応したより現実に近いシミュレーションをするためには、計算負荷の軽い反応速度論の方法を用いる必要がある。

そこで、kMC法と反応速度論の方法を同一条件下で比較し、照射による欠陥の回復過程をシミュレーションした研究を紹介する⁹⁾。この研究では、低温で鉄原子を照射した鉄結晶を一定温度で昇温する回復過程を対象とする。初期条件はMDシミュレーションによる、はじき出しカスケードの結果をもとに設定した。kMC法においては、MD法で得られた各欠陥の大きさと位置を取り入れた初期条件を用いた。一方、反応速度論の方法では、大きなクラスタは平均化操作により空間的に一様に分布しているとして初期条件を決めた。

第5図にkMCと反応速度論(RT)を比較した結果を示す。全体として2つの方法による結果はよく一致していることがわかる。顕著な違いは回復初期に見られる。特に $T=115\text{ K}$ におけるIとV間の相関による再結合は、反応速度論の方法では再現できない。しかし、Iと I_2 の移動に伴う回復過程は、kMCの結果と若干ピークの位置は異なるが、よく再現されていることがわかる。両手法による高温における欠陥の回復過程のピークはよく一致しており、欠陥間の相関の影響は高温における回復過程に大きな影響を及ぼしていないことがわかる。照射量 10^{-4} dpa の場合の計算においても、同様に欠陥間の相関の効果により低温におけるピークに相違が見られるが、高温においては両手法で良い一致が得られた。また、これらそれぞれの回復ピークに伴う照射欠陥の挙動も詳しく解析され、そのピーク出現の欠陥レベルでのメカニズムも明らかにされた。

以上紹介したメソ、マクロスケールのシミュレーションでは、第一原理計算により小さなクラスタの挙動、特



第5図 照射量 10^{-6} dpa におけるkMCと反応速度論(RT)による欠陥回復過程(全欠陥数の温度に対する微分値)の結果(文献9)より引用)

性を明確に決定できるようになったため、不純物や欠陥等、他の要素の影響を同定できるようになったことに意義がある。また、これらのモデリングと対応させることのできる精密な実験結果の存在は不可欠である。

IV. おわりに

以上概観してきたように、照射効果に関するシミュレーションは、はじき出し損傷により形成された点欠陥、クラスタが移動し、再結合、合体、消滅する過程、すなわち照射によるマイクロ組織の変化を予測することを中心に行われている。特に最近、第一原理計算により点欠陥および小さな点欠陥クラスタのエネルギー状態が正確に計算されるようになり、これらの結果をメソスケールのkMC法や反応速度論の手法と結合して、実験結果の背景にあるマイクロな機構を把握することが可能になってきた。まだ、照射量が低い領域に限られているが、今後のより高い照射量におけるモデリングのためには、検証可能な精密な実験と計算との協力が不可欠といえる。一方、実際の材料の特性を予測するには、これらマイクロ組織の変化からマクロな機械的性質の変化を導出する必要があるが、現状では計算科学の手法のみでは困難なことも多い。しかし、照射による材料硬化の後、照射欠陥が存在しないせん断帯(転位チャネル)が形成されることに起因する局在化破断現象⁹⁾やHeをはじめ、不純物の偏析による照射材料の硬化を伴わない粒界破壊現象¹⁰⁾等、原因のよくわかっていない現象に対しては計算科学的手法による解決が期待できる。前者では、転位動力学法による転位レベルからの理解が一つの方向である¹¹⁾。また、後者の問題では第一原理計算により、不純物の鉄粒界への偏析強度およびその時の原子間結合強度が正確に見積もることが可能になり¹²⁾、その結果を有限要素法によるマクロな弾性シミュレーション¹³⁾と結合することによる破壊限界応力予測の試みも行われている。いずれ

にせよ、実験結果をその原因から理解し、モデル化により核融合炉材料の設計に寄与するためには、マルチスケールの観点から位置付けられたメソ、マクロスケールのシミュレーション手法の予測精度向上が不可欠といえる。

最後に、核融合炉に関する照射材料の実験についてご教示いただいた日本原子力研究開発機構の實川資朗氏に感謝します。

—参考文献—

- 1) 實川資朗, R. E. Stoller, F. W. Wiffen, 谷川博康, 安藤正巳, 鈴木一彦, 日本原子力学会誌, **49**(9), 631 (2007).
- 2) S. J. Zinkle, *Phys. Plasmas*, **12**, 058101 (2005).
- 3) S. R. De Groot, P. Mazur, *Non-Equilibrium Thermodynamics*, Dover Publ., New York, (1984).
- 4) R. E. Stoller, S. I. Golubov, C. Domain, C. S. Becquart, *J. Nucl. Mater.*, **387**, 77 (2008).
- 5) C-C Fu, J. Dalla Torre, F. Willaime, J. L. Bocquet, A. Barbu, *Nature Mater.*, **4**, 68 (2005).
- 6) S. Takaki, J. Fuss, H. Kugler, U. Dedek, H. Schultz, *Radiat. Eff.*, **79**, 87 (1983).
- 7) M. J. Caturla, *J. Nucl. Mater.*, **351**, 78 (2006).
- 8) C. S. Deo, M.A. Okuniewski, S.G. Srivilliputhur, S.A. Maloy, M.I. Baskes, M.R. James, J.F. Stubbins, *J. Nucl. Mater.*, **361**, 141 (2007).
- 9) C. J. Ortiz, M. J. Caturla, *Phys. Rev.*, **B 75**, 100102(R) (2007).
- 10) G. R. Odette, T. Yamamoto, H. J. Rathbun, M. Y. He, M. L.

Hribernik, J. W. Rensman, *J. Nucl. Mater.*, **323**, 313 (2003).

- 11) T. Nogaret, D. Rodney, M. Fivel, C. Robertson, *J. Nucl. Mater.*, **380**, 22 (2008).
- 12) M. Yamaguchi, Y. Nishiyama, H. Kaburaki, *Phys. Rev.*, **B 76**, 035418 (2007).
- 13) M. Itakura, H. Kaburaki, C. Arakawa, *Phys. Rev.* **E 71**, 055102(R) (2005).

著者紹介

蕪木英雄(かぶらき・ひでお)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 計算材料科学, 計算物理

鈴木知明(すずど・ともあき)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 計算材料科学, 特に微細構造変化のシミュレーション

板倉充洋(いたくら・みつひろ)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 計算材料科学, 計算物理

連載
講座軽水炉プラント
—その半世紀の進化のあゆみ第16回 今後の軽水炉の開発(2)
—導入計画中の軽水炉②

三菱重工業(株) 緒方善樹, 日本原子力研究開発機構 大久保 努

前回の AP1000 と ESBWR に引きつづき、今回は US-APWR およびその他の建設中または導入計画中の軽水炉の開発について紹介する。

I. US-APWR の開発

国内で開発された改良型加圧水型軽水炉(APWR)をベースとした米国向け APWR(US-APWR)は、高性能の蒸気発生器、タービンなどの最新の自主技術を取り入れるとともに、米国規制要求、顧客ニーズなどを反映した経済性、信頼性、安全性に優れた170万 kWe 級のプラントである¹⁻³⁾。

三菱は、2007年12月に US-APWR の設計認証(DC)を米国原子力規制委員会(USNRC)に申請し(2008年2月受理)、現在審査が行われている。また、2008年9月にル

ミナント電力から建設・運転一括許可(COL)申請が実施された。

1. プラントの特長

US-APWR は、APWR をベースに高性能の蒸気発生器、タービンなど既設プラントの機器交換需要への対応の中で培ってきた最新技術を適用することで、170万 kWe 級の高効率プラントとしている。また、米国規制要求、顧客ニーズなどを反映するため、機械系に加え、電源系の4トレン化、14フィート燃料の採用など米国向けカスタマイズを行っている。

2. プラントの概要

(1) 主要仕様

第1表に US-APWR の主要仕様を既設4ループプラント(120万 kWe 級)、APWR(敦賀3号機:150万 kWe 級)と比較して示す。APWR は既設4ループプラントから炉心を大型化し、原子炉熱出力を増加させ、蒸気発生器などの主要機器を大容量化することで電気出力の増加を図っている。UA-APWR は APWR と同じ原子炉熱出力で、さらに蒸気発生器(SG)の大容量化、タービンの高性能化を図り、170万 kWe 級の高効率プラントとしている。

(2) 燃料および炉心

燃料集合体数は APWR と同じ257体であるが、燃料の有効長を12フィートから、顧客要求に応えるため、米国で採用実績のある14フィートに伸ばすことにより、熱

LWR-Plants - Their Evolutionary Progress in the Last Half-Century—(16): Development of Next LWRs(2); LWRs on Current Introduction Plan②: Yoshiki OGATA, Tsutomu OKUBO.

(2008年10月8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)
—シッピングポートから美浜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号炉まで
- 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)
- 第13回 日本の軽水炉開発(7)—PWRの改良標準化③
- 第14回 日本の軽水炉開発(8)
—第3次改良標準化計画(BWR)
- 第15回 今後の軽水炉の開発(1)
—導入計画中の軽水炉①

第1表 主要仕様比較

	既設 4ループ	APWR	US-APWR
電気出力(MW)	1,180	1,538	1,700級
原子炉熱出力(MW)	3,423	4,466	4,466
蒸気発生器			
型式	52 F	70 F-1	91 TT-1
伝熱管寸法	7/8 in	3/4 in	3/4 in
タービン (低圧最終翼長)	44 in	54 in	70 in 級

出力密度を下げ、炉心運用上の余裕を増加させるとともに、24ヶ月程度の長期サイクル運転に対応させている。

原子炉容器はAPWRと同サイズとしている。US-APWRでは米国顧客要求に応えるため原子炉容器下部管台を廃止しており、そのため炉内計装方式を従来の下部挿入方式から上部挿入方式に変更している。

炉内構造物は、APWR同様に中性子反射体を採用し、部品点数の削減による信頼性向上と、中性子の有効利用による燃料経済の向上を図っている。

第2表に主な仕様比較を示す。

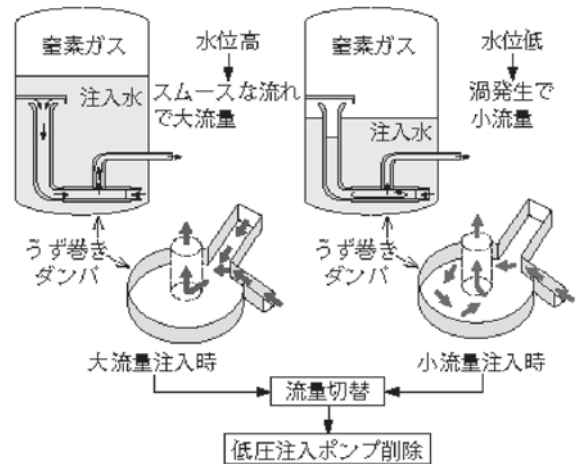
(3) 安全設計

APWRでは安全性の向上を図るため、非常用炉心冷却系(ECCS)の機械系を既設4ループプラントの2系列構成(2×100%容量)から、4系列構成(4×50%容量)とした。各系列の設備をそれぞれループの近傍に設置することで、配管物量を低減し、配置上の分離・独立性を強化している。また、既設プラントでは、原子炉格納容器(CV)の外に配置していた燃料取替用水ピットをCV底部に配置し、1次冷却材喪失事故(LOCA)時などのECCSの水源とし、事故時の炉心冷却水の水源切替を不要としている。さらに、新技術である高性能蓄圧タンク採用により、LOCA時初期の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に設置したうず巻ダンパにより自動的に切り替えることが可能となり、従来の低压注入系機能と蓄圧注入系機能を統合し、ECCS系統の簡素化を図っている。US-APWRでは上記改良に加え、運転中保守ニーズに対応するため、電源系についても4トレン化を採用している。

第3表にECCS系統構成比較を、第1図に高性能蓄圧タンク注入概念を示す。

3. 米国審査状況と環境整備

米国電力向けにカスタマイズしたUS-APWRの早期実現のため、US-APWRの設計認証(DC)を受けることとし、2006年7月から米国原子力規制委員会(USNRC)に対し、DC申請準備として事前レビュー(PAR)を開始



第1図 高性能蓄圧タンク注入概念図

した。PAR会議を2007年9月まで合計10回にわたって実施した結果、2007年12月31日にPAR会議開始からわずか1.5年という短期間でDC申請に結びつくことができ、2008年2月29日の正式受理後、現在USNRCの審査が行われている。

また、ルミナント電力(本社 テキサス州ダラス)がコマンチェピーク3,4号機へのUS-APWRの採用を決定し、2008年9月19日にUSNRCに対し建設・運転一括許可(COL)申請が行われるとともに、米国運転員によるプラント運転操作性の検証を米国に設置したシミュレータ設備を用いて実施している。

三菱では2006年7月に100%出資の現地法人 Mitsubishi Nuclear Energy Systems Inc.(MNES)を米国ワシントンDCに設立し、DCおよびCOL取得手続きに関する現地業務とともに、新規プラントの受注活動、米国向け取替用大型機器供給などのアフターサービス活動など、米国における三菱原子力事業の総合的な拠点として活動を実施している。

4. 欧州への展開

米国同様に、欧州においても原子力発電の再評価機運が高まる中で、US-APWRのEU諸国向け仕様であるEU-APWRの技術セミナーを2008年3月に開催した。

第2表 炉回り仕様比較

	既設 4ループ	APWR	US-APWR
原子炉熱出力(MW)	3,423	4,466	4,466
炉心燃料			
燃料集合体数	193	257	257
燃料有効長	12 ft	12 ft	14 ft
炉内構造物	パッフル フォーマ 構造	中性子 反射体	中性子 反射体
炉内計装	下部挿入	下部挿入	上部挿入

第3表 ECCS系統構成比較

	既設 4ループ	APWR	US-APWR
トレン構成			
機械系	2トレン	4トレン	4トレン
電源系	2トレン	2トレン	4トレン
系統構成			
高压注入	100%×2	50%×4	50%×4
低压注入	100%×2	—	—
蓄圧タンク	4	4(高性能)	4(高性能)
燃料取替用水ピット	CV外設置	CV内設置	CV内設置

EU-APWRは欧州電力要求書(EUR)への適合を目指すプラントであり、今後、審査を受ける計画である。

II. その他の軽水炉の開発

その他の国内外の主な軽水炉の開発に関して、大型軽水炉、小型軽水炉および最近わが国で開始された次世代軽水炉開発プロジェクトの3つに分けて、公開の情報をもとに、それらの概要を以下に順に紹介する。

1. 大型軽水炉

(1) EPRの開発

ここでまず紹介するのは、フランスの国際企業アレバのEPR(European Pressurized Water Reactor:欧州型加圧水型軽水炉)である。これは、これまでに紹介したAP1000, ESBWR, US-APWR等と同じクラス/水準の軽水炉であるが、すでにフィンランドとフランスで建設が開始されており、それらの炉に先んじてこの数年にも運転が開始される予定である。さらに、米国や中国での具体的な導入計画も発表されている。

EPRの開発は、1989年に当時のフランスのフラマトムとドイツのシーメンスが合弁会社を設立して開始し、その後、両国の電力会社や規制当局も協力した10年にわたる設計・研究開発の結果完成したものである。EPRの基本的な設計理念は、それまでに両社が有していた大型PWRであるN4およびKONVOIプラントで培ってきた建設・運転経験を十分に活用し、それらの既存技術をベースに発展させた技術的リスクの少ないPWRを開発する、というものであった。これにより、欧州電力要求書(EUR)にも適合した経済性と安全性の高い160万kWe級のプラントとして完成された。

チェルノブイリ事故を背景として、EPRでは安全性や放射線防護について特に重視した設計がなされ、それがこの炉の特徴の一つともなっている。炉心熔融を想定したシビアアクシデントの発生確率を低く抑えんとともに、仮に発生した場合の放射能の影響を限定的にするために格納容器の性能を向上させるなどの設計対応をとった。これは、EURに書かれている「事故時に、プラントから800 m以遠の住民に対し退去不要の設計」という要求に対応したものである。また、航空機墜落等の外部事象への対策も講じた。その結果、2重の格納容器、4トレンの多重性を持つ安全系、4組の安全設備をそれぞれ格納した4つのセーフガード建屋を原子炉建屋回りに配置した建屋構成などの特徴を有する設計となっている。

一方、経済性の観点から、37%の発電効率、60年のプラント寿命、24ヶ月までの長期サイクル運転、92%の稼働率などの達成を実現し、改良型コンバインドサイクル火力発電(ACC)に比べて20%程度低い発電コストを確

保した。また、フルMOX燃料装荷が可能な設計となっており、その平均取出燃焼度も60 GWd/t以上となっている。

なお、米国向けにカスタマイズされたEPRは、米国型EPR(U.S. Evolutionary Power Reactor:U.S.EPR)と呼ばれ、DCを申請して現在審査中であるが、2008年10月10日時点で4基/4件のCOL申請がなされており、その後も3基/2件の申請が予定されている。また、フランスでは大統領が先頭に立って官民一体で世界各国にEPRの売込みを図っており、その状況については時々報道されている通りである。

