

報告

16 原子炉出力向上に関する技術検討評価の結果について

安全を損なうことなく、原子炉の定格熱出力を上げて発電出力を1~20%程度増加させる。欧米では、このような原子炉出力向上によって、発電容量が700万kW以上も増えた。二酸化炭素の排出削減に大きく寄与する原子炉出力向上を考える。

岡本孝司, 木倉宏成, 山口 彰
三島嘉一郎, 関村直人

シリーズ解説

我が国の最先端原子力研究開発
No. 6

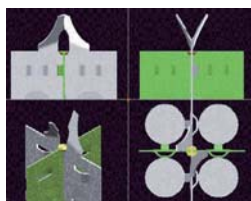
29 量子ビームが切り拓く未来(II) —バイオ・環境・エネルギーに貢献する荷電粒子・RI 利用研究

近年技術革新のキーテクノロジーとして世界的に注目されている量子ビーム。なかでもガンマ線、電子線やイオンビームを用いた荷電粒子・RI 利用研究は、さまざまな分野で利用されている。南波秀樹, 田中 淳, 伊藤久義

解説

34 複雑な流路における流れの解明 —燃料集合体内の流動計測/評価技術の進展

PWR 燃料バンドル内での熱流体は、複雑な動きを見せる。その流れを、模擬燃料棒に組み込んだレーザー Doppler 流速計を用いた精密な流速分布測定によって検証するとともに、CFD 解析を組み合わせる手法を開発した。



スパーサグリッド模式図

池田一生, 星 雅也

巻頭言

1 原子力にも闘魂ゲノムを!

アントニオ猪木

時論

2 いよいよ始動の J-PARC —国際施設の新たな課題に向かって

8年の歳月をかけて建設されてきた J-PARC が完成し、供用が始まる。よりよい成果を生み出すためには、国際社会と産業界への施設開放が必須。永宮正治

解説

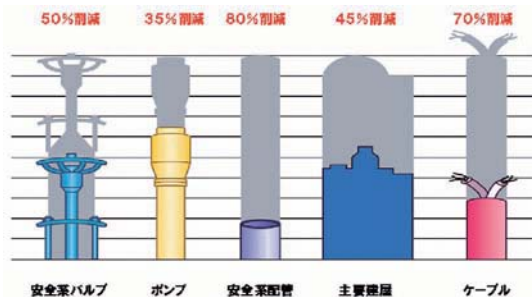
39 なぜ「掲載否」と判定されるのか —論文査読者からのコメント

苦勞して書き上げた論文が「掲載否」となることは、投稿者にとってだけでなく、査読・編集者にとっても大きな損失である。ここでは、掲載否となった論文によく見られる問題点を抽出し、完成度と信頼性の高い論文を執筆するためのポイントをまとめた。編集委員会

連載講座 軽水炉プラント —その半世紀の進化のあゆみ(15)

42 今後の軽水炉の開発(1) —導入計画中の軽水炉①

現在、世界では第2世代と呼ばれる原子炉とそれを改良した、第3世代の原子炉が運転されている。今回は、まだ稼働していない今後の軽水炉のうち、AP 1000, ESBWR を紹介する。これらは、第3世代+の原子炉と呼ばれている。野田哲也, 守屋公三明, 大久保 努



AP 1000のプラント構成機器の物量削減(従来型 PWR との比較)

表紙イラスト Venezia ヴェネツィア / イタリア

底冷えのするヴェネツィアを年末訪れたが、世界的な観光地だけあり、観光客の姿もやはり多く、通りはたくさんの人であふれていた。広場ではオープンカフェにもぎわっており、ウェイターも忙しそうであった。夜散歩すると、通りにはイルミネーションが輝き、それが夜霧に反射して美しく輝いていた。

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

連載講座 今、核融合炉の壁が熱い！
—数値モデリングでチャレンジ(7)

47 壁の中は傷まないか—放射線照射によって
受ける壁材料のダメージをいかに予測するか

核融合炉では放射線照射によって、材料内に多数の格子欠陥が生成し、より複雑な欠陥集合体が形成される。そのようなマイクロ構造変化が、やがては材料のマクロな特性を変化させていく。今回はそのプロセスのうち、照射損傷による材料マイクロ構造変化のモデル化について解説する。 森下和功, Shahram SHARAFAT

50 周年記念企画

原子力学会1959—2009

ヤング・フリートーク

53 「原子力は、私たちの社会の基盤を
支えている」—原子力を学ぶ学生が、
想いを語りました

原子力を学び始めた理由はさまざまでも、将来の日本は原子力に頼るしかないという点では一致する。今の原子力をめぐる情勢や、そこで働く人たちは、学生の人たちの目にどう映っているのか。

嘉村明彦, 佐野祐太
鈴木 将, 永田章人
羽倉尚人, 前川 陽
(聞き手)小林容子



シニアの自論

58 化石燃料からのエネルギー転換を急げ
池亀 亮

59 保全プログラムを基礎とする検査の導入
松永一郎

公募記事

60 「日本のチェルノブイリ」と言われて
稲村 卓

61 巨大トリウムエネルギー産業の早期
世界展開 古川和男, 亀井敬史

巻頭言アーカイブ

62 原子力研究の昨日・今日・明日
武田栄一

私の主張

63 地層処分の実現に向けた取組み
についての私見

高レベル放射性廃棄物等の地層処分の安全性を判断する際には、千年程度を射程とした人工バリアと安全管理を重視すべきではないだろうか。 前田敏克

4 NEWS

- 来年度概算要求, 今年度比6%増の4914億円
- 柏崎商工会がアンケート, 運転再開に期待
- 米国向け投資金融具体化へ, 政令を閣議決定
- 経産省, 3年計画でガラス固化の新技術開発へ
- 富岡町議会が福島プルサーマル計画凍結を解除
- 機械学会が柏崎刈羽運転チームを表彰
- J-PARCで最初のミュオンビームを発生
- 草津温泉から希少金属を回収
- 家庭用燃料電池用の高耐久性電解質膜を開発
- ATOMCON 2008参加原産代表団報告書を刊行
- 原産協会提供の動画番組の案内
- 海外ニュース

14 Nuclear News を見て

「FUEL 特集」(08年6月号)を読んで 高田誠一

談話室

65 核分裂は誰が発見したのか?(その1)

核分裂は今から70年前に発見され、オットー・ハーンがノーベル化学賞を受賞した。しかし、その理論的解明を行ったリーゼ・マイトナーは受賞しなかった。 河田東海夫

部会便り

67 水化学サマーセミナー in 福井 磯部 毅

ジャーナリストの視点

69 「安全」と「安心」の間にあるもの 坪谷英紀

15 From Editors

33, 52 新刊紹介

「事例に学ぶ流体関連振動」 稲田文夫

「Fundamentals of Nuclear Reactor Physics」

北田孝典

67 支部便り

70 英文論文誌(Vol.45, No.12) 目次,

和文論文誌(Vol.7, No.4) 目次

72 会報 原子力関係会議案内, 人事公募,

平成21年度フェロー候補推薦募集,

フェローの活動状況, 主要会務, 編集後記

後付 総目次・著者名索引(Vol.50, Nos 1~12)

WEB アンケート

8月号のアンケート結果をお知らせします。(p.68)

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

学会誌ホームページが変わりました

http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/atomos/

原子力にも闘魂ゲノムを！



アントニオ猪木(あんとにおいのき)

元プロレスラー。スポーツ平和党からレスラー初の参議院議員に当選。事業家。ラッパー。現在はイノキゲノムフェデレーション(IGF)会長。

元気ですかー！

私の本業はプロレスですが、そのかわり、これまでいろんな事業を立ち上げてきました。師匠の力道山も事業家でした。祖父もそうでした。祖父のリーダーシップで私達一家はブラジル移住を執行したのです。

壮絶に厳しかった力道山と大好きだった祖父から授かった“闘魂”と発想の自由さが、いわば私の人生のゲノムです。そんな私がかつて最も力を注いだ事業がアントン・ハイセルです。

1980年に設立したバイオのベンチャーで、ブラジル政府も支援した国際的一大プロジェクトでした。サトウキビから精製したエタノールを石油の代替にしようとしたのです。ところが、製造工程の廃液と絞りがすのバカスが公害問題になった。バカスは繊維質が強く肥料にならず、土壌に混ぜれば土質が悪化し農作物が育たない。家畜に食べさせると下痢を起こす。とても厄介で、毒のような魔物です。

アントン・ハイセルの事業は、バカスと廃液に酵素菌を加えて発酵させ、安全な家畜飼料を作る。さらに、このバカス飼料を食べた家畜の糞を有機肥料として、農作物と家畜の増産を促す。このように、世界の食料問題を一挙に解決しようという魂胆でした。まさに毒のような魔物のバカスを金の卵にバカス(化かす)。

ところが、日本とブラジルの気候の違いから、現地での発酵処理に行き詰まりました。ブラジルのインフレの影響もあり、事業は頓挫し撤退を余儀なくされました。あのときもマスコミにはいろいろ叩かれました。

あれから四半世紀、やれ環境にやさしいだの持続性だのと騒ぐ時代がまた巡ってきました。そして、サトウキビからのエタノールもバカスの利用も事業化の目処が立ってきた。ついに金の卵になったのです。しかし、もはや私の手中にはない。残念といえばそれまでですが、「再生可能」とか「持続性」の本質は悟りました。ぐるぐる回すってことじゃない。お天道様ですよ。空に太陽がある限り。あれは原子の力ですね。

1980年、本業ではスタン・ハンセンと対戦し、逆ラリアットでフォール勝ちしました。彼の必殺技を逆手に取ったのです。私の本来の必殺技は、コブラツイスト、卍固め、延髄切りといくつもあります。とにかく身体を酷使してきました。だからこそ“闘魂猪木”であり続けた。しかし、そのころのツケも少しずつ溜まってきて、膝の関節はかなりガタがきています。時々オーバーホールしてやらないといけない。何年も前に、オーストラリアに岩盤浴の良い施設があると知りました。ラドンから出る放射線の効果もあると聞きました。ラドンと聞くとゴジラかいという仲間がいますね。なにをバカなど。ともあれ、試さない手はない。もともと好奇心は人一倍ありますから。トロッコで廃坑の洞窟のなかにゴトゴト入っていくと、洞のなかは低温サウナ状態。やがて身体が暖まり、ドロツとした汗が全身からダラダラと出てきます。自然のパワーを体感します。効能に関しては未知のこともあるとか。もっと研究して欲しいものです。いずれにせよ、岩盤浴のあとに飲むビールは最高です。周りの景色もすばらしい。毎年通っています。放射線も原子の力ですね。つまり、私達を育む自然は原子力に満ちていると自然に教わったのですよ。

私は世界の隅々まで旅し、様々な人間関係を見てきました。元祖異種格闘技のモハメド・アリ戦では賛否両論、喧々諤々。リング外でもスポーツ平和党のスキャンダルなどあった。マスコミはね、いいときは調子いいのですが、一たん敵にすると怖い。リングの敵は倒せますが、マスコミは無理です。うまくつきあって行くしかない。でもそれだけ注目してくれているということです。原子力も私に似ていませんか。原子力は私たちの生活を確実に支えている。しかし、なにかあると原子力に携わっている人々や業界は、新聞やテレビでコテンパンに叩かれていますね。弱気になっている？ そんな暇はないでしょう。“闘魂原子力”じゃないですかと言いたいですね。打たれ強くならなきゃあ。でもね、笑顔と優しさは忘れちゃいけない。

私はプロレスでも事業でも人一倍の工夫と努力をしてきました。少々ガタのきた身体にむち打ち、いまもイノキ・ゲノム・フェデレーション(IGF)で若いレスラーの育成に努めています。夢はつきないのです。

原子力学会の皆さんも、若手をどんどん育てて、未知のことに自由な発想で挑戦して研究を重ね、原子力の平和利用で世界を先導して行ってほしいものです。さあ準備いいですかあ？ いきますよー。

1！2！3！ダーッ！

(2008年 8月31日 記)



いよいよ始動の J-PARC

国際施設の新たな課題に向かって



永宮 正治(ながみや・しょうじ)

J-PARC センター長

東大理学部卒，阪大理学研究科博士課程修了。東大理学部助手，カリフォルニア大学研究員，東大理学部助教授，コロンビア大学教授，東大原子核研究所教授，高エネルギー加速器研究機構教授を経て，平成18年現職に。

平成13年度に建設着手した J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex の略) は，建設 8 年の歳月を経て，今年12月にいよいよ供用を開始する。加速器施設は，建設するのが目的ではなく，それを使って立派な「成果」を生み出すのが使命である。これからが施設の本番ともいえる

加速器からの性能向上や実験室の整備が着々と進む一方，施設運用に際して整えておくべき多くの課題が怒濤のように押し寄せてきた。特に国際化と産業界への施設開放は，今後の J-PARC の 2 つの大きな課題だと思う。この「時論」では，国際化について述べたい。

国際公共財としての J-PARC

昔の話になるが，本計画の予算措置が認可される前，原子力委員会と学術審議会の下に「事前評価部会」が設置され，9ヶ月あまりにわたるレビューが行われた。1,500億円も投資する価値がある施設なのかについて，慎重な評価がなされたのである。大型計画として，このようなレビューを受けた最初の例ともなった。

レビューの途中で，委員の佐和隆光氏が「このような施設は国際公共財として位置づけるべきではなかるうか」という発言をされた。私は，評価を受ける側ではあったが，至極もっとものご発言だと思った。評価部会もこの発言を重視し，J-PARC を国際公共財と位置づけた。

評価部会の最後の日には私一人が呼ばれ，計画に対する「抱負」を述べるように言われた。そこで，なぜ J-PARC が必要なのかを述べたあと，私の「夢」を述べた。

自然科学はヨーロッパで誕生した。戦前，米国の研究者はその流れを米国に引き寄せようと大変な努力を払った。もうお亡くなりになったが，I. I. Rabi という先生がその中心的役割を果たされ，このような努力の話がうかがったことがある。そして，ついに戦後は米国が自然科学の中心になったのである。米国内部でも，はじめは東部海岸で，そして，その後西部海岸へと科学の流れは移っていった。

この西へ西へと流れていった科学の潮流を，その一部でもよいから，21世紀にはさらに西の日本に持っていかないだろうか？いや，持っていきたいし持っていきべきであるというのが，私の大きな夢であった。私だけの夢に留まらず，これは外国からの強い期待でもあった。日本が経済大国として成長した頃，世界は日本が世界の経済的リーダーとしての責任を果たすことを期待した。科学の世界においても，これまでは「おんぶにだっこ」の日本の科学界であったが，世界の中でリーダーとしての日本は責任を果たすべきである。米国に長く滞在していた私には，このような要請と期待感が外国人の中で漂っていたことを，肌で感じていた。

「J-PARC が出来れば，世界的に一流の加速器施設になる。それを国際施設にし，世界の人がここに集まって研究を展開する国際センターにしたい。」「世界の科学の進展の歴史を見ると，科学はまんべんなく進展するのではなく，ある限られた場所である限られた時代に大きく伸びる。J-PARC 施設をそういった場所に，そして，そういった時代を築き上げる施設にしたい。」「可能なら，J-PARC に来ることが科学者の履歴の中でキャリアパスの場所となるようにまで高めたい。」

こんな夢を，平成12年の評価部会で述べた。米国から帰国後数年経った頃の，私の心の叫びでもあった。

国際的施設としての J-PARC

8年前に述べたこの「夢」は今でも私の中で生き続けている。しかし，状況的に異なっている点は，8年前は J-PARC の建設前の「夢」であったが，今は運転を間近に控えた「現実問題」となった点である。

J-PARC 3 GeV シンクロトロン加速器は，ごく最近，定常的に200 kW の出力を出すことに成功した。ビーム加速に成功してから1年も経たないうちにこのような強度を達成したのは驚異的でもある。身内を褒めるわけではないが，J-PARC 加速器グループの献身的とも思える貢献には頭が下がる思いである。これまで，日本国内で

は3 kWの出力が精一杯であった。これに比べて70倍の強度である。一躍世界の頂点にも立った。

さらに、今年9月末にはミュオンビーム施設が完成し、来年には、世界で唯一のK中間子ビームが50 GeVシンクロトロンにおいて得られる。また、来年4月には、ニュートリノビームがJ-PARCにおいて生成され、300 km離れた神岡において測定される。

こういった状況の中、外国人研究者がJ-PARCにおいて実験をしたいと次々と現れてきた。その数は、すでに400名以上に達している。

私たちは、計画の始まる以前から外国人10名以上を含む国際諮問委員会を作り、毎年1回の諮問を受けてきた。また、この国際諮問委員会の下に多くの国際的委員会が作られ、加速器の技術面、中性子源のデザイン、ミュオンの進め方、等々の審議も行われた。J-PARCに関する英語での意見書は、30にも40にも及んでいる。また、J-PARC内部では国際化委員会を作った。英語で対応できるユーザーズオフィスを新設し、外国人受入れ体制を整えつつある。さらに、地元の東海村にも、多くの面でご協力をお願いしている。

しかしながら、外国人研究者の受入れ体制は、残念ながら、ほとんど整っていないのが実情である。東海村は、日本の原子力分野では有名な町である。しかし、外国人を受け入れる宿がごくごく限られていることはご存知だろうか？フロントで英語の通じる宿がまずない。JAEA職員用の宿はあるが、部屋数が限られている。私も、最近、宿のご主人と会って交渉をしたり村とも交渉したりしているが、なかなか進展はしない。文部科学省もユーザーズの宿舎への予算措置には消極的である。

しかし、このような宿の問題よりもさらに遅れていることがある。研究機関としての受入れ体制の整備である。J-PARCには、外国から資金を持ってきてでも実験を進めたいという利用者やグループが少なからず存在する。そういったグループは外国で実験装置を作り、J-PARCに持ち込むのである。さらに、その装置の運搬や据え付けも外国の機関の責任で費用負担してもよいというグループが存在する。しかしながら、このようなグループに対応できるJ-PARC側の体制が全く整備されていない。たとえば、外国政府のお金を使うときに、受入れ側の機関で責任を持ってその資金を受け入れ運用することが必要とされる。国際的感覚で資金運用に責任を持つ体制が整っておらず、最近になってやっとこの整備を始めた段階である。装置の据え付けには多くの技術的サポートが必要とされる。外国機関はお金を払ってでもよいからきちっと据え付けぐらいいはしてほしいと依頼するが、肝心の受入れ側ではそれに対応できる技術者を配

置できない。また、大きな実験装置を海外の研究機関から送っても、それを責任持って受け入れたり、税関等の問題を解決する「受入れ事務部門」も整っていない。外国の研究者が日本の研究機関で働く際の身分保障や安全保障に関しても、十分な措置がなされていない。オフィススペースもすぐにはもらえない。このように、国際協力実験をするための最低条件が日本の研究機関には整っていない。

J-PARCを世界の人を使いやすい施設にするためには、今後、国際機関としての組織整備に全力投球をしないとイケない。遅まきながら、必死の努力を始めたところである。これまでは加速器や実験室の整備に夢中になっていた。そのあまり、完成に近づいた今になって、このような運営期の重要な課題をおろそかにしてきたことに、ハッと気がついた次第である。J-PARCを国際公共財とするための問題は山積している。ずっと抱いていた「夢」の実現に、今こそ再奮起しなければと自戒する今日この頃である。

アジア・オセアニアの研究センターに

J-PARCを世界的拠点にすると同時に、この施設をアジア・オセアニアの研究センターとすることも重要だと思う。この方向の努力もやっと始まった。中性子分野では、アジア・オセアニア中性子学会(AONSA)が最近結成され、韓国のMahn-Won Kim氏が会長に就任した。原子核物理では、OECD Global Science Forumでアジア地区の連携が議論になり、IUPAP(International Union for Pure and Applied Physics)のWorking Groupが中心になって10月初頭にアジア地区の連携の議論が始まる。また、10月中旬には、北京でJ-PARCサイエンスに関するシンポジウムがアジア地区参加者を集めて大々的に開催される。これらの活動を機縁に、J-PARCをアジア・オセアニア地区の研究センターに近づける努力をしたい。

国際化とともに重要な産業界への解放

J-PARCは、科学者に施設を解放するだけでなく、特に中性子ビームの応用性の高さに着目すると、産業界への解放が重要となる。冒頭に述べたように、私は「国際化」と「産業界への解放」をJ-PARCの今後の二大課題と考えている。今回、後者には触れることができなかったが、どちらの課題にも共通していることは、その準備がおろそかになっていたことである。J-PARC施設が次々と完成していくことに喜んでばかりはいられない。これから、この二大課題に真剣に取り組みたい。

(2008年 9月30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。

来年度概算要求, 今年度比 6 % 増の 4,914 億円—FBR など 技術開発重点に

文部科学省, 経済産業省など各省庁は, 8 月末までに 09 年度の概算要求をまとめた。これをもとに原子力委員会は 9 月 2 日, 原子力関係の 09 年度概算要求を発表, 総額は 08 年度予算比 6 % 増の 4,914 億円となった。文部科学省が同 5.3% 増の 2,753 億円, 経済産業省が同 7 % 増の 2,048 億円, その他省庁が同 5.3% 増の 113 億円。FBR サイクルや次世代軽水炉の技術開発, ITER 計画などに意欲的に取り組み, 国際協力, 人材育成, 耐震安全性なども一層拡充する。

原子力委員会のまとめによると, 総額 4,914 億円のうち, 一般会計が同 11% 増の 1,381 億円, エネルギー対策特別会計が同 4 % 増の 3,533 億円。同会計では, 電源立地対策が同 5 % 増の 2,055 億円, 電源利用対策が同 4 % 増の 1,478 億円となっている。



文科省は 8 月 28 日に発表した概算要求で, 原子力に関し, 「重要課題が目白押し」とした。高速増殖炉サイクル技術の同 28% 増の 372 億円, ITER 計画等推進の同 19% 増の 123 億円, 大強度陽子加速器(J-PARC)の同 8 % 増の 206 億円など。原子力人材育成プログラムは同 18% 増の 2.6 億円, 研究施設等の放射性廃棄物処分に向けた積立等は同 65% 増の 72 億円を要求した。

独立行政法人に必要な経費の要求額では, 日本原子力研究開発機構が 08 年度比 8 % 増の 2,011 億円, 放射線医学総合研究所が同 5 % 減の 118 億円などとなっている。

予算区分上, 原子力関係に含めないが, 11 年度からの共用開始を目指す X 線自由電子レーザー開発

利用」は, 同 23% 増の 135 億円, 地震・防災分野では, 「活断層調査の総合的推進」に同 70% 増の 8 億円を要求, 沿岸海域の長大な活断層を中心とした地質調査の新規実施を見込んでいる。



経産省は 8 月 27 日に発表した概算要求の重点政策の第一に, 低炭素社会の実現を掲げた。エネルギーの供給と需要の構造革新を推進, 供給側は新工ネ加速と原子力拡大を柱とする。

原子力関係の主要施策は, 次世代軽水炉や FBR など先進的原子力発電技術開発が同 42% 増の 91 億円, フル MOX 炉や新型遠心機など軽水炉核燃料サイクル技術開発が同 40% 増の 67 億円, 海外ウラン探鉱支援事業が同 25% 増の 15 億円などで, 世界的な原子力発電導入の拡大に対応した国際貢献は同 17% 増の 14 億円を要求した。

放射性廃棄物対策は同 5 % 減の 55 億円, 原子力発電施設等と地域との共生の実現(各種交付金・補助金)は同 7 % 増の 1,380 億円を計上している。

保安院は同 3 % 増の 339 億円で, 耐震安全性対策の強化が同 3 % 増の 35 億円, 高経年化対策の充実が同 18% 増の 26 億円, 安全研究の技術的基盤の確保に同額の 18 億円など。



このほか, 外務省が IAEA 分担金および拠出金の同 4 % 増の 89 億円など合計同 5 % 増の 91 億円, 内閣府が同 5 % 増の 21 億円, 原子力災害対策充実を大幅に増額する総務省が同 36% 増の 1,700 万円などとなっている。

(資料提供: 日本原子力産業協会)

柏崎商工会がアンケート，地域の復興期待では柏崎刈羽発電所の運転再開がトップ

昨年7月の中越沖地震で，所属会員企業も大きな被害を受けた柏崎商工会議所は，地震発生後1年を経過して，会員企業や事業所に復旧状況や今後の復興課題などについて聞いたアンケート調査結果を公表した。調査は会員・事業所約2,000社を対象に7月中に調査票の郵送，ファックスでの回収を行った。回収率は27%だった。

地域の復興課題については，①「原子力発電所の

営業再開」がトップで51.6%，次いで②「行政の震災復興支援制度充実」が48.0%と期待を集め，順次，③「ライフライン，インフラの震災対策」26.6%，④「商店街の復旧」21.6%，⑤「風評被害対策」19.2%，⑥「企業誘致」15.9%，⑦「観光振興」14.3%，⑧「マスコミの取材攻勢」12.6%，⑨「行政の復興プラン実現」12.5%，⑩「企業の地域や環境への関わり」8.1%——などとなっている。(同)

米国向け投資金融具体化へ，関係政令を閣議決定

今年8月の先進国原子力発電事業向け投資金融に関する政令の閣議決定，10月の日本政策金融公庫の発足などにより，米国の原子力発電新設における日本の投資金融協力が本格的に動き出そうとしている。米国では今後10年間で30基の新設が計画されており，この中で日本政策金融公庫による投資金融が，どの程度のプロジェクトで実現するか，関心が高まっている。

資源エネルギー庁の原子力政策課は9月2日の原子力委員会・定例会議に，日本政策金融公庫による原子力分野の先進国向け投資金融について説明した。

日本政策金融公庫は，今年10月1日に現在の国際協力銀行(JBIC)，国民生活金融公庫，農林漁業金融公庫，中小企業金融公庫などを統合し，新たに設立される政府全額出資の株式会社。

今回の政府系金融機関の組織改正を機に，輸出金融は外国法人向けマッチング融資の場合を除いて先進国向けは廃止，投資金融も重要な資源の開発や取得を除き，先進国向けは原則廃止となる。ただし，我が国の産業の国際競争力の維持や向上に関する国の施策の推進のために特に必要があるときは，政令で定めた上で投資金融の実施を可能としている。この原子力発電事業向け投資金融に関する政令が，8月26日に閣議決定され，制度上，すでに米国での新設における投資金融が可能となっている。

投資金融は，プロジェクトに日本企業が出資する

ことを条件に，そのプロジェクトに融資や債務保証を行う。米国政府は原子力発電所の建設支援策として，個々のプロジェクトに融資保証を実施する方針だが，予算枠は2年間で約2兆円と制限があるため，実際に多くのプラントを供給すると予想される日本の公的金融機関の協力を期待してきた。

昨年4月に署名した「日米原子力エネルギー共同行動計画」に，原子力発電所の新規建設を支援するための政策協調を提起。今年5月に開催した同行動計画に基づく日米原子力エネルギー運営委員会の第2回会合で，日本貿易保険とJBICが連携して，米国政府の融資保証をサポートすることで合意。さらに，同6月に青森で開催されたG8エネルギー大臣会合の際に，甘利明・経産相(当時)とボドマン米国エネルギー省(DOE)長官が会談，日米協力の一環としてJBICの融資を検討するとの共同声明を出した。

米国政府の融資保証を受けるための申請の第1回締切りは，9月26日となっている。

日本政策金融公庫が米国電力会社や日本企業が出資する原子力発電所の建設・運転などを行う共同企業体に融資するかどうかの判断や融資額は，同公庫が個々の案件ごとに貸し倒れのリスクなど，金融上の判断により決定する。融資は日本からのプラントユニットや資機材調達とリンクしないアンタイトとなる。(同)

経産省、3年計画でガラス固化の新技术開発へ —原燃主体にオールジャパン体制で

経済産業省は日本原燃・六ヶ所再処理施設のガラス溶融炉の更新に備え、来年度から新しいガラス溶融炉やガラス素材の開発を推進する計画をまとめた。日本原燃を開発主体とし、開発費として3年間で総額140億円を計上、国は使用済燃料再処理事業高度化補助金として、この内の半分の70億円を負担する。来年度は20億円を概算要求した。現行の直接通電加熱方式を踏襲し、安定稼動のための様々な技術を開発する計画だが、「外部加熱方式を切り捨てているわけではない」としている。

開発計画は、9月16日に開いた総合資源エネルギー調査会原子力部会の核燃料サイクル技術検討小委員会(委員長=田中知・東大院教授)で原子力立地・核燃料サイクル産業課が説明した。

開発テーマは、(1)新型ガラス、(2)新型ガラス溶融炉の構成技術、(3)炉底技術、(4)新型ガラス溶融炉、(5)ガラス溶融炉解析コード——など。新型ガラスは、高レベル廃液が溶融しやすいガラス素材や白金族元素を含む同廃液をより多く取り込むことができるタイプを開発。構成技術では、炉底に堆積した白金族元素を攪拌する装置、廃液とガラスの混合性を高めるバブリング装置、正確なガラス密度や液位を測定する計測装置など。炉底技術では、白金族元素の抽出し性能の向上、同元素堆積に影響されない加熱装置、交換可能なストレーナなどを開発する。

新型溶融炉の開発ではこれらの技術を反映させ、

実規模の装置を製作し、確証試験まで実施する方針。また、解析コード開発により、新型溶融炉の炉内挙動を正確に模擬できる技術の確立を目指している。

国は事業実施にあたり、日本原燃への補助率1/2で補助し、09年度は20億円、10年度と11年度は25億円を負担する計画。

小委員会では各委員とも同計画に賛同したが、海外の溶融炉で実績がある外部加熱方式を検討する計画の確認などとともに、現在問題となっている溶融炉からガラスを流下させるノズル機構についても技術開発が必要との意見も出された。経産省は、新型ガラスの開発ではガラス工業に携わる技術者や学識経験者などの参加も要請、オールジャパン体制で推進したいとした。

六ヶ所再処理施設のガラス溶融方式は、日本原子力研究開発機構が開発したガラスに直接電流を流して加熱する直接通電方式。運転効率が高く、溶融炉の寿命も5年程度と、外部高周波過熱方式に比べ10倍近く長いなどの特徴を有する。

現段階で、次期溶融炉も直接通電方式をベースに考えており、3年間で開発を進め、現在の溶融炉の更新時期となる2012年頃に導入する計画。新型ガラスの利用により、処分時の安全裕度の一層の向上やガラス固化体の製造本数の削減などを進めることも可能としている。(同)

富岡町議会が福島プルサーマル計画凍結を解除

福島県の富岡町議会は9月16日、東京電力の福島第一原子力発電所3号機のプルサーマル計画の凍結を求めた6年前の意見書を白紙にする決議を賛成13、反対1で可決した。今後、双葉町・大熊町・楡葉町を含む立地4町や県で、同計画の議論が再び活発化する見通し。

富岡町の原子力発電所に関する特別委員会は今月9日の会合で、事業者や国の安全確保への取組みが進んでおり、立地4町がオープンにプルサーマルを議論することが必要な時期になっているとして、凍

結を白紙に戻すことを賛成多数で可決していた。16日の町議会では、こうした同委員会の審議の経緯が報告され、町議会としても凍結を白紙にする決議を可決した。

福島第一・第二原子力発電所が立地する4町の内で、議会が凍結を決議していたのは富岡町だけ。このため今回の凍結解除により、4町の町長と議長で構成する原子力発電所所在町協議会などでプルサーマル計画に関する議論が活発化することが予想される。すでに3町は議論再開の姿勢を示している。

県や立地町は、1998年に同計画を事前了解したが、2002年の東京電力のトラブル隠蔽を受け、県や富岡町が凍結を決議。計画はその後6年間、凍結状態が続いている。

電力各社のプルサーマル計画は、九州電力の玄海3号機以降、着実に進んでいるが、福島の進展はこうした動きを大きく推進することになる。(同)

機械学会が柏崎刈羽運転チームを表彰、地震時の適切な対応を評価

日本機械学会・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、昨夏の中越沖地震発生時、東京電力柏崎刈羽原子力発電所で安全確保、プラント点検など、現場サイドでの確な対応に当たった発電所運転チームらに同部門「貢献表彰」を贈賞する。10月24日に横浜で開かれるエネルギーシステム部門年次セミナーで、表彰式が行われる予定。

地震発生時、柏崎刈羽発電所では、全運転当直班の相互連携により、運転中プラントの冷温停止を完遂し、以降も、機器の健全性確認を地道に進めるなど、これまでの事故・トラブルの教訓を活かした日

頃のプラント保全、研修訓練などの成果が発揮されたとして、IAEAはじめ、国内外で高く評価された。

機械学会・動力エネルギーシステム部門では毎年、動力エネルギー技術の発展に貢献のあった個人・団体への「貢献表彰」を行っている。今回、贈賞されるのは、地震発生時に運転・起動中にあった柏崎刈羽2,3,4,7号機の運転当直・点検チーム代表4名。

同部門の中越沖地震柏崎刈羽発電所影響評価研究分科会では、6月に取りまとめた調査報告書の中で、運転員の適切な対応を、原子力の安全向上のみならず、他の産業分野にも今後の有益な事例となる「グッドプラクティス」として評価している。(同)

J-PARC で最初のミュオンビームの発生に成功

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(高エネ機構)の共同運営組織であるJ-PARC センターの大強度陽子加速器施設(J-PARC:建設中)では、平成20年9月26日12時10分、光速近くまで加速した陽子ビームを黒鉛(炭素)製の標的に入射して中間子を造り出すことにより、ミュオンのビームを発生させることに成功した。

J-PARCの物質・生命科学実験施設(MLF)では、標的の表面で発生したミュオンは、ビームラインと呼ばれる実験装置を通して、種々の実験を行うための実験エリアへと輸送される。今回ミュオンの輸送に成功したのは「崩壊ミュオンビームライン」と称されるラインであり、超伝導ソレノイドを用いて、様々なエネルギーのミュオンを発生源から実験エリアまで輸送する。

電荷をもち、磁氣的性質を敏感にとらえる素粒子であるミュオンは、物質のナノスケールでの磁気構造や機能の解明に利用されるほか、物質中に含まれる水素の状態や働きを解明するための有力な手段でもある。本格的に稼働した際には、高い強度をもつミュオンビームを発生することが可能となるため、

物性物理学や原子分子物理学、素粒子物理学、原子核物理学等における基礎的研究の推進のみならず、磁性材料や燃料電池の開発研究等、様々な分野で産業発展につながる物質・生命科学研究での利用展開が予定されている。

(<http://www.jaea.go.jp/02/press2008/p08092601/index.html> 参照)

(資料提供：高エネルギー加速器研究機構)



喜びに沸く関係者一同

草津温泉から希少金属の回収に成功—放射線グラフト重合で開発した金属捕集布でスカンジウム回収を実証

原子力機構と日本カーリット㈱、㈱アンザイ、㈱群馬分析センター、財群馬県産業支援機構は、「温泉水中のスカンジウム捕集に関する研究^{*1)}」で開発した金属捕集布を用いて草津温泉の温泉水に含まれる高価な希少金属であるスカンジウムを、選択的かつ効率的に回収することに成功した。

強い酸性の草津温泉の温泉水1トン(1m³)中には、希少金属であるスカンジウムが約17mg 溶け込んでいる。この資源を有効利用するために、スカンジウムのみを分離・捕集でき、高温かつ強酸の温泉水に耐える高性能の金属捕集布が必要であった。

本研究開発事業では、酸やアルカリに強いポリエチレン不織布基材に、「放射線グラフト重合技術^{*2)}」でスカンジウムと親和性の高いリン酸基を導入した金属捕集布を製作し、草津温泉の温泉水が流れ込む湯川に、流量の千分の1の温泉水が処理できる装置を草津町の協力を得て設置し、金属捕集布の性能評価を行った。

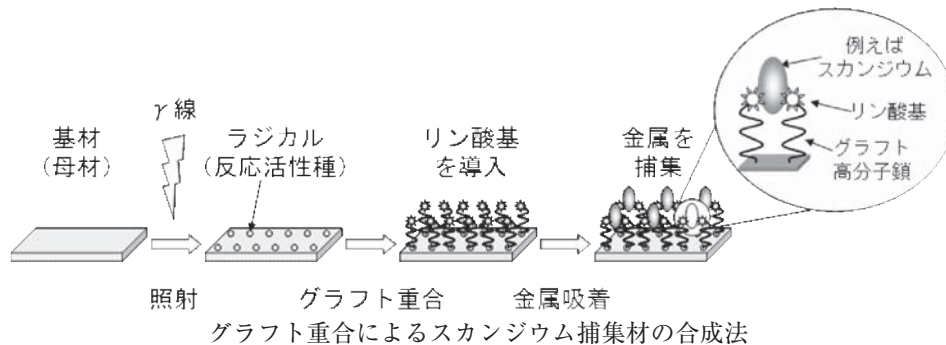
その結果、温泉水から連続的に95%以上の回収率でスカンジウム捕集が可能であることを実証した。この装置を1,000倍にスケールアップすることにより、約200kg/年のスカンジウムが捕集可能となる。この技術は金属捕集布の化学構造を変えることにより、日本では採れない鉱物資源の回収技術として大きく期待される。

*1)平成18, 19年度の経済産業省、地域新生コンソーシアム研究開発事業

*2)ポリエチレンなどのプラスチック素材に放射線を照射した後、試薬と反応させて、接ぎ木のように分子の枝を導入し、プラスチックの特性を改良することができる日本原子力研究開発機構が開発した技術。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press2008/p08100703/index.html>)

(資料提供：日本原子力研究開発機構)



家庭用燃料電池に最適な高耐久性電解質膜の開発に成功—「放射線グラフト重合」技術を用いて課題を解決

原子力機構は、放射線グラフト重合技術を用いて、世界に先駆け高温でも高い導電性と強度を併せ持つ高分子電解質膜の開発に成功した。

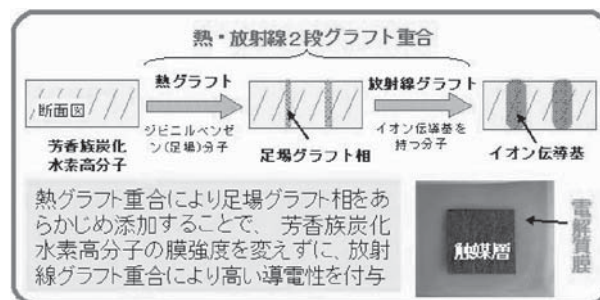
電解質に高分子薄膜を使用した固体高分子型燃料電池は、小型・軽量化が可能であることなどから、家庭用燃料電池の本格普及に向けて精力的に研究開発が進められている。しかし、従来の高分子電解質

