

インタビュー

5 「高速炉は“増殖”しないと意味がない！」

J・ブシャール氏に聞く

長年にわたり仏日両国の高速増殖炉研究開発をリードして来たブシャール博士が日本国より叙勲された。これを機に、原子力研究開発の森羅万象を聞いた。

聞き手 澤田哲生



羅針盤

4 尋常ならざる事態を知る

科学技術の共同研究やシンポジウムに「日中友好」の名を冠したら、要注意である。湯浅 博

特集 原子力発電所における耐震とは何か

2006年に改訂された耐震指針と、2007年に起きた新潟県中越沖地震。これらの経験を経た原子力施設における耐震安全性の取り組みの「今」と「今後」について、地質学、地震学、建築工学、機械工学の4人の専門家が解説する。

20 耐震安全性確認のための地質調査

耐震安全性の確認には、活断層を認定することが必要になる。そのための地形・地質調査について最新知見を紹介する。 杉山雄一

25 耐震設計審査指針とバックチェック

改訂された耐震設計審査指針にもとづく基準地震動の評価方法と、耐震安全性のためのバックチェックについて紹介する。 入倉孝次郎

31 原子力発電施設の耐震設計

基準地震動による地震力に対して、原子力施設がもつ安全裕度はこれまで、定量的に示されてこなかった。中越沖地震を経て、その答えが次第に明らかになりつつある。 西川孝夫

35 機械・電気設備への影響評価

柏崎刈羽原子力発電所の安全上重要な機械・電気設備に、中越沖地震による有意な損傷はなかった。原技協に設けられた評価委員会の検討結果を紹介する。 野本敏治

巻頭言

1 熟議による政策形成に向けて 鈴木 寛

時論

2 あらゆる可能性の検討が必要な日本のレアアース対策

そのためには供給源の多元化と国内資源の有効活用、そして代替技術の開発などが必要だ。平沼 光

シリーズ解説

我が国の最先端研究開発

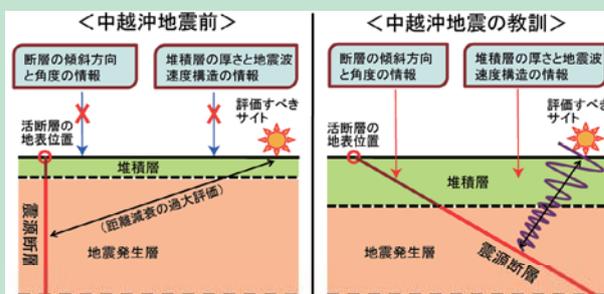
No. 27 放射線医学総合研究所 (第3回)

48 医療用放射性同位元素の製造と利用展開—新しい視点からの放射性同位元素利用

核医学は、放射性同位体で標識された薬剤を人体に投与し、その挙動を追跡することで疾患診断を行うものだ。そこで使われる放射性同位元素の製造には、加速器やターゲット、標識法の開発が必要となる。 藤林靖久



中越沖地震時に原子炉建屋基礎版上で観測された加速度単位: gal (cm/s²), カッコ内は設計時の最大加速度応答値



中越沖地震前(左)と同地震を踏まえた後の地震動評価(右)

表紙の絵「桜みち」 製作者 中路融人

【製作者より】今迄に桜のモチーフは大作でも数点描いているが、いずれも滋賀県北部びわ湖岸にある桜である。この桜は京都市南部の大きな川が合流する堤の桜で、両側よりトンネル状の爛漫の景を画面一杯に表現した。

第41回「日展」へ出展された作品を掲載いたします。(表紙装丁は鈴木 新氏)

FOCUS

40 原子力安全・保安院の10年の歩み

原子力安全・保安院が今年、設立から10年を迎えた。設立の経緯とこれまでの歩み、そして今後の課題について紹介する。

原子力安全・保安院

原子力安全・保安院の10年間と今後について
寺坂信昭

原子力安全・保安院の思い出と期待
佐々木宜彦

解説

52 次世代軽水炉(HP-ABWR/ HP-APWR)の開発状況 —中間評価と今後の開発計画

当初2年間の開発成果として、HP-ABWR、HP-APWRそれぞれのプラント概念と今後の開発計画等、主な中間的な評価結果を紹介する。

笠井 滋, 遠山 眞, 守屋公三明, 飯倉隆彦

講演

フェニックスから「もんじゅ」へ： 高速炉開発と日本の役割

57 高速炉開発におけるトラブルと 開発への影響

高速炉開発に限らず、開発過程におけるトラブルは設計を進歩させ安全性の向上に有効である。また、いまだ起こっていないトラブルを事前に想定したリスク管理により、さらなる安全性の向上を図ることができる。 此村 守

61 開発段階の高速炉の安全評価と 規制の役割

「もんじゅ」は運開後に、高性能炉心の安全審査が行われる。その後は高速実証炉の安全審査が規制課題となる。なお JNES は、保安院が行う高速実証炉に関するこれらの安全規制を多面的かつ積極的に支援している。 遠藤 寛

65 小型炉市場・4S 開発現状・原子力 GDP モデル

分散電源を必要としている世界の市場と、必要とするエネルギーを提供できる小型の原子炉の開発現状について述べる。また、原子力新興国が求める原子力システムへの要望を評価・整理した。 飯田式彦

私の主張

69 なぜ CFD 検証を日本の国家戦略 として進めなくてはならないか？ (CFD 4 NRS-3)

安全解析に、数値流体シミュレーション(CFD)を用いる動きが加速している。日本はこれを、戦略的な知的財産として生かすのか、それともガラパゴス化する道をたどるのか。

岡本孝司

11 NEWS

- 菅第2次改造内閣が発足
- 安全委、施策の基本方針を改定
- 経産省が川内3号を重要電源地点に
- 東電・東通発電所1号に原子炉設置許可
- 三菱重、米国原発に取替用上部原子炉容器納入
- 日韓、原子力協力協定に調印
- 経産省がトルコと協力文書
- 柏崎に原子力耐震・構造研究センターが完成
- JNESとIAEA、耐震安全をテーマに国際シンポ
- 原子力機構、ポーランドと試験研究炉で研究協力
- HTTRで炉心流量喪失時の安全性実証試験
- 「原子力産業セミナー」の来場学生数が大幅増
- 原産協会が高レベルでシンポジウム
- 海外ニュース

活動報告

71 アクチノイド元素の化学・物理 実習を体験—J-ACTINET サマー スクール2010 上原章寛

会議報告

72 2010日本放射化学会年会・第54回放射 化学討論会報告 篠原 厚, 笠松良崇

73 原子力分野におけるスーパーコン ピューティングとモンテカルロ・ シミュレーション 森 貴正, 中島憲宏

ジャーナリストの視点

76 未来を見据えた2つの提案 山崎淑行

- 51 From Editors
- 60 新刊紹介「地球システム環境化学」 長尾誠也
- 77 「2011年春の年会」見どころ
- 82 会報 会告「平成23年度新役員候補者募集のお知らせ」、原子力関係会議案内、人事公募、富山大一般共同研究募集、平成23年度派遣学生募集、「2011年春の年会」見学会のご案内、平成23年度原子力学会「奨学生」決定のご案内、英文論文誌(Vol.48, No. 3)目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

WEB アンケート

10・11月号のアンケート結果をお知らせします。(p.74)
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はこちら
<http://www.aesj.or.jp/atomos/>

熟議による政策形成に向けて



文部科学副大臣・参議院議員

鈴木 寛 (すずき・かん)

1964年(昭和39年)2月5日生まれ。兵庫県出身。86年東京大学卒，通商産業省入省。99年慶應義塾大学助教授。01年参議院議員当選。09年文部科学副大臣に就任。
主な著書：中央省庁の政策形成過程(編著)，「熟議」で日本の教育を変える など。

「熟議」とは熟慮して議論することである。しかし、ディベートのように相手を論破するための議論ではなく、関係する様々な立場の人が、多角的な視点の情報を持ち寄り、皆で知恵を出し合い、解決方法を見出していくものである。

現代のように複雑化した社会においては、物事の全容を正確に把握し、全ての正解を知っているという人や組織は存在しない。国や自治体のみならず、学校や病院、企業などあらゆる組織において、容易には解決できない課題を考えるに当たり、様々な当事者、関係者が熟慮し、議論しながら、問題の解決策を考えていくことが求められる。そして、熟議のプロセスを通じ、参加者間の相互理解や相互信頼が進むとともに、参加者それぞれが進化・成長し、自分たちに何ができるか、何を行うべきかに到達するという自発的に協働する好循環を生み出すことができる。

ドイツの社会学者ユルゲン・ハーバーマスは、代議制民主主義を、現場での熟議(=公共圏)で補完することが必要であるとする「熟議の民主主義」を提唱している。特に、教育や医療など、多くの市民に直接影響が及ぶ政策分野においては、民意をより反映させていくため、政策の形成プロセスにおいて、現場に関わる様々な立場の人が熟議に参加することが必要と考える。

このため、文部科学省では、昨年4月より、インターネットを活用した「熟議カケアイ」サイトを開催するとともに、現場の当事者が膝をつき合わせて議論する「リアル熟議」の開催や全国各地での実施の支援をしている。

「熟議カケアイ」サイトでは、教員の資質向上方策や研究費についての問題点と解決策、元気な日本復活特別枠の文部科学省要望施策などについて熟議を行い、これまで、約2,300人の登録、約1万4千件のコメント、約190万件のページビューを数えている。教員の資質向上方策についての熟議では、サイト参加者により提案書がまとめられ、それを基に中央教育審議会での審議が行われ、また、研究費に関する熟議では、科研費の使い勝手をよくするための基金化が提案され、政府の予算案に具体化されるなど、既に政策形成への参画の成果が生まれ始めている。

リアル熟議では、文科省主催のものだけでなく、全国各地の小中学校や市町村レベル、また学生を中心とした大学での実施など、今年度だけで約100箇所で開催される予定である。私自身、週末を中心に、全国各地で行われている熟議に参加しているが、小学生から地域の高齢者まで、自らの学校や地域の教育問題を解決していかうとする建設的な提言とそれに基づく具体的な行動の萌芽を目にし、熟議の持つ大きな可能性を確信している。

政府の新成長戦略(平成22年6月閣議決定)においても「現場対話とインターネット活用等による熟議を通じた政策形成メカニズムの導入」として、市町村への支援や政府内への浸透など、熟議の普及・定着を目指すこととしている。

原子力の分野については、様々な立場の人によって意見が対立しがちな特性を有しているが、そのような分野であるからこそ、多くの関係者の皆様による熟議が必要ではないだろうか。日本原子力学会が中心となり、立場の違いを乗り越え、原子力の問題について大いに熟議をしていただくことを期待する。

(2011年 1月13日 記)



あらゆる可能性の検討が必要な 日本のレアアース対策



平沼 光(ひらぬま・ひかる)

東京財団 研究員

日産自動車(株)勤務を経て、2000年より政策シンクタンクの公益財団法人東京財団に勤務。現在は、外交・安全保障、資源エネルギー分野のプロジェクトを担当する。

2010年9月7日、沖縄県尖閣諸島沖で不法操業をしていた中国漁船が海上保安庁の巡視船に衝突するという事件をきっかけに、中国から日本へ輸出されるレアアースの輸出が実質的に禁止されるという事態に陥って以降、いまだレアアースの今後の確保の見通しは不透明な状況にある。レアアースは希少鉱物資源として経産省が指定する31種類のレアメタルのうちの一つで、電気自動車など次世代自動車の駆動モーターに使われる永久磁石、原子炉の中性子遮蔽材、省エネディスプレイなど様々な環境・エネルギー技術に使用される不可欠な鉱物資源である。現在、中国はレアアースの世界需要の約9割をまかなっているという寡占化した状況にあり、日本もその9割を中国からの輸入に頼っている。

一言でレアアースといっても実は17種類の元素の総称であり、レアアースには17種類あるといえる。また、レアアースとはさも“レア”なものと思われがちだが、実は種類によっては世界に広く存在するものもあれば、現状開発に適した鉱床が中国南部に偏在してしまっている種類もあるなど様々だ。世界の埋蔵量を見ると、中国の埋蔵量は世界の30%程度で、他は各国に広く存在しているという状況にあるのだ。

ではなぜ中国がレアアースの世界供給の9割を握っているかという点、中国は、1989年から1990年代にかけて価格の安いレアアースを大量に市場に投入するというダンピング攻勢をかけてきたため、中国以外のレアアース鉱山は採算が合わなくなり軒並み閉山に追い込まれていったということと、レアアースの中でも環境・エネルギー技術にとって重要なジスプロシウムやガドリニウムといった重希土類という種類のレアアースの開発に適した鉱床が中国南部に偏在しているため、今のところ重希土類に関しては中国に依存せざるを得ないという理由があるのだ。

中国のレアアース依存に危機感を持っているのは日本だけではない。各国も現在の状況に懸念を抱いており、2010年12月に米国エネルギー省(DOE)から公表されたレポート、“Critical Materials Strategy(重要材料戦略)”

では、米国が推進するクリーンエネルギー経済政策にとって必要な鉱物資源のうち、今後5～15年間という中長期的視点で資源リスクが最も高いのはジスプロシウムをはじめとするレアアースとされている。中国商務部が2010年12月末に公表した11年上半期のレアアース輸出許可枠総量は、前年同期に比べ約35%の減少となっていることから、日本としてはあらゆる対策の可能性を検討し、対処していくことが必要となっている。

事態を重く見た日本政府は、インド、モンゴル、ベトナム、オーストラリア、米国などレアアースポテンシャルのある国からのレアアースの供給や資源開発を進める方針を矢継ぎ早に打ち出した。これまで中国一国に依存していた供給源を多元化しようという動きだ。米国は中国依存を解消するため、かつて操業していたカルフォルニアにあるレアアース鉱山“Mt. Pass”の再開を決定し、2012年から年間20,000tの操業を開始する予定だ。オーストラリアのレアアース鉱山“Mt. Weld”でも早ければ2011年の後半からレアアースの生産、販売を始める予定だ。日本としてはそうした新たな供給源となる様々な国との連携の可能性を検討し、早急に供給源の多元化を行うことが求められている。

レアアースを海外から調達するという視点だけではなく、これからは日本の国内にある資源を有効活用して対処していくという視点も選択肢として現実的に考えていくことが必要だ。国内にある資源の利用としては、まず都市鉱山といわれる市中に埋もれている(蓄積されている)家電廃棄物からのレアアースの回収、再生がある。現在、経済産業省では「希少金属等高効率回収システムの開発事業」として、廃小型電子・電気機器からの希少金属等の回収のほか、レアアースを使用した次世代自動車などに使われるネオジム磁石のスクラップについての効果的なリサイクル法についての技術開発を実施している。こうしたリサイクルにはまだまだ課題も多いが、今は着実に実績を積み重ねることが重要だ。

日本国内にある資源としては海底鉱物資源もある。日本の排他的経済水域(EEZ)と大陸棚延伸可能域内に存在

する海底熱水鉱床やコバルト・リッチクラストといった海底鉱物資源は世界1、2位の資源量があるとされている。ガリウム、コバルト、プラチナなどのほか、重希土類を含んだレアアースの高いポテンシャルが海底鉱物資源の専門家から指摘されているなど、日本独自の資源フロンティアとしてその注目が高まっている。一昔前までは技術面や採算性といった課題により非現実的とされてきたが、昨今の資源高と技術の進歩によりその現実性も高まってきている状況にある。Teck Cominco社(カナダ)、Anglo American社(英)、Epion Holdings社(露)といった資源メジャーが株主に名前を連ねるカナダのノーチラスミネラルズ社(Nautilus Minerals)は、2009年9月にパプアニューギニアから陸上の鉱物資源開発法に基づいて海底鉱物資源の開発許可を得てパプアニューギニア近海の海底熱水鉱床の開発を進め、2012年から2013年頃の商業化を目指しているという現実もあり、この分野での油断は禁物だ。

そもそもレアアースを使わない、また、省レアアース化への対応も重要だ。2010年12月27日付けの独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプレスリリースによると、NEDOの「希少金属代替材料開発プロジェクト」の一環として取り組んでいるジスプロシウムの使用量を低減したネオジム磁石の開発において、ネオジム磁石を発明した佐川真人博士が代表取締役を務めるインターメタリックス(株)と東北大学の杉本論教授らが、ネオジム磁石の結晶粒子を微細化することで保磁力を向上させ、ジスプロシウムの使用量を約40%削減することに成功したことを発表している。レアアース対策の切り札といえる代替、省レアアース技術こそ技術力を売りにする日本が他国に先駆け開発を進めるべきであろう。

また、新たな視点として、“レアアースを自ら創る”と

いう試みもある。原子炉の中性子を利用して豊富で低価格な物質から希少で高価な物質を製造する核変換技術、“原子炉錬金術”といわれるものだ。原子炉の中では中性子による核反応によって、運転開始当初には存在していなかった新たな核種が随時生成されている。この物質の核変換といえる現象は、中性子を照射する物質や照射する条件を適切に設定することで、豊富で低価値な物質から希少で高価値な物質を製造する有用物質製造方法として活用できる可能性があるということで、東海大学工学部原子力工学科の高木直行教授などのあいだで研究が進められている。原子炉錬金術により、レアアースをはじめ様々な金属を地下資源から採取するのではなく、自ら創り出すことができないかという研究だ。従来、鉱物資源については地下資源から採取するということがあたりまえと考えられてきたが、原子炉錬金術のように原子炉を利用して有用金属を創り出すという発想は興味深く、原子炉の新たな役割として今後注目されるのではないだろうか。

尖閣問題でにわかに注目されているレアアースであるが、レアアースに資源リスクがあるということは以前より認識されていたことだ。1988年には「日中レアアース交流会議」という日中双方がレアアースの需給について話し合う会議まで設けられており、この問題が課題視されてきている。にもかかわらず、現在の状況を見ると、結果として有効な対策が講じられてこなかったということになる。今回のレアアース危機を教訓として、今後は前述してきたようなレアアース対策のあらゆる可能性を検討し、具体的な対処を行うことが必要だ。そのためには、資源エネルギー分野に係る政策担当者、専門家は自分の専門分野のポジショントークに陥るのではなく、様々な可能性を俯瞰した広い視野を持つことが重要だ。

(2011年 1月14日 記)



尋常ならざる事態を知る

産経新聞社 湯浅 博

ノーベル平和賞の授賞式の前日を狙った北京の「孔子平和賞」には驚いた。賞の選考委員は、中国を代表する大学の著名教授だということから、嘲笑が泣き顔になってしまいそうだ。これには委員会の宣言文のようなものがある。

「中国は平和の象徴であると同時に平和擁護の絶対的力だ」

なんとといっても人口数億の中国は、世界平和に大きな発言権を持つのだと誇示する。それに比べると、ノーベル平和賞を決めるノルウェーなど、地球の極北の極小の国にすぎないから「偏向と誤りが避けられない」のだと断罪していた。

世界はこれをブラックユーモアとしてとらえるが、彼らは驚異的な経済力と強大な軍事力を背景に大真面目である。おそらく、それは新興覇権国の悪癖で、まず自分を過大評価し、既存の国際秩序に不満を抱き、かつ国家的な損得勘定の分析ができなくなる。

中国の基準がすべてという独善性と排他性の爆発で、隣の島国としては「まあ、ひどい国だね」と妙に納得してしまう。

ところが、ノーベル賞授賞式と相前後して発表された数字に、日本人は愕然となる。とても、「孔子平和賞」を笑ってられない事態が目の前に示されたのだ。

経済協力開発機構(OECD)の国際学力調査なるものが発表された。日本は読解力で8位、数学的応用力で9位、科学的応用力で5位という結果だった。「前回よりも上ったぞ」といえどもこの程度だった。

ところが初参加の中国の上海は、すべての分野で軽々トップだった。国と都市が参加できるルールだから、富裕層が多く、教育熱心な上海が上位に入るのは当然といえば当然である。しかし、香港も日本の上を行くから、鼻高々の中国の傲慢がますます天を突く。

学力低下、理科離れ、ゆとり教育によってズルズルと順位を下げているのに、日本政府はバラマキと無償化という甘えの注入で、わざわざ教育の“血糖値”を上げている。

根岸英一さんと鈴木章さんのノーベル化学賞の受賞で有頂天ではあるが、あれは30年も前の研究成果ではないのか。その証拠に、いまの企業人は理工系大学院の修了書など信じない。大学院生といえども、微分積分、三角関数どころか、電卓がなければ2ケタの掛け算すらできない。ある企業の技術担当役員から聞いた話である。

大学によっては、「高校数学」の講座があることが“売り”になっているからあきれる。そんな大学はいらない

と思うが、「ドングリの背比べ」と聞いて、事態の尋常ならざるを知った。

いまや先端技術を持つ大学院では、院生のおよそ半分が中国人留学生に占められているという。何しろ一人っ子政策の落とし子だから、一家の期待を一身に担ってくる。学業に貪欲だし、知識、技術の吸収が早い。

彼らが日本の最高技術を手を帰国して、欧米の大学院生との技術と出合えば、世界最強の技術が誕生するかもしれない。

しかも、中国は世界に冠たるコピー大国である。

流線形をした中国の高速鉄道は「和諧号」というのだそうだ。流線形の先頭部分は、日本の川崎重工業から新幹線技術の供与を受け、ドイツ、フランス、カナダからの技術をドッキングさせて「自主開発」と称している。

各国の技術の合体で「和諧」とはしたり。そのうえ、単なる混合コピーの「独自技術」やらをブラジルなどに果敢に売り込んでいるらしい。

コピーは平和的な技術に限らないから厄介だ。中国はソ連崩壊後に、ロシア製兵器を次々に購入してはコピーし、いまやこれも輸出している。

典型的な例が“国産”戦闘機J-1Bである。中国は1996年に25億ドルSU-27sを瀋陽の工場に200機ライセンス生産する契約を結んだ。ところが、2004年までに105機生産したところで契約を破棄した。

その3年後に登場したのが、「国産」と称するJ-11Bというコピー機だった。次に狙うのは、ロシアの最新鋭機SU-35で、これがコピーされたら、日本の現有第4世代機では歯が立たない。さて、どうするニッポン。

教育の甘やかしプログラムはやめて抜本改革を断行し、モンスター・ベアレントをのさばらせないことが肝要である。科学技術の共同研究やシンポジウムに「日中友好」の名を冠したら、もう要注意である。技術流出を覚悟するか、思い切ってやめる決断をおすすめしたい。

(2010年 12月17日 記)

湯浅 博(ゆあさ・ひろし)

1948年東京都生まれ。中央大学法学部卒、プリンストン大学Mid-Career Fellow 修了。産経新聞入社後に千葉支局、経済部を経てワシントン特派員、外信部次長、ワシントン支局長、シンガポール支局長、2002年7月から東京特派員・論説委員。産経新聞に「世界読解」「東京特派員」などのコラムを執筆中。主著に『東京特派員』(産経新聞出版)、『アジアが日本を見捨てる日』(PHP 研究所)、『アメリカに未来はあるか』(講談社)、『円とドルの攻防』(飛鳥新社)ほか。

INTERVIEW

「持続的発展に高速増殖炉は
不可欠！」

ジャック・ブシャール氏に聞く

長年にわたり仏日両国の高速増殖炉研究開発をリードしてきたブシャール博士が日本国より叙勲された。これを機に、原子力研究開発の森羅万象を聞いた。



ジャック・ブシャール

Jacques BOUCHARD 1939年生まれ、パリ中央大学卒業、博士(原子力物理)。フランス原子力庁(CEA)原子炉局長、軍事応用局長、同原子力開発局長、Gen-IV国際フォーラム政策グループ会合議長などを歴任。



聞き手 本誌編集委員 澤田哲生(東京工業大学)

日本の原子力との関わりは、東海再処理施設の立ち上げから

澤田 このほど、旭日中綬章の叙勲を受けられました。おめでとうございます。博士のどのような業績が評価されたのでしょうか。

ブシャール博士 はっきりとはわかりませんが、私にとって大変名誉なことです。おそらく、原子力分野における日本とフランスの協力が評価されたのではないかと思います。

私が日本と最初にかかわりを持ったのは、東海村に再処理施設を作る頃でした。その当時、私はフランスで工場の物理検査を専門に担当していました。その関係で東海施設の物理検査についてIAEAとの協議を支援するために呼ばれ、日本に来ることになったのです。今から35年前のことです。

その次が、「もんじゅ」の準備段階です。当時は、フランスの「フェニックス」が動いており、我々はそこでの経験があったために、そのころの動燃で「もんじゅ」の準備に協力をする作業をしました。

さらに90年代になると、ヨーロッパと日本との高速炉開発に関する協力事業に参加しました。

その後、1990年代後半から2000年にかけて、非常に難しい時期が来ました。多くの国がほとんど原子力の開発をやめてしまって、フランスと日本だけが残ったという時代です。当時も私は、残っているフランスと日本の

2ヵ国だけでも、ぜひ原子力の促進と開発をすべきだということをずっと訴え続けてきました。

2000年代に入ると、第4世代原子力システムの研究開発に関する国際フォーラム(Generation-IV International Forum: GIF)ができて、再び国際的に協力関係を成立させることができました。

私はたぶんフランスの中で、「もんじゅ」は必ず運転を再開すると言っていた唯一のフランス人かもしれません。

—35年前からという、「もんじゅ」の初期から日本にある意味支えてこられたということですね。さて、博士が原子力の道に入られることになった動機や契機は何だったのでしょ。

私がバカロレア試験(高等学校を卒業する際に受ける大学などの高等教育に進むために必要な試験)を受けたのは、1956年でした。私の両親は2人とも、物理学の教師でした。したがって原子力がまったく未知の領域という訳ではありませんでした。また、当時は原子力に、大きな未来があった時期だと思います。アイゼンハワーの原子力の平和利用に関する宣言が行われたり、ジュネーブ会議が行われたりしていたころで、原子力に大きな期待が集まっていました。このためエンジニアの卒業証書を受け取ってから、原子力を専門にやってみようと考えました。

最終的には、高速中性子炉が必要になる

—フランスにおける高速炉開発の今後について、お話しいただけますか。

フランスはずい分昔から、高速中性子炉が必要だということを認識していました。これは、持続的な発展のため、長期間にわたって広く原子力エネルギーというものを利用するためには、最終的には高速中性子炉が必要だというふうに考えていたからです。そのためにラプソディーやフェニックス、そしてスーパーフェニックスを建設しました。その当時からヨーロッパや日本と、高速中性子炉に関するさまざまな協力を行ってきました。フェニックスの場合には、35年間の運転実績があります。スーパーフェニックスの場合には、確かに政治的な理由で停止せざるを得ませんでした。需要の見込み間違いがあり、1990年代には、あれほど大型のものは必要なかったのに、作ってしまったということもあるのかもしれない。

高速中性子炉に関しては、商業化にはまだ少し時間の余裕があると私たちは考えています。その間に技術を磨き上げて、価格を下げたり、最も優れた軽水炉と同じレベルの安全性をしっかりと確立することや、アクチノイドを最大限燃やすことができるような技術を開発するなどに取り組む段階だと思います。そのために2020年を目処にアストリッドと呼ばれる原型炉をつくらうとしているのです。その原型炉で様々な技術をテストし、高速炉の改良を続けていくつもりです。

フェニックスはもう止めてしまったので、そのまま継続することはできませんでしたが、今はその計画に向かって作業をしているところです。

—まさにフェニックス(不死鳥)のように生き残り、つながっていくというわけですね。

フェニックスという名前をつけたのも、増殖して新しいものにしていくということにその理由があります。

—中性子経済から見ると、軽水炉に比べて高速炉が圧倒的に優位であることは明らかです。ところが高速炉の場合は、フランスも日本もロシアも、ナトリウム技術で非常に苦労している。そのナトリウム技術をいかにして克服していくかについて、博士の長年の経験から何か見通しを教えてくださいませんか。

これについてはGIFができた時にも様々な検討が行われました。ナトリウムについてはまず、経験がすでにあるということ、それから熱流動学的に見て、また配管がコンパクトになるなど非常に大きな利点があります。逆に欠点については、皆わかっていると思いますのでそれは考慮しなくてはなりません。今の技術では確かに、



ナトリウム冷却が一番すぐれた技術であると考えられます。ただ、一つの技術だけに固執するのは間違いで、常にバックアップが必要で、2番目や3番目の技術というものも展開していかなければいけないと思っています。今のところ、それにあたるのはガス冷却や鉛冷却の高速炉になっています。ナトリウム炉が本命だとは思いますが、ナトリウムに何か問題があったときには、他の方式にいけるように常に逃げ道をつくっておくということも必要なのです。

ただし、ナトリウムの危険をあまり過大視してもいけないと思います。例えば、フェニックスの場合には35年間の運転の実績がありますが、その中で恐らく20回ぐらい小規模な漏えいがありました。けれども、そのたびにきちんと問題を解決し大きな被害もありませんでした。学校の先生方が、ナトリウムを出して、それが水とこんなに反応すると言って見せることがありますが、それがいけないのだと思います。(笑)

—そうすると、冷却材の種類のいかに問わず、やはり持続性のある原子力エネルギー源としては高速炉でなければならないと理解してよろしいですか。

そうです。ただし、その冷却材の種類が技術を決めるので、冷却材というのは非常に大切な要素でもあります。フランスの場合のバックアップはガス冷却です。けれどもガス冷却の高速炉を開発するのは簡単ではありません。ヨーロッパレベルでガス冷却高速炉を作る計画があります。

—ガス冷却高速炉の燃料はMOXですか、それともメタルですか。

メタルではありません。温度が高過ぎるので、酸化物質または恐らく炭化物になるでしょうが、どちらにしろセラミック燃料です。フランスでは、ナトリウム炉についても、金属燃料に未来はないというふうに考えています。

—未来はない。

そうです。未来はセラミック燃料にあります。酸化物燃料は伝導率と密度の問題があります。その点で、炭化物のセラミック燃料が最も優れた性能を発揮できるでしょう。

—ナトリウム技術には実績と自信があるとのことですが、水に比べるとナトリウムは、その中で何が起きているかが見えない、可視性の問題があります。

確かに透明でないということと、化学反応があるということは欠点です。ただ、水に比べると高圧にする必要がないということが非常に大きな利点です。また、ナトリウムが水より危険だとは言えないと私は思います。原子力施設で死者がでる事故というのは、水蒸気が原因のものが多いのです。

—ナトリウム高速炉では、核的(ニュートロニック)な再臨界の問題があります。

軽水炉の場合は炉心の溶融の問題がありますね。それと同じように、再臨界の問題はあります。再臨界の確率を非常に低く抑える必要があり、現在、1炉当り年間10のマイナス8乗または9乗まで下げようという研究が行われています。さらに、もしそれが起こったとしても、その影響を最小限にするための研究が重要です。これは軽水炉の炉心溶融のケースと同じです。その研究については日本でも多くなされており、とてもいい研究報告があります。

—その高速炉はやはり、持続性をもつために増殖しないといけないのでしょうか。

もちろん、ブリーダー(増殖炉)でなくてはなりません。今はプルトニウムのストックも結構ありますし、アメリカ人の中には高速炉はプルトニウムを燃やすためのものだという人もいますが、そのストックもいつかは尽きてしまいます。だから、最終的にはブリーダーにしないといけないと思っています。

日本とフランスは高速炉開発の世界的リーダー

—高速炉については最近、ロシアや中国、インドが、相当程度の開発を進めています。けれども技術的な成熟度で考えるならば、フランスと日本が協力しながら、世界のリーダーシップをとっていくべきだと思うのですが、今後日仏の高速炉の研究開発の中で、特に重要になってくる点は。

フランスと日本、そしてそれ以外の国というように分類されましたが、それは正しい分類だと思います。といいますのは、中国が最近、臨界を達成した高速炉は、フランスの場合だとたぶん40年前、日本だと30年前の技術

を使っているものだと思います。

またロシアとインドは、それぞれ800メガワットと500メガワットの高速炉の原型炉を建設中です。それらも20年前の技術を使っているのです。BN 800の技術は、20年前からほとんど進歩していません。またインドの場合は、核不拡散条約の問題があったので今まで全くどの国とも協力関係ができなかったので、独自に開発しているということもあって、我々が1990年代に開発したような技術を使っているのです。それらの国は確かに興味深い仕事をしていますが、フランスと日本がリーダーとなってこれからの目標としている第4世代原子力システムの技術には到達していません。

高速炉について今、何をしなければいけないかという、安全に関しては、軽水炉の第3世代と同じレベルの安全を確保しなくてはならないのです。30年前は、軽水炉の場合も、炉心溶融の問題は確率的にきわめてまれにしか起きないことから、あまり考慮されませんでした。ところが、世界中にどんどん軽水炉ができると、確率的にどこかで起こるかもしれないということになり、炉心溶融が発生してもその影響を最小にするような措置も考えるようになりました。それが第3世代の炉なのです。高速炉でも同じようなことが必要です。