ところで、関連する話として、アレバと三菱重工は、2007年11月に合弁会社ATMEAをフランスに設立し、110万kWeの第3世代中型3ループPWRであるATMEA1の開発を開始している。概念設計はすでに完了し、2009年末を許認可準備の完了目標として基本設計を進めている。本炉は、上述のEPRや三菱のAPWR等の技術をベースにそれらを効率的に統合して設計標準化を図ったものとされている。

(2) APR1400の開発

APR1400(Advanced Power Reactor 1400)は、韓国型次世代炉(KNGR)として1992年以降の10年で開発された140万kWeのPWRで、Shin Kori 3, 4号機としてツインプラントの初号機の建設が2007年9月に開始されている。また、さらにShin Ulchin 1, 2号機として建設が決定されている。この設計においては、韓国標準型原子炉(Korean Standard Nuclear Plant:KSNP)の開発経験と米国CE社がUSNRCからDCを取得したSystem 80+の設計が強く反映されている。

APR1400の開発では、経済性向上のために、出力アップ、稼働率向上、建設工期短縮、システムの簡素化・合理化等が実施され、習熟効果も考慮した最終的な建設単価は1,200ドル/kWeといわれている。原子炉設備はCE社由来の独特な2ループ構成で、各ループは、ホットレグ1系統、蒸気発生器1基、1次冷却材ポンプ2台、コールドレグ2系統からなっている。一方、非常用炉心冷却系において、各系統独立の注入ラインから圧力容器に直接注水を行う方式(DVI)を採用しているのが特徴となっている。

なお、上で紹介したEPRやAPR1400のより詳しい情報については、参考資料4)を参照されたい。

(3) その他の開発

その他、ACR-1000(Advanced CANDU Reactor 1000)は、世界で根強いシェアを持つカナダ独自の重水炉CANDUを大型化して経済性ととも安全性を向上させた重水減速軽水冷却炉である。現在、カナダ国内を中心に、初号機導入に向けて動きが活発化しているところで、今後の動向が注目される。

一方、わが国でも、ABWRやAPWRの改良発展型

炉として、ABWR-IIおよびAPWR+の開発が行われ、経済性と安全性のさらなる向上が図られた。さらに東芝では、ABWR-IIを発展させたAB1600を開発している。これは、大型化のスケールメリットによる経済性と、パッシブ(静的)安全系を採用したハイブリッド安全系に特徴があり、一層の経済性の向上と、国際市場を視野に入れてシビアアクシデント対応能力の向上を図ったものである。

また、アレバではドイツKWU社由来の100万kWe級中型BWRであるSWR-1000(Siedewasser Reaktor 1000)を開発した。これは、静的安全性の活用を特徴とするものである。

2. 小型軽水炉

上に述べたように、発電炉の主流は大出力化の傾向にあるが、ここでは出力がおおむね50万kWe程度以下の軽水炉の開発について述べる。小型軽水炉には、一般的にスケールデメリットが存在するため、電力需要が小さな場合や送電網の規模が小さな場合、あるいは初期投資を抑えたい場合や海水脱塩などへのエネルギーの供給などの特定の場合への適用を想定して開発されてきたが、最近では、このスケールデメリットを解消する方策が広く研究され、高出力化に加えて斬新な単純化・簡素化を駆使した技術的な工夫や多数基の発注などの採用によって、大型炉並みの経済性を確保可能な設計が提案されている。小型軽水炉では、実に多くの概念が研究・提案されているが、以下では、世界の中でも代表的なものと考えられる米国のIRIS、韓国のSMART、アルゼンチンのCAREMおよび我が国のIMR、DMS、CCRについて概要を簡単に紹介する。

IRIS(International Reactor Innovative and Secure)は、ウエスチングハウスを中心とした国際協力によって開発され、炉心に加え、加圧器、循環ポンプ、蒸気発生器および制御棒駆動装置を圧力容器内に内蔵する一体型の30万kWe級PWRである。30~48ヶ月の長期サイクル運転が可能な点を特徴とし、現在、USNRCの設計認証(DC)の取得を目指して申請前審査中の状況にある。

韓国原子力研究所(KAERI)が中心となって開発しているSMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)は、出力10万kWe級の自然循環冷却方式の多目的一体型PWRである。1/5規模のパイロットプラントを建設予定であったが、現在計画通りに進んでいない状況である。

アルゼンチン原子力委員会(CNEA)と政府系のINVAP社が開発しているCAREM(Central Argentina de Elementos Modulares)は、30万kWe級の一体型PWRである。2.7万kWeの原型炉の建設を計画しており、詳細設計まで完了している。

一方、我が国では、日本原子力発電が国内メーカー3

社とそれぞれ独立に、以下に述べる30~40万kWe級の3つの炉を開発している。IMR(Integrated Modular Water Reactor)は、三菱の設計による自然循環方式の一体型PWRであるが、ボイドの発生を許容して自然循環力を増加させている点に特徴がある。また、DMS(Modular Simplified Medium Small Reactor)は、日立の設計による自然循環方式の40万kWe級のBWRであるが、大型化によって経済性向上を図り、重力による気水分離方式の採用などを特徴としている。また、ブルトニウムの増殖が可能な低減速炉心の使用も可能としている。さらに、CCR(Compact Containment Reactor)は、東芝の設計による自然循環方式のBWRであるが、格納容器を高耐圧化することでコンパクトにしている点が特徴である。

しかしながら、現実的には、やはりせっかく作るなら出力の大きな炉という状況になっていて、小型炉の建設を実現するのは容易ではない状況となっている。この壁を乗り越えてまず商用炉を1基建設することが、小型炉導入にとっての重要な突破口であると思われる。なお、小型炉のより詳しい情報については、参考資料^{5,6)}を参照されたい。

3. 次世代軽水炉開発プロジェクト

最後に、わが国の経済産業省、電力会社、原子炉メーカー等が参加して、今年度から8年計画で開始された標記プロジェクトについて、公開された情報⁷⁾に基づいてその概要を簡単に紹介する。これは、原子力大綱にも書かれているように、現在、わが国で運転中の軽水炉が2030年頃から順次寿命を迎える状況であることに対応して、それらの更新用の軽水炉として開発されるもので、同時に世界の標準ともなるような軽水炉の実現を目指すものであるとされている。国家規模での開発としては20年振りとなる総開発費600億円を見込む大規模プロジェクトである。参考資料7)によれば、開発の具体的な目標や実施内容は以下に要点を記載する6つの項目(コアコンセプトと呼ばれる)である：

(1) 世界初の濃縮度5%超燃料を用いた原子炉系の開発により使用済燃料の大幅削減と世界最高の稼働率実現

ウランの濃縮度を5%を超える範囲まで拡げて燃料をより長期間燃焼させられるようにし、70GWd/tへの高燃焼度化(現行では50GWd/t程度)と24ヶ月への燃料交換間隔の長期化(現行では13ヶ月)を実現できる原子炉を開発する。これにより、使用済燃料の発生量が30~40%程度削減されるとともにウラン資源も10%程度低減でき、目標97%(現行では70~80%台)という世界最高水準の稼働率の実現を図る。

(2) 免震技術により立地条件によらない標準化プラントの実現

多様な立地条件に対して広範囲にカバーできるように免震技術を採用したプラント設計の標準化を実現し、国内の立地自由度の拡大と海外の地震国向けの競争力獲得を図る。また、免震技術の効果によって建屋や機器の大幅簡素化が可能となり、建設コストの10%程度の低減が図れる。

(3) プラント寿命80年とメンテナンス時被ばく線量の大幅低減を目指した新材料開発と水化学の融合

新材料の開発とともに、水化学などのその使用環境まで含めた総合的な取組みにより、プラント寿命80年(現行では40~60年程度)の実現を目指すとともに、メンテナンス時の被ばく線量を現状の10%以下に大幅な低減を図る。

(4) 斬新な建設技術の採用により建設工期の大幅短縮
鋼板コンクリート(SC)構造の採用拡大や、あらかじめ工場で配管や機器類を組み込んだ大型ブロックモジュール工法の採用拡大を図り、現場での作業を大幅に削減して標準的な建設工期を30ヶ月程度(現行では50ヶ月程度)に短縮する。

(5) パッシブ系、アクティブ系の最適組合せにより世界最高水準の安全性・経済性の同時実現

重力などの自然の力を活用したパッシブ系設備の導入と実績の高いポンプなどのアクティブ系設備の最適な組合せを行って、現行と同等以上の性能、安全性、信頼性を確保しつつ、設備・機器数を大幅に削減する。これにより、13万円/kWeの建設単価(現行では28万円/kWe程度)と保全作業量の半減を目指す。

(6) 稼働率と安全性を同時に向上させる世界最先端のプラントデジタル化技術

近年、発展の著しいIT技術等を活用し、常時監視によるメンテナンスの合理化や、運転員にやさしい情報処理・提供システム等を導入することにより、ABWRや

APWRと同等以上の安全性の確保・向上と目標97%(現行では70~80%台)という稼働率の大幅向上を同時に実現させる。

さらに、上記の開発に併せて、それらと一体的に、必要な規格基準を整備し、それらに適合する規制制度について提案するとともに、安全当局との連携を図って規制の高度化を一体的に推進するとされている。

より詳しい情報については、参考資料7)を参照されたい。

—参考資料—

- 1) 三菱重工技報, 43[4], (2006).
- 2) 三菱重工技報, 45[1], (2008).
- 3) 三菱重工技報, 45[3], (2008).
- 4) 原子力システム懇話会編, 軽水炉技術の改良と高度化, 日本原子力産業協会, (2006).
- 5) 原子力ハンドブック, 3-3, 小型軽水炉, オーム社, p.530-536(2007).
- 6) IAEA, IAEA-TECDOC-1485, (2006).
- 7) “グローバル市場を視野に入れた次世代軽水炉開発”, 原子力 eye, 54[1], 4-23(2008).

著者紹介

緒方善樹(おがた・よしき)



三菱重工業株
(専門分野/関心分野)原子力発電プラント
技術全般

大久保 努(おおくぼ・つとむ)

本誌, 50[12], p.46(2008)参照。

Active Free Talk

これまでの原子力、これからの原子力

実績を積み上げることが、信頼と社会的受容につながる 現役世代に、原子力についての想いを語っていただきました

地球環境対応から、注目が集まりつつある原子力。現役世代は、それを肌で感じ取りながら、仕事に携わっている。原子力を選んだ理由は、「チェルノブイリ事故で関心をもった」「偶然」「世の中に貢献したかった」「モノづくりの魅力から」と、さまざま。しかし、これからの原子力については、「人材育成」が重要で、きちんとした実績を積み上げ、世界に貢献していくことが、信頼と社会的受容につながるという点で一致した。



日本原子力研究開発機構
経営企画部研究主幹

大井川宏之

日立 GE ニュークリア・エナジー
主管技師長

谷川尚司

資源エネルギー庁原子力政策課
課長補佐

西崎崇徳

原子力発電環境整備機構技術部
課長代理

樋口奈津子(50音順)

聞き手 石橋すおみ 本誌編集諮問委員

原子カルネッサンスの時代がやってきた

—最初に、皆さんが今どんな仕事をされているか。その仕事の魅力や難しさ、仕事に対する思いについてお話し下さい。

樋口 原子力発電環境整備機構(NUMO)の樋口です。技術部安全グループの所属で、機構で得られた研究成果などをもとに、保安院や原子力安全委員会、電事連などの対外機関との交渉などを担当しています。関西電力に入社して以来、ずっと廃棄物処分の仕事をやってきており、今は出向先で、高レベルの放射性廃棄物の制度化対応をやっております。

廃棄物をやってきてずっと思っていることは、処分はまだ先のことでどうにかなるだろうという感じがあり、業界の中でも危機感が少ない気がします。高レベルにしても場所が見つからないからなかなか進まないということはあるのですが、その辺が自分としてはもどかしい気がしています。

—NUMOが初めての出向になるのですね。

樋口 はい。廃棄物の問題はオールジャパンとしての大きな課題なので、東京で議論されていることが多く、こちらに来てからの1年間は、東京ではこういうことを

やっているんだという驚きの毎日でした。

大井川 原子力機構経営企画部の大井川です。原子力基礎工学研究部門とJ-PARCセンターの仕事を兼務しています。高レベル放射性廃棄物の分離変換技術の研究や、経営企画部で機構全体の将来計画、J-PARCの核変換実験施設を実現するための仕事などを行っています。

経営企画部に来て1年になります。原子力機構全体のことを考えるような立場になり、今まで経験したことのない問題点や課題に取り組んでいるところです。

—J-PARCというのはどういう施設ですか。

大井川 J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)は、世界最高クラスの強い陽子ビームを生成する加速器と、そこでできた大強度陽子ビームを利用する複数の実験施設で構成されています。このうちの一つの施設では、陽子ビームで大量の中性子を発生させ、物質の構造を調べたり、医薬品の研究に貢献したりすることが期待されています。他の施設では、原子核や素粒子の物理実験を行います。私が携わっているのは、まだ建設が認められていないのですが、長寿命の放射性廃棄物を短寿命化するための研究を行う施設です。

西崎 経済産業省資源エネルギー庁原子力政策課の西崎です。今は主に、次世代軽水炉やFBRシステムの研究開発を担当しています。近年、世界的に原子力発電の

有用性が再評価されており、我が国でも、昨今まとめられた低炭素社会づくり行動計画において低炭素電源を50%以上にしていこうとうたわれており、その中核として原子力発電が位置づけられています。

原子力にまつわるさまざまな課題の中には、技術開発によってクリアできるもののがかなりあり、それらは官民一体となってやっていくということが第一です。私たちの役割はそういう民間セクターで行われている研究開発を促進し、最大限お手伝いしていくということだと思います。FBR サイクルシステムは原子力機構が研究開発の中核を担っておられ、世界的に大変期待が高まっているところだと思います。また、次世代の軽水炉については、将来のユーザーである電力さんの積極的参加を得て、官民一体となって取り組んでいきたいと思っています。

—西崎さんは、ずっと経産省におられるのですか。

西崎 原子力専攻の大学院を出て平成15年に入省し、今は6年目です。このポストが3つ目で、最初は原子力安全・保安院におり、平成17年にはクリアランス制度などを導入した法改正にも携わりました。

谷川 日立GEニュークリア・エナジーの谷川です。去年7月に日立とGEの原子力部門が事業統合してできた会社です。今は研究開発を統括する仕事をしていますが、もともとはBWRプラントの過渡解析や制御系の設計などの業務を担当してきました。入社以来新設プラントの設計や運転プラントの予防保全、ABWRの開発などに携わってきました。

—GEと一緒に、会社全体の雰囲気や風土は変わりましたか。

谷川 日立はこれまで、国内を中心に設計・製造・建設経験を積んできました。一方、GEは米国のみならず世界に通用するグローバルなブランド力を持っています。両社は補完関係にあり、世界展開を図る上で最適な組み合わせと考え新会社を発足させました。研究開発や人事など広範囲な交流をすでに始めていますが、これから海外のプロジェクトがスタートすると、変わったなという実感がわいてくると思っています。

原子力を選んだ理由は「チェ事故で関心」「入ったのは偶然」「世の中への貢献」「モノづくり」

—原子力の仕事に携わることになったきっかけと、これまでの仕事の中で思い出深かったことを。

西崎 小学生のころにチェルノブイリ事故があり、この事故以降、世界の原子力は冬の時代に入ったのですが、その時に初めて原子力ということについて関心を持ちました。その後、ぜひ原子力をやろうということで大学に入り、9年間勉強した後に役所に入りました。民間セクターでやるよりも国で何かお手伝いできることがあ

るのではないかとと思って役所に入ったわけです。最近の出来事で印象に残ったのは、次世代軽水炉の開発を開始できたということ。さまざまな検討と調整を行った末に、この4月から具体的に開発に着手できたということは、非常に大きかったと思っています。

谷川 就職されるときに、メーカーや電力ではなく、役所を選ばれた理由は。

西崎 原子力に関するいろいろな諸課題を解決するには、もちろん技術で開発できるところもあると思いますが、それだけで総合的な問題解決につながるわけではなく、もっと全体的な枠組みの中で、例えば、さまざまな電源構成の中での原子力の位置づけを考えながら、どうあるべきかということを考え直さないといけない、そういうことをやっていきたいなという思いがありました。

樋口 私は修士課程では石油化学を専攻しましたが、研究より事業がしたいという気持ちがあって、電力会社を志望しました。原子力の世界に入ったのは、最初の配属先が原子力発電所だったからであり、いってみれば偶然です。入社する直前に「もんじゅ」のナトリウム事故があり、私が美浜発電所に配属されるというと、家族みんなから心配された思い出があります。