膜は、導電性に優れるものの高温・低湿度環境では非常に脆弱であるという問題があった。今回、原子力機構が独自に開発した熱・放射線2段グラフト重合技術(熱グラフト重合と放射線グラフト重合を組み合わせた技術)を、耐熱性や強度の優れた芳香族炭化水素高分子に適用することで、高温で高い導電性と耐久性を併せ持つ電解質膜を製作することに成功

した。

この電解質膜は、従来の製品と比較して導電性で1.5倍、強度で2.3倍となっており、燃料電池セルに組み込んでの発電試験の結果、家庭用燃料電池に求められる作動条件(80℃)で、4万時間以上に相当する安定運転を達成した。また、この電解質膜は、低湿度条件でもほとんど劣化しないことから、昨今の環境問題から早期実用化が待たれる燃料電池車にも対応が可能である。

今後、産業界とも連携し、さらに厳しい条件下においても使用可能な高分子電解質膜の開発、量産化技術の確立など、実用化に向けた研究開発を推進し



ていく。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press2008/p08091901/index.html>) (同)

ATOMCON 2008参加原産協会代表団報告書を刊行

日本原子力産業協会は、今年6月下旬から7月上旬にかけ、ロシア・モスクワ市で開催された第1回国際会議・展示会「ATOMCON2008」への参加と原子力関連機器製造施設や原子力関係機関への訪問を目的とした代表団(団長：服部原産協会理事長)を派遣したが、このほど、同代表団の報告書を刊行した。

報告書では、「ATOMCON2008」および、高速炉用関連機器のポドルスク製造工場、ロシア型加圧水型軽水炉(VVER)やフロード型原子炉(出力7万

kW)の製造工場イジョーラ工場、タービンや発電機を製造するパワー・マシズ社、燃料製造のトヴェル社など、訪問先での工場見学、企業幹部との意見交換などの内容を報告している。一部資料は日本語に訳して掲載されている。

頒布価格は、当協会会員8千円、非会員1万円。お問い合わせは、原産協会・国際部(TEL03-6812-7109)まで。

(資料提供：日本原子力産業協会)

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。

8～10月の番組(予定も含む)は以下の通り。

- ・ IAEA 通常総会レポート(10/17公開)

- ・ 「第4回 WNU 世界原子力大学一夏季セミナーレポート」(9/16公開)
- ・ 特集「変貌するロシアの原子力産業—服部理事長のロシア見聞録」(8/14公開)

(同)

海外情報

(情報提供：日本原子力産業協会)

[国際]

NSG、対印協力を承認

日本を含む45か国で原子力関連資機材の輸出管理に取り組んでいる原子力供給国グループ(NSG)は9月4～6日、ウィーンで開催した臨時総会で、イ

ンドの核実験モラトリアムの継続等を条件に、核不拡散防止条約(NPT)未加盟で核保有国となったインドを例外扱いとし、同国に対する原子炉や核燃料の輸出規制を解除するという米国の提案をコンセンサス(全会一致)で承認した。これにより、米印原子力協力協定発効に向けて残ったハードルは米国議会による承認のみとなったが、同協定の締結を推し進めてきたプッシュ現政権の任期切れが来年1月に迫っていることから、年内承認の見通しは未だ不透

明な状況だ。日本政府高官はそろって、難しい判断だったことを認めている。

インドを例外扱いするための声明文では、インドがこれまで取ってきた行動として、(1)核実験の自主的モラトリアム継続、(2)核兵器用核分裂性物質生産禁止条約締結に向けて他国と協力していく姿勢、(3)民生用原子力施設を段階的にIAEA 保障措置対象に追加申告する合意、(4)濃縮および再処理技術を有していない国に対するこれら技術の移転を控えるとともに、これらの拡散を制限する国際的な努力の支持——などを高く評価している。

同声明文では、インドが今後、核実験などを行った場合の措置として明確な条件は盛り込んでいないものの、「1か国あるいはそれ以上の参加国が協議を必要とする事態が発生した場合は、参加国政府は会合を開き、NSG ガイドラインのパラグラフ16(協議および行動)に従って行動する」との文言が盛り込まれた。

1974年にインドの第1回目の核実験を契機に設立されたNSGは30数年を経て、インドへの禁輸解除に踏み切る判断を下した。

藪中三十二・外務事務次官は9月8日、「難しい判断を全体として行わざるを得なかった」と述べた。

[米国]

レタスとホウレン草 食品照射認可 米 FDA 食中毒防止で対応急ぐ

米国の食品医薬品局(FDA)は8月21日、生の玉レタスとホウレン草への放射線照射を認可すると発表した。審査の結果、放射線照射が両品目の安全性に悪影響を及ぼすことはないとは断定し、病原菌の制御と保存期間の延長を目的とした最大4キログレイまでの電離放射線照射が可能になるよう食品添加物規制を改定する最終規則を提案したものの。FDAは9月22日までの30日間に限り一般からのコメントを受け付けているが、同規則は8月22日付けで直ちに発効している。

今回の規則改定は2000年に国家食品加工業者協会(現在の食料品製造業者協会)が食品照射連合に代わって提出した請願の一部に応えた形。当初の請願品目は加工前の食肉や生鮮野菜など多岐にわたって

いたが、米国では06年9月、生ホウレン草に付着していた病原性大腸菌により205名が食中毒を発症、3名が死亡するという事件が発生しており、同協会では昨年12月に急遽、請願品目をレタスとホウレン草に絞って申請し直したという経緯がある。今回、これら2品目に対する放射線照射が可能となったが、残りの請願品目については現在もFDAによる審査が続けられている。

なお、米国では今年5月以降、3種類の生トマトが原因と見られるサルモネラ菌中毒患者が36州およびワシントンDCで800名以上発生しており、過去最悪の食中毒事件に発展するとの懸念が広がっている。大手ファーストフード・チェーンでも予防措置として生トマトの提供を一時的に自粛しており、FDAでは生鮮野菜全般に対する病原菌抑制目的の放射線照射認可を急いでいる。

DOE と NRC, 次世代炉の認可戦略を作成

米エネルギー省(DOE)と米原子力規制委員会(NRC)はこのほど、次世代型原子炉(NGNP)設計に2017年までに認可を与え、2021年までに操業を開始させるために、必要なアプローチや分析ツール、研究開発活動、および財源の見積もりなどを記述した許認可ロードマップを作成し、議会に配布した。

NGNP計画はDOEによる第4世代原子炉プログラムの一部で、原子力利用の新たな概念に着目したものの。「次世代原子炉の許認可戦略」と題されるこの計画書では特に、水素やプロセス熱の生産が可能な高温ガス炉(VHTR)に焦点を当て、高温を産業利用する可能性に言及している。

具体的な内容はDOEとNRC、そして潜在的なプラントメーカーがこのVHTR設計に認可を取得させ、2017年までに運転開始させるためにどのように協力していくかを議員達に説明するものとなっている。特に、NGNPのための最良の認可戦略とは、軽水炉で適用されているような一括方式の認可システムを活用することだと指摘。軽水炉用の分析ツールをNGNP用のモデルやデータに適宜修正することが可能な一方、既存のリスク情報活用型・性能ベースの認可要求項目をNGNP特有の要求項目創設のために適用することもできるとしている。

NRCの試算では、分析ツールやデータの構築には2018年までの期間に5年で1億2,800万～1億4,900万ドルかかる見通し。今年から準備を始めても勧告した戦略が認可申請に適用されるのは13年になるとの見方を示している。

DOEはすでに今年4月、進行中の概念設計活動を完了させ、NGNPの性能や安全性、機能上の要件、および建設・操業に関するコストと日程を詳細決定するため、一般および産業界から意見を募集。NGNP計画の展開で産業界と協働していくための最終戦略策定に活用する。最終戦略はこの秋にも取りまとめ、21年までにNGNP原型炉を設計・建設したいとしている。

モンティセロ原発で停止中に感電死亡事故

米ミネソタ州でモンティセロ原子力発電所(BWR, 61.3万kW)を操業するエクセル・エナジー社は9月17日、同発電所の機器レンタル会社所属の職員1名が発電所ゲート外で作業中、機器が高圧線に触れたため死亡したと発表した。

同発電所では事故の約1週間前に変電所の遮断機が下り、電源から切り離された状態になったため原子炉は運転を停止し検査に入っていた。職員は遮断機が切れた原因を探るために吊り上げ装置を操作していたという。

米原子力規制委員会(NRC)では、同事故が発電所の安全性を損なう可能性はあったものの、公衆の安全を脅かす性質のものではなかったとして、段階の緊急時区分システムの中でも最も低いランクに評定したことを明らかにしている。

[フランス]

アレバ、廃液漏洩で補償の方針

仏アレバ・グループは8月27日、トリカスタンにある同グループ子会社で7月に発生した放射性廃液漏洩事象に対し、環境改善や住民の健康調査など総計2,000万ユーロの補償対策をとる方針であると発表した。

この事象は7月7日から8日にかけて、ウラン処理企業であるSOCATRI社のウラン貯蔵タンクが

ら74kgの天然ウランを含有する廃液が地元の河川に流出したというもの。モニタリング計画に則った計測活動の結果、河川水の放射能濃度がほどなく通常レベルに戻ったことから、フランス原子力安全局(ASN)では同事象を国際原子力事象評価尺度(INES)でレベル1と判定した。

しかしながら、アレバとしては同事象が引き起こした住民感情や疑問に対する配慮、および透明性のある誠実な政策というポリシーの下、同事象の全面的な調査に乗り出すとともに、同社施設の安全性について徹底的に審査することになったとしている。

また、地元住民らとは直ちに話し合いの場を持ち、環境分析や調査の進展状況についての情報を定期的に連絡するための役員などを選出した。7月末には、被害を受けた住民が適切な補償を得られるよう、地元ヴォークリューズ県の複数の町民ホールに苦情登録簿を設けることを決定。すでに個人や事業体から130件近い申請があり、8月12日付で第1回目の支払いが行われたことを明らかにしている。

[ドイツ]

E・ON社、スウェーデン子会社を完全子会社化、3原発も買収

ドイツのE・ON社はこのほど、スウェーデン政府が出資するスタットクラフト社と、45億ユーロ相当の株式買収契約を結んだと発表した。

この契約はE・ON社が北欧電力市場における立場の強化を狙って締結したものの。内容は、スタットクラフト社がこれまで保有していたE・ONスウェーデン社(E・ON社のスウェーデン子会社)の株式44.6%をE・ON社が買収することとなり、E・ONスウェーデン社はほぼ100%、E・ON社の所有となった。E・ONスウェーデン社はスウェーデン国内の原子力発電所ーリングハルス、フォルスマルクおよびオスカーシャムーの株式の一部を所有していたため、これらの権利もすべてE・ON社に移ることになる。E・ON社はこのほか、スウェーデンの水力発電所も1基購入していることから、同社の購入総額は約45億ユーロに達している。

一方、スタットクラフト社はE・ON社がスウェーデン国内で所有していた水力発電所やドイツ、英国の発電所などを21億8,000万ユーロで購入した。両

社間の資産変換は今年末までに完了することになっている。

E.ON社は意欲的な欧州戦略に従って、2006～13年までの期間に北欧電力市場に60億ユーロを投資する計画を実行中だ。

[南ア]

PBMR 計画、実証炉建設で契約

南アフリカ共和国のPBMR社は8月22日、ペブルベッド燃料モジュール型高温ガス炉(PBMR)の実証炉建設について、マレー&ロバーツSNC-ラバリン・ニュークリア社(MRSLN)との間で、エンジニアリング、機器調達およびプロジェクト・建設管理(EPCM)契約を締結したと発表した。契約総額は2億5,300万カナダドル。

PBMRプロジェクトは、PBMR社が南ア国営電力のESKOM社やウェスチングハウス社らの出資を受けて進めているもので、2014年までに電気出力16.5万kWの実証炉をケープタウン近郊のクバークに、また、専用の球状燃料工場をプレトリア近郊のペリンダバに建設することが計画されている。

今年6月にプロジェクト全体の規模を決定付けるフェーズⅠの作業が終了し、7月から2014年9月までの予定でフェーズⅡが開始。南ア規制当局から実証炉についての認可を取得し、また環境影響声明書(EIA)の手続きなど、実証炉の完成に向けた具体的な作業を進める段階に入った。

MRSLNは南アの大手エンジニアリング会社であるマレー&ロバーツ社と、カナダのSNL-ラバリン社のJVで、フェーズⅠの業務を担当したのに続き、フェーズⅡでも一部を請け負うことになったもの。日本では三菱重工業が、05年にPBMR社から実証炉・炉内構造物の基本設計と材料調達を受注している。

[中国]

WH社、2サイトで基礎掘削開始

ウェスチングハウス社(WH)はこのほど、同社とその企業連合パートナーであるショー・グループ、および中国の山東核電会社が、中国・山東省の海陽原子力発電所サイトでAP1000を2基建設するため

の基礎掘削を開始したことを明らかにした。

予定より前倒しして始まったこの作業は3か月間を予定しており、原子炉やタービンの建屋を設置する深さ12mの岩盤まで掘削することになる。原子炉ベースマツト部分の広さは縦250m×幅175mとなる予定で、掘削容積の合計は4万8,916m³に及ぶという。

実際の建設工事段階に入れば同社の最先端技術により業界内でも最も短期間で作業を完了できるとしており、1号機の運転開始は2014年となる計画だ。

WH社率いる企業連合は、中国の国家原子力発電技術公司(SNTPC)と連携して中国に合計4基のAP1000を建設することを計画している。世界で初のAP1000となる浙江省三門原子力発電所の2基(各125万kW)は、すでに2月から基礎掘削が始まり、今月2日には予定より67日早く直径40m×深さ12mの岩盤まで掘削し終えたという。正式な着工を意味する最初のコンクリート打設は来年3月を、運転開始は2013年を予定している。

EDF、EPR 建設で中国とJV 設立へ

フランス電力(EDF)は8月10日、中国広東省で計画されている台山(腰古)原子力発電所のEPR建設および操業を円滑に進めるため、中国広東核電集团公司(CGNPC)と「広東台山原子力発電ジョイント・ベンチャー社(TNPC)」を創設することで最終的な合意に達したと発表した。

両者はすでに昨年11月、北京でこの枠組みとなる協定に署名。最終的には中国当局の承認を得る必要があるが、設立されればTNPCは中国で初めての原子力発電投資会社となる予定だ。EDFは中国におけるJV規約の許容限度に従って、新会社株の30%を50年間にわたって保有することになる。

台山計画では昨年末に1号機の準備工事が開始され、最初のコンクリート打設は来年秋に予定されている。1号機の営業運転開始は2013年末に、2号機については15年になる計画だが、これらはEDFがフランスのノルマンディで建設中のフラマンビル3号機(160万kW級EPR)の設計を基準にしていることから、建設工事の最盛期にはEDFの専門家が60名以上、台山に派遣されることになるという。

JVの創設により、両社は互いの技術を補い合い

ながらプロジェクトを進めていくが、EDF 側はさらに、両者が結んだ技術支援契約に従って高度な技術者の育成支援や技術情報の共有により、企業ノウハウを提供していくとしている。

[台湾]

アレバ社、台湾原発に燃料集合体を供給

仏アレバ社はこのほど、台湾で稼動する金山(60万kW級BWR2基)、国聖(100万kW級BWR2基)の両原子力発電所に燃料集合体を納入する契約を台湾電力から受注したと発表した。

契約総額が2億ドル以上というこの契約は昨年6月に招待された入札の結果、締結されたもの。入札時の要件仕様に対して、アレバ社ではアトリウム10Aモデルをベースとした定番の取替用燃料を各ユニットに5体ずつ提案したほか、将来のオプション設計として最新世代のアトリウム10XMモデルを3体ずつ納入する予定だ。

同社はまた、炉心監視システム支援や許認可分析などを提供する。

[韓国]

2030年までに10基を新設するエネルギー計画を策定、原子力のシェア6割に

韓国政府は8月27日、原子力発電と再生可能エネルギーの拡大を骨子とする「第1次国家エネルギー基本計画」を決定し、2030年までに新たな原子炉を10基建設して、原子力による発電量シェアを59%まで引き上げる計画であることを明らかにした。

この計画は同日、青瓦台で開催された第3回国家エネルギー委員会(委員長=李明博大統領)で審議されたもの。20年単位の長期エネルギー戦略が策定されたのは韓国建国以来初めてのこと。

主な特徴としては、韓国のエネルギー関連の様々

な計画についての原則と方向性を提示しているほか、温室効果ガス排出を抑えるグリーン・エネルギー産業の成長をエネルギー部門から後押し。従来は安全供給を中心とする政策と異なり、強力な節減目標を提示して、環境と効率と安全保障といった政策目標を考慮した最適の長期エネルギー供給ミックスを導き出したとしている。

原子力に関する記述ではまず、「過去25年間で消費者物価が186%上昇しているのに対し、電気料金が11.4%の上昇にとどまっているのは原子力発電が安く安全に電力を供給してきたから」と指摘。韓国経済における石油依存とエネルギー輸入負担を緩和し、安価な電気を安全に供給するために大きく貢献してきたと高く評価しており、今後も原油価格の高騰と温室効果ガス削減に対応するために原子力の役割強化は避けられない選択だ、との見解を表明している。

2030年までの計画としては、発電設備全体に占める原子力の設備容量を2007年実績の26%から41%に、発電量のシェアも36%から59%に上昇させるとしており、具体的には140万kW級の原子炉を新たに10基建設するとしている。

これらのための用地は2010年までに確保する計画だが、原子力増設による地域住民の反発と不安を払拭するために、「地域共存型の原子力発電所建設」と名付けた政策の実施を提案。原子力発電所の誘致によって周辺地域が直接優遇措置を受けられるよう支援事業を改善していくことを検討しており、原子力発電所を誘致したいという地域を中心に、地域に見合った発電事業と一体化して政策を推進すると説明している。

また、使用済み燃料の処分問題についても、民主的かつ透明な協議という手順を経て、最終的な解決に向けた準備を進める方針だ。このほか同計画では、原子力を輸出産業に育成するために、次世代型原子炉(APR+)の技術開発を当初計画の2015年から12年に前倒しすることも明らかにしている。

Nuclear News “FUEL 特集”を読んで

はじめに

今回の原子燃料の特集は、ウラン精鉱の市場の概要から原子燃料の信頼性、濃縮、MOX燃料の成型加工工場まで、米国の原子燃料サイクルのフロントエンド部分の現状をわかりやすくまとめている。中でも中心は米国における濃縮事業の現状について詳しく写真も多数含め報告している。

1. ウラン市場の現況と今後の見通し

昨年8月に歴史的な高値のUS\$136にまで上昇したウランのスポット価格が、この5月にはUS\$65まで下がっている。この市場の動きの分析は、Ux Consulting Co. の Jeff Combs 社長によれば、昨年スポットウランの急騰の原因は、ヘッジファンド、ウランの買い手の一般的投機、カナダの Cigar Lake およびオーストラリアの Ranger の水問題(採鉱作業の障害となる)が複雑に絡んでいるとのこと。さらに、原子力発電所の建設に時間がかかり、ウラン需要が急には増えないことを指摘している。今後のウラン需要は原子炉の開発がどの程度早く進むか、そして電力会社がどの時期でウランを調達するかによるとしている。一方、スポットウラン価格についてはUS\$60を大きく下回ることはないとも予想している。また今後、ウラン市場に影響を与える要素としては、米国の高濃縮ウラン契約^{a)}が2013年に終了すること、またインド、ロシア、中国での原子力開発状況、テール(低濃縮ウラン精製時の残余物)をさらに濃縮して製品化する動きとの関係もある。また米国におけるリサイクル計画も影響あるとしながら時間がかかるとしている。

2. 燃料の信頼性の改善向上

原子力発電の操業の信頼性向上に米国原子力産業界が努力をしているが、なかでも EPRI は燃料信頼性データ

ベースを整備し、産業界、電力・成型加工会社と協力し、原子燃料の信頼性の向上に注力している、Institute of Reliability Database (INPO) は2010年までに、米国において燃料破損ゼロを達成する目標を設定した。EPRI や INPO の人員とともに電力の専門家60人以上、燃料メーカーの専門家26人が原子燃料性能改善のガイドライン作りに参加している。この記事ではこれら原子燃料信頼性向上運動を紹介している。

3. アイダホ国立研究所におけるパフォーマンス目標

DOE の Generation IV 開発計画の Next Generation Nuclear Plant (NGNP) 計画の研究の一環として的高温ガス炉の燃料、多層被覆燃料 TRISO (tri-isotopic) 燃料テストで燃料破損なしで9%の燃焼度を達成した INL の研究を紹介。

4. American Centrifuge Project (ACP) の進展

USEC の American Centrifuge Plant (ACP) 計画の進展が継続している。これは35億ドルの予算で進められており、この4月には AC100型遠心機の初期デザインが最終化されており、2008年初めよりリードカスケードを使った試運転が行われており30,000マシン・時以上の運転が行われ、機器の信頼性のために、さらにマシン、カスケードの最適化のためのデータを提供しつつある。本件はボーイングが推進していたが、昨年 USEC は Babcock & Wilcox (B&W) と契約。USEC はボーイングの施設を買収し B&W と契約、施設の名称を American Centrifuge Technology and Manufacturing Center と改名、また多数のボーイングの社員を再雇用した。また炭素繊維の回転胴は Alliant Techsystems Inc. が生産する見込み。USEC は2008年末ころにサービス機器を設置、配管、電気計装を始める予定である。AC100型機 11,500台設置し、380万 SWU (3,800トン SWU) の出力となる。

American Centrifuge のリードカスケードの試験計画が進んでおり、USEC は生産設備の開発をはじめとして、2010年から2012年まで月間数百台の生産を行う。生産工場は、オクラリッジの American Centrifuge Technology and Manufacturing Center である。

5. National Enrichment Facility の状況

ウレンコ社の主導のコンソーシアム (LES 社) の進行

^{a)}1993年に米国政府とロシア政府は、核兵器解体に関する協定を締結し、ロシアの高濃縮ウラン (HEU) 500トン (天然ウラン約15万 tU + 濃縮後作業量約9万 t SWU に相当) を低濃縮ウラン (LWU) に希釈し、20年間かけて米国に供給する契約を締結した。USEC (米国濃縮会社) が米国の独占エージェントとして LEU の濃縮コンポーネントを原子力プラントに売却することとなり、天然ウランコンポーネントの商用化に関しては、Cameco、COGEMA (Areva)、Nukem の西側3社と TENEX (ロシア原子力庁が所管する原子燃料貿易会社) との間で別の契約が結ばれた。

状況についての解説によれば、ライセンスは2006年6月に取得済みとのことである。また、このライセンスは米国で過去30年間に於いて主要な原子力施設に与えられた最初のライセンスになる。全部で6カスケードのうち、最初のカスケードは2009年暮れに運開、最終カスケードは2011年に完成し、需要に応じ総計出力は2013年までに年間300万SWU(3,000トンSWU)となる見込みである。

6. エネルギー省のMOX燃料工場

ロシアとの高濃縮ウラン契約に基づき、34トンのプルトニウムをMOX燃料とするためのMOXプラントをDOEのサバンナリバーで2014年までに完成し、2016年より稼動し、年間3.5トンの酸化プルトニウムを処理する予定である。

7. 新たな枠組みの必要性

IAEAのエルバラダイ事務局長が2008年4月17日、ベルリンにおける[International Conference on Nuclear Fuel Supply: Challenges and Opportunities]で講演を行った。事務局長は、化石燃料の枯渇、価格上昇、環境問題に伴い、発展途上国も含めた多くの国が原子力発電

の開発を検討し始めている。これに対し安全を確保しながら原子燃料を供給し、なおかつ核の不拡散を実現するためには国際的な核燃料サイクルの多国間管理体制が重要であるという従来からの説を力説した。

以上、特集を要約した立場で若干の感想を最後に付け加える。ウラン市況への影響要因が多様であることを再認識した。今後、インド等が市場に買い手として参入してくるので、複雑さは増すだろう。これは投機筋の活発な動きを誘引することにもなるだろう。米国は、ここ10年ほどで施設利用率がすばらしく伸長している。燃料の信頼性向上は、作業員の被ばく線量の低減にも寄与するので、そのような含みもあり、なお一層の改善をしようとしている。比較的新しい試みでは、高温ガス炉への対応がある。燃料の高度化の基礎研究が進んでいるが、ガス炉本体の導入の見通しが気になるところである。その他、濃縮やMOX燃料の製造等に関わる基盤技術がしっかりしているよううかがえる。米印協定が成立し、インドも含め、原子燃料の市況が今後よりいっそう複雑かつドラスティックに動いていく可能性があると感じた。

(日本エネルギー経済研究所 高田誠一、
2008年8月26日記)

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—
(11月7日 第5回編集幹事会)

【学会誌関係】

- ・創立50周年関連記事作成の工程は、順調に進んでいる旨説明があった。部会・連絡会の記念記事については、各組織での自主Peer Review、校閲を済ませた原稿による記事編集を進めている。
- ・50周年記念号の挨拶、祝辞について、国内外の機関の長に依頼中。
- ・執筆者名を匿名にした記事の申し出があったが、記事責任が不明確となるので、認めないこととした。記事掲載

の判断基準の明確化については、引き続き議論することとした。

- ・学会誌の記事を編集委員会所掌記事と会報等機関誌的部分とに明確に分けるため、掲載場所を見直し整理することとした。
- ・広告料金を、賛助会員と賛助会員以外に区別し、2009年4月号から改定予定。

【論文誌関係】

- ・大学や研究所などのサーバーに、所属の教員・研究員が執筆し原子力学会論文誌に掲載された論文の全文を掲載して公開したいという申し出があったが、著作権上、許諾されていないので、許可しないこととした。学会ホームページならびにJ-Stageにて、無料公開していますので、ご利用願います。
- ・和文論文誌の論文執筆用テンプレートを改訂した。ホームページに掲載しましたので、ご利用下さい。

編集委員会連絡先 hensyu@aesj.or.jp

原子炉出力向上に関する技術検討評価の結果について

「原子炉出力向上に関する技術検討評価」特別専門委員会
最終報告

「特別専門委員会」

東京大学 岡本孝司, 東京工業大学 木倉宏成,
大阪大学 山口 彰

「講評寄稿」

京都大学 三島嘉一郎, 東京大学 関村直人

はじめに

原子炉出力向上とは、既存の原子力発電プラントの安全を損なうことなく、原子炉の定格熱出力を上げて発電出力を1～20%程度増加することである。これは、地球温暖化対策およびエネルギー安全保障の観点から、有利な原子力発電の優れた特性を活かし、原子力発電プラントを有効に活用しようとするものである。すでに米国や欧州では30年以上前から合わせて約160件に及ぶ多数の原子炉出力向上が認可、実施され、これらの出力向上によって増加した発電容量は100万kW級発電所約7.6基分に相当する。

仮に、国内すべての既設プラントが5%の出力向上を実施すれば、約250万kW(100万kW級の約2.5基分)の電力を生み出すことができ、これは、二酸化炭素の排出量削減の観点からも無視できない量である。

米国においては、原子力規制委員会(Nuclear Regulatory Commission; NRC)が原子炉出力向上審査の定型化と期間短縮のため、原子炉出力向上を次の3つの型式に分類している。

(1) 測定精度改善型(Measurement Uncertainty Recapture: MU)

原子炉出力はおおむね2%以下の増加であり、原子炉出力の算定に使用される給水流量計の計測不確かさを超音波流量計の採用によって改善することにより、安全解析で考慮される原子炉出力の計測誤差などの程度(原子炉出力計算の不確かさ)を減らすことで対応する。

Technical Study on Nuclear Reactor Safety Assessment for Power Upstres: Koji OKAMOTO, Hirotsige KIKURA, Akira YAMAGUCHI, Kaichiro MISHIMA, Naoto SEKIMURA.

(2008年 8月5日 受理)

(2) ストレッチ型(Stretch: S)

原子炉出力7%までの増加であり、大きな設備改造を伴わずにプラント性能の範囲で実施する。

(3) 設備拡張型(Extended: E)

原子炉出力20%程度までの増加であり、主要機器の改造を実施する。

また、米国では特に一般規制ガイドラインに基づき、原子炉出力向上の際にも確率的リスク評価が行われており、E型出力向上(約20%程度増)プラントのリスク評価の結果では、出力向上前後でのリスク増加量は小さく、許容基準を満足しており、従来と同様に、安全性は確保されることが示されている。

欧米と同型の原子力発電プラントを有する日本においても、安全に原子炉出力向上を実施することは欧米の実績からも可能と考えられるが、本特別専門委員会は、こうした欧米の状況も踏まえ、MU型とS型、E型の出力向上について技術検討評価を行ったので、その結果について以下に紹介する。 (岡本孝司)

I. MU型出力向上における超音波流量計

原子炉出力は、給水流量とエンタルピー上昇の積を取ることによって求められるが、給水流量の計測には比較的大きな不確かさを含んでいる。このため、原子炉の安全解析では、この不確かさ(約2%)を考慮して、102%出力での解析が行われている。もし、給水流量の計測不確かさを、例えば1%以下に抑えることができれば、すでに102%で安全が確認されているので、101%で運転を続けても安全は担保される。つまり、給水流量の計測不確かさを低減することで、安全を確保したまま、原子炉出力を向上できることになる。この方法をMU型原子炉出力向上と呼び、すでに米国とスペインで導入されている。

計測不確かさの小さな流量計としては、超音波流量計が用いられている。

1. 検討対象の超音波流量計

米国でMU型原子炉出力向上に用いられている超音波流量計は、Chordal型(伝播時間差式配管一体型)、Crossflow型(相関時間差式)の2種類がある。それに加えて、給水流量の管理・監視用途に実績のあるExternal型(伝播時間差式配管外付型)という型式もある。

これらの流量計に対する日本国内の実機適用性試験、米国規制当局における審査資料や発電所での実績データ等の情報を基に、3種類の超音波流量計に対して、技術的にその不確かさを評価するとともに、更なる実証試験の必要性などについて、学術的に検討・審議を行った。第1表に検討対象とした3種類の流量計をまとめて示す。

2. 検討・審議の視点

流量の計測不確かさを議論する際、計測しようとしている流体の慣性力や粘性力の影響を考慮する必要がある。また、これらの影響を考慮する際には、一般的にレイノルズ数という慣性力と粘性力の比を表す無次元パラメータが用いられる。原子力プラントでは高温の水が大量に流れているため、実機ではレイノルズ数は約 2×10^7 程度になる。一方、流量計の校正試験で利用される実流量試験装置では、流量(kg/s)自体は実機と等しいが、

レイノルズ数は約 5×10^6 と小さい。このレイノルズ数の違いが計測不確かさに与える影響について検討を行う必要がある。また、校正試験では、実流量試験による実測値と超音波流量計の計測値の比として校正定数を求めている。この校正定数は、Chordal型およびExternal型ではプロファイルファクタ(PF)、Crossflow型では流速分布補正係数(VPCF)と呼ばれる。

本検討では、不確かさ評価の対象として下記項目について、実流量試験データおよび実機データを用いて評価した。

- (1) 校正定数(PF・VPCF)
- (2) 流速分布への影響因子(レイノルズ数, 流量計上流の流体擾乱要素, 配管内面の粗さ)
- (3) レイノルズ数および温度・圧力の外挿性
- (4) 信号のSN比(信号対ノイズ比)の管理
- (5) 流量計の個体差

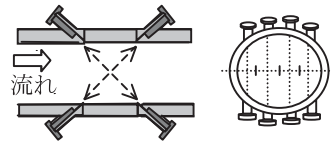
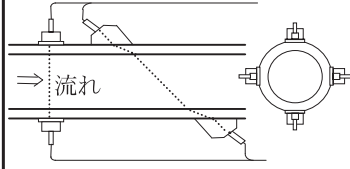
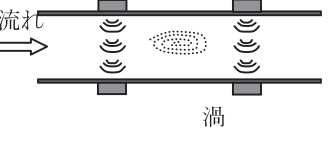
さらに、流量計の不確かさ・機能維持の方法として、保守点検内容、自己診断機能等についても審議した。

以下に、それぞれの型式ごとに、計測不確かさに対する評価結果を示す。

3. Chordal型超音波流量計

Chordal型(8測線)では、米国のARL(Alden Research Laboratory)試験設備において、実機における流量計の上流側配管形状を模擬した試験装置を用いて常温実流量

第1表 超音波流量計型式

型式	Chordal型	External型	Crossflow型
概要図			
計測方式	伝播時間差式配管一体型	伝播時間差式配管外付型	相関時間差式
計測原理	下流から上流への超音波伝播時間と、上流から下流への超音波伝播時間との差が、配管内流速に比例することを利用。配管内の平行4測線または8測線上の線平均流速より流量を求める。	下流から上流への超音波伝播時間と、上流から下流への超音波伝播時間との差が、配管内流速に比例することを利用。配管直径上の超音波伝播経路の線平均流速を校正定数(プロファイルファクタ)で補正することにより流量を求める。	発信した超音波性状が配管内の渦と作用して変調することを利用。上流と下流の2点で変調波の相互相関をとり、渦の移動速度から流量を求める。
計測精度(2σ) (メーカー公称)	±0.3~0.5%	±1.0%	±0.3~0.5%

試験(レイノルズ数： $\sim 5 \times 10^6$)を実施し、ここで得られた校正定数 PF を 2×10^7 の高いレイノルズ数領域まで外挿することによって実機相当の校正定数 PF を決定するとともに、メーカーが独自に確立した不確かさの評価手法を用いることによって、実機の質量流量計測不確かさが $\pm 0.28\%$ であると評価している。

Chordal 型は、直接流体に接した 8 測線データにより計測していること、校正定数 PF のレイノルズ数依存性が大きくないこと、流速分布の変動を比較的捕らえやすいこと、という特徴から、校正定数 PF に関するレイノルズ数の外挿性は比較的高いと判断した。このことから、MU 型原子炉出力向上に利用できる計測不確かさを有する可能性が高いと考える。なお、レイノルズ数の外挿性をより詳細に確認するため、高レイノルズ数領域での試験を行い、日本国内だけではなく、世界中の原子力プラントに対して、データを提示することは意味があると考えられる。

4. External 型超音波流量計

External 型では Chordal 型と同様に、米国の ARL (Alden Research Laboratory) 試験設備において、実機における流量計の上流側配管形状を模擬した試験装置を用いて常温実流量試験(レイノルズ数： $\sim 5 \times 10^6$)を実施し、ここで得られた校正定数 PF を 2×10^7 の高いレイノルズ数領域まで外挿することによって実機相当の校正定数 PF を決定するとともに、メーカーが独自に確立した不確かさの評価手法を用いることによって、実機の質量流量計測の不確かさが $\pm 1.0\%$ であると評価している。また整流装置下流 4-12 D の位置に設置することで、流速分布変化の影響を極小化する工夫がなされている。

External 型は直径軸上の 1 測線のみにて計測しているため、流速分布に関する情報量が少ないことが弱点である。また、配管外部から超音波信号を送受信していることからノイズの影響を受けやすいため、ノイズに起因して計上する不確かさの割合は Chordal 型に比較して大きくなる傾向にあるが、適切な計測手順でノイズを実機条件にて計測し不確かさを評価することが可能と考えられる。よって、MU 型原子炉出力向上に利用するためには、たとえ不確かさが $\pm 1.0\%$ であっても、高レイノルズ数領域での試験を実施し、外挿性を確認することが推奨される。

5. Crossflow 型超音波流量計

Crossflow 型の校正定数 VPCF は、米国の実機データならびに検定試験データからレイノルズ数に関連したパラメータの 1 次関数でフィッティングでき、高レイノルズ数領域での不確かさについて $\pm 0.25\%$ 以内であることが説明可能であると、メーカーは主張している。

Crossflow 型は、実機プラントの 100% 流量条件にて

各系統の超音波流量計および差圧式流量計の流量指示値を比較し、それぞれの計測値は時間変動を含めてよく一致していることを確認した。しかし、差圧式流量計の計測不確かさは超音波流量計の計測不確かさと比べて大きいため、VPCF の不確かさ (0.25%) を保証するためには、より精度の高い試験を行うことが望ましいと考える。よって、MU 型原子炉出力向上に利用するためには、たとえ不確かさが $\pm 0.25\%$ であっても高レイノルズ数領域での試験を実施し、外挿性を確認することが推奨される。

なお、2008 年 9 月に、NRC も Crossflow 型に関して、試験設備で校正した結果を実機に適用する場合の不確かさ評価が不完全である等の技術的課題を挙げ、この課題の解決を NRC が認めるまで、Crossflow 型超音波流量計による MU 型原子炉出力向上の認可を中止するとの見解¹⁾が出された。

6. MU 型出力向上の関連事項

MU 型出力向上に用いる超音波流量計の評価に関連して、検討した事項をまとめる。

- ・本検討においては、実機の不確かさを見積もるために、米国機械学会 (ASME) 方式の評価手法を用いて検討を実施した。不確かさ評価に関する研究は日々進歩しており、国際標準化機構 (ISO) ベースの評価手法や、設置場所と検定場所の違いなどの差を補正するファシリティファクタなどの検討も進んでいる。今後、技術の進歩に合わせて、合理的に判断が可能な不確かさ評価の標準的手法の確立が望まれる。
- ・(独)産業技術総合研究所には、世界唯一の高レイノルズ数流量試験装置²⁾(レイノルズ数： $\sim 1.7 \times 10^7$)があり、この有効利用が期待される。
- ・日本発の新しい超音波式の流量計として開発が進められている流速分布型超音波流量計³⁾について、実用化を進めることを期待する。
- ・原子力安全委員会が策定している ECCS 性能評価指針などでは、明示的に定格熱出力の 102% を下回らない出力で評価することを要求している。不確かさが低減できれば、この 102% という数字も合理的に変更を行う必要があると考えられる。

(木倉宏成)

II. S 型, E 型出力向上について

次に、MU 型よりも出力向上量の大きい S 型ならびに E 型原子炉出力向上について述べる。

1. 出力向上に伴い安全上評価すべき項目の抽出
我が国において出力向上を計画する場合、基本設計段

階で安全上評価すべき項目やその対応についてどのように検討したらよいか検討する。以下に、その考え方や検討結果について述べる。

(1) どのように検討するか

出力向上における安全上評価すべき項目の検討は、我が国の原子炉施設安全審査のプロセスがベースとなる。ここで注意すべきは次の2点である。1点目は、S型、E型出力向上はプラント全体に影響を及ぼす可能性があるため、検討においては安全上評価すべき項目を網羅的に抽出することが重要であること、2点目は、出力向上は既設の運転プラントで実施することから、プラントの経年変化の観点も考慮すべきであること、である。