もう一つの目標は、放射性廃棄物の問題です。今は長寿命の放射性廃棄物をどうするのかという問題があります。そのまま処分しようとするならば、それはとても長い半減期を持つものなので、10万年後、100万年後にどうなるかとかという検討が行われています。その長寿命のものを燃やして廃棄物を短寿命のものにするためには、高速中性子炉が必要になります。これが高速炉の第2の目標です。

—第4世代の高速炉で強く求められていることの一つに、核拡散抵抗性があります。高速炉と軽水炉を比べた場合、高速炉のほうが核拡散抵抗性において優位性はあるのでしょうか。

核拡散抵抗性は原子炉ではなく、核燃料サイクルの問題です。炉だけを考えた場合には、軽水炉と高速炉で核拡散抵抗性が変わるということはないと思います。再処理およびリサイクル施設で、どのように核拡散抵抗性を実現するか。そのためには2つの方法がありますが。一つは、濃縮で行われているように、実施できる特定の国を決めて、その国がほかの国にもサービスを提供するような形にするという方法です。もう一つは、核拡散抵抗性が大きい技術を開発するという事です。それがGIFで決められたことで、その決定にどのくらいの国が従うかわかりませんが、再処理して単独で回収するのではなくて、アクチノイドを全部一緒にして回収するような方法を開発することです。

最終的にどちらの方法になるのかは、後になってから

でなければわかりません。今のところは2番目の技術的な研究しているところですよ。

TWRの構想は面白いが、実用化は無理

—最近よく耳にする Trans Wave Reactor (TWR) やキャンドル炉、東芝などがやっている4S原子炉についてはどうでしょう。

小型の高速炉は今まで、経済的な問題からうまくいきませんでした。小型化するとどうしても、発電単価が高くなってしまいます。ただし、軽水炉の場合は、サイズを小さくすることによってすごく高くなるけれども、高速炉の場合はそれほどありません。

またTWRの構想というのは、机上ではおもしろいかもしれませんが、実現は無理だと思います。100年間燃料交換が必要ないといいますが、一体誰がそれに責任を持つのでしょうか。

一方で4Sは、もっと真面目な構想です。論理的ではありますが、かなり高くなると思います。

—レアアースを精製する時には、残渣にトリウムができてきます。そのトリウムを、中国やインドでは原子炉の燃料として重要視していますが、トリウムの利用についてはどのようにお考えですか。

私がいつも言っていることですが、トリウムにはマッチが必要です。トリウムはウランやプルトニウムのように核分裂性ではありません。だから、そのトリウムを原子炉で使おうと思ったら、ウランやプルトニウムと一緒に使わなくてはならないのです。そのためには増殖炉を使わなければなりません。ところが高速増殖炉を使うとすれば、ウランを数世紀にわたって使える状態になります。だから、トリウムを、今探しに行かなくてははいけない理由はないのです。

核軍縮は、大国の意向に左右される

—博士はかつて、原子力の民生利用だけでなく、軍事利用もマネージされる立場にあったとお聞きしています。またイギリスとフランスでは、核施設を共用する方向で検討しているとも。核軍縮において、フランスがこれからとるべきリーダーシップについて一言お願いできますか。

フランスは、核兵器の使用および開発を制限するあらゆる条約に調印しましたし、調印する用意があります。包括的核実験禁止条約に調印しましたし、核兵器用分裂性物質生産禁止条約にも調印する用意があります。私が担当したのですが、フランスではこのような物質の生産はやめています。しかしながらこの問題については、核兵器をたくさん持っているロシアとアメリカが、大きな

努力をしなくてはならないと思います。中国は、どれぐらい持っているのかよくわかりませんが。フランスは、その保有数を大幅に制限しました。核兵器はあくまでもヨーロッパの平和維持のためにあるものであり、その必要を超える数は持たないという方針をとっています。これがフランスの核抑止力です。抑止力の構成要素が4つあったのですが、そのうちの2つ、大陸間弾道弾(地対地)および戦術核をフランスは廃棄しています。

たくさん核兵器をもつ大国と、フランスのように最少のものに保有をとどめている国があるというのが現実ですが、世界中でバランスをとることが必要だと思います。

一方、フランスとイギリスとの施設共用計画ですが、核実験を行わずに兵器の能力を維持するためにはシミュレーションが必要になります。このシミュレーション計画でイギリスとインフラを共用しようという構想です。

—包括的核実験禁止条約(CTBT)はある程度、進捗していると思うのですが、兵器用核分裂性物質生産禁止条約(カットオフ条約: FMCT)は、あまり進んでいないように見えます。これが世界にとって有効な状況になるためには、どういう働きかけが必要だと思われますか。

CTBTの方にも、まだ問題があります。我々はサインしましたが、まだサインしていない国があります。中国やアメリカはまだ批准していません。そこに問題があります。

FMCTについては、フランスは15年前からマルクルの工場もピエールラットの工場も閉鎖しています。いつでもそれに署名する用意があります。けれども問題なのは、その協議に参加しようとする複数の大国があるということです。

ですから、もしFMCTのほうを何とかうまく生かせることができたならば、それは私たちにとっても最優先事項です。

—1996年にフランスが最後に核実験をやった時には、7回か8回、計画されていたうち、2回か3回分はキャンセルされました。そのキャンセルされた実験は非常に重要な意味を持っていたと聞いています。

あれは、何か新しい兵器を開発する目的ではなく、今ある核兵器がシミュレーションだけでうまく能力を維持していくことができるかどうかを確認するための実験でした。最初の実験でいい結果が出たので、後のほうの実験はもう必要ないということでやりました。それだけです。

—博士は、広島や長崎は訪問されたことがあるのですか。あります。ずいぶん昔ですが、両方とも行きました。

日本にはいろいろきれいなところがありますがけれども、広島、長崎はとても美しい場所だと思いました。

—長崎市長には本誌に巻頭言を寄稿頂きました。

長崎市長がどういうことをお書きになったかということは想像できます。ヨーロッパでは20世紀の前半に2つの世界大戦を実際に経験しました。それらの戦争で何百万もの人間が死亡しました。そういう意味で、あらゆる種類の戦争の恐ろしさや戦争の悲惨さというのは本当によくわかっています。

それに対して核抑止力というのは、そのような戦争を起こさないためのものです。実際に20世紀後半は核兵器によって、平和が維持され、安定した状況が生まれたということはあると思います。

もちろん、長崎や広島で原爆によって実際にどういうことが起こったかというのを見ると、非常に恐ろしいことだとは思いますが。戦争で被災したドイツのドレスデンやロシアの街を見ても、戦争というものは本当に恐ろしいものであって、絶対に避けなければいけないことです。

—私の理解ではこれまで、原子力の平和利用の推進と核兵器の廃絶ということが、同じ平面で語られることがなかったように思います。そういう状況が少しずつ変わってきつつあるのではないかと思うのですが、博士はどのようにお考えなんでしょうか。

その2つは重要なことなので議論しなくてはならないのですが、原子力エネルギーの平和利用と軍事利用を同じテーブルに乗せるのは間違っていると思います。それを混ぜこぜにすると、一般の人々は混同し、民生利用が進んでいくと危険であるという印象を受ける恐れがあります。2つの面を持った単一の問題ととられる恐れがあるのです。実際には全くそうではなくて、核拡散や核兵器の問題は、原子力の民生利用とは切り離して考える必要があります。

核兵器を削減するという課題は確かにあります。アメリカとロシアは今、それぞれ3万発ほども持っています。それはどう見ても核抑止力として最低限必要な数よりずっと多いものです。それを縮小するという事は確かに必要です。けれども完全に廃絶するということがいかにどうか。もし核兵器を廃絶するのであれば、そのかわりに何かほかのものが必要になってくると思うのです。そうでないと、きっとまた20世紀の初頭に行われたような戦争が起きてしまうと思います。それは絶対に避けなくてはならないことです。

—ということは、常に我々は核兵器ないしはそれにかわるものによって、“ふた”をされていなければいけない部分があるということですか。



そうです。核兵器でなければ、何らかのほかの方法が必要となります。それについての検討はあまり行われていません。

確かに、核でこの平和を維持しているというのは、いい方法だとは思いません。けれども今まで、何十年もこれで平和が維持してこられたわけですから、もし核兵器を廃絶するのでしたら、何かほかの方法を考えなければいけないと思います。

核軍縮に関する条約をサインすることはできます。けれども今、本当の問題は、それをどうやって適用するかということですね。だれかが、どこかの国がその条約を守らなかった場合は、何も方法がないのです。

原子力は付加価値が高い、これからの産業

—世界的に原子力ビジネスが活況を呈しています。日本では国際原子力開発という株式会社が立ち上がり、ベトナムとのプラント輸出契約が結ばれる方向で進んでいます。原子力プラントの国際市場が拡大している中で、日・仏の協力関係はどうなっていくべきかとお考えでしょうか。

原子炉や技術を輸出するにあたっては、核拡散抵抗性や安全などのいろいろな基準があります。最近、日・仏の原子力の専門家会合というのがあり、そこでも話をしたのですが、そのような同じ基準をまず、持つということが必要だと思います。世界的にはIAEAを中心として、さらに日仏2カ国間の議論の中で、どのようなプラントをどのような条件で輸出するべきかという議論が進んでいます。

後は産業界に任せるべきです。産業界ではATMEA炉のように協力もするけれども、競争も生まれてきます。例えばフランスの場合はEPRを売りたい。日本の場合はABWRかAPWRを売りたい。そういうようなことで必ず競争というものが出てくるはずですが、それは、別に原子力だけではなく、自動車産業や航空業界、その他の産業でも同じだと思います。そういう意味で、協力

関係もあるし、また競争関係もあるということです。

—国際的な環境がどんどん変わっていく中で、国際的にコミュニケーションしながら研究開発を進めていく人材育成というのは非常に重要になってくると思います。2010年3月にサルコジ大統領がパリに招集された会議で大統領が提案された項目の中に、フランスに拠点をつくって、ヨーロッパのみならず、世界的な教育システムを作るというのがありました。次世代以降の人材育成に関してご意見を。

これまでのテーマの中で、この教育という問題が一番重要な問題ではないかと思います。何年もの間、原子力分野の教育がないがしろにされてきた国がたくさんあります。今は、その遅れを取り戻さなければならないという状況にあります。日仏両国は、ほかの国が原子力から後退したような時期があったにもかかわらず、その間もずっと原子力開発をやってきましたし、原子力発電所を実際に運転してきました。その意味でも日本とフランスは経験もあるし、それなりの資材もあり、幅広い教育を提供することができます。ここでもまた両国の協力が大変重要です。また、政府の後押しがあるということで、この両国は原子力分野における教育でもやはりリーダー的な役割を果たせる国だと思います。

大統領提案の拠点構想もこのような考えから生まれたものですが、やはり日仏両国が互いに協力して、自国の人間、自国のヒューマンリソースを教育すると同時に、新興国などのたくさんの国々に教育を提供していくことが大切だと思います。

—フランスの場合は、アフリカのマグレブ諸国と歴史的なつながりが深いと思います。同じアフリカにはマグレブ諸国のほかにたくさんの国が、将来、原子力を導入したいという希望を持っています。電気が利用できない人たちが一番多いのも、あの地域だと思います。そういう国々の若者に教育の機会、原子力教育の機会という

ものが、手の届くところになければいけないと思うのですが、難しそうです。

原子力分野の教育では、まず設備が必要になってきます。机上でセオリーを教えるだけでは足りないのです。やはり設備を使って実地訓練ができるということが大切になってきます。そういう意味では日本もフランスも非常に恵まれていると思います。

もう一つは、実際に教育訓練を実施し、生徒や学生をそちらの方向に持っていく意思があるかどうかです。国によっては教育訓練はやる用意はあるけれども、学生に意欲がないというような国もあると思います。学生が興味を持つようにどういうふうにしていくかということも、大切だと思います。

—今日(11月17日)は、たまたま国際学生交流会(International Student Day)ですが、若手の研究者やこれから原子力の世界をめざす学生に対して、何かエールを。

私は20年間、原子力工学を教えてきました。その間、いつも楽観主義的なメッセージを送ってきました。それは、原子力は必要であるし、様々な議論はあるもののこれからも必ず発展し続ける分野であり、かつ付加価値が一番高い分野だということです。さらに科学者として非常に興味深い分野です。それから、もう一つは、安全文化という問題があるので、厳格性というものを学べる学校でもあるということです。私は学生に対し、いつもそういうようなことを言っています。

今後も、高速炉分野だけでなく、もっと広い科学技術の分野でフランスと日本の協力関係が強化されると思いますし、そのことが世界の持続的な発展に対する貢献をしていくものと期待しています。

—ありがとうございました。

(編集協力：松木美刈[フランス大使館]、
取材：白川典幸)



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。

菅第2次改造内閣が発足

菅第2次改造内閣が1月14日に発足し、経済産業大臣には海江田万里氏、科学技術政策を所掌する内閣府科学技術担当大臣には玄葉光一郎氏が就任した。高木義明・文部科学大臣と、原子力安全委員会を所掌する松本龍・内閣府防災担当大臣は留任。なお高木文科相は同日の留任会見で、「我が国の資源エネルギーをめぐる状況や今

後の国民生活、環境問題を考えると、原子力発電の役割というのは重要であり、安全第一で推進をしていく。『もんじゅ』については早く、正常な運転を再開できるよう取り組んでおり、緊張感を持って推進をしていかなければならない」と述べた。

安全委、施策の基本方針を改定

原子力安全委員会は2010年12月2日、「当面の施策の基本方針」を決定した。04年9月以来、およそ6年ぶりの改定となる今回の基本方針では、(1)原子力安全の基本的考え方の提示、(2)原子力安全規制制度の運用のさらなる改善等、(3)原子力安全規制を支える環境整備等——の3項目を機軸に掲げ、今後、安全委員会が取り組む重要課題を示し、これまで明示されていなかった「原子力安全の基本原則」も明文化することとしている。班目春樹委員長は、基本方針改定に際し、原子力安全規制の国際的整合性や国際的説明性の必要に立ち、「世界に誇れる規制体制」を目指すとしている。

安全委員会は10年6月、近年の原子力安全を取り巻く環境の変化等を踏まえ、基本方針改定に向けた検討を決定。以降、主に本会合の場で、関係行政機関、事業者、有識者などからヒアリングを実施し、今後の取組みの方向性を整理した。

同委が規制行政庁からの諮問を受けて行う2次審査で用いる安全審査指針類は現在、細目も含めて60以上あるが、必要に応じて策定・改訂されてきたため、十分に体系化されていない。新たな基本方針では、これまでに策定された指針類が立脚する原子力安全に関する基本原則を、「リスクの抑制水準を把握することなどによって、合理的に実行可能な限りの安全性の向上努力を継続すべきこと」などととらえ、その重要性に鑑み、「最も基本的な原則を明示した文書」を策定することとしている。

原子力安全規制制度の運用のさらなる改善としては、ダブルチェック機能の高度化、指針類の策定・改訂等のあり方に関する検討のほか、将来的に導入が見込まれる次世代軽水炉、高速増殖炉について、安全規制上の考え方の整理を行う。

同委下に組織する専門部会は、新方針を踏まえ、改編されることとなる。(資料提供：日本原子力産業界協会)

経産省が川内3号を重要電源地点に指定

経済産業省は2010年12月9日、第2回重要電源関係府省協議会を開催し、九州電力が鹿児島県薩摩川内市に計画している川内原子力発電所3号機(APWR, 159万kW)の重要電源開発地点の指定について審議を行い、関係各府省から異論がなかったことから、今後、同地点の指定に向けて手続きを進める。

重要電源開発地点の指定は、電源開発に係る地元合意形成や許認可の円滑化などを目的として、経産相が行うもので、指定に当たっては同省のほか、内閣府、総務省、文科省、厚労省、農水省、国交省、環境省を構成員とする同協議会を開いて審議を行うこととなっている。

(同)

東電・東通発電所1号に原子炉設置許可

原子力安全委員会と原子力委員会は2010年12月14日までに、経済産業省より諮問された東京電力の東通原子力発電所1号(ABWR, 135.8万kW)のダブルチェック審査について、安全性確保などに問題ないとして、同省に

対し答申した。これを受け、経済産業省は12月24日、同機の設置を許可した。同機は、11年4月工事開始、17年3月運転開始の計画。

(同)

三菱重工、米国サンオノフレ原発に取替用上部原子炉容器納入

三菱重工業は2010年12月14日、米国の電力会社サン・カリフォルニア・エジソン社(SCE)のサンオノフレ原子力発電所(カリフォルニア州サンディエゴ)で運転を延長する2号機と3号機を取替用に、上部原子炉容器を2基納入したと発表した。

いずれも直径5mの低合金鋼製で、重量は約75トン。2005年に受注し、神戸造船所で製作したもの。同社は2009年2月と2010年10月にも、同2号機と3号機向けの取替

用蒸気発生器(SG)を2基ずつ納入している。

サンオノフレ原子力発電所2号機および3号機はそれぞれ出力110万kW級の加圧水型軽水炉(PWR)で、2号機は1983年、3号機は1984年から運転している。今回出荷した上部原子炉容器はPWRの主要機器で、外部との確実な遮断性が求められる。1次冷却水による強い圧力に耐えられるよう、マンガン・モリブデン・ニッケル鋼の強靱な低合金鋼を用いている。(同)

日韓両政府、原子力協力協定に調印

日韓原子力協力協定が2010年12月20日、東京で正式調印された。前原誠司外相と権哲賢(クォン・チョルヒョン)駐日韓国大使が署名した。次期通常国会へ提出し批准をめざす。同協定は、日本と韓国の原子力平和利用分野における相互協力を規定したもので、(1)核物質、原子力関連資機材、技術の平和的目的に限った利用、(2)核物質への国際原子力機関(IAEA)による保障措置の適用、

(3)早期通報、相互援助、原子力安全、放射性廃棄物の4条約に基づく措置の実施、(4)核物質防護措置の適用、(5)核物質、原子力関連資機材、技術の第三国への移転の規制——など。20%以上の濃縮および再処理は事前同意の対象、濃縮・再処理などの機微技術の移転はできないことになっている。(同)

経済産業省がトルコと協力文書、発電開発や人材育成など支援へ

経済産業省は2010年12月24日、トルコとの原子力協力文書への署名を行った。同国での原子力発電導入に向けた基盤整備を支援するもの。協力のスコープは、原子力発電開発、原子力産業の技術的発展、人材育成、国民の信頼醸成などからなり、同日、大畠章宏経産相とトルコ

のタネル・ユルドゥズ・エネルギー天然資源相との間で文書への署名が行われた。

トルコでは現在、17年の原子力発電運転開始を目指し、地中海沿岸でロシアと、黒海沿岸で韓国と基礎調査を実施している。(同)

柏崎に原子力耐震・構造研究センターが完成

新潟工科大学が東京電力、原子力安全基盤機構との連携協力で整備する「原子力耐震・構造研究センター」の竣工式が2010年11月24日、同学構内で、森邦雄・新潟県副知事、会田洋・柏崎市長、デニス・フローリー・IAEA次長らも出席し開催された。布村成具学長は、「原子力施設の安全性と信頼性を高めるために、産学官が連携して最先端の耐震安全に係わる研究を」と述べ、同センターの世界最先端の研究拠点としての活躍に期待した。

07年夏に発生した中越沖地震に伴い、柏崎刈羽原子力発電所が被災し、地震国であるわが国で、原子力施設に関する高度な信頼性と合理性を有する耐震設計や革新的技術への課題が顕在化してきたほか、他国からの関心も高まった。これらの課題に対応するため、柏崎刈羽発電

所に近接する新潟工科大では、地元根差した産学官の研究協力体制により、原子力耐震・構造研究拠点を整備することとし、09年12月、東京電力、原子力安全基盤機構と連携協定を締結、10年3月に、研究センターの建屋の着工となった。

本拠点では、(1)地震波の増幅特性の評価をもとにした地震動の施設への影響評価技術、(2)原子力発電所の耐震裕度を定量的に評価する手法、(3)建造物の経年劣化を考慮した耐震評価手法、(4)地震時に観測された情報を集約し地元でわかりやすく伝達するシステムの開発——をテーマに掲げ、世界最先端の原子力耐震構造等の研究推進を目指す。(同)

JNES と IAEA, 原子力耐震安全をテーマに柏崎で国際シンポジウム — 柏崎での経験をもとに, 耐震安全性の方向付けを議論

原子力安全基盤機構(JNES)と国際原子力機関(IAEA)は2010年11月24~26日の3日間, 柏崎市にある新潟工科大学で, 第1回柏崎国際原子力耐震安全シンポジウムを開催した。当日は海外28ヶ国, 69名を含む568名が参加。IAEAのフローリ次長, サマダセンター長をはじめ, NRCやOECD/NEA等の海外機関からも多数の参加がある国際色豊かな会合となった。なお本会合はJNES, 新潟工科大学および東京電力が, 国際的な耐震安全研究の拠点としての機能を備える「新潟工科大学原子力耐震・構造研究センター」の竣工式典にあわせて開催された。

この国際シンポジウムは耐震安全性に関する方向付けを議論して, 耐震技術革新への道を示し, 次世代の人材育成の機会を与えることがその目的。その第1回目となる今回は, 「柏崎の経験から実際に学んだこと」を中心テーマとした。

会合は「地震・地震動」, 「津波」, 「耐震裕度・リスク評価」, 「地震情報伝達システム」の4セッションと, 「深

部地震動観測」, 「免震」の2つのワークショップで構成。「地震・地震動」のセッションでは, 地震動の不確実性の評価への今後の挑戦課題について, 全参加者が最新の技術動向と要点を共有した。また「耐震裕度」, 「リスク評価」のセッションでは, 地震PSA(確率論での安全評価)と耐震裕度評価の最新動向を議論した。最後に各セッションとWSのコーディネータが, 確認されたそれぞれの成果(レゾリューション)を報告し, 将来に向けた提言を行った。

また新潟工科大学は, 原子力安全分野で国際的に活躍している3人の講師による公開市民講座を, 関連企画として開催。講座には, 一般市民や新潟工科大学の学生など約170名が参加した。さらに本シンポジウム, 耐震・構造研究センターの竣工式及び市民講座の参加者を対象に同センターの施設見学会を実施し, 約250名の参加があった。(資料提供: 原子力安全基盤機構)



高温ガス炉(HTR)で炉心流量喪失時における安全性を実証する試験を開始 — 第1回目の炉心流量喪失試験を終了

日本原子力研究開発機構は2010年12月21日, 高温工学試験研究炉(HTR: 高温ガス炉)を用いて, 炉出力約30%(9 MW)において, すべてのガス循環機を停止させることにより炉心における冷却材ヘリウムの流量をゼロとする第1回目の炉心流量喪失試験を行った。その結果, 自然に原子炉出力が低下するとともに燃料温度の異常な上昇等もなく, 安定な状態になることを確認し, 試

験を計画通り終了した。

原子力機構は, 高温ガス炉の優れた安全性を実証するための実証試験として, 今回の試験よりも厳しい条件となる高出力での炉心流量喪失試験や, 原子炉停止後の残留熱を除去するために原子炉圧力容器周りに設置される炉容器冷却設備を同時に停止させる炉心冷却喪失試験を, 段階的に行う予定。なお, 炉心冷却喪失試験は, 世



会議室モニタによる試験経過の視察風景

界で初めての試みとなる。

これらの安全性実証試験の成果は、冷却設備等の工学的安全施設の合理化などを可能とし、実用高温ガス炉システムの経済性向上等に貢献するものである。また、世界的にも米国次世代原子力プラント(NGNP)計画、カザ

フスタン高温ガス炉計画などにおいて、設計を効率的に進めるため、HTTR による安全性実証試験に大きな期待が寄せられている。

(資料提供：日本原子力研究開発機構)

原子力機構、ポーランド原子力研究所と試験研究炉の研究開発協力で取決め

原子力機構は1月21日、ポーランド原子力研究所と「試験研究炉における研究開発協力のための取決め」に署名した。両機関は試験研究炉の運転管理や照射技術に関する情報交換や、試験研究炉の相互利用などで協力や連携を進める。

相互利用の対象となるのは、原子力機構の材料試験炉(JMTR)とポーランド原子力研究所の試験研究炉(MARIA)。原子力機構ではこれらの炉の照射技術の標準化を図ることで、利用者が炉停止や照射容量不足等で

JMTR を利用できない場合、代替としてポーランド原子力研究所の MARIA の利用ができるようにする予定。また MARIA では、JMTR で計画している医療診断用^{99m}Mo の製造やハイブリッド自動車用 Si 半導体照射の経験をもつ。両試験研究炉では、今後これらの照射技術や施設管理の経験を共有し、相互の利用促進及び利用性の向上を目指す。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press2010/p11012401/index.html>)

(同)

「原子力産業セミナー」に来場学生数大幅増加、原子力業界への期待あらわす

原産協会は2010年12月11日、2012年に就職を目指す学生を対象とした合同企業説明会「原子力産業セミナー2012」を東京・新宿で開催した。

電力会社や東芝、日立、三菱重工など国内主要プラントメーカー、研究開発や安全規制に関わる機関など、原子力に携わる38の企業・団体がブースを設けたほか、14の企業・団体の採用案内資料を用意し、学生に周知し

た。この日の来場学生数は1,256名で、前年度より500名増加。開場前から多くの学生が列を作り、関心の高さが伺えた。

18日には大阪で同セミナーが開催され、27企業・団体および647名の学生が参加した。

(資料提供：日本原子力産業協会)

原産協会「高レベル廃棄物処分シンポジウム」開催、政治の役割を取り上げ議論

原産協会は2010年12月17日、東京・臨海副都心の日本科学未来館“みらいCANホール”で、高レベル放射性廃棄物の処分問題がいまの状況より一歩でも前に進むために、“地域の関心の芽が育つ環境”を作り上げるための「政治の役割」を取り上げたシンポジウムを開催した。約220名が参加した。

基調講演で、元総務相で前岩手県知事の増田寛也氏は、10年間、岩手県知事を務め一般廃棄物や産業廃棄物問題にも取り組んできた経験から、放射性廃棄物の処分は国が責任者であり一方の当事者であるべきだ、と明快に主張した上で、「一方の受け手は知事だろう」と指摘した。今後の推進方策について同氏は、公募で市町村長に手を挙げてもらう方式ではなく、「国が10から20か所の地点を示し、その中から進めていくべきだ」と提案した。

パネルディスカッションでは、元日本経済新聞社・論説委員の鳥井弘之氏が議長を務め、パネリストとして前新潟県柏崎市長の西川正純氏、中国新聞社総合編集本部・経済部長の宮田俊範氏、東京大学法学部教授の森田朗氏、大阪大学コミュニケーションデザインセンター特任准教授の八木絵香氏が意見を述べた。パネル討論の論点として、(1)政治主導と言うが、そもそも政治が関心を持っていないのが現状だろうか。この点をどう克服できるか、すべきか、(2)国と都道府県、市町村、地域コミュニティとのパートナーシップのあり方、(3)国策として推進するために考えられる政策手段とは、(4)「地方分権」「住民投票」など現代のキーワードとの関連で国の役割はどうあるべきか——が提起され、活発な議論が展開された。(同)

動画配信のご案内

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

2010年11月～2011年1月の番組は以下の通り。

・原子力をめぐる連携とコミュニケーションに関する話

題(11/30公開)

・高速炉実用化を見据えて一高速増殖原型炉「もんじゅ」のいま(12/15公開)

・原子力の将来に備える一高レベル廃棄物処分への環境整備と人材基盤の強化

(同)

海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[米国]

ショー・グループが東芝のSTP建設計画に参加

東芝は2010年11月29日、同社がABWRを受注したテキサス州のサウステキサスプロジェクト(STP)原子力発電所3、4号機の建設計画に、米国の大手エンジニアリング企業のショー・グループが参加すると発表した。

同計画のEPC(設計・調達・建設)契約にショー・グループが加わり、東芝との協力関係における投資金2.5億ドルのうち1億ドルをSTP計画に出資。米政府による融資保証適用が遅れている同計画で建設工事を担当し、その運転資金調達に一役買うことになった。また、東芝が今後、ベトナム以外の海外で受注するABWR建設についても、一部のEPCサービス提供で独占的な機会を得ることになる。

STP計画では、東芝と米NRGエネルギー社が12対88の比率で出資するニュークリア・イノベーション・ノースアメリカ(NINA)社とテキサス州サンアントニオ市の公

営電気事業者であるCPSエネルギー社がABWR2基の建設を想定。建設コストが初期見積もりから大幅に膨らんだことから、CPS社は10年2月、参加規模を7.625%に縮小した。

5月には東京電力が、米政府による融資保証適用を条件に、NINA社傘下の同プロジェクト用企業の株式10%を引き受けたが、現在までに融資保証適用は発表されておらず、NRG社は8月から月次の支出額を大幅に削減していた。

ショー・グループはこれまで、東芝傘下のウェスチングハウス(WH)社が中国で4基、米国で6基受注したAP1000の建設計画すべてで、アーキテクト・エンジニアリング契約を獲得。今回の東芝との合意により、AP1000のみならず、ABWRについてもEPC契約に参加できたことを歓迎している。

エクセロン社、冷却塔設置問題でオイスタークリーク炉を前倒し閉鎖へ

米国最大の原子力発電事業者であるエクセロン社は2010年12月8日、ニュージャージー(NJ)州のオイスタークリーク原子力発電所は2019年で操業を停止するとの方針を明らかにした。現行の運転認可は2029年まで有効だが、地元NJ州の環境保護局(DEP)は冷却水の取放水に関する認可の更新条件として冷却塔の設置を義務付ける方針であるため、その建設費など7億~8億ドルという経済的な影響を勘案すると10年前倒しで閉鎖するのが最も得策と判断した。米国ではその他の州でも、取放水による環境への悪影響軽減という観点から、その規制が強化される方向に動いており、冷却塔使用などの閉鎖循環方式でなければ操業継続が難しくなる原子力発電所が増えるのではとの懸念が広がっている。

米国では発電所での取放水は「水清浄法」によって規制されており、温排水の放出がやむを得ない場合は環境への被害を最小限にする技術の導入を前提に排出源ごとの許可(NPDES)を環境保護庁(EPA)が発給。NPDESは5年ごとに更新手続きが必要で、更新時にモニタリングや新たな排出防止対策導入の可能性が検討される。取放水に関わる条項としては取水施設の設計技術指針(316条b)などがあり、近い過去では2001年から06年にかけてEPAが3段階に分けて指針を公表していた。

具体的な審査や指導は州政府などが行うことになっており、オイスター炉が立地するニュージャージー州のDEPでは2010年1月、連邦政府の規制条項を満たすには閉鎖循環方式がベストと位置付け、ワンス・スルー(OTC)方式で取放水されているバーニガット湾の生態系保護のため、冷却塔を建設するようエクセロン社に要請。「閉鎖循環方式は水生生物にとって一層健全であり、地元住民の生活の質向上にもつながる」と説明し、州政府の許可(NPDES)更新の条件になることを言明していた。DEPはその後、2月と3月にこの件に関する公聴会を実施したほか、州民から2,000通のコメントを収集。現在、その分析作業中である。

[フランス]

アレバ社、ジョルジュ・ベスⅡ濃縮プラントにウラン搬入

仏アレバ社が2006年にトリカスタンで着工したジョルジュ・ベスⅡ遠心分離濃縮工場で、2010年12月14日に最初のウラン原料コンテナが搬入された。開業式には14か国から100名以上の顧客が出席し、総工費30億ユーロの大型建設プロジェクトが決定的な段階に達したことを見

届けた。

同工場を構成する南北2つのユニットのうち、先行建設中の南ユニットでは09年5月に最初の遠心分離カスケードが始動。今回、実質的に操業開始されることになった。09年初頭に遅れて着工した北ユニットを含めた南北両方のユニットが操業を開始すれば、16年にも2年前倒しでフル容量の年間7,500トンSWUに到達する見通し。最終的にはさらに1ユニットを増設し、1万千トンSWUの容量を目指す計画だ。

アレバ社は現在、世界のウラン濃縮市場で25%のシェアを占めているが、その他の部分を占めるウレンコ社や米国濃縮会社(USEC)、ロシアのアトムエネルギープロム社(AEP)ではすべて、遠心分離技術を採用した工場を操業中か、あるいは新規建設中。アレバ社によれば従来、同社が活用してきたガス拡散法と比べて、遠心分離法では所要電力が50分の1で済む。このため同社は2003年、ウレンコ社との合併で遠心分離器の製造会社(ETC)を設立し、06年には遠心分離技術の使用権をウレンコ社から取得した。

トリカスタン・サイトでは現在、子会社のユーロディフがガス拡散法のジョルジュ・ベスⅠ工場を操業中。Ⅱが部分ごとに完成していくのに併せて、徐々に濃縮能力を差し替えていく方針である。

[スイス]

電力グループ3社、共同で既存炉建替えへ

スイスで既存原子炉の建替えを計画している電力グループ3社(AXPO, BKW, ALPIQ)は2010年12月23日に共同声明を発表し、今後は3社による「共同計画会社」を通じて2つの原子力発電所を新たに建設する方針であることを明らかにした。