会社ではこれまで、廃棄物ばかりやってきました。その中で、同じ放射性廃棄物なのに、レベルによって検討状況も制度の状況もばらばらだし、全体を見ている人がいないのかなという思いがずっと頭にありました。そんな中で、バックエンドの費用がどれぐらいかかるかという試算を電事連がやったことがあり、当時18.8兆円という額をはじきました。その時に、私もその仕事に参画しました。あの時は数ヶ月という短い間に、電力はもちろん、メーカーも含めて総出で、バックエンドの費用を計算してまとめ上げたことがすごく印象に残っています。六ヶ所村まで行って担当者に直接説明を聞きに行ったりもしました。

それ以降、クリアランスが制度化され、余裕深度処分という六ヶ所のレベルの低レベルについても、いま原子力安全委員会で安全審査の基本的考え方が議論されているなど、着々と準備が進んでいます。このときの試算が、ある程度の後押しやきっかけになったのではないかなと思っています。

大井川 私は大学に入る時に、できるだけ世の中の役に立ちたいということがあって、原子力を選びました。これまでは研究者として実験をやっていることが多く、その成果を原子力学会の論文誌に発表するということを経験してきました。また実験装置を自分たちで考案し、それを共同実験者やメーカーの人たちと一緒にやってつくり、それで実験がうまくいった時なども、達成感がありました。

—これまでで一番苦労されたことは。

大井川 原研に入った時に、高速増殖炉の臨界実験施

設FCAに配属になり、そこでドブラー効果の測定実験をしたことがありました。FCAの中には5cm角の管が数千本あり、実験はその管の中に燃料を入れて臨界状態にし、燃料の温度が上がった時にその出力を下げる方向に効くフィードバック効果を測定しようというものでした。中は2千度まで熱くなるのですが、外側は40度にまで下げる必要があるため、メーカーさんと協力して熱遮へいや冷却、実験精度の確保などに非常に苦労しましたが、何とか測定がうまくいきました。この成果で原子力学会賞をもらえたのは良い思い出です。

谷川 学生時代は高エネルギー物理学を専攻していました。当時学会で発表した時に、後のノーベル賞受賞者である小柴先生に質問していただいたということを、今でも覚えています。就職では、純粋な研究というよりは物づくりの実感が持てるメーカーを希望して日立に入りました。

思い出深い仕事は、ABWRで自分が開発した制御システムが実プラントでちゃんと動いたことと、メーカーにはつきもののトラブル対応です。電力さんと一緒になって、原因究明や対策を考えて、プラントが立ち上がった時は本当にほっとします。

—具体的にはどんなことをされたのですか。

谷川 原因を究明するためには、まず事象が発生した時のプラント状態を隈なく調べます。そして、仮説立てそれを検証するために、モックアップ設備による動作確認や、シミュレーション解析による確認を行ないます。それらをつなげて、最終的な原因究明に至ります。それまでの間は、ほとんど家に帰れないこともあります。



谷川「自分が開発したシステムが、プラントで想定通りに動作した時は、本当にうれしいものです。」

—大変だったんですね。

谷川 これまで、いろいろな仕事を経験できました。大変だったこともありましたが、巨大な原子力プラントを力を合わせて作ってきたという充実感のほうが大きいです。

人材育成と「夢」をアピールすることが課題

—ここからは少し広く、今の日本の原子力をめぐる課題についてお聞かせください。

樋口 この業界では、同じ人がずっと長いことやっている。10年たっても全然メンバーが変わっていない。そういう意味では、現役の人たちが一斉に引退されたらどうになってしまうのだろうという思いがあります。

西崎 政策課題という視点からいうと、原子力立国計画では体系的な整理ができていていると思います。原子力発電についていえば、短期的には耐震安全性や高経年化対策、新検査制度への対応などにより、原子力発電が信頼性のある安定運転の実績を積み重ねていくということ。その結果として、既設軽水炉の稼働率を上げていく。中期的には着実な新增設と、リプレースを進めていくこと。そして長期的には、エネルギーセキュリティを踏まえて、高速増殖炉サイクルに向けた確実な取組みを進め、実用化を図っていくこと。もちろん、これらと同時に、例えば、放射性廃棄物の処理処分の問題や、我が国全体としての研究開発のあり方などについて、産官学みんなが最適解を考えていかなければならないと思います。

また、世界的に原子力に対する期待が高まっている中で、原子力発電を供給できる日本の原子力産業の三大プラントメーカーさんは、冬の時代にも着実につくってきたという実績があり、今はそれなりに高い位置にあるということは間違いありません。逆にいえば、そういう世界的な需要に対してきちっと、手を取り合ってサプライをしていくということが必要になってくると思います。

—そういった取組みを進めるに当たっては、民間セクターにおける人材育成が重要で、それに対する支援を国としてもこれからもやっていかないといけない。

総論的には、原子力に対する期待が高まっているので、それにこたえられるように官民挙げて取り組んでいく必要があると思っています。

大井川 原子力学界としてはそのほかに、ニュークリアサイエンスも重要なポイントだと思います。原子力機構ではエネルギーのことに加え、放射線の幅広い利用、量子ビームテクノロジーも手がけています。これをもとにサイエンスとしてのおもしろさ、夢のある原子力を打ち出していく。人材育成のためには、学会や大学、あるいは原子力機構が、高校生や中学生が原子力をやりたいなと思ってもらえるような取組みをしていくことが必要だと思います。

—夢のあるサイエンスとは？

大井川 宇宙航空研究開発機構(JAXA)の紹介では宇宙飛行士が出てきます。子どもたちが、宇宙ステーションの中で宇宙遊泳をしているような映像をテレビで見るといことは、科学技術への夢を持つという点で有効だと思います。一方、原子力を世間の人を感じる場合は…

—事故ですね。テレビでは事故の映像しかもっばら流れない。具体的にどうしていったらいいのでしょうか。

大井川 私は、放射性廃棄物の分離変換技術を加速器と結びつけてアピールができたらと思います。また二酸化炭素を低減するためには、原子力はこれぐらい必要だ、また高速増殖炉や核融合エネルギーを実現すればこ



大井川「量子ビームテクノロジーをもとに、サイエンスのおもしろさや夢のある原子力をアピールできないだろうか」

うなるというようないい方もできると思います。

一小学生ぐらいの男の子が、原子力に対して夢をもてるようなアプローチがあれば……。

樋口 私が理科を好きになったのは、中学校の理科の先生が女の先生だったのですが、教科書に載っていること以外にも科学に関するいろんな話をしてくれて、その話がとてもおもしろくて、科学そのものに興味を持ったからです。

西崎 高速増殖炉が日本で実用化されるというのは象徴的な意味があると思います。そういう意味では、まずは「もんじゅ」がきちっと再稼働するというのが大事だと思います。そういった着実な実績を積みながら実用化を図っていくということは極めて重要ですし、国民の理解を得るという意味でもいい意味を持つと思っています。

また人材育成については、その産業がリーディングカンパニーであるということは、大きいと思います。一時期ITバブルといわれたときに、IT産業にみんなが集まったのは、同じような現象だったと思います。したがって、日本の原子力産業が着実に実績を積み上げていき、原子力発電所が安定運転を続けていけば、いずれは社会的に高い評価を得られると思います。



西崎「日本の原子力産業が着実に実績を積み上げていき、原子力発電所が安定運転を続けていけば、いずれは社会的に高い評価を得られる。それがひいては、人材育成にもつながると期待します」

谷川 ABWRでは、多くの人が開発に携わり、人材の育成につながりました。現在、日本型次世代炉の開発を行っています。国の大方針の下で開発が行えるということで、我々技術者の大きな励みになっています。海外の有力メーカーに負けない立派なプラントを開発することが、我々の夢です。開発にはまだ時間がかかりますが、現実味がある夢だと思っていますし、これを契機に若い技術者が成長するのが楽しみです。

一日本の原子力の現状は、世界からどのように評価されているのでしょうか。

谷川 日本では着実にプラントを建設してきており、設計・製造技術力だけではなく、運転・設備管理面でもトップクラスと評価されているように思えます。特に、

中越沖地震でも安全上重要な機器にはほとんど損傷が無かった点は、驚きを持って受け止められています。しかし、残念なことは、日本の発電所の稼働率が低いことです。昔米国は稼働率が低かったのですが、原子力発電所が規制緩和とリンクしてビジネスの対象となり、稼働率がどんどん上がっていきました。今は日本よりも高い稼働率で運転しています。日本もこれからは、安定運転を続けながら、長期サイクル化などが加速され高稼働率を実現し、名実ともにトップクラスになればいいと思っています。

西崎 原子力産業では最近、志望される方が増えてきていると聞いています。皆さんの実感としてはどうですか。

樋口 残念ながら、実感としてはまだありません。そういう評価が出てきているというのはわかりますが。事業者からすると、我々の一番の課題は、一般の人にどう受け入れてもらえるかということだと思っています。廃棄物をやっていると、特にそういうのを感じます。

一電力会社も、会社全体への応募は多いけれども、原子力部門は人気がないですね。樋口さんはこの業界では数少ない女性のエンジニアですが、日本の原子力の課題や人材育成について、何か思いはありますか。関西電力では今は、女性を採用していないのですか。

樋口 採っていないというより、希望者がいないのではないかと思います。関西電力でいうと、平成13年を最後に、原子力には女性が入ってきていない。工学部の女性自体は増えているはずなのに、志望してくる人がいないというのは残念です。電力会社の中でも原子力は、女性がものすごく少ないと感じています。

一ハードだから？

樋口 ハードな仕事はほかにもありますが、転居を伴う転勤が多い。それから発電所の近くだと保育園がなかったり。子供ができれば、例えば、ご主人を自宅に残して、子供だけを連れて現場に赴任することになりますが、それは現実的には非常に難しいので、断念する人が結構います。

一確かに女性が働きやすい職場環境ではないですね。

谷川 私は去年採用を担当しましたが、おととしに比べて、去年は応募してくる学生が増えました。応募してくる人は、環境問題の解決には原子力が不可欠であるということをはっきり言います。また、海外でも仕事ができることに魅力を感じているとのこと。だから、若い人たちは見るところは見ていると感じました。若い人たちの期待を実現してあげられる環境を提供することが、継続的な志望者の確保につながると思います。

きちんとした実績を積み上げることが、信頼と社会的受容につながる

一世界から見て、日本の原子力がどうなっていくべき

か、また我々がどうそれに貢献していけばいいのか。さらに原子力学会に対して要望や提案がありましたら。

谷川 原子力カルネッサンスを迎えるにあたり、国内で経験と実績を積んできた日本のメーカーに期待するところは、大変大きいと感じています。その期待に応えるためには、日本で培った「信頼性の高いプラント」を海外でもきちっと作り、実績を上げることが大事であり、それを早く実現したいと思います。しかし、国内がおろそかになり「信頼性」が揺らぐと、海外からの期待も先細りになると考えています。これまでも増して、安全で安心できる原子炉を作り続けることが世界の期待に応えることにつながると思います。

原子力学会は、学術・技術の権威ある第三者機関として現在行っている規格・基準作りの動きをどんどん進めたいと思います。

大井川 原子力機構では、まず期待されているところを着実にやっていかないといけない。それから、本当に低炭素社会に役立つためには、例えば、水素を高温ガス炉でつくっていくというような可能性なども、どんどん我々から発信していかないといけないと思います。高速増殖炉サイクルや核融合、それから高温ガス炉についての2050年ごろ以降の取組みというのは、今、原子力機構がメインでやっていかないといけない。それは世界的にも競争あるいは協力しながらやっていくことになっていくと思います。

一方で、2050年までを見通しても、いろいろな問題がたくさんあります。例えば、次世代軽水炉や、廃棄物処分、安全性、稼働率などの問題についても、国内唯一の総合的な研究開発機関として、うまくコミットし、役に立っていただけらなと思っています。それに加え、もっと幅広い原子力の利用について、いろいろな可能性を出していけたらなと思っています。

また、これからの展開を考えると、その基盤が本当に大丈夫かということが、少し心配されます。照射用炉はやっとJMTRが改修できるようになってきていますが、臨界実験装置などの基礎的、基盤的なインフラが一部で老朽化してきている。2050年やそれ以降まで原子力をちゃんとやっていこうとするならば、そういう整備も着実にやっていかないといけない。

原子力学会に対しては、学会だけで閉じるのではなくて、いろいろな他の学会とうまく接点を設けられるようなアクティビティーがあればおもしろいと思います。

樋口 NUMOとしては、これからの数年は信頼獲得の時期だと思っています。当機構が設立されて8年、処分地の公募を開始して6年、応募獲得に向け、一生懸命やってきましたが、十分な理解を得るには至っていません。みんなにわかってもらえるような情報提供をしていかなければならないと思っています。

地層処分をやる立場からすると、まだ立地点が決まっ

ていない中で、どこまでできるかということはあるのですが、我々としては、処分をするに当たって、安全基準や自主基準、民間規格の整備などの品質マネジメントといった、信頼性向上のためのさまざまな検討を地道にやっていくことが大事だと思っています。

また処分の世界では民間規格の整備に力を入れており、低レベルの方ではいろいろな標準が日本原子力学会により制定されています。地層処分についても今後、低レベルと同様に、民間規格をどんどん整備していく必要がある。そういう意味では第三者機関である学会のオーソライズは重要であり、期待しています。我々事業者としては、その規格をつくるにあたって必要な材料を随時出していき、そのために必要な研究や検討を地道にやっていく。それが信頼獲得のために一番、今の事業者に必要なものだと思います。



樋口「高レベル廃棄物処分は、今は実施する際の品質マネジメントの検討などを地道にやっていくことが、信頼向上につながると思っています」

西崎 原子力発電がこれから、今以上に重要な位置を占めてくると、今度は資源制約についてもよく考えないといけない。今は核燃料サイクルのうちフロントエンドについては各社それぞれで、バックエンドについては共有でやられている。けれども、ウラン資源を今後も経済的かつ安定的に確保していくためには、上流部分での取組みについても日本全体で考えていく必要があると思っています。

また新規導入国から日本は非常に高い期待を寄せられており、発電所を安全かつ安定に運転するためには、それを支えるいろいろな技術をその国が持たなければ難しい。そういう意味で、例えば、カザフスタンなどからは原子力機構への期待があると思います。さらに世界全体からみると、食品や医療など様々な分野における放射線利用も重要で、これについても、日本への期待があると思います。こういった期待に対して、原子力機構も含めて、我が国の産業界が一致団結して答えていくことが必要だろうと思います。

これからのエネルギー需要と、地政学的なリスクを考えれば、原子力発電の重要性は年を追うごとに増していくと思いますが、その大前提になるのは、原子力安全、核不拡散、核セキュリティという、いわゆる3Sの確保がなにより重要だと思っています。

原子力学会への期待としては、すでに一部の取組みをされていると聞いていますが、この3Sの確保のために、技術的あるいは自然科学的な要素のみならず、社会的な観点からも、民主・自主・公開の原則の下で学術

的な研究をしていただき、その成果を社会に還元していただく、社会との接点を持ってやっていただくということを期待しています。

—ありがとうございました。



今の原子力業界を担う勇者達と
いった面々による座談会は大変刺
激的でした。所属や立場が違え
ば、こんなにも視点が変わるんだ
なと驚かされる一方、日本の原子
力に託す夢やそれに貢献したい気
持ちは共通でした。この日、私自
身が、原子力の仕事をしていくパ
ワーをもらった気がしました。今
度は、お酒を飲みながら語り合っ
てみたいものです。(石橋)

(取材・編集協力 小林容子編集委員、
佐田務副編集長)

新刊紹介

理科少年が仕事を変える、会社を救う

出川 通著, 191 p, (2008.5), 彩流社,
(価格1,500円, 税別) ISBN 978-4779110320

本書は、自分の専門性を大事にする人を「技術者」として読者に想定し、素直な関心や遊び心を発想の中心にして新しいものを作っていこうという呼びかけの本です。「理科少年には3つのタイプがある」、「100点-99点≠1点の法則」、「不完全なハイテクに心が躍る」といった魅力的なタイトルの10章からなります。各章は理科少年という、少年の心が躍る「好奇心と冒険心」から出発していくのですが、そこに技術者としての観点と、マネジメントとして、経営というか世の中との折り合いのつけ方が次第に入ってきます。この後から入ってくところが著者の創意です。

いろいろな議論のなかでも「100点-99点≠1点」の章は、読むたびに評者の感想や考え方は変わりました。100点の意味にもいろいろあるから、100点-99点はいつも同じ評価ではないのは、そのとおりでしょう。しかし、100点を越えてしまった成果は製品としてはオーバースペックで、かえって評価が低いかもしれないという発想は、評者には盲点部分で