まず、実際に出力向上において安全上評価すべき項目やその対応について机上検討する。検討にあたっては、我が国の既設軽水炉(BWR, PWR)を対象に、出力増加割合は欧米での実績と同程度と想定し、我が国で利用可能な技術的知見などを活用することを前提とした。具体的手順は以下の通り。

- (1) 安全上評価すべき項目を網羅的に抽出することを目的に、出力向上に伴い変化するプラントパラメータと主要系統設備への影響を検討、分類する。
- (2) (1)の影響分類をもとに、原子炉設置許可申請書に記載されている全項目について、出力向上による影響の有無を確認する。
- (3) (2)で「影響あり」とした項目について、「安全上評価すべき項目」を抽出する。抽出された評価項目は、「[a]安全評価に係る項目」と、「[b]設備への影響を評価すべき項目」に分類する。
- (4) 「[a]安全評価に係る項目」は、評価方法および判断基準を明確にし、出力向上に係る影響を評価・考察する。「[b]設備への影響を評価すべき項目」は、出力向上による影響と対応方針を検討する。

(2)で評価のベースを原子炉設置許可申請書とするのは、本図書がプラントの基本設計段階において安全性確保の観点から安全審査に用いられる指針類を踏まえて作成するものであり、安全性に関連したプラント設備に関して網羅的に記載された図書であることによる。なお、原子炉設置許可申請書の中で、安全性の評価に関連する内容は添付書類八、九、十であるため、実質的には評価対象は添付書類八、九、十の全項目となる。

(2) どのような結果が得られたか

前述の手順に従って出力向上の影響を検討すると、原子炉設置許可申請書記載項目のうち、「安全上評価すべき項目」はBWR 125項目、PWR 120項目の合計245項目が挙げられる。

このうち、「[a]安全評価に係る項目」に分類されるのは、燃料被覆管温度、反応度停止余裕、周辺公衆線量評価、非常用炉心冷却設備の冷却能力などである。抽出された項目に対して、その評価方法を整理・検討した結

果、出力向上条件が現行の評価方法(計算コード)の適用範囲内であれば、現行の評価方法は有効である。また、判断基準についても、現行の判断基準はプラント仕様に依存しないため、出力向上条件でも適用できる。すなわち、現行の評価方法を用いて出力向上条件で評価を行い、現行の判断基準を満足すれば、安全性は確認することができるといえる。さらに、現在開発中の改良手法も、将来的には評価方法として適用することも有効である。なお、現行設備において判断基準を満足しない場合は、判断基準を満足できるように設備改造(仕様の変更)で対応することも可能である。

また、「[b]設備への影響を評価すべき項目」のうち、「流れ加速型腐食による配管減肉への影響」、「流れ誘起振動に起因した振動疲労の影響—BWRの蒸気乾燥器」、「中性子照射脆化への影響」について検討したが、これらは現在実施されている保安全管理で対応可能である。その他の項目についても、設計、保安全管理、運用管理を適切に実施することによりプラントの安全性を保つことができる。

2. 安全評価への影響について

(1) どうやって影響評価を行ったか

ここでは、「[a]安全評価に係る項目」のうち、安全性を確保する上で重要な安全評価審査指針に定められた評価事象に対し、①出力向上において注目すべき評価項目を確認すること、②出力向上後も安全性を確保できる見通しを得ることを目的に、BWR/PWR代表プラントにおける出力向上に係る影響を定量的に評価・考察する。安全評価審査指針で評価の対象としている項目は第2表の通りである。

出力向上の影響評価は、概略評価と解析評価の2段階に分けて行う。まず概略評価では、各評価項目に対する出力向上の影響を考察し、以下のように分類する。

分類A：出力向上の影響が軽微な項目

分類B：出力向上の影響を比較的容易に推測できる項目

分類C：出力向上の影響を概略評価では容易に推測できない項目

次にCに分類された項目は、概略評価では影響を容易に推測できない項目であり、出力向上時に注目すべき項目と考え、判断基準に対して最も厳しい事象を解析評価する。なお、これら評価にあたっては、以下を主要な前提条件とする。

(1) 対象プラントはBWR 5代表プラント(9×9型燃料装荷)、PWR代表3ループプラント(17×17型燃料装荷)とする。

(2) 出力向上量は、BWRが7%(米国における出力向上分類のストレッチ型相当)、PWRが9%(米国 Beaver Valley-1/2での設備拡張型出力向上の実績

第2表 安全評価指針における評価対象項目

	BWR	PWR
運転時の異常な過渡変化	MCPR	最小 DNBR
	表面熱流束	燃料中心温度
	燃料エンタルピ	燃料エンタルピ
	原子炉圧力(原子炉冷却材圧力バウンダリーにかかる圧力)	原子炉圧力(原子炉冷却材圧力バウンダリーにかかる圧力)
事故	炉心冷却性能(PCT/ECR)	炉心冷却性能(PCT/ECR) 炉心冷却性能(最小 DNBR)
	原子炉圧力(原子炉冷却材圧力バウンダリーにかかる圧力)	原子炉圧力(原子炉冷却材圧力バウンダリーにかかる圧力)
	燃料エンタルピ	燃料エンタルピ
	格納容器内圧力	格納容器内圧力
	周辺公衆の受ける線量	周辺公衆の受ける線量
	格納容器内可燃性ガス濃度	格納容器内可燃性ガス濃度

MCPR：最小限界出力比，DNBR：限界熱流束比，PCT：燃料被覆管最高温度，ECR：局所的な最大ジルコニウム水反応量

第3表 運転時の異常な過渡変化に対する概略評価結果(BWR)

評価項目 ()内は判断基準	判断基準に対して最も厳しい事象	出力向上の影響	分類
MCPR(≥ 1.07)	負荷の喪失(発電機負荷遮断バイパス弁不作動)	過渡時のボイド反応度印加割合が増加するため，MCPR低下量(Δ MCPR)が大きくなることが考えられる。	C
表面熱流束($\leq 170\%$)	出力運転中の制御棒の異常な引抜き	初期値の熱的状態(最大線出力密度)，制御棒引抜き阻止信号の設定値は変わらないため，影響は軽微。	A
燃料エンタルピ (\leq 燃料の許容限界)	原子炉起動時における制御棒の異常な引抜き	ゼロ出力状態(高温待機時)の解析のため，影響は軽微。	A
原子炉圧力(≤ 9.48 MPa [gage])	負荷の喪失(発電機負荷遮断バイパス弁不作動)	主蒸気流量の増加で主蒸気遮断量が増加するため，過渡時の原子炉圧力が上昇することが考えられる。	C

第4表 事故に対する概略評価結果(BWR)

評価項目 ()内は判断基準	判断基準に対して最も厳しい事象	出力向上の影響	分類
炉心冷却性能 (PCT $\leq 1200^\circ\text{C}$) (ECR $\leq 15\%$)	LOCA (ECCS性能評価)	崩壊熱が増加するため，PCT/ECRの上昇が考えられる。	C
燃料エンタルピ(\leq 燃料エンタルピ制限値)	制御棒落下	ゼロ出力状態(冷温時および高温待機時)の解析のため，影響は軽微。	A
原子炉圧力 (≤ 10.34 MPa [gage])	原子炉冷却材ポンプの軸固着	主蒸気流量の増加で主蒸気遮断量が増加するため，事故時の原子炉圧力が上昇することが考えられる。	C
格納容器内圧力 (≤ 310 kPa [gage])	LOCA (PCV健全性評価)	LOCA時の格納容器に放出されるエネルギーが増加するため，格納容器内圧力，温度が上昇することが考えられる。	C
周辺公衆に対する線量 (≤ 5 mSv)	放射性気体廃棄物処理施設の破損	燃料中の核分裂生成物蓄積量が出力向上割合に比例して増加するが，現行評価において判断基準を十分下回っているため，判断基準は満足。	B
格納容器内可燃性ガス濃度(≤ 4 vol% [水素] または 5 vol% [酸素])	可燃性ガスの発生	核分裂生成物の炉内蓄積量の増加で格納容器内放射線が増加するため，格納容器内水素および酸素濃度が増加することが考えられる。	C

と同程度)とする。

(3) 定格運転時の原子炉圧力および炉心流量(BWR)/1次冷却材流量(PWR)は現行と同じとする。

(2) BWRの評価結果

(a) 出力向上において注目すべき項目は何か

代表BWRプラントを対象に，現行評価(出力向上前)の結果を参考に，安全評価の全事象を対象として，現行手法をベースに評価項目ごとに出力向上に係る安全評価への影響を概略評価する。概略評価の結果を第3, 4表に示す。概略評価結果は，前述の出力向上の影響の程度による分類で，以下のように整理することができる。

分類A：表面熱流束，燃料エンタルピ

分類B：周辺公衆に対する線量

分類C：MCPR，原子炉圧力，PCT/ECR，格納容器内圧力，格納容器内可燃性ガス濃度

以上より，BWRの安全評価において出力向上時に注目すべき項目は，分類CのMCPR，原子炉圧力，PCT/ECR，格納容器内圧力および格納容器内可燃性ガス濃度である。

(b) 出力向上においても安全性は確保されるのか

次に、出力向上の影響を定量的に確認する。分類 A および B の項目については、概略評価の結果、判断基準を満足することは容易に推測できるため、ここでは、出力向上の影響を容易に推測できない分類 C の項目として抽出された MCPR, 原子炉圧力, PCT/ECR, 格納容器内圧力および格納容器内可燃性ガス濃度について出力向上の影響を定量的に確認する。確認にあたっては、判断基準に対して最も厳しい「負荷の喪失(発電機負荷遮断バイパス弁不動作)」および「LOCA」を対象に解析評価を実施した。ここでは、現行の評価手法を用いた。

第 5 表に解析評価結果のまとめを、第 1, 2 図におおの「負荷の喪失(発電機負荷遮断バイパス弁不動作)」, 「LOCA(大破断)」の解析例を示す。解析例では、出力向上前の解析結果も合わせてプロットしたが、「LOCA(大破断)」では出力向上前後で水位, 圧力等の挙動は図上ではその差を識別できない程度である。

以上、注目すべき項目に対して、現行の評価手法を用いて解析評価を実施した結果、出力向上条件下でも判断基準を満足することが示された。

(3) PWR の評価結果

(a) 出力向上において注目すべき項目は何か

代表 PWR プラントを対象に、現行評価(出力向上前)の結果を参考に、安全評価の全事象を対象として、現行手法をベースに評価項目ごとに出力向上に係る安全評価への影響を概略評価する。概略評価の結果を第 6, 7 表に示す。概略評価結果は、前述の出力向上の影響の程度による分類で、以下のように整理することができる。

分類 A : 燃料中心温度, 燃料エンタルピ, 原子炉圧力, 原子炉格納容器圧力

分類 B : 周辺公衆に対する線量, 可燃性ガス濃度

分類 C : PCT/ECR, 最小 DNBR

以上より、PWR の安全評価において出力向上時に注

第 5 表 解析評価のまとめ

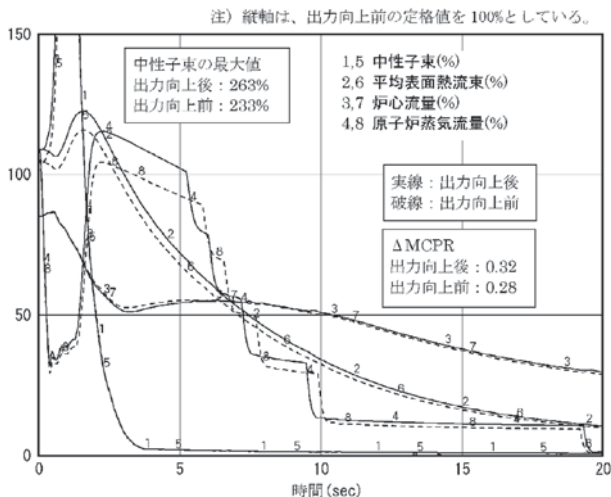
評価項目 ()内は判断基準	解析事象	解析値	
運転時の異常な過渡変化	MCPR (≥1.07)	負荷の喪失(発電機負荷遮断バイパス弁不動作)	ΔMCPR: 0.32 [MCPR=運転制限MCPR-ΔMCPR]
	原子炉圧力 (≤9.48 MPa [gage])	負荷の喪失(発電機負荷遮断バイパス弁不動作)	約8.05 MPa
事故	炉心冷却性能 (PCT≤1200°C) (ECR≤15%)	LOCA (ECCS 性能評価)	大破断: 約587°C 中小破断: 約583°C ECR: 極めて小さい
	格納容器内圧力 (≤310 kPa [gage])	LOCA (PCV 健全性評価)	約254 kPa
	格納容器内可燃性ガス濃度 (≤ 4 vol% [水素] または 5 vol% [酸素])	可燃性ガスの発生	【水素濃度】 約3.4% (D/W), 約1.3% (S/C) 【酸素濃度】 約4.4% (D/W), 約4.4% (S/C)

D/W: ドライウェル, S/C: サプレッションチェンバ

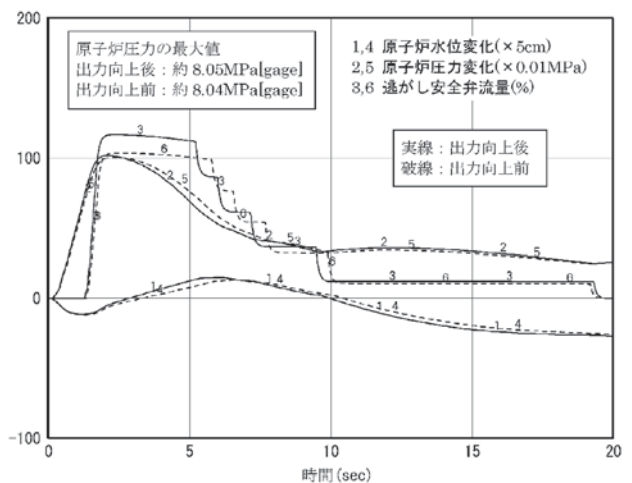
目すべき項目は、分類 C の PCT/ECR および最小 DNBR である。

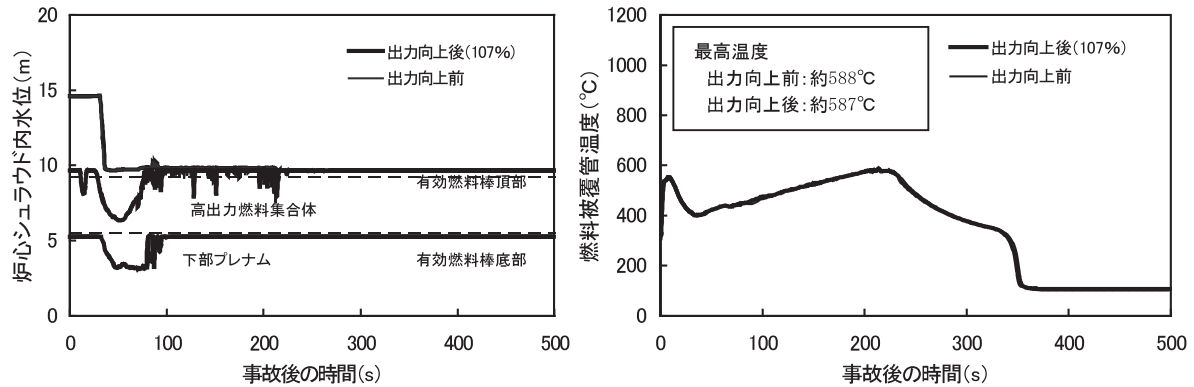
(b) 出力向上においても安全性は確保されるのか

次に、出力向上の影響を定量的に確認した。分類 A および B の項目については、概略評価の結果、判断基準を満足することは容易に推測できるため、ここでは、出力向上の影響を容易に推測できない分類 C の項目として抽出された PCT/ECR および最小 DNBR について出力向上の影響を定量的に確認する。確認にあたっては、判断基準に対して最も厳しい「LOCA (ECCS 性能評価)」および「原子炉冷却材ポンプの軸固着(最小 DNBR



第 1 図 負荷の喪失(発電機負荷遮断バイパス弁不動作)の解析例(BWR)





第2図 LOCA (大破断) の解析例 (BWR)

第6表 運転時の異常な過渡変化に対する概略評価結果 (PWR)

評価項目 ()内は判断基準	判断基準に対して 最も厳しい事象	出力向上の影響	分類
最小 DNBR (\geq 許容限界値)	出力運転中の制御棒の 異常な引抜き	定格運転時最小 DNBR は低下し、それに伴って過渡時最小 DNBR も低下。現行評価において判断基準を十分上回っているため、出力向上後も判断基準は満足される見通し。	C
燃料中心温度 ($<$ 燃料ペレット溶融点)	出力運転中の制御棒の 異常な引抜き	左記事象で対象としている線出力密度は、実際の過渡時線出力密度に十分に余裕を見込んだ値であり、出力向上後も評価対象となる線出力密度は変更しないため、出力向上の影響は軽微。	A
燃料エンタルピ (\leq 燃料の許容限界)	原子炉起動時における 制御棒の異常な引抜き	高温ゼロ出力からの解析であり、出力向上の影響は軽微。	A
原子炉圧力 (≤ 18.88 MPa[gage])	負荷の喪失	原子炉圧力の上昇が考えられるが、過渡時原子炉圧力は加圧器安全弁作動設定圧付近に留まるため、出力向上の影響は軽微。	A

第7表 事故に対する概略評価結果 (PWR)

評価項目 ()内は判断基準	判断基準に対して 最も厳しい事象	出力向上の影響	分類	
炉心冷却	PCT ($\leq 1, 200^\circ\text{C}$) ECR ($\leq 15\%$)	LOCA (ECCS 性能評価)	線出力密度および崩壊熱が増加するため、PCT/ECR が上昇。	C
	最小 DNBR (\geq 許容限界値)	原子炉冷却材ポンプの 軸固着	定格運転時最小 DNBR は低下し、それに伴って過渡時最小 DNBR も低下。	C
燃料エンタルピ (\leq エンタルピ制限値)	制御棒飛び出し (高温ゼロ出力)	高温ゼロ出力からの解析であり、出力向上の影響は軽微。	A	
原子炉圧力 (≤ 20.59 MPa[gage])	主給水管破断	原子炉圧力の上昇が考えられるが、過渡時原子炉圧力は加圧器安全弁作動設定圧付近に留まるため、出力向上の影響は軽微。	A	
格納容器内圧力 (\leq 最高使用圧力)	LOCA (CV 健全性評価)	炉心保有エネルギーおよび崩壊熱が増加するため、事故時 CV 圧力が上昇することが考えられるが、出力向上に伴う CV 圧力への寄与は軽微。	A	
周辺公衆に対する線量 (≤ 5 mSv)	LOCA (蒸気発生器伝熱管 破損)	核分裂生成物の炉内蓄積量および1次冷却材中の核分裂生成物の濃度が出力向上割合にほぼ比例して増加するが、現行評価において判断基準を十分下回っているため、判断基準は満足。	B	
可燃性ガス濃度 (≤ 4 vol% [水素])	可燃性ガスの発生	核分裂生成物の炉内蓄積量が出力向上割合に比例して増加し、格納容器内放射線が増加するため、格納容器内水素濃度は増加することが考えられるが、現行評価において判断基準を十分下回っているため、判断基準は満足。	B	

評価)」を対象に解析評価を実施した。ここでは、将来、出力向上を申請する場合に使用すると予想される改良手法(統計的安全評価手法および核熱結合手法)を用いた。これらの手法は、米国ではすでに開発済みであり、国内においても開発はほぼ完了している。統計的安全評価手法に関する日本原子力学会標準が2008年度中に発刊予定である。

a) LOCA

LOCAのECCS性能評価は、最適評価コード(MCOBRA/TRAC)を用いた統計的安全評価手法(順序統計法)による評価を実施した。第3図に、その解析例を示すが、統計的安全評価手法を用いて評価すると、PCT/ECRは約950°C/約1%となり、出力向上条件下でも判断基準を十分に満足する結果となった。

b) 原子炉冷却材ポンプの軸固着

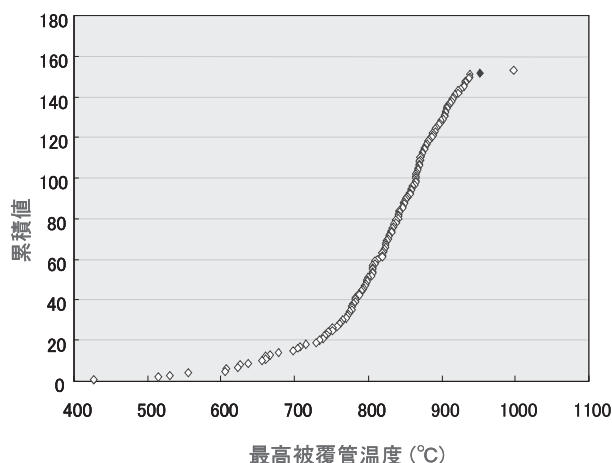
原子炉冷却材ポンプの軸固着の最小DNBR評価は、核熱結合評価手法を適用したSPARKLEコードを用いて評価を実施した。第4図に、その解析例を示すが、核熱結合手法により出力向上時の最小DNBRを評価すると、1次冷却材温度上昇に伴う減速材密度フィードバック効果が急激に添加されることにより過渡時の炉心出力が早期に緩和され、出力向上条件下でも、DNBR許容限界値を満足することが確認された。

以上、注目すべき項目に対して、改良手法を用いて解析評価を実施した結果、出力向上条件下でも判断基準を満足することが示された。

(4) 「安全評価への影響」のまとめ

「[a]安全評価に係る項目」のうち、安全評価審査指針に定められた評価事象を対象に、BWR/PWR代表プラントにおける出力向上に係る影響を評価・考察した結果を以下に示す。

- ・概略評価により、出力向上を図る場合に安全評価において注目すべき項目を抽出した。



第3図 出力向上における「LOCA (ECCS性能評価)」の解析例
(国内PWR代表3ループプラント、
MCOBRA/TRAC+統計的安全評価手法)

- ・注目すべき項目に対して、判断基準に対して最も厳しい事象を対象に解析評価を実施した結果、判断基準を満足することが確認された。
- ・BWR5代表プラントは約7%、PWR代表3ループプラントは約9%の出力向上割合で評価した結果、安全評価の判断基準を逸脱することはなく、出力向上の安全性は確保される見通しが得られた。
- ・ただし、将来、実機において出力向上を図る場合は、個別プラントごとに出力向上の安全性を確認する必要がある。
- ・出力向上にあたっては、最新の研究成果を反映した解析手法を採用することが合理的である。また、出力向上は、それに適合する改良燃料の開発などの新技術を導入する契機となる。

3. 設備への影響評価

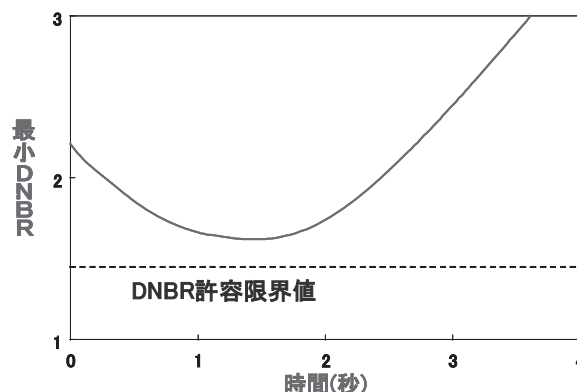
出力向上に伴い安全上評価すべき項目は、II-1節で述べたとおり、「[a]安全評価に係る項目」と「[b]設備への影響を評価すべき項目」に分類される。

「[b]設備への影響を評価すべき項目」は、出力向上による影響はどのようなことが考えられるか、また、その影響はどのように評価・対応できるか、について検討した結果、設計、保安全管理、運用管理を適切に実施すればプラントの安全性は保たれると判断された。

本節では、「[b]設備への影響を評価すべき項目」のうち、注目事象として中性子照射量の増加による脆化への影響、流れ誘起振動に起因した振動疲労への影響、および流れ加速型腐食による配管減肉への影響について述べる。

(1) 中性子照射量の増加による脆化への影響

中性子照射によって原子炉压力容器の破壊靱性が低下する照射脆化について、電気技術規程 JEAC 4201-2004「原子炉構造材の監視試験方法」に規定される監視試験を実施し、靱性の低下を監視している。また、電気技術規



第4図 出力向上における「原子炉冷却材ポンプの軸固着(最小DNBR評価)」の解析例
(国内PWR代表3ループプラント、
核熱結合評価手法)

程 JEAC 4206-2004「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」に従って、材料の関連温度 (RTNDT) に基づく原子炉冷却材の圧力・温度制限を設けるとともに、上部棚吸収エネルギー (USE) の低下に対する評価などを実施し、原子炉圧力容器の健全性を確認している。

原子炉の出力向上時には炉心中性子束が増加するが、この出力向上後の条件でも前述の評価方法は適用できる。したがって、出力向上後の照射時間を考慮した原子炉圧力容器への中性子照射量を求め、材料の関連温度および上部棚吸収エネルギーなどの評価を行うことができる。これらの評価結果を適切に保全管理に反映することにより、原子炉圧力容器の健全性を確保できるように管理することができる。

(2) 流れ誘起振動に起因した影響

(a) 蒸気乾燥器および主蒸気逃がし安全弁の振動

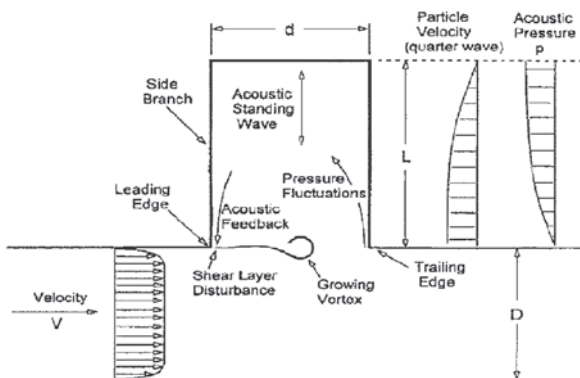
出力向上により主蒸気の流速が増加するため、流れ誘起振動 (Flow Induced Vibration: FIV) の発生が考えられる。

米国の E 型出力向上 (17.8% Up) プラント (Quad Citis: BWR) において、蒸気乾燥器の振動疲労損傷や主蒸気配管に設置されている逃がし安全弁の駆動機構の損傷が経験されている。原因調査の結果、出力向上に伴い主蒸気の流速が増加した主蒸気配管内で主蒸気の流れに起因した音響共鳴現象が発生し、この音響振動が主原因であることが確認された。

音響共鳴現象の発生メカニズムは、主蒸気配管に設置された逃がし安全弁の管台分岐部を高流速の蒸気流が通過する際に、管台分岐部で発生する渦の発生周波数が管台の形状寸法から決まる音響固有振動数に一致して音響共鳴が発生するというものである。音響共鳴の発生メカニズム⁴⁾を第 5 図に示す。

(b) 音響共鳴現象に関する検討

音響共鳴現象が分岐管部で発生し始める蒸気流速の評価式から、本損傷事例が発生した米国出力向上プラントでの主蒸気流速条件での音響共鳴発生の有無を評価した。この結果、損傷発生プラントの主蒸気配管形状から



第 5 図 主蒸気の流れによる音響共鳴の発生メカニズム

決まる音響固有振動数と、他プラントと比較して際立って大きい主蒸気流速条件から音響共鳴が発生することがわかった。

また、本損傷事象が発生していない米国 E 型出力向上プラントの主蒸気流速は、Quad Citis より小さく、また、標準的な国内プラント (BWR 5) での E 型出力向上時のモデル評価でも音響共鳴の発生の可能性は低いことがわかった。第 8 表に Quad Citis と標準的な国内プラント (BWR 5) の主蒸気流速および音響共鳴の開始流速の比較を示す。

なお、当該プラントは、共鳴の発生防止対策として、逃がし安全弁管台分岐部に枝管を設置し、分岐管台部の有効長さを増加、音響固有振動数を低下させることによって出力向上運転における共鳴発生の防止を図っている。

以上のことから、今後、個々のプラントが出力向上を実施する際には、出力向上条件での流れ誘起振動に関する評価や保全管理を適切に実施すれば、機器損傷の未然防止等の対応は可能であると考えられる。

(3) 配管の流れ加速型腐食現象への影響

原子力プラントの炭素鋼配管では、オリフィス下流、エルボ、曲げ管、T 管、レデューサなどの偏流部において、腐食 (コロージョン) が流れの乱れによる物質移動の増大により静水中の腐食を超えて加速される流れ加速型腐食 (Flow Accelerated Corrosion: FAC) が発生する。この FAC 現象は、プラント配管劣化の主要なモードの一つであり配管損傷につながりうるため、肉厚管理をすることが必要である。

本稿では代表プラントとして、国内 BWR プラントの 58% を占める BWR 5 を選定し、一般的にプラント性能範囲内で達成されるストレッチ (S 型) 出力向上に相当するレベルとして 5%、大規模な設備改造を伴う設備拡張

第 8 表 Quad Citis と国内 BWR 5 の比較

	Quad Citis (17.8%出力 Up)	国内 BWR 5 (20%出力 Up 例)
主蒸気流速 (A)	約 62 (m/s)	約 53 (m/s)
音響共鳴開始流速* (B)	約 30~40 (m/s)	約 58 (m/s)
流速比 (A)/(B)	1.5~2.1	0.9
評価	音響共鳴が発生し得る	音響共鳴発生の可能性は低い

* : 音響共鳴開始流速 (分岐管の形状寸法から決まる流速)

$$= f(d+r)/1.2 \times St$$

$$f: 1/4 \text{波長の音響共鳴周波数 } f = C / (4 \times L)$$

C : 主蒸気配管内蒸気の音速

L : 分岐管の長さ, d : 分岐管直径

r : 分岐管入口部の曲率半径

St : ピーク共鳴に対応するストローハル数 (= 0.56)

1.2 : 係数 (音響共鳴のピーク点流速より 20% 低い流速を音響共鳴開始点と定義するため設定)

型(E型)出力向上に相当するレベルとして15%を想定して、FACによる減肉率がどのような傾向で変化するか、また、FACによる配管減肉の管理計画への程度影響するかを調べた。評価では、BWRの配管減肉管理に関する技術規格⁵⁾において最短寿命が20年以下とされている系統、さらに減肉率が比較的高いとされている箇所について、国内BWR5プラントにおける出力向上前後のプロセス量の変化を参考にして、FACによる配管減肉の変化(余寿命や減肉率の変化)の傾向をつかむための概略評価を実施した。

減肉率を算定するための評価コードとしては、内容が公開されており、定量的に評価が可能なものとしてWATHECコード⁶⁾を用いた。本コードはおおむね保守的な推定値を与えるが、計算値と実測値の比較においてバラツキが見られる。しかし、出力向上前後における配管減肉の変化の傾向を見るのであれば、十分適用できると考える。

評価結果を第6図に示す。ここで系統No.は、規格⁵⁾に記載されている系統No.と対応している。5%出力向上のケースでは、最短寿命が10年を下回る系統は見られず、ほとんどの系統で出力向上前の寿命に対する変化率(RL)は大きくない(減肉率は150℃付近でピークを持つため、温度条件によっては寿命が長くなる系統も多い)という結果が得られた。15%出力向上のケースでは、タービンから給水加熱器に至る抽気系の一部(No.10-2, 12-2)で寿命がやや短くなる傾向が見られたものの、寿命は10年程度であり、従来の保安全管理方法で対応できるレベルであった。また低合金鋼やステンレス鋼などの対策材が使用されているプラントでは、寿命低下が大幅に軽減される。その他の箇所については5%出力向上と同様に、寿命の低下がわずかであるか、あるいはむしろ長くなる系統が多く、影響は小さいものであった。

以上のように、FACについては出力向上による配管減肉管理計画への影響は小さく、従来の保安全管理方法を

適切に実施すれば対応が可能な見通しである。

(山口 彰)

Ⅲ. まとめと提言

1. MU型出力向上に関する検討結果と提言

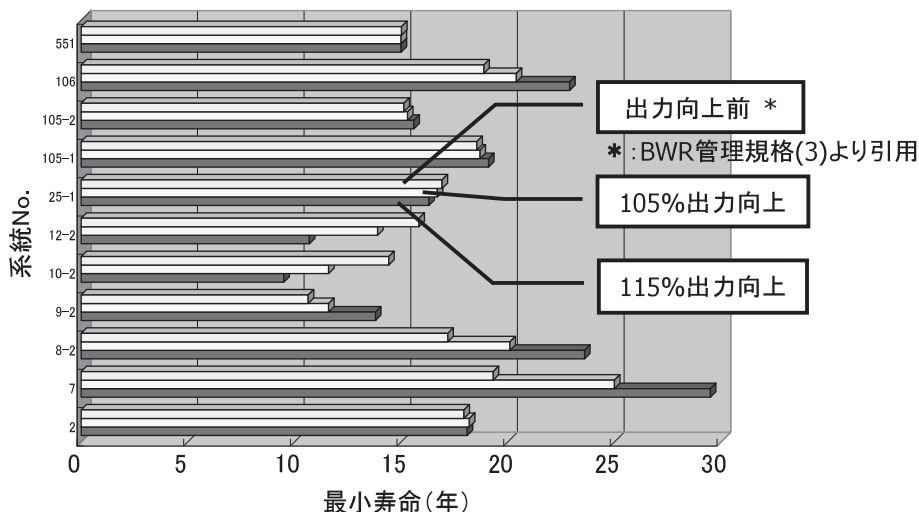
MU型原子炉出力向上を目的とした超音波流量計の計測不確かさについての検討結果を以下にまとめるとともに提言を行う。

- ・ Crossflow型, External型については、実機レイノルズ数付近での試験により、高レイノルズ数への外挿性を評価することを推奨する。Chordal型については、外挿性が比較的高いと判断される。
- ・ 本検討結果を参考に、必要に応じて高レイノルズ数試験と組み合わせることで、MU型原子炉出力向上は技術的に可能である。なお、実機適用に当たっては、「超音波流量計に関する技術検討評価」最終報告書⁷⁾を参考に個別の評価を行い、安全審査によって判断を行う必要がある。
- ・ より安全な出力向上を目指し、①不確かさ評価の標準的手法の確立、②高レイノルズ数流量試験装置²⁾による研究の推進、③新型流速分布式超音波流量計³⁾の開発などを推進することが重要である。
- ・ 原子力安全委員会のECCS性能評価指針等の合理的な改定を検討する必要がある。(木倉宏成)

2. S型, E型出力向上に関する検討結果と提言

原子力発電プラントにおいて、原子炉出力を増加させることによって電気出力を増やす出力向上は、欧米ではすでに約30年ほど前から取り組まれ、運転年数30年以上のプラントから最近のプラントにわたって、延べ約160件に及ぶ多数の実績がある。

これらの欧米における出力向上の状況に関する調査・検討結果を参考に、我が国における出力向上に際しては



第6図 BWRプラントにおけるFACに対する出力向上の影響評価の例

ラントへの影響検討を行い、安全性確保の観点から安全上評価すべき項目の検討および評価を実施した。

安全評価に係る項目は、出力向上の評価条件が評価コード等の適用範囲内であれば、現行の評価方法および判断基準を適用することが可能である。

出力向上に係る安全評価への影響について、出力向上時に注目すべき項目の解析評価・考察を実施した結果、判断基準を逸脱する項目はなく、安全性は確保されるの見通しを得た。

設備への影響を評価すべき項目について検討した結果、設計、保全管理、または運用管理で対応することが可能であり、適切に対応すれば、プラントの安全性は保たれる。

以上の結果、我が国においても現在の知見と技術に基づき技術的に適切に対応すれば、十分な安全性を確保した出力向上が実施可能であると考ええる。環境問題などを考慮すれば、安全を確保することを大前提とし、積極的な原子炉出力向上が望まれる。

原子炉出力向上にあたっては、本報告書⁸⁾の内容を参考に、個別のプラントごとに原子炉出力向上条件における評価を行い、安全性が確保されることを確認していくことが必要である。同様に、原子炉出力向上による設備影響については、個別のプラントごとに評価を実施し、設計や保全管理で適切に対応していくことが重要である。また、欧米での原子炉出力向上実績や運転経験などを反映し、安全な原子炉出力向上が可能となるよう、常に最新知見を取り入れていくことが重要である。

さらに将来にむけて、安全かつ合理的に、より大幅な原子炉出力向上を目指すため、次の点が重要である。

- * 安全評価手法の高度化を推進すること
- * 新しい燃料の開発研究・導入を推進すること

また、リスク情報の活用が推進されていくことを期待する。(岡本孝司)

Ⅳ. 原子炉出力向上への期待

前述の研究成果をとりまとめた報告書^{7,8)}の内容に対して、専門家の方々からの評価が寄稿された。以下にその内容を示す。

1. 研究成果の活用と期待

欧米ではすでに多くの原子力発電プラントで出力向上が実施されているが、それによって安全性が本質的に損なわれるような事象は経験されていない。許認可上も、出力向上に対して特別な規制は設けられておらず、リスク評価の観点からも出力向上によるリスク増加量は小さいということである。これらの実績から、わが国においても出力向上は可能と考えられるが、リスク増加に敏感に反応し、より保守的な立場をとる傾向のあるわが国の

状況に鑑みれば、実プラントでの実施の際、より入念な準備作業が必要になると予想される。リスク情報の活用は、この報告⁸⁾でも今後の課題の一つとして上げられており、規制の側でこれをうまく活用すれば国民の福祉の向上につながると考えられる。

出力向上の方策としては、測定精度改善(MU)型、ストレッチ(S)型、設備拡張(E)型の3つのタイプが考えられている。MU型は、超音波流量計の計測誤差を現状の2%から、例えば0.5%に減少して出力向上を図るもので、計測誤差0.5%という高精度が要求されることから、当然、流量計校正試験では極めて高い精度が要求される。これに関しては、わが国には産業技術総合研究所の新校正試験装置がある。これは高レイノルズ数までの流量計の校正が可能な世界唯一の試験装置だということであり、これを活用して信頼できるデータを提供していただきたい。

安全上評価すべき項目については、現行BWRおよびPWRの代表プラントを対象に、設置許可申請書添付書類記載事項をもとに、S型およびE型の炉出力向上により評価すべき項目を網羅的に抽出し、それらの項目を安全評価に係る項目と設備への影響を評価すべき項目とに分類し、それぞれの項目について解析評価している。安全評価では現行の判断基準を適用し、現行設備が判断基準を満たさない場合には設備仕様の変更で対応としている。ここで示された安全評価結果は、現行代表プラントの炉心・燃料の設計および運転管理を前提としており、実プラントでの実施に際しては、個別プラントの特性や運転管理を反映した安全評価を行うべきことはいうまでもないことであるが、この報告書⁸⁾で示された考え方、手法およびその結果が大いに参考になる。また、安全評価手法の高度化に関しては、原子力学会標準委員会で検討中の統計的安全評価手法などが活用できよう。