地元州政府や内閣の審議に続いて、議会の承認、国民投票の実施など、原子力発電所建設に伴う政治的および公的手続きの迅速化を図るとともに、評価手続きにおける相乗効果やコスト軽減を狙ったもの。2012年半ばに、建替えサイトとして承認済みの3つの候補地の中から2サイトを決定し、建設計画の優先順位付けをするとしている。

スイスでは現在、5基の原子炉が稼働中だが、10年後にはこのうち4基が運開後、40~50年に達するほか、フランスからの電力購入契約も18年以降、徐々に期限切れとなる。国の総電力需要の4割を支えるこれら約340万kWの設備容量を温存するため、2008年6月にATEL社はゲスゲン原子力発電所の隣接サイト(ニーダーアムト)での原子炉新設計画を政府に申請。同年12月にはAXPOグループとBKW・FMBエネルギー社がベツナウおよび

ミューレレベルク両原子力発電所の建替えとして両サイトに160万kW級原子炉各1基の建設を申請していた。

今回、AXPOとBKWの共同計画会社にALPIQ社(旧ATEL社)が加わり、3分の1ずつ出資。当面それぞれ3サイトでの建設計画を等価値で進めていく。連邦エネルギー庁は現在、これら3件に関する一般認可申請を審査中で、その結果が出る2012年半ばには、連邦参事会(内閣)が3申請それぞれの可否を判断。共同計画会社はそれに基づいて、優先して進める2サイトの計画を最終決定する予定だ。

ベツナウ、ミューレレベルク、ニーダーアムトの3サイトはすでに09年11月、連邦原子力安全検査局(ENSI)が原子炉建替え用地として承認済みで、現在さらなるFSが行われている。

なお、原子炉が完成した後、共同計画会社はそのまま共同運転会社に移行する可能性があるが、発電電力の買い上げ率は暫定的に、AXPOグループが59%、ALPIQ社が25.5%、BKW社が15.5%となっている。

[UAE]

原発建設認可を規制当局に提出

アラブ首長国連邦(UAE)の首長国原子力会社(ENEC)は2010年12月27日、アブダビ首長国西部のブラカで同国初の原子炉を建設するための認可申請書を連邦原子力規制庁(FANR)に提出した。

ENECは2020年までにブラカで韓国製の第3世代・140万kW級改良型PWR(APR)1400を4基建設するが、今回の認可はその最初の2基に関するもの。今後、原子力先進国の技術コンサルティング企業連合から助言を得つつFANRが同申請を評価するが、FANRの認可に加えて、アブダビ首長国環境庁(EAD)が発給する合計4基分の建設環境許可(CEP)をもって初めて、ENECは2017年の1号機運開に向けて着工可能となる。

FANRは09年7月に、サイトでの限定的な準備作業と一部の機器製造を認可しており、ENECは専用栈橋など原子炉の安全性とは無関係のインフラ準備作業のほか、韓国電力が斗山重工業に発注した1～4号機の压力容器や蒸気発生器(SG)、加圧器、冷却ポンプ等の製造・組立てを開始していた。

今回、ENECがFANRに提出した申請書は9,000頁に及んでいるが、国際的に最も厳しいレベルの安全基準達成というFANRの方針により、世界の著名な技術コンサルティング企業がこの申請書の評価作業を支援する。すなわち、米国の大手原子力コンサル企業であるライトブリッジ社、仏独の原子炉・放射線安全団体が欧州の原子力安全確保のために設立したRISKAUDIT、UAE国営の技術移転事業会社であるベイヌナ・グループと米国の

研究分析企業ISLの企業連合など——だ。

なお、今後UAEの原子力発電計画を支える優秀な人材を確保するため、ENECは09年、韓国電力の協力により応用技術研究所(IAT)とハリファ科学技術研究大学の学生48名に1か月間、韓国で原子力設備の運転訓練を受けさせた。この訓練は今後も継続する方針で、今年9月からは韓国電力とIATが協力し、3年間の運転員養成特別コースを始めるとしている。

[インド]

フランスとインドがEPR建設で枠組み合意、2018年に運開へ

仏アレバ社は2010年12月6日、インド南西部のジャイタプールに出力165万kWの欧州加圧水型炉(EPR)2基を建設するとともに、原子炉燃料を25年間供給するための枠組み合意文書にインド原子力発電公社(NPCIL)と調印した。1,500億ドル規模という巨大なインドの民生用原子力市場を前に、原賠法関係の課題により米国企業が足踏み状態のなか、フランスは総額70億ユーロといわれる大規模な取引でいち早く先鞭を付け、強固なビジネス基盤を築く考え。今後はサイト掘削のための調査やインド安全規制当局の承認手続き、サイトに適合する詳細な機器構成設定などを開始し、2018年の初号機運開を目指す。

今回の合意は、2009年2月に両者が結んだ覚書(MOU)に基づいており、さらに4基の増設オプション付き。フランスのN・サルコジ大統領による4日から7日までのインド訪問に際して決定したもので、これに先立ち、インドの環境森林省は11月28日付けで、ジャイタプールにEPR6基を建設する計画に環境許可を発給していた。

両国が合意した重要協力事項は、インドに対する(1)EPR蒸気供給系(NI)と燃料の供給、(2)サイトでの準備作業開始に関する事項のほか、(3)EPR協力実施に伴う技術データ・情報の機密性防護に関わる2国間協定、(4)EPR関係の知的所有権拡散を制限する2国間協定、(5)フランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)とインド原子力省(DAE)の原子力分野における研究開発協力——など。さらに、両国双方の安全当局や放射線防護研究所、廃棄物管理担当局同士の協力に関する覚書も結ばれている。

[中国]

ウェスチングハウス社、最初のAP1000用燃料集合体を製造

ウェスチングハウス(WH)社は2010年12月20日、世界初のAP1000として中国で建設されている三門原子力発

電所 1 号機用に最初の燃料集合体 4 体を製造したと発表した。中国では三門と海陽に続いて、内陸部の 3 地点でも AP1000 建設計画が検討されており、WH 社では高性能で完璧な燃料の提供を目指して米国内の燃料加工工場を大幅に改修するなど、万全な製造体制を整えている。

WH 社によると、AP1000 の燃料設計は同社製 PWR で実証済みの「堅固な燃料集合体」の技術に、有害な冷却材デブリからの防護性能や耐震性能の向上、運転性能の効率化が図られるようさらに改良。米サウスカロライナ州の「コロンビア燃料加工施設 (CFFF)」に同社の 3 サイトから集めた 100 名以上の従業員で専門チームを作り、2006 年から AP1000 燃料確証プログラムを実施。CFFF も 1,600 万ドルをかけて改修している。

現在、中国では、浙江省の三門、山東省の海陽の両原子力発電所で AP1000 を 2 基ずつ建設中で、三門 1 号機の送電開始は 2013 年の予定。後続の 3 基は半年遅れで順次送電網に接続する計画だが、両サイトとも最終的には AP1000 が 6 基ずつ設置される。

WH 社はまた、中国内陸部の湖南省桃花江、湖北省咸寧、江西省彭澤サイトでも AP1000 が採用されるとしており、いずれも複数基の原子炉建設について中国と交渉中となっている。

[国際]

IAEA の燃料バンク、理事会で設置が決定

国際原子力機関 (IAEA) の理事会は 2010 年 12 月 3 日、核燃料サイクル施設を持たない選択をした加盟国に対して低濃縮ウラン (LEU) の供給を支援する「LEU バンク」の設置を決定した。

これは米国の非政府組織である「核脅威イニシアティブ (NTI)」が提案していた核燃料供給保証構想で、10 年 3 月に創設合意したロシアの「国際ウラン濃縮センター

(IUEC)」とともに、09 年 11 月の理事会で承認されていた。ロシアの IUEC は濃縮を含めた核燃料サイクル・サービスを IAEA の管理下で差別なく提供するのに対し、IAEA の LEU バンクは、(1)加盟国の原子力発電所で LEU の供給が途絶し、国家間の調整その他の方法で解決しない、(2)核燃料の移転など、核不拡散上の問題がない、(3)IAEA の包括的保障措置を受け入れる——の 3 条件を事務局長が確認した上で、IAEA 自身が備蓄・管理する LEU を市場価格で提供する。

加盟国が自前の核燃料生産施設を設置する権利を損なう性質のものではないが、インドやエジプトなど非同盟運動 (NAM) 諸国は、原子力平和利用の権利の制限や「持つ国」と「持たざる国」の二分化につながるなど、懸念を表明している。

IAEA は 100 万 kW 級 PWR 1 基のフル炉心分 LEU をホスト国内に備蓄することになるが、その購入経費や運転資金としては、提案国である米国が 08 会計年度の一括歳出法から約 5,000 万ドル、ノルウェーが 500 万ドルをすでに拠出済み。このほか、クウェートとアラブ首長国連邦 (UAE) がそれぞれ 1,000 万ドルずつ、NTI が 5,000 万ドル、および欧州連合が 2,500 万ユーロの拠出を表明している。

LEU 受領国は、発電用燃料以外への使用や軍事用への転用、さらなる濃縮、再処理・再輸出等の実施を禁じられているほか、LEU ホスト国同様、IAEA の保障措置協定に加えて同安全基準、核物質防護策の適用が義務付けられる予定だ。

技術上および商業上の事由と無関係に、LEU 供給の途絶した IAEA 加盟国が同理事会の審査をクリアすれば IUEC から LEU の供給を受けられる。

また、申請時点で原子炉を保有していない国でも参加が可能で、核不拡散の要請を両立させつつ関心を持つ国すべてに原子力エネルギーへのアクセスを与えることを目指している。

特集

原子力発電所における耐震とは何か

愛知工業大学 入倉孝次郎
 産業技術総合研究所 杉山 雄一
 首都大学東京 西川 孝夫
 東京大学 野本 敏治

2007年7月16日の新潟県中越沖地震(気象庁マグニチュード6.8)は原子力発電所の極近傍に発生し、それにより発電所の建物・施設が極めて大きな強震動の直撃を受けた。このように大きな地震が原子力発電所の近くで起こったのは国内のみならず国際的にも初めてのケースで、日本の原子力発電所のみならず、地震国にある各国の原子力発電所の耐震安全性に大きな問題を投げかけた。

この地震により、東京電力(株)の柏崎刈羽原子力発電所では、設計時の想定を大きく超える揺れが観測されたが、原子炉施設はこの揺れに対し「止める」「冷やす」「閉じ込める」という重要な安全機能が確保され、安全に止まった。しかしながら、安全上重要な設備の損傷は免れたとはいえ、変圧器の火災、極微量の放射能漏えい、原子炉建屋クレーン軸の継手の破損など周辺設備に広範な影響が出ており、原子力発電所の耐震安全性のあり方に種々の検討すべき課題があることがあらわになった。活断層、地震動、耐震工学などの研究者には、「なぜ想定外の地震動が生じたのか」「今後、別の地震が起こったときに原子力施設の耐震安全性は確保されるのか」といった問題が突きつけられた。

原子力発電所の耐震安全性を審査するための「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」は4年に及ぶ議論を経て2006年9月19日に改訂された。改訂が必要となった背景には、地震学などにおける新知見の蓄積や原子力発電所の耐震設計技術の進歩があるが、やはり、1995年に発生した兵庫県南部地震により大災害を引き起こされたこと、それにより原子力発電所は地震に対し本当に大丈夫かという漠然とした不安感が国民の間に広がったこと、などの社会情勢があげられる。

1995年の阪神・淡路大震災の経験が契機となり、地震調査研究推進本部が設置され、基盤的調査研究として、全国の基盤的観測網の構築とあわせて、活断層調査、地下構造調査など、また工学分野では実大構造物の振動実験施設(E-Defense)の建設などがなされた。強震動観測網の充実で、大きな地震が起きると強震動が記録され、それらを用いて即時的な解析により直ちに震源断層の破壊過程が推定されるなどの研究が行われ、地震の震源像が次第に明らかになってきた。地殻媒質の伝播特性、表

層の地盤特性などの研究と結びつけることにより、強震動予測手法の研究が大きく進展した。これらの調査研究を総合化することで「全国を概観する強震動予測地図」が作成され、2005年に発表された。一方、この地震のとき、実際にビルや高架橋の倒壊などの被害を受けた地域ではじめて強震動が記録され、強震動による構造物の応答さらにその損傷過程が定量的に理解されることとなった。

これらの地震学・地震工学の発展が原子力発電所の耐震設計審査指針の改訂につながった。改訂された耐震設計審査指針は中越沖地震のような地震の発生も想定して策定されたものであるが、新指針に従って原子力発電所の十分な耐震性が確保できるかどうかの検証が必要とされている。

本特集は、2006年の耐震指針の改訂および2007年新潟県中越沖地震による柏崎刈羽発電所の経験を受けて、原子力施設の耐震安全性の取組みの現状と今後のあるべき方向について、地質学、地震学、建築工学、機械工学の4人の専門家に、執筆を依頼した。

最初の杉山論文「耐震安全性確認のための地質調査」では、耐震安全性の確認に必要な活断層を認定するための地形・地質調査について最新知見を紹介する。次の入倉論文「耐震設計審査指針とバックチェック」では、新指針に基づく基準地震動の評価方法および柏崎刈羽原子力発電所を例とした耐震安全性のためのバックチェックについて紹介する。

続く西川論文「原子力発電施設の耐震設計」では、原子力施設が地震力に対してもつ裕度について、中越沖地震時における柏崎刈羽発電所施設の例を紹介するとともに、免震構造の採用による標準設計について述べる。最後の野本論文「機械・電気設備への影響評価」では、新潟県中越沖地震が原子炉機器の健全性にどのような影響を与えたかについて行った評価結果を紹介するとともに、指針に対応した機器の健全性に関して、検査と解析の組合せによる評価の枠組みを示す。

本特集は、上記のように幅広い視点から、新潟県中越沖地震から学ぶ原子力発電所の耐震安全性についての理解を深め、我々が今後なすべきことは何かについて、議論することを目的としてまとめたものである。

(入倉孝次郎)

耐震安全性確認のための地質調査

本稿では、耐震安全性の確認に必要な活断層を認定するための地形・地質調査について最新知見を紹介する。新しい耐震設計審査指針では、原子力施設の耐震安全をより高めるために考慮すべき活断層の基準が変更された。それに伴い、原子力安全・保安院や原子力安全委員会において行われている原子力施設のバックチェックや、安全審査で活断層の見直しの検討事例を紹介する。また活断層の連動性や地震発生頻度など、今後の検討課題について指摘する。

産業技術総合研究所 杉山 雄一

I. はじめに

耐震設計審査指針の改訂(2006年9月)および新潟県中越沖地震の発生(2007年7月)に伴い、主要な原子力施設では、耐震安全性の確認を目的とする各種の地質調査(変動地形学的調査および地球物理学的調査を含む)が行われている。また、2009年8月に発生した駿河湾の地震では、中部電力浜岡原子力発電所において、500 mも離れていない地点で2倍程度以上も異なる最大加速度が観測された。このため、同電力によって詳細な地質調査・地球物理学的調査が実施されている。本稿では、指針改訂に伴う調査やこれらの地震対応として行われた調査を通じて明らかになった、耐震安全性の確認上重要と考えられる地質学的な知見について紹介する。

II. 活断層の基準の変更—その意義と適用事例

新耐震設計審査指針において地質調査関連の大きな変更として注目された点として、耐震設計上考慮する活断層の基準の変更がある。旧指針では5万年前以降の活動が否定できない断層とされていたが、新指針では後期更新世以降(約13万年前以降)の活動が否定できない断層に変更された。本章ではまず、その意義について簡単に触れ、この変更の適用により、活断層と評価し直された例として下北半島の横浜断層を紹介する。

1. 5万年前以降から後期更新世以降への変更の意義

上述のような断層活動の有無を確かめる期間の変更は、単に期間を2倍以上長くして、より安全に配慮したというだけではない。活断層か否かの判断に利用できる直接的な基準を増やすことになった点が重要である。具体例を挙げると、原子力発電所が立地する沿岸部には、8~13万年前に形成された海成段丘面(第1図)が広く分布する。地表地質調査や変動地形学的調査により、評価すべき断層がこれらの段丘面を変位・変形させているか確かめることによって、直接、活断層か否か判定できるよ

うになった。また、沿岸の浅海域には、15万年前頃の一つ前の氷河期の陸上・浅海での侵食や、その後の急激な海面上昇に伴う海進侵食によって形成された侵食面が分布する。音波探査により侵食面を追跡し、評価すべき断層が侵食面上に堆積した後期更新世の地層を変位・変形させているか確かめることによって、活断層か否かの判定が可能となった。さらに、5~13万年前は、年代が明確になっている火山灰がたくさん知られている時代であり(第1図)、これらを断層の活動性の評価に一層積極的に利用できるようになった。

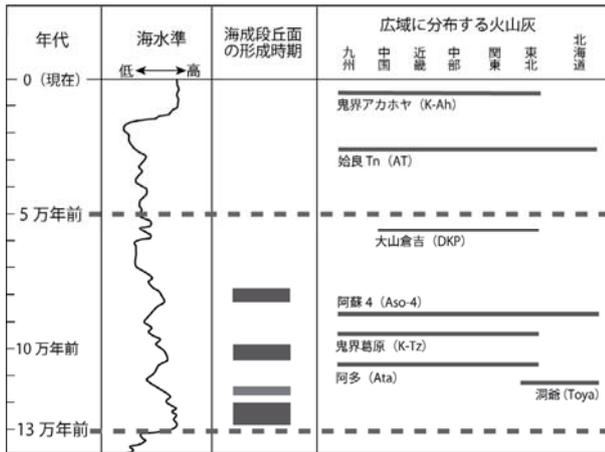
2. 横浜断層—11万年前の火山灰による活断層の認定

横浜断層は、東北電力東通原子力発電所の設置許可(1998年)時には、後期更新世に形成された海成段丘面に明瞭な変位が認められないこと等から、活断層とは見なされていなかった。その後、東京電力東通発電所の設置許可申請(2006年)に伴い、同電力が2007年に同断層のトレンチ調査を実施した。その結果、約11.2~11.5万年前の洞爺火山灰の層準に断層変位が及んでいる可能性があり、さらに詳しい調査が必要と判断された。このため、2008年に東京電力、東北電力、リサイクル燃料貯蔵の3社により新たなトレンチが掘削され、断層変位が洞爺火山灰の層準に及んでいることが確認された(第2図)。この結果、横浜断層は新審査指針に従って活断層と判断され、その長さは約15 kmと評価されている。

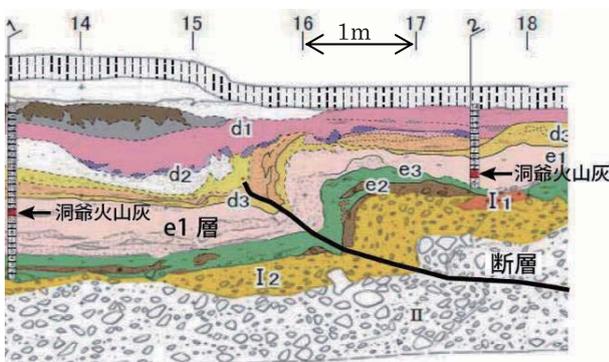
既設原子炉の設置許可時点では活断層とされていなかった断層、リニアメント等が指針改訂に伴う詳細調査によって、活断層と見直された例は他にもある。次に、日本原子力発電敦賀発電所敷地内の浦底断層と関西電力大飯発電所の沖合にあるFO-AおよびFO-B断層を紹介する。

3. 浦底断層—地質調査結果の適切な解釈の重要性

日本原子力発電は、3,4号機の増設許可を申請した2004年の時点では、浦底断層が5万年前以降に活動した証拠はなく、活断層ではないとしている。原子力安全・保安院は2005年に、他の敷地周辺の活断層とともに浦底断層の追加調査を指示し、翌年には新指針に基づく安全性の確認を指示した。これを受けて日本原電はトレンチ



第1図 約13万年前に始まる後期更新世以降の海水準の変化，海成段丘面の形成時期，主な広域火山灰



第2図 トレンチ壁面に現れた横浜断層とそのスケッチ(東京電力，東北電力，リサイクル燃料貯蔵の資料に加筆)

調査等を実施し，敷地内の浦底断層が上部更新統と完新統を切る活断層であることを確認した。浦底断層は長さ18 kmの浦底—内池見断層と評価され，地震動評価に当たっては，破壊が浦底断層から池河内断層へ伝播するケース(長さ25 km)も考慮されている。

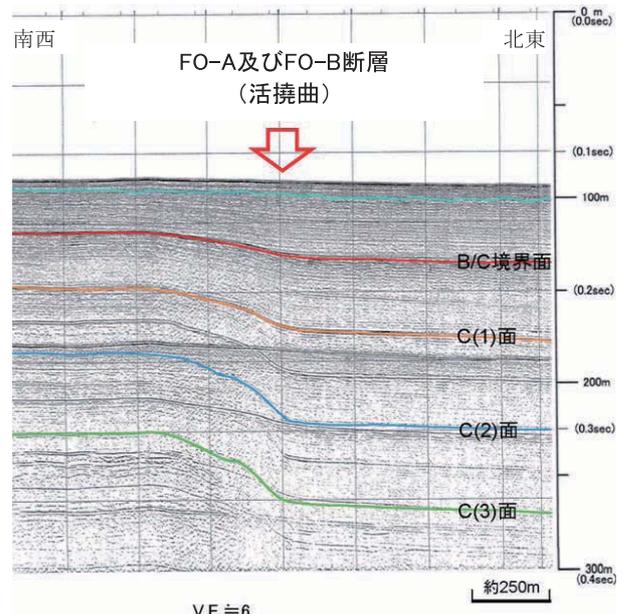
浦底断層については，増設許可申請に際して実施したボーリング調査結果を適切に評価していれば，活断層の基準の変更とは関係なく，活断層と判断できたと考える。事業者には事実を率直に認め，速やかに公表する勇気を望みたい。また，今回の指針改訂に伴う耐震安全性のチェックは，事業者には断層に関する判断の変更を公表しやすい機会を与えたと考える。規制当局には事業者が

事実を速やかに公表しやすい仕組みの構築を望む。

4. FO-A 断層および FO-B 断層—活褶曲・活撓曲の評価

両断層については，1987年の大飯発電所3，4号機の増設許可時には，「A層(完新世の地層)およびB層(後期更新世の地層)中には断層の活動に伴うと考えられるような地層の乱れは認められない」とする関西電力の判断が了承されている。今回のバックチェックによって，関西電力と原子力安全・保安院がおのおの実施した音波探査の結果，両断層は後期更新世以降の地層に撓曲変形を及ぼしていることが確かめられ(第3図下)，活断層と見直された。また，音波探査の結果を踏まえ，地震動の評価に当たっては長さ35 kmの一つの断層として扱われている(第3図上)。

FO-A および FO-B 断層の活断層としての認定と地震動評価における取扱いは，新審査指針中の「地震活動に関連した活褶曲，活撓曲等については，その性状に依



第3図 FO-A および FO-B 断層の位置(上)と音波探査によって明らかにされた活撓曲(下)(関西電力の資料による)

じて震源として想定する断層の評価に考慮する」の実践例といえる。なお、1987年の時点では、撓曲の重要性が審査する側にも十分理解されていなかったと推察される。

Ⅲ. 変動地形の重要性

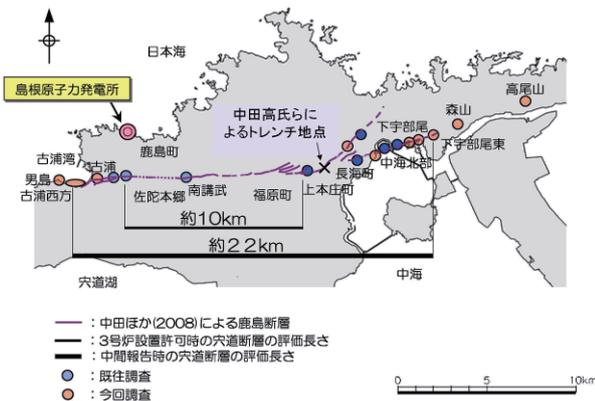
耐震設計審査指針の改訂において、地質調査関連で注目されたもう一つの点は、変動地形の重要性の再認識であり、「リニアメント」から「変動地形」への転換である。これに関連して、本章では島根半島の宍道断層と下北半島の段丘面の傾動を紹介する。

1. 宍道断層—安全審査の評価結果を覆した変動地形

中国電力島根原子力発電所3号炉の設置に係る安全審査(2005年設置許可)では、同発電所近傍の宍道断層の長さは約10 kmと評価された(第4図)。しかし翌2006年、中田高氏らの研究グループは、10 km 区間の外側(東側)に活断層を示唆する変動地形を認め、トレンチを掘削した。その結果、宍道断層が完新世の地層を切っていることが明らかになった。この調査は変動地形の正しい理解の重要性を強く示し、新審査指針に「変動地形学的調査」を明記することを後押しした重要な研究事例である。なお、バックチェックでは、宍道断層は長さ約22 kmと評価され、中田高氏ら変動地形研究者の最近の評価と同等の規模となっている(第4図)。

2. 下北半島の段丘の傾動—緩やかな変動地形の課題

下北半島の尻屋崎周辺には、中期更新世に形成された高位段丘面群と後期更新世に形成された中・低位段丘面群が分布する。このうち、40万年前以前に形成された高位段丘面は西に傾動しており、この傾動を形成した西傾斜の逆断層の存在が示唆される。一方、10~13万年前に形成された中位段丘面は、事業者の詳細な調査によると、太平洋岸から津軽海峡沿岸にかけてほぼ同じ高さに分布し、傾動は認められない。この調査結果に基づき、高位段丘面を傾動させた逆断層運動は後期更新世より前に終息したと判断された。下北半島の地殻変動は、横浜断層周辺に分布する段丘面の変動量などから、中期更新

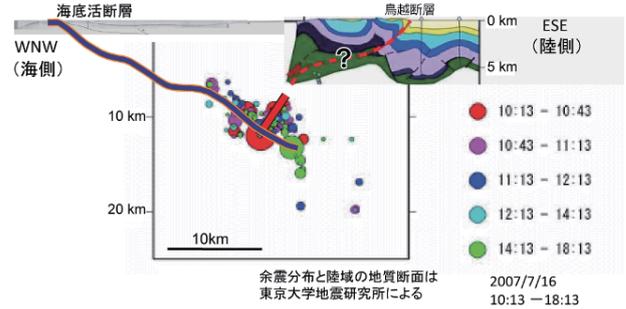


第4図 宍道断層の評価の変遷(中国電力の資料による)

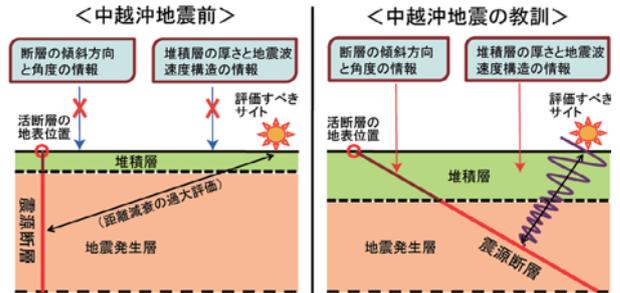
世以降、次第に衰えていると考えられる。その中で、横浜断層は後期更新世の前葉に活動したことが確かめられたことから、将来の活動を考慮すべき活断層とされ、他方、高位段丘面を傾動させた逆断層運動は将来の再活動はないと判断された。この判断はかなり微妙なものであり、異論もある。緩やかで広い範囲に及ぶ変動地形に関する知見を深め、より適切な安全審査に資するため、今後も多様な視点と手法によって検討されることを期待する。

Ⅳ. 地質および地質構造データの重要性

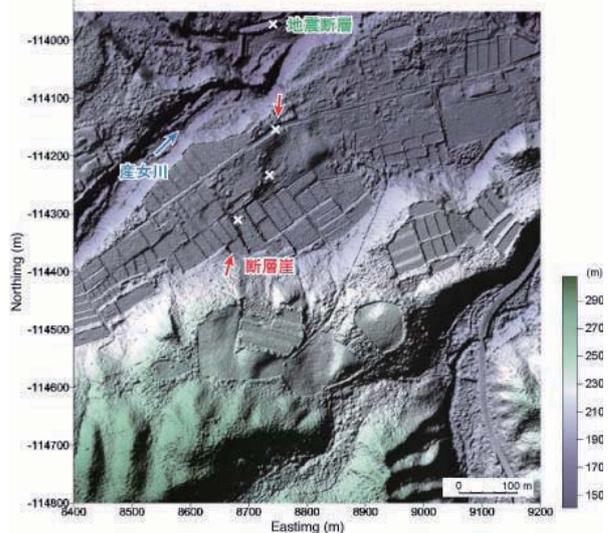
活断層を震源とする地震の適切な震源モデルの作成には、活断層の位置と長さの情報だけでは不十分である。



第5図 新潟県中越沖地震の震源断層—活断層システム



第6図 中越沖地震前の地震動評価(左)と同地震を踏まえた地震動評価(右)



第7図 岩手・宮城内陸地震の震源域における航空レーザー計測で検出された断層崖(一関市巖美町字岡山)過去の断層活動の痕跡を示す(産総研・丸山 正氏資料)

地下深部の震源断層に至る断層の3次元形状の情報が不可欠である。また、原子力サイトを襲う地震動を適切に評価するためには、サイト周辺の深部および浅部の地質・地質構造(厳密には地震波速度構造)の情報が不可欠である。本章では、このことを強く印象付けた2007年新潟県中越沖地震と2009年の駿河湾の地震を取り上げる。

1. 中越沖地震の教訓—深部地質構造の重要性

地質学の視点から見た中越沖地震の重要な特徴は、震源域と断層の地表への表出域(「F-B断層」などの活断層や活褶曲の分布域)が10 km近くも離れていたことである(第5図)。その主な原因は、(1)断層の傾斜が35度程度と低角度であったこと、(2)6 km以上に達する厚い堆積層が存在していたこと、の2つである。

「ひずみ集中帯」のような、厚い堆積層が分布する地域で発生する地震や地震動を正確に予測するためには、地表や海底の活断層の位置や分布を明らかにするだけでは不十分である(第6図)。構造探査による活褶曲構造の解明や「断層関連褶曲」の考え方の適用によって、活断層の深部延長に当たる震源断層の位置と形状を3次的に想定する必要がある。同時に、厚い堆積層地盤による地震動の増幅を適切に評価することが不可欠である。そのためには、深部構造探査等によって、堆積層の厚さ、地震波速度構造、堆積層/岩盤境界の形状等を知る必要がある。

2. 駿河湾の地震—浅い地質および地質構造の影響

駿河湾の地震で浜岡原発5号機において他号機に比べて2倍程度以上の地震動が観測された原因については、中部電力が詳細な地質調査・地球物理学的調査を実施中である。これまでの調査によると、5号機での揺れの増幅は、相対的に小さな地震波速度をもつ地層が5号機周辺からその北東方に分布しているためと推定される。浅部の堆積層中の小さな不均質が大きな揺れの増幅を引き起こした可能性が高く、敷地近傍の浅い地質・地質構造と地震波速度構造の3次元の把握の重要性を示した。

しかし、本稿を執筆している2010年9月の時点では、相対的に小さな地震波速度をもつ地層の実態、堆積層中の不均質の実態は明確になっていない。今後の地質調査および地球物理学的調査によっても、これらの実態が解明されない場合には、浅い地質や地質構造による地震動の増幅の「不確かさ」について、他の原発サイトを巻き込んだ見直しを迫られる可能性がある。中部電力による詳細調査の結果が注目される。

V. 活断層の検出に係る課題と新しい技術の動向

この10年に発生した2000年鳥取県西部、2004年新潟県中越、2005年福岡県西方沖、2007年能登半島、2007年新潟県中越沖、2008年岩手・宮城内陸の6つの内陸・沿岸の被害地震のうち、能登半島地震以外の5地震は活

断層が認められていなかった場所を震源として起きた。これらの地震では、地表・海底に出現した地震断層は断続的・不明瞭で変位量が小さく、不連続部を含む総延長は震源断層や地震の規模に比べて小さいという共通点があった。このため、地表痕跡が不明瞭な活断層の調査が重要な課題として浮上した。また、福岡県西方沖、能登半島、中越沖の3地震(半数の地震)は、沿岸域を震源として発生した。従来、沿岸域(特に沖合5 kmまで)は海・陸の調査の狭間となり、情報の空白域となっていたところが多い。このため、沿岸域の活断層情報の充実・高精度化が強く求められている。

本章では、これらの課題の解決に向けた取組みのうち、地表痕跡が不明瞭な活断層の調査技術として、レーザー計測と断層破砕物質・断層岩の解析、沿岸域の活断層の調査技術として、高分解能音波探査を紹介する。