した。また100点前後の議論のほか、0点前後の議論というのもあり、これも著者に賛成のときも、反対したくなるときもありました。

ハイテックローテックとリスクリターンの議論もなかなか面白いと感じます。それが一転して「産学連携はなぜ難しいか」という話になると、企業の研究者としては「面白い」ではすまなくて、自分なりに考えてみなくてはならなくなります。

著者の意見に賛成かどうかは重要ではなく、100点前後の議論と同じく、ここは考えてみるきっかけであると考えればよいでしょう。

本書の冒頭のほうには、本書は技術者の生き方の話で、真理の発見を主題にする科学者の生き方は異なると但し書きがあります。理科には技術と科学の萌芽があるのですが、「好奇心と冒険心」の理科少年はどこでこの二つの生き方に分かれていくのでしょうか。ともあれ、どうやら私は技術ではなく科学の方へ分かれていった少年らしく、本書はあるところまでは心をうちますが、あるところからは「そういう考えもあるのか」という感想になっていきます。皆様はどうでしょうか。
(日立製作所・笹平 朗)



安全な海上輸送の実現に向けて 独立行政法人海上技術安全研究所の取組み

海上技術安全研究所 谷澤克治, 小田野直光

海上技術安全研究所では、海上輸送の安全確保のための研究活動を精力的に実施している。本稿では重点的に実施している研究課題として、船体の構造強度基準の策定に関する研究、衝突・座礁の防止など操船に係わる安全性向上のための研究、復原性基準策定等の荒天波浪中航走する船舶の安全性向上のための研究、危険物・放射性物質等の海上輸送に係わる安全性向上のための研究、海難事故再発防止に対する取組みなどを紹介する。

I. はじめに

我が国の輸出入貨物のうち、どの程度が船舶によって海上輸送されているかご存知であろうか。平成20年の海事レポートによると、実に99.7%が海上輸送されている。海上輸送は食料やエネルギー・鉱物資源の輸入や自動車等の工業製品の輸出に欠かせないものであり、国民生活を支える生命線である。安全で安定的な海上輸送の確保は四面を海に囲まれた我が国にとって最重要課題のひとつであるといえよう。

ところが、船舶の重大海難事故が世界中で発生しており、海上輸送の安全性はまだまだ十分とはいえない状況にある。例えば、「ナホトカ号」事故(1997年)、「エリカ号」事故(1999年)、「プレステージ号」事故(2002年：第1図)では、いずれも船体折損から引き起こされた大規模油流出が立て続けに起こり、沿岸国に甚大な環境被害を及ぼした。バルト海における RORO 客船「エストニア号」の転覆事故(1994年)では900人近くの人命が失われる大惨事となった。国内においても、底引網漁船「第五龍寶丸」の転覆事故(2000年)では乗組員14人が行方不明になるなど、漁船の転覆事故が後を絶たず毎年人命が失われている。また、ジェットフォイル旅客船「トッピー4」の浮遊物との衝突事故(2006年)では、多数の旅客が腰椎圧迫骨折、腰椎破裂骨折などの重傷を負っている。今年に入ってからでも、野島崎沖で発生したイージス艦「あたご」と漁船「清徳丸」との衝突事故(2月)で2名が行方不

明に、明石海峡付近で発生した貨物船やタンカーなど3隻が絡む衝突事故(3月)では、貨物船「ゴールドリナー」が沈没して3人が死亡し、1人が行方不明になっている。

以上に述べたように、海上輸送の安全性はまだまだ不十分であり、海上輸送の安全確保は国民の命と財産を守るために不可欠であるのみならず、海難事故に伴う油汚染等の環境被害を未然に防止する観点からも非常に重要である。そこで、独立行政法人海上技術安全研究所(以下、海技研)では、第2期中期計画の重点課題に「海上輸送の安全確保」を設定して研究活動を展開している。本稿では、主に安全確保の切り口で海技研の活動を紹介するとともに、使用済核燃料等の危険物の海上輸送に関する安全確保への取組みについても併せて紹介したい。

II. 構造安全性基準

船舶の荒天下での折損事故等を未然に防止するには、



第1図 プレステージ号折損事故(2002年)(事故報告書より)

Activities of National Maritime Research Institute to Create the Basis for the Maritime Safety Improvements : Katsujii TANIZAWA, Naoteru ODANO.

(2008年 10月 6日 受理)

合理的な構造安全基準の整備が重要な対策の一つである。これまでも重大海難事故が発生するたびに国連の組織IMO(国際海事機関)が国際規則を整備し、海上安全の確保と海洋汚染の防止に向けて中心的役割を担ってきた。しかし、近年の重大海難事故の多発を受けて、リスク評価により均一な安全レベルを担保するより合理的な安全基準の整備が求められている。海技研では以下に述べるGBSの概念による合理的で体系的な船体構造強度基準を提案すべく研究を実施している。

1. 目的指向型構造安全基準

目的指向型構造安全基準：GBSとはGOAL-BASED NEW SHIP CONSTRUCTION STANDARDSの略称で、船舶の構造設計・建造を対象にした基本的理念を構築する基準である。これに対し、造船所が船舶の設計に用いる構造設計規則は、要求部材寸法を規定する仕様の規則であり、世界の主要な船級協会(我が国では日本海事協会)がこれを定めている。GBSは船級協会が定める詳細な仕様の規則を作成するための目標(ゴール)や機能要件等を規定した規則、すなわち規則作成のための規則である。

IMOにおけるGBSの審議では、国際的に整合性を確保した構造設計規則を整備していくために、構造設計基準の体系的整理に取り組んでいる。このような基準の体系化は、すでに原子力など他分野でも取り組まれているものである。IMOで現在合意されている基準体系は第2図に示す5階層システムより構成されている。船級協会等が策定する構造設計規則(第4階層)の上位に、設計理念(ゴール(第1階層)、機能要件(第2階層))と適合性を検証するスキーム(第3階層)を新たに確立する体系となっている。第3階層の審議では事故をゼロに抑えることが現実的に不可能であることを前提に、社会的に許容できる安全レベルをどの程度に設定すべきかといった点が審議されている。

海技研では安全レベルの設定にあたり、既存の設計規則により設計・建造された船舶の安全レベルとの整合性を図る、いわゆるルールキャリブレーションと呼ばれる手法を採用し、船体が中央で折損するような、船体構造上想定される最も危機的な状態の最終強度を対象に解析

調査に取り組むなど、構造信頼性解析を系統的に実施するとともに、IMOにおける船舶が達成すべき安全レベルに関する国際的合意に向け、機動的に取り組んでいる。

2. コンテナ船の大型化への対応

世界的規模で海上輸送量が増大し続ける中、コンテナ船の大型化が進み、「EMMA MAERSK号」のように積載数が11,000 TEU(20フィートコンテナ換算の積載数)を超え、全長が400 mに迫る超大型コンテナ船が登場している。設計や安全基準の観点から見た場合、想定しているコンテナ船は6,000 TEU積み程度であるため、超大型コンテナ船は基準の想定外となっている。また、これらを設計・建造するためには、板厚の増加あるいは鋼材の高強度化が避けられないため、使用実績のない板厚および鋼材強度の構造部材に対する適切な評価を行った上で新しい構造基準を設定することが不可欠となっている。

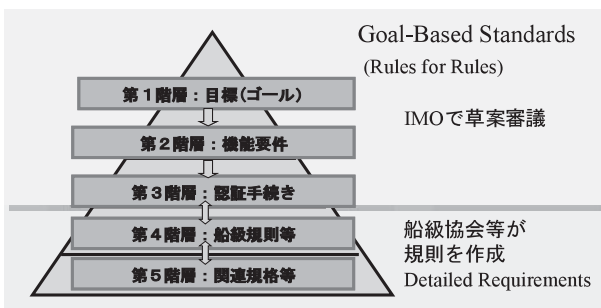
これらの問題を合理的に解決するためには、鋼材強度の確保、荷重と構造強度評価から工作の問題まで極めて多岐にわたる検討が必要になる。とりわけ、構造部材ごとの適切な材質選定や十分な構造強度の確保のためには、構造強度評価の入力である荷重の推定精度の重要性が従来以上に増してくることも明らかである。しかしながら、大型化は船体剛性の相対的低下をもたらし、船体が弾性梁として出会い波と同調して振動するスプリング現象が発生することも懸念される。また、大型化に伴い船首船側が大きく張り出すといった船型上の特徴から、荒天中では波高に対する船体応答ならびに波浪荷重の非線形性が顕著になってくる。

海技研ではこれら非線形影響や船体弾性影響を加味した6自由度の船体運動/波浪荷重計算法を開発した²⁾。6自由度に対応できることから、斜め波中で船体に作用する振りモーメントやホイッピング(波が船首部を叩くスラミングという現象に伴う船体振動応答)を計算することも可能である。

Ⅲ. 衝突・座礁防止

海運を取り巻く状況は大きく変化しつつある。現在、他の交通モードと同様に、乗組員の削減が進められているほか、内航海運においては船員の高齢化が進み、外航海運においては外国人船員が増加した。これにより船員の負担が増え、スキル維持も困難となり、ヒューマンエラーによる海難事故の発生が後を絶たない。一方、船舶の大型化、高速化、海域の輻輳化が進んだことにより、衝突・座礁事故に対する潜在的危険も増大するとともに、1回の事故の影響が大きくなっている。

このような状況に対応するため、優秀な船員の育成確



第2図 GBS 5段階システム(基準の体系化)

保のほか、経験の少ない船員による安全な航行を実現する、単純でわかり易い航海支援システムの開発が課題となっている。まず、船舶の自律的航行機能の向上には、①電子海図表示や衝突・座礁警報機能等による状況認識支援、②衝突危険状況表示や電子海図上への避険線(入ると危険な領域を示す線)表示等による航行判断支援、③設定航路上を自動航行させるトラックパイロット等による操船支援の向上等が挙げられる。また、陸上から船舶への航行支援機能の向上には、④海上交通センターによる海域監視・管制、航行関連情報の提供、⑤船上機器モニタリングなどによる陸上からの船舶管理等が挙げられる。海技研では、これらの支援技術に関する研究を通じて、関連国際規則・国際標準の策定支援、新しい航海支援システムの提案を行い、環境変化に伴う諸問題に対応している。また、以下に述べる e-Navigation 構想にも積極的に参画し、海上交通の ICT(情報通信技術)化を推進している。

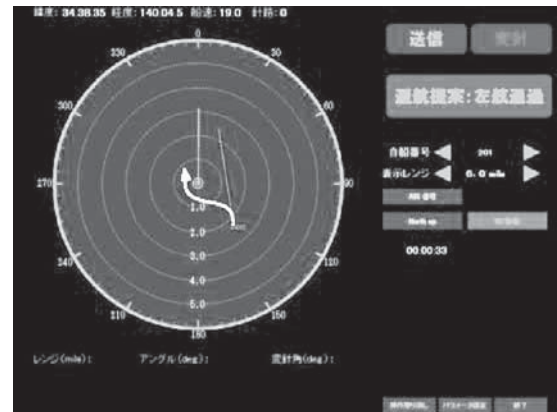
1. e-Navigation

海上輸送における運航システムの電子化・情報化は他の交通モードと比べて大きく遅れている。このため、IMO では海上安全委員会の下部組織である航行安全小委員会(NAV 小委員会)を軸に、情報通信技術を中心とした技術革新を総合的に反映させた e-Navigation の戦略構築および関連サービスの導入作業を行っており、海上輸送の安全性および効率の向上、環境保護、保安を目的に、新旧システムを有機的に活用した新しいサービスの提供を目指している。現在、e-Navigation 構想の状況は、2008年でその戦略策定を終え、2009年度から4年計画で具体的なサービスの導入計画の検討に入る。

海技研は、海難分析から必要となるサービスを抽出するとともに、サービス構築のためのロードマップを航行安全小委員会に提案するなど、e-Navigation 戦略構築に積極的に係わってきた。導入計画の検討においても積極的に参画し、e-Navigation 関連サービス実現を目指す³⁾。

2. 新しい航海機器の開発・評価

海技研では、自律的航行機能の向上を目的に、状況認識、航行判断、操船支援の各機能を対象にして各種の航海機器の開発を行っており、操船者の最も重要としている目視情報にマッチする形で情報提供を行う目視認識支援装置や先進航行安全支援システム(INT-NAV)の開発を行った。また、現在、遭遇船舶との航行意思疎通を支援する協調型航行支援システムの開発を行っている⁴⁾。協調型航行支援システムは、自動船舶識別装置(AIS)を利用し、遭遇船舶間で避航方法を矢印等でレーダ画面上に重畳表示するものである。表示例を第3図に示す。これにより従来の VHF 無線より容易に意思疎通が行える



第3図 協調型航行支援システムの表示例

ほか、言葉の障壁や誤認等の発生を低く抑えることができると期待されている。

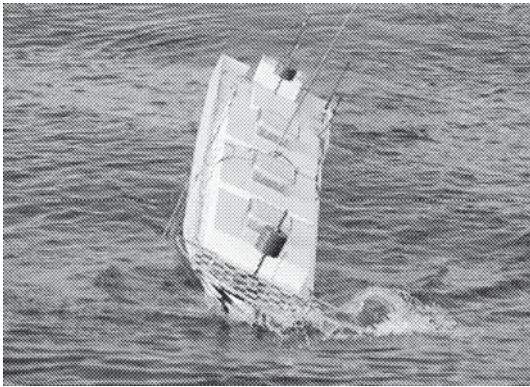
IV. 転覆事故防止

転覆事故に対する安全性を確保するためには、十分な復原性能を保持するとともに、適切な操船・運航を行う必要がある。復原性能に関しては、国内規則である船舶復原性規則および国際規則である IMO の非損傷時復原性コード(IS コード)において基準値が定められており、規則が適用される船舶に関しては一定以上の復原性能が確保されている。また IMO においては、転覆に至る危険な状況を避けるための操船ガイダンスも定められている。以下、最近の IMO における復原性基準の検討動向と海技研の取組みについて紹介する。

IMO では、1998年に北太平洋上において発生したコンテナ船のパラメトリック横揺(コンテナ船などのスマートな船体形状を有する船が向波や追波中を航走する際に発生する大振幅横揺で、1波ごとにブランコをこぐように横揺角が増加し、大振幅に至るのが特徴)に伴うコンテナ流出事故等を契機に、2002年から IS コードの改正が審議されてきた。その結果、短期的な課題とされた従来非強制的勧告であった IS コードの一部強制化が昨年度の会合で合意され、現在、2010年7月発効予定で条約の改正手続きが進められている。

一方、長期的な課題とされた性能要件化された復原性基準の策定に向けた検討が昨年より本格的に開始され、今年度の会合では、新世代非損傷時復原性基準としてその基本的な枠組みが合意され、2012年完了を目標に検討を進めることとなった。

新世代非損傷時復原性基準は、現行の IS コードで安全性が十分に担保されていない、機関故障時を想定した操船不能状態の復原性、復原力変動問題(パラメトリック横揺、追波中復原力減少)、操縦性関連問題(ブローチング)の3つの危険モードに関して策定されるものであり、危険性の有無を簡易に判定する基準(第1段階基準)と数値計算を用いたより詳細な復原性能の直接評価基準



第4図 パラメトリック横揺の水槽実験

(第2段階基準)で構成される。

このようなIMOにおける審議に対応するため、海技研ではISコードの強制化の際に導入された一部基準の代替評価のための標準模型試験方法を提案し、その検証を行うとともに、数値計算による復原性能の評価手法(操船不能状態の転覆確率計算、パラメトリック横揺のシミュレーション計算)の検討を行っている。

特に、パラメトリック横揺に関しては、波浪中における復原力変動に起因することから、現象把握のための自由航走模型を用いた実験⁵⁾に加えて、復原力変動量を計測する模型実験も行っており、シミュレーション計算の検証等に活用している。(第4図)

V. 危険物・放射性物質の海上輸送

我が国の経済活動上、一般に危険物と呼ばれるガソリン、硫酸、火薬等の輸送は不可欠である。基準に適合した容器に入れ、一般貨物船やコンテナ船で、あるいはケミカルタンカー、LPG船、LNG船に直接搭載することにより、危険物は大量に海上輸送されているのが現状である。また、原子力発電に関しては、新燃料(集合体および粉末)、使用済燃料、低レベル・高レベル放射性廃棄物等が海上輸送されており、核燃料サイクルを支えるうえで重要な役割を果たしている。

危険物輸送の安全確保は、国際基準に基づき、容器、表示等の運送要件および船舶の構造、設備等の技術基準が国内法令で定められているとともに、危険物を輸送する船舶に対して輸送前の検査や立入検査を行い、海上輸送時の事故防止対策を行っている。

海技研においては、放射性物質の海上輸送に係る研究として、放射線遮蔽および放射線計測技術を中心に研究を実施してきた。放射性物質の輸送はこれまでに安全の実績を積み重ねてきているが、今後、国際的に放射性物質輸送のセキュリティ強化が図られていくこと、国内では、原子炉の廃止措置に伴う放射性解体廃棄物が大量に海上輸送されることが予想されることから、海技研では、放射性物質の安全輸送を支える基盤的な研究を従来