設備への影響に関しては、原子炉压力容器の中性子照射脆化の進行、BWR蒸気乾燥器および主蒸気逃がし弁の振動並びに配管減肉について評価している。これらの事象の判断基準の根拠となる実測データには、例えば配管減肉データなどのように、かなりのばらつきがあるものがある。これは多くのパラメータの影響が把握されないまま含まれているためであろう。これらのパラメータの影響について理論的に考察し、あるいは条件の明らかな実測データを取得して、詳細に分析し、整理すれば、判断基準はさらに合理的なものになるのではないか。この点に関し、統一された手法に従って個別プラントにおいて、実測データを取得し、共通の知見として活用することができればよいと思う。

これらの検討評価により、特別専門委員会では、(1)MU型の出力向上は可能であり、その際、より信頼性の高い流量計の検証と指針の合理的な改定が必要であること、(2)S型およびE型の出力向上については、代表プラント

の解析により十分な見通しが得られたこと、実プラントでの実施においては現行の安全審査体系で個別プラントごとに厳格に審査すれば十分であること、また、配管減肉管理などの運転・保守管理を適切に行うべきこと、などの結果をまとめている。今後の課題としては、安全評価手法の高度化、新しい燃料の導入およびリスク情報の活用の推進を挙げている。出力上昇量20～30%となると、新しい燃料の導入が必要となると考えられるが、そのメリットは大きいので、今後、なんらかの形でそのための検討を進める必要がある。リスク情報の活用については前述の通りである。

この特別専門委員会報告^{7,8)}は、原子炉出力向上の技術的側面を総合的に検討評価し、わが国の代表プラントにおける出力向上の可能性を示した点で、大いに評価できる。この成果を踏まえて、近い将来、わが国の実プラントにおいて出力向上が実施されることを期待する。わが国においては、出力向上のほか、高燃焼度燃料や MOX 燃料、濃縮度 5% 超燃料の使用、定期検査期間延長など様々な計画がある。それぞれの計画を実施する際、どのような手順で、どのようなスケジュールで進めるかについて、研究開発に要する期間、安全規制の要求、コスト、社会的受容性などを考慮して総合的に戦略を立てる必要がある。また、その際、国、民間企業、研究機関および大学との適切な役割分担のもとに作業を進めるべきであることはいうまでもない。

(三島嘉一郎)

2. 総合的視点から一今後の展開について

原子炉出力向上には、軽水炉炉心燃料設計を始め、安全設計、系統機器設計、計測制御設計などのシステム設計に関する事項を再検討、評価する必要がある。また、設計・建設段階に加え、これまでの運転・保守の実績や最新研究成果などを踏まえて、材料劣化の加速、水化学との相互作用等に基づき、保全、高経年化などの観点から、軽水炉の運用に関する検討評価が必要である。

原子炉出力向上は、設計と運用という時空間にわたる軽水炉技術全般に係わり、最新の知見を踏まえて出力向上条件でそれらを見直す機会となる。このようなシステムティックな検討評価は、次世代軽水炉の設計開発にスムーズにつながっていくであろうことが予想されるものであり、軽水炉技術の維持・発展という意味で重要な位置を占めることになるであろう。今回の特別専門委員会の成果が次世代軽水炉につながり、世界標準という形で実を結んでいくことを願っている。

今回の特別専門委員会の活動は、産官学が学会という場をうまく活用した良い例といえよう。今回の報告書⁸⁾の内容をみると、原子炉出力向上の安全性評価、設備設計/保全/運用への影響評価、さらにはリスク評価など、多岐にわたる検討が行われており、その結果として総合

的な評価手法がきちんと提示されている。特に、原子炉出力向上を実施するに当たり、安全上評価すべき事項を、先達の知恵が集約されている安全設計審査指針や設置変更許可申請書の記載事項を参照しながら専門家の思考シミュレーションを通じて網羅的に抽出し、どのような評価方法と判断基準を適用すればよいか、正確かつ明確に示している点は評価に値する。原子炉出力向上の技術評価のベースとなるものと評価する。

前述のように、軽水炉技術は、多くの技術から成り立っている総合技術である。それらの各種技術のうち、高経年化と燃料については、学会等の場をうまく利用して、この分野のこれまでの経緯や背景を明確にしつつ、今後、どのような技術課題にどう取り組んでいけばよいかを明確にした「技術戦略マップ」が策定されている。今後、その他の技術についても順次、技術戦略マップやロードマップが策定されていくものと期待している。原子炉出力向上に関する技術体系は今後、これら各技術分野のロードマップに組み込まれ、協調していく必要があると思われる。

高経年化や保全技術の観点からは、原子炉出力向上に伴い、中性子束やプロセス状態値(圧力、温度、流量[流速])などの条件が変わるところをどのようにマネージしていくかが課題である。個々の事象ごとには、十分管理が可能であると考えられるが、技術全体として俯瞰的に見てマネージしていくセンスも必要であろう。米国が80年運転の準備を戦略的に検討し始めているが、原子炉出力向上と運転期間の延長を組み合わせた場合を想定した制度的あるいは技術的な検討も必要とされている。

炉心燃料高度化の観点からは、多くの課題が議論されるべきである。例えば、トピカルレポートという制度をうまく活かしながら新しい燃料の導入に取り組んでいく必要がある。BWRの10×10燃料、PWRの新しい被覆管の開発、さらには炉心燃料の解析技術の高度化などに取り組んでいく必要がある。

原子炉出力向上を総合的に評価する手法としてリスク評価があげられる。今回の特別専門委員会の報告書の中でもリスク評価が取り上げられ、原子炉出力向上によるリスク増は極めて小さいことが示されている。リスクというものをきちんと提示し、説明責任を果たしていくことも必要である。

以上、今回の特別専門委員会報告書を読んで重要と考えられる事項について述べさせていただいた。

(関村直人)

—参考文献—

- 1) NRC Regulatory Issue Summary 2007-24.
- 2) H. Sato, N. Furuichi, Y. Terao, M. Takamoto, "Uncertainty examination of new water flow calibration facility for nuclear power application," *Proc. 2006 ASME Joint U. S.*

-*European Fluids Engineering Summer Meeting*,
Florida, USA, July 17-20, 2006, #98500, (2006).

- 3) M. Mori, Y. Takeda, T. Taishi, N. Furuichi, M. Aritomi, H. Kikura, "Development of a Novel Flow Measuring System using Ultrasonic Velocity Profile Measurement", *Exp. Fluids*, **32**[2], 153-160(2002).
- 4) D. S. Weaver, G. O. MacLeod, *Entrance Port Rounding Effects on Acoustic Resonance in Safety Relief Valves*, PVP-Vol. 389, Flow Induced Vibration-1999, ASME, (1999).
- 5) 発電用原子力設備規格 沸騰水型配管減肉管理に関する技術規格 JSME S NH1-2006.
- 6) W. Kastner, R. Riedle, *Empirisches Modell zur Berechnung von Materialabtagen durch Erosionskorrosion*, VGB-Kraftwerkstechnik 66, 12, 1171-1178(1986).
- 7) 「超音波流量計に関する技術検討評価」最終報告書, 原子力学会「原子炉出力向上に関する技術検討評価」特別専門委員会, 平成19年10月.
- 8) 「原子炉出力向上の安全性に関する技術検討評価」最終報告書, 原子力学会「原子炉出力向上に関する技術検討評価」特別専門委員会, 平成19年10月.

著者紹介

岡本孝司(おかもと・こうじ)



東京大学
(専門/関心分野)原子炉熱流動, 可視化環境学など

木倉宏成(きくら・ひろしげ)



東京工業大学
(専門/関心分野)原子炉熱流動, 熱流体計測工学など

山口 彰(やまぐち・あきら)



大阪大学
(専門/関心分野)原子炉熱流動, 原子炉工学など

三島嘉一郎(みしま・かいちろう)



京都大学
(専門/関心分野)原子炉工学, 中性子ラジオグラフィーなど

関村直人(せきむら・なおと)



東京大学
(専門/関心分野)システム保全学, 原子力材料, 材料・環境相互作用など

我が国の最先端原子力研究開発

シリーズ解説 第6回

量子ビームが切り拓く未来(II)

バイオ・環境・エネルギーに貢献する
荷電粒子・RI 利用研究

日本原子力研究開発機構 南波秀樹, 田中 淳, 伊藤久義

前回の解説では近年、技術革新のキーテクノロジーとして世界的に注目されている量子ビームの応用研究の概要について紹介した。ガンマ線、電子線やイオンビームを用いた荷電粒子・RI 利用研究は、量子ビームの利用の中でも最も長い歴史を持ち、学術研究分野はもとより、工業、農業、医療活動の幅広い分野において、様々な形で利用されている¹⁾。本稿では、この荷電粒子・RI を用いたバイオ技術・医療応用・環境・エネルギー分野での研究開発を紹介する。

I. 荷電粒子・RI 利用の原理と応用

ガンマ線、電子線、イオンビーム等の量子ビーム利用の原理は、大別すると、(1)量子ビームの持つエネルギーを物質(被照射物)に与える【エネルギー付与】、(2)量子ビームの持つ物質を被照射物に導入する【物質付与】、(3)量子ビームの持つエネルギー・質量を被照射物の構成元素に与え異なる原子を作る【核変換】に分けられる。

エネルギー付与は量子ビーム利用の中で最も広く用いられており、高効率で選択的にエネルギーを物質に与えることのできる特長を利用している。電子線・ガンマ線を用いた高分子材料の改質・機能付与等はこの例である(第1図)。物質に与えられたエネルギーは、反応性に富んだイオンやラジカルなどの「活性種」を生成させる。高分子の材料中では、この活性種を起点として高分子同士が「橋かけ」を起こし、材料の耐熱性や強度を高めることができる。ラジアルタイヤや電線ケーブル等は、この橋かけを利用して作られている。この活性種にモノマーと呼ばれる化合物を反応させると、元の高分子にはなかった性質を「接ぎ木」のように与えることができる。

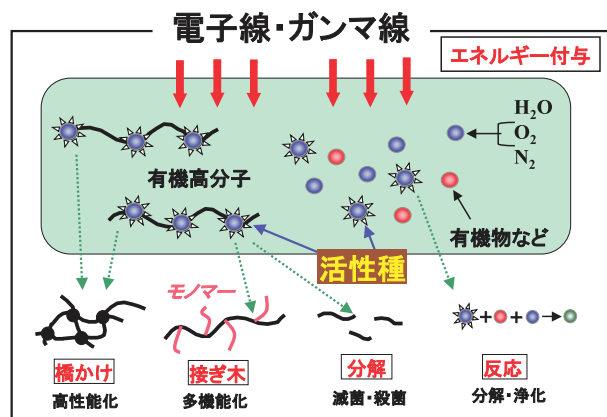
ボタン型電池の隔膜やLSI 製造用の空気浄化フィルタはこの接ぎ木の例である。この活性種は、高分子の鎖

Quantum Beams Open up the Future(II) : Hideki NAMBA, Atsushi TANAKA, Hisayoshi ITOH.

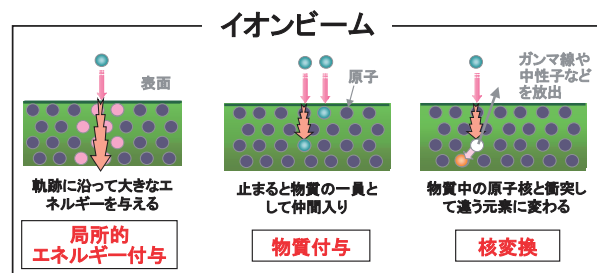
(2008年 10月22日 受理)

を切るのにも使われる。潤滑剤に添加するテフロン[®]の微粉末はこの分解を利用している。放射線滅菌・殺菌は、生物のDNA をこの活性種で切断している例である。

イオンビーム照射でもエネルギー付与が利用される



第1図 電子線・ガンマ線の利用の原理



第2図 イオンビーム利用の原理

が、イオンビームの場合は、電子線やガンマ線よりもさらに局所的にエネルギーを与えることができる(第2図)。近年、注目を浴びている重粒子線によるがん治療や新品種の植物作出はその例である。イオンビームを用いた物質付与は半導体の製造等に広く用いられている。また、高エネルギーイオンビームを用いた核変換はポジトロン放出核種の製造等に用いられており、ポジトロン断層法(positron emission tomography:PET)によるがん診断等、最近の核医学の診断・治療に欠かせないものになっている。

Ⅱ. 世界の研究開発の現状

荷電粒子・RI利用は、医学、農業、工業、環境と多岐にわたり、活発な研究開発が行われている。

医学利用では、放射性薬剤による画像診断や放射線治療のための研究開発が最も盛んに行われている。テクネチウム^{99m}Tcは、核医学診断で最も多く利用されているRIであるが、近年、製造元の原子炉の老朽化や新設中止により輸入困難が危惧されており、各国での自給自足体制の確立が急務となっている。また、がんの診断法として世界的に有用性が認められている¹⁸F標識グルコース薬剤(¹⁸F-fluorodeoxy glucose:FDG)を代表とするPET検査では、ポストFDGの開発に期待が寄せられている。

放射線治療のうち、RIの内用治療では、欧米が先導する形で治療用核種の医療承認が進められており、我が国でも、昨年度、イットリウム⁹⁰やストロンチウム⁸⁹で標識した放射性薬剤の承認が認められたところである。体外照射による治療では、陽子線や炭素線等の粒子線治療が注目されてきており、我が国をはじめ、ドイツ、イタリア等の欧州各国、米国、中国等で施設の建設計画が相次いでおり、同時に細胞レベルでの応答機構解明研究も進められている。

農業利用では、食品照射や放射線による不妊虫放飼法による害虫駆除、また突然変異育種による品種改良などが行われてきた。中でも突然変異育種研究は、近年、FAO(国際連合食糧農業機関)/IAEA(国際原子力機関)の共同プロジェクトでも大きく取り上げられ、アジアを中心として世界で2,500種以上の品種改良が行われており、日本は世界で第3番目の突然変異育種大国となっている。さらに我が国では、世界に先駆けてイオンビームによる突然変異育種技術を開発し、国内では100を越す研究グループが研究開発を行っているとともに、東南アジアを中心に世界各国から注目を集め始めている。

工業利用分野では、産業応用、競争力強化の観点から、半導体をはじめとする機能材料の開発が大きなウェイトを占めており、極浅イオン注入、電子線リソグラフィ、反応性イオンエッチング等、微細加工手段としてイオン

ビームや電子線の果たす役割は極めて大きい。一方、半導体の信頼性評価手段としても荷電粒子の利用価値は高く、宇宙環境模擬の観点から、高エネルギーイオンビームや電子線を用いた劣化・誤作動評価が日米欧で精力的に行われ、半導体の信頼性向上に活かされている。

環境分野では、地球温暖化や資源枯渇の問題がクローズアップされる中、環境保全・浄化やエネルギー・資源セキュリティに係る研究開発が積極的に推進されている。水素エネルギー利用の切り札となる水素燃料電池の開発は世界的に競争が激化しているが、その中核をなす固体高分子形電解質膜の性能向上が頭打ちになっており、新たな技術創出が期待されている。このひとつとして、電子線やガンマ線による橋かけやグラフト重合等の放射線化学反応の活用が注目され、我が国のほか、欧州やアジア、特にスイスや韓国で精力的に研究が進められている。

放射線による高分子加工では、近年、植物由来の材料の焼却・堆肥化で発生する二酸化炭素は、光合成で大気中から植物に取り込まれた炭素に由来するものであり、大気中の炭素量は差し引き変化せず、地球温暖化につながらないというカーボンニュートラルの観点から、植物由来のセルロースやデンプン、海洋多糖類であるカラギーナン、キチン、キトサンを利用した新材料開発が盛んに行われている。IAEAの共同研究プロジェクト(CRP)としても採択され、「農業、医療、工業、環境への応用をめざした天然高分子の放射線加工品の開発」が進められているほか、アジア原子力地域協力協定(RCA)プロジェクトやアジア原子力協力フォーラム(FNCA)でも重要視され、天然高分子の放射線加工・実用化促進は大きな流れとなっている。

環境浄化技術関連では、電子線を用いた排煙脱硫・脱硝技術は我が国で開発され、中国、ポーランド、ブルガリア等、海外で実用化が進められている。最近では、塗装印刷や化学製品製造工場からの排ガス中に存在する揮発性有機化合物(VOC)が問題視され、我が国や韓国、ルーマニアでは、電子線・触媒併用除去プロセスの開発が精力的に行われている。電子線を利用した排水処理は、韓国で実規模レベルの処理装置が稼働しており、ブラジルではトリクロロエチレン等の有機ハロゲン化合物を含む排水の処理試験が実施されるなど、排ガス・排水処理にはますます関心が高まっている。

Ⅲ. 荷電粒子・RI 利用研究

我が国では多くの大学、研究機関、民間企業において、荷電粒子・RIを利用した幅広い研究開発が進められているが、本章では、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所で進めているイオン照射研究施設TIARA、電子線、ガンマ線照射施設を用いた、バイオ技術・医療応

用、環境・エネルギー分野の研究開発について紹介する。

1. バイオ技術・医療応用に貢献する研究開発²⁾

バイオ分野への利用研究では、イオンビーム、ガンマ線などを用いて食糧資源の確保や環境保全、また医療に役立つ研究開発を行っている。放射性抵抗性細菌デインコッカス・ラジオデュランスは、大腸菌の100倍以上、ヒトの1,000倍以上放射線に強い。この優れた耐性メカニズムを解明する過程で、他の微生物にはない、新しいタンパク質 PprA (Pleiotropic protein promoting DNA repair「DNA 修復を促進する多面的タンパク質」) に由来) が切れた DNA 鎖を認識して結合し、DNA の修復を非常に効率よく行う機能があることを発見した。この PprA を用いた遺伝子工学試薬は、DNA 結合所要時間を32倍短縮できるため、2005年に実用化された。今後さらに、遺伝子診断や新薬等の開発に役立つことが期待される。

イオンビームを用いた突然変異研究では、変異率がガンマ線等に比べて高く、新しい変異体が高頻度で誘発されるという特徴を見出した。この特徴を利用して、民間や公的研究機関等との共同研究を行い、遺伝子資源や実用的な新品種の開発を進めている。最近では、植物初の紫外線耐性遺伝子や植物ホルモンオーキシン関連遺伝子の同定に成功した。また鹿児島県との共同研究による無側枝性の輪ギク品種の実用化に成功し、全国で30を越す農協団体等が栽培を行っている。地元群馬県との研究協力による新花色のオステオスペルマムや、広島大学との協力で親株よりも二酸化窒素を40~80%以上吸収する環境浄化用ヒメイトビが育成された(第3図)。

¹¹C 等のポジトロン放出核種を利用したイメージング技術を開発して植物の生理機能を解明し、食糧確保や環境保全に貢献する研究も進めている。最近では、米や野菜等のカドミウム汚染低減化を目指し、TIARA のイオ

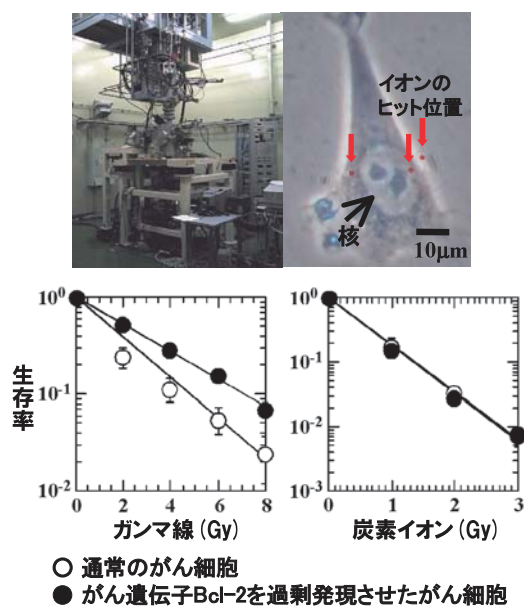


第3図 イオンビーム育種技術を用いて開発した新品種

ンビームを用いて¹⁰⁷Cd を新たに製造してイネ植物体内での動態解析を行った。Cd は1時間以内に茎に達するものの、葉への移行は量も少なく、数時間以上を要した。現在、稲穂や米への移行・蓄積の解析を進めている。¹⁰⁷Cd のほかに、¹¹CO₂, ¹³NO₃⁻, ¹³NH₄⁺, ⁵²Fe²⁺, ⁶²Zn²⁺等が利用可能であり、植物体内の栄養物質や有害物質の動態解明に役立っている。

重イオンは、重粒子線がん治療や宇宙放射線影響として最近注目されつつある。世界に先駆けて炭素イオン等の重イオンをマイクロビーム化させ、生きた細胞に照射し、その影響を調べた。特に顕著な結果として、重イオンによるバースタンド効果を見出した。これは、1つの細胞に重イオンが当たると、その細胞の周りにある細胞が、自分も当たったかのように反応し、アポトーシス(細胞の自殺)などを起こす現象である。最近では、群馬大学医学部と協力して、がん遺伝子 Bcl-2 が高発現し、ガンマ線や X 線では死にくいがん細胞にも重イオンは効果的に働くことを発見した(第4図)。

近年、PET で用いられている¹⁸F-FDG は、がん診断用薬剤として普及しているが、さらに新しい RI として、⁶⁴Cu、⁷⁶Br や¹⁷⁷Lu 等が期待されている。群馬大学と協力して、がん特異的抗体等にこれらの RI を標識することによって、狙ったがん組織に RI を輸送し、診断や治療を行う、いわゆる RI-DDS (ドラッグデリバリーシステム) の構築を目指している。これらはまだ実用段階に至っていないが、様々な疾病の診断や治療に役立つ最先端技術であり、その将来性への期待は大きいものがある。



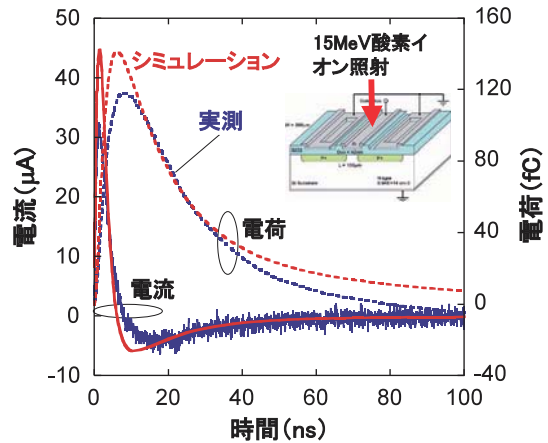
第4図 マイクロビーム細胞照射装置による細胞へのイオン照射(上)とがん細胞へのガンマ線と炭素イオン照射効果の比較(下)

2. 環境・エネルギー分野に貢献する研究開発³⁾

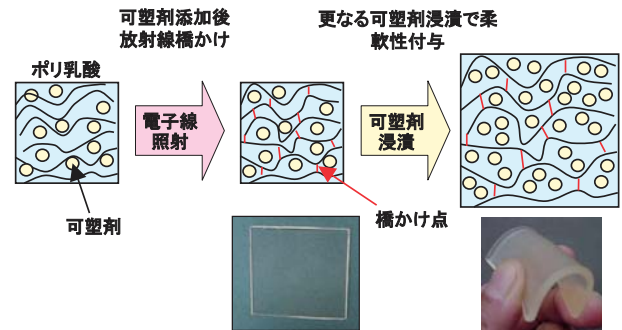
環境・エネルギー分野における新機能材料創製の一環として、水素エネルギー利用を促進するため、燃料電池用電解質膜の開発を推進している。家庭向け燃料電池用電解質膜の開発では、要求される80℃以上での高い耐久性と導電性を達成するため、芳香族炭化水素系高分子のポリエーテルエーテルケトン(PEEK)を基材とする電解質膜開発を進めた。これにより、熱グラフト重合で膜内にあらかじめジビニルベンゼン分子を導入し、これを足場にガンマ線によるグラフト重合反応を進行させ、イオン導電性を有するスルホン酸基を導入する技術を編み出し、世界に先駆け高温で高い導電性と耐久性を併せ持つ電解質膜の開発に成功した。さらに、開発膜を用いて燃料電池セルを組み上げ、発電試験を実施した結果、温度95℃、湿度40%条件で250時間安定に作動し、市販フッ素膜を凌ぐ高い性能が確認できた(第5図)。この結果は、家庭向け燃料電池の実作動条件(温度80℃、湿度80%)では4万時間安定に運転できることに相当し、電解質膜の要求性能をクリアしていることが実証できた。今後は産業界と連携し、実用化を目指す計画である。

また、原子力水素製造や水素純化・利用に役立つ水素分離フィルタの開発を目的に、電子線を用いて多孔質アルミナ基材表面に炭化ケイ素(SiC)セラミック薄膜を形成する研究を進めている。基材へのケイ素高分子溶液塗布条件の検討を行い、塗布、照射、焼成のプロセスを繰り返して積層薄膜を形成し、水素分離特性を調べた結果、ピンホールのない水素分離膜特有の分子ふるい効果が確認され、高品質 SiC 薄膜の形成技術が開発できた。

半導体分野では、宇宙等の極限環境での半導体の耐久性・信頼性評価技術の確立を目指した放射線劣化予測モデルの構築研究を展開している。この一環として、高エネルギー重イオンによる集積回路の誤作動・故障予測に必要なトランジスタの放射線誘起電流シミュレーション技術の開発を行い、酸化膜・半導体界面の電界変動に起因する変位電流の効果を取り込むことで、実験で得られた放射線誘起電流を再現でき、開発手法の妥当性が検証できた(第6図)。また、宇宙航空研究開発機構と共同で宇宙用半導体の耐放射線性評価を進め、これに基づき人



第6図 高エネルギー重イオンによりトランジスタ内に誘起される過渡電流および電荷の実測およびシミュレーション結果

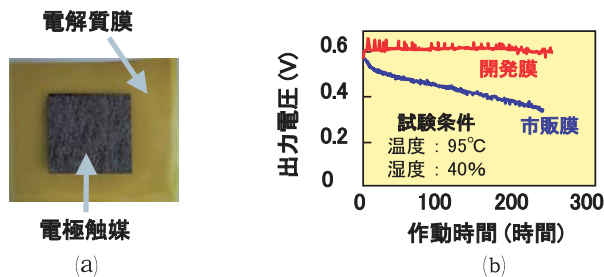


第7図 柔軟性のあるポリ乳酸の開発

工衛星搭載部品の開発が行われ、月周回衛星「かぐや」に実装される等、我が国の宇宙開発に寄与している。

環境浄化・保全に役立つ生分解性高分子の開発では、植物由来のポリ乳酸の産業応用を目指し、耐熱性等の特性改善を進めた。ポリ乳酸に橋かけ助剤および二酸化ケイ素を添加して電子線で橋かけ後、熱処理して微結晶を形成した結果、70℃での熱変形特性を約100倍向上でき、実用化への道筋を付けた。さらに、硬くて脆いポリ乳酸の欠点克服に取り組み、電子線橋かけと可塑剤浸漬の組合せで弾性を発現・保持できることを見出し、柔軟性のあるポリ乳酸を世界で初めて開発して(第7図)、応用分野を拡げることができた。この研究をさらに進展させることで、石油系プラスチックに代わる優れた植物由来プラスチックの広範な普及が期待される。

大気中有害汚染物質の処理技術の開発を目的に、トルエンやキシレン等のVOCを電子線と触媒を併用して分解・無害化する研究を進め、VOC分解率が電子線の加速電圧により異なることを明らかにし、実用化に有効な可搬型低エネルギー加速器を用いたVOC処理プロセス開発への技術的指針を得た。これに基づき現在、VOCを含む実規模流量ガスの処理システムの構築を進めている。



第5図 開発したPEEKを基材とする電解質膜の発電試験；
(a)試験用に組み上げた膜・電極接合体、
(b)発電試験結果

—参考資料—

- 1) 南波秀樹, 他, 「放射線の世界2008」第5章放射線利用の最前線, 原子力文化振興財団, (2008).
- 2) 田中 淳, “生活の中の放射線利用—生命科学・農業へのイオンビーム利用”, FBNews No.375, 1~5 (2008).
- 3) 伊藤久義, “生活の中の放射線利用—工業利用”, FBNews No.374, 1~6 (2008).

—著者紹介—

南波秀樹(なんば・ひでき)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 放射線化学

田中 淳(たなか・あつし)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 放射線遺伝学

伊藤久義(いとう・ひさよし)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 材料科学/量子ビームによる機能材料創製, 環境技術開発

新刊紹介

事例に学ぶ流体関連振動 第2版

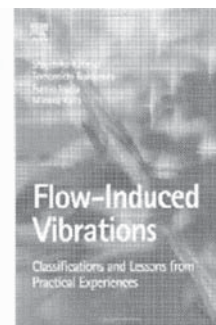
日本機械学会編, A5判, 365 p. (2008.6), 技報堂出版.
(価格 4,620円税込) ISBN 978-4765532624

Flow Induced Vibrations : Classifications and Lessons from Practical Experiences

Shigehiko Kaneko, Tomomichi Nakamura, Fumio Inada,
Minoru Kato, 284 p. (2008.6), Elsevier.
(価格 USD 150.00) ISBN 9780080449548

原子力プラント機器・配管の健全性を阻害する根本要因の一つは、流れと構造物や音響系が連成して発生する流体関連振動であり、世界中の様々な研究機関で基礎から実機規模まで幅広く研究が行われてきた。また流体関連振動の問題は、1960年ごろからプラントの大容量化、高速化などに関係した振動・音響問題が顕在化したころから日本でも関心を持たれてきた。

日本機械学会編の書籍『事例に学ぶ流体関連振動』は、日本機械学会内に1984年以来設置されている、流体関連振動の研究情報を調査するための研究会(FIV研究会, FIVはFlow Induced Vibrationの略)で調査した文献をベースとして取りまとめたものである。2003年に発刊した初版では、概論、直交流れによる流体励起振動、外部平行流による振動、管内流による振動、管内の圧力波による振動、熱に起因する振動の6章構成であったが、このたび、回転機械の関与する振動、流体・構造連成系の振動の2章を加えて全8章構成とし、実



際のプラントシステムや各種機器・配管で発生する流動励起振動現象を体系立てて、現象全体を網羅する形を整えた。

また、第1版の内容をベースとして、日本機械学会と技報堂出版の了解の元、Elsevierより英文版も発刊し、世界に向けた情報発信もすることとした。

本分野は原子力発電における様々な事例と関連が深く、温度計ウエル破損は第2章2.1節の直交流れ中の単一円管の振動の節で、蒸気発生器U字型伝熱管破損は2.3節の直交流れ中の複数円管の振動の節で、低圧タービンの動翼の破損は第7章7.1節の回転体の翼・翼列の振動の項で、地震時の使用済燃料貯蔵設備からの溢水は第8章8.3節のスロッシングの項で解説している。

本書の特徴は、基礎的な事項の整理と事例紹介をセットにした記述にあり、エンジニア、設計者がいざという時に過去の事例を引き出せる豊富な参考文献に基づいた対策のデータベースとなる。また、規格技術者、大学院生にとっては系統的な理解に役立つ書物である。

(電力中央研究所・稲田文夫)

複雑な流路における流れの解明 燃料集合体内の流動計測/評価技術の進展

ニュークリア・デベロップメント(株) 池田一生, 三菱重工業(株) 星 雅也

CFD(数値計算による流体解析)は非常に便利なツールであるが, 適切な検証を行うことが重要である。PWR 燃料バンドル内の複雑な流れに対して, 模擬燃料棒(以下, ロッドと呼ぶ)に組み込んだレーザードップラー流速計を用いた精密な流速分布測定による検証試験と, CFD解析を組み合わせた評価手法を開発した。この手法により, スペーサグリッドの熱流体的性能の信頼性の高い定量的推定を可能とし, 紙と計算機上のデータである多数の仮想的試作のうちの限られたケースだけを実験で確認しながら, 高性能スペーサグリッドの開発に成功した。この開発手法は, 実験では測定し得ない多くの熱流体パラメータの定量的把握をCFDにより行うことで, 開発時の予測性を確保し, 開発プロセスの時間的, 費用的合理化をも可能とした。

I. はじめに

CFDは広く産業界で使われており, いまやCFDなしでは流体を扱う機器の性能向上や信頼性向上を望めないとなってきた。原子燃料の分野においてもCFDの活用が進んでいる。著者らが勤務する企業では, 高燃焼度, 高出力負荷に耐える高性能燃料集合体, とりわけ, その構成要素のなかでも重要な役割を持つ高性能なスペーサグリッドの開発を行ってきた。このようなプロジェクトでは, 最終的にスペーサグリッドの流動的・熱的性能を確認するために, 実寸大の模擬燃料集合体を用いた流水試験による圧力損失(流動抵抗)測定や, 高温高圧条件でのDNB(核沸騰限界出力)試験を実施するが, これには相当の期間と多額の費用を要する。開発段階で考案される多数の形状のひとつひとつに対して, このような実験だけに頼って最適な設計を求めていくことは容易ではない。

そこで著者らのグループでは, CFDを最大限に活用することで開発段階での実験ケース数の増加を抑え, 圧力損失やDNB特性を推定しながら仮想的試作を繰り返して, 開発の期間や費用を合理的なものとする取組みを行ってきた。すなわち, そのプロセスでは, 紙と3次元CAD, CFDという計算機上のデータとしてのみ存在したいくつもの試作ケースがあり, そのなかの限られたケースだけが実際の試験供試体としての形を得ることになった。多数の燃料棒を配列して構成される燃料バンド

ル内の流路で, スペーサグリッドにより攪拌される流れに対し, 適切に検証されたCFDに基づいたこのようなプロセスを適用したことの副次的産物として, 実験では測定できない多くの熱流体パラメータを把握することもできた。これにより, 実際の試験供試体を製作する前に, 圧力損失やDNB特性の定量的な見通しを確認しながら設計を確定していくことができた。

この取組みはCFDと流動計測を組み合わせ, 両者が互いに補完しながら開発プロセスの最適化を相当程度に達成したものである。この取組みの過程では, 燃料バンドル内の狭い流路内の流速を正確に測定するため, 数年間にわたる技術開発を行い, 多くの関係者が創意工夫と努力の積み重ねを行ってきた。上記の開発の取組みのうち, 流動計測に関する部分をまとめた論文3編により, 第40回(平成19年度)日本原子力学会賞(技術賞)『ロッド内蔵型レーザードップラー流速計による燃料ロッドバンドル内乱流流速場の計測』を受賞した。

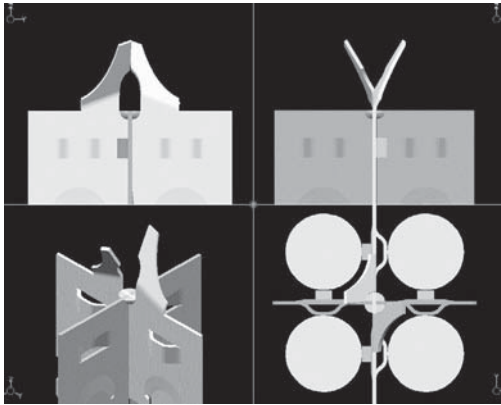
II. 流動計測装置

1. 開発要件(計測装置に求められるもの)

第1図は今回の取組みの成果として開発されたスペーサグリッド模式図である。PWRの燃料棒バンドル部では, 一般に第1図に示すようなスペーサグリッド上端にある主流に対し, 約30°に折り曲げられた一对のミキシングバーにより旋回流が発生し, 下流側で徐々に横流れに変化していくという複雑な流速場を形成している。そのため, ミキシングバーやグリッドの形状は, 重要な特性である圧力損失やDNB性能に大きな影響を持っている。したがって, スペーサグリッド開発には, 形状変更によるロッドバンドル内の流速分布や圧力分布, 温度分布などの変化を精度良く予測する必要がある。

Clarification of Flow Characteristics in Complex Flow Channel; Development of Velocity Measurement and Analytical Technique in PWR Fuel Rod Bundle: Kazuo IKEDA, Masaya HOSHI.