1. 地表痕跡が不明瞭な活断層の調査

(1) レーザー計測

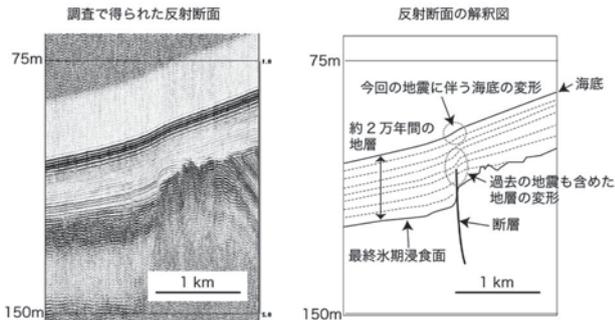
岩手・宮城内陸地震の震源域については、地震後、航空レーザー計測に基づく1 mグリッド数値標高モデルから作成した地形イメージ図から、踏査で確認された地表地震断層が検出できるか検討された。その結果、田や牧草地では50 cm程度以下の上下変位でも検出可能であることがわかった。また、山地内の地震断層でも、1 m程度以上の上下変位を伴う場合には、その性状を明瞭に捉えられることがわかった。さらに、地震断層沿いの数ヶ所で、2008年の地震以前にも同じ断層が活動したことを示す低崖が検出された(第7図)。これらの結果は、地表痕跡が不明瞭な活断層の存否確認・追跡に航空レーザー測量が有効であることを示した。現在、航空および地上レーザー計測は、原子力施設のバックチェックに活用されている。

(2) 断層破砕物質・断層岩の構造地質学的解析

後期更新世以降の断層の活動性を判断する基準(後期更新世の地層や段丘面など)を欠く地域では、断層粘土などの断層破砕物質やそれらが固結した断層岩から、断層の活動性に関する情報を得る努力がなされている。原子力施設のバックチェックでは、断層粘土や断層岩の肉眼～顕微鏡オーダーの組織を構造地質学的に解析することによって、断層が活動した時期の応力方位を復元し、地質時代から現在に至る応力場と比較し、活断層か否か判断する方法が採用されている。今後、断層破砕物質や断層岩の物理・化学的特性から断層の活動性を評価する手法の開発を期待したい。

2. 沿岸域の活断層調査—高分解能音波探査

能登半島地震の震源域では、北陸電力志賀原子力発電所の原子炉設置許可申請時の音波探査等によって知られていた海底断層に沿って、今回の地震に伴う海底の変形が捉えられた(第8図)。小規模な海底の変形を2007年の



第8図 高分解能音波探査で捉えた能登半島地震による海底の変形(産総研・岡村行信氏資料)

地震による変形と認定できたのは、浅海用の高分解能マルチチャンネル音波探査システムの開発に負うところが大きい。この新たに開発された浅海用の音波探査システムは、中越沖地震の震源域とその周辺の調査や、耐震設計審査指針の改訂に伴う原子力施設のバックチェック等に利用され、多くの成果を上げている。

Ⅵ. 地震の規模および頻度の評価に係る課題と技術の動向

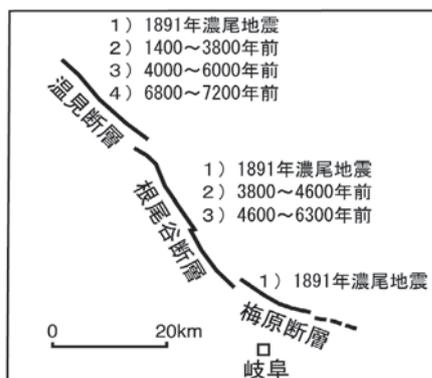
1. 断層の連動性評価に基づく地震規模の適切な評価

原子力施設の耐震安全性評価を目的とする活断層の調査および評価では、地震の規模の評価に直結する、一度に活動する可能性のある断層のグループ(起震断層)の過小評価を防ぐことが重要である(第9図)。従来の原子力業界における地震規模の評価では、活断層の単独破壊のみを想定したものが多く、一般防災を目的とする地震本部による、活断層の連動を考慮した地震規模よりも小さいという問題があった。

審査指針の改訂に伴うバックチェックでは、地震本部採用の経験的な連動評価法を採用するとともに、クーロン破壊応力変化法や動的断層破壊シミュレーション法などによる検討も採用されるようになってきている。

2. 地震発生頻度の過小評価の可能性とその解決策

2004年新潟県中越地震に伴う地震断層の変位量は10



第9図 連動型巨大内陸地震の例—1891年濃尾地震(M8.0) 温見断層、根尾谷断層、梅原断層の3断層が連動破壊して発生。過去1万年間にただ1回起きています。



第10図 A:中越地震に伴って出現した地震断層と背後の崖 B:崖と地震断層を横断するトレンチに現れた逆断層

cm程度であったが、トレンチ調査の結果、同じ断層が過去には1.5 m以上に達する地表変位を繰り返していたことが判明した(第10図)。同一断層の10倍以上も違う地表変位は、岩手・宮城内陸地震の地震断層のトレンチ調査でも指摘されている。10 cm程度の地表変位は、その痕跡を地形や地層中に留める可能性は非常に低い。このため、活断層調査によって、このような小さな地表変位しか伴わない過去の地震を検出することはほぼ不可能である。この事実は現在、主にトレンチ調査等の古地震調査の結果に基づいて推定されている地震の発生頻度は、過小評価の可能性を示唆している。この結果は、原子力発電所の設置許可申請時に策定される活断層を震源とする地震の地震動についても、その発生確率を過小評価している可能性を内包している。

この課題は地質学的な古地震調査のみによって解決することは不可能である。震源断層に至る断層の3次元形状を明らかにし、地震活動・地殻変動・地殻応力・地殻物性等の観測・実験データに基づく物理学的検討(破壊の発生・伝播のシミュレーションなど)と合わせて、地表断層変位の発生モデルを構築する必要がある。

著者紹介

杉山雄一(すぎやま・ゆういち)



産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター
(専門分野)地質学、第四紀学、活断層

耐震設計審査指針とバックチェック

原子力安全委員会が2006年9月に改訂した耐震設計審査指針に基づく基準地震動の評価方法と、柏崎刈羽原子力発電所を例とした耐震安全性のためのバックチェックについて紹介する。新潟県中越沖地震のときの柏崎刈羽発電所における強震動は、これまで経験的関係式として用いられている断層最短距離と最大加速度の関係に比べて顕著に大きかった。その原因を明らかにする。また、今後の基準地震動の評価のために、敷地周辺における地震動観測および震源域から敷地に至る伝播経路の地下構造の調査に基づいて、地震動伝播特性の把握、震源となる断層の形状の設定および断層パラメータのばらつきを検討の重要性について述べる。

愛知工業大学 入倉孝次郎

I. はじめに

2007年7月16日の新潟県中越沖地震(気象庁マグニチュード6.8, モーメント・マグニチュード6.6)は原子力発電所の極近傍に発生し、それにより発電所の建物・施設が極めて大きな強震動の直撃を受けた。この地震の強震動は設計時に想定された地震動レベルを2.5倍も上回った¹⁾。「なぜ想定外の地震動が生じたのか」「今後、別の地震が起こったときに原子力施設の耐震安全性は確保されるのか」といった問題が突きつけられた。この地震の約10ヶ月前の2006年9月に改訂された耐震設計審査指針²⁾は中越沖地震のような地震の発生に対して有効なのか、また、新指針に従って原子力発電所の十分な耐震性が確保できるかどうかについて、検証が必要とされている。

II. 耐震設計のための基準地震動

原子力施設の耐震設計のための基準地震動は、新指針で、「地震学および地震工学的見地から施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切な地震動」と定められている²⁾。この基準地震動による地震力に対して、「施設はその安全機能が損なわれることがないように設計されなければならない」と規定されている。

上記の新指針の基準地震動の考えは、旧指針で「発電用原子炉施設は想定されるいかなる地震力に対してもこれが大きな事故の誘因とならないよう十分な耐震性を有していなければならない」との規定と同等な考え方に立ったものである。しかしながら、新指針では、解説において、「地震学的見地からは、上記のように策定された地震動を上回る強さの地震動が生起する可能性は否定できない」と記し、耐震設計用の地震動の策定において、

「残余のリスク」が存在することを明記している点が旧指針の規定と異なっている。さらに、新指針では、「施設の設計に当たっては、策定された地震動を上回る地震動が生起する可能性に対して適切な考慮を払い、基本設計の段階のみならず、それ以降の段階も含めて、この『残余のリスク』の存在を十分認識しつつ、それを合理的に実行可能な限り小さくするための努力が払われるべきである」と述べ、耐震設計のための基準地震動評価の意味をより明確にしている。

1. 基準地震動の評価

基準地震動は、旧指針では設計用最強地震力S1と設計用限界地震動S2の2種類が用いられたが、新指針では、「最近の地震学および地震工学の知見に基づき、科学的見地から限界地震動としてSsを評価する」と規定された。ただし、耐震設計上の必要性から弾性設計用地震動Sdを $Sd = \alpha \times Ss (\alpha \geq 0.5)$ として算出し、S1と同等のものとして設計に用いることとした。また、基準地震動は、これまで水平方向のみ決め、鉛直方向は静的地震力として水平方向の1/2と仮定していたものを用いてきたが、新指針では、水平方向だけでなく鉛直方向についても、検討対象とする地震とその伝播経路・サイトの性質を考慮して評価することが規定されている。

基準地震動のSsを決めるために、敷地周辺における地震活動・震源の性質、および伝播経路・サイト特性を十分調査し、施設に最も大きな影響を与える可能性のある地震として検討用地震(複数)が選定される。それらの地震に対して「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」が評価される。さらに、調査を行っても特定できない地震の存在も知られており、これらの地震に対して「震源を特定せず策定する地震動」が評価される。

2. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」は以下のような手順で策定される。はじめに、敷地に影響を及ぼす地震について、「内陸地殻内地震」、「プレート間地震」、「海洋プレート内地震」という地震発生様式等に着眼した

New Regulatory Guide for reviewing Seismic Design of Nuclear Power Reactor Facilities and reevaluation of Seismic Safety of existing Nuclear Power Plants: Kojiro IRIKURA.

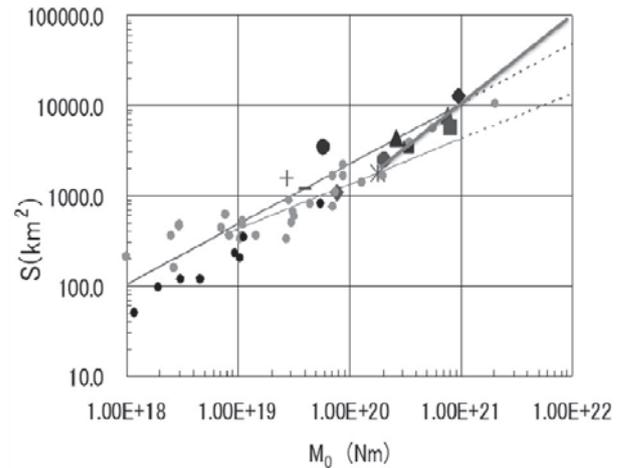
(2011年 1月6日 受理)

分類により、それぞれについて地質・地形学および地球物理学的調査を行い、敷地に影響の大きい地震がどれかを検討する。「内陸地殻内地震」のため評価すべき活断層は後期更新世以降に活動が否定できないものとする。「プレート間地震」や「海洋プレート内地震」は、過去の地震の発生状況を精査し、敷地周辺の中・小・微小地震の活動、応力場、地震発生様式等に関する既往の研究成果を総合的に検討して選定される。このような調査に基づき、検討用地震を設定し、それぞれの検討用地震ごとに、「応答スペクトルに基づいた地震動評価」および「断層モデルに基づいた地震動評価」の双方を実施する³⁾。

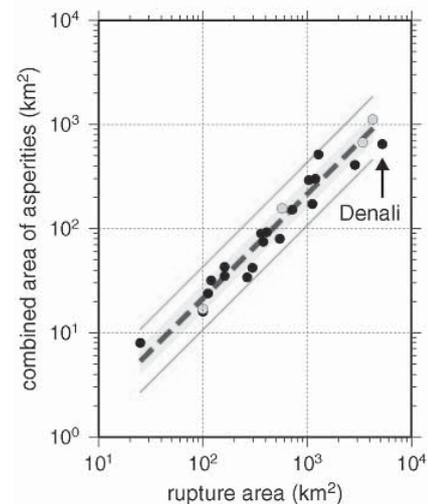
応答スペクトルに基づく地震動評価に関しては、旧指針では、活断層の長さから想定される地震規模と経験的な距離減衰式から応答スペクトルの形状、いわゆる大崎スペクトルを決めて、経験的な包絡関数を考慮して時刻歴波形を決めるという方法で基準地震動の策定がなされてきた。改訂指針でも、これまでの基準地震動策定の経験を生かして、同様の手法で基準地震動を策定する。設計用の応答スペクトルの形状はこれまで日本国内で蓄積された強震動データを用いて新たに求め直したものをを用いる。最近の各地で得られた強震動データから、応答スペクトルの経験的關係式は内陸地殻内地震やプレート間地震など地震発生様式の違い、震源域や伝播経路などの地域特性により異なることがわかってきた。敷地ごとに応答スペクトルの適用に当たって、上記の地震発生様式、地域性などを考慮することが必要とされる。

断層モデルを用いた手法による地震動評価に関して、最近、地震調査委員会は標準的な評価法として「強震動予測レシピ」を推奨している。この方法は、断層面積や地震規模のような震源の全体像を表す「巨視的断層パラメータ」と、震源断層中の不均質性を表すアスペリティの面積やそこでの応力降下量などの「微視的断層パラメータ」の両方を考慮して、強震動を算出する。これらの「巨視的断層パラメータ」と「微視的断層パラメータ」は地震モーメントを関数として経験的に得られた2つの異なるスケール則により推定される(第1, 2図)。

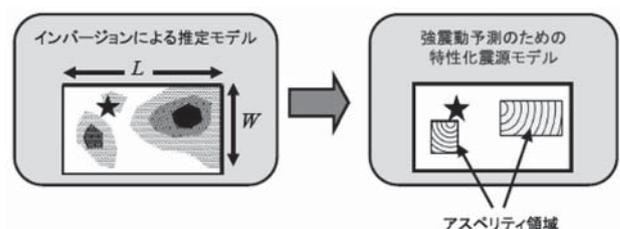
内陸地殻内地震でもプレート境界や海洋プレート内に起こる海溝型地震でも、種々の調査データから震源域の大きさやアスペリティの情報が得られると、レシピに基づいて震源断層がモデル化され、強震動の時刻歴波形が評価される(第3図)。また、波形が得られれば、応答スペクトル、最大加速度、最大速度などの情報も同時に求めることもできる。とくに、敷地が震源断層に近い場合には断層モデルを用いた方法を重視することが決められている。これは、震源近傍域では震源断層とサイトの幾何学的位置関係により強震動の波形が大きく影響を受けるからである。強震動の破壊力を評価する上で、断層破壊の前方方向に生じる指向性パルスなど波形の位相特性が非常に重要になる。



第1図 巨視的断層パラメータのスケール則—地震モーメントと断層面積の関係(室谷, 他, 2010)
赤マークと●■▲は最近起こった横ずれおよび逆断層巨大地震で、地震記録のインバージョン解析から決められたもので、信頼性が高い。●と●は Stirling *et al.* (2006) のカタログからの横ずれ/正断層地震と逆断層地震で、信頼性は相対的に低い。



第2図 微視的断層パラメータのスケール則—断層面積とアスペリティの全面積の関係(Irikura and Miyake, 2010)
●は横ずれおよび逆断層(高角)地震。○は低角逆断層地震。



第3図 地震動評価のための特性化震源モデル
(原子力安全委員会地震動解析技術等作業会合(平成20年7月24日)資料第7号)

原子力施設の耐震安全性を確保するために、敷地周辺について地形学・地質学・地球物理学的方法で活断層や

海溝型地震の震源域の詳細な調査を実施し、震源断層の3次元的形状をモデル化し、波形シミュレーション法を用いて基準地震動を策定する方法は世界に先駆けた最新の考え方である。これが今回の改訂の重要点の1つで、国際的にも日本がはじめて導入したものである。

3. 震源を特定せず策定する地震動

改訂指針では、旧指針のようにM6.5の「直下地震」というような一定規模の「地震」を規定するのではなく、活断層との関係が特定できなかった過去の地震の地震動の応答スペクトルを参考に、「震源を特定せず策定する地震動」を基準地震動の1つとして別途に算定することとした。具体的には、震源と活断層を関連付けることが困難な内陸地殻内地震について、震源近傍で得られた観測記録を収集し、これらを基に敷地の地盤物性を加味した応答スペクトルを設定し、これに地震動の継続時間、振幅包絡線の経時変化等の地震動特性を適切に考慮して地震動評価を行うこととした。ただし、この考え方を具現化して策定された基準地震動の妥当性については、申請時点における最新の知見に照らして個別に確認する必要があることも規定されている。例えば、地震本部による「震源断層をあらかじめ特定しにくい地震」の最大規模等を参考に、対象地域毎に適切な規模・地震発生様式をもつ地震を設定し、それらの震源断層を想定し、震源近傍の面的な地震動評価を行い、その地震動レベルから妥当性を確認すること等が参考例として挙げられる。

Ⅲ. 2007年新潟県中越沖地震の強震動

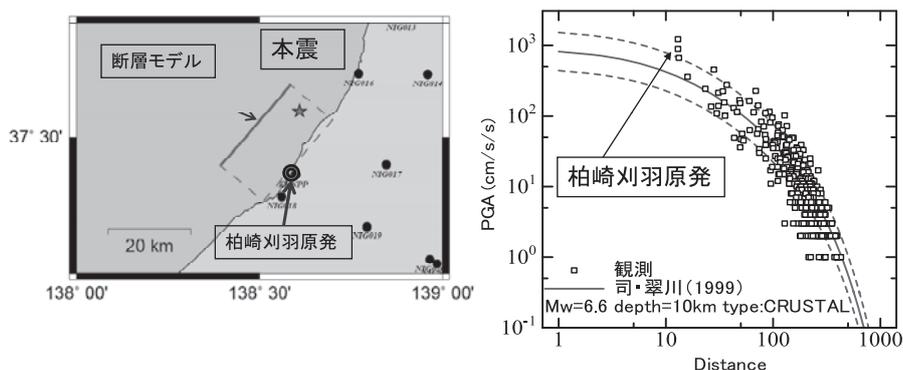
この地震の強震動は防災科学技術研究所のK-NETおよびKik-net強震観測網に加えて、柏崎刈羽原子力発電所の地表および地中観測網など震源近傍域を含む多くの観測点で記録された。強震動の最大値と距離の関係から、この地震の強震動は全般的には既存の距離減衰式にほぼ一致しているが、最も震源断層に近いと考えられる柏崎刈羽原発サイトでの強震動記録は、地表、地中岩盤とも既存の距離減衰式よりも顕著に大きいことがわかっ

た(第4図)。同発電所にある7機の原子炉の基礎版上で、設計時の地震動レベルを上回る観測記録が得られた。そのうち、地震動が最も大きかった1号機では、設計レベル273ガルの約2.5倍にあたる最大加速度680ガル(EW成分)、比較的小さかった5号機でも設計レベル254ガルの約1.7倍の最大加速度442ガルが記録された。柏崎刈羽原発の強震動が大きい理由として以下があげられる。

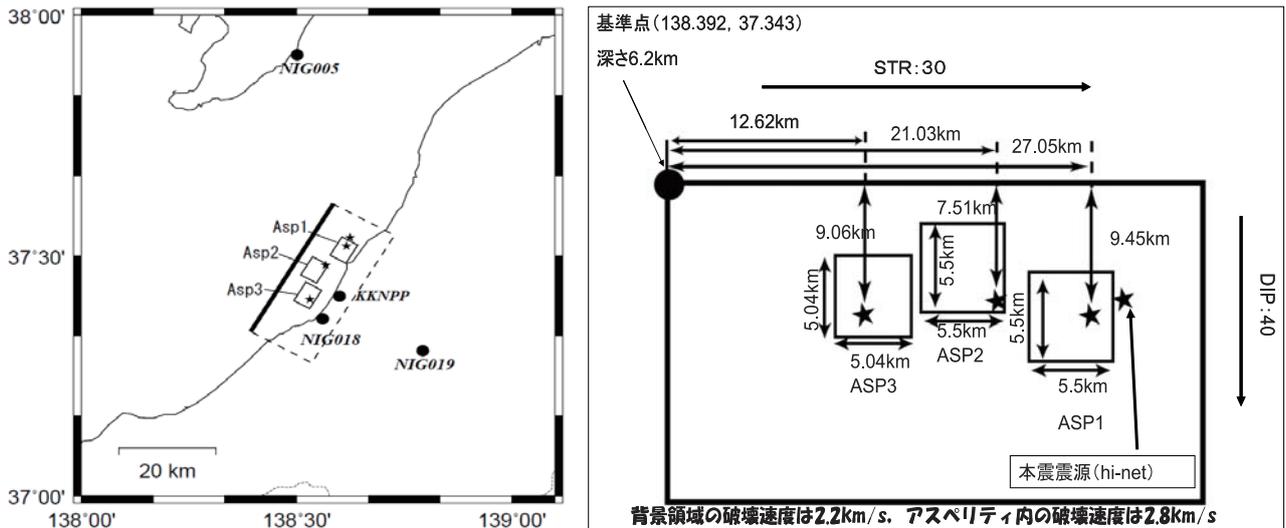
(1) 震源特性については、強震動生成に寄与するアスペリティの応力降下はやや大きい程度(1.5倍程度)。これは観測された強震動と既存の距離減衰式の関係にほぼ対応している。(2) 伝播経路については、震源域からサイトに至る地下構造(地殻浅部構造)が褶曲構造になっていて、サイト付近で背斜構造となっていることおよび厚い堆積層(西山層、 $V_s=0.7$ km/s)のため、震源から出た波がサイト付近でフォーカシング効果により振幅が増大した可能性が高い。標準的な地下構造の地域に比べて、地震動は5号機側(北側)で約1.5倍、1号機側(南側)で約3倍大きい。このことは本震のみならず、余震の観測データおよびシミュレーションでも確かめられている^{4,5)}。

この地震について、余震分布に基づき震源断層面(南東傾斜の逆断層)を設定し、震源近傍域の強震動記録を用いて断層破壊過程の推定が多くの研究者により行われている。それによると、この地震の震源モデルは強い揺れを生成するアスペリティが3つあったことがわかってきた。経験的グリーン関数法を用いると、3つのアスペリティからなる断層モデルで広帯域の強震動の再現が可能である(第5,6図)。

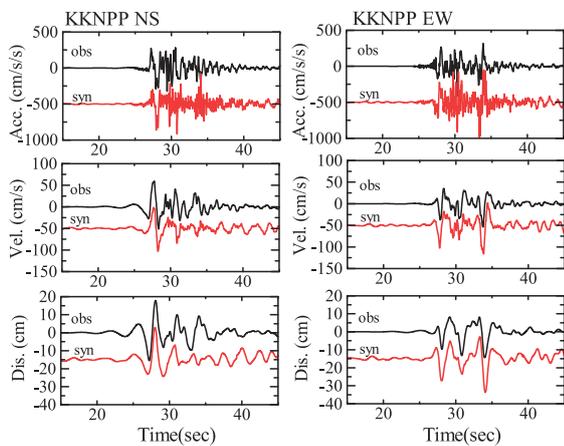
原子力発電所のような重要構造物の耐震安全性を確保するためには、活断層調査に基づいて敷地に影響のある地震を想定し、適切な断層パラメータを設定し、精度の高い強震動予測を行い、それに耐え得る構造物の設計を行う必要がある。中越沖地震を引き起こした震源断層は余震分布の延長上にあるF-B断層に対応することがほぼ明らかになった(第7図)。このF-B断層は、建設時



第4図 左：2007年中越沖地震の破壊開始点(星印)、震源断層(長方形で囲われた部分、実線：地表、破線：地中)、および柏崎刈羽原発の位置関係。右：強震動(PGA：最大加速度)の距離減衰。



第5図 2007年新潟県中越沖地震の特性化震源モデル

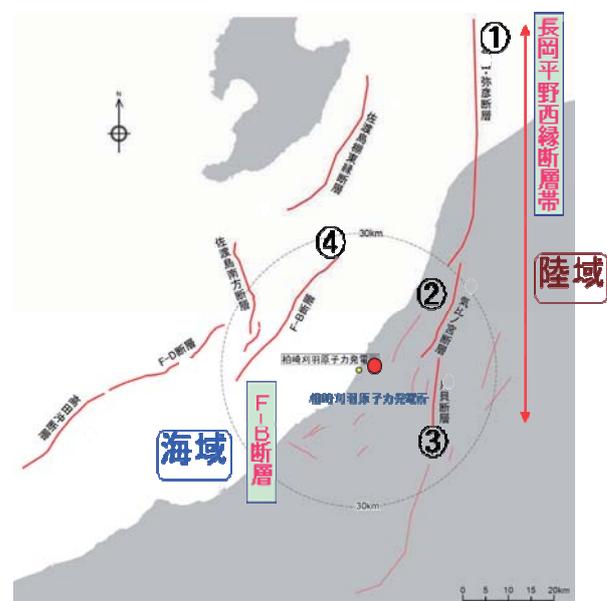


第6図 柏崎刈羽原子力発電所の1号機基礎版上での観測記録(黒)と経験的グリーン関数を用いて合成された地震動(赤)との比較
震源モデルは第5図に示される。

点で海域に断層として存在することは東京電力により確認されていたが、5万年以降の活動がないということで評価対象となる活断層ではないと判断されていた。その後、褶曲の形態に関する新知見が得られ、活断層として認定すべきとの見解が出され、その考えに基づいて東京電力は基準地震動の再評価を行ったが、この活断層に対する地震動は旧指針のS2を上回らないとの結論を出した。これは、地表で活断層情報が得られたとしても、震源断層に関するモデル化が適切に設定できなければ、地震動が評価できないことを如実に示している。

Ⅳ. 新指針に基づく既存原子炉施設のバックチェック

耐震設計審査指針の改訂(2006年9月)を受けて、原子力安全委員会は、行政庁に原子力事業者に対して既設も含めて原子力施設の耐震安全性の評価の実施と、その結果の速やかな報告を指示した。原子力安全・保安院は、



	断層名	断層長さ	考慮すべき断層長さ
陸域	①角田・弥彦断層	54km	3つの断層の連動を想定した、長岡平野西縁断層帯 91km
	②気比ノ宮断層	22km	
	③片貝断層	16km	
海域	④F-B断層	36km	36km

第7図 柏崎刈羽原子力発電所周辺陸域および海域における活断層調査結果
敷地への影響の大きい検討用地震として、陸域で長岡平野西縁地震、海域でF-B断層地震がそれぞれ選定された。

原子力施設について新耐震指針に照らした耐震安全性の評価(バックチェック)を原子力事業者に要請した。それを受けて原子力事業者は、耐震安全性の評価の実施計画書を行政庁に提出し、既設原発の耐震安全性の評価のために地形・地質調査を実施するとともに、基準地震動の

評価を準備している最中に、新潟県中越沖地震は起こった。

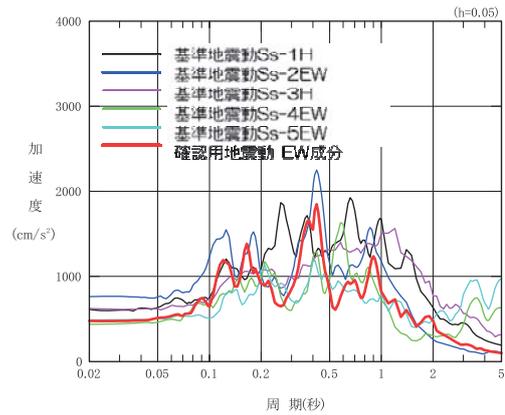
柏崎刈羽原子力発電所では、中越沖地震による影響評価とともに、新指針に基づき、基準地震動の評価がなされ、それに対する7機の原子炉の耐震安全性の評価が順番に行われている。最初に7号機、次いで6号機、1号機、5号機について、原子力安全・保安院および原子力安全委員会による耐震安全性の確認が終了し(2010年12月現在)、順次、運転が再開されている。

耐震安全性評価のための基準地震動の設定は以下の手順でなされる。耐震設計上考慮すべき断層については、旧指針では5万年前以降に活動したものとされていたが、新指針では後期更新世以降の活動が否定できないものを対象とする。活断層の調査は、新たに作成された「活断層等に関する安全審査の手引き(2008年6月)」に基づいて、事業者により変動地形学、地質学、および地球物理学的な詳細調査が行われるとともに、原子力安全・保安院による海上音波探査や専門家を交えた現地調査などの補足調査が実施された。これらの調査結果に基づき、原子力安全・保安院は、柏崎刈羽原子力発電所に影響の大きい活断層は、海域ではF-B断層(長さ約36 km)、陸域では長岡平野西縁断層帯(長さ約91 km)と評価した(第7図)。

それらの活断層が震源となって発生する地震を検討用地震として、発電所敷地における基準地震動が、経験式を用いた応答スペクトル手法、および断層モデルを用いた波形合成の手法で評価される。断層モデルによる評価では、新潟県中越沖地震の観測データの分析に基づき、

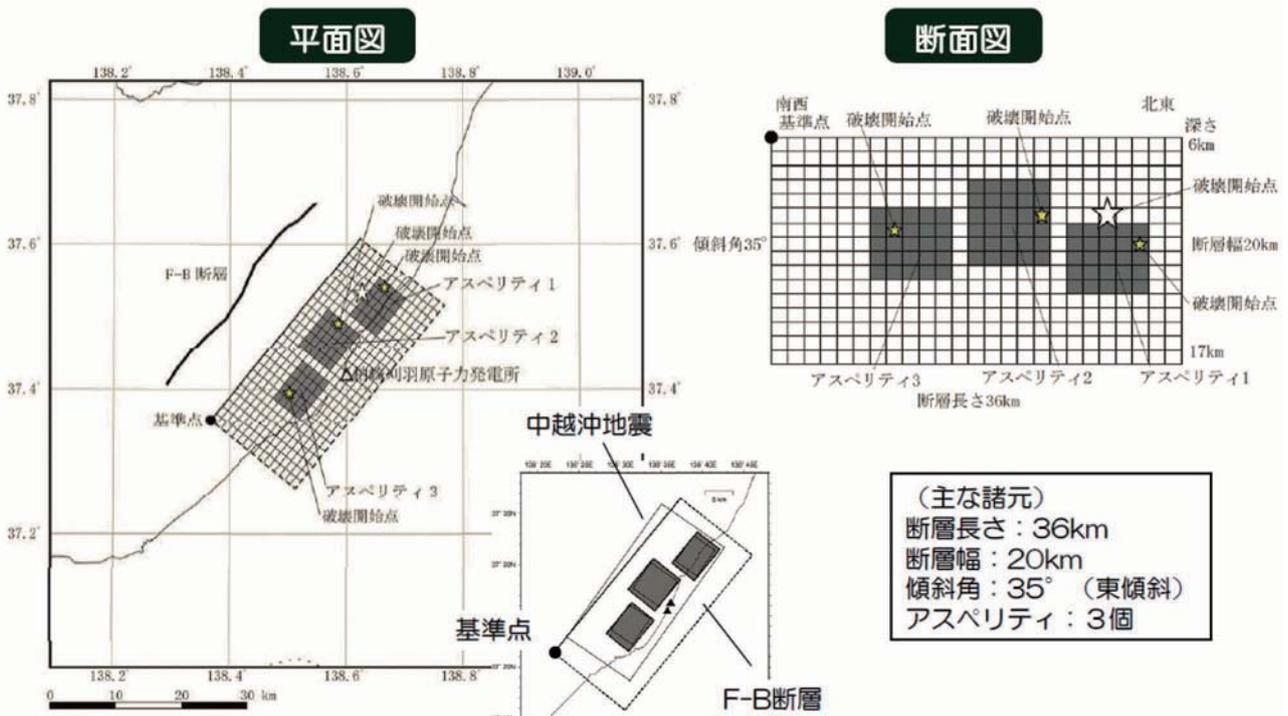
その特徴を踏まえた震源のモデル化と地震波の伝播経路特性を考慮した地震動の計算がなされた。

東京電力による基準地震動の評価結果について、原子力安全・保安院の審議で、活断層の諸元の妥当性および中越沖地震の分析結果の反映などの評価の見直しが行われた。見直しの結果、最終的に設定されたF-B断層地震の震源モデル(基本モデル)は3つのアスペリティからなる特性化震源モデルである(第8図)。長岡西縁断層地震については3つのセグメントからなり、その中で51 kmの長さの角田・弥彦セグメントに2つのアスペリティ、気



第9図 種々の検討用地震に対して評価された基準地震動の加速度応答スペクトルの例

Ss-1とSs-2はFB断層地震に対する応答スペクトル法と断層モデル法による評価、Ss-3とSs-4は長岡平野西縁断層地震に対する応答スペクトル法と断層モデル法による評価。評価地点は荒浜側(1~4号機)の解放基盤表面。