よりも幅広く実施しているところである。最近では、海上輸送事故時の環境影響評価システムの構築、輸送のリスク評価に関する研究、テロ等の不法行為に対する船舶の保安向上に関する研究に取り組んでおり、本稿では近年、重点的に取り組んでいる研究の主要な成果を紹介する。

1. 輸送容器の遮蔽安全評価に用いられるデータおよび手法に関する研究

我が国では、使用済燃料輸送容器の設計承認等の安全審査における遮蔽安全評価には、離散座標法による輸送計算コード(1次元用:ANISN, 2次元用:DOT)が主に使用されている。これらの輸送計算コードには中性子・ガンマ線断面積セットが必要となるが、従来より米国の評価済核データライブラリー ENDF/B-II に基づく DLC 23/CASK が広く用いられている。この断面積セットは1973年に作成されたものであり、特定の条件では計算精度に問題があることがわかっており、最新の核データライブラリーに基づくデータセットが望まれている。すでに、最新の評価済核データである JENDL-3.3 に基づく、輸送容器遮蔽評価用断面積セット SFCX-J 33 が開発されており、海技研では、1次元平板体系および輸送容器モックアップ体系において²⁵²Cf 線源を用いたベンチマーク実験を行い、新しい断面積セット SFCX-J 33 の検証を行った。ベンチマーク実験の結果と SFCX-J 33 を用いた解析結果はよく一致しており、SFCX-J 33 は輸送容器体系において十分な精度を有することを確認した⁶⁾。今後、輸送容器設計のみならず、幅広い分野での活用が期待される。

また、放射線遮蔽解析の分野では、計算機の性能向上に伴い、モンテカルロ法が広く使用されるようになってきている。上述のように、現在、輸送容器の安全審査においては輸送計算コードが使用されているが、2次元のモデル化をしているために、種々の安全裕度を見込んだ評価をしているのが現状である。近年、炉心の高燃焼度化が進んでおり、2次元モデルによる評価の結果を用いた場合には、実際には輸送可能なまでに使用済燃料が冷却されているにもかかわらず、より長期間の冷却が求められることになる。そのため、海技研では、モデル化の誤差がほとんどないモンテカルロ法を輸送容器の安全審査の遮蔽安全評価に適用可能であることを検証するためのベンチマーク実験を、モックアップ模型や実機輸送容器を使用して実施している。これらの実験と解析を比較することにより、モンテカルロ法を用いる際に考慮すべき安全裕度を明らかにするとともに、モンテカルロ法による輸送容器の遮蔽解析手法のガイドラインを作成することを目標としている。これらの研究成果は、高燃焼度使用済燃料の効率的な輸送と最新の科学的知見に基づく合理的な安全審査に資するものと期待される。

2. 海上輸送事故時の環境影響評価システムの構築

平成11年のウラン加工工場での臨界事故を契機に、平成12年に原子力災害対策特別措置法が施行され、放射性物質の輸送についても原子力災害としての対応が求められることになった。そのため、海技研では、国土交通省からの受託研究として、放射性物資の海上輸送時に事故が発生した際の環境影響評価システムを開発した⁷⁾。このシステムは、平成17年度より、国の核燃料物質等の海上輸送時の災害対応に組み込まれており、事故時において、海技研が運用する体制が構築されている。海技研においては、短時間で、環境影響評価を実施し、国土交通省がとる事故対策措置を迅速かつ的確に支援することが求められている。

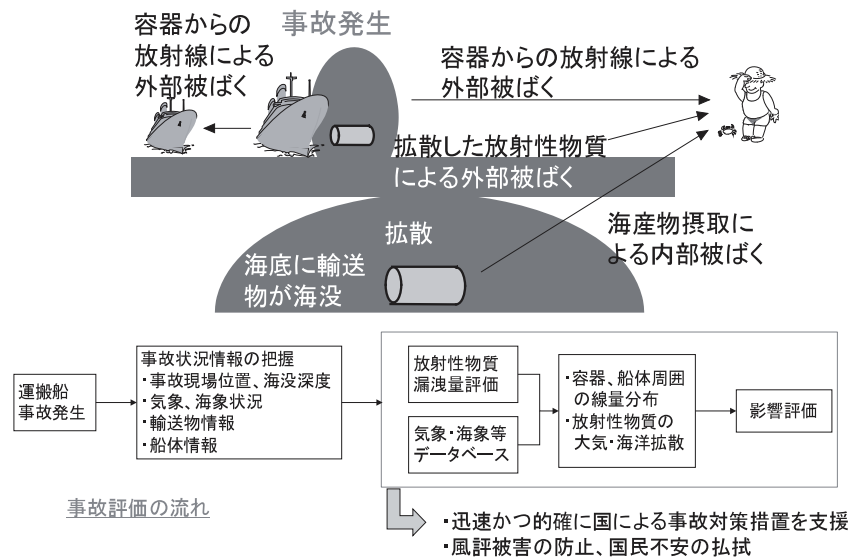
開発した環境影響評価システムの概念を第5図に示す。システムは、気象・海象等のデータベースのほか、大気拡散解析、海洋拡散解析、船内被ばく線量評価解析のための計算プログラムで構成されている。システムは逐次、シミュレーションプログラムのさらなる高度化を図っており、大気拡散解析では、港湾付近での事故を想定し、陸上地形並びに海上および地上の大気の相互作用を考慮できるよう改良するとともに、海洋拡散解析で

は、海流の流速・流向予測データを活用した高精度で高速な解析システムを構築中である。これらの成果は、事故時の環境影響評価のみならず、テロ等の不法行為が発生した際の環境影響評価にも活用されることが期待される。

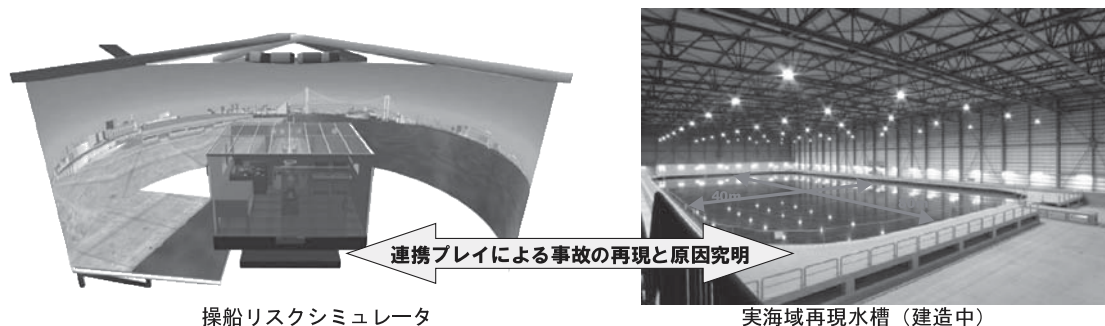
VI. 海難事故解析センターの開設

最後に、海技研が9月1日に開設した「海難事故解析センター」を紹介して本稿を締めくくりたい。

海難事故に際しては、客観的かつ定量的な事故情報を迅速に収集するとともに、必要に応じて事故再現実験を行い事故シナリオを検証し、事故原因を解明することが再発防止策を立案する上で大変重要である。2008年10月に国土交通省に運輸安全委員会が設置されたことを受け、海技研では海難事故解析センターを開設し、重大海難事故に対して即応体制を整えた。本センターは、事故情報収集、事故解析、情報発信の機能を担っており、重大海難事故発生に際しては、まず、センター長、副センター長、上級海難分析研究員等からなる情報分析会議を招集し、迅速な情報発信を行うために必要は対応方針を議決する。さらに、詳細解析が必要な場合には、第6図



第5図 事故評価システムの概念



操船リスクシミュレータ

実海域再現水槽（建造中）

第6図 海難事故解析に活用される海技研の主要施設

に示す主要施設等を活用し、事故再現や各種状況のシミュレーションを行うことにより、国等における再発防止対策の立案等への支援を行っていく計画である。

—参考資料—

- 1) 平方勝, 他, “船舶の構造信頼性評価についての技術的課題”, 日本船舶海洋工学学会講演会論文集, 第6号, (2008).
- 2) Y. Ogawa, et. al., “The effect of a bow flare shape on the water impact pressure”, *Int. J. Offshore Polar Eng. (IJOPE)*, 16[2], 112-117(2005).
- 3) 今津隼馬, 他, “航海情報の統合と表示に関する研究”, 日本航海学会論文集, 109, 133-140(2003).
- 4) 南真紀子, 他, “AISを用いた協調型航行支援システムの検討”, 日本航海学会論文集, 120(2009), 掲載予定.
- 5) H. Taguchi, S. Ishida, H. Sawada, M. Minami. “Model Experiment on Parametric Rolling of a Post-Panamax Containership in Head Waves”, *Proc. 9th Int. Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Vol. 1, p.147-156 (2006).
- 6) 大西世紀, 他, “²⁵²Cf核分裂中性子源を用いた遮へい透

過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J 33の適用性に関する研究”, 海上技術安全研報, 7[3], 1-20, (2007).

- 7) N. Odano, et al., “Development of Supporting System for Emergency Response to Maritime Transport Accidents involving Radioactive Material”, PATRAM 2004, (2004).

著者紹介

谷澤克治(たにざわ・かつじ)



海上技術安全研究所
(専門分野)船舶工学, 耐航性能, 波浪荷重

小田野直光(おだの・なおてる)



海上技術安全研究所
(専門分野)放射線工学, 放射性物質輸送工学

□ 目安箱への投書 □

2005年10月

日本原子力学会編集委員会

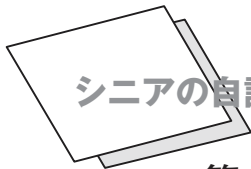
編集委員会は、読者・会員・投稿者・査読委員等からのご意見、ご提案を頂き、よりよい学会誌・論文誌編集活動を目指すべく、意見窓口「目安箱」を設けております。

- ・学会誌・論文誌の企画、編集、掲載記事・論文に関すること
- ・論文査読方針・審査方針およびシステムに関すること*
- ・新刊図書の書評の推薦

などについてのご意見・ご要望がございましたら、学会ホームページ <http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/publication/meyasu.html> または E-mail (宛先 aesj2005meyasu@aesj.or.jp) にてお寄せ下さい。編集委員会にて検討後、担当編集委員より回答させていただきます。

学会誌、論文誌の編集活動への皆様の積極的なご参加をお願いいたします。

*個々の査読コメント等に関するお問合せ、ご意見等については受け付けかねますのでご了承下さい。



シニアの自論—原子力新時代を迎えシニアはかく提言する

これまでの原子力、これからの原子力

第二の原子力時代に適合した原子力関係法規の整備を

(社)日本原子力産業協会 宅間 正夫

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

今までが国内供給目的の第一の原子力発電の時代とするなら、資源と環境問題で新たな役割が期待される原子力は国際展開を視野の第二の発展期を迎えつつある。平和利用一筋のわが国が国内的・国際的に然るべき役割を果たすには、原子力関連法規の思い切った見直しが必要と思われる。法律の素人も省みずに原子力発電現場の経験から2点述べる。

1. 国民の安全・安心に直結する安全規制の体制へ

現在の原子力発電の規制が基本的に事業者とそれが所有・運営する施設を規制する法体系で、国民の安全についても事業者への規制を介して保証する体系であるが、時代の変化に応じて、これを「国民の立場に立って国民の安全を直接見守る国民のための安全規制」に変えてゆく必要がある。

20世紀は技術と専門家・専門集団が社会を牽引した「生産者論理の時代」。しかし21世紀は「消費者論理の時代」で、国民(消費者・市民・生活者)が社会を牽引する主役。生産者論理の時代に整備された原子力発電関連の法規の本質は事業規制であり、国民の安寧福祉を目的に事業の健全な維持発展を促す一方、事業運営の不具合阻止のための保安条項が国民の安全を保証する条項、と拮据して読み替えられてきたようだ。国が事業者を介して国民の安全を保証する間接規制といえる。もちろん、事業者はその社会的責任からして安全に第一義的責任を有し、自主的に安全確保に取り組んでいる。しかし消費者論理の時代は、医療や食品等にも見るように、国が「消費者の立場に立って直接に消費者の安全を保証し安心を実感させてほしい」という社会。そこでは事業規制と事業者を介した安全規制とが同一官庁に属する現状に疑義が出てくる。事業規制とは別に国民の立場からの安全規制が求められる。国民一人ひとりが原子力を自分のことと考え、参画していく方向への意識の変革のためにも必要な法制面での改革ではないか。これは原子力の積極的な国際展開を目指すわが国の原子力への海外での評価にもつながろう。

2. 原子力発電プラントの国際市場への展開へ

従来、わが国の原子力産業は、ウラン資源、濃縮役務

など海外依存不可避のもの以外は可及的速やかに国産自主技術化と国内生産化を図ってきた。1億超の人口と天然資源小国のわが国としては当然の選択で、その先行きは当時の仏・独の国の政策と製造者の活動のように、わが国も原子力プラント産業を輸出産業として育成する遠大な政策目標があったやに思う。しかし、国内プラントの旺盛な需要もあって、プラント輸出の話は出るたびに立ち消え、仏・独の後塵を拝してきたのが現状。しかし今やわが国の原子力発電プラント技術や製造能力が世界的に注目されている。こういう状況変化に適合したプラント輸出への法整備が未だ十分ではない気がする。

現行法では、電気事業者などプラント所有者がプラント立地点とそこに置くプラントの設計とを一体として安全審査を受ける。米国では安全規制合理化の一環として、立地とプラント設計とを切り離し、プラントの基本的な安全性を「設計認証」とともに、立地点はこれとは別に「早期立地点許可」審査で審査され、実際のプラントは、立地点の諸条件を踏まえて安全性が審査される方式という。「設計認証」は素人目ながら航空法の航空機設計の「型式証明」に似ている。航空法では、航空会社など所有者が使用する航空機の「耐空証明」を申請して検査を受けて取得するが、同じ航空法にある「型式証明」を受けた航空機だと「耐空証明」の検査が一部省略されるようであり、「型式証明」は所有者とは無関係に製造者が取得する。原子力プラントでいうなら「型式証明」はプラント輸出にあたって重要な制度と思われるが、わが国の原子力の現行法にはないようだ。わが国で設計されたプラントを米国で「設計認証」してもらい以外に、わが国も事業者が取得する原子炉設置許可の条項に加えて、「設計認証」方式を原子炉等規制法などに定めたら、従来のような部品輸出を超えたプラントの国際展開に役立つであろう。

近い将来に、自国で設計製造した原子力プラントが国内国外の豊富な設計製造や建設実績・運転実績の反映に加えて、わが国発行の「設計認証」がついて国際市場に展開できる日を夢見たい。わが国は安全・核不拡散・核物質防護の原則を堅持しつつ、原子力の賢明な利用によって世界平和の確立に貢献すべきである。

(2008年 9月16日 記)

シニアの自論—原子力新時代を迎えシニアはかく提言する

世界に飛躍するわが国原子力産業界への期待と提案

シニアネットワーク連絡会(元 ㈱IHI) 石井 正則

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

まえがき

原子力産業界のグローバル化に向け、原子力メーカーが再編された。これにより、世界の原子力カルネッサンスで、わが国の原子力プラントメーカーがその中核の役割を果たす体制が整った。わが国のメーカーの時宜を得た、また勇気ある経営判断に敬意を表する。

原子力プラントの輸出にあたっては様々な制約がある。一企業では負担し得ないリスクが伴い、体制整備が必要である。プラントメーカーに必ずしも十分なノウハウが蓄積されていないものもあろう。これらの制約を克服し、わが国が世界のエネルギー問題の解決に貢献するためには、産業界と政府が一体となった支援体制が必要である。それがなければ、わが国は単に装置を供給するだけの「製造センター」の役割に留まることになる。プラントメーカーへの期待—世界に通用する「総合的ものづくり」への脱却

わが国の原子力産業界は技術の提供を受けてスタートした。しかし、そこには明治時代の富国強兵策以来培われてきた、鉄鋼や重工業・重電機産業界の「ものづくり」技術の基盤があった。筆者も「ものづくり」の一端を担って、そのことを強く感じた。この基盤こそが短期間に提供された技術を自らのものとし、遂には奥義を極め「日本流原子力ものづくり」とした要因と思う。幸い、わが国の原子力プラント建設は、世界的な中断があっても続けられてきた結果、現在では世界で原子力プラントを提供できる数少ない国となった。

この日本型原子力プラントは、電力とプラントメーカーが一体になり、わが国の国情に沿って粋を集めて作り上げた「日本型ものづくり」の成果である。しかしながら、これがそのまま世界に通用するどうかはわからない。「日本型ものづくり」の粋を集めて作られた零戦が、熟練パイロットが不足した後半戦ではその性能を発揮できなかった事例もある。