(2008年 9月3日 受理)



第1図 スペースグリッド模式図

従来の開発手順は、新しい形状のスペースグリッドを試作し、圧力損失やDNB特性に関する性能試験を繰り返す方法をとっていた。この場合、グリッドの試作は月単位の期間が必要であり、圧損試験/DNB試験はさらに数ヶ月単位の時間と多額の費用が必要であった。当時の問題点を以下に示す。

- (1) 供試体製作/試験実施による開発期間と費用の増大
- (2) 試験結果を解釈し、設計を行うための評価手法が不十分であり、大幅な設計変更が困難(マイナーな形状変更のみ可能)

近年、計算機能力の向上に伴い、CFDは原子力産業界でも様々な分野で幅広く用いられている。CFDは計算機環境さえ整えば誰でも利用することができ、答が得られるが、その答えが妥当であるか?ということは別問題である。この点を解決しなければ、設計や開発に用いることは非常に危険であるため、解析結果を検証するための実験データが重要になってくる。しかしながら、燃料集合体内の流路は狭くて細長い(燃料棒間の最小ギャップ約3mm、軸方向に約4m)チャンネル構造であり、流動計測が難しい体系である。燃料集合体流路での計測項目として、圧力分布測定やロッド表面熱伝達率測定などがあるが、数多く実施されているものとして、PIV(粒子像流速計)やLDV(レーザードップラー流速計)を用いた流動計測がある。後者は測定データが1次元(点)であるのに対して、前者は2次元(平面)の流速場情報が得られるため、近年はPIVが盛んに用いられる。ただし、定量的な速度の情報はLDVの方が正確である。著者らは次の観点より、LDV計測を選択することとした。

- (1) ミキシングベーン後流側の流速分布を定量的に求めて、形状変更による流速場への影響を評価する
- (2) 計測した流速分布を良好に再現する3次元流動解析モデルを構築し、別途試験により妥当性検証を行う
ただし、従来型LDVは燃料集合体の外側から計測を行うため測定対象範囲が限定されることや、測定ボリュームが大きく狭い燃料棒間ギャップの流速分布を把握することは困難である、などの欠点があった。そこで、これらに留意したLDVを開発することとした。開発要

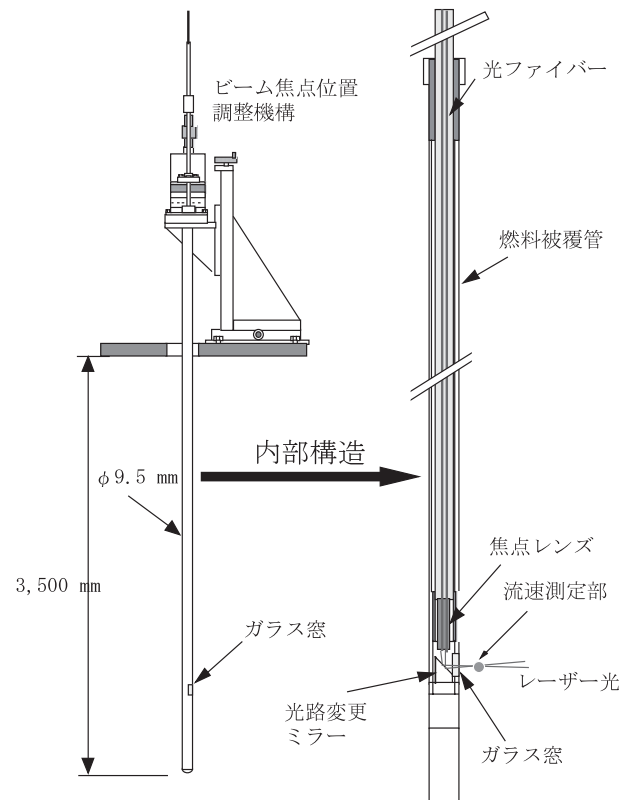
件は次の通りとした。

- (1) 高空間分解能を有すること(微小領域を計測できる)
- (2) 流れを乱さず、任意の位置で計測が可能なこと

上記の観点より、燃料被覆管の内部にファイバLDVヘッドを挿入する構造とした(以下、ロッドLDVと呼ぶ)。外径が燃料棒と同一であるため、バンドル内部の流況に影響を与えることがなく、また燃料集合体内の任意の燃料棒と入れ替えることで任意の位置での流動計測を行うことが可能となった¹⁾。

2. ロッドLDV

第2図にロッドLDVの模式図を示す。燃料被覆管(外径 ϕ 9.5 mm)内に3本の光ファイバ(レーザー射出用2本/信号受光用1本)が内蔵され、下端にレーザー光焦点レンズが設置されている。燃料被覆管底部には、レーザー光を流路へ導くミラーを設置し、燃料被覆管を一部切り欠いて、レーザー光および計測信号を通過させるためのガラス窓を設置している。ガラス窓外面は燃料被覆管と同じ曲率とし、流れ場を乱さない構造とした。また、燃料被覆管の上端部には、流路でのレーザー焦点位置を径方向、周方向および軸方向に移動させるための位置調整機構がある。ロッドLDVの開発思想として、燃料棒バンドル内の流路チャンネルが狭いため、空間分解能を高めることに重点を置いた。この観点より、測定長を約1mmとし、燃料棒間ギャップ(3mm)を重複せずに3ポイント測定可能とした。また、光路変更ミラーにあたる



第2図 ロッドLDV 模式図

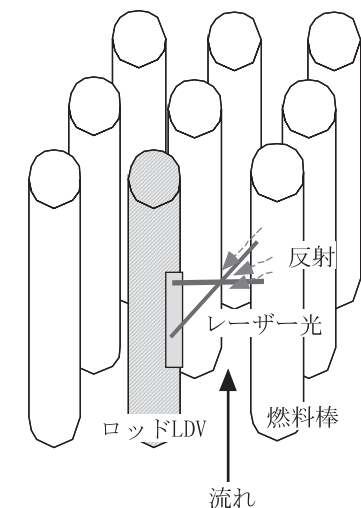
レーザー光の方向を90°回転することで、軸流速(主流方向成分)と横流速(主流に対して垂直断面成分)の両方をそれぞれ測定することができる。

Ⅲ. 流動計測の実際

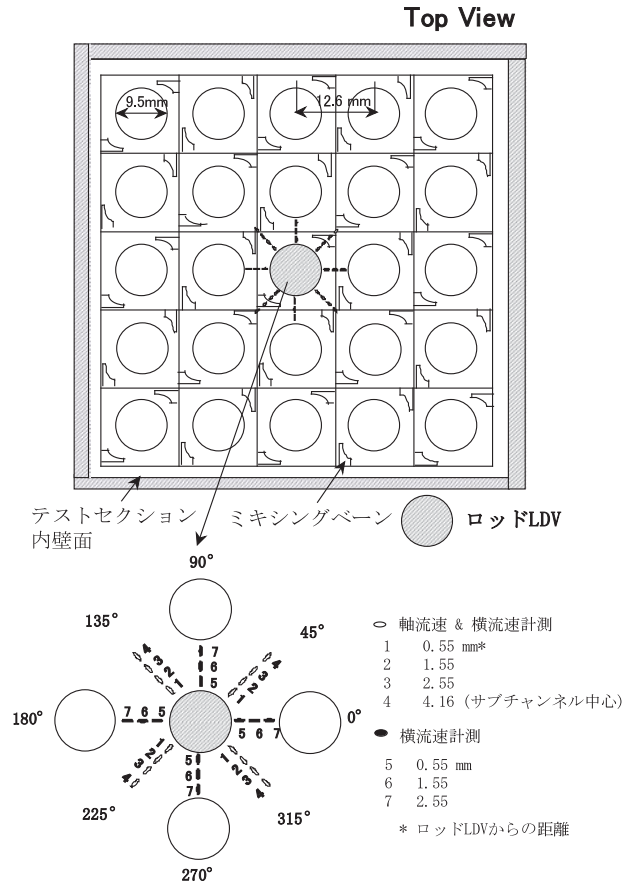
燃料集合体内部流路での計測は、測定流路近傍に多数の燃料棒や案内管が存在するため、第3図に示すように、受光するドップラー信号は周囲のロッドからの乱反射によるノイズ成分を含んだものになる。そのため、ロッドLDV開発初期の段階ではデータがうまく取得できず、データの信頼性が低いことや、1箇所あたりの計測時間が1時間以上かかるなどの問題があった。これらの問題を解決するため、例えば周囲のロッドをアクリルに変更する、などの工夫を積み重ね、最終的には乱反射を抑えるためロッドLDV周囲の燃料棒を黒くペイントすることと、信号処理方法の工夫(専門的なためここでは省略。詳細は参考資料¹⁾参照)を行い、1箇所の計測時間約2~3分、計測の不確かさ約2%の精度で流動計測を実施できるまでに至った。ここまで、開発当初より数年にわたる年月を要した。

このようにして実用化したロッドLDVでの流動計測の例を示す。試験体系は第4図に示すように、5×5バンドル体系の中央にロッドLDVを設置し、スペーサグリッド水平断面位置(90°ごとに、燃料棒間ギャップ3点、対角方向4点)で、グリッド下流軸方向位置6箇所

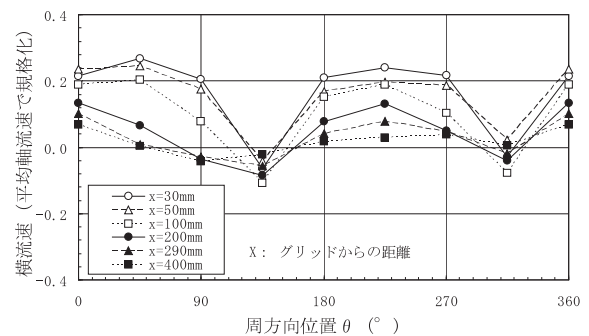
で計測を行った。第5図は、燃料棒(ロッドLDV)表面から約2mmでの横流速計測結果である。この図から、グリッド下流での横流速が、周方向でどのように分布し、また、グリッド下流側でどのように減衰していくかを把握することができる。また第4図に示したとおり、水平断面内はこれ以外の位置でも計測を行っており、バンドル内の位置がわずかに異なるだけでも、横流速分布が大きく異なっていることが確認でき²⁾、定量的な流速分布データを得る



第3図 ロッドLDVによる流速計測



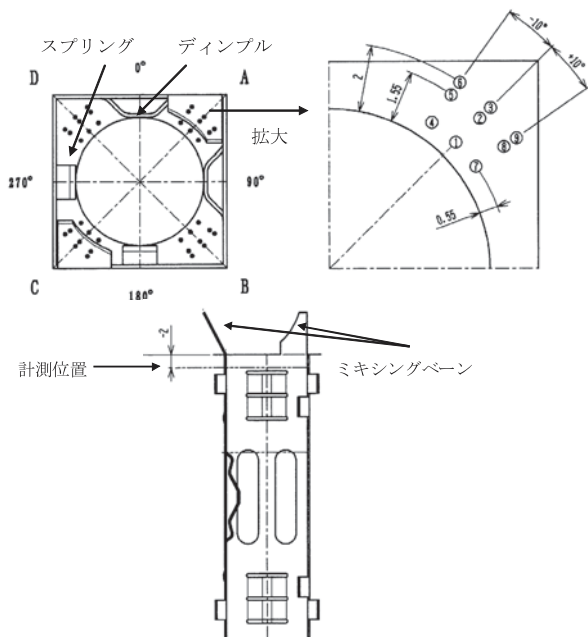
第4図 水平断面内流動計測位置の模式図



第5図 ロッド周りの横流速が軸方向で変化する様子

ことが可能となった。

また、第6図は、スペーサグリッド内部(ミキシングベーンよりも2mm上流位置)での軸流速測定位置の例である(A~D領域:各9ポイント計測)。グリッド内部は、燃料棒を保持するために90°ごとに、スプリングとデンプルという燃料棒支持構造が狭い流路内に設置される。このため流れが複雑であり、これを把握することがグリッド設計上重要である。グリッド内部は通常型LDVではレーザー光を入射できないため計測不能な領域であるが、ロッドLDVでは流速計測が可能である。グリッド内部の流速分布を計測することにより、グリッド内部の流動抵抗の違いによる流量分布を求めることができる。



第6図 スペーサグリッド内部の流速計測位置

第1表 スペーサグリッド内部の流量分布

	平均流量との差分	
	ミキシングペーンなし	A/C位置に ミキシングペーンあり
領域 A	+ 7 %	+ 1 % (6 %減少)
領域 B	± 0 %	+ 2 % (2 %増加)
領域 C	- 6 %	- 12% (6 %減少)
領域 D	- 1 %	+ 9 % (8 %増加)

()内はミキシングペーンなしとの比較

第1表に、グリッド内部軸流速測定結果から評価した領域A~Dでの流量比(平均流量との差分)を示す。同一仕様のスペーサグリッドを用いてミキシングペーン設置の有無で、グリッド内部の流量配分がどのように変化するかを確認した結果である³⁾。ミキシングペーンがない場合、スプリングとディンプルに挟まれた領域であるBとDは流量配分がほぼ同じになっている。一方、下流側にミキシングペーンが設置されると、上流側に影響し、グリッド内部の流量分布が変化している。この効果は、ミキシングペーンや燃料棒支持構造の形状により、異なって現れてくるのがロッドLDV計測により実測データとして初めて明らかとなった。

以上のように、ロッドLDVを用いて、スペーサグリッド内部と下流での燃料集合体流動場を詳細に把握することが可能となり、燃料棒をより効率的に冷却するためのスペーサグリッドの形状検討を進めていった。

IV. 流動解析

1. 解析モデル

燃料集合体内の流路は、スペーサグリッド部や燃料棒

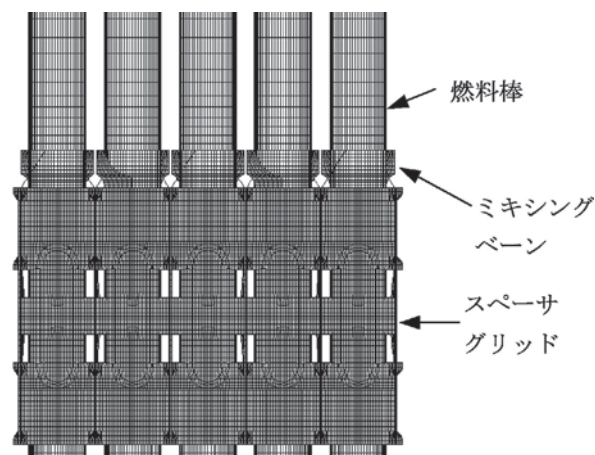
バンドル部など複雑な形状をしており、流動解析ではこれらの形状を精度よく模擬することが重要である。そのため、六面体要素や三角柱要素を自由に組み合わせて流路形状を模擬することができる非構造格子型CFD⁴⁾を用いることとした。解析モデル構築にあたっては、以下の点に留意した。

- (1) 流路部の要素分割方法
- (2) 流動計測結果の再現性

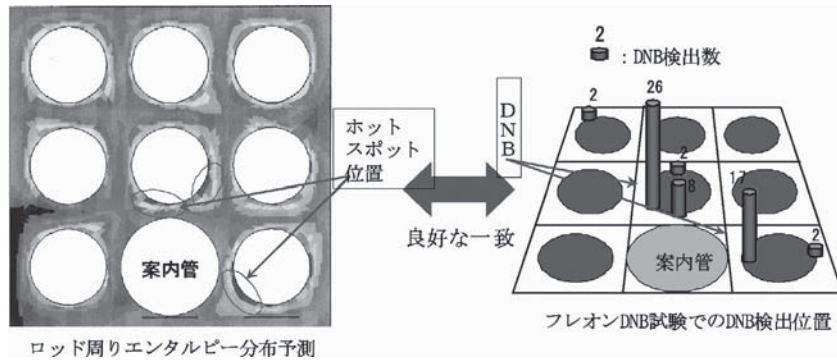
前者は、いわゆるメッシュ分割に関するものであるが、解析精度面から四面体要素は用いずに六面体要素をベースとして、解析要素の縦横比や物体に近接する流体層の分割方法などに注意し、「高品質の要素分割」となるよう留意した。また、ロッドLDVにより取得したスペーサグリッド内部やロッドバンドル部の流速分布を良好に模擬できる、物理モデルや数値計算モデルの組合せと(1)の要素分割方法について十分に検討を行った。(1)と(2)の組合せを繰返し検討した結果、計測した流速分布をほぼ充分と考えられる精度でモデル化することが可能となった。第7図にスペーサグリッド近傍部の要素分割モデル図を示す。

2. 試験データの検証

流動計測結果により解析モデルを構築した後、別の試験データにより、解析モデルの検証を行った。前述したように、スペーサグリッドの最も重要な流動特性は、圧力損失とDNB性能である。まず圧力損失については、数種類のスペーサグリッドを用いて計測を行い、試験を模擬する解析を実施した結果、5%以内の精度で予測できることを確認した。次にDNB性能は、沸騰事象を伴う気液二相流の挙動を評価する必要があるが、現在の汎用CFDは十分な評価機能を有していない。そのため、DNB性能についての絶対値は評価できないが、スペーサグリッド形状による相対的な良否や、ロッドバンドル内のどのロッド位置でDNBが発生し易いかについて検討を行った。一例として、水よりも沸点の低いフロン



第7図 スペーサグリッド近傍部の要素分割モデル



第8図 流動解析でのホットスポット位置とフレオン DNB 試験での DNB 検出位置の比較

を用いた DNB 試験(二相流状態)結果と, 単相流のみを考慮した流動解析結果の比較を第8図に示す。結果として, 流動解析で予測したホットスポット(高エンタルピー)位置は, 案内管に隣接するヒータロッド(2本)の案内管に面した側にあり, フレオン試験で検出された DNB 発生位置と良好な一致が見られる。また, ヒータロッド周囲の局所的なエンタルピーが高いスペーサグリッド形状ほど, 試験で DNB 熱流束が小さい結果となり, グリッド形状による定性的な DNB 特性の良否について, ある程度妥当な判断が可能であった。

このような取組みから, 詳細な流動計測データにより構築した流動解析モデルは, スペーサグリッド圧力損失の絶対値と DNB 特性の相対的な良否を予測するためのツールとして見通しが得られ, スペーサグリッドの大幅な形状変更を扱うことのできる設計ツールとして利用でき, 開発時間の短縮と費用の低減を行うことが可能となった。

V. まとめと将来への展望

著者らのグループは, ロッド LDV により CFD の検証を行うと同時に, 考案したスペーサグリッドの熱流動特性を CFD により定量的に推定しながら開発を進めた。開発の過程で非常に多くのスペーサグリッドが考案され, それらのうち, 有望と判断されたものについて CFD による特性予測を行い, さらに絞り込まれたいくつかのケースについてロッド LDV による流速測定試験やフレオンや水の DNB 試験により DNB 熱流束を測定し, CFD による性能評価結果との直接の比較や特性の相関を調べた。このようにして, 複数のケースで実験との比較の一致や, パラメータ間の相関性を確認した。CFD により自由に流体パラメータが抽出でき, 冷却材の攪拌・混合性能を定量的に評価できるとの感触を得たとき, 開発の現場では, 未だ経験したことのない「予測性を持って開発を進めることができる」という技術的な興奮を感じることができた。CFD はそれに対して適切な検証を得たとき, 設計・開発の強力なツールとなり得ることを実体験した瞬間である。

今回の開発では, スペーサグリッドの重要な特性であ

る圧力損失や DNB 特性の評価を主たる目的として CFD を予測ツールとして適用したが, 結果として多くの熱流体的パラメータが算出された。今後, これらのパラメータの分析を進めることで, 圧力損失や DNB 以外にも, 冷却材の攪拌・混合性能に影響される燃料棒表面の水あか(クラッド)の付着, 燃料被覆管の腐食, 燃料棒の振動摩耗(グリッドフレッティング)などの原子燃料分野の技術的課題の現象解明への道筋がさらに開けてくるものと期待される。

—参考資料—

- 1) K. Ikeda, M. Hoshi, "Development of Rod-embedded Fiber LDV to Measure Velocity in Fuel Rod Bundles", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **43**[2], 150-158(2006).
- 2) 池田一生, 他, "PWR 燃料ロッドバンドル内の乱流流速場に関する研究", 日本原子力学会和文論文誌, **6**[1], 35-45(2007).
- 3) K. Ikeda, M. Hoshi, "Flow Characteristics in Spacer Grids Measured by Rod-embedded Fiber Laser Doppler Velocimetry", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**[2], 194-200(2007).
- 4) *Methodology*, STAR-CD V3.2, CD adapco Group, (2004).

著者紹介

池田一生(いけだ・かずお)



ニュークリア・デベロップメント(株)
(専門分野/関心分野)燃料集合体の開発,
原子炉内の熱流動解析・評価技術の開発

星 雅也(ほし・まさや)



三菱重工業(株)
(専門分野/関心分野)原子炉熱水力設計,
燃料集合体の開発

なぜ「掲載否」と判定されるのか

—論文査読者からのコメント

日本原子力学会 編集委員会

研究成果は公表され、広く活用されてはじめて世界の知的共有財産になります。苦勞して書き上げた論文が「掲載否」となることは、投稿者にとってはもちろんのこと、査読・編集者にとっても大きな損失です。しかし、編集委員会では毎月、かなりの数の「掲載否」論文が報告されています。本記事では、これまでの「掲載否」論文によく見られる論文作成上の問題点を抽出し、査読者の視点から完成度および信頼性の高い論文を執筆するためのポイントをまとめました。

I. はじめに

最近、日本原子力学会論文誌への投稿数が増えており、編集委員会としては喜ばしい限りなのですが、残念なことに投稿原稿のうちの約20%が掲載否となっております。しかもその数は漸増の傾向にあります。掲載の可否は新規性および有用性並びに信頼性に加え、その内容が読者に理解できるように、簡潔、明瞭かつ平易に記述されているかどうかの論文の完成度からも判断されます。

投稿者は、「投稿規程」、「投稿の手引」、「論文審査要領の概要」を参照されていることと思います。完成度および信頼性の高い論文作成の際の一助として、以下に査読者の視点、査読者はどこを見ているか、をまとめました。この一文が、優れた研究成果の円滑・迅速な公表に結びつくことを期待します。

II. 論文の完成度と信頼性

1. 完成度の高い論文とするには

(1) 読者の立場に立って書いていますか？

著者の主張が読者に正しく伝わるのが最も重要です。一般の読者は、著者のようには論文中の解析・実験などの過程について十分な知識を持っていません。読者への配慮不足により無意識のうちに説明を省略し、論理の飛躍を招くと、読者に極めて不親切となり、誤解を招きやすくなります。逆に、説明過多になると、情報の正確な伝達の妨げになります。これは、なかなか難しいこ

となのですが、読者の立場に立って、全体の構成および表現が適切であるようにすべきです。

(2) 筋道立った表現となっていますか？

論文の種類・性格にもよりますが、通常は、序論(先行研究の評価、研究の目的と意義)、研究の具体的な方法や手段(分析の枠組や理論モデルの提示、実験または調査方法)、得られた結果、結果の検討および考察、結論、引用文献、の順に書き進められます。全体にわたって筋道を通すように心掛け、簡潔に文章を整理することにより、著者の考え・ぜひ伝えたい情報・論文の要点が明確に伝わるようになります。

2. 信頼性のある論文とするには

以下のような内容を含む論文が信頼性のある論文と考えています。

- (1) 他者による追試の可能性を保証できるだけの情報を含んでいる。
- (2) 自分がした仕事と他人の仕事を明確に区別している。著者の実施した研究とそれに関連した既往の研究との位置づけ、内容の新規性、有用性、創意性がどの部分にあるかが記述してある。例えば、理論・実験方法・実験結果などについて、従来の考え方、手法、結果と比べ、どのような点がユニークなのかあるいはどの部分を発展させたのかが示されている。
- (3) データを示す場合には、実験や解析の条件を記述し、どういう誤差があり得るか、データの精度はどれだけかなどが定量的にわかる。
- (4) 論文の前提となる仮定や条件の妥当性について十分検討し、導出された結論に一般性のあることを明らかにしている。また、どういう条件のもとでその結論が成り立つものかを記述している。著者が自明と考えていることでも、一般的でないことはきちんと

Why the Submitted Manuscript Judged as REJECTED ; Advice from Reviewers to Improve Your Manuscript : AESJ Editorial Committee.

(2008年 10月 1日 受理)

と記述している。

- (5) 重要な文献が引用・評価され、公平・適正な結論を導いている。非公開文書および入手が極めて困難あるいは著者しか知りえない情報は、参考文献として挙げていない。

Ⅲ. 「掲載否」論文の問題点

掲載否の通知を受け取ると、査読者の能力不足で自分の研究成果がわからない、と査読者を批判非難したくなるかもしれません。しかし、査読者は自分も投稿論文を書き、投稿者の気持ちを理解している方々です。経費、人材、時間という共有財を使って得た研究成果を世界的共有財産とするため、迅速に評価し公表したいと願いつつ、査読していますが、論文誌の質を維持するためには、掲載否と判断せざるを得ない場合があります。

以下には、これまでの掲載否論文においてよく見られる問題点をまとめました。これらの事例を反面教師として受け止め、これらと正反対の方向を目指して原稿を作成していただければ、必ず内容ある完成度および信頼性の高い論文が出来上がるものと期待しています。

(1) 研究の意義が不明である。

- ① 何を主張し、何を知らしてもらいたいのか、研究の重点・目的と成果が明確でない。
- ② 論文の内容の、何が新しいのかわからない。既往の研究との関係が不明確である。
- ③ 多少の有用な結果を含んではいるが、独立の論文としての価値は認められない。
- ④ 既発表または既知のことから容易に導き得る内容がほとんどである。または、通説が述べられているだけで新しい知見がない。
- ⑤ 新たに購入した装置の取扱説明書のような内容である。
- ⑥ 私的な興味による色彩がきわめて強い、あるいは政策的な意図、宣伝の意図が強く、知的共有財産とは考えられない。

(2) 論理展開が不十分である。

- ① 論文の筋道が整理されていない。特に、章の構成が整理されていない。(論文作成前に、各章で書くべきことを書き出し、フローチャート形式にまとめることを薦めたい。)
- ② 根拠なく推定に基づいた記述をしている。単なる自説の主張や、独断的な記述をしているだけでその主張を裏付ける根拠がない。
- ③ 客観事実と自身の主張点とを混同して記載しているものがある。どこまでが事実で、どこからが主張・自分の考えなのか、について明確に区分して記載すべきである。
- ④ 主張の論拠として、自身が過去に書いた査読付き

ではない文献(エッセイ等)を引用している。この場合、主張の論拠を再度記述してあらためて査読の対象とすべきである。文献引用をもって論拠に代える場合は、査読付き論文の引用に限定すべきである。

- ⑤ 社会的事象を取り扱った論文で、独善的あるいは普遍性を持ち得ない分析枠組み・視点をういた論考がある。
- ⑥ 都合のよいデータ・文献のみを利用して議論を進めている。
- ⑦ 論文のアブストラクト・目的の記載と、結論の不整合や記述不足がある。

(3) 説明が不足している。

- ① 読者の予備知識を適切に想定して書かれていない。
- ② 解析対象・解析条件・解析手法などが不明確。また、結論がどのような条件の下で成り立つのか不明確。
- ③ 手法の適用性の説明に、導入した近似手法が良好な一致を示す例示やその理由、適用範囲の議論の記載がなく、読者に不親切である。
- ④ 利用した計算コード名を記していない。適用する近似法などの技術説明がない、不足している。
- ⑤ 測定結果や計算結果が羅列してあるだけで、結果の評価・議論がほとんどされてない。
- ⑥ 独立した完結した論文となっていない。前報の続報あるいは連載形式として構成されていて、それだけを見た場合、理解できない。

(4) 技術的な誤りがある。

- ① 論理展開が誤っている、誤った結果または不公正な結果を導いている。
- ② 理論や考え方のプロセスに本質的な誤りがある。
- ③ 計算あるいはデータ解析と整理に重大な誤りがある。
- ④ 現象の解析にあたり、不適切・不相応な理論を当てはめている。
- ⑤ 図表の値と本文での値が異なっており、論文の正誤の判断が困難となっている。

(5) 文章表現等が適切ではない。

- ① 推敲が不十分で、記述の過不足があり、まとまりがない。
- ② 記述が冗長である。章ごとの分量がバランスを欠いている。緒言が異様に長いものがある。
- ③ 一般に慣用されていない省略語や記号が説明なしで用いられている。
- ④ タイトルが内容を適切に表していない。
- ⑤ アブストラクトに主要な結果、結論が書かれていない。研究背景や目的だけが書かれている。
- ⑥ 社会的事象を取り扱った論文において、情緒的・あいまいな表現の多いものがある。

- ⑦ 図あるいは表が過多であり整理されていない。
- ⑧ 図表がわかりにくい。図の品質が悪い。
- ⑨ 英文または日本語の意味が不明確で、意味の通じないところがある。用語の混乱が生じないようにするため、定義づけをすることも重要。

(6) 著作権違反・二重投稿*の可能性がある。

- ① 著作権に触れるおそれのある引用をしている。自分等の先行論文の説明や図をそのまま利用している。他論文誌に掲載された論文からの引用承諾取得などの記載がない。他人の研究成果をあたかも本人の成果のごとく記述している。
- ② すでに公開された自分等の論文・国際会議のプロシーディングスとほとんど同じ内容となっているなど、二重投稿とみなされる。
- ③ 他機関が登録している Registered Trademark (登録商標) が必要なものの引用文献がない。自らの勝手な見方により、引用なしに単語として利用している。

(7) その他

- ① 修正稿の投稿に関して
 - 掲載不可の要因として指摘された箇所だけを対症的に修正・補充した結果、論旨の統一性が欠けてしまう、またアンバランスになる。あるいは理由なく、一部だけを直して再投稿している。
 - 追加記載部分に、さらに修正を要する箇所が多くある。
 - 指摘箇所を丁寧に修正した結果、より冗長になり、逆にわかりにくくなってしまう。
- ② 適切な参考文献が挙げられていない。引用先が間違っている。
- ③ 引用文献において孫引きがなされている。しかも、間違った引用をしている論文を読んで、そのまま間違った引用をしてしまった投稿論文もある。
- ④ 内容と関係のない引用文献を多数記載している。
- ⑤ 法律的または倫理的に書いてはいけないことが書かれている。または、法律違反行為を記述している。
- ⑥ 学会の方針・目的に一致していない。

IV. 共著者の責任

投稿されてきた論文の中には、共著者が目を通していないのではないかとと思われるようなものも見受けられます。共著者にはその論文内容を完全に説明でき、それに関する質問に責任をもって応じられ、その内容に責任を負うことが、倫理的にも求められています。したがって、共著者全員が論文作成にも共同して努力することが求め

られています。

編集委員会や査読者は論文作成の指導は行いません。グループリーダーなどの指導的立場にある方には、次世代を担う人材育成に向けて論文作成の指導も期待しております。

V. 論文を書き終えて

論文を書き終えたら、すぐにでも投稿したくなりますが、そこを堪えて、原稿を冷静、客観的に読み直す期間を持つべきです。直近の経験や特に苦勞したことが強く印象に残っていると、記述に濃淡ができやすいといわれています。記述の偏りを避けるために、しばらくの冷却期間を置き、文章の構成、研究内容が的確に表現されているかを、新鮮な気持ちで改めてよく見直すようにしたいです。可能であれば、当該研究に直接関わりのない方に目を通してもらえれば一層好ましいと思われます。

通常の研究では着想から原稿作成まで数年は要しています。数日から数週間の冷却期間において、改めて冷静・客観的に読み直すことにより、論文が格段に良くなることを考えるとこの期間は決して長くはないと思います。

VI. 終わりに

論文を書く際は、論理的・客観的な姿勢で書き、読んでいただくという謙虚さを持ちましょう。広く読まれるためには、記述が具体的でしかもその筋道が論理的であり、明快に貫かれていることが基本となります。より良い論文を書く力は、多くの論文を書くという実践を通じてのみ達成できます。したがって、査読者からの指摘・批判に対して冷静に耳を傾けて、適切なものは素直に受け止め、論文の改善の参考として取り入れていくべきです。

なお、この記事の執筆に際しては多くの方の経験、以下の学会の投稿規程・投稿の手引き等を参考にしました。論文の書き方や英文の書き方に関して多くの参考書が出版されています。それらも参考にしてください。

— 参考文献 —

- 1) 日本原子力学会 <http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/>
上記サイトには、本記事と連動した記事も掲載されていますので、ぜひご覧ください。
- 2) 日本機械学会 <http://www.jsme.or.jp/>
- 3) 日本物理学会 <http://www.soc.nii.ac.jp/jps/>
- 4) 土木学会 <http://www.jsce.or.jp/>
- 5) 日本金属学会 <http://www.soc.nii.ac.jp/jim/>
- 6) 電気学会 <http://www.iee.or.jp/>
- 7) 日本化学会 <http://www.csj.jp/>
- 8) 酒井聡樹、これから論文を書く若者のために、共立出版、(2006).
(<http://hostgk3.biology.tohoku.ac.jp/sakai/ronbun/kyo/korekara/korekara.html>)

*二重投稿については、以下を参照のこと。
<http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/publication/ronbunshi.htm>

連載
講座軽水炉プラント
—その半世紀の進化のあゆみ第15回 今後の軽水炉の開発(1)
—導入計画中の軽水炉①(株)東芝 野田哲也, 日立 GE ニュークリア・エナジー(株) 守屋公三明,
日本原子力研究開発機構 大久保 努

これまでに、ABWR および APWR までのあゆみを紹介してきたが、今回から 3 回にわたって、まだ稼働には至っていない今後の軽水炉の開発について紹介する。まず、すでに建設が開始されたり導入計画が具体的に進んでいる軽水炉の概要に関して、今回および次回で紹介するが、我が国のメーカーが関与している AP1000, ESBWR, US-APWR を中心に掲載する。また、最終回では、現在研究開発中の超臨界圧炉と低減速炉について紹介する。

上記の AP1000 等は、米国エネルギー省(USDOE)が 2000 年以降用いている原子炉の世代の分類¹⁾によれば、第 3 世代+(Generation III+)と呼ばれており、超臨界圧炉が第 4 世代炉の一つとされている。また、この分類では、現在稼働中の原子炉は ABWR を除いて第 2 世代といわれており、ABWR は第 3 世代と呼ばれている。なお、上記世代の 3 と 3+ の違いは経済性の向上とされ

てはいるものの、その定量的な区分は必ずしも明確ではなく、両者を一緒くたにして第 3 世代といわれる場合もある。いずれにしても、これら第 3 世代以降の原子炉が今後の軽水炉の主流となっていく情勢であるといえる。

現在、特に米国において 2010 年以降の導入計画が多数発表されており、総数で 30 基以上に上っているが、本年 9 月末までのほぼ 1 年間でも、延べ 25 基に対する 16 件の許可申請が米国原子力規制委員会(USNRC)に提出されている。USNRC では、1990 年代以降、効率的な許認可を行うために、設計認証(Design Certification: DC)という制度を導入しているが、それに最初に申請を行った ABWR 等の炉型が上に述べた USDOE の当初の第 3 世代炉とされたという関係になっている。その後も、USNRC では、建設・運転一括許可(Construction and Operating License あるいは Combined License: COL)と呼ばれる制度を導入して許認可の迅速化を図っているが、上記 16 件の申請はすべて、この COL により実施されている。

なお、AP1000, ESBWR 等のより詳しい情報については、参考資料 2) 等も参照されたい。

LWR-Plants - Their Evolutionary Progress in the Last Half-Century—(15) : Development of Next LWRs(1) ; LWRs on Current Introduction Plan① : Tetsuya NODA, Kumiaki MORIYA, Tsutomu OKUBO.