第8図 F-B断層地震に対する震源モデル(基本モデル)。

比ノ宮および片貝セグメントにそれぞれ1つ、計4つのアスペリティからなる震源モデルを設定して地震動が計算された。これらの地震に対して計算された基準地震動の加速度応答スペクトル例が第9図に示される。基準地震動は、基本モデルに対する評価だけでなく、断層パラメータのばらつきを考慮して策定される。最終的には求められた基準地震動は1～4号機側で2,300ガル、5～7号機側1,209ガルとして策定された(第10図)。なお、柏崎刈羽原子力発電所の設置時の基準地震動(S2)は450ガルだったので、今回の評価はその2.7～5.1倍となった。

これらの基準地震動から逆算される原子炉基礎版での入力地震動は、1号機で829ガル(観測は680ガル)、5号機で652ガル(観測は442ガル)など、いずれの号機においても、中越沖地震で観測された強震動の1.2～2.0倍の強さに相当している。

原子力安全委員会は、柏崎刈羽原子力発電所の基準地震動の評価等に関する原子力安全・保安院の見解に関して、原子力安全性評価特別委員会で独自の検討を行い、いくつかの留意点を指摘した。F-B断層に対する震源断層のモデル化に関して地震調査委員会における検討を参考に、地震モーメント(1.7倍)およびアスペリティ個数(4個)を想定した確認用地震動の評価を行い、基準地震動のレベルが適切であることを確認している¹⁾。

V. ま と め

2006年9月の新耐震安全審査指針の改訂を受けて、関連する原子力施設では、敷地に影響する海溝型地震や活断層の調査、それに基づく震源断層モデルの構築および断層パラメータの不確かさの検討により、基準地震動が評価され、その基準地震動に対する施設の耐震安全性に関するバックチェックが行われている。2009年新潟県中越沖地震の強震動の直撃を受けた柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性の評価は、これからの原子力発電所の耐震性を検討する上でキーとなるものである。今回の地震から得られる強震動の評価や施設の健全性の確認に関わる知見を整理し、他の原子力発電所に反映すべき事項を明確にする必要がある。

基準地震動の評価に関して、今後解決すべき多くの課題が残されている。特に緊急の課題としては、地表に短い活断層のみが分布する場合に地下の断層形状の推定、複数の断層の連動性、さらに、震源を特定しにくい地震や震源を特定せず策定する地震動の評価についてより詳細な検討が必要とされている。また、別の観点として、現在

基準地震動	(単位:Gal)	
	荒浜側 (1～4号機)	大湊側 (5～7号機)
Ss-1 (F-B断層・応答スペクトル)	水平:2300 鉛直:1050	水平:1050 鉛直:650
Ss-2 (F-B断層・断層モデル)	NS:847 EW:1703 UD:510	NS:848 EW:1209 UD:466
Ss-3 (長岡平野西縁断層帯・応答スペクトル)	水平:600 鉛直:400	
Ss-4 (長岡平野西縁断層帯・断層モデル)	NS:589 EW:574 UD:314	NS:428 EW:826 UD:332
Ss-5 (長岡平野西縁断層帯・断層モデル)	NS:553 EW:554 UD:266	NS:426 EW:664 UD:346
S2 (旧耐震指針の基準地震動)	水平:450 鉛直:300	

第10図 採用された基準地震動の最大加速度の一覧

Ss-1～Ss-5の応答スペクトルは第9図に示される。

の決定論的手法で評価される基準地震動は震源パラメータの不確かさを考慮して保守的に見積もられているが、施設がそれより大きな地震動を受ける可能性は否定できない。現在の決定論的评价法と確率論的评价法を融合することにより、残余のリスクを定量的に評価する方法論の確立が必要とされている。これらの課題は、地震学的検討だけでなく、地形学・地質学、建築工学、機械工学、原子力工学の研究者と共同で検討が必要とされている。

一 参 考 文 献 一

- 1) 原子力安全委員会, 第1章新潟県中越沖地震による影響, 平成19・20年版原子力安全白書, (2010).
- 2) 原子力安全委員会, 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針, <http://www.nsc.go.jp/shinsashishin/pdf/1/si004.pdf>, 2006.
- 3) 入倉孝次郎, “原子力発電所の耐震設計のための基準地震動”, 日本地震工学会会誌, 第5号, p.23-28(2007).
- 4) 入倉孝次郎, 他, 2007年新潟県中越沖地震の強震動—なぜ柏崎刈羽原子力発電所は想定以上の破壊的強震動に襲われたのか?, http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/cyuetsu_080319.pdf
- 5) 原子力安全基盤機構, 2007年新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所で発生した地震動の分析, <http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g80522a21j.pdf>

著 者 紹 介

入倉孝次郎(いりくら・こうじろう)



京都大学 名誉教授
(専門分野)地震学, 地震ハザード研究, 経験的グリーン関数法・ハイブリッド法による強震動評価, 強震動予測のためのレシピの研究

原子力発電施設の耐震設計

原子力施設は基準地震動 S_s による地震力に対して、保守的に安全余裕をもって設計されている。しかしながら実際に出来上がったものがどの程度の裕度を有しているかはこれまで、定量的に示されてこなかった。その答えが、新潟県中越沖地震のときに柏崎刈羽発電所施設の応答の地震記録を解析することである程度明らかになり、安全余裕がどの部材でどの程度あるかの研究が進んでいる。

首都大学東京 名誉教授 西川 孝夫

I. はじめに

日本に原子力発電施設が出現して以来、21世紀になるまでは大きな地震が施設の近くで発生することはなかったが、第1表に示すように、2005年8月に宮城県沖地震が女川原発の、2005年3月に能登半島沖地震が志賀原発の近くで発生し、その地震記録の応答スペクトルが設計用の応答スペクトルを一部の周期帯で上回ったため、施設等の再検証がなされた。また、2007年7月には柏崎刈羽原発が直下に近い中越沖地震に見舞われ、設計用地震動を大きく越える応答が観測され、その耐震安全性が問題になった。さらには2009年8月には駿河湾の地震で浜岡原発が自動停止する事態が発生している。このようにわずか5年の間に、原子力発電所を襲う地震が頻発した。これらの地震で柏崎刈羽原子力発電所の3～5号機、浜岡原子力発電所の5号機は安全性の確認が完全に終了していないとして、停止したままである。たまたま、2006年9月にそれまでの耐震設計審査指針の見直しがなされ、新指針に基づいた既存原発の耐震バックチェックが行われようとした時と重なっていたため、バックチェックに当たって、特に断層調査とそれに基づく設計

第1表 設計用地震動レベルを超えた最近の地震

・駿河湾沖の地震	2009年8月11日	マグニチュード 6.5
	浜岡原発	
・新潟県中越沖地震	2007年7月16日	マグニチュード 6.8
	柏崎刈羽原発(ほぼ直下か)?	
・能登半島地震	2007年3月25日	マグニチュード 6.9
	志賀原発	
・宮城県沖地震	2005年8月16日	マグニチュード 7.2
	女川原発	

Earthquake Resistant Design of Nuclear Power Plant:
Takao NISHIKAWA.

(2010年 9月28日 受理)

用地震動の評価が大きな話題となった。

本稿では原子力発電施設の耐震設計の実情と、将来の設計のあり方について述べたい。

II. 原子力発電施設の耐震設計

地震に対する安全性を確保するために、極めてまれながら施設の供用期間中に発生すると想定される地震動に対しても、安全上重要な機能(止める, 冷やす, 閉じ込める)が損なわれないように設計することが求められている。しかし、その機能の重要度に応じて設計用の地震力には差をつけてある。具体的にはSクラス施設, Bクラス施設, Cクラス施設の3種類である。Sクラス施設は安全上重要な機能に関係するもので、例えば、原子炉格納容器, 原子炉圧力容器, 非常用発電機などで、Bクラス施設は廃棄物処理施設, Cクラス施設は発電機, タービン設備などである。

Sクラスの各施設は「弾性設計用地震動 S_d 」による地震力または「静的地震力(建築基準法で定められた一般建築物に対する設計用基準値 C_i)の3倍(3.0 C_i)に基づく地震力」と鉛直方向の動的地震力および静的地震力(C_v)も考慮し、水平、鉛直の地震力を組み合わせる作用させたものに対して許容応力度設計されたうえで、「基準地震動 S_s 」による動的地震力に対して安全機能が保持できることを検証することとなっている。ただし、実際にはほぼ弾性限度に収まるよう設計されるのが通常である。

Bクラスの施設は「静的地震力(1.5 C_i)」に対して設計がなされ、また共振の恐れのある施設についてはその影響についても検討が行われることになっている。Cクラスの各施設は「静的地震力(1.0 C_i)」に対して設計が行われる。なお、機器・配管の「静的地震力」については、建物・構造物の設計用地震力の1.2倍の値を用いることとなっている。簡単にいえば、Sクラスの施設は、一般の建築物の3倍以上の、Bクラスの施設は1.5倍以上の耐震性能を保有するように設計されているといえる。それら設計用地震力の考え方をまとめて第2表に示す。

第2表 設計用地震力と許容限界

■荷重(地震力)の組合せと許容限界

重要度分類		Sクラス		Bクラス	Cクラス	
建物・構築物	地震力	水平	Ss	Max (Sd,3.0Ci)	1.5Ci	1.0Ci
		鉛直		Max (Sd,Cv)	—	—
	荷重の組合せ		常時荷重+運転時荷重+Ss	常時荷重+運転時荷重+地震力(水平・鉛直)	常時荷重+運転時荷重+静的地震力	
	許容限界		終局耐力に対して妥当な安全余裕を有すること	建築基準法等に基づく短期許容応力度	建築基準法等に基づく短期許容応力度	
機器・配管	地震力	水平	Ss	Max (Sd,3.6Ci)	1.8Ci	1.2Ci
		鉛直		Max (Sd,1.2Cv)	—	—
	荷重の組合せ		(通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時又は事故時の荷重)+Ss	(通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時又は事故時の荷重)+地震力(水平・鉛直)	(通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時)+静的地震力	
	許容限界		変形等が機能に影響しない動的機器等は機能維持を確認した加速度等を許容限界とする	降伏応力又は同等な許容限界	降伏応力又は同等な許容限界	

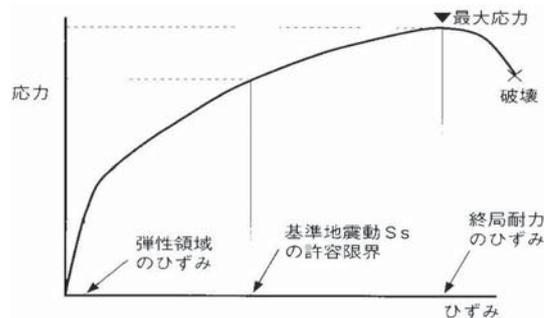
記号の説明 Ss: 基準地震動Ssに基づく地震力
 Sd: 弾性設計用地震動Sdに基づく地震力
 3.0Ci, 1.5Ci, 1.0Ci, 3.6Ci, 1.8Ci, 1.2Ci: 建築基準法で定められた基準値 (Ci) に係数を乗じて定めた静的地震力 (水平方向)
 Cv, 1.2Cv: 鉛直震度 (Cv) に係数を乗じて定めた静的地震力 (鉛直方向)

Ⅲ. 設計上の許容限界(性能)

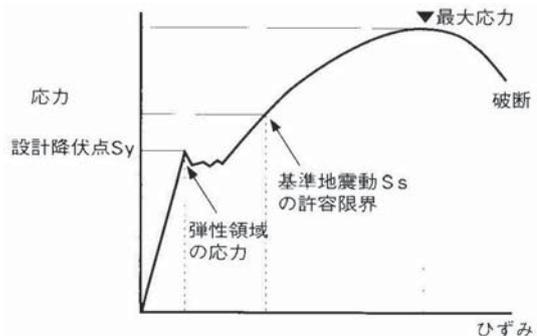
工学の分野での設計では、外力の不確かさ、用いる材料などの不確かさ並びに設計に用いるモデルの不確かさ等から、設計解析上生じる応力、変形に対してある程度の安全率を見込んだ許容限界を設け、最終的な安全性を図ることが一般的である。第1, 2図に建物・構築物の許容限界、機器・配管系の許容限界に関する概念図を示す。

基準地震動 Ss による地震力と他の荷重を組み合わせた荷重に対して建物・構築物では、構造全体が荷重に応じて変形できる能力に十分な余裕があり、終局耐力に対して妥当な安全余裕があることを確認し、また機器・配管系では荷重によって発生する応力について、構造物の相当部分が降伏して塑性変形が生じて、過大な変形、亀裂、破損等が生じ、施設の機能に影響が及ぼさないことを確認することとしている。

しかし、現実にはそれら荷重に対してほぼ弾性領域の応力以内に納める設計がなされている。原子力の世界では「保守的」といっているようであるが、逆に出来上がったものが安全限界状態に対して実際はどの程度の余裕を有しているのかは必ずしも明確でない。今回の中越沖地震の際にも、一部の号機で設計用の地震動に対する応答値を大きく超える記録が観測されたにもかかわらず、無被害で、それに対してもともと原子力施設は十分な耐震



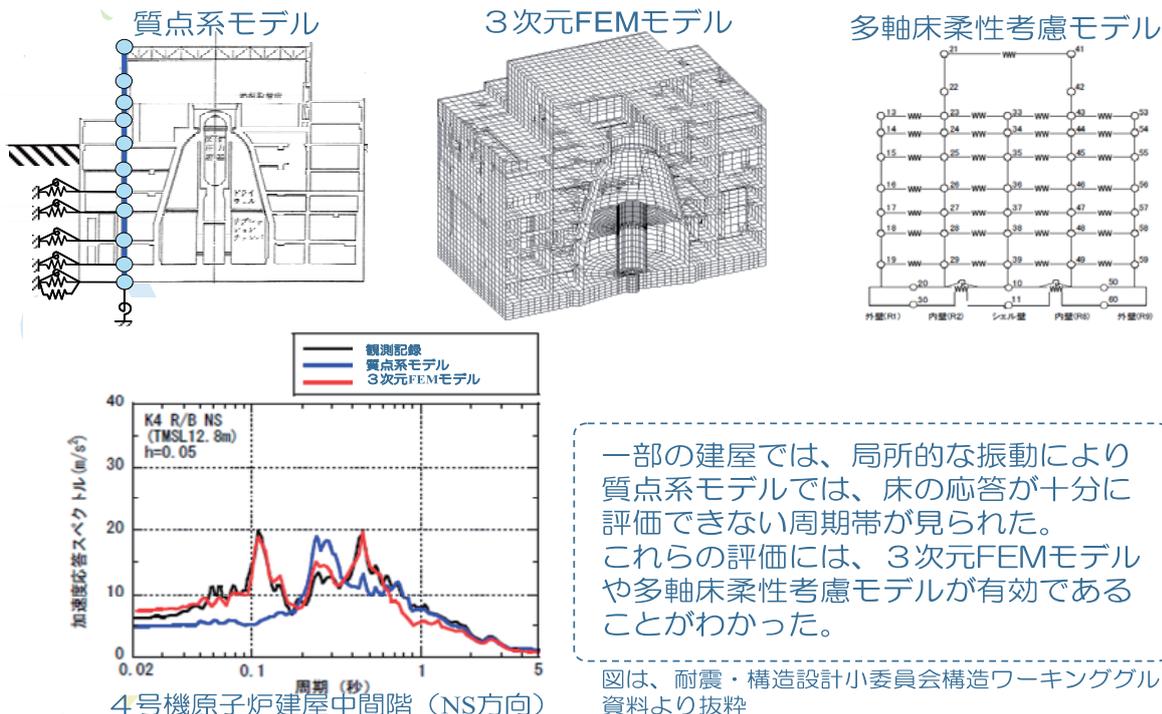
建物・構築物の許容限界の例
 第1図 建物・構築物の応力とひずみの関係例



機器・配管系の許容限界の例
 第2図 機器・配管系の応力とひずみの関係例

余裕度を持っているので、安全性には問題はないとする一般にはわかりにくい説明がなされたりすることがあったのも、そのためである。原因は、機器等の安全限界が

簡便モデルからより詳細な解析モデルへ



第3図 解析モデルとその精度

不明瞭な上に、設計解析モデルも余裕度を確保することに重点を置いて(?), 工学的簡略モデルに頼っており地震時の実現象を必ずしも正確に把握してこなかったきらいがあるためである。

しかし、新潟県中越沖地震での柏崎刈羽原子力発電所に対するその後の種々の解析的検討の結果、第3図に示すように、従来の単軸質点系モデル(左側のモデル図)より、床の剛性をも考慮した多軸質点系モデル(右側のモデル図)のほうが、さらには3次元有限要素法モデルのほうがより実情の挙動をよく模擬できることが明らかになった。これら詳細モデルによる解析から、今回の地震に対する建屋部位、設備・機器ごとの安全余裕の程度がある程度明らかになり、余裕があまりなかった箇所、十分過ぎる余裕があった箇所などが判明し、その後の点検や補修・補強計画に活かされている。

Ⅳ. 性能設計に向けて

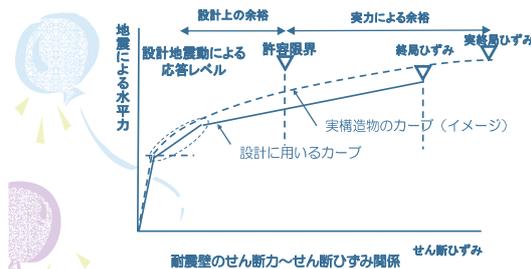
現在の原子力施設の耐震設計は出来上がったものの最終的な性能を示す体系にはなっていない。活断層に関する調査・研究が急速に進み、新しい知見が次々に公表され、それによる地震動が種々予測される現在、原子力発電施設の設計、あるいは既存施設の安全性の再確認のためには、出来上がった施設の性能をできるだけ詳細に把握する必要がある。そのためにはできるだけ実情に応じた解析モデルを用いた検討が必要であるし、保守的な設計がどの程度各部位の安全率を正當に評価しているのか

を検証する必要がある。

原子力発電施設の各部位の力学特性と安全機能限界が第4図に示すように定量的に示されるならば、想定地震動に対してどの程度の安全余裕が確保されているかを、相当程度まで定量的に示すことが可能となろう。一般建築物の耐震設計ではすでに建物の3次元解析が主流で、できるだけ地震時の挙動を詳細に推測することが行われているし、それに基づいた性能設計の概念が取り入れられ、建物の持つ性能を定量的に示すことが行われている。また、耐震性能を向上させるための技術の開発—応答制御技術—の開発が進んでいる。例えば、地震動を建物に入れにくくしようとする構造方式、免震構造などの

原子力発電所建屋の裕度明示化

設計地震動による応答レベルを超えた領域における挙動について検討・把握し、安全裕度を評価し、明示する方法について検討することが重要である。

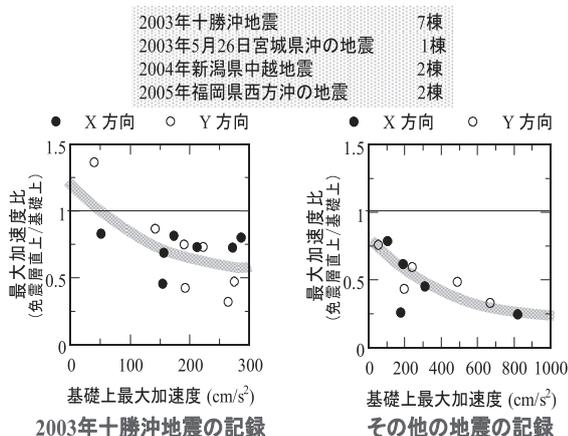


第4図 建屋の性能明示の例

第3表 免震構造における支承

弾性系	①天然ゴム系積層ゴムアイソレータ
アイソレータ	②高減衰ゴム系積層ゴムアイソレータ ③鉛プラグ挿入型積層ゴムアイソレータ ④U型ダンパー付天然ゴム系積層ゴムアイソレータ
すべり系支承	①弾性すべり支承 ②曲面すべり支承 ③平面すべり支承 ④摩擦皿ばね支承
転がり系支承	①平面転がり支承 ②曲面転がり支承 ③レール式転がり支承

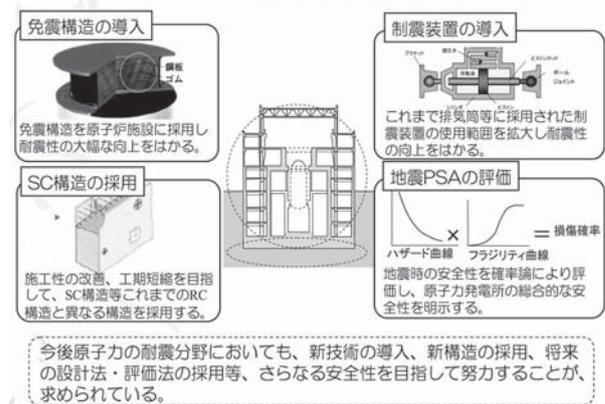
近年の地震における免震建物の応答値



第5図 免震効果

導入である。このシステムは建物の基部に第3表に示す積層ゴムなどの免震支承(免震部材ともいう)を入れ、建屋系としての周期を長くし、かつ地震入力エネルギーの大部分を免震層で吸収しようとするのである。基礎をしっかりと地面に固定した従来の建築方法と比べて建屋に入る地震動は、第5図に示すように大幅に減るので、建屋の安全性は相対的に増し、たとえ想定を超えた地震動が発生しても耐震安全性が損なわれる可能性は大幅に減少する。また、このシステムは地盤から切り離れたものになっているので、地盤との相互作用がないというメリットもある。原子力施設に免震構造を導入すれば、施設の耐震安全性向上につながるし、施設への入力を制御できることから、例えば、施設の標準設計が可能になるということにもつながる。日本ではまだ実用化されていないが、フランスではすでに40年くらい前に実用化されており、強地震帯での原子力発電施設には免震構造を取り入れる動きが活発化している。ITER(国際熱核融合実験炉)計画でのトカマク建屋には免震構造を採用する予定としており、さらに国際的に免震原子力発電所を売り

将来の技術動向



第6図 将来の技術動向

込む動きを見せている。わが国でも、次世代軽水炉の開発計画の大きな柱の一つが免震原子力発電所の開発であるといわれているが、強地震国である我が国こそが、その実用化を急ぎ、世界にその技術を普及させる必要がある。

V. 結び

2007年の中越沖地震は設計で想定していた地震動レベルを超える地震であったが、原子力発電施設緊急時に要求される「止める、冷やす、閉じ込める」という原子炉の安全性を守るための重要な安全機能は維持された。しかし、B、Cクラスの構造物・施設に生じたいくつかの被害や、地盤に生じた被害などから、国民に原子力発電施設の耐震性に対する不信感をもたらした。国民の原子力施設の耐震安全性に対する不安感を払拭するためには、耐震性能や安全余裕度等を明示できるきめ細かい設計法を開発・適用するとともに、第6図に示すような免震構造、SC構造などの新しい技術の積極的な導入が必要であろう。

参考および引用

第1表、第1、2図は、原子力安全・保安院、原子力安全基盤機構作成の「原子力発電所の耐震安全性」および「新しい耐震設計審査指針」からの引用である。本梗概は、日本保全学会第5回学術講演会予稿集(2008年7月)への発表論文に加筆、修正したものである。

著者紹介

西川孝夫(にしかわ・たかお)



首都大学東京 名誉教授
(専門分野)建築耐震工学

機械・電気設備への影響評価

柏崎刈羽原子力発電所の安全上重要な機械・電気設備に、中越沖地震による有意な損傷はなかった。本稿では日本原子力技術協会に設けられた SANE 委員会の検討結果として、検査と解析の組合せによる健全性評価の枠組み、設備点検と解析評価の事例、地震後の再起動に関する検討状況を紹介する。

東京大学名誉教授 野本 敏治

I. はじめに

新潟県中越沖地震後の柏崎刈羽原子力発電所では、設備への影響評価が完了した号機より運転が再開されつつある。点検・評価に携わった多くの関係者に敬意を表するとともに、災害から得られた貴重な教訓を広く共有することが、原子力発電を進めていくために必要である。

中越沖地震を契機に、原子力安全・保安院、原子力安全委員会、新潟県がそれぞれに審議会を設置し、設備健全性について入念な検討を実施していることは周知のとおりであるが、関係学協会もまた専門家による委員会を設置し、それぞれの立場から検討を進めてきた。日本原子力技術協会も「中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会(主査：野本敏治)」(SANE 委員会：Structural Integrity Assessment for Nuclear Power Components experienced Niigata Chuetsu-Oki Earthquake)を発足させ、構造強度・検査・耐震などを専門的分野とする学識経験者と、電力・メーカー関係者が一同に会することになった。

SANE 委員会では、まず重要設備に外見上の大きな損傷がないことを確認し、健全性評価をどのように具体化するか模索しながら、検査と解析の組合せによる評価フロー、想定される損傷モード、考慮すべき事象について議論を開始した。約3年にわたる検討のなかで地震後の設備健全性評価が進展し、教訓を今後に反映させるための活動を継続している。本稿では、SANE 委員会でも得られた知見をもとに設備への影響評価の一端を紹介する¹⁾。

II. 地震による設備の損傷状況

2007年7月16日に M6.8の中越沖地震が発生し、柏崎刈羽原子力発電所を直撃した。原子炉建屋基礎版上の観測加速度が設計時の動的地震力による最大加速度応答値を大きく超えたものとなった(第1図)。

安全上重要な耐震重要度 A, As クラスの設備に有意な

Report on the Structural Integrity Assessment of the Nuclear Power Components by the JANTI Committee : Toshiharu NOMOTO

(2010年 9月29日 受理)

損傷はなく、原子炉内も全号機の点検結果、機器に影響を与える損傷・変形・脱落などの異常はなかった。

従前より耐震設計段階では、様々な不確定要素に安全側の判断を加えており、設計基準には多くの保守性があることが知られていたが、静的地震力(建築基準法で定められた静的地震力の3倍を考慮)や様々な設計上の保守性に起因する裕度が重要設備を守ることが示された。

その一方で、耐震グレードの低い変圧器、排気ダクト、構内道路、事務所等が大きく損傷した。中越沖地震後の柏崎刈羽原子力発電所設備の損傷の状況を第1表に示す。



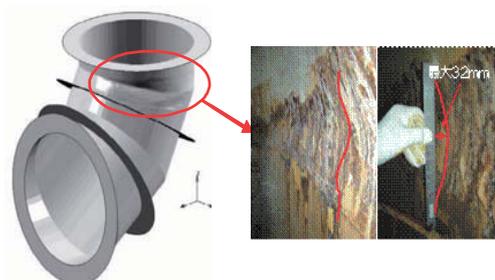
第1図 新潟県中越沖地震の概要



第2図 主変圧器の損傷
(基礎ボルトの破断)



第3図 ろ過水タンクの損傷
(象脚座屈)



第4図 循環水配管の変形状況

被害の多くが屋外設備に発生した。なかでも所内変圧器とタービン建屋をつなぐケーブル部の基礎が沈下したことにより、変圧器の中に入っていた絶縁油が漏れ、ショートによる発火で発生した火災が生々しく報道されたことは記憶に新しい。その他にも大きな重量物を基礎ボルトで固定しているような構造や、地盤沈下により相対変位が生じるような個所に大きなエネルギーが生じ破損に至った事例が散見された。(第2, 3図)。

ろ過水タンク基部の全周にわたる象脚座屈は、FEM解析による円筒形容器の座屈挙動シミュレーションにより、構造強度評価の知見拡充に活用されている。

また地震で変形が生じた屋外埋設配管の事例として、3号機循環水系配管の下部マイタ管がある(第4図)。FEM解析の結果、土中の外圧座屈に対する裕度は水門鉄管技術基準で要求されている裕度を大きく上回り、継続使用に支障がないことが確認されている。

Ⅲ. 発電設備の地震影響評価

1. 安全規制上の地震に対する要求事項

地震後の機器への健全性評価は、耐震安全上の重要な機器が地震荷重を受けた後もその機能を維持しており、「止める」「冷やす」「閉じ込める」という安全機能により設備の安全性が確保されることにある。

「発電用原子力設備に関する技術基準(省令62号)」第5条には耐震設計に係る要求事項が定められている。この技術基準は性能規定化されており、原子力安全・保安院が定める解釈により、耐震設計の具体的な方法は「原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601)」に基づいて実施することとされており、ここに規定された各運転状態における容器、配管、支持構造物等の要件を満足することにより、地震による破断、崩壊などの損傷を防止することが求められる。

また、技術基準(省令62号)における耐震設計以外の要求事項として、第9条で設備の材料および構造に関する要求があるほか、各設備に対して安全上要求される機能

に係る事項がその他の条項に定められており、その具体的な方法は関連する学協会規格によることとされている。これらの法令や学協会規格により、地震後の原子力発電所の機械・電気設備への影響評価は、機器レベル、系統レベル、プラント全体での評価と順を追って進められる。

ここで機器レベルの評価では、地震荷重により機器が実際に経験した応力状態に基づいて構造健全性を評価する。また、機能維持の評価は、地震時に作動することが要求される動的機器に対して回転機器の作動性などの機能を評価している。

さらに耐震性については、平成18年9月に改定された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」に対応することが求められている。東京電力では本指針に照らして策定した基準地震動Ssによる耐震安全性評価を行い、安全上重要な機能を有する設備について耐震強化後の地震応答解析結果を取りまとめた。さらに各号機の耐震安全性を向上させるために耐震強化工事(配管サポート追加・強化、排気筒の強化、原子炉建屋・天井クレーンの強化、燃料取替機の強化など)を実施している。

2. 検査と解析の組合せによる評価の枠組み

SANE委員会では、機器レベルの構造健全性評価について、設備点検と地震応答解析の組合せにより全体フローのなかで個別検討課題を抽出し、WGを設置して具体的な検討を重ねた。健全性評価に資するデータ補強が必要な場合には、追加試験の進め方を検討した。地震後の設備健全性評価、耐震安全性評価に関するフローと各WGの位置づけを第5図に示す。

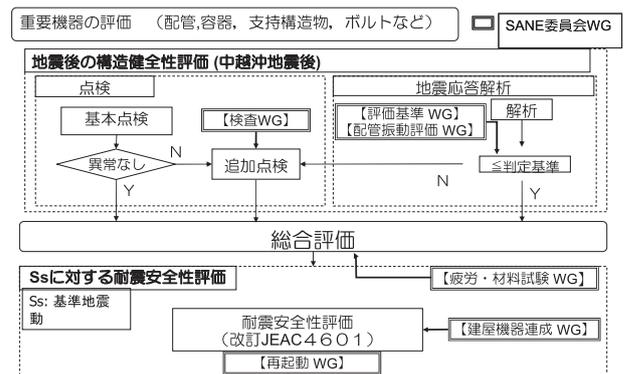
地震を受ける容器、配管、支持構造等の機器に想定される損傷モードとしては、破断、崩壊、過大な変形(座屈を含む)、疲労損傷の累積とき裂の発生等を評価した。

また、経年事象(SCC, 減肉など)についても考慮することとした。

地震後の健全性確認のための解析の評価は、設計段階における想定地震に対する評価と異なり、既知の構造・材料特性値を用いた、より精度の高い評価が可能であ

第1表 中越沖地震後の発電所設備の損傷状況

耐震クラス	設備の例	損傷
As	・原子炉圧力容器 ・原子炉格納容器 ・制御棒	なし
A	・非常用炉心冷却系 ・原子炉建屋	なし
B	・タービン設備 ・放射性廃棄物処理系	一部軽微な損傷を確認(原子炉建屋天井クレーン走行継手部)
C	・主発電機 ・変圧器 ・所内ボイラー	所内変圧器、主排気筒ダクト、消化系配管など



第5図 構造健全性評価、耐震安全性評価の位置づけ

る。さらに採取された地震観測記録と、地震時のプラント状態から、地震時に作用した荷重を推定し、機器の状態(損傷の有無、変形や破損状況など)を補完的に説明することが可能である。

SANE 委員会の当初の課題であった点検と解析の組合せによる健全性評価の枠組み、疲労寿命の評価、塑性ひずみ測定、締結部材の検査、原子炉压力容器基礎部の弾塑性手法適用などの成果は、東京電力による健全性評価報告や国の様々な審議プロセスの中で間接的に活用されている。以下にその具体的な事例を紹介する。

3. 設備点検・検査手法の検討事例

発電所の膨大な設備を点検・検査していくためには、第6図に示すとおり、各設備に共通的に実施する目視点検・作動試験等の基本点検と、基本点検や地震応答解析の結果に応じて実施する追加点検(分解点検・非破壊試験等)に分けて事前の点検計画が作られる。

点検実施に際しては、遵守すべき関係法令・基準と、点検・評価者に必要とされる力量を明確にし、地震による損傷部位を的確に予測して設備点検に反映する体制が重要となる。

SANE 委員会では、遵守すべき基準等を明記し、点検・評価者に必要とされる資格について検討した。また、NDI などとともに塑性ひずみの評価、基礎ボルトの健全性評価の評価方法について提案した。