原子力発電を行う各国の事情は、原子力先進国、中国やインドなど原子力新興国、および原子力途上国との間で異なっている。燃料の供給、運転、保守を含めた支援が必要になる場合もあろう。発電所の建設から維持管理までを含めたハードとソフトを提供する「総合的ものづくり」に脱却する必要がある。プラントメーカーには、これを志向した戦略の立案力と実行力が必要となる。

産業界と政府の連携した対応への期待と提案—原子力発電の普及に向けた秩序作り

原子力発電所の建設と運営・維持には経済基盤はもとより、人、社会制度(規制や規準など)、産業基盤などのインフラが必要である。また核不拡散の面からは、国際紛争やテロなどの起こらない、安定した政治基盤がなにより重要である。

原子力プラントの輸出にあたっては、これらが、資金調達や為替などの経済的なリスクのみならず、様々なリスクとなって現れる。リスクを軽減するためには、経済的で安全性と核不拡散性の高い発電所の建設および運転、維持などのための技術面やサービス面とともに、政治、経済、社会制度の基盤整備といった社会的なインフラの整備にも対応する必要がある。核燃料の供給や使用済燃料の処理も重要である。これらの課題の克服には、一企業の枠を超えたエネルギー・環境問題への国際貢献としての視点も必要である。特に原子力新興国や途上国への輸出にあたっては、世界の原子力界が一体となって組織的に対応しなければ、これら各国の秩序ある原子力発電の導入は実現しないであろう。

世界の原子力メーカーのなかで、日本のプラントメーカーが中核を占めるようになった現在、一案として、原子力産業界に「原子力プラント国際展開協議会(仮称)」を設置、円滑な導入のための課題を抽出し、実現のための戦略を推進することを提案する。

先の洞爺湖サミットでは、わが国は3S(保障措置/核不拡散、安全、核セキュリティ)を軸とするとの提案を行った。政府に対しては、核不拡散を始めとする課題を乗り越えて、わが国が主体的に貢献できるよう、産業界と連携して多国間協定、二国間協定、経済支援、人材育成など様々な分野での枠組み作りとその推進について、縦割り行政を超えたリーダーシップと支援体制の構築を期待する。

おわりに

先進国、途上国を問わず、世界のエネルギー資源や環境問題における原子力の役割はますます増大する。時には流れの周辺で淀みや逆流もあろうが、大きな流れは変わらないと信ずる。わが国が原子力を軸として、世界のエネルギー、環境問題に貢献することを期待して止まない。(2008年 9月30日 記)

50

周年企画
公募記事

これまでの原子力、これからの原子力

学会と共に歩む原子力研修センター の50年

日本原子力研究開発機構
原子力研修センター

杉本 純

日本原子力学会の創立50周年、おめでとうございます。心よりお祝い申し上げます。

日本原子力研究開発機構(原子力機構)の原子力研修センターも平成20年で開講50周年を迎えており、この機会に私共の50年の歩みを中心にご紹介したい。

当センターは、昭和32年に東京駒込に設置された旧原研のラジオアイソトープ研修所と同34年に東海研究所内に設置された原子炉研修所を平成15年に統合し、東海研究所内に国際協力研修を含めた国際原子力総合技術センターとし、さらに昭和55年に旧動燃事業団東海事業所に設置された職員向け安全教育研修所を平成17年の原子力機構発足時に統合して現在の原子力研修センターに至っている。

昭和33年1月のラジオアイソトープ研修所の開講以来、50年間で受講生は平成19年度末で延べ約10.9万人に達している。内訳は、国内外の研修が約5.7万人、原子力機構職員研修が約5.2万人である。このうち国際研修は、昭和33年にユネスコ主催のアイソトープ訓練コース、同34年にIAEAのRIトレーニングコースを開始し、受講生は東南アジア諸国を中心に平成19年度末で延べ約2.6千人に達している。

これら受講生から、原子炉主任技術者や第1種放射線取扱主任者など国家資格取得者を含め、産業界、官公庁、大学、東南アジア等の第一線で活躍する多くの人材を輩出するなど、原子力界への貢献を果たしてきた。研修を担当する当時の研究者等の講師も、原子力委員会や原子力安全委員会、大学、産業界などの重鎮として活躍された方も多い。また、職員研修においても、高速炉、再処理、廃棄物地層処分など、原子力機構独自の技術について安全・技術教育を実施し、安全確保とプロジェクトの進展に貢献してきた。

研修コースは時代の要請に応じて、50年間に多々変遷を経ているが、放射線基礎課程や原子炉一般課程のように、開講当初から現在も基本的に継続しているコースもある。近年は、J-PARC利用を対象とした中性子利用講座、第3種放射線取扱主任者講習、技術士試験準備講座など、最近の社会ニーズに応えた新規研修の導入にも積極的に取り組んでいる。

大学関係では、従来から連携大学院制度に基づく協力を実施してきたが(平成19年度で14大学院1学部、約60名の客員教員の派遣、約20名の学生受入)、平成17年度から開始した東京大学原子力専攻(専門職大学院)、同原子力国際専攻への協力では、原子力機構の窓口として機

能している。特に、東大原子力専攻への協力では、客員教員、講師約120名が協力する体制を整え、講義の6割、実習・実験の9割を原子力機構が担当している。連携大学協力では、平成19年度より東京工業大学、金沢大学、福井大学(同20年度からは茨城大学と岡山大学も参加)と原子力機構を結ぶ多拠点双方向遠隔講義や核燃料サイクル技術中心の実習等による連携大学ネットワーク活動を開始した。さらに、文部科学省および経済産業省により同19年度から開始された原子力人材育成プログラムでは、採択校の約半数に相当する大学と高専に対し、実習、講師派遣、施設見学等の協力を実施している。

国際協力では、近年はインドネシア、タイ、ベトナムを対象とした教官を育成する研修(文科省特会)、原子力委員会のアジア原子力協力フォーラム(FNCA)における原子力人材育成ニーズと既存プログラムの調整や人材育成データベースの構築、IAEAの保障措置研修やアジア原子力安全ネットワークへの協力、仏CEAの国家原子力科学技術研究院との協力等も進めている。

昭和30年の原子力基本法の成立に始まり、同31年の原子力委員会、科学技術庁および原研の設立、同32年のIAEAへの日本加盟とJRR-1の初臨界、同38年のJPDRによる発電成功など、昭和30年代は我が国原子力界の黎明期であり、原子力が夢のエネルギーとして、一般大衆からも広く支持された時代であった。こうした時代に設立された原子力委員会、科学技術庁、日本原子力学会、原研は、一心同体といってよい組織であったと思う。原子力人材育成が急務なことは当時から認識され、原研の研修所ばかりでなく、各大学に原子力学科が設置された。学会には昭和53年設置の「原子力教育・研究」特別専門委員会や平成17年設置の原子力教育委員会などでお世話になっており、また、「日本原子力学会ニュース」でも当センターの研修コース募集を案内して頂いている。

1979年のTMI事故や1986年のチェルノブイリ事故等を経て、原子力に対する一般大衆の支持が低下し、大学の原子力関係学科が名称変更するなど、一時は出口が見えない冬の時代を迎えたが、昨今、エネルギー需要の増加、化石燃料の高騰、地球温暖化問題などを背景として、原子力に再び光が当てられる時代を迎えつつある。当センターは、原子力機構が有する様々な施設、専門家等のリソースを最大限に活用することにより、我が国の原子力人材育成を支える役割を果たしつつ、日本原子力学会とは今後も共に歩んでいく所存である。

(2008年 9月24日 記)

50

周年企画
公募記事

これまでの原子力、これからの原子力

発見後半世紀過ぎた人形石の近況

武藤 正

わが国の原子力開発は、1954年4月の2億5千万円予算の可決で始まったことはよく知られているが、この中に1,500万円のウラン探鉱費があり、当時の通産省地質調査所がその年に資源の探査を始めたことを知る人は少ない。その成果は翌年、人形峠鉱床の発見で有名になったが、探鉱活動は1956年8月に設立された旧原子燃料公社に引き継がれ、同地区のウラン埋蔵量は約2,000 tU₃O₈に達し、採掘・製錬事業を継承した旧動燃事業団は1998年までに84トンのウランを生産した。これらは、同地施設で濃縮後、軽水炉やふげん用燃料にも利用され、ウランサイクル技術を実証した。

人形石[(U, Ca, Ce)₂(PO₄)₂·1-2H₂O] (Ningyoite)の発見は人形峠鉱山の掘削が進み、黒い非酸化帯鉱石が出現した1957年春にさかのぼる。天然には200種以上の多数のウラン鉱物が産出するが、ほとんどは黄色ないし緑色で多彩な蛍光を発するウラニル基を含むVI価のウラン鉱物で、通常、IV価の初生鉱物の2次的な酸化により作られる。

これに反し、初生ウラン鉱物は、微量の含ウラニル溶液がその鉱床に入り硫化物や有機物等で還元されると、溶解度が激減し初生鉱物として沈殿固定されるもので、種類は大変少ない。通常は、閃ウラン鉱[UO_{2+x}]かコッフィン石[U(SiO₄)_{1-x}(OH)_{4x}]に限られる。

人形峠の黒色鉱石は、最濃縮部分のX線回折でも上記2鉱物の回折線の痕跡は認められず、未知の新鉱物と思われた。しかし、鉱物が微細で試料を選鉱単離できず、ちょうど留学を控えていた筆者が選鉱物を持参し、米国地質調査所で強力な協力者を得て人形石として決定した経緯については、すでに「温故知新(107)」(本誌, 42巻(2000))で紹介した。国際鉱物学連合からわが国9番目の新鉱物として承認されたのは、米国鉱物学雑誌に掲載されて間もない半世紀前の1959年9月であった。

人形石はデータブックでは産出は稀と書かれているが、私は稀に見つかるのは人形石が存在しても微粒で、X線回折でも類似のパターンを示す鉱物が多く、同定しにくいと考えていた。発見20年後にソ連のI. N. Belovaらが、続いてカナダ地質調査所のD. R. Boyleら³⁾が、ウラン鉱床の主鉱物として初期に報告したが、その後、表に示すような国々での発見が公表されている。最新の発見は未確

認要素が残るが、天然原子炉で有名なガボンのオクロ近傍から、日米仏国際共同研究でコッフィン石と混在した人形石が2008年に報告されている³⁾。

人形石がどういう環境で生成するのかは、熱化学的根拠からU(IV)含有2鉱物(閃ウラン鉱やコッフィン石)と比べて、より低温かつ中性側で沈殿したと筆者が発表した⁴⁾、最近もかなり議論がある。ロシアのO. A. Doinikova⁵⁾は発見された大部分の人形石の鉱化作用は地下浸透型鉱床に限られ、酸化還元ゾーニング境界の還元帯に分布し、他の黒色ウラン鉱物に比較してより高いEhで生成したとした。また、人形石生成において微生物プロセスが決定的な役割を持つと示唆するとともに、筆者と同様、この鉱物が稀な鉱物ではないことを強調している。

人形石の有機物との共生は発見当初から知られているが、近年、高レベル廃棄物処分でも有機物との関連と影響がしばしば議論になる。ウラン同様、還元環境で小さな溶解度を持つマイナーアクチニド(Nb, Pu, Amなど)の挙動を類推できるので、一種のナチュラルアナログとして改めて調べられるウラン鉱床も多いようである。

(2008年9月20日 記)

—参考文献—

- 1) T. Muto, *et al.*, *Am. Mineral.*, **44**, 633-650(1959).
- 2) D. R. Boyle, *et al.*, *Can. Mineral.*, **19**, 325-331(1981).
- 3) S. Utsunomiya, *et al.*, *Goldschmidt Conference Abstracts*, G-968, (2008).
- 4) T. Muto, *Mineral. J.*, **4**, 245-274(1965).
- 5) O. A. Doinikova, *Geology of One Deposits*, **49**, 80-86(2005).

表 人形石が発見された国、同定者など

国名	場所	産状	同定年	同定者
日本	人形峠、神の倉鉱床	礫岩中	1959	武藤正ら ¹⁾
	奥尻島	同上	1971	橋本好一ら
ウズベキスタン	Kyzylkum 砂漠	ウラン鉱床	1978	I.N. Belova ら
カナダ	British Columbia	ウラン鉱床	1981	D.R. Boyle ら ²⁾
ブルガリア	Novasen	ウラン鉱床	1986	I.N. Belova ら
フランス	Bretagne Lignal 等		1998	R. Pierrot ら
チェコ	北ボヘミア Liberec	ウラン鉱床	1995	B. Scharm
	東ボヘミア Katarina	石炭鉱山中	2001	J. Jirásek
ガボン	Bangombé	コッフィン石共生	2008	S. Utsunomiya ら ³⁾

多くは“Ningyoite”で検出されるインターネット・データより。ガボンのデータは未確定

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

我々は今、何をなすべきか。

文部科学省 原子力安全課長 黒木 慎一

今ほど、我々原子力に携わるものが何をなすべきか、明確な時代はないと思っている。

最近、一時期のブームのような報道は見られないが、地球温暖化の問題は極めて深刻である。我が国および人類社会が持続的発展を目指すならば、取るべき政策の選択肢はほとんどない。地球環境の維持、確保を図るためには、IPCCの議論を踏まえれば、世界平均での気温の上昇を2℃程度に抑えるべきである。このため、先の洞爺湖サミットにおいては、2050年までに、世界の温室効果ガスの少なくとも50%排出削減が合意された。

IEAによる50%削減のシナリオでは、2030年までに、世界全体の1次エネルギー需要を、2005年と比べ1.2倍に抑えることとしている。一方、世界の電力需要は2030年に現状の1.6倍となり、その中で、水力発電は2.3倍、バイオマス発電は9倍、風力発電は22倍、太陽光発電は135倍としている。原子力発電も大きく増加し、現状の2.4倍としている。国際的な政策目標として、例えば、これらの数値の達成を掲げるべきであるが、いずれの技術に

よる発電もその実現には極めて大きな困難が予想されている。この中で、原子力発電は、経済性、技術的成立性の両面で実証されたものであり、温暖化対策の切り札である。

この現状認識の下、我々は何をなすべきであろうか。

国際的には、原子力安全、セキュリティ、核不拡散の確保が上記目標達成の鍵を握る。我が国は非核兵器国であり、原子力産業技術大国であるという国際的にユニークな特性を最大限に活用して、これらの面で国際的に貢献すべきである。

国内では、耐震対応等未だに足踏み状態の部分があり、原子力技術に対する国民の信頼は必ずしも確立されていない。国民の信頼を勝ち取るには、安全確保、透明性の向上等で、地道な努力の継続が必要である。

特に、原子力学会を始めとするアカデミック・サークルでは、あらゆる機会を通じての科学的観点に立った原子力の安全性、必要性に関する社会への情報発信がますます期待されている。(2008年10月30日記)

夢の原子炉の実現をめざして

(株)東芝 塚 俊郎

「今月から「もんじゅ」と4S原子炉の設計を担当してもらう。「もんじゅ」が再起動に向けて点検中だから、ここでしっかり高速炉の構造を習得して4S原子炉の設計に生かしてほしい。」

入社2年目の2006年夏、当時担当していた軽水炉機器の据付のため、1ヶ月ほどの出張から帰任したときのことであった。以前から高速炉を担当することを希望していた私は、念願がかなった喜びとともに、責任の大きさに身が引き締まる思いであった。

4S(Super-Safe Small and Simple Reactor)は10~50MWe級の小型Na冷却高速炉で、実現すれば世界初の小型商用高速炉である。遠隔地の電源として、30年間燃料交換が不要で、核不拡散性に優れていることを特徴としている。これまで原子力発電といえば大規模発電所が中心であったが、私はこの4Sを実現することによって、経済的に大規模電力施設の建設が難しい開発途上国や企業にも原子力発電を広め、究極の低炭素社会を目指す先駆けとなりたい。原子力の分散型エネルギーといえ

ば、軍事向けの船用炉が中心だが、平和利用の領域でも実現して地球環境とエネルギー問題に貢献したいと思うのである。現在、4Sの2010年代の実現を目指し、設計とNRC(米国原子力規制委員会)の設計審査の対応を行っている。

冬季の燃料輸送に制約がある米国アラスカ州や、従来は化石燃料による熱で採掘しているオイルサンドなどの資源開発のエネルギー源として、また砂漠緑化のエネルギー源として、世界の多くの人々に貢献できるプロジェクトとして実現したい。

日本の原子力発電は、外国より導入した技術を基礎にして発展させ、今日の地位を築いてきた。しかし、高速炉に関しては、「もんじゅ」をはじめ日本が独自に開発してきた歴史がある。今度は日本から世界に向けて原子炉の新しい形を発信する時ではないだろうか。この思いを胸に4Sの実現に向け、全力で取り組んでいきたい。