(2008 年 10 月 8 日 受理)

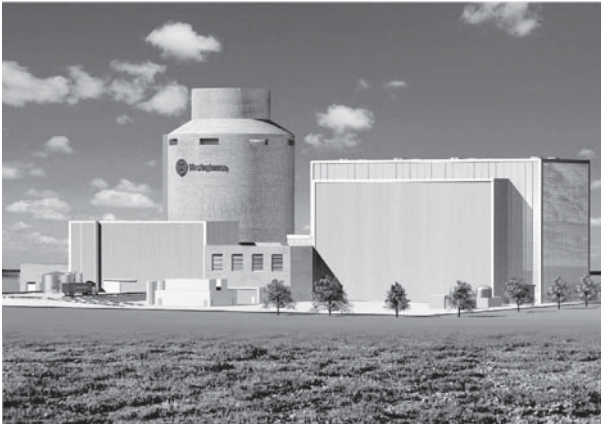
各回タイトル

- 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)
— Shippingport から美浜 1 号機まで
- 第 6 回 軽水炉の改良研究(BWR)
— ドレスデン から敦賀 1 号機まで
- 第 7 回 日本の軽水炉開発(1)—軽水炉の導入(PWR)
- 第 8 回 日本の軽水炉開発(2)—軽水炉の導入(BWR)
- 第 9 回 日本の軽水炉開発(3)—PWR の改良標準化①
- 第 10 回 日本の軽水炉開発(4)
— 第 1 次改良標準化計画(BWR)
- 第 11 回 日本の軽水炉開発(5)—PWR の改良標準化②
- 第 12 回 日本の軽水炉開発(6)
— 第 2 次改良標準化計画(BWR)
- 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)

I. AP1000の開発

1. AP1000の概要

AP1000はウェスチングハウス社が提供する最新鋭の加圧水型原子炉(PWR)であり、第 3 世代+の原子炉として、現時点では唯一 USNRC の設計認証を取得している。また、欧州電力要求書(EUR)への認証を取得済みであり、世界標準炉としての信頼性を有している(第 1 図)。さらに、AP1000は、経済性を一層向上させた原子炉であり、その最大の特徴は、使用実績のある設計を踏襲した大型蒸気発生器(SG)や大型原子炉冷却材ポンプ(RCP)の採用などにより、2 ループ構造で 110 万 kW_e 級の出力を実現した点、および静的安全システムを採用し、高い安全性とシステム簡素化に伴う保守・物量を低減している点にある。主要なプラント仕様を既存の PWR と比較して第 1 表に示す。

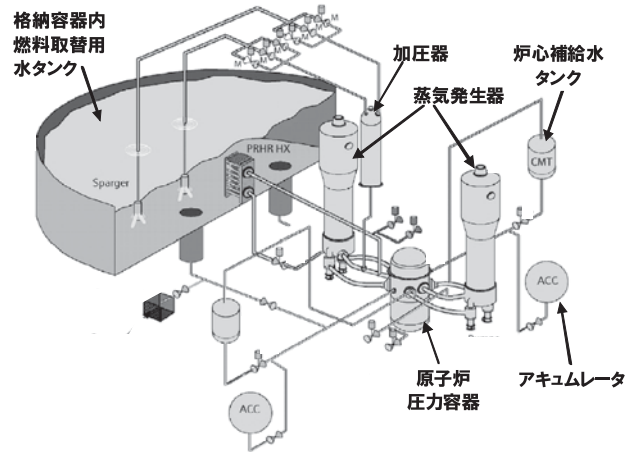


第1図 AP1000の外観

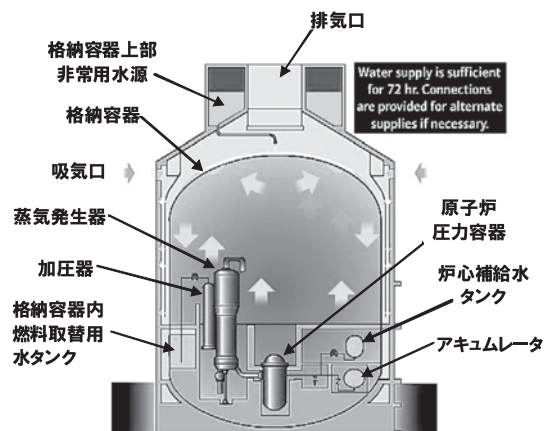
第1表 AP1000と従来型PWRのプラント仕様の比較

	AP1000	従来型PWR
出力(MWt/MWe)	3,415/1,215	3,423/1,180
燃料集合体数(体)	157	193
有効燃料長(m)	4.27	3.66
燃料集合体形式	17×17	17×17
炉圧力(MPaG)	15.4	15.4
蒸気発生器(体)	2	4
循環ポンプ(m ³ /h)	17,886-4台	20,100-4台
制御棒駆動機構体数(体)	69	57
安全系ポンプ	なし	あり
非常用ディーゼル発電機	なし	あり

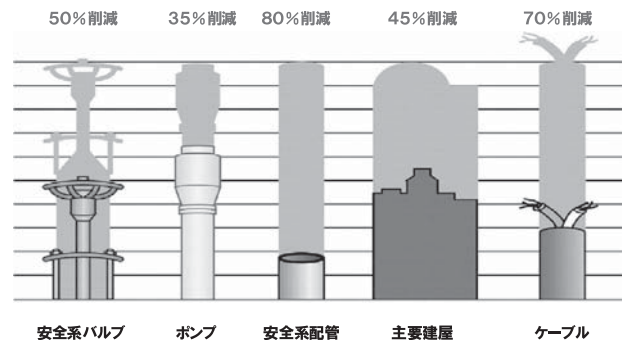
静的安全システムとは、安全注入系や格納容器冷却系などの安全システムを、ポンプなどの外部動力を必要とする動的なシステムを使用せず、重力や圧縮性ガス(窒素、空気)、自然対流・蒸発・凝縮などの自然現象を駆動源として利用する静的システムだけで構成したものである。格納容器内燃料取替用水タンクや格納容器上部に設置された非常用水源から重力等を駆動力としてプラントは長期に安全が確保される仕組みとなっている(第2、3図)。広範な試験で検証し、NRCの承認を受けたこの静的安全システムは、弁の単純作動のみの静的プロセスに依存し、作動後はAC電源、換気空調系などの動的機器が不要である。この静的安全系のみでNRCの要求する炉心損傷確率をクリアしており、事故時の故障確率を下げて安全性を最大限に高めるとともに、運転員の操作なしに72時間の安全停止状態を維持できるなど、安全確保と運転員への負担軽減を実現するものである。従来型の動的な安全システムと比較して単純な設計となっており、機器などの物量削減やメンテナンス負担が低減するといった経済性の向上、作業員の被ばく低減や放射性廃棄物の低減に寄与している。第4図にプラント構成機器の物量削減の効果を示す。同等の出力(110万kW)規模の従来型PWRプラントと比較するとかなりの物量削減を実現している。



第2図 AP1000の静的安全システム(安全注入系)



第3図 AP1000の静的格納容器冷却システム



第4図 AP1000のプラント構成機器の物量削減(従来型PWRとの比較)

簡素化された静的安全系の採用により、安全系を原子炉建屋に集中して収納できるようになり、高い耐震性が要求される建物を極小化でき、建設費の低減が実現されている。これに加えて、建屋、設備をモジュール化し、工場製作量を増加させて、出荷前に予備試験や検査を実施することにより、品質の向上を図るとともに、現地労働力の削減、建設工期の短縮が計画されている。AP1000では3次元プラントモデル等による建設ステップの完全検証を行い、36ヶ月の短工期での建設を目標としている。

2. AP1000の世界展開

すでにウェスチングハウス社は、中国浙江省三門原子力発電所向けに110万 kWe 級の AP1000を 2 基、山東省海陽原子力発電所向けに同 2 基を新規建設する契約を締結し、三門原子力発電所 1 号機については2013年以降の運転開始を目指して本年 2 月に、海陽原子力発電 1 号機については2014年以降の運転開始を目指して本年 7 月に着工している。

また、米国では、ジョージア電力ボーグル発電所および SCE&G 社が運営する V.C サマー発電所にそれぞれ 110万 kWe 級の AP1000を 2 基建設する契約を締結して、2016年以降の米国初号機運転開始に向け、詳細設計と先行機器手配を進めている。

II. ESBWR の開発

ESBWR は1990年代に開発を凍結した67万 kWe の SBWR (Simplified BWR) の開発資産に基づいて、自然循環による炉心冷却と静的安全系の採用を特徴とした大出力(150万 kWe)の BWR であり、米国では第 3 世代+に分類される。主要なプラント仕様を既存の BWR と比較して第 2 表に示す。また、ESBWR の原子炉構造を第 5 図に示す³⁻⁵⁾。

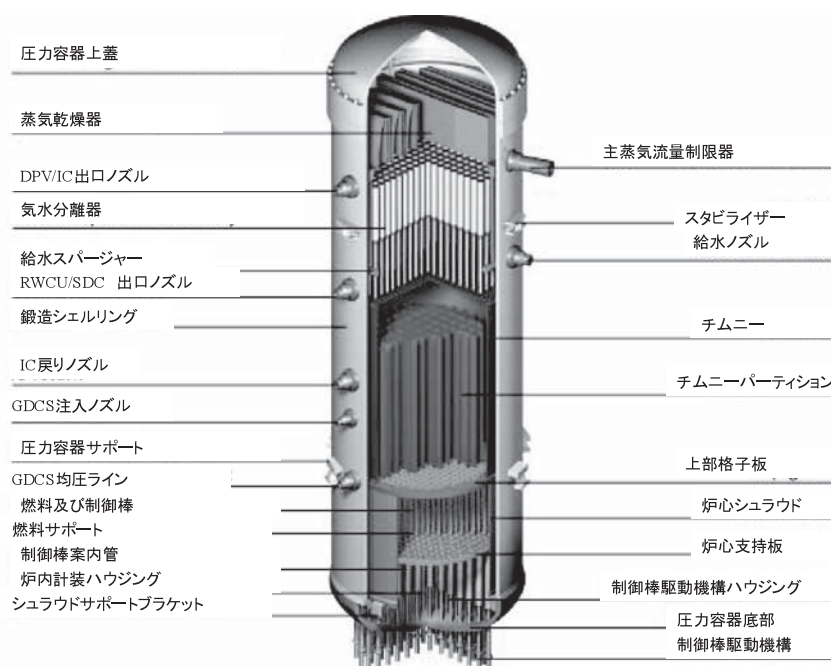
ESBWR では、単純化設計の追及の結果、現行炉に比べて11のシステムが削除され、ポンプ、弁、モータ等が 25%削減された。この結果、運転の単純化やプラント利用率の向上が期待でき、保守費用も 20%合理化できると評価される。

自然循環による炉心冷却は、米国のファンボルト・ベイ

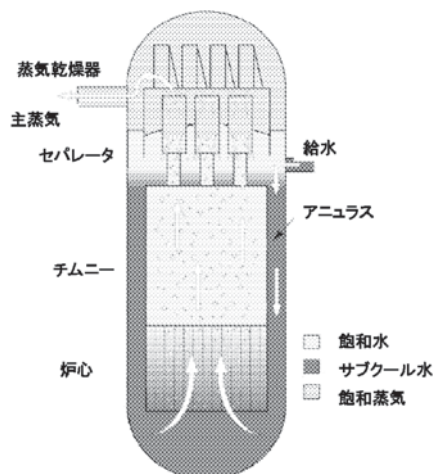
第 2 表 ESBWR と ABWR のプラント仕様の比較

	ABWR	ESBWR
出力(MWt/MWe)	3,926/1,350	4,500/1,500
圧力容器高さ/直径(m)	21.1/7.1	27.7/7.1
燃料集合体数(体)	872	1,132
燃料有効長(m)	3.7	3.0
炉心出力密度(kW/l)	51	54
再循環ポンプ	10	なし
制御棒本数	205	269
安全系ポンプ	18	なし
非常用ディーゼル発電機	3	なし
炉心損傷頻度(/炉年)	2.4×10^{-8}	1×10^{-9}
安全系建屋容積(m ³ /MWe)	160	80

で13年、オランダのドデワードで30年の小規模ではあるが良好な運転実績で実証されている。また、現在の大型 BWR(100万 kWe 以上)でも自然循環状態で定格出力の約50%の出力を出すことができる。ESBWR は、この状態を定格出力としたものであるが、ESBWR ではさらに自然循環力を増すために高さ約 9 m のチムニーを炉心の上部に設置し、炉心の圧損を低減するために、従来の炉心高さの約2/3の長さの短尺炉心を採用した(第 6 図参照)。自然循環における高出力状態では、流動安定性、蒸気クオリティ、ボイド率、ボイド係数、出力分布などの予測が重要であるが、GE ではラサール、ライプシュタット、フォルスマック、コンフレンツ、ナインマイル・ポイント 2 号炉並びにピーチボトム 2 号炉などの多くのプラントでの運転データで検証された予測モデルが開発済みである。

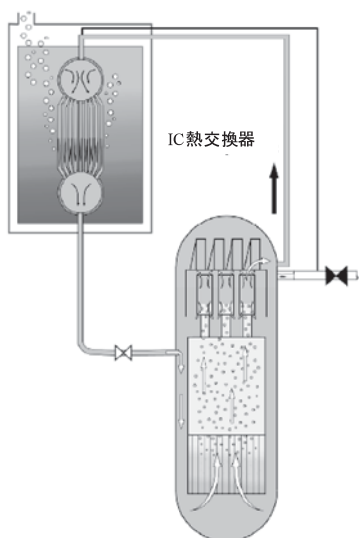


第 5 図 ESBWR の原子炉構造

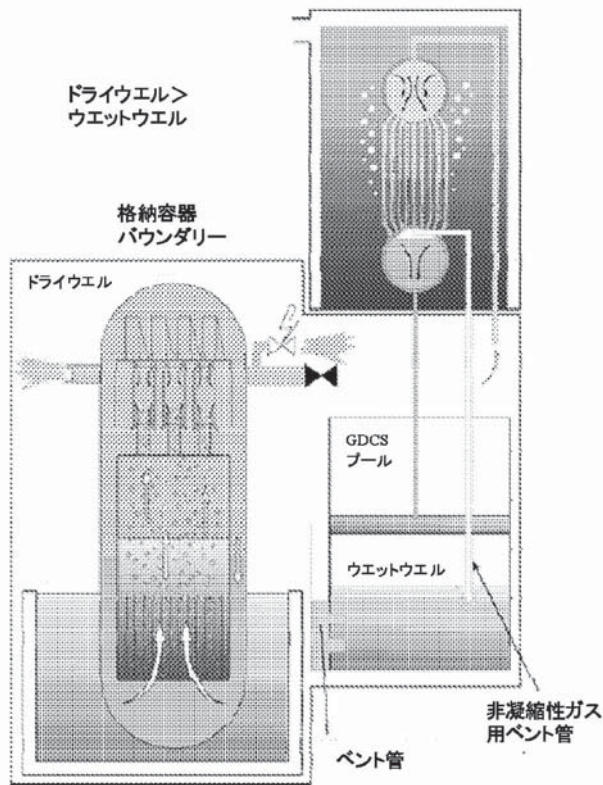


第6図 ESBWRの自然循環システム

一方、チムニーの採用に伴って原子炉圧力容器も現行炉よりも長くせざるを得ないが、その分、炉内の冷却材水量は増加し、原子炉隔離時冷却系に第7図に示すアイソレーション・コンデンサ(余剰の蒸気を自然循環で熱交換器に導き凝縮させる)やLOCA時の非常用炉心冷却系にGDCS(重力落下式の注水系)の採用を容易にできた。さらに、事故時の崩壊熱除去系には、第8図に示すPCCS(Passive Containment Cooling System)という静的に格納容器内の蒸気を凝縮させるシステムを採用することで、ESBWRの安全系はポンプや非常用ディーゼル発電機などの動的な機器を必要としない静的安全系を実現することができ、事故後72時間は運転員操作が不要となるようにPCCSプールの水量が確保されている。なお、GDCSの注入を速やかに行うこととPCCSへ崩壊熱を受け渡すことを目的として、ABWRと同様のADS(自



第7図 ESBWRのアイソレーション・コンデンサ



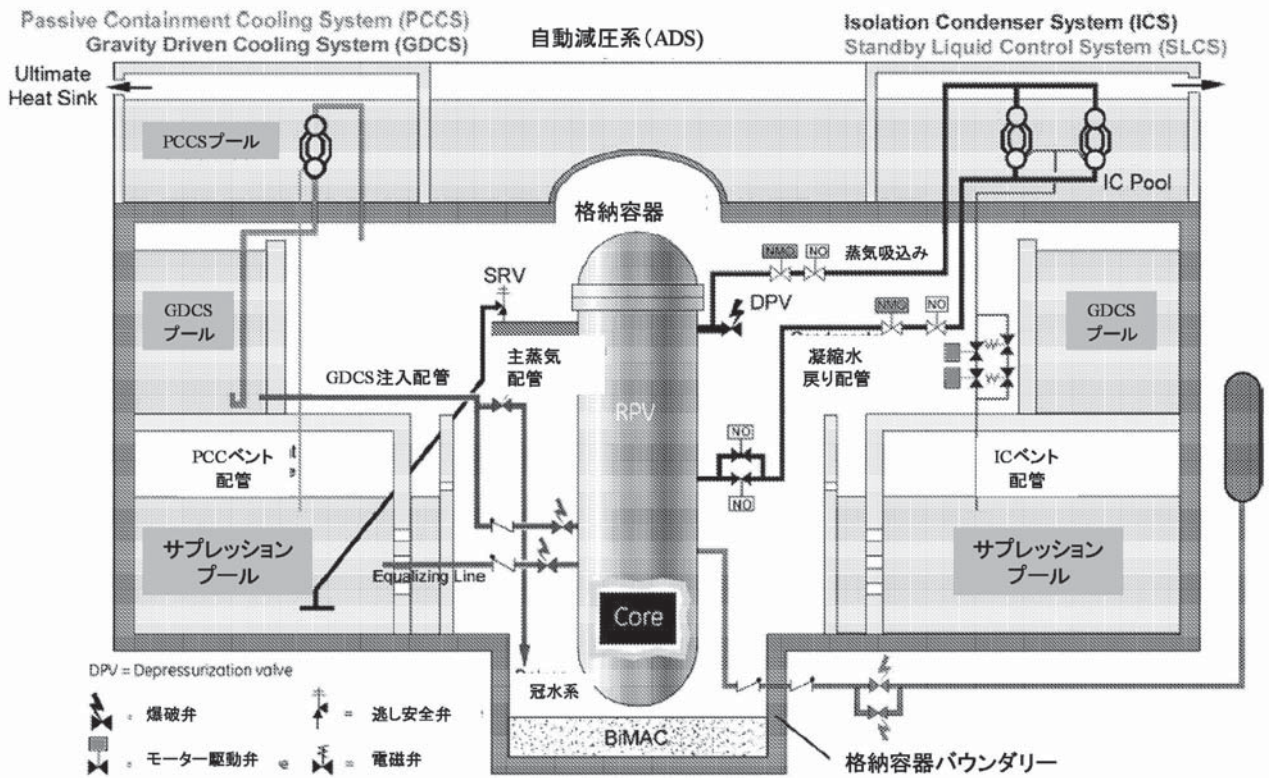
第8図 ESBWRのPCCSシステム

動減圧系) 8弁に加えて、直接格納容器に冷却材を放出する爆破弁タイプのDPV(減圧弁)が8弁設置されている。なお、これらの静的安全系の機器やシステムの実証はSBWRの開発時に完了している。第9図にESBWR全体の安全系構成を示す。以上の結果、これまでのBWRで必要とされた安全系のポンプや非常用発電機などのサーバランスがなくなり、運転中の待機不全の可能性も低減することができる。なお、ABWRで達成されたいかなるLOCAに対しても炉心の冠水維持という目標はESBWRでも踏襲されている。

さらに、静的安全系の採用により、ESBWRの炉心損傷確率は 1×10^{-9} /炉年とABWRの 2.4×10^{-8} に比べてさらに1桁小さくなり、FPの大規模放出頻度も 1×10^{-9} /炉年と十分に低い値になった。ただし、深層防護の観点で、原子炉圧力容器の下部にはコアキャッチャーを設置した。

ESBWRでは徹底した標準化を目的として、すべてのサイトを包絡した耐震条件で設計を行っており、標準建設期間は、標準認可と標準化されたモジュール設計により42ヶ月と推定される。

ESBWRは、2005年8月24日に米国の設計認証(DC)の申請を行っており、現在審査中であるが、2010年には認証を受ける予定になっている。COLも2007年に申請が行われている。



第 9 図 ESBWR の安全系構成

—参考資料—

- 1) USDOE ホームページ : <http://www.ne.doe.gov/geniv/negeniv1.html>
- 2) 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).
- 3) ANS ホームページ : <http://www.ans.org/pubs/magazines/nn/docs/2006-1-3.pdf>
- 4) USDOE ホームページ : <http://www.ne.doe.gov/np2010/pdfs/esbwrOverview.pdf>
- 5) D. Hains, "Next-generation nuclear energy: The ESBWR", *ANS Nuclear News*, Jan. (2006).

著者紹介

野田哲也(のだ・てつや)



(株)東芝, Westinghouse Electric Company (専門分野/関心分野)原子力プラント設計, 海外プロジェクトマネジメント

守屋公三明(もりや・くみあき)

本誌, 50〔5〕, pp.317参照。

大久保 努(おおくぼ・つとむ)



日本原子力研究開発機構 (専門分野/関心分野)新型軽水炉設計, 軽水炉熱流動・安全工学, 核燃料サイクルなど

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7回 VI-2 壁の中は傷まないか

京都大学 森下 和功, カリフォルニア大学 Shahram SHARAFAT

II. 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

1. はじめに

前章においては、(1)核融合炉が商用炉として成立するには、プラズマ燃焼だけでなく、放射線照射下での材料劣化の問題(照射損傷)も重要であること、(2)高エネルギー粒子の照射によって材料内には多数の格子欠陥が生成し、それらが移動・集合化することによって、ナノ～サブミクロンサイズの、より複雑な欠陥集合体が形成されること、(3)そのようなマイクロ構造変化が、材料のマクロな特性を変化させ、材料機能の低下、さらには核融合炉の寿命そのものを決定する可能性があること、などを述べた。本章では、照射損傷によるマイクロ構造変化をいかにモデル化するかについて解説する。なお、以後で頻出するフェムト、ピコ、ナノは、それぞれ、 10^{-15} 、 10^{-12} 、 10^{-9} を表す接頭語である。

2. 構造階層性を有する核融合炉システム

核融合炉のような巨大プラントは、いくつかのサブシステムの組合せで構成される。サブシステムは多数の機器や装置から構成され、機器や装置は数多くの部品から構成される¹⁾。そして、部品はやはり数多くの材料から構成される。材料(固体物質)は原子の集団である。その途中の段階では、原子配列に応じて、結晶粒とか、粒界とか、転位といった中間的な構造が存在する。また、原子そのものは、電子と原子核から構成される。このよう

に巨大プラントのシステムは、サブシステム—機器・装置—部品—材料—結晶・粒界・転位—原子—原子核・電子等、多数の要素から構成され、それらは互いに階層的な構造をもつ。材料の階層構造を、模式的に第VI-5図の横軸に示す。

これらの要素はさまざまな機能をもつ。電子は原子同士を結びつけ固体を安定化させる。固体中の粒界は、結晶粒同士を結び付け、転位や析出相などとともに、時に、材料強度において重要な役割を担う。そして、そのような要素から構成される材料は、全体として、巨大構造物を支えるとか、容器内を真空中に保つとか、熱を除去するとか、放射性同位元素を外部に漏らさないなどの役割をもつ。さまざまな役割(機能)を負わされたこうした材料の寄せ集めにより、たとえば、核融合炉ブランケット(核融合発電プラントに必要なサブシステムのひとつ)が構成される。

こうした機能の発現は、階層構造の各層に固有である。すなわち、構造材料の強度は、粒界・転位・析出相等の材料要素の組合せで決まるのであって、それより下の階層(原子や電子)の性質をいくら調べても、それだけで理解できるものではない。同様に、いくら材料要素の熱的特性を調べたところで、それだけで材料全体の除熱特性は得られない。いわゆる“要素還元論”の成立しない世界がここにある。系の機能は、各要素独自の性質だけでなく、それらの組合せ方を指定して初めて明らかになる。

系を表現する方法はさまざまである。たとえば板材なら、寸法、形、重さなどである。場合によっては、硬さとか熱伝導度も必要であろう。が、それらを含めたとしても、マクロな視点から系を表現するのに必要なパラメータの数(自由度の数)は有限である。一方、同じ板材でも、原子という単位で系をとらえると、そこには、たとえば1モルなら 6×10^{23} 個もの、事実上、無限の数の原子が存在する。それぞれの原子がもつ3次元の位置および速度情報、原子の種類の情報、そして、原子1個あたり数10個にも及ぶ電子の情報までをも含めると、1モルの系の自由度は全体で 10^{26} 以上になる。さらに原子を分割して、その中身(原子核)の情報(内部自由度)までも詳述することは可能だが、切りがない。このように、同じ系でも、マクロな視点かマイクロな視点かによって、系

The Fusion Reactor Wall is Getting Hot!—A Challenge towards the Future for Numerical Modelling (7):

Chap. VI How is the wall damaged?—2. How to Predict Radiation Damage in Materials: Kazunori MORISHITA, Shahram SHARAFAT.

(2008年 10月 3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)

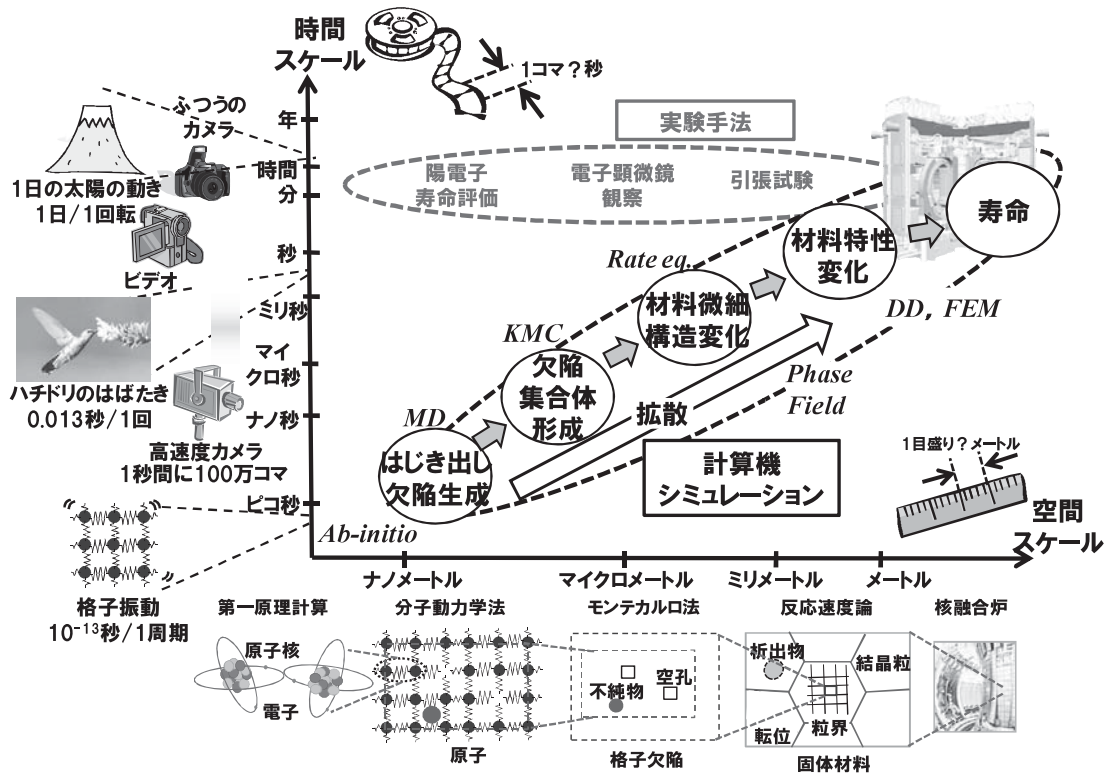
第2回 II-2 壁の前で何が起きているか?(プラズマの攻撃)

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VI-5図 階層性を有する構造をもち、かつ、多要素である系の中で起こる時間的にも空間的にもマルチスケールな材料照射損傷プロセスのマルチスケールモデリング

の記述に必要なパラメータの数はかなり異なる。ただし、マイクロ世界のパラメータとマクロ世界のそれとは当然関係があるはずで、それは一般に、統計力学によって与えられる。系が熱平衡状態にありさえすれば、たとえマイクロ世界の無数の原子の速度に関する情報も、マクロ世界においては温度というたった1つのパラメータで表現できる。そして、状態方程式のようなマクロな表現をする際には、原子1個1個の情報が必要でなく、温度など、ごく少数のパラメータで十分になる。詳しい方がいいだろうと、マイクロ世界で通用する無数の原子の膨大な情報を与えたとしても、マクロ世界では、逆に、そのデータ量の多さに困ってしまう。各階層によって適切なパラメータの数というものがある。しかし残念なことに、マイクロとマクロの関係が明確なのは、熱平衡という特別な場合に限定される。前章の材料照射損傷のような非平衡プロセスでは、両者の関係は必ずしも自明でない。この場合、無限の自由度をもつマイクロ世界の情報を、いかに、少数自由度のマクロな世界に練り込むかが問題になる。

一般に材料は多要素な系である。多要素とは、ここでは系が不均一であることを意味する。ただし、この不均一性は、どのような空間尺度(スケール)で系を眺めるかに依存する。すなわち、数ミクロンの空間スケールで材料を眺めると、まず、結晶粒が見え、その隣に粒界が見え、そして時に、転位や表面などが見える。これらは、それぞれが異なる原子配列をもつ材料要素である。しかしながらこの空間スケールでは、決して原子そのものは

見えない。そこで今度は、系をサブナノの空間スケールで眺めてみる。結晶粒、粒界、転位など、各要素に依存した原子配列が見えてくる。しかし、あまりに空間スケールが小さいので、たとえば、結晶粒は見えても粒界は見えない。その場から粒界は遠すぎるのだ。要するに、原子配列の多様性に基づく材料の不均一な性質は、典型的には、ミクロンオーダー以上の空間スケールではじめて気付く性質であって、原子・電子レベルの空間スケールでは気にならない。

3. さまざまな時間スケールで現象を見る

ここでは、時間スケール(現象の時定数や観測の時間分解能)について考える(第VI-5図の縦軸)。通常、物理法則は、なんらかの物理量の時間微分に関する方程式で表される。たとえば、ニュートンの運動方程式なら、運動量の時間変化率とその質点に働く力に等しいとおく。ただし、このような方程式を解くとき、どの時間スケールで現象を眺めるかで見え方が異なってくる²⁾。ここで、「どの時間スケールで」というのは、時間分解能、すなわち、現象をビデオ撮影するときのコマとコマの間の時間間隔を意味する。

たとえば、100万コマ/秒の撮影が可能な高速度カメラで地上からの太陽の動きを観察する。しかし、1コマ目と100万コマ目の太陽の位置に違いはない。すなわち、この時間刻みで見た場合の太陽の位置座標の時間変化率は実質上ゼロとなる。このときの微分方程式は、太陽が

止まっている場合と全く同じになる。だからといって、本当に太陽が止まっているわけではないのだが、この時間スケールで太陽を眺める観測者には、「太陽は止まっている」と認識される。(もちろん、このカメラで1時間ほど撮影を続けるなら、「太陽も動き出す」のだが、その場合、10°コマという事実上無限の情報を扱わなければならない。そんな解析は不可能である。)

一方、1秒間に約80回の羽ばたきをするハチドリの撮影を考える。通常のカメラやビデオ(30コマ/秒)では、羽ばたきの詳細はわからない。せめて1秒間に数100コマの撮影が可能な高速度カメラが必要になる。ただし、先ほどの太陽の動き(遅い動き)を高速度カメラ(高い時間分解能)で見るとは違い、今度の羽ばたき(速い動き)を通常のカメラ(低い時間分解能)で見るとは、羽ばたき速度などの詳細は不明でも、羽ばたきの事実は「一瞬の出来事(“デルタ関数的な出来事”)」として認識される。

以上要するに、ある現象をその時定数より極端に短い時間スケールで眺める場合、それは止まって見え、逆に、極端に長い時間スケールで見るとは、「詳細不明の一瞬の出来事」として認識される。「物理現象の観察で重要なのは時間微分である」という考えに立てば、短すぎる時間スケールはその現象が起こっていないのと同じであり、逆に、長すぎる時間スケールは、多くの情報が「詳細不明の一瞬の中」に押し込まれることになる。これらから、「現象の時定数に適した時間分解能を選ぶ必要がある」という結論もいえるのだが、一方で、多くの現象が同時に起こるような場合(“マルチスケールな現象”と呼ぶ)、すなわち、太陽の下で羽ばたくハチドリを見る場合は、どの時間スケールを選ぶかによって、ハチドリの羽ばたきを見るのか、あるいは、太陽の動きを見るのかに分かれることになる。

以上、時間・空間スケールを変えたときの現象の見え方を説明した。我々は、多くの異なるスケールを同時に見ることはできないので、正しく現象を見ようとするなら、多種多様の時間分解能のカメラと、多種多様の空間分解能の顕微鏡が必要になる。これは、材料照射損傷プロセスの解析においても同様である。そこでは、個々のスケールにおける適切な解析と、それらの接続(マルチスケールカップリング)が重要になる。

4. マルチスケールな照射損傷プロセス

VI-1章によると、照射損傷プロセスは、(1)高エネルギー粒子(中性子やイオンなど)が材料内に入り、(2)はじき出し欠陥が導入される。(3)さまざまな点欠陥は熱活性化過程により材料内を拡散するので、照射の影響は時間をかけながら徐々に材料全体にひろがっていく。(4)拡散によって点欠陥同士が出会うと、種々の欠陥反応が起こり、時に、ポイドやヘリウムバブルなどの欠陥集合体が

形成される。(5)このようなマイクロ構造の変化は材料劣化の要因となる、ということであった。このプロセスに関与する時間・空間スケールは、以下のとおりである。

まず、外界から高エネルギー粒子が入射し、材料構成原子と衝突するプロセスであるが、これはサブフェムト～フェムト秒、かつ、フェムト～0.1ナノメートルの現象である。衝突した材料構成原子を1次はじき出し原子(PKA)と呼ぶ。この時間スケールでは、固体中の格子振動(周期0.1ピコ秒)でさえ止まって見える。次に、PKAの発生から数10ピコ秒程度の時間に原子間衝突の連鎖反応が起こる(いわゆるカスケード損傷)。このプロセスにより、数10ナノメートルの領域に、はじき出し欠陥が高密度に形成される。こうして生成した格子欠陥は、時間をかけながら徐々に材料内を拡散し、マイクロ構造が変化する。すなわち、この拡散過程は、時間スケールの増大に伴い空間スケールが広がるプロセスである(第VI-1図の左下から右上への流れ)。

5. いかに関照射損傷プロセスをモデル化するか?

さて、時間的にも空間的にもマルチスケールな現象である照射損傷プロセスをいかにモデル化するか?しかも、この現象が起こる場所は、結晶粒、粒界、転位、表面など、多様な要素を含む系である。

まず、材料の階層構造性を考えずに、全体を原子や電子で表すことを考える。この表現法を使うと、たとえば、核融合炉であれば 10^{21} 個以上の原子核とその数10倍の電子が必要になる。これは、事実上無限大の自由度の系を扱うことを意味する。解析は不可能である。仮に 10^{21} 個もの原子の10年間の挙動(位置座標の情報)が正しく予測できたとしても、果たして10年後の炉の健全性が判断できるか、という問題も発生する。膨大な量のデータの評価に、それこそ10年以上かかってしまう。

さてここで、物理現象は時間微分の方程式で書かれていること思い出そう。時間変化率がゼロのものは無視できるのであった。しかもそこでは、本当に止まっているかどうかは問題でなく、観測者の時間スケールにおいて止まっているとみなせるもの(たとえば、高速度カメラで撮影した地上の太陽)も無視できる。この考えに立てば、事実上無限個にもなる原子や電子をあらかじめ系内に並べておく必要はなく、注目する時間スケールの間に動くものだけを考えればよい。つまり、フェムト秒の時間スケールでは、1個の入射粒子と1個の材料構成原子の衝突のみを考えればよい。(実は、この時間スケールに限定しても、核融合炉システム全体に目を向けるのであれば、同様の衝突現象はやはり無限個存在する。しかし、やはりこの時間スケールに限定するならば、それらの現象は互いに独立なので、それらは分離して考えてよい。)

問題はそれ以降である。外界から系に注入されたエネ

ルギーは、原子間衝突連鎖や欠陥の拡散を通して散逸する。このプロセスに関与する系の大きさは、第VI-5図に示すように、時間とともに増大する。そのため、原子や電子を最小単位とする方法では、系の自由度(系の記述に必要なパラメータの数。解析対象の原子や電子の数に比例する。)はすぐに発散する。解析に使うパラメータの数には上限があるので、結局、解析対象が大きくなるに従い、系の記述を簡略化しながら、パラメータ数をはしょっていくしかない。

ところで、そもそも我々が必要とする情報は何であったか？それは、材料劣化の要因となるマイクロ構造変化である。それを知るには、どのくらいの非平衡欠陥が生成し、それらがどのように移動して欠陥集合体が形成されるかがわかればよい。そのような観点からすると、電子の挙動よりは原子(イオン)の挙動が、また、原子(イオン)の挙動よりは格子欠陥の挙動が重要になる。もちろん、原子(イオン)のふるまいは電子のふるまいに影響されるし、格子欠陥のふるまいは周囲の原子のふるまいに影響されるのであるが、系のパラメータ数の発散を抑えるには、このように、系内の解析対象に優劣をつけるしかない。そこで、電子に関する情報ははしょって系を原子(イオン)のみで表現するとか、あるいは、原子に関する情報ははしょって系を格子欠陥のみで表現するなどの工夫が必要になる。ただし、はしょるといっても無視することではない。たとえば、多くの電子のふるまいを、より少ないパラメータ数で表現される原子間ポテンシャル関数の中に繰り込み、それを使って、原子(イオン)の位置を追跡する。これが、古典的分子動力学(MD)法である。あるいはまた、格子欠陥の周囲にある多くの格子原子(正規位置にある原子)のふるまいを欠陥移動エネルギーなどの少数のパラメータの中に繰り込み、それを使って、欠陥の位置のみを追跡する。これがキネティックモンテカルロ(KMC)法である。そしてさらに、KMC法における欠陥1個1個の詳細な位置情報を、空間上に作成したメッシュ内の欠陥濃度の情報に置き換え、それを使って欠陥濃度の時間発展を追跡する。これが反応速度論解析である。空間メッシュ内部の欠陥の相対的な位置情報は失われ、メッシュ内部は空間的に均質化されることになる。

こうして、さまざまな情報ははしょることにより、すなわち、異なる解析手法間での接続における繰り込み作業(事実上無限個にもなる情報を少数自由度の情報に置き換える作業)をうまくこなすことにより、解析に必要なパラメータ数(自由度)の発散を抑えながらも、解析対象の系を大きくするとか、シミュレーション時間を伸ばすなどが可能になる。このように、系の自由度を徐々に減らしながら、逆に、解析可能な時間・空間スケールを大きくしていくモデル化の手法をマルチスケールモデリングと呼ぶ。次節では、MD法やKMC法を使ったモデ

リング例を示す。

なお、特に非平衡現象を扱うときには、系の自由度を徐々に減らす行為、すなわち、マイクロ世界の多数自由度の情報を少数自由度のマクロ世界の記述法に繰り込む際の作業の妥当性が問題になる。たとえば、欠陥集合体の形成過程が最もよく現れる時間・空間スケールを、反応速度式を使って解析する場合、それよりずっと小さなスケールのカスケード損傷プロセス(数10ピコ秒かつ数10ナノメートルで起こる原子間衝突連鎖による欠陥生成プロセス)は、「デルタ関数で記述される、詳細不明な一瞬の出来事」になる。本来なら、そこには、「どの程度のエネルギーの粒子がどの角度で材料に入射し、標的原子にどの程度のエネルギーを与えたのか？続く原子間衝突連鎖によって、どれくらい欠陥が生成したのか？それらのうち、どの程度が即座に自発的に再結合したのか」などの詳細情報が含まれるはずである。しかし、それらの情報は積分作業(時間的かつ空間的な均質化・平均化の作業)の中で捨象され、すべてはdpaというパラメータの中に押し込まれてしまう。dpa(displacement per atom)は、照射量の単位として広く使われているものであり、反応速度論解析の欠陥生成項(source term)にはdpa/sが使われる。しかしながら、たとえば、同じdpa量の高エネルギー電子線照射と中性子照射では、異なる材料マイクロ構造変化を示すことが知られており、これは、すなわち、dpaによる繰り込みが、決して広い範囲で妥当でないことを意味する。

理想的には、古典的MD法による原子挙動解析にも関わらず、電子挙動を含む第一原理MD解析と同じ結果を得るとか、あるいは、格子原子を扱わないKMC解析にも関わらず、MD解析と同じ結果が得られればよい。現実にはもちろん、そのような繰り込み作業を完璧に行うことは難しい。

その他、材料の不均一性に起因する問題もある。材料要素が異なると、たとえば、結晶粒内と粒界では、欠陥移動の活性化エネルギーや欠陥集合体のできやすさなどが異なる。そこで解析対象が大きくなると、ひとつの空間メッシュも拡大し(粗視化)、そこに多様な材料要素が内包されるようになる。そうすると、そのメッシュの中の欠陥の移動エネルギーは、果たして、結晶粒での値を使うべきか、それとも粒界での値を使うべきか？などの判断が難しくなる。本来なら、粗視化され、不均質化した空間メッシュに有効な実効的移動エネルギーを設定する必要があるのだが、そのモデル化にはさまざまな任意性が入りこむ。すなわち、粗視化されたメッシュは多様な内部自由度をもつので、その多様性に対応できないのであれば、材料挙動の予測性が低下する。あるいは、そのような面倒を避けるために空間メッシュ内の均一性を確保するのであれば、ひとつのメッシュの大きさは精々結晶粒程度に限定される。空間メッシュの全数は実質的