これらの検査手法は原子力発電設備のみならず、産業設備全般の検査手法にも適用できるものであり、「地震発生後の検査手法ガイドライン(仮称)」として取りまとめることとしている。

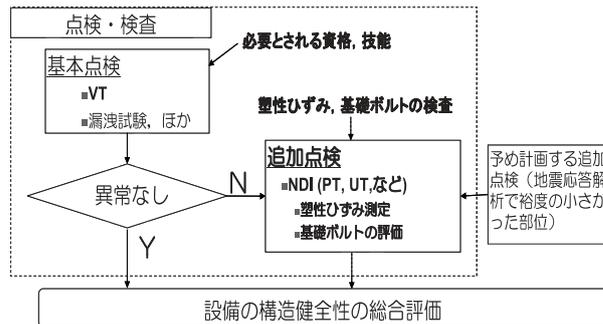
(1) 塑性ひずみの検出手法

中越沖地震直後の混乱のなか、仮に配管系が大きく揺られて塑性変形が生じたと想定した場合に、目視点検では容易に検出できない塑性ひずみを、据付状態のまま測定・評価することが可能か否かについて、検討する必要性が生じた。

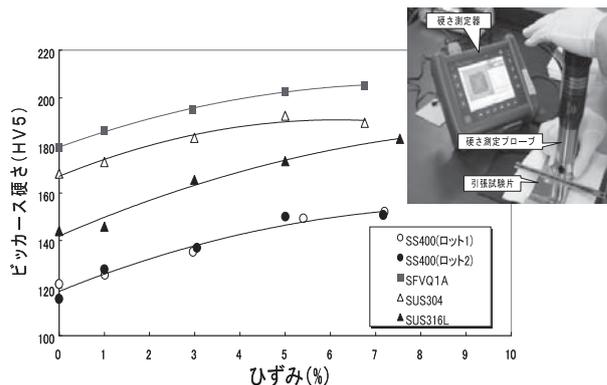
SANE 委員会では検査技術を幅広く調査し、候補としてビッカース硬さ測定、磁気特性検出などの評価手法適用の有効性を評価、現場での作業性も考慮に入れて硬さ測定法を選定した。

第7図には、原子力発電所の代表的な配管材料の塑性ひずみと表面硬さの関係を示す。一般に表面硬さは塑性ひずみの増加に伴い増加する傾向があるが、表面硬さと塑性ひずみに相関があることを実験室における基礎的な評価で確認した。さらに原子力発電所内での作業性を考慮した結果、表面硬さ測定を有効な塑性ひずみ検出手法として選定し、具体的な測定方法として定めることとした²⁾。

硬さ測定による塑性ひずみの評価は、これまでに柏崎刈羽発電所の1, 5, 6, 7号機の耐震設計グレードの高



第6図 点検・検査手法



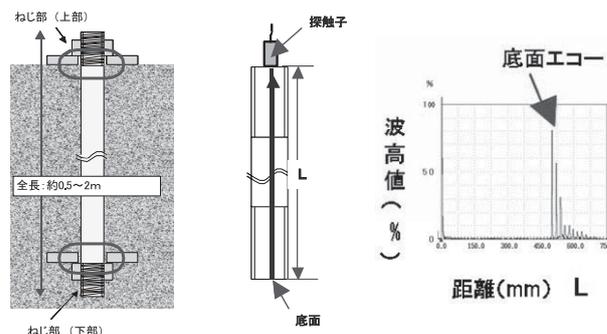
第7図 表面硬さと塑性ひずみの相関確認試験結果 (ポータブルビッカース硬さ計)

い配管の追加点検に適用された結果、いずれの配管も有意な硬さ上昇はなく、地震による有意な塑性ひずみは生じていないことが確認されている。

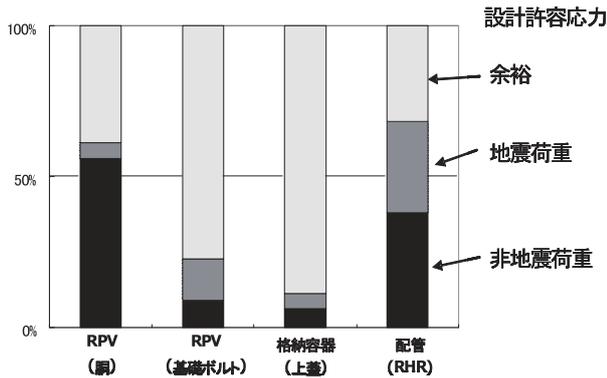
(2) 基礎ボルトの検査手法

地震による損傷モードとして想定すべきもののひとつに、機器を固定する基礎ボルトのねじ部谷底からのき裂の発生がある。基礎ボルトは先端部を除いてほとんどがコンクリート等に埋設されているため、SANE 委員会では超音波探傷方法(UT)による検査手法を検討し、ねじ部谷底を対象としたモックアップ試験を経て、基礎ボルトの具体的な検査方法を提案した。第8図に压力容器基礎ボルトの試験結果を示す²⁾。

これまでに柏崎刈羽発電所の1, 5, 6, 7号機の压力容器を含む代表機器の基礎ボルトに本検査方法が適用さ



第8図 UTによる基礎ボルト点検結果 (原子炉压力容器基礎ボルト)



第9図 各機器の発生応力に占める地震荷重の割合

れた結果、いずれの基礎ボルトも欠陥は検出されず、健全であることが確認されている。

4. 解析評価の検討事例

(1) 配管系の地震応答解析

発電所設備のなかで大きな物量を占める配管系は、第9図に示すように、容器などの単体機器に比較して地震荷重の影響が大きいことがわかる。一方で、この配管系は設計上の評価基準値を超えて、大きな裕度を有していることが、加振台を用いた耐震実証試験や実設備での地震経験から確認されている。

したがって耐震設計技術指針(JEAG 4601)による評価の保守性を踏まえ、状況に応じて弾塑性解析手法を適用することや、余裕の適正化を図った規格類の適用検討、合理的な耐震性評価手法を追求することが必要である。

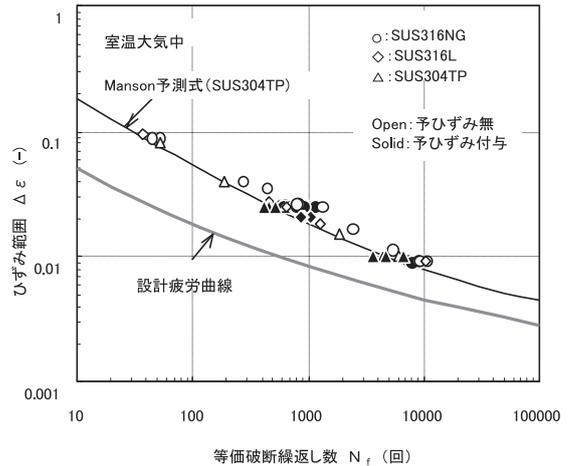
また耐震設計上の裕度に定量的な考察を加え、わかりやすく説明していくことも今後の検討課題である。

(2) 低サイクル疲労寿命評価

地震荷重を受けた耐震重要度 A, As クラスの配管系の健全性評価では、有意な変形や割れが発生しないことはもちろんのこと、地震の交番荷重による疲労損傷を、設計疲労曲線を用いた疲労累積係数により評価することが重要である。

一般に、鉄鋼材料が塑性変形するとひずみ硬化が生じ、塑性ひずみの負荷により低サイクル疲労寿命は減少し、高サイクル疲労寿命は増加することが予想される。そこで SANE 委員会では、あらかじめ塑性ひずみ(予ひずみ)を与えた材料の疲労試験を実施し、低サイクル疲労寿命に及ぼす塑性ひずみの影響について検討した。

予ひずみを付与した材料の低サイクル試験結果の一例を第10図に示す。ここで、横軸は等価破断繰返し数で、予ひずみを付与したときの繰返し数を予ひずみ付与後の疲労試験の繰返し数に加算した破断繰返し数である。この試験では最大16%(±8%)の予ひずみを与えたが、予ひずみの付与に関わらず、疲労寿命は既存データとほぼ同等であり、予ひずみ範囲16%(±8%)までの試験では疲労寿命への影響は認められなかった²⁾。



第10図 オーステナイト系ステンレス鋼の疲労試験結果

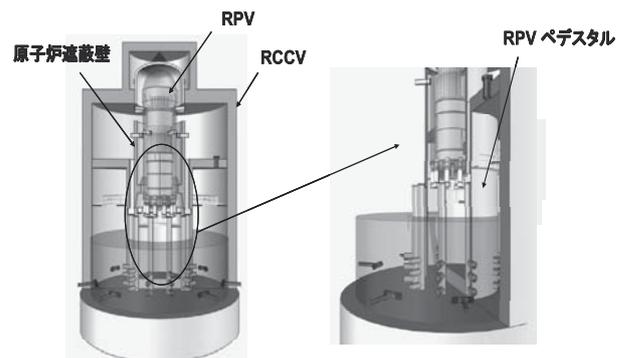
またいずれの試験結果からも、設計疲労曲線に対しては十分な余裕が確保されていることを確認した。

(3) 原子炉本体基礎部の耐震安全評価

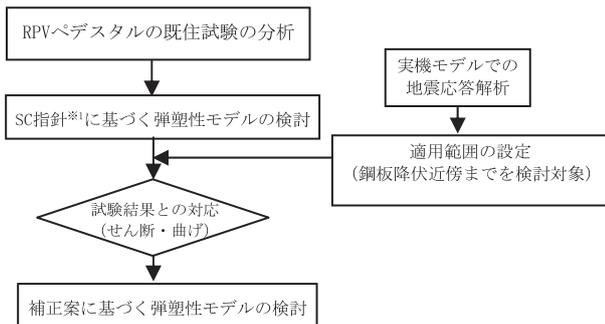
原子炉本体基礎部(RPV ベDESTAL)は、第11図に示すように、鋼板円筒殻の内部にコンクリートを充填した構造となっている。原子炉建屋—原子炉格納容器—RPV ベDESTALを連成させた地震応答解析を実施する場合、これまではRPV ベDESTALを弾性と仮定した解析を実施しており、建屋系に比較して相対的に重量の小さいRPV ベDESTALの応答挙動は、重量の大きい建屋系の応答の影響を受けることになる。そこで原子炉本体基礎部の地震応答解析を地震時の挙動を実態に合わせ、ABWR, BWR 5型プラントのそれぞれについてRPV ベDESTALの弾塑性モデルを作成し、地震応答解析と強度評価を実施した。

弾塑性モデルの作成に当たっては、鋼板コンクリート構造耐震設計技術指針(SC 指針)をもとに、RPV ベDESTALの固有の構造様式、隔壁方式のSC構造などを考慮して、スケルトンカーブおよび履歴特性をモデル化した³⁾。

第12図にRPV ベDESTALの検討フローを示す。補正案に基づく弾塑性モデルを用いて基準地震動 Ss に対する地震応答解析を実施し、円筒部、基部アンカ部など各部に生じる応力が許容値を満足していることを確認した。



第11図 RPV ベDESTALの構造(ABWR)



※1 SC 指針：鋼板コンクリート構造耐震設計技術指針 JEAG4618-2005
第12図 RPV ペDESTALの弾塑性モデル検討フロー

Ⅳ. 地震後の再起動プロセスの検討

中越沖地震後の柏崎刈羽原子力発電所のみならず、昨今の大地震を経験した国内原子力発電所では、再起動までに多大な時間を要している。将来の予期せぬ地震発生に備えて対応方法を事前に定めておくことは、地震後のプラント再起動に至る点検・評価プロセスを的確かつ効率的に実施するために有効である。安全確保を大前提に原子力発電所の設備利用率を向上させていくことも、今後の課題である。

このため SANE 委員会では、柏崎刈羽原子力発電所の地震経験から得た知見を活用し、地震後のプラント再起動に至る点検・評価プロセスについて検討することとした。

すでに米国では EPRI ガイドラインや学協会において地震前計画と地震後の対応について基準類が整備されており^{4,5)}、IAEA においても地震前後の対応をまとめたレポートがまとめられつつある。

SANE 委員会では、中越沖地震での経験や海外動向を踏まえて、地震前の計画と地震発生直後から再起動に至るまでの設備の点検・評価の考え方と手順を、ガイドライン案として取りまとめており、その構成を第13図に示す。

地震後の再起動にあたっては、地震後の点検・評価による設備健全性の確認、必要に応じて実施される補修の完了が基本であり、ガイドライン案の特徴として以下の

点が挙げられる。

- ・点検対象部位の事前検討や健全データの採取など地震前に実施する項目を明確にする。
- ・地震発生後の時間推移により、対応を4つの実施区分(A~D)に分ける。
- ・地震動レベル(3段階)、設備の損傷状態レベル(4段階)に応じて点検・評価の対応ケースを決める。
- ・観測された地震動がSsを超える場合は、地震動特性に応じた対応ケースを決める。

仮にこれらの考え方に基づいて、安全関連設備が損傷していないケースに当てはめると、系統機能試験を経て速やかに運転を再開、その後で観測された地震動を用いた耐震安全評価を行うことになる。

SANE 委員会では、ガイドラインを整備する上での検討課題も抽出しており、各対応ケースで規定される点検対象や点検方法の具体化、実プラントへの試適用、区分設定根拠の明確化など、ガイドライン制定に向けた検討をすすめている。

Ⅴ. おわりに

地震国にあって安全確保を第一に原子力発電を推進し、原子力発電が地球温暖化対策で期待される役割を果たしていくためにも、地震経験から得た貴重な知見は体系化・一般化し、伝承していくことが必要である。耐震に関わる広範な学問体系を俯瞰し、様々な技術開発課題に効率的に取り組むために、関係学協会の中でも(社)日本原子力学会が中心的に果たす役割は大きいものと思われ、その活動に期待するものである。

— 参考資料 —

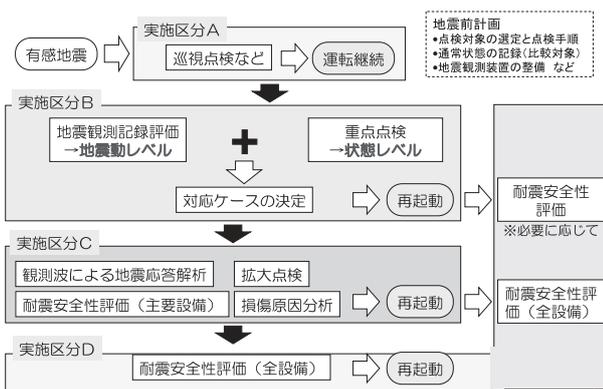
- 1) 中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価 平成19, 20, 21年度中間報告, 日本原子力技術協会. (<http://www.gengikyo.jp/KikakuKijun/NomotoLinkai/index.html>)
- 2) 大岡紀一, 他, 「柏崎刈羽原子力発電所における地震後の健全性評価」特集号, 非破壊検査, Vol. 59, (2010).
- 3) 菊地利喜郎, 他, “原子炉本体基礎の弾塑性モデル化手法に関する研究”, 2010日本建築学会大会予稿集, (2010).
- 4) *Guidelines for Nuclear Power Plant Response to an Earthquake*, EPRI NP-6695, EPRI, (1989).
- 5) *Nuclear Plant Response to an Earthquake*, ANSI/ANS-2.23-2002, (2002).

著者紹介

野本敏治(のもと・としはる)



東京大学 名誉教授
(専門分野)構造力学, 溶接工学, システム工学



第13図 地震前後の点検・評価ガイドライン案の構成

原子力安全・保安院の10年の歩み

主要な活動の紹介を中心として

原子力安全・保安院 原子力安全広報課

原子力安全・保安院(以下、「保安院」という)は、この1月で平成13年の設立から満10年を迎えたところです。本稿では、規制活動の不断の見直しと、一般社会の理解と信頼感の醸成を図るため、公開の場で多様なステークホルダーと集中的に議論を交わす場として、昨年10月に初めて開催した「原子力安全規制情報会議」における寺坂原子力安全・保安院長による保安院の活動報告をベースに「原子力安全・保安院の10年の歩み」を紹介します。

I. 原子力安全規制の体制・整備

本章では、保安院を中心に、原子力安全規制体制におけるこれまでの整備状況と保安院の横断的な業務について紹介します。

1. 保安院の組織

保安院は、中央省庁の再編により、平成13年1月に設置され、それまで科学技術庁と資源エネルギー庁でそれぞれ実施してきたエネルギー利用に係る原子力安全行政を一元的に取り扱うこととなりました。さらに、通商産業省の内部部局で実施していた産業保安行政も保安院へ移管され、原子力安全・産業保安行政が一元化、かつ、強化されることとなりました。

保安院には、現在、約800名在籍しており、その約半数が原子力安全行政を担っています。

2. 原子力保安検査官事務所及び緊急事態応急対策拠点施設(オフサイトセンター)

保安院は、東京の本院に加え、全国21ヶ所の原子力保安検査官事務所を有しており、原子力施設に関する安全と安心に関する活動を実施しています。

当該事務所は、原子力施設近傍に整備されている緊急事態応急対策拠点施設(通称「オフサイトセンター」)内に原則設置されており、事務所に勤務する原子力保安検査官及び原子力防災専門官は、24時間365日いつでも、緊急時には連絡が取れる体制となっています。

3. 保安院の組織目標と原子力安全規制の理念

保安院では、設立当初に、組織目標とともに、保安院の活動における3つの安全規制の理念と4つの行動規範を定めました。

組織目標は「国民の安全の確保と環境の保全」です。また、理念は①「安全規制が明確であり、公開されていること」、②「安全規制は最新の技術的知見を反映した効果的なものであること」、③「国際動向に主体的に対応すること」です。さらに、行動規範は①「強い使命感」、②「科学的・合理的な判断」、③「業務執行の透明性」、④「中立性・公正性」。保安院の職員は、これらを常に頭に入れながら、日々活動を重ねているところです。

4. 原子力安全規制体制

我が国の原子力安全規制は、保安院の行う審査・検査等に加えて、昭和53年に設置された原子力安全委員会が、保安院の行った審査・検査等の安全規制を客観的・中立的に監視するダブルチェック体制をとっています。

平成12年には後述する「JCO事故」等の教訓を踏まえ、設置許可時のダブルチェックに加え、建設段階、運転段階及び廃止措置段階における規制行政庁の安全規制の調査を開始しています。

また、後述の「データ改ざん問題」を踏まえ、平成14年12月の改正電気事業法等により、四半期毎報告義務の創設、調査権限の強化等、原子力安全委員会のダブルチェックの機能が一層強化されたところです。

5. 独立行政法人原子力安全基盤機構(JNES)の設立

JNESは、原子力安全規制の更なる効率的かつ的確な実施を図るため、平成15年10月に設立された独立行政法人であり、専門技術者が約420名在籍しています。

保安院と JNES との一体的な活動が安全確保の上で極めて重要です。JNES では、原子炉施設及び原子力施設に関する検査の一部を行うとともに、安全審査の解析評価におけるクロスチェックや規格基準策定のための試験研究、国や地方自治体における防災業務の支援、国際業務等を行っており、保安院の業務を補完しつつ、この両者が一体となって全体的な安全確保を図っているところです。

6. 原子力安全に関する「広聴・広報」活動

保安院の「広聴・広報」活動方針としては、①原子力安全規制活動について、国民への説明責任を果たす、②多様なステークホルダー(原子力に関して、直接又は間接に影響を受ける人や組織)からの評価を安全規制行政に的確に反映する、の2点を柱に据えています。

また、「広聴・広報」活動においては、地域住民等のニーズを把握し、そのニーズに対して活動することが重要です。

このため、従来型の広報誌やパンフレット等の情報提供に限らず、直接対話型コミュニケーションとして、住民説明会に加えて、立地地域にある原子力保安検査官事務所が自ら企画する「一日原子力保安検査官事務所」を開催するなどして少人数の方々との会合も実施しているところです。

さらに、「緊急時の情報提供」も大変重要であり、平成19年の「新潟県中越沖地震」の教訓を踏まえ、大規模地震等発生の際、保安院から、メールアドレス登録者の携帯電話に、原子力施設の状況等に係る情報を直接提供する「モバイル保安院」を平成20年7月に開設・運用しています。

7. 国際協力の取組

保安院では、これまで、①国際条約の履行、②国際機関の活動への積極的関与、③海外の規制機関との情報交換、④アジア等への協力を積極的に進めてきたところです。

原子力の安全は、国際的な公共財、世界共通の財産です。相互に情報交換、意見交換しながら安全を確保していくことが重要です。こうした中、例えば、耐震の安全性などは日本が一番進んでいるものと考えています。

このため、運転管理の技術も含めて、今後は、日本からも情報発信を積極的に行っていくことが大変重要であり、これらの取組も今後ますます強化していくこととしています。

II. 原子力安全規制の充実・強化

本章においては、原子力安全を巡るこれまでのいくつ

かの大きな出来事と、それに伴って制度などがどのように変わってきたのかを紹介します。

1. 安全規制の整備・強化

(1) JCO ウラン加工施設の臨界事故(平成11年)の教訓

保安院発足前、平成11年9月に(株)ジェー・シー・オーのウラン加工施設において臨界事故が発生しました。これは数々の規則違反によって生じた臨界事故であり、また、これにより作業員3名が大量の放射線を浴び、うち2名が亡くなり、更に施設周辺住民186人が避難を余儀なくされるなど忘れてはならない事故です。

この事故の教訓を踏まえ、同年に原子炉等規制法が改正され、また、原子力災害対策特別措置法が制定されました。これにより、保安検査の充実、前述のオフサイトセンターの設置、また、総理大臣をはじめとする関係大臣及び関係省庁が参加する政府全体の総合防災訓練を毎年実施することになりました。

(2) 「データ改ざん問題」(平成14年)への対応

また、大きな出来事として、電力会社による不正問題やデータ改ざんなどがありました。

社会的にも大きな問題になったものであり、組織面での改革としては前述の JNES の設立(平成15年)や、原子力安全委員会におけるダブルチェック体制の強化、制度面としては定期事業者検査の義務付け等の事業者の保安活動の充実、プロセス型検査方法等の導入や JNES による安全管理審査といった国の検査の実効性向上など、安全規制面での改革が行われました。

安全はもとより、信頼・安心の観点からも、本問題は、保安院の取組方針を含めて、決して忘れてはならない重要な出来事です。

(3) 「発電設備の総点検」(平成18年度)への対応

平成18年から19年にかけて、いわゆる「発電設備の総点検」を行いました。

これは、平成18年11月、水力発電におけるダム水位の測定値や、火力・原子力発電設備における冷却用海水の温度測定値に対する不適切な補正が明らかになるなど、憂慮すべき事案が続いたことから、全電力会社に対して発電用の設備において、データ改ざん、必要な手続きの不備、その他同様な問題がないか総点検を行うように指示をしたものです。

この結果、原子力に関し、事業者から報告があった事案は計98事案に上り、うち、北陸電力(株)志賀1号機の停止中に発生した臨界事故を含む安全上重要なものが11事案ありました。

このため、原因究明・再発防止対策に加え、安全の向上、安全文化の構築を具体化させるため、「30項目の今

後の対応」(火力・水力を含む)を発表し、実施させました。また、安全上重要な課題のあった原子力発電所に対し保安規定の変更命令、特別な保安検査等の行政処分などを行いました。

(4) 保守管理不備問題(平成22年)への対応

昨年3月、中国電力(株)島根原子力発電所において、事業者が作成する点検計画表の記載通りに点検(分解・取替)がなされていないことが判明しました。

保安院の指示に基づき、同発電所1,2号機の保守管理の実施状況について総点検を実施したところ、法令で定める定期事業者検査の対象機器を含め、点検計画表通りに分解点検・取替がなされていない機器(511箇所)があることを確認しました。

このため、保守管理不備等に対して、①保安規定違反としての嚴重注意、②保安規定変更命令による行政処分などを行いました。

社内での情報共有の不備等が原因であり、信頼という面からの大きな教訓として忘れてはならない事案です。

2. 耐震に係る新たな知見の反映

次に、耐震安全性への取組について紹介します。最近、特に大きな地震が原子力発電所の近くで発生しており、社会的な関心の高まりが見られるところです。

こうした中、最近の地震学や耐震工学の成果など最新の知見を取り入れ、原子炉施設の耐震安全性のより一層の向上に資するとの観点から、平成18年9月に、原子力安全委員会が新しい「耐震設計審査指針」(以下、「新耐震指針」という)を策定しました。指針改定の趣旨を踏まえ、保安院は、新耐震指針に基づく原子力施設の耐震安全性の再確認(いわゆる「耐震バックチェック」)を行っているところです。

〈新潟県中越沖地震〉(平成19年)の教訓

平成19年7月に「新潟県中越沖地震」が発生し、東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所に与えた揺れは、原子炉が安全に停止したとはいえ、設計時の想定を大幅に上回るものでした。

保安院は、本地震で得られた知見を作業中の耐震バックチェックに反映するよう指示しました。また、耐震安全性に関する調査・研究活動を拡充するため、平成21年12月、柏崎市に産学官による原子力耐震・構造研究拠点を設置し、大深度ボーリング孔での地震観測による地震波の増幅特性の評価などの研究を実施しています。

加えて、本地震の教訓を踏まえ、事業者による化学消防車等の配備等火災対策や、情報提供・連絡体制として、前述の「モバイル保安院」の開設・運用等、多くの措置を講じてきたところです。

このように、耐震安全性の確保のために、常に最新の

技術、最新の研究成果を生かす取組を行っているところです。

3. 原子炉の高経年化への対応

これからの安全確保の面で大変重要なものが、原子炉の高経年化対策です。

日本においては、既に、運転から40年を超えた原子炉も出てきています。こうした高経年化した原子炉は今後、順次増えていきますが、この運転を継続する場合、何よりも安全性を確保することが大前提です。

日々の巡視・点検、検査・調査等で安全を確保することはもとより、節目として運転開始後30年が経過する前の時点及びその後10年ごとに、60年の供用を仮定して健全性に関する技術評価(高経年化技術評価)の実施や長期保守管理方針の策定を事業者に義務付けさせるとともに、保安院が審査及び認可を行っています。

〈美浜発電所3号機2次系配管の破断事故(平成16年)への対応〉

高経年化に関連して忘れてはいけない事案として、関西電力(株)美浜発電所3号機で起こった2次系配管の破断事故があります。当該配管が破断し、高温の2次系冷却水が流出し、作業員5名が死亡、6名が負傷した大きな事故です。

この事故の背景には、事業者・メーカーの不適切な保守管理・品質保証活動があり、この事故を教訓とした安全規制面での対策として、省令改正による配管減肉管理についての検査対象及び検査方法等の明確化などを実施しています。

4. 新検査制度の開始

個別のプラントの状況に応じた保全活動を行うことにより、安全性の更なる向上を図ることを目的に、保全プログラムを基礎とする検査の具体的な制度を取りまとめ、関係省令の改正を行い、平成21年に新検査制度として施行しています。

具体的には、(1)設備の重要度に応じ、保全実績を踏まえ、保全計画の策定、保全の実施、その有効性の評価など品質保証システムの下で適切に保全活動を実施する仕組み(保全プログラム)を導入、(2)設備の劣化データ収集と点検への反映を行い、個別の機器毎の評価を踏まえ、検査の点検頻度を適切に設定、(3)新しい技術を用いた運転中の機器の状態監視を充実、(4)これらを踏まえ、原子炉の停止間隔(運転期間)を適切に設定するなどの措置を講じています。

なお、東北電力(株)より、東通原子力発電所1号機において、運転期間を従来の13ヶ月以内から16ヶ月以内に延長する初めてのケースとなる計画について、保安規定の

変更認可申請及び保安規程の保全計画届出などが申請され、現在、厳格に審査しています。

5. 核燃料サイクル施設等における安全確保

核燃料サイクル施設等における安全確保については、再処理施設をはじめとして燃料加工施設、中間貯蔵施設、「もんじゅ」などがあり、非常に重要です。

○日本原燃(株)再処理施設

平成4年12月に再処理事業指定を行い、現在、使用済燃料を用いたアクティブ試験(使用済燃料を用いた総合試験)が継続中です。

○日本原燃(株)MOX燃料加工施設

平成22年5月に加工事業許可を行い、同年10月、建設工事に着手しています。

○使用済燃料貯蔵施設「リサイクル燃料備蓄センター」

平成19年3月に国内初の使用済燃料貯蔵事業の許可申請があり、平成22年5月に事業許可を行ったところであり、同年8月に着工しています。

○核燃料輸送物の安全審査及び検査の実施

原子力施設の稼働に伴う輸送ニーズに対応して、容器設計、容器製造等に係る安全審査を実施しています。

○高速増殖原型炉「もんじゅ」の安全性確認

平成6年4月初臨界の後、平成7年12月のナトリウム漏えい事故を踏まえ、ナトリウム漏えい対策等の改造工事等を行い、試運転再開に当たっての安全性評価(平成22年2月)などを実施した後、平成22年5月に試運転(性能試験)を再開し、同年7月に炉心確認試験(性能試験の第一段階)を終了したところです。

同年8月に起きた炉内中継装置の落下トラブルについては、11月、炉内中継装置に変形が確認されたとして、原子炉等規制法に基づく報告を受けました。なお、(独)日本原子力研究開発機構は、炉内中継装置を燃料出入孔スリーブと一体で引き抜くため、現在その具体的な作業手順について検討中です。原子力機構は、同年12月に性能試験工程の変更を公表し、平成23年度後半の40%出力プラント確認試験開始を目指すとしています。

6. 廃止措置、廃棄物処分に係る安全確保

廃止措置も現実のものとなってきています。制度整備とともに、原子炉施設を安全に廃止していくことが重要です。併せて、廃止の過程で生じる廃棄物をどのように処分するかも重要です。また、廃棄物の問題は、廃止の過程のみならず、運転の過程でも発生するものであり、非常に放射能レベルの高いものから低いものまで様々なレベルがあります。それぞれのレベルに応じた具体的な廃棄物処分を進めていくことが、原子力利用を進めていくに当たって、事業者と国ともに考えていかなければなら

ない大変重要な課題です。

○原子炉施設に係る廃止措置計画の認可制度導入

廃止措置の本格化を控え、手続の透明性確保、基準の整備を進めるため、平成17年に原子炉等規制法の改正を行い、廃止措置計画に係る手続を届出制から認可制にするなど廃止措置規制の明確化を行ったところです。

○クリアランス制度の導入

今後、原子炉施設の解体工事が本格化することにより、大量の資材等の発生が見込まれます。当該資材等の汚染の実態に即した規制体系の整備を進めるため、平成17年に原子炉等規制法の改正を行い、放射能レベルの極めて低いものを一般に再生利用又は処分できるクリアランス制度を整備・導入してきたところです。

○高レベル放射性廃棄物等の最終処分の安全規制体系の整備

青森県六ヶ所村の再処理施設の本格稼働等により、高レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物の発生が本格化することから、これらの放射性廃棄物の最終処分に係る安全規制体系の明確化が必要です。平成19年に原子炉等規制法の改正を行い、放射性廃棄物の処分事業を放射能濃度により「高レベル放射性廃棄物の処分事業(地層処分)」と「低レベル放射性廃棄物の処分事業(余裕深度処分及び浅地中処分)」に分類するなど、高レベル放射性廃棄物等の最終処分に係る安全規制体系の整備を図ったところです。

7. 原子力防災対策の推進

前述のとおり、平成11年9月の(株)ジェー・シー・オーのウラン加工施設で起こった臨界事故の反省・教訓を踏まえ、平成12年6月に原子力災害対策特別措置法が施行されました。

その中で強化した事項としては、①事業者責任の明確化、②災害時の迅速な初動体制の確保、③国、関係自治体、原子力事業者等の連携の強化、④原子力の専門的知識を有する国の役割の強化などがあります。

また、原子力災害予防対策として、①原子力防災体制の整備(原子力防災専門官の設置など)、②原子力防災に係る施設・資機材の整備(オフサイトセンターの整備など)、③原子力防災訓練の実施、④原子力防災に関する技術開発・整備などの実施が定められました。

8. 核物質防護対策の充実

核防護対策も時代の変化の中でますます重要な要素です。原子力の平和利用を行う国には、いわゆる「3S」という取組が求められています。すなわち、事故を起こさないようにする「Safety」、軍事転用を防ぐ核不拡散の「Safeguard」及び核物質の不法移転(盗取)や原子力施設

等に対する妨害破壊行為(いわゆる核テロ)から核物質を守る「Security」を確保することです。保安院は、主として「Safety」に取り組んできたところではありますが、今後、ますます重要になってくるのが「Security」です。

国際的なテロ脅威等の高まりを受け、平成17年に原子炉等規制法を改正し、核物質防護検査制度、核物質防護秘密制度の創設等、核物質防護(Physical Protection)対策を強化し、国際的な水準に高めたところではあります。

このような体制の整備や治安当局等との連携を重ねながら、セキュリティ対策の高度化を図っていく必要があります。

Ⅲ. 今後の課題

最後に「今後の課題」について紹介します。

安全規制の対象範囲や内容の変化、原子力を取り巻く経済的・国際的な状況の変化、原子力安全を巡る社会との関係の変化など安全規制を取り巻く環境変化を踏まえ、原子力安全・保安部会基本政策小委員会にて、今後の規制内容の充実・高度化、より安全を確保しつつ合理