(2008年10月18日記)

談話室

核分裂は誰が発見したのか？(その2)

—ベルリンでの化学的発見，クングエルブでの理論的
解明

原子力発電環境整備機構 河田東海夫

フランスの奇妙な結果

1938年7月にドイツを脱出したマイトナーは、コペンハーゲンのボーアのもとで一時を過ごした後、スウェーデンに渡り、秋にはストックホルムのジークバーン研究所に身を寄せた。ちょうどそのころ、パリのラジウム研究所のイレヌ・キュリーらは、ウランの中性子照射で生じる半減期3.5時間のAc類似物の性質は、AcというよりはLaの性質に似ているという研究結果を発表した。ウランからLaが生成するはずがない。ハーンはその報告に驚き、その再現試験をすることにした。その過程で彼らは、3種類のRa類似物質を発見し、中性子捕獲後のウランが、2度アルファ崩壊することでRaが生成するという解釈を発表した。その報告に興味を持ったボーアは、11月13日にハーンをコペンハーゲンに招き、直接議論を交わしたが、ハーンの解釈には納得しなかった。この場にはマイトナーも招かれており、彼女もハーンの解釈に同意せず、実験をもう一度注意深くやり直してみるべきだと強く主張した。ドイツに戻ったハーンは、マイトナーと国外で接触したことは内密にしておいたが、彼女の勧告を重く受け止め、3種類のRa類似物質に焦点を絞り、シュトラースマンの協力のもと、再試験を開始した。

われわれの生成物はRaではなく、Baだ！

照射済みウランからのRa類似物質の分離には、まずRaの同属元素であるBaを担体として共沈させる。次に、共沈物中のRa類似物質とBaの分離を分別結晶化という手法で進めたが、両者はまったく分離しなかった。そこで、分別結晶化法の有効性を再検証するため、既知のRa同位体を用いてBaとの分離を同法で試みたが、今度は完全に分離し、彼らの手法の正しさが確認された。この結果に当惑したハーンは、12月19日の夕方、マイトナーに次のような手紙を書いた。「……私たちの『Ra同位体』について、大変奇妙なことが起きています。この同位体は他のすべての元素から分離可能ですが、Baからだけは分離できません。私たちは次第に、私たちの『Ra同位体』はRaではなく、Baのように振舞うという恐るべき結論に至りつつあります。……このことは当面あなた以外の誰にも話さないことにしました。多分あなたなら、なにか素晴らしい説明を提案できるでしょう」。マイトナーは2日後にこの手紙を受け取り、直ちに次の

ような返事をしたためた。「……あなたのRaに関する結果は本当に奇妙です。減速中性子との反応でBaが生成したらしいなんて！ そんなひどい壊変が起こるなんて、とても考えられません。でも、私たちは、原子物理の世界では驚くべきことをたくさん見てきていますので、『そんなことはありえない』と断言することもできないでしょう……」

休暇に入るため研究室を閉めたハーンは、研究結果をシュトラースマンとの連名の論文にまとめ、12月22日付けでNaturwissenschaften(NWS)誌に投稿した。その最後に、「結果が奇妙なので、公表すべきか否か迷うところであるが、最新の実験について述べておこう。……我々は、これまで『Ra同位体』としてきた物質がBaの性質を持つという結論に至った。化学者としては、この物質はRaではなく、Baそのものであると断言せざるを得ない。……化学者としては、これまで提案してきた崩壊系列上でRa, Ac, Thとしてきたものを、Ba, La, Ceと書き改めるべきである。しかしながら、物理学に極めて近い領域で仕事をしてきた『核化学者』としては、原子核物理の法則を全く無視するような冒険は未だできない」と記した。

クングエルブ、雪の森の中の散歩

研究ノート類もすべて残したまま亡命し、自らの研究環境も整えられず、孤独な日々を過ごしていたマイトナーを、旧来の友人が、彼女の甥でボーアのもとにいるオットー・フリッシュとともに、クングエルブにある自宅でのクリスマスディナーに招いた。クングエルブは、ヨテボリの北約20 kmにある小さな町で、川沿いに14世紀初頭の古い要塞が現在も残っている。招かれた2人は、12月23日夕方、クングエルブに着き、町の小さな宿に投



マイトナーと甥のフリッシュ(1930年代)
(MPG アーカイブおよび AIP E.Segre アーカイブ提供)

宿した。翌朝、フリッシュが食堂に行くと、マイトナーは、待ち構えていたように12月19日付のハーンの手紙を甥に読ませた。一読したフリッシュは「Ba などありえない。何かの間違いだ！」といった。マイトナーは、その議論を続けるため、雪の森の中の散歩にフリッシュを誘った。フリッシュはクロスカントリースキーを履いたが、マイトナーは雪靴の早足で甥に並んで歩き、2人は氷結した川面を越えて対岸の森の中に入った。フリッシュの見解にマイトナーは、「ハーンほどの化学者が間違いを犯すはずがない」と強く反論した。それでは、なぜBaができるのか？ α 粒子より大きな粒子が飛び出すことなどありえない。陽子や α 粒子が一度にたくさん飛び出すこともありえない。それでは、ウランが半分に割れることは可能なのか？実際、原子核は剛性ではなく、液滴のようなのだとボーアはいつている……。

彼らは、丸太を見つけ、並んで腰を下ろした。マイトナーはポケットから紙切れと鉛筆を取り出し、「こんな風にならないかしら？」といて二重丸を描いた。その意味を解したフリッシュは、液滴の真ん中が繭のようなくびれ、2つに分かれる様子に描きなおした。彼女は、「それ、それなのよ」と答えた。ボーアの液滴モデルを適用し、表面張力と原子核内の陽子反発力の関係を概算してみた。その結果、陽子の数が100近辺で表面張力と反発力が拮抗することがわかった。ウランの原子数92はこれに近く、非常に不安定なことが予想できた。するとマイトナーが、もし本当に割れた場合、大きな電荷をもつ持つ2つの破片は大きなエネルギーで互いに反跳するはずだと指摘した。そこで、その反跳エネルギーを計算してみると、約200 MeVになった。原子1ヶ当たりで考えると途方もなく大きなエネルギーであり、「それでは、この200 MeV という巨大なエネルギーはどこから生まれてくるのか？」という議論に発展した。幸いマイトナーは、原子核の質量計算の経験式を暗記していた。ウランの質量と、分裂後の2つの原子の質量を計算してみると、後者の合計は元のウランの質量に比べ、陽子の質量の約1/5ほど少なくなることがわかった。その質量欠損を、アインシュタインの公式 $E=mc^2$ でエネルギーに換算すると、200 MeV となり、前述の反跳エネルギーにぴったり一致した。

一方、ベルリンでは、論文投稿後もなお思案をめぐらし続けたハーンは、12月27日にNWS誌の編集長に電話を入れ、「ともかく、これまで誰もその可能性を考えてもみなかったのだが、BaとTcの質量数の和、すなわち138+101は239になる！」という歴史的記述を付け加えた。ハーンは再度、マイトナーに手紙を書き、この現象の物理的解釈の助けを求め、論文の写しを送付した。これに応じてマイトナーは、大晦日の夜中に、「私たちは、あなたの論文を読み、いろいろと検討してみました。多分、エネルギー的には、重い原子核が割れることは起

こりえるでしょう。しかし、BaとTcが生まれるというあなたの仮説は、成立しえません」という手紙を書いた。BaとTcの原子番号、すなわち陽子の数は、56と43であり、その合計99はウランの原子番号92に一致しない。ハーンは、原子核の分裂の可能性を質量数の面からのみ推測しており、陽子の数の保存に関してはまったく考えが及んでいなかった。このことは、当時のハーンの核分裂現象への洞察はまったく未熟なものであったことを物語っている。

ネイチャーへの論文投稿

休暇を終えてコペンハーゲンに戻ったフリッシュは、1月3日にボーアに会い、この重大な発見を伝えた。彼が話し始めたとき、ボーアは自分の頭をたたき、「我々はなんてバカだったのだ！でも、これは素晴らしい！こういうことだったのだ！」と興奮して叫んだ。ボーアはプリンストンの高等研究所に招かれおり、1月7日朝、米国に向かってストックホルムを立った。

フリッシュは、マイトナーと長距離電話で相談しつつ、共著の論文「中性子による分解：新しい形式の核反応」をまとめた。彼は生物学者から、細胞分裂は「fission」というと教えられ、論文中で新現象を述べる際にこの言葉を使った。マイトナーらは、彼らの論文を補強するため、核分裂現象の物理的確認を行うことにした。フリッシュはそのために、一方の電極にウランを塗布した薄膜を張り付けたイオンチェンバーを組み立てた。その電極に電圧をかけ、Ra-Be中性子源を近づけると、オシロスコープには α 線で観測されるよりもはるかに大きな電流パルスが現れた。彼はその結果を電話でマイトナーに知らせ、別の小論文にまとめた。彼は2つの論文を1月16日付けでネイチャーの編集者に送った。

核分裂発見のニュースの米国への爆発的伝播

ボーアは、1月16日にニューヨーク港に着いたが、出発前に、この件は米国で口外しないことをフリッシュに約束していた。しかし彼の同行者が、到着の晩にプリンストン高等研究所の定例ゼミに招かれて報告したことで、核分裂発見のホットニュースはたちまちのうちに全米に広がった。ドイツで1月6日に発行されたNWS誌のハーン論文も2週間後に米国に届き、米国の研究者は一斉に核分裂確認実験を開始した。マイトナーらの論文は、ネイチャーの2月11日号によりやく掲載され、フリッシュの実験報告はその翌週号に掲載された。そのころには、米国や欧州でさまざまな実験が始まっており、その直後から溢れるように研究成果が専門誌に公表され始めた。それから半年後の1939年9月1日、ナチス・ドイツが突如ポーランドを侵攻し、第二次世界大戦が始まった。核分裂の発見は、やがて米国のマンハッタン計画を生み、広島、長崎の原爆の悲劇へとつながって行った。

(続く)

(2008年 11月 7日 記)

談話室

地球温暖化の世紀に原子力が目指すもの

元 日本原子力発電㈱ 山崎 亮吉

原子力は長期的に地球温暖化対策の役割を担っていくための十分な能力を備えているといえるであろうか。本稿では特に基本的な課題を取り上げ、意見を述べる。

1. 軽水炉の設備利用率

(1) 代替エネルギーの開発と原子力発電の役割

CO₂削減への取組みは、エネルギー需要の削減、エネルギー効率向上、代替エネルギーの開発等々多岐にわたるが、これらのうち、代替エネルギーの開発については、原子力供給量の大幅な増加が不可欠という意見が一部にあるものの、一般には自然エネルギーを大幅に増加しようという意見が多いと思われる¹⁾。

筆者も基本的にこの方向を支持している。理由は、エネルギー源は本来、多様化しリスク分散を図るのが大原則と考えるからだ。従来、化石燃料と原子力を主体に良好なバランスを保ってきたエネルギー源の中で、化石燃料を削減するとすれば、原子力の着実な増加に加えて、自然エネルギーなどの新たなエネルギー源の開発に最善の努力を払い、その上で、おのおのの役割分担を正しく定めるのが正道であろう。

それでは原子力業界は比較的责任が軽いかといえそうではない。原子力はエネルギー供給体系を支える根幹として、低廉で安定した電力供給を行う責任が現在以上に求められる。化石燃料が現在担っている極めて大きな責任の多くを引き受けねばならない。

自然エネルギーの開発は容易なことではなかろう。新たな取組みには常に思いがけない問題に遭遇するリスクがある。原子力はかつて化石燃料の支えのもとに成長してきたが、今後は新エネルギーの開発に伴う様々な不確実性を支えて、エネルギー供給全体の脆弱化を招かないように機能することがまず求められよう。

(2) 原子力の最近の運転状況と喫緊の課題

より大きな責任を担うべき我が国の原子力であるが、最近の運転状況は芳しいものではない。設備利用率は80%を大きく割り込んでいるが、この状況を早急に改善しなければならない。対比して米国の状況を見ると、2005～2007の3年平均の設備利用率は90.61%であり、全104基の原子炉のうち80%を割り込んでいるのは6基にすぎない²⁾。この差異については別途、専門家に分析をいただければ幸いである。

電力事業者および各関係機関は、設備利用率向上を共

通の使命ととらえ、組織の枠を超えて協力し、改善に取り組むよう要望する。設備利用率向上ほど効果的なCO₂削減方策はなかなか見出せるものではない。

2. 高速増殖炉への移行とプルサーマル

(1) 高速増殖炉への移行

軽水炉を主体とする現在の原子力エネルギーは天然ウラン資源の制約という弱点を抱えている。これは多くの教科書に述べられているように³⁾、ウラン精鉱をベースにした天然ウランの利用率が0.5%程度にすぎないことに起因する。天然ウラン資源は海水中ウランを含めて無尽蔵にあるという楽観論もあるが、発展途上国を含め世界的な原子力利用の拡大の動き、さらに近年の天然ウラン価格の著しい上昇を見れば、いずれ天然ウランの需給逼迫、天然ウラン確保の困難に直面する可能性があり得ると考えるのが無難であろう。それが杞憂であるとしても、軽水炉における非効率なウラン資源利用は廃棄物の増加につながり、50年、100年先の未来のエネルギーの姿としてふさわしいものではない。

我が国および原子力先進国の原子力は、軽水炉から高速増殖炉への移行を進め、天然ウラン利用率の飛躍的向上(2桁程度)を図り、資源の制約から解放されるべきである。軽水炉ではエネルギーの主役は²³⁵Uであるが、高速増殖炉では天然ウラン成分の99.3%を占める²³⁸Uこそ主役といってよいであろう。高速増殖炉への移行は、原子力が22世紀以降においても人類が依存し得るエネルギーとして生き残るための不可避の進路であり、また我が国が国産のエネルギーを手にし、平和国家として生きる礎を築くものと考えられる。

我が国は原子力開発の当初から高速増殖炉への発展を目標としながら、それは将来の夢という意識が強く、軽水炉の世界に安住しがちであったと思われるが、化石燃料依存にブレーキがかかった今こそ、原子力はより頼りになるエネルギーを目指して体質改善を強力に進めるべき時期であると考えられる。

(2) プルサーマル

現在、軽水炉ではプルサーマルを鋭意進めようとしている。プルサーマルは資源の有効利用を図る核燃料サイクル技術の一つと位置付けられるが、その意義は単に資源の有効利用にとどまるものではない。確かに、前述の天然ウラン利用率は0.6～0.7%と何割も向上することに

なるが、それに伴う多大な労力や費用を考えればそれだけでは物足りない。

筆者は、プルサーマルの最大の意義はプルトニウム本格利用に向けた国民意識の醸成および国際的認知にあると考える。我々が、「軽水炉ではウランとともにプルトニウムも燃焼している」、「敦賀1号や美浜1号でプルサーマルの実証経験がある」、「ふげんや常陽でプルトニウム燃料の豊富な使用実績がある」と伝えても、プルトニウムは国民意識の中にほとんど根付いていない。これでは高速増殖炉の実用規模の展開は難しだろう。身近なエネルギー供給がプルトニウムにより行われることを、国民レベルで体得する時間がさらに必要である。そのため電力供給を通じて国民との接点を有する商業用軽水炉のプルサーマルは最も効果的な役割を果たすことができる。国内における定常的なプルトニウム燃料の製造や輸送、発電所における日常的な取扱いや管理、法規基準の整備・適用、IAEA 保障措置の適用などがプルトニウム利用のための社会基盤を形成する。これらの活動を極力公開することがプルトニウムに対する国民意識の醸成をより確かなものにする。

また我が国は永年にわたる原子力平和利用、IAEA 保障措置への積極的な協力などの実績を基に、国際的にプルトニウムの取扱いを認知されている。この国際的認知をより確かなものにするためにも、プルサーマルは大きな役割を果たすものと考えられる。そのため核不拡散対策と透明性の確保に徹し、プルトニウムの平和利用における世界の模範例になることを目指すべきである。

このような重要な役割を考えれば、今後数十年をかけて取り組むに値する活動であることが理解されよう。

3. 高レベル放射性廃棄物の処分

高速増殖炉への移行と並んで21世紀の大きな課題は高レベル放射性廃棄物の処分である。高速増殖炉への移行によってマイナーアクチニド核種のリサイクルを進めて超長寿命廃棄物の発生量を大幅削減するとともに、高レベル放射性廃棄物であるガラス固化体の処分を実現しなければならない。ガラス固化体は現在、地上に貯蔵・管理されているが、いずれ深地層に埋設処分することになっている。処分の基本的考え方については OECD-NEA が中心になって環境および倫理的観点から検討を行い⁴⁾、深地層処分が適当という考えがまとめられ、我が国を含む多くの国々に支持されている。しかし実際に地層処分の候補地を決定するのは時間がかかりそうだ。処分候補地になることを検討する地域に対しては、誠意を尽くして処分の安全性とエネルギーの重要性について説明していくことが何よりも大切であるが、並行してガラス固化体の長期貯蔵にも真剣に取り組む必要があると考える。