に解析が可能な有限個に抑える必要があるため、すなわち、解析可能な系の大きさに上限ができることになる。

6. ヘリウム損傷のマルチスケールモデリング

ここでは、核融合材料に特徴的なヘリウム損傷のモデル化研究を紹介する。ヘリウム損傷を含む照射損傷の詳細は、前章を参照されたい。

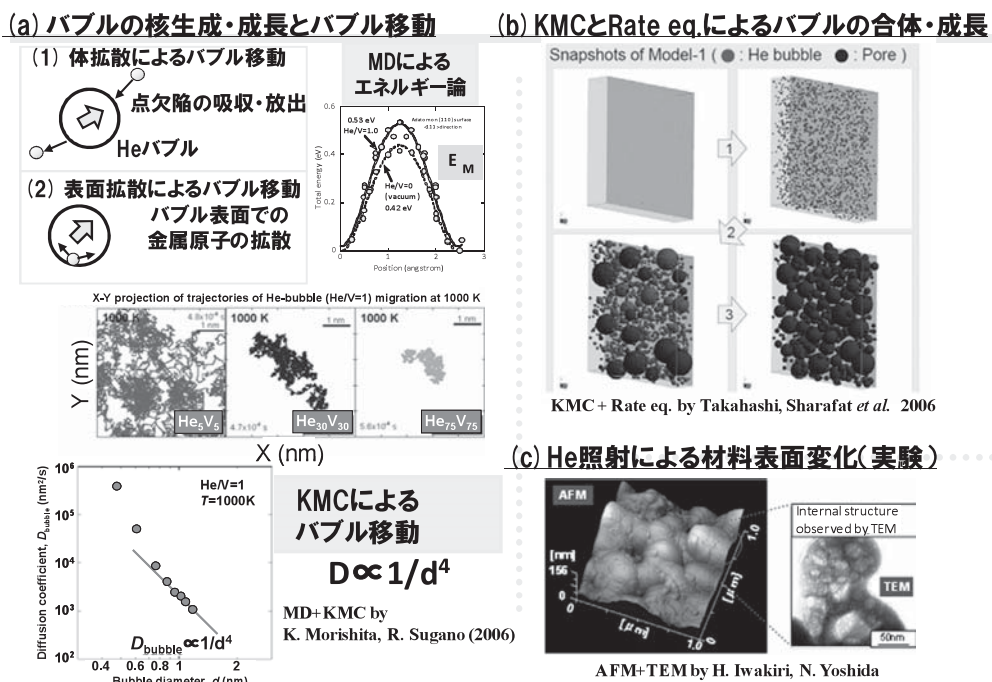
ヘリウム損傷の特徴は、ヘリウムバブル(空孔集合体である材料内の空洞に、ヘリウムがつかまっている構造)をもつ。照射による体積膨張現象(スエリング)の発生や材料強度変化の要因である)の形成である。ゆらぎによって核生成するバブルの形成を予測するには、まず、ヘリウムバブルの点欠陥結合エネルギーが必要になる。これは、点欠陥の集合化によるエネルギー利得であり、集合体近傍においては、同時に起こる配置エントロピー減少に対応する自由エネルギー損失とつりあう。また、これはバブルの熱的安定性を定量的に評価するための指標でもある。このような欠陥のエネルギー論は、量子力学計算、MD解析、熱力学的解析など、いくつかの方法を用いて評価できる。こうした評価をバブルに対して行うと、(1)ヘリウムには、バブルを熱的に安定化させる効果があること、(2)バブル内のヘリウム密度が極端に高い場合には、バブル界面の材料構成原子をマトリクス内に放出し、結果として、バブルを成長させる効果があること、などが明らかになる。このような欠陥集合体の核生成・成長挙動の時定数は、一般に、MD法で解析可能な時間

スケールよりも十分に長く、そのため、MD法とKMC法の組合せによりモデル化される³⁾。

次に、KMC解析において、バブル界面の原子の運動を考慮すると、第VI-6図(a)に示すように、バブル自身の移動が見えてくる⁴⁾。バブル移動は、実験的にも観察される事実⁵⁾であるが、これは、バブル界面上の多くの原子による無限に継続可能なジャンプ運動の寄せ集めである。バブルの拡散距離と経過時間の関係から拡散係数を導出することができるが、これは、無限回に及ぶ界面原子の運動が、拡散係数というひとつのパラメータに繰り込まれたことを意味する。このような繰り込みが可能になると、もはや、界面原子の運動は忘れてもよい。マクロな世界のモデル化においては、バブルの拡散係数のみを使えばよい。バブルの拡散係数は、バブル径の4乗に反比例する⁴⁾。そこでさらに、別のKMCおよび反応速度論解析から、バブルの移動および合体現象をモデル化する⁶⁾。ただし、このモデルにおけるバブル移動は、拡散係数のみを考慮し、先述の界面原子の移動はもはや扱わない。バブル同士の接触・合体により、バブルは徐々に成長し、そして、第VI-6図(b)に示すように、材料のミクロ構造は次第にポーラスな構造へと変化する。これは、ヘリウム照射実験によって得られる電子顕微鏡観察結果(第VI-6図(c))⁷⁾をよく再現する。

7. プラズマとのダイナミックな相互作用

階層構造化および多要素性をもつ材料の中で起こる照



第VI-6図 (a) ポテンシャルを使ったMD解析による欠陥エネルギー論およびKMC解析から、バブルの核生成・成長とバブル移動の両方を模擬する
(b) KMCとRate eq.より、バブルの移動・合体吸収を模擬し、スポンジ構造を得る
(c) 実験的に得られる材料表面のスポンジ構造

射損傷プロセスについて、その現象の時間的・空間的マルチスケール性に留意しつつ、いかにモデル化するかにについて述べた。第VI-6図のように、表面付近にポーラス構造やブリスターが形成されると、それらは塊として剝離し、核融合炉のプラズマ側へと輸送される。そうした不純物の影響によりプラズマ特性は劣化し、今度はそれが原因となって、プラズマ粒子の材料への入射特性が変化する。すなわち、材料とプラズマは動的に相互作用するのである。このような相互作用は、プラズマおよび材料の両方に対して、ダイナミックな境界条件を与える。もちろん、このダイナミックなプラズマ-材料相互作用も、注目する時間・空間スケールによって、多様な表情を見せるであろう。

核融合材料開発や材料健全性に基づく炉の保全是、材料の照射下挙動に関する正しい理解とそれに基づく予測・制御法の確立が前提である。そのためには、現象のマルチスケール性を十分に考慮したモデルの構築が必要になる。次章では、解析手法と応用例について、より具体的に説明する。

—参考文献—

- 1) 日本保全学会編, 保全のリテラシー, (2007).
- 2) 吉田善章, 非線形とは何か, 岩波書店, (2008).
- 3) K. Morishita, *Phil. Mag.*, **87**, 1139 (2007).
- 4) K. Morishita, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, B **255**, 52 (2007).
- 5) M. Miyamoto, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **367-370**, 350 (2007).
- 6) A. Takahashi, S. Sharafat, *et al.*, *Proc. ANS TOFE*, Nov. 13-16, 2006, New Mexico, USA, (2006).
- 7) 吉田直亮, プラズマ・核融合学会誌, **83**, 1003 (2007); 岩切宏友, プラズマ・核融合学会誌, **81**, 19 (2005).

著者紹介

森下和功(もりした・かずのり)

本誌, 50[11], pp.729参照。

Shahram SHARAFAT(シャールム・シャラファット)

本誌, 50[11], pp.729参照。

新刊紹介

Fundamentals of Nuclear Reactor Physics

E. E. Lewis, 280 p. (2008. 1), Elsevier 社.
(価格 USD 94.95) ISBN 978-0123706317

本書はタイトルに Fundamentals と付いているとおり、原子炉物理学をこれから学ぼうとする学生、若い研究者や技術者を対象として書かれた原子炉物理学の入門書である。著者の長年の教育経験を踏まえ、これまで原子力分野に関する学習をほとんどしていない者であっても、この1冊で“原子炉”の物理の全体概要が容易にわかるように配慮された構成および内容となっている。

近年になって、いくつか原子炉物理学に関する書物が刊行されてきているが、本書では、多くの原子炉物理学の本に見られる詳細な数式や数値解法に関する記述はほとんどなく、現象の物理的な解釈・理解に重点が置かれた内容となっている点で他と趣を異にしている。そのため本書はこれまでの書物と比して章構成にも特徴がある。前半で記述されることが多い中性子拡散方程式の導出は前半では行われず、前半部分では原子炉物理学と他の学問分野がどのように関連しているかに重点を置いた記述となっている。特に、発電炉の型式・構造や原子炉動特性(核分裂連鎖反応の時間依存性)を前半に配置することにより、後半部分で記述される中性子拡散方

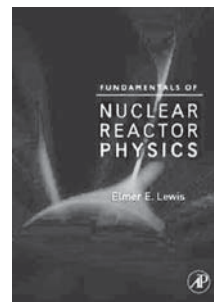
式を解くことで得られる出力の空間分布、原子炉内の温度分布と熱輸送や反応度フィードバックなど、原子炉の中で起こっている物理現象をイメージしやすいよう構成されている。

全体的に図表を用いながら平易に記述されており、本書は原子炉物理学以外を専門とする方々にも一読していただきたい1冊であるといえる。

本書の章構成

1. Nuclear Reactions
2. Neutron Interaction
3. Neutron Distributions in Energy
4. The Power Reactor Core
5. Reactor Kinetics
6. Spatial Diffusion of Neutrons
7. Neutron Distributions in Reactors
8. Energy Transport
9. Reactivity Feedback
10. Long Term Core Behavior

(大阪大学・北田孝典)



「原子力は、私たちの社会の基盤を支えている」 原子力を学ぶ学生が、想いを語りました

原子力を選んだ理由は「たまたま」「JCO 事故がきっかけ」「社会に貢献できるから」とさまざま。けれども将来を考えると、日本は原子力に頼るしかないという点では、一致する。学会誌では50周年記念企画として、原子力を学ぶ学生に、原子力について自由に語ってもらう会合を開催。将来の抱負については「被ばく量低減のための仕事がしたい」「原子力がふつうの技術として受け入れられることが目標」と語られる一方、学会に対しては「会合はカジュアルで和やかなものにできないか」「もっとさまざまな人とのコミュニケーションができる場を提供してほしい」との要望が寄せられた。



東京海洋大学大学院修士課程 嘉村明彦
 筑波大学大学院修士課程 佐野祐太
 東海大学大学院修士課程 鈴木 将
 東京工業大学大学院博士課程 永田章人
 武蔵工業大学大学院博士課程 羽倉尚人
 東京大学大学院博士課程 前川 陽(50音順)

聞き手 小林容子 本誌編集委員

原子力を選んだ理由は「何となく」「JCO 事故がきっかけ」「社会に貢献できる」

—今日は原子力学会誌の50周年記念の企画の一つとして、学生の方とお話をしたいと思います。最初に皆さんがされている研究と、この道を選んだ理由を。

鈴木 東海大学修士課程2年の鈴木です。高レベル放射性廃棄物を地層に埋めるときに使われる緩衝材である粘土の、化学的な吸着や拡散といった性質の研究をしています。高校3年生のときに、エネルギーはどうなるのかなという漠然とした思いがあって、大学に入学しました。学部で学んでいくうちに、原子力は必要なという感じになりました。理系を選んだのは、抽象的な文系と違って技術が身につく感じがあり、魅力を感じたからです。

前川 東京大学博士課程2年の前川です。上坂研究室で、電子加速器を使って、レーザーを使った計測や応用

を考えていくことをやっています。東大では原子力専門の学部というのはなく、システム創成という大括りの学部があって、その中で環境・エネルギーコースを選んだのですが、その中に加速器を使った研究がありました。もともと理科や数学が好きだったので、高校のときには漠然と理系かなと考えていました。

—専門外の読者のために加速器について説明していただければ。

前川 電子などの固まりを加速していく機械です。それをすごい高エネルギーまで加速していくとX線などを出したりするので、それを放射線科学に使ったり、医療や工業に利用していこうとするものです。

永田 東京工業大学博士課程3年の永田です。関本研究室で、CANDLE 燃焼方式を高速増殖炉に適用させたものの炉心解析をやっています。学部のときに、今後のエネルギーを考えたときには原子力しかないと思ったことと、資源のない日本がエネルギー需要を賄っていく

ためには、増殖できるという高速炉が重要になってくると思ったことが、原子力を選んだ理由の一つです。それから宇宙が好きだったので、宇宙用原子炉が作れたらと思ったのが二つ目。もう一つは、東工大にあこがれていたことです。理系を選んだのは、小さいころからパズルや算数、数学だけは、誰にも負けないと自負しているくらい大好きだったから。

羽倉 武蔵工業大学博士課程2年の羽倉です。研究室では、使用済み燃料の崩壊熱の計算などを行っています。学部はエネルギー基礎工学科でした。原子力だと思いついたのは、高校2年のときに起こったJCO事故です。何か大変なことになっているのに、何で原子力をやり続けているのかということが全然わからなくて、そういうのを勉強したいなと思ったのがきっかけです。



羽倉「高校生のときにJCO事故が起きた。そのとき、日本はなぜ、原子力をやり続けるのかを疑問に思い、勉強したいなと思ったのが、原子力を選んだ理由です」

佐野 筑波大学修士課程2年の佐野です。現在は電力会社さんと共同で、ABWRの圧力容器内の冷却材の流れについて研究しています。そのために模擬試験装置を作って、水を流して実際に実験をやり、共同研究者の方が解析して、実機に適用できる解析手法を構築することを目的としています。環境に関わるような研究をしたかったので、CO₂の海洋貯留や原子力、宇宙、火山を手がけている今の研究室を選びました。原子力になったのはたまたまです。もともと数学が得意で、国語が異様に苦手だったから理系を選びました。



佐野「模擬試験装置を使ってABWRの圧力容器内の冷却材の流れを調べています。実験と解析がうまく合わないことがあって、大変で時間もかかりますが、やりがいがあります」

嘉村 東京海洋大学修士課程1年の嘉村です。原子炉内の熱流動に関する研究をしています。研究室では、原子炉内の熱流動に関する研究をしており、沸騰伝熱様式の中の環状流という流れの流動特性を予測するためモデルをより高精度化するための研究を行っています。

佐野 それは発電所の中でいうと、どの部分にあたりますか？

嘉村 炉心内の冷却材の部分にあたります。

原子力関係に進もうと考えたのは今入っている研究室の先生の専門が原子力であったこと、また、仕事にする



嘉村「炉心内で事故時想定した環状流という流れの研究をしています。環状流というのは管壁面を液体が、中心は気体が流れている流動です。これが高精度に予測できれば、安全性の向上が期待できます」

のなら社会に貢献できて誇りを持てるようなものがあると思ったからです。理系を選んだ理由は、手に職はある方が良いということで、理系を選びました。海洋大を選んだ理由は、どうしても東京に行ってみたかったのですが、そういう国立で入れるところがもうこしかなかった。

一皆さん割と現実的なのですね。私は原子力学会の男女共同参画委員をしているので、春休みや夏休みに女子高校生が理系に進むための支援として、原子力に関する紹介などをやっているのですが、そういうのは効果があると思いますか。

鈴木 原子力に進むかどうかについては、中高校生では判断する能力がないから、大学で1、2年ぐらい勉強して現実的な判断能力がついてから原子力へ行くのが普通なのかなという気がします。中高というのは周りの雰囲気が進路を決めてしまうところがあると思うので、原子力へ行くことに賛成してくれる人も周りにいないだろうし。

永田 大学受験のときは、おそらく大学の名前や偏差値で決める人が半分以上です。

羽倉 武蔵工大では学群制といって、いくつかの学科から学群が構成され、入学後に専門分野を選択することができるという仕組みを取り入れています。

佐野 筑波大でも工学システム学類から、エネルギーや環境、ロボット、建築などに分かれていく。

前川 東大も医学系と薬学系を別にすると、その他は理学部・工学部を全部まとめた1つのコースなので、3年に進学するときに決める。

佐野 そのときなんじゃないですか、原子力が視野に入ってくるのは。

羽倉 ふつうの人たちは、原子力はいつもたたかかれているイメージがあると思います。いろいろ勉強していき、巨大なテクノロジーだから、みんなで監視していかなければいけないというようなことがわかってくれば、ある程度そのように批判的な目で見られているんだということが、納得できるんですが。

永田 だって、原子力イコール原爆と思う人が圧倒的ですよ。

原子力に携わる人には、社会基盤を支えている責任感と自負心とがある

一技術が純粹にどうかということだけではなくて、社会的にどう見られているかとかも影響としては大きいのかしら。

佐野 親にいても「危ないんじゃない」といわれてしまいますから。

鈴木 原子力の名前がある学科も、昔はかなりたくさんあったけど、東大が学科の名前から「原子力」を消したらどんどん他大学も消してしまって、今「原子力」という名前が学科にあるのは武蔵工大と福井工大ぐらいですか。

一「原子力」という名前がついていると、生徒が集まらないということですか。

前川 最近はまだ注目を浴びていると思います。

鈴木 いろいろごみが出てくる原子力や火力よりも、太陽や新エネルギーの方が夢があって魅力を感じさせる。けれども調べれば、それらにも実はいろいろとマイナス面がある。原子力の夢って何でしょう。

佐野 原子力の技術自体が結構、夢のような技術のような気がします。

一核燃料サイクルは2050年頃には実現されるのでしょうか。

佐野 僕が仕事をしている間は高速炉の実現は難しいというのを聞いたことがあります。

一それでは、原子力で仕事をしている人のモチベーションは何になるのでしょうか。

鈴木 「今は本当にエネルギーがないから、原子力がなくなったら本当に戦争になるよ」という話を聞いたことがあります。中国などがエネルギーを買いあさり、石油もどんどん高くなることを考えると、今は原子力に頼るしかない。現実には、なくてはならないものだなということが、本当に学んでいくにつれてわかります。それがモチベーションになっています。

永田 自然エネルギーをフルに活用できるものが一番いいと思いますが、少なくとも僕たちが生きている間は、原子力がたぶん、メインのエネルギー源になっていくと思います。



永田「少なくとも僕たちが生きている間は、原子力がおそらくメインのエネルギー源になっていくと思います」

佐野 皆さん現実派だから、原子力にいるんだと思うんです。

鈴木 原子力に携わっている社会人の中にも「いつの

まにか原子力に来ていたんだよね」という人が多い。そういう人が今は原子力の品質保証をやっていて、「本当はロケットをつくりたかったんだけど」といいながらも、その人たちは「今こういうことをやることは大切だし、今必要な技術だから、今後50年とか100年とかで絶対原子力は必要になるから、誰かやっていく人がいなくてはいけなからね」と、本当に責任感を持ってやっている。

一原子力は、業界全体が、そういうまじめな人が多いようです。皆さんは、30代の社会人などを見て、何か思うことはありますか。また学会ではどうでしょうか。

前川 30代だと付き合いがあるのは大学の同じ研究室の助教ぐらいで、それ以外の、例えばメーカーの人とはまるで接点がない。

鈴木 原子力学会の年会で開催しているポスターセッションは、そこを通りがかった人といろいろ対話できるので、口頭発表とは別の形で、いろいろ勉強になる。

羽倉 掲示場所も最近はいいいところをとってもらえるようになったんです。ポスターセッションのいいところは、口頭発表よりも締切りが遅いので、ぎりぎりまで研究を進めてから出すか出さないかを判断できる場所。でも全体のCDには収められないので、成果や業績としては見えにくい。

佐野 特に原子力学会は他の学会に比べると原稿提出期限が早い。

一予稿集もA4で1枚しかなく、発表時間も10分です。短いですね。

学会では問い詰められることもある。もっと和やかにならないか

佐野 原子力学会に出たときに思うんですが、企業の方の学生に対する意見が厳しいと感じることがあります(笑)。原子力以外のほかの学会を見学することもあるんですけども、そこでは業界全体の問題としてみんなの一つの問題に対して考えていこうという雰囲気があるように感じます。しかし、私が出る原子力学会の部会では、意見交換というよりも意見のぶつかり合いが多く見られるように思います。企業の方が明らかに学生では答えられないような質問をぶつけてくるようなこともありますし……。

一原子力学会の中でも、熱流動は特にそうなのではないでしょうか。

佐野 僕は学生セッションがあったらいいのになと本当に思っていて、原子力学会は怖くてしょうがないんです。発表すらおぼつかない学生に対して、わからないような質問をぶつけてくる方もいらっしゃるんです。

一攻撃するのではなくて、もっとその研究を深めるためのコメントがほしいですね。

佐野 もし原子力の若手研究者や技術者を育てたいのであれば、もう少し学会全体で和やかな雰囲気が作ればいいと思います。特に熱流動のセッションを一度見たら、きっとわかると思います、怖くて。大体の構図は、学生がわからないような質問をぶつけて、共同研究者の方が助言するのを待つというのが流れとしてあるように思います(笑)。

前川 それは敵意を持った質問なんですか。純粋にそれを聞きたいから質問しているんですか。

佐野 若干敵意を感じる時もありますね。自分のところでもやっている研究で、その結果と違っていたりすると、特定のメーカーが手をあげてきます。

永田 炉物理部会は、どちらかというと学問的な部会だと思います。企業や大学の人は利益云々には関係なく、純粋に学問としての質問をしてくる人が多い印象を受けます。そういう意味では、学会の中でもすごくいいと思う。

鈴木 天文学会へ行ったことがあるんですが、この学会では、うちの大学の先生がアロハシャツで発表していました(笑)。

佐野 火山をやっている人は、ハワイでアロハシャツで発表したりしている。原子力学会もアロハシャツにしてほしいですね。(笑)。

—ほかの学会へ行くと、学生さんはもっとラフな格好で来る人が多い。ジーンズで発表したりとか。原子力学会だけですよね、そんなにすごくまじめなのは。この際だからほかに、原子力学会への要望などあったら。

鈴木 原子力学会は、横の交流もあまりないという気がします。ポスターセッションは学生だけだし。あとは初日の懇親会とウェルカムレセプションも、年をとった人が多くて。

—分野が違えば、全然関連がない。その点、学生連絡会はすごくやっていますね、原子力学会の中の組織としては成功していると思います。

熱いシニアとクールな若手

羽倉 シニアや YGN 世代の人たちと話すとき、シニア世代と比べ YGN の人たちの印象はすごくクールです。原子力を今熱心にはやっているけれども、画期的な代替案があるならば、別に原子力じゃなければいけないとは思っていない。けれど、シニアの人はそうじゃなくすごく熱い。温度差がある。

—シニアの方たちは、自分たちが日本の原子力を築き上げたという自負があるのではないですか。

永田 世代意識かな。今、大学の教授のような世代の人たちは、原子力が上り坂のときで、今の中堅といわれる人たちのときにはもう底のときというぐらいでしょう

か。

鈴木 まわりに、原子力のことをちゃんと話してくれる人がいない中で、シニアの人たちから、原子力関連企業では今までどういうことがあったとか、夢のエネルギー技術を日本に導入して、がんばってここまで建ててきたとか、本当に安全のために気を使ってきたとか、そういう話を直接的に聞けるのはモチベーションになります。

—その世代は非常にアクティブだと思います。

永田 元気ですよ、皆さん。

鈴木 SNW の竹内会長は学生とシニアの対話とかに参加したりして、すごいと思います。

永田 けど、学会はいいものです。学生からすれば、学会ではそういう人前で発表するという機会が持てるし、ほかの人にも聞ける。いろいろな人とも会えるし、場所によっては小旅行にもなる。

鈴木 ただ学生にとっては、学会は発表するために入る場だけの感じだと思うんです。

前川 僕の研究は割と日本ではあまりやられていないテーマなので、海外で発表したり質問したりするのは楽しい。前にポルトガルでその分野だけの人たちが集まるワークショップがあって、本当におもしろかったですね。そんな機会に、今まで論文でしか名前を見ていなかったような人たちと実際に会えるのは刺激になるし、発表を聞けるのもよかったです。僕はアメリカのアルゴンヌ研究所にいたのですが、規模も大きいし、おもしろそうだなという気がします。日本の大学の研究室だと、予算にしてもスペースにしても、できることに限りがある。



前川「海外で発表することやワークショップに参加することは、とても刺激になります」

10年後は—「海外で活躍」「被ばく量低減に貢献」「社会への説明責任果たす」

—10年後に自分が何をやっていると思いますか。

永田 海外で生活を充実している自分を想像しています。できればヨーロッパへ行きたいですね。けれどもアメリカへも行って、高速炉を建てる計画に参加もしたい。

佐野 原子力では今、若手の人があまり多くない。10年後に自分が、若い人たちに今の仕事はどう楽しいかをちゃんと説明してあげたいという気持ちがあります。原子力業界にはこんないいところと悪いところがあるということを説明してあげられればと思います。

鈴木 自分が原子力関係に行こうかなと思ったのは、チェルノブイリ事故がきっかけです。事故で放射能がヨーロッパ圏にも飛散して、中絶した人が数万人単位でした。風評被害の影響もあった。それを聞いて、少しでもみんなが安心できるように、被ばく量を減らすような技術ができればいいな、そんな仕事に携われればと思いました。



鈴木「チェルノブイリ事故で大きな被害がでました。そのときに、みんなが安心できるように、被ばく量を低減できるような仕事に携われればと思いました」

前川 僕は今までの装置の改良や全く新しい装置の開発に携わっていただけだと思います。

—原子力や放射線は怖くないのですよといっても、なかなか難しいですね。

羽倉 もっと量的にわかったほうがいいなと思うんです。本当は問題ない量なのにちょっと漏れたということが問題になる。それより、安全なのかどうなのかということの方が重要じゃないですか。何か、漏れただけですぐ問題にするような社会的な空気や風潮が、原子力の首を締めているという感じがする。

—そういう量の感覚がない人が多いから、これぐらいなら許せて、これぐらいならだめだというふうに割り切る感覚って……。

羽倉 でも、降水確率なんかは、みんな受け入れるようになりましたし、多分そういうことかな。

鈴木 先日、北海道で勉強会というか対話の会合があったんですが、北海道の大学生を原子炉や新日本製鐵の見学へ連れていき、実際にやっている人と直接、話して安心したので、みんなを連れていけばいいと提案していました。

—資料で説明しても難しく、現物を見てもらったり、そこで働いている人と話してもらったりというのが、たぶん一番効果的で、早道なんですよ。けれども今は規制があって、中に入れない。そういうジレンマがある。

鈴木 私は高校生のときに初めて、福島に原子力発電所があって、その電気が東京に送られているということを知って驚いた。すごく疑問が残りました。新潟県では、原子力発電所があるよということは、ちゃんと地元の人には、高校で説明しているのですか。

—発電所が立地している立地町村では、小学校の生徒が発電所に毎年、見学に来るし、お父さんが発電所で働いていたりすることがあるから、その町の子は原子力

発電所のことを、すごく認識している。学校行事として、発電所構内で写生大会やマラソン大会とか、いろいろあるんですよ。だから、その町の子はすごく知っているけれども、隣町になったら、もうほとんど知らないという感じになってしまうようです。

コミュニケーションの場として学会に期待

—最後に一言ずつ。

鈴木 就職活動にしても、人と接することで安心する部分があるので、そういうコミュニケーションの機会や、原子力学会の中の横のつながりが増えていけばいいなと思います。

永田 自分の専門分野とは関係ない人と話すと、新鮮ですし、自分の知らないことも聞けて、楽しい。

鈴木 不思議と行き着くところはそこになってしまいますものね、技術とか新しいものをやっても。

羽倉 そういうコミュニケーションの場である学会の大会に、ちょっとあそこには行きたくないみたいなことにならないような雰囲気やまづつくるのが大事ですね。そのためには、例えば岡先生を筆頭に、ノーネクタイ、カジュアルで集合しなければいけないようにする。

—楽しくて学会に行きたいなとみんなが思うようになってほしいですね。

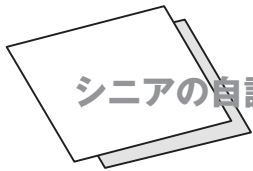
鈴木 東北大の北村先生も、コミュニケーション能力が技術者にも必要になると述べておられた。

—皆さんは10年後にどうなっているのでしょうか。これから、自分の思うとおりにならないような挫折もあるでしょうが、そのときにどれだけ我慢したかで、その後の人生も変わってくると思いますので、がんばってほしいです。今日はありがとうございました。本当に10年後に会ってみたいですね。



これからの原子力界を担っていく学生さん達とのトークは、大変、熱がこもったものとなりました。現実を冷静に見つめながらも、大きな夢も持っている。頼もしい存在です。私も、タイムスリップして、若返ったような気分になり、新たな夢を持ちたくなりました。

(取材・編集協力 石橋すおみ編集諮問委員、
佐田務副編集長)



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

化石燃料からのエネルギー転換を急げ

元東京電力(株) 池亀 亮

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。

最近でこそバーレル120ドルを切って反落しているが、ここ数年、石油価格は高騰を続け、一時150ドル近くまで上昇した。石油に続いて、他の化石燃料であるLNGや石炭の価格も急上昇を続けている。また、この石油価格の高騰は、続く資材や食糧価格高騰の引き金となった。

平成19年中に輸入された原油・粗油は2.4億klで12兆円が産油国に流出した。この年の平均輸入価格はバーレル72ドルであったが、もし120ドルであったら、20兆円に達し、所得流出はGNPの4%に達することになる。他の化石燃料も熱量当たり単価が石油並に上昇すると仮定すれば、化石燃料輸入全体による所得流出は35兆円にもなると計算される。

石油価格の高騰によって、国民の所得が産油国に為す術もなく流出することは、無資源国、とくに高齢化が進み、所得が低迷するわが国経済にとっては大きな負担となる。また、価格上昇によって、石油は国家の安全保障に関わる戦略物資としての色彩が濃厚となり、石油争奪戦を通じて国際紛争の火種となる恐れもある。この困難から抜け出すためには、石油に代わる豊富で安いエネルギーが必要である。

化石燃料に代わるエネルギーとして原子力のほかに、太陽光、風力、バイオエタノール等が挙げられているが、これら再生可能エネルギーは質、量、価格を考慮すると、いずれも残念ながら補助的エネルギーに止まり、豊富で安い基幹エネルギーとして化石燃料を代替できるものは原子力に限られる。

原子力と石油始め化石燃料火力との発電原価の比較については、総合エネルギー調査会電気事業分科会コスト等小委が平成16年に報告を出し、原子力はkWh当たり5.3円程度で、火力と経済的に競合できると評価している。

その時点から4年、石油価格はこの間におよそバーレル当たり100ドル上昇したが、これだけで石油火力の発電原価をkWh当たり15円程度押し上げることになる。

一方、原子力発電の燃料の原材料であるウランの価格も当然、石油価格に続いて上昇したが、原子力発電の場合、発電原価に占めるウラン価格の割合が非常に小さいため、ウラン価格がこの4年間にポンド当たり10ドルから約75ドル上昇したにもかかわらず、発電原価はkWh

当たり約20銭上昇するに過ぎない。

もちろん、発電原価には原燃料費以外に資材費高騰等による資本費の上昇を考慮する必要がある。火力に比して資本比率の高い原子力発電では資材等高騰の影響は大きいですが、それらを考慮しても原子力が石油火力に比してはるかに低い原価で発電できることは明らかである。

将来のウラン資源の枯渇や価格の上昇を懸念する声もあるが、ウラン鉱石は生物起源の石油とは違って鉱物資源であるため、資源枯渇は緩やかで、さらに、リン鉱石や海水中に豊富なウラン資源が含まれており、最終的には高速増殖炉を実現すれば、無限に近い資源を有する。この点は今後の原子力に期待される役割を考える上で極めて重要である。

最近の洞爺湖サミットでは地球温暖化防止が主な議題となり、原子力はそのための不可欠の手段であることが初めて確認された。温暖化ガス排出削減に当たっても経済性の確保は重要で、この点から太陽光、風力、バイオエタノール等の代替手段に比して原子力の優位性は疑う余地がない。

例えば、100万kWの石油火力発電所を原子力に置き換えれば、1年間でCO₂放出を500万トン削減するだけでなく、1,300億円分の石油を輸入しないで済む。

幸いにして、わが国は半世紀前から原子力の開発を国是として中断することなく努力してきた結果、国内メーカーには原子力発電に関する技術が蓄積されており、化石燃料から原子力へのエネルギー転換に対応する基盤があり、さらに、海外で活躍するチャンスが与えられている。

むしろ、心配なのは国内立地である。「原子力は怖い」、「放射能は怖い」という住民の感情が新しい立地を阻害する恐れがある。さらに、中越沖地震によって起こった耐震性に関する不安が解消していないこともあり、事業者も積極的な一歩を踏み出せない状態にある。

今日、最も必要なことは、まず耐震安全性に関する結論を急ぐこと、それに続いて化石燃料から原子力へエネルギー源の迅速な転換を始動させるためのインパクトを与える施策である。国のトップによる強力なリーダーシップを望むこと切なるものがある。

(2008年 8月16日 記)

保全プログラムを基礎とする検査の導入 保安院は地元との対話の継続を

シニアネットワーク連絡会(元住友金属鉱山株) 松永 一郎

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。

平成12年の省庁再編に伴い発足した原子力安全・保安院は、それまで手薄であった原子力規制行政を大幅に強化した。まず始めに、平成11年に起こったJCO事故を契機とした年4回の保安検査の導入。ついで平成14年の東電問題を踏まえた自主検査の定期安全管理審査への格上げと品質保証制度の導入。3番目に昨年の「電力会社の総点検」の結果としての品質保証制度の強化である。そして4番目として、原子力プラントに対する「保全プログラムを基礎とする検査」の導入が今年の8月に決まり、関係省令の改正が来年1月1日に施行される。

今回の規制の強化案は、3年前に総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会の「検査の在り方に関する検討会」で検討が始まり、17回審議されている。原子力発電所の保守管理の充実・強化を目的としており、事業者に対して運転中の状態監視と定期検査を組み合わせた詳細な保全プログラムの作成と、それに従った保守管理活動の推進が義務付けられる。また、運転サイクルごとに保全プログラムの実施結果を自己評価し、自己経験あるいは他のデータも参考にして、プログラムを改善することも義務付けられる。国はその実施状況を定期安全管理審査により確認する。付随的に今まで最長13ヶ月であった運転期間が、条件次第で18ヶ月あるいは24ヶ月まで認められる。また、欧米で広く取り入れられている安全運転成績と設備検査成績に基づくプラントごとの保安活動総合評価がなされ、成績が良好なところと、そうでないところで検査内容に差がつけられる。

原子力絶対安全神話の下に維持基準すらなかった段階から、8年余りで科学的・合理的規制にたどり着いたことになる。多くの議論を経てここまでたどり着いた関係者には敬意を表する。こういった「信頼性重視保全」は欧米ではすでに10年以上前に取り入れられており、それに加えて事業者の自主管理・改善努力が大幅に認められるようになった結果、原子炉の操業安全率の向上と稼働率の向上、ならびに従事者の被ばく低減の3つが同時に達成されている。我が国にこれほど早く導入されたのは、平成14年以降の日本の原子力プラントの稼働率の低さと従事者の被ばく線量の高い原因が、事あるごとに規制の不備にされてきたためであろう。また、建設後30年を越える原子炉が続々と出てくる「高経年化炉の時代」が目前に迫っており、設備・系統の経年劣化の科学的、合理的

な判断が必須であったことも理由の一つであろう。

我が国の原子力発電はここ数年稼働率60~70%台に低迷しているが、はたして今回の保全プログラムの導入によりそれが大幅に改善されるだろうか。低迷の原因が一律ではないので一概にはいえないが、状態監視保全の導入により、定期検査時におけるポンプ、モータといった動的機器の不必要な分解点検が減るため検査時間が圧縮されること、分解点検の際の異物混入などが原因で、全トラブルの30%を占めるともいわれている検査後の運転再開時のトラブルが減ること、PDCAを廻すことで保全技術が向上し、不測の事態による炉の停止が減ること、運転期間が18ヶ月あるいは24ヶ月(平成26年度から)まで延ばせること、などにより明らかに向上するであろう。ただ、我が国における計画外停止の発生比率は0.2回/基・年で諸外国の0.8~3.1/基・年に比べて際立って低い(2003年)。問題なのは一たん、炉が停止した後の立上げまでの時間が長いことで、米国に比べると4倍だそうである¹⁾。その理由は、地方自治体と事業者間で結ばれた安全協定などにより、単純な操作ミスや部品の損傷であっても、原因と対策を地元の説明するまでは再開が認められないことにある。裏返していえば、今までの事業者の保安維持の姿勢や国の検査に信頼性がなく、地元が再確認しないと安心できないということなのだろう。

今回の保全プログラムは科学的、合理的で外からも見えるものであり、運転トラブルなども減ってくれば地元の事業者、国に対する信頼も回復すると思われる。保安活動総合評価の結果も一般に公開して、事業者の安全確保に対する努力を地元の人達に見せるとよい。

原子力安全・保安院は導入に先立ち、地方自治体および地元住民に対して90回以上の説明会を開いたそうである。その効果は大きく、地元および自治体の今回の早期受入に繋がったものと思う。これを契機として、国の規制部門としても引き続いて積極的に地元とのコミュニケーションをとることで、地元住民と自治体の安心感の醸成に努めてもらいたい。そのことが、遠回りのようであるが、海外のように部品の交換だけで運転の再開を認め、その後に原因と対策の報告をするという「早期運転再開」への路を開くものと考えられる。(2008年8月25日記)

—参考文献—

1) 月刊エネルギー, Vol. 6, 84(2008).