的な規制を重ねていくための検討が行われ、平成22年2月に42項目の課題として改めて整理したところです。

具体的には、安全規制における経験と知見の活用、発電炉の更なる高経年化への対応、経済的・国際的な状況変化への対応、ステークホルダー・コミュニケーションに関する取組の充実、規制当局の品質保証活動の充実などです。

今後、これらの規制課題は、毎年作成する「原子力安全・保安院の使命と行動計画」(ミッションペーパー)に反映させ、PDCAサイクルを回しながら、1つ1つの内容を深めていきます。これらを実施するに当たっては、昨年10月に開催した「原子力安全規制情報会議」をはじめ様々な会議での活動やステークホルダー・コミュニケーションというものが大変重要です。

今後とも、こうした取組を継続するとともに、専門家も交えた議論を行いつつ対応策の具体化を進め、新たな課題に対応した安全規制の一層の充実を図っていきます。

(2011年 1月15日 記)



原子力安全・保安院発足後の原子力安全をめぐる主な出来事

(平成13年)	成11年の臨界事故の発覚
1月 中央省庁再編により原子力安全・保安院発足	3月 能登半島地震が発生(志賀原子力発電所1・2号機は点検のため停止中)
7月 原子力安全・保安部会報告「原子力の安全基盤の確保について」	4月 原子力安全・保安院が「発電設備の総点検に関する評価と今後の対応等について」取りまとめ
11月 中部電力(株)浜岡原子力発電所1号機余熱除去系蒸気凝縮系配管破断事故発生	6月 放射性廃棄物の地層処分に係る原子炉等規制法の改正
12月 原子力安全・保安部会原子炉安全小委員会報告「定格熱出力一定運転の安全性について」	6月 IAEA 総合的評価サービス(IRRS)ミッション来日
(平成14年)	7月 新潟県中越沖地震により東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所が自動停止
2月 日本原燃(株)より再処理事業所の使用済み燃料受入れ・貯蔵施設におけるプール水漏えいの報告	7月 原子力安全・保安部会の下に「中越沖地震における原子力施設に関する調査・対策委員会」を設置
6月 原子力安全・保安部会報告「原子力施設の検査制度の見直しの方向性について」	8月 新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所への影響に関する国際原子力機関(IAEA)による調査の実施
7月 発電用原子力設備の技術基準の性能規定化のための省令改正等	(平成20年)
8月 東京電力(株)の自主点検作業記録に係る不正等の事案が発覚	6月 原子力発電所における耐震安全性、大地震からの教訓に関するIAEA国際ワークショップ開催
10月 原子力安全規制法制検討小委員会中間報告	8月 保全プログラムを基礎とする検査制度の導入に係る規則等の改正
12月 法定義務化された「定期事業者検査」の導入、設備健全性評価(維持基準の導入)の義務化を盛り込んだ改正電気事業法及び原子炉等規制法が成立	8月 原子力施設における初期消火体制の整備に係る規則等の改正
(平成15年)	(平成21年)
10月 独立行政法人原子力安全基盤機構(JNES)設立	1月 新検査制度の施行
10月 保安検査への品質保証の導入	1月 原子力発電所の耐震安全性に係る信頼性の一層の向上を図るための新たな知見の反映の仕組み等について基本方針決定
11月 放射性廃棄物等安全条約を批准	8月 駿河湾を震源とする地震が発生し、中部電力(株)浜岡原子力発電所4号機、同5号機が自動停止
(平成16年)	(平成22年)
8月 関西電力(株)美浜発電所3号機2次系配管破損事故発生	2月 原子力安全・保安部会基本政策小委員会報告「原子力規制に関する課題の整理」
(平成17年)	3月 原子力安全・保安部会原子炉熱出力向上ワーキンググループ報告「原子炉熱出力向上の安全性について」
5月 核物質防護、廃止措置計画の認可及びクリアランス制度に係る原子炉等規制法の改正	5月 (独)日本原子力研究開発機構高速増殖原型炉「もんじゅ」の性能試験の再開
8月 原子力安全・保安院「実用発電用原子炉施設における高経年化対策の充実について」	5月 リサイクル燃料貯蔵(株)リサイクル燃料備蓄センターにおける使用済燃料の貯蔵事業の許可
8月 宮城県沖地震により東北電力(株)女川原子力発電所の原子炉がすべて自動停止	5月 日本原燃(株)MOX燃料加工事業の許可
10月 独立行政法人日本原子力研究開発機構(JAEA)発足	6月 原子力発電所の保安活動総合評価(試行)の実施結果の公表
12月 IAEA放射性物質輸送安全評価サービス(TranSAS)ミッション来日	7月 「原子力安全規制ラウンドテーブル」を初めて開催
(平成18年)	10月 「原子力安全規制情報会議」を初めて開催
9月 原子力安全委員会が「発電用原子炉施設の耐震設計審査指針」等を改訂	
9月 原子力安全・保安院が「原子力発電施設に対する検査制度の改善について」を取りまとめ	
11月 発電設備に係る総点検指示の発出	
(平成19年)	
3月 北陸電力(株)志賀原子力発電所1号機における平	

原子力安全・保安院の10年間と今後について

原子力安全・保安院長 寺坂 信昭



原子力安全・保安院は、この1月で平成13年の設立からちょうど満10年を経ました。この10年の間、「安全の確保」を第一に、組織一丸となって日夜務めてまいりました。その中で、原子力の関係で言えば、平成14年の自主点検記録不正問題、平成16年の美浜3号機2次系配管破損事故、平成19年の中越沖地震といった様々な事故・トラブル等がありました。原子力安全・保安院としては、着実に対応してきたところですが、一般社会に対し、原子力利用の不安を惹き起した事案でもありました。

近年、エネルギーの安定確保、地球環境問題等を背景とした原子力に対する再評価や安全への意識の高まり、新たな技術の開発や新知見の蓄積など、安全規制を取り巻く環境は大きく変化しております。

原子力安全・保安院は、設立10年を経て、次の段階を迎えるに当たり、国民生活や産業活動に欠かさないエネルギーや産業活動の安全確保を使命として、こうした経験の蓄積や国際動向も含めた環境変化に対応しつつ、設立当初に定めた4つの行動規範—「強い使命感」「科学的・合理的な判断」「業務執行の透明性」「中立性・公正性」—に則り、安全規制の一層の充実、事故・トラブルの未然防止、万一の事

故への迅速で適確な対応、事故の再発防止等に引き続き全力を挙げて取り組んでまいります。

原子力の利用を進めていくに当たり、安全の確保は大前提であり、厳正かつ適切な安全規制の執行が何よりも重要であることは言を俟ちません。

今後とも、原子力安全・保安院としては、新たな事業の進展に対応した適切な安全規制を実施していくとともに、事故・トラブル等に対しては厳正な対処をとってまいります。また、万一の事態に備えた防災体制の確保にも努めてまいります。

さらに、原子力の安全を一層確固たるものとしていくためには、その向上を目指した不断の取組を継続していくことが不可欠です。

昨年2月には、原子力安全・保安部会基本政策小委員会において、原子力安全の規制に係る今後取り組むべき課題について整理を行い、経験と知見に基づく規制制度の充実、安全研究等による新たな技術的知見の活用、規制対象の変化を見越した取組、既存設備の有効利用に対する安全規制の在り方、安全規制に係る国際協力の充実、規制プロセスにおけるステークホルダー・コミュニケーションの充実等、42項目の「規制課題」を取りまとめました。

これら規制課題への対応として、「原子力安全規制情報会議」を昨年10月に初めて開催し、公開の下で産業界や自治体、一般国民の皆様等と集中的に議論を行うとともに、産業界の代表者との率直な意見交換を行う「原子力安全規制ラウンドテーブル」も開催しています。こうした取組についても継続的に実施するとともに、専門家も交えた議論を行いつつ対応策の具体化を進め、新たな課題に対応した安全規制の一層の充実を図っていく所存であります。

(2011年 1月15日 記)

原子力安全・保安院の思い出と期待

初代原子力安全・保安院長 佐々木 宜彦



私は2001年1月の原子力安全・保安院発足から初代院長として3年半勤めさせていただいた。思い出はと問われると様々な思いがよぎってくるが、内心忸怩たる思い、皆さんの助けによってなんとか保安院の初期のルール敷きにささかでもお役に立てたかもしれないと

の思いが錯綜するのである。

新しい組織のベクトルをあわせるには、組織の基本理念、目標、ミッションを明確にし、共有することが不可欠となる。当時、皆が新しい組織運営を担う気持ちが漲っていた。規制のあるべき姿勢、目指すべき方向を大いに議論し、基本理念と4つの行動規範を掲げた。これらは組織の伝統となるべきものであり、決して陳腐化するものではない真理であるとの思いであったが、後輩諸氏がこの伝統を引き継いでもらっている。

また、発足当初、METI 職員、旧科学技術庁出向職員、民間企業、防衛庁などからの中途採用職員など異なるバックグラウンドの混成部隊でスタートした。これらの人たちがお互いに意思疎通を図り心を通い合わせる試みとして、管理職が率先して院内講演会の講師として自分の経験や考えを話す機会と場を設けたが、含蓄のある話が多かった。風通しのよい組織風土づくりに役立った試みだったと思う。

規制行政は日常の公正な行政の積み重ねが基本であることはもとよりであるが、いざ、事故の発生といった事態にすぐさま対処できる危機管理能力が厳しく求められている。院長は危機管理者として実務レベルの最高責任者である。院長に就任して生活様式が一変してしまったことが2つある。一つは、緊急時にも直ちに役所に徒歩で駆けつけられる範囲内に居住すべしということで、六本木の公務員宿舎の一室を借りて住むことになった。東京内の単身赴任生活が始まった。当初はこのポストの性格からも長くても1年半程度だろう。公務員生活を永きにわたりやらせていただいた恩返しのため、この間

は身も心も捧げようと自分自身に言い聞かせることにした。外部からの出入り自由の官舎だったので、後に東京電力問題が起こったときは、若い記者諸君から夜討ち、朝駆けを受けることになりご近所にご迷惑をかけたことと思う。もう一つは携帯電話の支給があり常時身につけておくべしだった。そこで公務用と私用の着信メロディを変えて、着信音で心の準備ができるようにした。退官して携帯電話から解放されることになって心底、精神の安寧を得てホットしたことは記憶に新しい。

また、危機管理組織として、宿直常駐体制をとることとしたので、正月、5月の連休などには指定職、管理職が率先して対応してもらうことにした。院長自ら宿直することへの懐疑論もあったが、私は大晦日から元日にかけて宿直することにし、3年にわたりお正月の朝を役所の窓から覗くことになったが今となってみれば懐かしい思い出である。

私の在任期間中、最も大きなエポックは東京電力問題への対応であった。事柄の推移、国会での対応などをたどるにつけ、私自身の力不足もあり忸怩たる思いも募るのであるが、日本の原子力が本格的な運転管理の時代に入り、規制者、事業者がそれぞれの立場から謙虚に原子力導入時代の原点に帰り安全確保に向けて、いま一度たがを締めなおして再構築していくための貴重な経験として生かしていくべき試練だったと理解することになっている。

私は、規制行政への信頼は、行政の質とレベルがあらゆるステークホルダーから尊敬に値するものでなければ生まれないと思っている。私なりの努力はしてきたものの翻ってみるに道半ばであったとの感は否めない。現在、保安院では、科学的技術的に合理性のある規制を目指して、保全プログラムの導入など検査制度の大幅な見直しが行われているほか、今後の規制課題を体系的に整理しその取り組み方針を示したところである。規制の国際整合への対応、安全確保の本質に立ち返った合理的規制などメリハリをつけて、スピード感をもって迅速に取り組んでほしいものである。また、規制者は規制活動のみならず厳しくチェックし、不断の見直し改善を続ける姿勢を堅持しつつ、規制の質とレベルを高めていく格段の努力を継続していただきたいと願っている。

(2011年 1月15日 記)

我が国の最先端研究開発

シリーズ解説 第27回

医療用放射性同位元素の製造と利用展開

新しい視点からの放射性同位元素利用

(独)放射線医学総合研究所 藤林 靖久

核医学は、放射性同位体で標識された薬剤(分子プローブ)を人体に投与し、その挙動を追跡することで疾患診断を行うものである。近年の分子生物学の進展によって抗体などのタンパク薬や、遺伝情報を利用した核酸医薬が続々と登場するに至って、これらを使った核医学診断・治療の開発が活発となり、それらに最適化された新たな放射性同位元素の選択と活用が始まっている。これらの製造には、加速器、ターゲットならびにターゲット処理システムの構築が不可欠であり、また新しい放射性同位元素に適した標識法の開発も必要となる。本稿では、これに関連して放射線医学総合研究所で行われている取組みについて紹介する。

I. はじめに

核医学で用いられる放射性同位元素は、その用途や測定原理によって、「SPECT(シングルフォトン断層撮影)核種」、「PET(ポジトロン断層撮影)核種」、「治療核種」の3種類に分類される。SPECT核種は、アンガー型シンチレーションカメラに適した140~150 keV前後のエネルギーを持つ γ 線のみを放出する半減期が数時間から数日の短半減期核種、PET核種は、病院内超小型サイクロトロンで製造されポジトロンを放出する超短半減期核種、治療核種は β 線を放出する中半減期核種である。

SPECT核種は、原子炉あるいは大型加速器で企業的に製造されもっとも多用されているものであり、遠距離にわたる輸送や安定供給に適したある程度の半減期の長さを持つ必要があるため、人体への影響が小さい一方で人体透過性を確保できる低エネルギー γ 線のみを出す核種が選択されてきた。

一方、PET核種には、生体構成元素の同位体であるC-11、F-18、N-13、O-15が汎用されている。これらは、原理的にあらゆる生体構成物質の標識に用いることができ、超短半減期であるため比較的高いエネルギーの消滅放射線(511 keV)を出しても人体に与える被曝線量は軽

微となること、原理的にPETが高い定量性を有すること等から汎用されているものである。

これらに対して治療核種は、がん等に標的細胞選択的に集積し、ある程度の時間にわたって β 線等の放射線を照射することによって標的とする細胞に対する毒性を発揮させるため、ある程度の半減期の長さ(数日程度)を持つものが選択されてきた。

近年、分子生物学の進展から、特定分子の機能を標的とした医薬(分子標的薬)や遺伝子組み換え技術を用いた医薬の開発研究が活発となってきた。これらの医薬は、主として抗体やペプチド(アミノ酸がいくつか結合したもの)等のタンパク製剤や、siRNA(核酸の一種でsmall interfering RNAの略。特定の配列を持つmRNAの分解を選択的に促進させ、その産物であるタンパク発現を低下させることができるもの)等の遺伝子医薬からなっており、比較的高い分子量を持っている。核医学においても、これら新しい考え方に基づいて開発された医薬を用いた画像診断やがん治療に取り組み方向性が生まれたが、その実現には従来にはない特性を持った一連の放射性同位体が求められている。すなわち、PET測定によるより高い定量性を確保できること、必要に応じて短半減期からゆっくりした体内動態を追跡することができること、比較的長半減期までの放射性同位体を選択できること、治療に適した β 線を出す同位体を選択できること、等である。

本稿では、これらの要求をクリアし広く分子生物学の

Production and Biomedical Research Application of a New Class of Radioisotopes : Yasuhisa FUJIBAYASHI.

(2010年 10月14日 受理)

新知見を核医学分子イメージング分野に展開するため、放射線医学総合研究所(以下、放医研)で行われている放射性同位体製造の取組みとその応用について概説する。

II. 放射性同位体の製造とその利用

1. 放射性銅(Cu)

Cuには、第1表にあげるように異なる物理的性質を持つ多くの放射性同位体が存在する。また、Cuは生理活性元素としてそれ自体の挙動に興味を持たれるのみでなく、様々なキレート試薬と強固に配位結合するためペプチド等の標識用放射性同位体としても有用である。放医研では、Cu-62、Cu-64の2種の放射性同位体の製造技術の開発を行い、医学研究者へ提供している。

(1) Cu-62

Cu-62は、半減期が9.8 min と非常に短寿命であるため、Zn-62と放射平衡にあることを利用したジェネレータの形で供給を行っている¹⁾。Zn-62は、天然に最も多いCu-63を原料として、サイクロトロンで陽子線を照射することにより $^{63}\text{Cu}(p, 2n)^{62}\text{Zn}$ の核反応で生成され

第1表 主な放射性Cuとその物理的性質

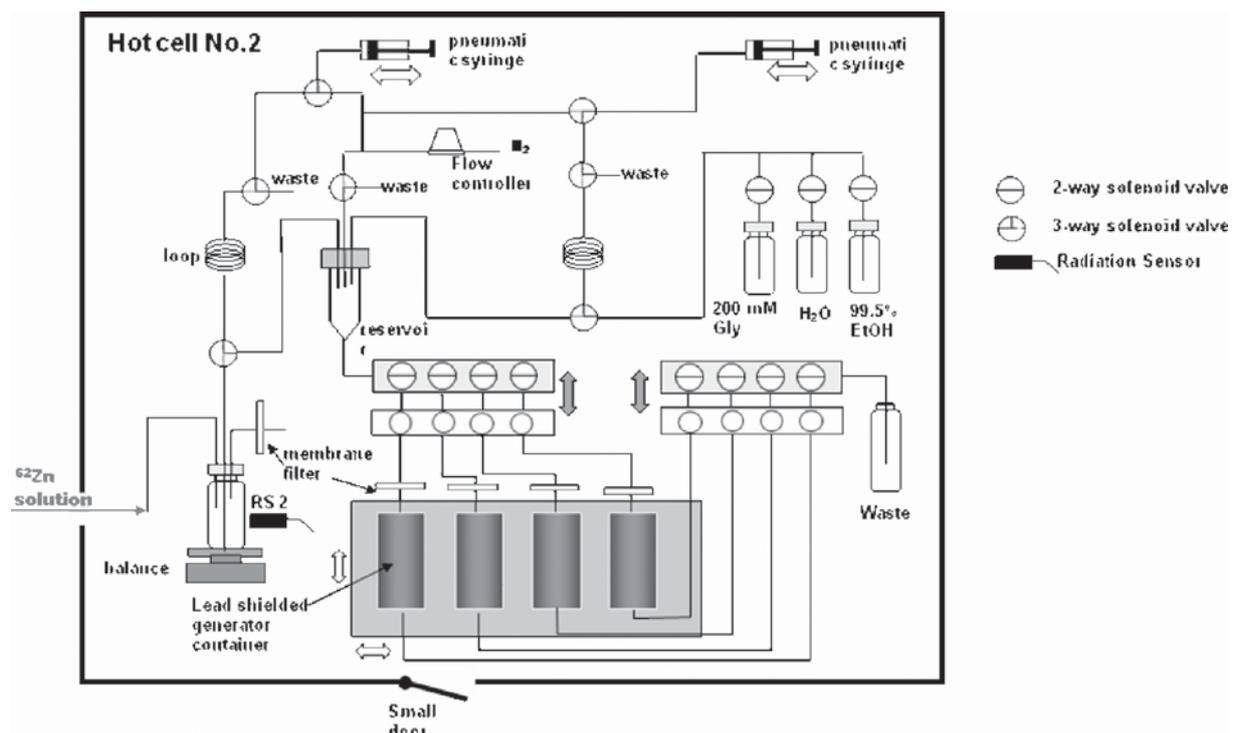
同位体	半減期	放出放射線
Cu-60	23.7 min	β^+
Cu-61	3.3 h	β^+
Cu-62	9.7 min	β^+
Cu-64	12.7 h	$\beta^+\beta^-$
Cu-67	61.8 h	β^-

る。Cuターゲットを溶解後、生成されたZn-62を陰イオン交換樹脂で分離・溶出する。得られたZn-62を陽イオン交換樹脂(Sep-Pak plus CM)に吸着させ、生理的条件である200 mM Gly 溶液にて必要時にCu-62を溶出させている。このように、何度も放射性同位体を溶出できるものをジェネレータとよんでいる。第1図は、放医研に設置されている、4個のジェネレータを同時に作成できる装置の概略である。このジェネレータにより得られたCu-62-Glyは比較的弱い錯体であり、容易に次段階の標識反応に利用可能である。ジェネレータを供給することにより非常にきれいなポジロン核種であるCu-62を簡便に繰り返し得ることができることから、サイクロトロンによるPET分子プローブ供給を補完するものとして期待が持たれている。

Cu-62によって標識されたPET用分子プローブとしては、低酸素代謝診断に用いられるCu-62-ATSMがある。放医研では、国内4箇所のPET研究施設にZn-62/Cu-62ジェネレータを供給し、各施設倫理委員会の承認の下に共同臨床研究を進めている。その成果として、がん組織内の治療抵抗性部位の検出と種々の放射線治療効果との関連性、いわゆる“がん幹細胞”-Rich 部位の画像化、ミトコンドリア遺伝障害疾患であるMELAS患者脳における代謝異常の画像化などが成果としてもたらされつつある。(「がん幹細胞」説：がんの中ががん細胞の元となる幹細胞が潜んでいて、再発や転移を引き起こすという考え方)

(2) Cu-64, Cu-61

超小型サイクロトロンで製造される超短半減期核種で



第1図 放医研に設置されている、4個のZn-62/Cu-62ジェネレータを同時に作成できる装置の概略

ある C-11, F-18, N-13, O-15 では, ペプチドやタンパクなど標的組織への選択的集積に半日から1日程度かかる高分子プローブを用いた検査は非常に困難である。Cu-64は, 半日程度の半減期を持つポジトロン核種であるため, これらの標識用同位体として適している。また, Cu-61(半減期3.3 h)は, F-18に類似する半減期を持つ放射性同位体として利用可能である。これらは, それぞれ $^{64}\text{Ni}(p, n)^{64}\text{Cu}$, $^{61}\text{Ni}(p, n)^{61}\text{Cu}$ の核反応を利用して製造されることから, ターゲットに対応するNi同位体を選択するのみで, まったく同じ方法と手順を用いた製造が可能であることも, 利点のひとつと考えられる。放医研では, これらを製造するとともに, がんを標的とする抗体やペプチドの標識に活用している。

Cu-64は, 一部が β 線崩壊することが知られており, 大量投与することで細胞障害を引き起こすことが可能である。そのため, Cu-ATSMや抗体等を用いたがん選択的内部放射線照射治療への利用も期待されている²⁾。この治療においては, Cu-64の体内動態をPETで検出することができるため, 患者個人における標的・非標的組織における被曝線量を定量的に把握し, 治療効果や副作用を予測することができるなど, 画像診断とがん治療との融合へ向けた取り組みに期待が持たれる。

(3) 放射性ハロゲン

ヨウ素(I)や臭素(Br)など, ハロゲンの放射性元素は, 比較的原子番号も小さくペプチド等の炭素鎖に安定に結合させることができるため, タンパク, ペプチド, 核酸のみならず, 低分子生理活性物質の標識にも有用である。

数日以上分子プローブ動態追跡が必要なPET測定に適した放射性ヨウ素としては, 半減期4.2 dのI-124がある。サイクロトロンを用いたI-124の製造には種々の核反応があるが, $^{124}\text{Te}(p, Xn)^{124}\text{I}$ が最も低エネルギーかつ長半減期放射性同位体生成副反応が起きにくく有用と考えられる。

放医研では, I-124製造用Te-124, 5ターゲットの作成, サイクロトロンによる照射ならびに精製技術を確立しており, その生物医学研究応用のひとつとしてヨウ素トランスポータ発現に関する研究を行っている。ヨウ素トランスポータは, 細胞内外での物質輸送をつかさどるタンパクのひとつであり, その発現と薬物輸送との関連に関する研究を行っている。また, ヨウ素トランスポータをレポーター遺伝子として用いることによりI-124集積を指標とする非侵襲的遺伝子治療モニタリングの可能性についても検討を行っている。

放射性Brとしては, 半減期16.2 hのBr-76がポジトロン放出核種として, また半減期57 hのBr-77が β 線放出核種として, それぞれPET診断, 内部放射線治療に適した放射性同位体と考えられる。放医研では, Br-76の製造において, 天然Brをターゲットとしていった

んKr-76を製造・単離し, Kr-76がポジトロン崩壊して生成するBr-76を集める方法を採用している。この方法では, 非常に純度の高いBr-76を製造することができるが, かなり高いエネルギーのプロトンビームが必要であり, 多くのPET研究施設で実施可能というものではない。一方, As-76, 77を10 MeV程度のプロトンを照射すると, 効率的にBr-76, 77が生成することが知られている。この核反応を用いれば, 一般PET研究施設でもBr-76, 77を製造することが可能となる。Brは, Iに比較して低原子量であるため低分子生理活性物質の標識に用いることが比較的容易である。核酸等の標識にも利用可能であり, 今後の利用拡大が期待される放射性同位体である。

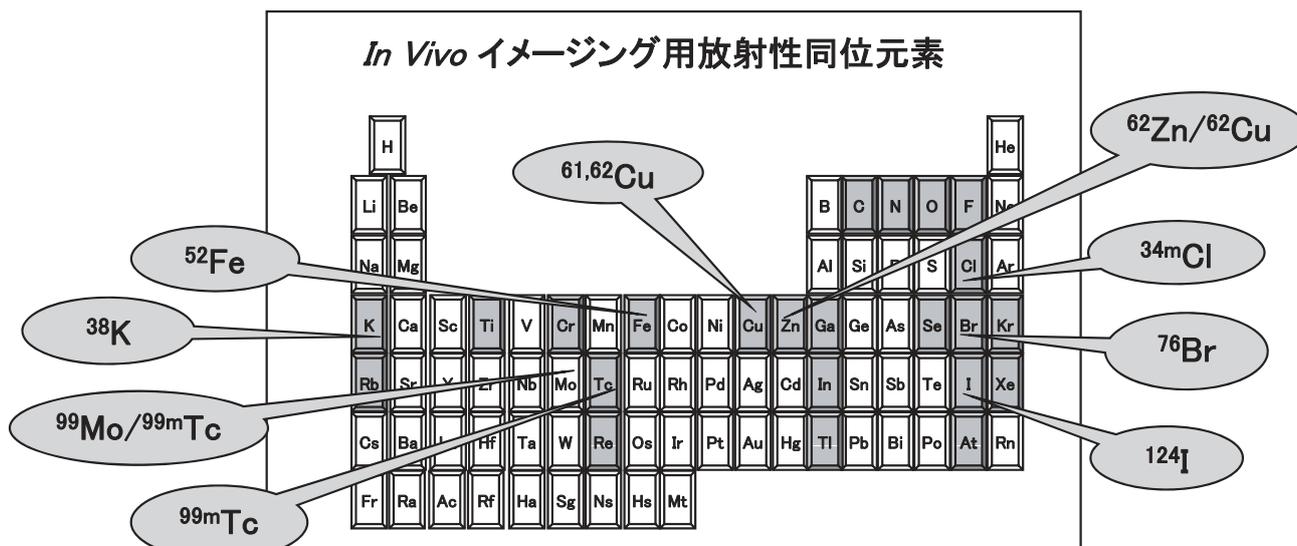
(4) テクネチウム-99m(Tc-99m)

核医学を支える二本柱であるポジトロンCT(PET)とシングルフォトンCT(SPECT)のうち, SPECTにおいて最も汎用されている放射性同位体がTc-99mである。Tc-99mは, 半減期6 hの低エネルギー γ 線放出核種であり, Mo-99との放射平衡を用いるジェネレータシステムによって供給されている。現在, Mo-99は原子炉において高濃縮ウランの核分裂生成物からの分離精製により製造されている。その製造には, 放射性同位体製造専用原子炉, 兵器級高濃縮ウラン, 高レベル放射性物質取扱施設, 大量に発生する核廃棄物処理施設等が必要となるため, 世界中でも数か所でのみ製造されており, わが国で用いられているMo-99は100%輸入に頼っているのが現状である。近年, これらの原子炉の老朽化が進行し, 故障や事故による供給停止や, 火山噴火による飛行機輸送の停止による深刻なMo-99供給不足が発生するに至っている。Mo-99/Tc-99mの国産製造は, 医療分野における安全保障問題として解決すべき喫緊の課題である。

放医研では, 加速器によるMo-99/Tc-99m製造の可能性に着目し, 緊急時対策あるいは安定供給を支える一つの柱と位置付けて検討を開始し, 良好な結果を得つつある。

Ⅲ. おわりに

原子炉と加速器は, 放射性同位体の製造を支える2つの柱であり, 今後ともそれぞれの特徴を生かしつつ協調して科学の進展や健康の増進に寄与していかねばならない。放射線医学総合研究所では, 分子イメージング研究センター内に設置された90 MeVサイクロトロン1基, 18 MeVサイクロトロン2基を活用し, 生物医学利用に適した放射性同位体の製造と利用展開を進めることにより, その責務を果たしていくための研究開発を推進している(第2図)。



第2図 これまでに報告されている *in vivo* イメージング用放射性同位元素(黒地)のうち、放医研で製造しているもの(吹き出し)

—参考資料—

- 1) *Nucl. Med. Biol.*, **33**[6], 821-7(2006).
- 2) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **98**[3], 1206-1(2001).