現在考えられている処分の道筋は、ガラス固化体は再

処理工場で生成するから再処理工場内に貯蔵し、地層処分場が用意された後は一直線に処分場へ搬出するという合理的な道筋であるが、柔軟性や遊びがないように感じられる。ここには国民がガラス固化体の存在を意識し安全実感を養うプロセスはほとんど存在しない。我々は遠回りのようでも、ガラス固化体の長期貯蔵を通じて、①エネルギー利用の代償として廃棄物が発生すること、②ガラス固化体は安全に取り扱うことができ、将来の地層処分に適するものであること、を体得するための十分な時間を経る必要がある。そのために貯蔵は大きな役割を果たすことができると考える。

現在、青森県にガラス固化体の貯蔵施設が用意されていることは大変ありがたいことであるが、長期的には貯蔵施設をさらに拡大することが必要になるであろう。将来の貯蔵施設はなるべく多くの人々と接点を有することが望ましく、したがって、人口密度が高い大都市近傍に展開することを検討すべきである。地層処分が特に安定な地盤を要求するのと異なり、貯蔵施設の場合は人間の管理下に置かれるから立地の自由度があり、洋上立地も可能と思われる。ガラス固化体は放射能の飛散の恐れがない比較的取り扱いやすい廃棄物であるから、適切な遮蔽や除熱を行うことにより安全な貯蔵施設を実現することは、技術的にはさほど困難とは思われない。ガラス固化体の貯蔵にとどまらず、様々な公共のニーズに応える多目的利用の施設、例えば各種の一般廃棄物や医療廃棄物の処理処分やリサイクル施設、災害時の支援物資の備蓄、リクリエーション施設などとの共存はさらに望ましいと考える。

21世紀は国民が廃棄物を明確に意識し、身近に安全に共存する時代、都会地にあっても無関心が許されない時代と考える。そのような時代変化が進展してこそ、ガラス固化体の地層処分は地域住民に安心感と公平感をもって受け入れられ、地域が誇りを持つ事業に発展することができると考える。

4. 結び

21世紀の原子力が目指すべきことは、自然エネルギーなどの新エネルギーの育成を支えることと並行して、原子力が抱える基本的・長期的課題を解決し、22世紀以降のエネルギーにふさわしい体質を身につけることである。原子力の草創期から変わらぬ大目標を見失うことなくたゆまず進むことが求められる。(2008年 9月 8日 記)

—参考文献—

- 1) 小宮山 宏, 地球持続の技術, 岩波新書, (1999).
- 2) E. M. Blake, "U.S. capacity factors: Another small gain, another new peak", *Nucl. News*, American Nuclear Society, (May 2008).
- 3) 鈴木篤之, 原子力の燃料サイクル, 電力新報社, (1985).
- 4) *The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal*, OECD, (1995).

支部便り

関東・甲越支部 第3回原子力オープンスクール

「未知との遭遇、アトムの世界」実施報告

2008年8月3日(三菱みなとみらい技術館)

本オープンスクールは、小・中学生を主たる対象に、科学に対する純粋な興味を持つ機会を提供することにより、今世紀、我が国が目指す科学技術立国の礎となる人材の育成に寄与することを目的としております。具体的には以下の目標を掲げて実施しました。

- (1) 来場者が実験に直接参加することで、原子、量子および放射線の持つ力と性質の不思議さを理解し、今後の持続的な興味のきっかけになるようにする。
- (2) 原子力を含む環境エネルギーに関する双六ゲームを用意し、本人だけでなく保護者にも正しい知識を理解していただく。

昨年に引き続き、下記の体験実験、実験実演および学習ゲームを関東・甲越支部企画委員関係者および原子力青年ネットワーク連絡会(YGN)で実施しました。また、環境問題や省エネルギーについて考えるCO₂ダイエットコーナーを設けました。

＜体験実験＞

1. 「見えない放射線を見る！」：身近な材料を利用して放射線検出器(霧箱)を製作し、放射線軌跡の観測を行いました。普段は見ることのできない放射線が白い飛程として見えるたびに子供も大人も驚いていました。
2. 「君は放射線に取り囲まれている！」：“人間の体からも放射線が出ているか”などの出題に○か×で答えるクイズを解いていただきました。実際に放射線測定器を使うことで、放射線を身近に感じることができたようでした。
3. 「光のファンタジーワールド! 万華鏡」：光の不思議を体験する万華鏡製作では、家族で製作に取り組むことができ非常に賑やかな雰囲気でありました。

これら3つの体験実験では、「放射線検出博士」、「放射線博士」、「万華鏡博士」という修了認定証を支部から授与し、参加者に大好評でした。

＜実演実験＞

4. 「ファラデーはえらい人！」：電磁石のパワーを体感し、発電の仕組みを理解できる「おもしろ博士」による実演実験では、電磁石の不思議さを体験でき子供たちに大好評でした。

＜学習ゲーム＞

5. 「双六ゲーム GEN-6」：環境問題をテーマにした双六ゲームでは、原子力、石油、天然ガスといった発電エネルギーのメリット、デメリットをクイズ形式で楽しく学ぶことができ、参加者の環境問題に対する意識の向上に大変役に立っていました。

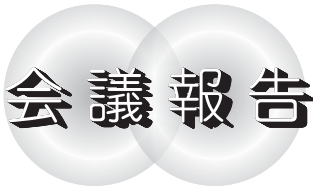
来場者は昨年並みの1,057人で、猛暑にもかかわらず大盛況でした。小学生・未就学児童を連れた家族連れも多く、夏休み中に親子で科学に触れ、エネルギーや環境問題に対して親子で楽しみながら学習する場を提供できたことは大変有意義であったと考えております。また、来場者全員に対してアンケートとともに行った放射線クイズ等を通して、放射線を身近に感じていただけたものと考えております。来年度以降も企画内容をさらに充実させ、継続開催する予定です。

(本オープンスクールは、平成20年度科学研究費補助金(研究成果公開促進費)「研究成果公开发表(B)」による補助を受け開催されました。)

(支部事務局/電中研・荻野晴之, 2008年9月25日記)



「光のファンタジーワールド! 万華鏡」の様子



OECD/NEA-NSC 第9回加速器遮蔽専門家会合

Expert Group on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities Ninth Meeting (SATIF-9)

2008年4月21～23日(米国テネシー州オークリッジ国立研究所)

米国ジョージア州パインマウンテンでの第11回放射線遮蔽国際会議(ICRS-11)に引き続き、OECD/NEAの核科学委員会NSCの標記会合がORNLの核破砕中性子源施設(以下、「SNS」)で開催された。本会合の目的は、加速器施設、ターゲットおよび照射施設における放射線遮蔽に係る情報交換、ベンチマーク問題の解析を通じた各種遮蔽計算コードの精度比較等である。今回の会合には9カ国から32名、日本からは、筆者らのほかに日立GEニュークリア・エナジーの林克己氏、清水建設の大石晃嗣氏、フジタの木村健一氏の5名が参加した。

初日のセッション1の線源項および関連事項では7件の発表があり、中村は、大阪大学核物理研究センターにおける140～392 MeVの陽子入射によるリチウムからの準単色中性子を用いたベンチマーク実験に関して発表を行った。これらは望まれていた実験であるため早急にベンチマーク問題とするよう要請があった。このほか、フェルミ加速器研究所での主入射器コリメーションシステム、国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動、ロスアラモス研究所の材料試験施設、韓国ポハン加速器研究所の中性子源および欧州オンライン同位体分離装置(以下、「EURISOL」)の遮蔽設計が紹介された。

セッション2の誘導放射能および放射化データの測定と計算では6件の発表があり、MCNPXコードと放射能インベントリー計算コードとの連結、アルゴンヌ国立研究所の中性子源IPSN、スイス・ポールシェラー研究所の超冷中性子ガイドシステムおよびカナダ国立素粒子原子核物理学研究所のオンライン同位体分離用加速器ウラン・カーバイドターゲットの放射能インベントリーの評価が紹介された。セッション終了後、SNSのターゲット建屋の実験ホールを見学した。中性子ビームラインの一部はまだ建設中であった。

2日目のセッション3の医療および工業への加速器利用での遮蔽に関して2件の発表があった。木村、林は、日本の原子力発電所を対象にした低放射化コンクリートの開発に関する発表を行い、高い関心が寄せられ、コストに関する質問があった。また、米国原子力学会における医用物理の計算に関する活動が紹介された。

セッション4のベンチマークの計算と結果では6件の発表があった。大石は、30 MeV以下の電子加速器でのターゲット周囲での中性子を含む線量分布の測定結果を紹介し、中性子の実験値と計算値が2倍ほど違って、光中性子の断面積に問題があることを指摘した。高

エネルギー加速器機構の平山英夫氏の代わりに坂本は、鉄およびコンクリートの遮蔽体での中性子線量減衰率のベンチマーク計算結果を紹介した。これは7回目のシリーズ発表であり、従来の問題に対してGEANT4の結果が更新されるとともに、ブルックヘブン国立研究所シンクロトン加速器施設AGSの水銀ターゲットを用いたベンチマーク実験に対するPHITSコードおよびMCNPXコードによる結果が比較されている。後者の解析では、遮蔽体内側での放射化反応率が実測データを再現しないことから、水銀ターゲットでの中性子発生量の計算に再検討の余地があると思われる、他の計算コードによる解析も待たれるところである。

セッション5の線量と関連事項では、ボナー球のアンフォールディング、250 MeVまでの陽子に対するコンクリート、鉄および複合遮蔽体での線量減衰並びにEURISOLでのターゲットステーションに関する3件の発表があった。また、セッション6の計算コード、断面積および遮蔽実験データライブラリー関連では、電磁シャワーによる放射線損傷、SINBADデータベース、最近の加速器関連の計算コードの発表とともに、坂本が粒子・重イオン輸送計算コードPHITSの現状として10 MeV以下の中性子に対するイベントジェネレーターモードを紹介した。同機能では原子の弾き出し断面積DPAを評価できることから、EURISOLの関係者からPHITSコードへの関心が寄せられた。

最終日3日目のセッション7の線量および関連事項では、「加速器遮蔽ハンドブック」の原稿の紹介、各章の取りまとめ役の再指名が行われた。取りまとめ役が担当する章の原稿を集め、2009年3月頃にパリのOECD/NEAで取りまとめ役の会合を開催することになった。なお、これまでSATIFのコーディネータ役であったOECD/NEAのSartori氏が来年6月に定年退職されることになり、今後の体制についての議論が行われた。

次回のSATIF-10は、2010年5月にスイス・ジュネーブの欧州原子核研究機構CERNで開催することが決まり、次々回のSATIF-11は、2012年に日本での開催が要請された。同年には日本でICRS-12が開催される予定なので、時期およびホスト機関等については今後、関係者で検討することとなった。

(日本原子力研究開発機構・坂本幸夫、
東北大学・中村尚司、2008年8月26日記)

放射線の利用と展望の記事が好評

放射線の恩恵をもっと宣伝すべしの声も(9月号のWebアンケート結果)

「原子力学会誌」9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85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。9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	NEWS	NEWS(9月号)	3.85
2	50周年記念 企画 公募	放射線の利用と展望 —工業・医療分野における利用動向	3.83
3	ジャーナリス トの視点	原子力業界のOB たちに学ぶ	3.81
4	巻頭言	原子力カルネッサンスを現実のものとするために	3.71
4	講演	原子力の広報活動を振り返って —新たな信頼関係づくりに向け てダイアローグの推進を	3.71

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	ジャーナリス トの視点	原子力業界のOB たちに学ぶ	3.81
2	NEWS	NEWS(9月号)	3.67
3	時論	倫理の目で見ると何が見える —身近な規制の法令に目を向け よう	3.66
4	巻頭言	原子力カルネッサンスを現実のものとするために	3.65

今回も先月に引き続き、50周年記念記事が上位に入っています。

2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 原子力業界の人に外部の人の考えを伝える記事が多くなり、孤立した状態でなく、社会とのつながりがわかるようになってきた。
- (2) 放射線の利用と展望は、待ちかねていた記事であった。放射線利用の宣伝が足りない。ただ、忠実性を徹底されたために、一般の人には理解できなかったところもあるのではないかと思う。
- (3) 今後掲載してほしい記事として、各国の原子力事情をその国の人に2ページくらいで紹介してもらうのはどうか。
- (4) アンケート結果に関して、各号の内容と評価点数の変化を分析し、今後の企画に生かしてほしいと思う。

3. 編集委員会からの回答

- (1) 上記(4)のコメントに関しては、7月号に1年間のアンケート結果のサマリーを掲載していますので、ぜひご覧ください。

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

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

北海道と原子力発電

読売新聞 西沢 隆之

2009年から2010年は、後世、北海道のエネルギー史を振り返った際に、欠かすことのできない大きな節目として明記されることになるだろう。09年12月には北海道電力の泊原子力発電所3号機(出力91.2万キロ・ワット)が営業運転を始め、北電は10年度までにその3号機でプルサーマル計画を実施する予定となっているからだ。このタイミングで、改めて北海道の電力需要に考えを巡らしてみたい。

泊3号機が稼働すれば、北電の電源構成に占める原子力の比率(発電電力量ベース)は、現在の約25%から40%程度へとアップする。全国平均と変わらない水準に達するという。ただ、3号機の導入で電源構成も大きく変わってしまうという現実、それだけ北海道内の電力事情が脆弱である裏返しともいえる。

東京本社の経済部で電力会社や経済産業省の担当をしていたときは、電力各社を「電力業界」としてひとくくりに把握し、コトの本質を見極めようと努めた。そうした折、北電の広報担当者から「北海道は電力ピークが夏場でなく冬場に訪れる」との説明を受けた。首都圏で生まれ育った自分には新鮮な驚きであり、電力業界をすべてひとくくりにする難しさにも気付いた。

その後、北海道に取材の場を移してみると、本州や九州、四国と同じ土俵で電力事情を論じることの難しさを、随所で実感する。北海道には、設備容量60万キロ・ワットの「北海道・本州間連系設備(北本連系)」でしか他地域と送電線が繋がっていない事情があるためだ。電力会社間で行われる電力融通が、北電と他電力会社の間では容易に行えない。

北海道の冬は、1月、2月となると、最低気温は日常的に氷点下となる。今でこそ、高気密高断熱住宅が普及してきているが、冬場に発電所が1つトラブルを起こして発電を停止すると、電力の安定供給に対する懸念が一気に高まってしまふ構造は解消されてはいない。電力需給を自立させようという要請は北海道では必然的に強まる。

現在、北海道内の原子力を巡っては、泊3号機の稼働とプルサーマル計画を滞りなく実現できるかどうか注目が集まっている。経産省もプルサーマル計画実現に向けて、安全性の観点を中心に北海道民への理解活動に力を入れている。

ただ、私は「ポスト泊」についても同様に、北海道にとっては重要な課題になってくると見ている。

すでに稼働中の泊1,2号機は、全国で稼働している55基のプラントの中でも高い稼働率を誇っている。その理由には、原発建設の後発組であったために、先行プラントの不具合を十分に学習し、設計・開発・建設が行われた点が指摘されている。ただ、09年6月には泊1号機が稼働から20年を迎えることも、もう1つの事実である。

北海道では日本海側を中心に風力発電が盛んで、バイオマス発電にも動きが出てきた点などを挙げて、原発を唱える声もあるが、私はこうした主張に現実性を感じることはできない。

新エネルギーの導入推進は極めて重要だが、新エネルギーに過度に期待することは、未解決の系統問題が足元に立ちはだかる現実へ目を背けることと同じではないのか。資源小国・日本にあっては、科学的に安全性が担保される前提下で、プルサーマル計画を進めることも現実的対応といえるだろう。

そうであれば、リスク分散という観点に立って、泊のプラントが不測の事態で一時、運転停止に至った際、科学的に安全性が検証されれば、速やかに再稼働できる仕組みを議論する機運が出てきてもよいと思う。しかし、現実にはそうはなっていない。

これまでの取材経験を踏まえると、実際、トラブルが起きれば冷静な議論は行えなくなる。国や電力会社の説明が、かえって人々に不信感を募らせるという悪循環を招く可能性もある。

だからこそ、専門性を有し、原子力問題全般を日頃から広くカバーしている日本原子力学会には、分かりやすい言葉で情報発信しつつ、関係者が冷静な議論を重ねることの出来る素地を北海道内のみならず、至る所で築いてもらいたい。活動に期待したい。



西沢隆之(にしざわ・たかゆき)
読売新聞北海道支社報道課経済担当
記者

1991年早稲田大学法学部卒。読売新聞社入社後、静岡支局を経て97年から経済部。東京電力トラブル隠しなどを取材。2007年4月から現職。