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

「日本のチェルノブイリ」と言われて

理研仁科センター 稲村 卓

私は、原子力学会の会員であるけれども、原子核構造の実験的研究を専門にしてきたので、原子力の周辺にいる一人である。いわば外野席で、わが国の原子力の健全な発展を願ってきた、と自認している。そんな私にとって、きわめてショッキングな出来事は1999年の「JCO事故」であった。そのとき日本にいたとしても、とてもショッキングであったと思うけれども、外国で聞く第1報は、ショッキングであることを超えて、ほとんど恐怖に近い気持ちでわが国の原子力の将来に絶望せざるをえないのか、と暗澹たる思いを余儀なくするものであった。そのときに思ったことを記して、これからのわが国の原子力の健全な発展の一助になれば幸いである。

私は、理研を定年退職して、98年4月からワルシャワ大学重イオン研究所に勤めることになった。翌年の9月、ドイツのマインツで会議があり、そこに出席していたことのであった。忘れもしない30日の昼ごろ(現地時間)、会議の主催者で旧知の間柄にあったマインツ大学のB教授が「日本の東海村で大変なことが起こっている」とJCO事故の第1報をもたらしてくれた。かれの情報を要約して、当時の日記には次のように記されている。「東海地区の核燃料取扱い施設(民間会社)で大変な事故が起こった。核分裂の連鎖反応が起こってしまったというのだ。手のほどこしようがない、という情報だ。困ったことだ」翌日の朝には街に出てドイツの新聞2紙を買い求めていることがわかる。いずれも東海事故(JCO事故)を大きく報道していた。その日の午後2時のTVニュース(ドイツ語全国放送)ではトップで「日本のチェルノブイリ」と報道されていた。やがて事故の事情が明るみになるにつれ、私は恥ずかしい事故だと思わずにはおれなかった。チェルノブイリの事故は技術的な問題とヒューマンエラーが重なって起こった事故であった。けれども、JCO事故には技術のかけらもない。ヒューマンエラーという範ちゅうに入れるべきこともない。日本の高度な原子力技術の陰で、まことに恥ずべきことが行われていたのだ。そのあとで、会う人ごとに、ワルシャワにもどってはもちろんのこと、「日本でねー、信じたい」といわれて口惜しかった。かれらが異口同音にいていたように、わが国の技術水準だけからみれば起こりえないことであるけれども、「ありえる。やっぱりそうか」という思いが私にはあったからだ。

私は2002年の秋、任期を終えて帰国した。それから今日まで6年の間に、原子力に限らずあるはあるは、次か

ら次とデータのねつ造改ざんがあつと絶たない。最近の新聞記事(朝日8月9日、33面)によると、全国の気象台でミスやねつ造が相次いでいたという、信じがたいことがある。私は、かねて心配していたように、現場の疲弊ということを深刻に受け止めなければならない事態になってきている、と思う。換言すれば、現場が疎んじられている。これは、管理型組織の行き着くところなのだ。私がJCO事故を「ありえる。やっぱりそうか」と思わざるをえなかった理由はそういうことを懸念していたからであった。

管理型組織は紙の書類をやたらと増やす。ところが、そういう書類をうずたかく積んだところで、現場の安全や改善、あるいは士気を高めることにはならない。実際、新聞の報道等にある不祥事は、そういう書類があるにもかかわらず起こっている。JCO事故も例外ではなかった。私はかつて、安全に関して、紙の書類を減らすことを提案していた。これは一般化できる。

私は理研を定年退職するまでの最後の4年半を研究所全体の安全をみる責任者として過ごした。その間に、原子力安全にかかわる方々ともお会いする機会があった。また、大学その他の研究機関の安全にかかわる方々ともお会いすることがあった。そういう経験から、全国に呼び掛けて「学術研究機関における安全」シンポジウムを開催するなどを行ってきた。その思いは「安全は管理するものでない」という思想をわが国に広めたいということにあった。

安全は人権として護るべきものである。そのことを徹底するためには、現場で働く人びとの教育訓練を欠かすことができない。そうして、現場に管理のための報告書を求めないこと。現場にはその職場に応じて日誌(運転記録などを含む)がある。それは、管理報告のためのものでなく、本来現場で働く人びと自身のためである。そこから、安全の維持、作業の改善、装置の改良などの発想が生まれてくる。現場日誌はそういうものでなければならない。そのためには、現場の人びとが誇りを持って仕事に従事できる環境をつくる必要がある。その施策の第一は待遇の改善、そして現場に練達の人を少なくとも一人は配置することである。練達の人をすべて管理職として現場から遠ざけてしまってはならない。

誇りを持って働く人びとの職場からデータのねつ造や改ざんはありえない。また、JCO事故も起きなかったであろう。(2008年9月10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

巨大トリウムエネルギー産業の 早期世界展開

トリウム熔融塩国際フォーラム 古川和男,
京都大学 亀井敬史

1. はじめに

世界的なエネルギー・環境そして貧困(テロ抑圧)問題の打開には、人類の叡智・諸方策を総動員しなければならないが、その中核を担うものとして核分裂エネルギーの平和利用はいよいよ重要になっている。

当面、既存のU-Pu燃料サイクル路線に依存せざるをえないが、それに加えてTh-U路線を再考する機が熟していると考えられる。その論拠と対策の概要を本誌6月号で紹介¹⁾したが、世界を取り巻く情勢はさらにその方向に向かっていると思われる。例えば、予算凍結の米国GNEP、危機に瀕したNPT体制が上記の方向を象徴し、洞爺湖サミットでも生産的・創造的なものは何も示されなかった。

2. 新構想：トリウム熔融塩核エネルギー協働システム

われわれの提唱する路線は、基礎を米オークリッジ研の熔融塩増殖発電炉(MSBR)に置くが、1980年以降に思想を抜本的に改変したことで、迅速で確実な世界展開を可能にした。数十名の国際協力で構築されたその構想をトリウム熔融塩核エネルギー協働システム(THORIMS-NES: Thorium Molten-Salt Nuclear Energy Synergetics)と名づけ詳細に報告²⁻⁵⁾してあるが、この30年来の原子力工学教科書にはトリウムや液体核燃料の記述はなく、原子力専門家さえ基礎理論ましてそれらの技術面の理解は進んでいない。かえって既存の核技術にとらわれない非専門家の理解と支持が広がっている⁶⁾。現状の危機感と共に発電と増殖の分離や系の単純化等のサプライチェーンの合理性が理解されたからであろう。

3. 主要な技術内容概要

システム構成： THORIMS-NESの最盛期を2060~70年に置くが、それによって世界の1次エネルギーの約半分となる10 TWe供給も可能である。標準モジュール化した10~30万kWeのFUJIシリーズ原発およそ5万基が稼動しよう。これは熔融塩 ${}^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ThF}_4-{}^{233}\text{UF}_4$ (-PuF₃)燃料の黒鉛減速炉であるが、MSBRと異なり連続化学処理および炉心黒鉛の取替なしで燃料自給自足という理想的原発となる。炉本体は密閉された単純な常圧タンクであり、工場で完成しその量産が可能である。炉の寿命終了後は世界の数十か所に設けた「地域センター」で再生される。ここでは燃料塩再生のほか、加速器熔融塩増殖装置(AMSB)で ${}^{233}\text{U}$ の製造が行われる。THORIMS-NES導入初期の軽水炉との共存期には、使用済み核燃料内のPuが単純なフッ素化処理で燃料塩に

できる。これで現在、各国で処分に行き詰まっている使用済み核燃料を活用できるだけでなく、軽水炉の下流工程を置換え単純化することで、規模拡大が予想される軽水炉路線を強力にバックアップできる。

核燃料増殖サイクルの完成および終末期処理： 燃料サイクルは、燃料加工・核反応・化学処理の全工程を通じて単一液相のFLIBE系熔融塩のみを用いた簡潔なものであり、核産業全体の作業負荷を大幅に低減できる。この塩は照射損傷がなく、高熱容量・高溶解度をもつ核反応・熱輸送・化学処理兼用の作業媒体であり、核廃棄物の最終消滅処理媒体としても理想的である。

安全性： 余剰反応度はわずかでよく、制御棒不要といつてよいほど理想的な制御性を持つ。1次系の破損が起きても、漏洩塩は受け皿で貯蔵タンクに収めるか、安全なガラス固化体に凝固することで放出される放射能をわずかにできる。

核拡散防止： 燃料サイクルを循環する熔融塩中の ${}^{233}\text{U}$ は常に ${}^{235}\text{U}$ を伴うため、これによる強力な2.6 MeVのガンマ線により軍事転用はできない。

社会適合性： 超U元素類はほとんど生まれず、高レベル廃棄物は圧倒的に減少する。固体燃料体の製造・解体・再処理・再加工・輸送・貯蔵など不要で、付帯施設・作業・廃棄物発生が激減し産業全体の経済性が大きく改善される。小型炉でも経済性を確保でき、安全性、操作性、負荷追従性、核拡散防止性が高いことから、送配電網の確立していない途上国などへの導入も容易である。

4. まとめ

本構想に対しては諸国の指導者から良い理解と支持、そして数多くの期待が寄せられている。すでに基盤技術は整っており、わずかな資金・人員・期間で実現可能である。世界に冠たる原子力産業を擁するわが国こそリーダーシップをとり、国際協力のもとでトリウム核エネルギー産業の世界展開、そして地球環境救済に踏み出そうではないか。
(2008年9月15日記)

—参考文献—

- 1) 古川和男, 日本原子力学会誌, 50〔6〕, 390~391(2008).
- 2) K. Furukawa *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **27**, 1157~1178(1990).
- 3) K. Furukawa, *et al.*, *Electrochem.*, **73**, 552~563(2005).
- 4) IAEA-TECDOC-1536, Vol. 2, 821~856(2007).
- 5) K. Furukawa, *et al.*, *Energy. Convers. Manage.*, **49**, 1832~1845(2008).
- 6) 古川和男, 「原発」革命, 文春新書(第2刷), (2008).

本誌では学会誌50周年記念企画の一つとして、創刊まもないころの学会誌の巻頭言を掲載しています。今月号では、今から44年前の当時に、プルトニウム利用の重要性を訴えられた武田栄一氏の巻頭言(1964年発行)を掲載します。

なおこのタイトルは、1963年に製作されたイタリアの映画「昨日・今日・明日」にちなんだものなのかもしれません。

日本原子力学会誌 Journal of the Atomic Energy Society of Japan

1964年11月号

原子力研究の昨日・今日・明日

東京工業大学 原子炉工業研究所 武田 栄一

ちかごろ、われわれの関心をもつ原子力研究の題材は、次第に精密化されてはくるけれども、小さく固定されてきたように思われてならない。大きな問題点はすでに諸外国でほとんど片付けられ、“落穂”をついている感じである。このようにいうことはもちろん言い過ぎであろうが、われわれが現在の時点でのような原子力研究に取り組むことが一層有意義であるかを反省してみることは無駄ではないだろう。

われわれが置かれた現在の立場を正しく認識するには、過去から現在に至る時代の推移を分析し、さらにそれが未来にわたってどのような方向に変わりつつあるかを観察することが必要である。

20年前には原子力の平和利用は全くの夢であった。1944年の頃に存在した原子力施設はほとんどすべてが軍事利用につながり、大規模な原子炉はすべてプルトニウム生産を主目的として運転されていた。1940年代の核データはほとんどが精度の悪いものであった上、原子炉設計の基礎理論も不十分なものであった。しかし基礎理論は1940年代の後半から50年代の前半にかけて素晴らしい進展をみせ、核データは50年代に著しい蓄積と精密化を見せた。

いまから10年前の1954年の頃を顧みると、アメリカ、イギリス、ソビエトの諸国によりやく原子力平和利用への意欲が動き出し、相当大規模な発電炉の開発計画が持たれ始めた。電子計算機の活用は戦時中から始められてはいたが、大型計算機が使われるようになったのは1950年代に入って以降のことである。これによって原子炉の設計は急速に精密化されることになった。1964年の現在においては、過去10年間の努力が実を結び、原子力平和利用の夢がほぼ現実のものとなったことは多くの人々の等しく認める所であろう。このような経過を回顧して、可能性を現実化するために払った人類の努力は素晴らしいものであったと思うし、また現代に生きる人間の誇りにしてよい事柄であると考ええる。

ここで10年後の世界の原子力開発の状況を予想してみると、原子力による発電コストが火力のそれを下まわることが十分考えられる。したがって、地域差等の諸事情はあるにしても、新設発電所の相当部分は原子力ということになろう。それらの発電所からは当然大量のプルトニウムが副産物として生産される。アメリカ、イギリス等の発電計画から推定すると、1975年の頃までに、もしプルトニウムの本格的利用の道が開かれていないと仮定すれば、20~30トンのプルトニウムが年々世界中で生産され、その時までの蓄積量は約100トンにも上るものと考えられる。これらの数字は1980年にはその2~3倍にも増大するであろう。

このプルトニウム蓄積の圧力は、高速炉の早期実現化に拍車をかけることになろうが、現在までの見通しでは、その完成は1985年頃と予想されているので、上記圧力の緩和にはあまり役立たず、プルトニウムの熱中性子炉への本格的利用が急がれるだろう。

いずれにしても、今後10年間の原子力研究の中心課題は、プルトニウムの利用研究に集中される可能性が大きく、プルトニウムの物理的ならびに化学的研究、炉物理、炉設計、燃料研究、安全取扱い等の面で大きな進歩が起るだろう。さらに研究能力に余裕があれば、 ^{233}U 燃料の開発から熱中性子増殖炉の方向への進展も起るものと思われる。このようにして、現在が主として ^{233}U に依存した原子力開発を行っているとすれば、10年後にはさらにその技術の上に、プルトニウムおよび ^{233}U を自由に使いこなす原子力開発を行なっている可能性が強い。

以上が私の10年後についての予想であり、現在の原子力研究を再び取り上げて考えるとき、まだまだ大いに努力をせねばならぬことを痛感する。

(1964年 10月28日)

私の 主張

地層処分の実現に向けた取組みについての 私見

日本原子力研究開発機構 前田 敏 克

高レベル放射性廃棄物等の最終処分の方法として、地層中への埋設が考えられている。これは、1万年後においても10万年後においても減衰せずに残り続ける長寿命の放射性廃棄物は、地表近くで無期限に管理するよりも、安定な地層中に隔離するほうが現実的に公衆へのリスクを小さくすると考えられるからである。

処分場を閉鎖したあとの安全性を判断するために、事業申請時の安全審査において潜在被ばくを評価しなければならないと考えられている。ここで潜在被ばくとは、「将来に起こるかもしれないし起こらないかもしれない被ばく」であり、廃棄物処分における潜在被ばくのプロセスとしては自然過程と人間侵入とに分けられる。

長寿命核種が減衰するまでの1万年あるいは10万年を超える超長期までを評価の対象とするならば、地層処分の潜在被ばく評価には大きな不確かさが伴う。これは、自然過程については地質環境の変化や地形変動などの予見し難い不確かさが含まれるし、人間侵入については技術進歩により廃棄物への接近がたやすくなることを評価し難いためである。

しかしながら、閉鎖後の安全性を判断しようとするときに、1万年あるいは10万年を超える超長期の被ばく線量評価を中心とするのははたして妥当であろうか？むしろ、例えば1,000年程度の間において放射性物質の漏れがないように信頼性の高い工学的設備(人工バリア)を作って、かつ、人間の侵入を防ぐために土地利用を制限するなどの安全管理をすることがより重要ではないか？

そうしたことも念頭に、処分が社会に受け入れられるための方策や技術的説得力のあるロジックの構築が必要であると考える。

社会的受容性も考慮した規制制度

地層処分を実施するためには、原子炉等規制法に基づいた安全審査を受け事業許可を得る必要がある。原子炉施設などでは数十年後の廃止措置によって危険源の大部分が取り除かれるが、処分場には危険源となる放射性廃棄物がきわめて長い期間存在し続ける。したがって、廃棄物の放射能が十分には減衰しなくても、適切な人工バリアを適切な地質環境に設けた多重バリアシステムにより生活環境から隔離し、公衆の潜在被ばくを許容されるレベル以下にすることが求められる。

しかしながら、被ばくを評価しなければならない時間スケールが、1万年あるいは10万年といった超長期間であると想定すれば、規制当局が考える不確かさを考慮

した上で施設の安全性を「大丈夫」と判断することも、公衆がそれを受け入れることも、必ずしも容易でない。また、将来にわたって安全であるように一所懸命知恵を絞って最善の技術を投入することや、専門的な第三者機関による十分なコミットが行われることは当然ながら、事業許可の時点での「大丈夫」という判断に加えて、その後、得られるかもしれない新たな知見や後世の人々が下すかもしれない異なった判断について全く考慮しないということは、ある意味「おこがましい」。

したがって、将来のある時点でその先の判断について決定できるように配慮した「段階的アプローチ」の考え方が有効であるというのが、国内外での一致した見解である。最もわかりやすい「段階的アプローチ」を取り込んだ規制制度は、安全性の再確認(定期安全レビュー)と廃棄体回収のための措置を前提として、まずは閉鎖までの許可を与えるような分割許可制度であろう。国の委員会では、平成18年から20年にかけて地層処分の安全規制制度を検討し、段階的アプローチの重要性とその具体策としての閉鎖時の意志決定プロセス、定期安全レビューおよび閉鎖までの廃棄体回収のための措置の必要性が示された。その結果を踏まえて策定された原子炉等規制法では、定期安全レビューに加えて、閉鎖の段階で「国が認可・確認する」という決定プロセスが規定された。

一方、廃棄体回収のための措置は、今後の施設設計を踏まえて検討されると考えるが、閉鎖の判断をするときに、その世代の人間がどのような選択をするにしても「できるだけ迷惑にならないように」しておくべきである。閉鎖が予定される、例えば100年後の技術をもってすれば、どんな埋め方であっても簡単に回収できるかもしれないが、記録を保存しておくだけで十分かもしれないが、将来世代の安全を確保するために現世代で取りうる最大の努力を施しておくことは、廃棄物処分の安全性が拠って立つ倫理である。

具体的な廃棄体回収の維持方法としては、安全に回収するという観点から、「少なくとも閉鎖までの100年程度は放射性物質をほとんど漏えいさせない廃棄体もしくは廃棄体と一体の人工バリアを設けること」とすることが一案と考える。

施設設計と安全評価

現在、閉鎖後の安全性を評価するための研究が研究開発機関等で実施されているが、よく見受けられる評価結果としては、横軸を時間、縦軸を被ばく線量として線量

ピークの高さに注目したものである。

そこでは往々にして、施設設備の重要度の違いや時間スケールに応じて不確かさに差があることが無視され、例えば、ある人工バリアの閉じ込め性能を高度化しても10万年後のピーク線量に効かないので無意味などといった判断が見受けられる。冒頭に述べたように、時間経過とともに増大する不確かさが安全評価を難しくしているのであれば、時間スケールに応じて不確かさが異なることを無視し、1,000年と10万年の話を一緒くたにすべきではない。「横軸をログスケールにした評価結果を安易に語らない」という認識を持つべきと考える。

被ばくの可能性が継続する以上、不確かさは大きくても超長期的な評価をおろそかにしてはいけませんが、例えば1,000年程度について最善の設計を施すことは、1,000年間の安全性のみならず、1万年あるいは10万年を超える超長期の安全性を考えるベースともなり得るはずである。それが10万年後のピーク線量に及ぼす影響はわずかであっても、1,000年間の閉じ込め性能を向上させることや、ある期間適切に閉じ込められることを確認することは無駄な努力ではないと考える。

これは「現時点および予測可能な将来を考えたときにその限りで最善の手段を技術的に講じておくことが、遠い将来の人々および環境を防護する上で最も合理的」という適用可能な最善技術(BAT: Best Available Technique)の思想であり、頑健な多重バリアシステムとするための一つの考え方として、原子力安全委員会においてもその検討の必要性が示されている。

事業者はBATの思想で頑健なシステムを構築すべきであるし、規制当局もBATの評価をより明確化するために、時間スケールを踏まえた施設的设计基準とその妥当性判断のための安全評価手法を用意しておくことが必要である。これらは、公衆からの信頼感を得る上でも有効と考える。以下に一案を示す。

- (1) ~1000年程度(一般的に人工バリアの信頼性高い性能評価が可能と考えられる期間)
 - ・ほとんど漏えいしない人工バリアを複数設ける(人工バリア性能/放出量評価)
- (2) ~数千年程度(一般的に地質環境の安定性が保たれると考えられる期間)
 - ・人工バリアなしで生物圏にほとんど漏えいしない地質環境に位置(天然バリア性能/放出量評価)
- (3) ~数万年程度(一般的に地質環境の変動が予測可能と考えられる期間)

・線量を達成可能な限り低く抑える頑健な多重バリアシステム(多重バリアの頑健性/線量評価)

(4) 数万年以降

・同上(多重バリアの頑健性/(4)をベースに線量ピークまでの外挿評価)

人間侵入をどう扱うか

人間の行為や掘削技術の進歩は予測困難であるので、廃棄物を深く埋めることにより人間侵入による被ばくの可能性がどこまで低減されるかわからない。しかし、なんらの管理も行わないのであれば、人間侵入は想定されるシナリオであり、安全評価が必要と考える。

一方、地層処分では事業者が申請すれば、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法令」(特廃法)に基づき、国が掘削制限できることとなっており、また、同法令により国が記録を永久に保存する。これらは、国による管理が行われることを意味し、さらに、国が規制を考えるにあたって、国が存在しない状態を想定することは無用と考えられることから、処分場掘削などの人間侵入シナリオは安全規制として要求するシナリオから外してよいと考える。

なお、地層処分以外の処分については、現時点では事業廃止後に国が関与する法令上の規定がないことから、事業廃止後の近い将来においても、人が非意図的に侵入するというシナリオを想定せざるを得ないと考える。

廃棄物処分は原子力基本法の「民主的、自主的」の原則にのっとるが、「自主」の努力に求めるべき範囲がある。それを越えた部分は国が責任を持つ必要があると考える。すなわち、地層処分以外の処分についても事業廃止後には国が関与することが可能となるような法的規定が必要ではないか。

おわりに

これらの私見は一案であり、今後さらなる議論を期待する。特に施設設計基準を明確にすることは、安全研究の方向性を決める上でも重要と考える。

多くのご助言をいただいた原子力安全基盤機構の阿部清治氏、日本原子力研究開発機構の中山真一氏をはじめ、原子力安全・保安院放射性廃棄物規制課での行政研修中に議論に付き合っていたいただいた皆様に感謝します。

(2008年 7月31日 記)

談話室

核分裂は誰が発見したのか？(その1)

—超ウラン元素探求競争とナチスのユダヤ人迫害

原子力発電環境整備機構 河田東海夫

核分裂は今から70年前の1938年12月に発見された。その功績でオットー・ハーンがノーベル化学賞を単独受賞したが、その理論的解明を行ったリーゼ・マイトナーが受賞しなかったことについては、当時から様々な議論があった。最近明らかになった当時のノーベル賞の選考経緯なども含め、核分裂発見の全体経緯を振り返ってみる。

リーゼ・マイトナー

1878年11月7日、ウィーンのプロラター公園から西に向かう並木通り沿いのアパートで女兒が誕生した。ユダヤ系弁護士マイトナー家の8人兄弟中3番目の子供として生まれた聡明な少女リーゼは、自由で開明的な環境で育てられ、幼い頃から数学と科学に興味を示した。高校卒業後教師の資格を得た後、1901年、23歳でウィーン大学に入学し、女子で物理学の授業を聴講する最初の学生となった。間もなく、当時新しい「原子論」を展開していたルートヴィッヒ・ボルツマンがウィーン大学に着任し、彼女は最新の理論物理学の薫陶を受けることになる。しかしながら、彼女が「非均質体における熱伝導度」という論文で博士号を取得して7ヵ月後の1906年9月、健康を害していたボルツマンは自らの命を絶った。その後、当時革命的な「量子仮説」を唱え始めていたベルリン大学のマックス・プランクがウィーン大学を訪れ、その際、マイトナーの指導教官は彼女をプランクに紹介した。物理学の新分野である放射線の研究を始めていたマイトナーは、このことがきっかけとなり、プランクのいるベルリンでの研究を決意した。女性が物理学を研究すること自体が異例な時代、そのために独身女性が故郷を

遠く離れるなどということは、一層異例なことであった。しかし、彼女の決意の固さと研究への情熱に負け、両親はとりあえず1年間程度のベルリン行きを許した。

ハーンとマイトナーの研究協力

29歳を目前にしたリーゼ・マイトナーは1907年秋にベルリンに移り住んだ。当時のドイツはまだ極めて保守的で、ベルリン大学も、男子学生がいる教室や実験室への女性の出入りを禁じていた。マイトナーは、プランクの特別許可で物理学の講義は聴講できたが、研究員として実験場所を確保することはできなかった。しかしながら、間もなく、同年齢の化学者オットー・ハーンを紹介されたことから、状況は一転した。ハーンは、有機化学で博士号を取得した後、新分野の放射化学研究に転向し、1905年秋からは、その分野の第一人者であったアーネスト・ラザフォード(当時カナダのマクギル大学教授、のちに原子核を発見)に師事し、新放射性元素の発見などで優れた業績を上げた。1906年夏にドイツに戻ったハーンは、ベルリン大学に放射化学研究を立ち上げつつあり、同分野の研究実績を持つマイトナーに研究協力を申し出た。ハーンの実験室は、化学教室の地階に空いていた木工室を利用したもので、大きな檜の机の上に、ラジウムなどの貴重な放射線源と、放射線測定用検電器などが取り揃えられていた。ここがハーン、マイトナーの共同研究の場となったが、化学教室の主任教授は、マイトナーが学生実験室には顔を出さないことを条件に、木工室での彼女の仕事を許可した。



マイトナーが生まれたアパートと彼女の生家であることを示す玄関脇のプレート(ウィーン市ハイネ通り)



木工室のハーンとマイトナー(1910年ころ)
(マックス・プランク研究所アーカイブ提供)

化学者ハーンと物理学者マイトナーとの研究協力は、種々の放射性元素のベータ線吸収曲線の解析などで目覚ましい成果を上げはじめた。こうして2人の協力は一層緊密になり、友情が深まっていったが、良家の娘として育てられたマイトナーは極めて控えめで、仕事場を出ると、2人だけで食事や散歩をするなどということは一切なかった。

父親からの仕送りに頼る身分であったが、マイトナーの異国での研究生生活は次第に長引き、1912年にはプランクの助手として採用され、給与も支給されるようになった。同年10月にはベルリン郊外のダーレムにカイザー・ヴィルヘルム研究所(KWI)が開設され、その化学研究所にハーンが移ると、マイトナーも客員研究員として招かれ、そちらに研究の場を移した。

1914年に第一次世界大戦が勃発すると、ハーンは国防軍曹長として出征し、マイトナーはエックス線技師としてオーストリア軍に志願し、前線で負傷兵の看護にあたった。この間も、両者の研究協力は、一時的な休暇などを利用して細々と続いた。こうして、当時の周期律表で空白となっていた91番元素を発見し、その成果を、休戦協定が成立した1918年に公表した。新元素はマイトナーの提案により、プロトアクチニウム(Pa)と命名された。

超ウラン元素探求の国際競争

ハーンとマイトナーは大戦後もしばらく研究協力を続けるが、次第にそれぞれ独自の道を歩み始めるようになる。物理学者としてのマイトナーの業績の評価は次第に高まり、ニールス・ボーアやアルベルト・アインシュタインなどとの親交も深まっていった。

20世紀はじめの物理学は、量子力学や特殊相対性理論など理論面で革命的な進展を遂げつつあり、原子核発見や、中性子発見など、重要な発見が相次いだ。1934年にパリのフレデリックとイレーヌ・ジョリオ＝キュリーが α 線照射で人工放射性核種ができることを発見すると、ローマのエンリコ・フェルミらのグループは、電荷を持たない中性子で一層効率的に人工放射性核種を作ることができ、減速した熱中性子ならさらに効率が上がることに明らかにした。その後フェルミらは、周期律表上のほぼ全元素について、中性子照射による放射性核種の生成状況を調べた。特に最も重い元素ウランからは、4種類の半減期を持つ放射性核種の生成を認め、そのうちの2種類はウランよりも重い人工元素、すなわち超ウラン元素(TRU)の可能性があると発表した。

この報告は世界の科学者を大いに刺激し、各地でウランの中性子照射によるTRU探求の競争が始まった。マイトナーは、この研究ではハーンとの協力が不可欠と考

え、当時、KWI化学研究所長として管理業務に追われていたハーンに、数年間中断していた研究協力の再開を申し出た。その後、若い分析化学者フリッツ・シュトラースマンも加わり、マイトナーらのチームは、パリのジョリオ＝キュリーチームと並んで、TRU探求レースの先頭ランナーとなった。こうして彼らは、1938年をはじめまでに、ウランの同位体かTRUと考えられる半減期の異なる10種類以上の放射性物質の存在を確認し、3つのTRU壊変系列を推定するに至った。

ナチスドイツからの脱出

TRU探求レースが始まる前年の1933年、ナチ党を率いるアドルフ・ヒットラーが政権をとり、厳しいユダヤ人迫害政策が始まった。このため、アインシュタインをはじめとする著名なユダヤ系科学者が多数追放され、米国等に亡命した。さらに1935年9月にはニュルンベルク法が施行され、ユダヤ人は公的活動から完全追放され、市民としての生活権を奪われた。そうした中マイトナーは、オーストリア国籍の客員教授であったため、ドイツ国内法の適用から除外され、KWIでの研究生生活をなんとか続けることができた。しかし1938年3月に突如、ドイツ軍が国境を越えオーストリアを併合したことで、一転してユダヤ人排斥法がマイトナーの身に直接及ぶようになった。ハーンらは、ボーアら海外の関係者とも連絡を取りつつ、彼女をドイツ国外に安全に連れ出す方策を検討しはじめていた。そうした中7月4日、ドイツ科学者の国外移住禁止令がまもなく発布されるとの情報がもたらされた。この情報に危機感を募らせたオランダのクロニンゲン大学教授ダーク・コスター(ハフニウムの発見者)は7月11日夜に急遽ベルリンに入り、ハーンらと接触してマイトナーの国外救出作戦を挙行した。7月12日朝ハーンからこの緊急計画を告げられたマイトナーは、その日は平常を装い夜8時まで仕事をし、帰宅後、急いで荷物をまとめた。翌朝マイトナーは、友人に駅まで送ってもらい、オランダ行きの列車に乗って、31年間を過ごしたベルリンを離れた。トランク一つと、財布に入れた10マルク、それに別れ際にハーンが非常時の足しにと持たせてくれた母親の形見のダイヤモンド指輪が全財産であった。別々に乗車したコスターがその後合流したが、彼はあらかじめオランダ当局と折衝し、国境で彼女のビザなし仮入国を許可してもらおう手筈を整えておいた。国境の入国審査官は彼女の入国を黙って認め、ドイツ脱出作戦は成功した。翌朝、コスターは、あらかじめ示し合わせたとおり「女兒無事出産」という電報をハーンに送った。

(続く)

(2008年10月14日記)



水化学部会主催

「第5回水化学サマーセミナー in 福井」開催報告

標記セミナーが7月15～17日に福井市フェニックスプラザで開催された。過去4回は研究専門委員会主催であったが、昨年の「水化学」部会発足に伴い今回(第5回)から部会主催となった。そして水化学部会での技術交流は、年4～5回開催の研究会で行われているが、サマーセミナーでは普段、学会活動には参加しにくいプラントサイトの化学者にも積極的な参加を呼びかけ、水化学の研究、設計、および実際の管理現場の間での技術交流を図っている。部会員170名の所帯で100名強の参加者を得て、講演14件とポスター16件に対し活発な質疑と討論が行われた。

1. 電気化学計測や電気化学に基づく腐食等のメカニズムに関する研究

柴田氏(福井工大)による招待講演では、昨今、関心が寄せられている炭素鋼腐食モデルと腐食科学に係わる歴史と知見について紹介があり、高温水中での炭素鋼腐食は、マイクロセルによる進行が支配的との見解が示された。その他、電気化学手法に基づく配管減肉速度評価手法の紹介、応力腐食割れ(SCC)に寄与する臨界電位について、その概念と高温高純度水環境への適用現状に係わる展望の紹介と当該環境下での研究例が少ないという課題[明石氏(ITS)], Zr合金被覆管腐食機構について従来難しいとされてきた電気化学手法での説明があった。

2. ポスターセッション

電力会社、メーカー、大学それに各研究機関の若手を中心とした研究者、技術者から全体で16件のテーマの発表があった。内容は、腐食環境に係わる基礎データの評価から実プラントでの水化学関連技術の運用実績とその改善に結びつくものまで広範囲にわたり、各テーマともセミナー参加者と熱心な議論が行われた。

3. 水化学がかかわる改善の取組み(1)

泊発電所での蒸気発生器2次側 ASCA(Advanced Scale Conditioning Agent)洗浄による伝熱管性能およ

びBEC(Broached Egg Crate)閉塞の緩和等改善効果、敦賀2号機の亜鉛注入による線量率約30%の低減効果、電中研での被覆管サブクール沸騰表面へのクラッド付着に及ぼすNi/Fe比、熱流束およびpHの影響についての実験結果等が示された。その他、硫酸イオン除去性能を向上させた樹脂とその伊方発電所での適用による硫酸イオン濃度低減効果、PWR実機プラント配管肉厚データに基づく試験対象系統・部位・初期設定減肉率の見直しおよび信頼性の高い規格策定について紹介された。

4. 水化学がかかわる改善の取組み(2)

女川1号機の給水Fe/Ni比制御と女川2,3号機と東通1号機の極低Fe・高Ni運転の実績比較、SCC対策水化学技術として酸化チタン防食の原理と現在までの研究成果、環境緩和対策としての貴金属注入(NMCA)適用時の線量率上昇等技術課題、北米における発電所分析化学QMS標準策定動向について紹介があった。

5. パネル討論;水化学ロードマップ

勝村氏(東大)の司会で、水化学ロードマップについて、事業者、研究機関、メーカーの観点から、水化学のプラント経年化、燃料高度化、およびプラント高度化(出力増大)への寄与が議論された。実機環境下で起こっている腐食および付着現象の理解と関係パラメータの理解のため、基盤技術と照射試験設備充実の重要性、Performance Indicatorの活用や実機・ラボでの腐食電位(ECP)計測技術の向上および高経年化対応のキーとなる寿命評価のためのSCC研究の必要性、ロードマップの活用を図るためローリングの重要性など、多くの発言があった。

6. 水のお話

セミナーを締めくくる恒例の長尾氏(元東芝)の講演では、今回は「磁気水」について、その歴史と謳われている効能、さらにはご自身の体験まで、楽しくかつ説得力のある話題を提供いただいた。(三菱マテリアル・磯部 毅)



50周年記念企画記事の掲載が始まる

早速、上位にノミネートされる(8月号のWebアンケート結果)

「原子力学会誌」8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99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。8月号で高く評価された記事について、「内容」、「書き方」に分けてそれぞれ上位4件をご紹介します。

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	巻頭言	柏崎刈羽原子力発電所を見学して	3.91
1	時論	“社会の木鐸になれ”は死語か —メディアの実態を踏まえた原子力情報の発信を	3.91
1	談話室	(50周年記念企画) 戦時下における京都帝国大学 荒勝文策教授の原子力研究	3.91
4	NEWS	NEWS(8月号)	3.79

第2表 「書き方」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (書き方)
1	巻頭言	柏崎刈羽原子力発電所を見学して	3.88
2	時論	“社会の木鐸になれ”は死語か —メディアの実態を踏まえた原子力情報の発信を	3.74
3	談話室	(50周年記念企画) 戦時下における京都帝国大学 荒勝文策教授の原子力研究	3.67
4	NEWS	NEWS(8月号)	3.55

今回は、「内容」の方で、同点で1位が3件ありました。50周年記念記事も1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) 今後、掲載してほしい記事として、学会の統計：年会、大会での学会の分野別の発表件数の変遷、発表者の所属の変遷など、今後の学会を考える際の資料があればいいと思う。記事としては面白くないかもしれないが、将来の学会像を考える際には重要な資料となると思う。

3. 編集委員会からの回答

(1) 今月号から、来年の4月号まで、通常号の50周年記念企画記事が順次掲載されます。上記(1)のコメントに関しては、50周年記念号(2009年4月号)に、学会の統計データ(略年表、会員数の推移、年会・大会発表件数と分野別内訳、財務状況等)が掲載される予定です。

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

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

「安全」と「安心」の間にあるもの

朝日新聞 坪谷 英紀

柏崎刈羽原子力発電所を襲った新潟県中越沖地震が発生して1年余りがたつ。東京電力や国が運転再開に向けて、安全検証を急ピッチで進めている。だが、たとえ国が安全性に問題ないとして、運転再開を認めてもすぐに運転再開されるわけではない。言うまでもなく、新潟県、柏崎市、刈羽村といった立地地域の住民が納得することが必要不可欠だからだ。

7基すべてが運転再開するのに果たしてどのくらいかかるのか。ある政府関係者と議論する機会があった。彼はこう言った「10年かかることもありうるかもしれませんね」。

それはあまりにも時間がかかりすぎではないか。最初はそう思ったが、過去の例を考えればなくはないとも思った。私は2003年に福島に赴任し、東京電力の一連のトラブル隠しによって県内全10基が運転停止した原子力発電所の運転再開を取材してきた。格納容器漏洩率検査の偽装で1年間の運転停止処分を受けた福島第一原発1号機は、事故や故障で止まったわけではないにもかかわらず運転再開にこぎつけるまで2年8ヵ月を要した。

東京で原発の安全行政をつかさどる担当者、電力事業者の目から見れば、地元福島県の対応は奇異に見えたかもしれない。実際、国会でも「国が安全と認めているのに、県が運転再開を認めないのはおかしい」と福島県の対応は批判を浴びた。

しかし、福島でトラブル隠し後の対応、その後、保安院担当として中越沖地震の取材をして強く感じるのは、国や事業者と立地地域の間の方への大きな隔たりだ。この隔たりをなくす努力なくして、柏崎刈羽原発の運転再開はあり得ない。

立地地域の首長らが原発について語る時に枕詞として使うのが、「安全」「安心」だ。頻繁に登場するようになったのは、BSEの感染牛が問題になった2001年ごろからだろうか。事業者、国にとっては「安全」＝「安心」。それが科学の常識だ。しかし、実際は違う。BSEの検査が実際にそうだった。農水省は生後20ヵ月以下の牛は科学的にみて感染のリスクはほとんどないとしていたが、政府は食用にする牛の全頭検査に踏み切った。なぜなら、そうしなければ国民が「安心」しなかったからだ。

原子力発電にも同じことが言える。国、事業者が考える「安全」は、立地地域の住民にとっての「安心」では

ない。そうした住民の不安に、事業者は工学的にみて不要と思いつつも原発の過剰な補修や改修を行うことで応えてきた。それが説明して地元自治体に理解を得るよりも、目に見えてわかりやすいからだ。

でも、そうした「科学や技術的に難しい話をしても素人にはわからない」といった考えに立地地域の住民はいらだっている。福島県が全基運転再開をなかなか認めなかったのは、原発が装置として安全かどうかではなく、ミスやトラブルが起きた時に包み隠さず住民にわかりやすく事業者が公表する仕組みの構築を目指していたからだ。その間、幾度となく事業者の説明の遅れや齟齬が生じ再開の議論が止まった。だが、東京電力は説明責任を果たす努力を根気強く続け、立地地域との間には一定の信頼関係は生まれたと私は思う。

さて、今回の中越沖地震ではどうだろうか。新潟県が問題にしているのは、地震の想定の見積もりだ。設計の際に地震を起こした断層の長さを事業者、国は故意に過小評価していたのではないかと不審に思っている。地震発生5年前に東京電力は断層の評価を見直していたにもかかわらず、地元で説明していなかったことも心証を悪くしている。事業者や国は中越沖地震が起きて初めて不確かさを考慮して断層を長めに評価し、地震が事前に十分な予測できないと説明するようになった。建設時にあたって立地地域に説明を尽くしてこなかったツケが回ってきている。

専門的な事柄を科学的にしかもわかりやすく説明することは骨の折れることだ。だが、事業者と国は立地地域へ対してその努力を怠ってはならない。その不断の努力があって初めて事業者、国と立地地域との隔たりが埋まっていく。そして私たちマスメディアもその一翼を担う責任があると考え、「安心」＝「安全」＋「信頼」なのだと思ふ。



坪谷英紀(つばや・ひでのり)

朝日新聞東京本社編集局科学グループ記者

1993年慶応義塾大学法学部卒。社会部などを経て、2001年から科学部。07年から原子力安全・保安院担当として、志賀原発臨界事故隠しなど電力不正問題や中越沖地震の取材を担当した。