—著者紹介—

藤林靖久(ふじばやし・やすひさ)



(独)放射線医学総合研究所 分子イメージング研究センター
(専門分野)分子イメージング, 放射性医薬品化学, 核医学

From Editors 編集委員会からのお知らせ

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



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

- 「投稿の手引」「和文論文テンプレート」を
改定しました。

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

—最近の編集委員会の話題より—
(2月4日第8回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・英文論文誌の出版形態について検討し、2012年から電子投稿・審査、電子ジャーナル化の可能な大手出版社との共同出版に移行することを承認した、掲載料(審査料)、ページ料金は課す方向で検討。次回の理事会へ申請することとした。
- ・英文誌のインパクトファクター向上策について検討し、可能な部分から実施することにした。

- ・原子力学会賞論文賞に関して、会員資格廃止を申し入れることとした。また、編集委員会独自の表彰の可能性についても検討することとした。
- ・論文の著作権について、再検討することとした。
- ・J-Stageでの電子版の公開を、冊子体より早めることとした。
- ・英文論文のElsevier社の抄録データベースScopusへの登録を認めることとした。
- ・審査フォームの英語表記を修正することとした。

【学会誌関係】

- ・新法人移行に伴い、編集幹事会運営内規が見直され、編集委員会の担当グループ名称が一部変更され、4月1日より適用される。
- ・予算管理の一環として、4月号より学会誌の紙数管理を徹底していくことになった。
- ・2011年春の年会企画セッションより、学会誌記事として採用するに相応しいセッションを選出、担当委員を決めた。

編集委員会連絡先 <<hensyu@aesj.or.jp>>

次世代軽水炉(HP-ABWR/HP-APWR)の開発状況 中間評価と今後の開発計画

(財)エネルギー総合工学研究所 笠井 滋, 三菱重工業(株) 遠山 眞,
日立 GE ニュークリア・エナジー(株) 守屋 公三明, (株)東芝 飯倉 隆彦

2030年前後に見込まれる既設原子力プラントの代替炉建設需要の本格化に対応するため、2008年度から海外市場も睨んだ国際競争力を有する次世代軽水炉の開発を官民一体となって進めてきた。当初2年間の成果や進捗状況について、多面的かつ総合的な評価を行った。その評価結果を踏まえ、引き続き官民一体となって取り組むこととし、2015年までに基本設計を終了させることができるよう、概念設計、要素技術の開発および試験等を進めることになった。

I. はじめに

次世代軽水炉等技術開発は、我が国の代替炉建設の円滑化、原子力産業の国際展開と競争力の確保、それらを支える技術と人材の維持・強化に資するものとして、2008年度からナショナルプロジェクトとして本格着手した。また、2010年度上半期に中間的な評価のためのホールドポイント(HP)を設け、2年間の開発成果と進捗状況を評価し、その後の開発戦略へ反映することとした。

プラント概念の構築にあたっては、我が国の最新プラントである改良型沸騰水型軽水炉(ABWR)および改良型加圧水型軽水炉(APWR)を基に、さらなる改良発展をさせ、国内外のユーザにとって魅力あるプラントとすることを基本に開発を進めた。さらに、国際標準炉に向けて考慮すべき条件の検討を踏まえ、開発目標を設定して、プラント概念の検討を実施し、HP-ABWR(High Performance ABWR)とHP-APWR(High Performance APWR)のプラント概念を取りまとめた。

本稿では、この2年間の開発成果として、HP-ABWR、HP-APWRそれぞれのプラント概念と今後の開発計画等、主な中間的な評価結果を紹介する。

II. 次世代軽水炉の開発目標

国内ユーザの豊富な運転経験、海外のユーザ要件、競合炉の性能などを踏まえ、FS(2006~2007年に実施)にて設定した基本条件、安全性、経済性、社会的受容性、運営・運転・保全、国際標準の6項目について、最新の

Development Status of Next-Generation Light Water Reactors (HP-ABWR/HP-APWR) — Interim Assessment Report and Future Development Plan: Shigeru KASAI, Makoto TOYAMA, Kumiaki MORIYA, Takahiko IIKURA.
(2010年12月17日受理)

市場調査から国際標準炉として考慮すべき条件を整理し、開発目標(性能目標)とした(第1表)。

III. 次世代軽水炉の概要

1. 次世代軽水炉の特長

次世代軽水炉は、開発目標を達成するとともに、国内外のユーザにとって魅力あるプラントとする必要がある。このため、国際標準炉に向けた観点から市場調査を実施し、国内外のユーザの期待や着目点に基づいて開発目標の中から重点的に伸ばす要件を抽出し、次世代軽水炉の特長(魅力)として以下の3つに分類・整理した(第2表)。

(1) 経済性—建設単価・発電コストの低減

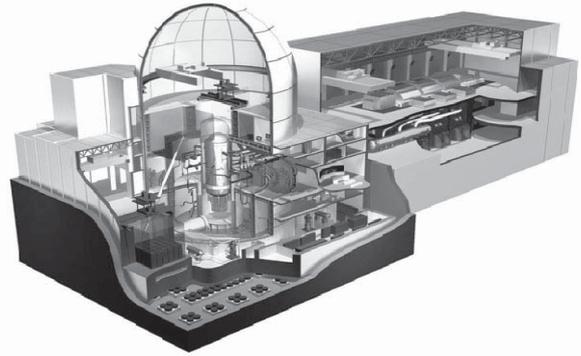
国内外ユーザ共に炉型選定の際、最も着目するのは建設費である。また、発電コストは、特に海外において他

第1表 次世代軽水炉の開発目標

項目	主な要件
1. 基本条件	電気出力 170万~180万kW 但し 170万~180万kW設計と共通技術を採用して標準化効果を阻害せずに80万~100万kWに対応可能なこと
2. 安全性	炉心損傷頻度 CDF < 10 ⁻⁵ /炉年 格納容器機能喪失頻度 CFF < 10 ⁻⁵ /炉年 過酷事故対策を設計上考慮
3. 経済性	建設単価: 約 13万円/kW (成熟機) 建設期間: 30ヶ月以下(岩盤検査~運転) かつ工期が遵守できること 時間稼働率: 97%(寿命平均)、24ヶ月運転サイクル 設計寿命: 80年 発電コストは他電源に対し競争力を有すること
4. 社会的受容性	事故時避難を要する確率: 短期的避難 ≤ 10 ⁻⁵ /炉年、長期的移住 ≤ 10 ⁻⁷ /炉年 地震・津波: 残余のリスクに対する裕度を確保 航空機落下: 0.1人・kg/年: 米欧の航空機落下と同等リスク対策に対応可能なこと 従業員安全: 個人線量 ≤ 5mSv/年、年度線量 ≤ 0.1人・Sv/炉年
5. 運営・運転・保全	保守物量: 現行プラントの50%削減 保守性向上、保守負荷の平準化 炉心設計: 取出平均燃焼度 70GWd/t、全炉心 MOX に対応可 新技術はプラント導入時までに十分な成熟度を有すること
6. 国際標準	米欧及び欧州の許認可、規格基準へ対応可能なこと 立地条件によらない標準設計

第2表 プラント概念設計の基本方針

特長	項目	基本方針
経済性	建設単価低減の追求	大出力化によるスケールメリットの追求 プラント標準化
	発電コスト低減の追求	工期短縮（資本金低減） 大モジュール化工法 併進工事によるクリティカル工事の削減
安全性	世界最高水準の安全性（過酷事故や地震、セキュリティ等に対する裕度向上）	最終ヒートシンク多様化 安全設備多重性と分離設計強化 建屋免震化 建屋壁による防護（航空機落下対策）
	過酷事故対策	デブリ冷却設備等の設置
運営・運転・保全	運転し易く使いやすいプラント	保守性向上 保守を考慮した配置・系統構成 保守性に優れた機器導入
	保守物量削減	設備簡素化 保守計画（頻度・周期）合理化



第1図 HP-ABWR プラント概念

第3表 HP-ABWR の主要要目

基本条件	電気出力	1760MWe
	炉心熱出力	4700MWt
炉心・燃料	プラント熱効率	37%
	燃料集合体	大型（1.5K）格子
	取出平均燃焼度	70GWd/t 以上
	ウラン濃縮度	6～8%
	燃料体数	424体
原子炉冷却系・主蒸気系	MOX	Full MOX 対応可能
	再循環方式	強制再循環方式（RIP 10台）
	定格炉心流量	52.2×10 ³ kg/h
	蒸気温度	287℃
	原子炉圧力	7.17MPa
過渡事象対応		非常用復水器（IC）
工学的安全系	安全系統構成	動的3区分
	非常用電源設備	ディーゼル発電機（3台）
計測制御系		フルデジタル I&C
タービン系		70 インチ級最終翼
格納容器		鋼板コンクリート構造（SC 構造）
運転性・保守性	運転サイクル	24ヶ月
	設計寿命	80年
	設計稼働率	97%
	保守・保全	リスクベース運転中保守
外部事象	地震	免震（原子炉建屋単独または「カビン」建屋一体）
	航空機落下	航空機落下対策建屋
過酷事故対応		静的デブリ冷却設備、静的格納容器冷却系（PCCS）により PCV ノーベント
建設工期		30ヶ月（岩盤検査から運転開始まで）

電源に対する競争力の指標として原子力建設の意志決定における重要な因子となっている。このため、建設単価と発電コストを大きく低減させたプラントは、ユーザにとって大きな魅力となる。

(2) 安全性—世界最高水準の安全性

これまでに達成してきた安全性を確保しつつ、過酷事故対策に加え、航空機落下、地震や津波などの外的事象やセキュリティに対する裕度を向上したプラントが世界的にも望まれている。

(3) 運営・運転・保守性—運転しやすく使いやすいプラント

ユーザの豊富なプラントの運営や運転経験を反映し、保守性をさらに向上させた設計は、国内はもとより、海外への円滑な導入にとっても大きな魅力となる。プラント概念設計検討にあたっては、我が国の最新プラントである改良型沸騰水型軽水炉（ABWR）および改良型加圧水型軽水炉（APWR）を基にさらなる改良発展をさせるものとし、プラント概念設計の基本方針をまとめた。

2. 次世代軽水炉のプラント概念

(1) HP-ABWR のプラント概念

HP-ABWR の概念は、豊富な建設経験と運転実績を蓄積してきた ABWR をベースに、インターナルポンプ（RIP）、制御棒駆動機構（FMCRD）などの優れた特長を有する技術は踏襲しつつ、新技術の開発により魅力ある炉概念を確立した（第1図、第3表）。主な特長は以下の通りである。

(1) 経済性—建設単価・発電コストの低減

プラント出力は、主要機器の大型化[主蒸気隔離弁（MSIV）、ベント管等]による機器数増加回避、およびタービン系機器の高性能化、低圧損 MSIV や低圧損セパレータ等の採用によるプラント熱効率向上により、176万 kWe を達成できる見通しである。

建屋構成については、免震技術の導入により、サイトによる地震条件の差を免震装置で吸収し、上物構造を標準化させることで、立地条件によらない標準化プラント

とする。

建設工期については、その約40%を占め、クリティカルパスとなる格納容器工事において、鉄筋コンクリート構造に替えて鋼板コンクリート（SC）構造を採用し、原子炉格納容器（円筒建屋）と原子炉建屋（外側建屋）の併進工事を可能にするとともに、建屋低層化およびモジュール化を促進することで建設工期の大幅短縮（岩盤検査から運開まで30ヶ月）を図る。

次世代燃料（ウラン濃縮度6～8%）の採用と超高燃焼度領域における水素吸収を抑え、かつ腐食に強い被覆管材料を採用し、24ヶ月運転と超高燃焼度（70 GWd/t）を同時に達成する。さらに、BWR の特徴であるスペクトルシフト効果を最大限に引き出すために、炉心流量制御幅を約40%まで拡大させるとともに、スペクトルシフト燃料を用いることで、省ウラン化を図る。さらに燃料内二相流挙動解明技術の確立や、大型燃料の採用により燃料設計の自由度を拡大させ、炉心高度化を進め、更なる燃料サイクル費の削減を図る。

(2) 安全性—世界最高水準の達成

設計基準事故に対しては、実績のある動的3区分構成の安全系により早期に事故収束を図る。過渡事象対応として、高圧注水系に代えて静的機器である非常用復水器(IC)を採用し、信頼性の向上を図る。さらに、航空機落下、2次被害として火災や溢水等への対応力強化策として、安全系設備を系統ごとに物理的障壁を設置して免震建屋内に完全分離配置とする。また、航空機落下対策については原子炉格納容器(PCV)や燃料プール等、冗長性を有しない安全系設備を構造強化により防護する。

また、過酷事故に対しては、炉心溶融時の格納容器の耐性を強化する観点から、静的デブリ冷却システムによる下部ベDESTAL領域での溶融デブリの保持・冷却および静的格納容器冷却系(PCCS)を用いて崩壊熱除去することで、事故時の格納容器閉じ込め機能を維持(PCVノーマント：事故時に格納容器から放射性物質の放出をさせないようにし、格納容器内において事故を収束させる)し、放射性物質の環境放出を抑制する。

(3) 運営・運転・安全性—運転しやすく使いやすいプラント

大型燃料の採用による燃料体数の削減により、定検時の燃料取扱作業、制御棒交換頻度を大幅に低減させる。一方、運転・保守時の従事者被ばく線量については、原子炉系は高温浄化技術、材料表面改質技術(放射性物質付着抑制)、水化学制御技術(放射性物質発生抑制)、タービン系はN-16移行低減技術による線源低減とプラントデジタル化技術(TMS：トータルマネジメントシステム)による保守作業の効率化により大幅低減を図る。

プラント運用についてはTMSを用いて、プラントライフを通し、電気事業者とメーカーが有するデータベースのネットワーク化を図るとともに、収集・蓄積された情報の共有化により、ヒューマンエラー防止、保守物量低減、経年劣化等による不適合低減、運転中保守の適用拡大を図り運用性を向上させる。

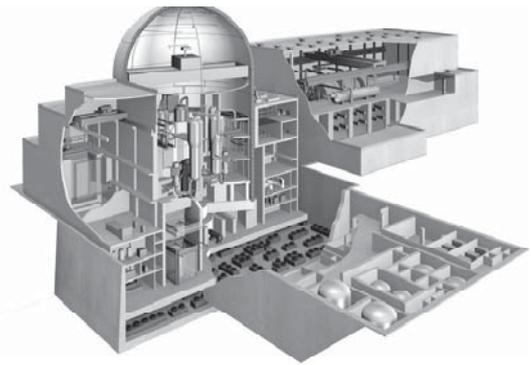
また、取替に伴うプラント停止期間が長期化する部位で、かつ次世代軽水炉での中性子照射増大の影響を大きく受ける部位としてシュラウドに廃棄物低減の観点からも80年交換不要な材料を適用する。

(2) HP-APWRのプラント概念

HP-APWRの概念は、良好な運転実績と建設実績を蓄積してきたPWRをベースに、APWRで取り入れた炉心や蒸気発生器などの大型化と信頼性向上技術を継承しつつ、新技術の開発により魅力ある炉概念を確立した(第2図、第4表)。主な特長は以下の通りである。

(1) 経済性—建設単価・発電コストの低減

炉心熱出力はAPWRと同等ながら世界最高熱効率(約40%)により出力178万kWeを達成できる見通しである。炉心出口温度(T_{hot})を325℃から330℃に高め、高性能蒸気発生器、大型最終翼高効率タービンと大容量1



第2図 次世代PWR(HP-APWR)プラント概念

第4表 次世代PWR(HP-APWR)の主要目目

基本条件	電気出力	1780MWe
	炉心熱出力	4451MWt
	プラント熱効率	40%
炉心・燃料	燃料集合体	17×17 拡大ピッチ大型集合体, 14ft
	取出平均燃焼度	70GWd/t~90GWd/t
	ウラン濃縮度	6~8%
	燃料体数	221体
	MOX	Full MOX 装荷可能
原子炉冷却系・主蒸気系	ループ数	4
	冷却材流量	29,000 m ³ /h・Loop
	冷却材温度、圧力	炉心出口温度 330℃
	蒸気発生器	高性能蒸気発生器(稠密伝熱管配列、エコノマイザ付)
工学的安全系	安全系統構成	自律安全システム(空冷・完全分離 4 トレン + 高性能耐圧タンク)
	非常用電源設備	ガスタービン発電機(4台)
計測制御系		フルデジタル I&C
タービン系		70 インチ級最終翼低圧タービン
格納容器		船殻構造鋼板コンクリート構造
運転性・安全性	運転サイクル	24 ヶ月
	設計寿命	80 年
	設計稼働率	97%
	保守・保全	4 トレン安全系による運転中保守可能
外部事象対応	地震	免震設計(格納容器及び原子炉建屋)
	航空機落下	航空機落下対策建屋
過酷事故対応		格納容器冷却設備の多様化 炉心溶融デブリ冷却 (IVR)
建設工期		30 ヶ月(岩盤検査から運転開始まで)

次冷却材ポンプを組合せて高い経済性を実現する。

原子炉建屋には、立地地域ごとに異なる地震条件の差を免震装置で吸収させる免震設計を導入することにより、立地条件によらないプラントの標準化を図る。

原子炉格納容器には、造船で培った技術を活用した船殻構造鋼板コンクリート方式の超大型モジュール工法を採用するほか、超大型複合モジュール工法を全面的に採用し、建設工期の大幅な短縮(岩盤検査から運開まで30ヶ月)と建設費の削減を図る。

高度化炉心として、超高燃焼度化燃料(取出平均燃焼度70 GWd/t 以上)、中性子減速環境を最適化した燃料集合体を採用し、24ヶ月運転サイクルによる稼働率97%の達成、燃料サイクルコストの低減を実現する。超高燃焼度化燃料には、長期照射と冷却材の高温化に耐え得る革新的な被覆管材料(Zr系、ステンレス鋼系)を適用する。また、高性能蒸気発生器には、エコノマイザと稠密伝熱管配列を採用し伝熱効率を向上させる。蒸気発生器伝熱管材料には、長寿命化および放射性腐食生成物低減

を狙った新材料を適用する。

(2) 安全性—世界最高水準の達成

安全系には、大気を最終ヒートシンクとする簡素な冷却サイクルである自律安全系を開発し、高い信頼性と安全性の強化を図る。この自律安全系は完全分離4トレン構成(システムをトレン毎に分離するとともに、物理的に分離した建屋区画に配置)をとり、多重性を強化するとともに、海水を最終ヒートシンクとする常用冷却系を合わせ、冷却システムの多様性を確保し信頼性を大幅に向上させている。加えて、安全設備を免震構造の原子炉建屋に完全分離配置し、テロや航空機落下、地震、津波、火災、溢水等の外的事象への対応を強化する。なお、航空機落下対策には、原子炉格納容器を含む原子炉建屋壁の強化により対応する。

過酷事故に対しては、常用冷却系も活用して炉心冷却や格納容器減圧に対する多様性を確保しつつ、炉心溶融デブリの冷却対策を強化する。また、海外における規制に応じた対策も取り入れることが可能な設計としている。

(3) 運営・運転・保全性—運転しやすく使いやすいプラント

設備の簡素化による設備数の削減、安全系の完全分離4トレン構成による運転中保守、ガスタービン非常用発電機などの保守性に優れた機器の採用により、保守負荷の平準化と保守作業の効率化を図る。さらに、プラントデジタル化技術(TMS)を採用する。これはプラントの設計、建設、保守、廃炉の各段階における活動に必要なあらゆる情報をデータベースとして一元管理し、電気事業者とメーカーが収集・蓄積された情報を共有することにより、ヒューマンエラー防止、保守間隔の最適化、運転負荷の合理的低減を図る。

3. 電気出力80万~100万 kW 級への対応

HP-ABWRは、主要機器であるインターナルポンプ台数を10台から6台構成として単機容量を変えずに基数を低減し、安全系・常用系については、基本的に区分数や系統構成は変えずに94万 kW 級へ対応する。

HP-APWRは、4ループ構成である次世代プラントを2ループ化することにより85万 kW 級に対応する。これにより、大型炉である次世代軽水炉の特性をそのまま踏襲し、当該規模の最新プラントに比較し高性能化を図ることが可能である。また、建設単価は、熱効率向上、主要機器の基数削減や容量低減により、当該規模の最新プラントに比較し大幅な低減が可能である。

4. 要素技術開発

次世代軽水炉のプラント概念の成立に必要な要素技術の一覧を第5表にまとめる。これまでの約2年間の開発は、プラントメーカーが主体となり、電気事業者のほか、大学等の有識者、関連する燃料メーカー、材料メーカー、建築会社等の参画を得た我が国の総力を挙げた取組みにて実施してきており、技術の成立性や実用化見通し等の

第5表 要素技術開発一覧

特長	適用先	要素技術	備考
建設単価・発電コスト	共通	超高燃焼度燃料の実用化研究 (97濃縮度 5~10wt%) 免震装置の実証	
低減の追求	BWR	BWR 超高燃焼度燃料の開発 スペクトルシフト燃料の開発 高性能炉心燃料内気液二相流挙動解明試験技術開発 原子炉内流動試験及び解析手法開発 SC 構造格納容器の開発	2010年度~ 新規
	PWR	PWR 超高燃焼度燃料の開発 高度化炉心の開発 蒸気発生器伝熱管材料の開発 高性能蒸気発生器の開発 船殻構造格納容器の開発	新規 新規 新規
世界最高水準の安全性	BWR	静的格納容器冷却系のシステム挙動試験 静的デブリ冷却システムの除熱特性基礎試験 大口徑ベント管動荷重試験	新規 新規 新規
	PWR	自律安全系の開発 炉心溶融デブリ対策 (IVR) の研究	新規 新規
運転しやすく 使い易いプラント	共通	プラントデジタル化技術の開発 (TMS)	~2010年度
	BWR	炉内構造部材開発 材料・水化学技術の高度化	
	PWR	二次系水化学技術の開発	新規

ホールドポイント(HP)までの目標を達成することができた。また、プラント概念成立に必要な要素技術ごとに、開発課題、今後の開発計画等を取りまとめた。

IV. 導入シナリオと開発全体ロードマップ

次世代軽水炉の円滑な導入を図るため、市場導入時期、開発スケジュール、安全規制と規格基準の整備や技術の成熟化等の実用化に向けた取組みなどについて相互に整合性をとり、全体を効率的、戦略的に進める道筋を描いたシナリオを策定した。

プラント全体の開発プロセスは、2015年までに基本設計完了、その後、詳細設計と個別・製作設計を2025年までに完了させ、2026年から安全審査、工認、建設・試運転を経て2030年に運転開始が可能なものとする。このため技術開発と同時に、規制と規格基準等の整備を一体的に進める。個々の開発技術については、その成熟度を高め、許認可建設に係るリスクを低減するとともに運開後の高稼働率維持を図る必要がある。このため、実用化に向けた確認試験や検証・確認試験等を計画的に実施する。また、導入条件の整った要素技術は、順次、可能な限り速やかに実機に先行適用し、許認可や製造・建設実績、運用ノウハウを蓄積していく。なお、長期の開発を要する燃料および一部の炉心技術等を除き主だった技術を集積したプラント(プレ次世代軽水炉)は、2024年度末頃には実現を目指す。

導入シナリオに基づき、プラント全体の開発計画、要素技術の開発計画、これらと一体的に取り組むべき安全規制および規格基準の整備計画についても整合性をもって検討を行い、開発全体のロードマップをまとめた(第3図)。



第3図 導入シナリオ

V. 安全規制および規格基準の整備

優れた安全性や経済性等の次世代軽水炉の特長や性能を最大限発揮するためには、技術や運用等と整合した安全規制および規格基準が必要である。このため、必要となる安全規制および規格基準を、性能目標達成や新技術の実用化の観点から既存炉に対する検討例も参考にして抽出し、規制や規格基準の整備に係る課題とその取組みをロードマップにまとめた(第6表)。

また、次世代軽水炉導入に向けての課題について、規制機関と意見交換を進めてきた結果、基本政策小委員会報告書において、次世代軽水炉への規制上の対応や設計認証制度の効果や必要性等の検討について記載され、規制側においても検討課題として認識された。今後、さらに規制機関との対話を深め、規制機関の取組みについて本開発の立場から提言し早期に規制機関のロードマップに位置付けられるよう働きかける等、着実な取組みを図る計画である。

VI. 目標達成度の評価

構築したプラント概念については、開発にあたり設定した開発目標を達成しているか、また、国内および海外ユーザにとっても魅力的な国際標準炉となり得るものか評価した。次世代軽水炉の開発目標に対しては、建設単価を除き、おおむね達成できる見通しを得た。すなわち、

第6表 安全規制および規格基準整備に係わる課題と取組み

分類	検討対象項目	課題、取組の概要
(A) 新技術の適用にあたって安全規制や規格基準の新規策定や更改が必要となるもの	次世代軽水炉燃料 免震技術 新材料(伊織材、蒸気発生器 伝熱管等) SC構造格納容器等	■現行規制の評価条件や解釈の明確化、民間規格基準の新規策定や追加改訂を行う必要がある ■民間規格基準を整備し、規制側のエンドースを得る(開発段階にて整備に必要なデータを合理的に取得)
(B) 運営・運転・安全性の改善に関するプラントの特長・性能の発揮のための必要となるもの	合理的な検査制度 機器の保守間隔延長等	■次世代炉の目標である建設期間、稼働率等を達成するため、現行規制上の取組の明確化等が必要 □建設段階では、合理的な検査等による期間短縮が前提 □運転段階では定検期間短縮と24ヶ月サイクル運転が前提 ■既設炉に対する最近の課題として検討が進められており、それら活動も踏まえて取り組む
(C) 国際標準炉として相応しい科学的・合理的な安全規制体系など戦略的な見直しが必要なもの	設計認証制度 国際的な安全規制の調和活動(MDEPIAEA等)	■設計認証制度は、審査の充実・効率化を図りつつ、立地計画から運開までの期間短縮など円滑な導入に寄与 ■国際的な安全規制の調和は各国規制水準の差が縮まり円滑な海外展開が期待できる ■法令の枠組みの変更や、国際的な取組みが必要となるため、利害得失を整理し方針を策定したうえで進める

次世代軽水炉は、HP-ABWR/HP-APWR 共に実績のある技術や経験を継承しつつ、大出力化、建設費低減、建設工期短縮を実現している。このことから、次世代軽水炉は現行最新のプラントに比べても十分優位性があると評価した。

最後に総合評価として、次世代軽水炉開発プロジェクトに対して多面的かつ総合的な評価を行い、国内外のユーザにとって魅力的な経済性、安全性等の特長を有するものと評価した。

VII. おわりに

本開発は、今回報告した中間評価結果を踏まえ、今後、引き続き、開発を継続していくことになった。原子力委員会からもこれまでの取組みは適切に推進されてきたと評価され、中間評価で取りまとめた取組みを着実に推進していくことを期待するとの見解が示されている。

今後、これらの期待に応え、中核機関、メーカ、電気事業者、国が連携して応分の役割を担い、さらに規制機関や大学、研究機関などの関係者も含め、我が国の総力を挙げた体制にて取り組んでいくこととしたい。

なお、中間評価報告書は、(財)エネルギー総合工学研究所ホームページに公開しているため、参照していただきたい。

—参考資料—

- 3000-10-IAE-0001「次世代軽水炉等技術開発に係わる中間評価報告書—約2年間の開発に対する評価と今後の開発の在り方について」、エネルギー総合工学研究所、平成22年7月29日。
- 「次世代軽水炉等技術開発に係る中間評価報告書」に対する講評、次世代軽水炉等技術開発評価委員会、平成22年7月28日。
- 「次世代軽水炉開発の今後の取り組みについて」、経済産業省、電気事業連合会、東芝、日立GEニュークリア・エナジー、三菱重工業、エネルギー総合工学研究所、平成22年7月29日。

著者紹介

笠井 滋(かさい・しげる)
 (財)エネルギー総合工学研究所
 (専門分野/関心分野)燃料・炉心設計, エネルギー問題

遠山 眞(とよやま・まこと)
 三菱重工業(株)
 (専門分野/関心分野)原子力プラント安全設計, 原子力技術一般

守屋公三明(もりや・くみあき)
 日立GEニュークリア・エナジー(株)
 (専門分野/関心分野)次世代エネルギー技術開発, 原子力プラント安全設計/熱流動

飯倉隆彦(いいくら・たかひこ)
 (株)東芝
 (専門分野/関心分野)バックエンド, 流体工学, 動力エネルギーシステム

講演

フェニックスから「もんじゅ」へ：高速炉開発と日本の役割

(1) 高速炉開発におけるトラブルと開発への影響

日本原子力研究開発機構 此村 守

高速炉開発に限らず、開発過程においてトラブルが生ずることを常に考え、そのリスク管理を行うことは技術開発に携わる者の常識とあってよい。一方、トラブルは設計を進歩させ安全性の向上に有効であることは間違いない。しかし、トラブルという結果がなくとも、当事者の技術的な想像力と、それを生かす継続的なリスク管理により安全性の向上を図ることができる。

I. 高速増殖原型炉の開発経緯

高速増殖炉の開発は第1図に示すように1940年代に米国で始まった。1940年代から1950年代にかけて米国では高速増殖炉の炉心冷却材として種々の材料を調査し、一部は実際に小型の原子炉を建設・運転し、1960年代には高速増殖炉の冷却材としてナトリウムを選択するに至った。高速増殖炉の動作原理を確認する「実験炉」を経て、「原型炉」と呼ばれる実用炉一步手前の原子炉を1970年代に計画した。これがクリンチリバー高速増殖炉(CRBR)である。CRBRは設計・一部建設まで進んだが、カーター大統領の核不拡散政策を端緒として中止された。

日本ではCRBRとほぼ同時期にCRBRの設計・許認可経験を生かした日本の自主技術に基づく高速増殖原型炉「もんじゅ」の設計が開始された。建設は順調に進み、1994年に臨界となり、性能試験段階となった。しかし、1995年に2次系ナトリウムの漏洩事故を起こし、以来14年5ヶ月の間、停止し、本年5月に性能試験を再開した。

フランスではフェニックスが高速増殖原型炉として1973年に臨界となって以来、運転を続けてきたが、奇しくも「もんじゅ」が運転を再開した本年に運転を終了し、その使命を終えた。

II. 原型炉の開発とトラブル

これらの「原型炉」は厳格なかつ透明性のある安全規制体系の中で許認可を取得し運転されてきている。しかし、残念ながらトラブルはゼロではなく、いくつかのト

ラブルに見舞われている。これらのトラブルから学習した点は後発の原子炉の設計に生かされている。

「もんじゅ」の設計段階においては、例えば、米国・高速増殖実験炉であるフェルミ炉での燃料溶融の原因となった燃料集合体の冷却材流入孔の形状について、物理的に閉塞が生じないような形状を採用している。

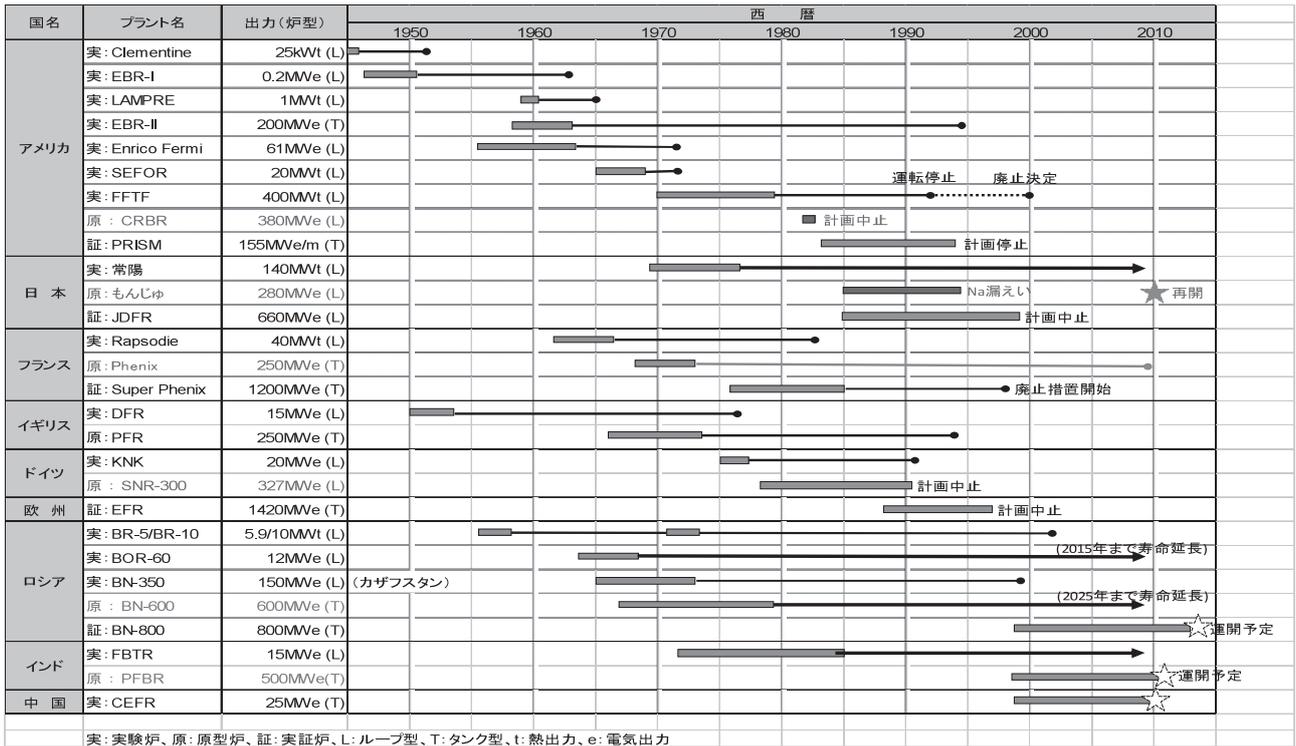
また、「もんじゅ」が長期間停止する原因となった2次系ナトリウムの漏洩事故からは、ナトリウムの化学的な性質に着目した「ナトリウムバウンダリー」の概念を明確にした。これは原子力安全で対象とする放射線安全としての「原子炉冷却材バウンダリー」とは異なる概念である。高速増殖炉の場合、放射化した1次系ナトリウムが「原子炉冷却材」であり、これが格納される原子炉容器、1次系配管および中間熱交換器の伝熱管までが「原子炉冷却材バウンダリー」である。一方、非放射性の2次系ナトリウムは、この放射化した1次系ナトリウムと蒸気発生器の水とが直接接触することを防止するために設けられており「原子炉冷却材」ではない。しかし、「もんじゅ」の2次系ナトリウムの漏洩事故により、ナトリウムの化学的な性質に基づく燃焼が原子炉施設に及ぼす影響を原子力安全とは別に考える必要が明確となり、「ナトリウムバウンダリー」という概念を導入した。したがって、「原子炉冷却材バウンダリー」である加圧水型軽水炉の蒸気発生器の伝熱管の破損による影響と、「原子炉冷却材バウンダリー」ではない高速増殖炉の蒸気発生器の伝熱管の破損による影響とは原子力安全の観点からは全く異なるものである。

さらに、フランス・フェニックスでもトラブルが発生しており、これらは逐次、日本とフランスとの専門家による情報交換の場で討議され、「もんじゅ」の運転・保守に反映されている。

このような経験から、事業者としては、「トラブルは

Phenix to Monju: FBR Development and Japan Role ; (1) Incident in development of FBR and its effect on the development : Mamoru KONOMURA.

(2010年 10月 4日 受理)

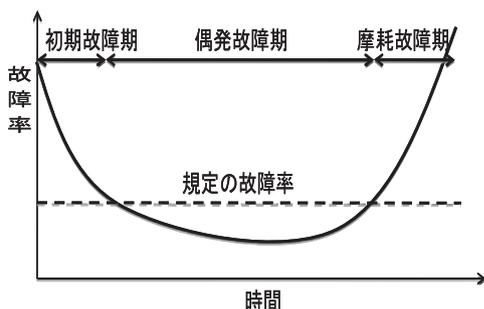


第1図 世界の高速増殖炉の開発状況

常に起こりえる」という意識で運転していくことが大切である。トラブルの原因としては、機器等の取扱いのミスや機器の自然故障といった「即発的なエラー」と、設計・製作段階でのミスや保全作業時の作業員のミスが運転されるまでは明確にならないといった「潜在的な原因」とが挙げられる。また、「もんじゅ」のような研究開発過程にある原子炉のトラブルでは、経験が少ない機器のためトラブルを予測するための故障データが少ないこと、また、第2図に示すようなバスタブ曲線の初期故障期での故障率が大きいことが特徴である。

これらのトラブルの発生を防止するために対策が取られるが、この対策の考え方として「深層防護」と「自動化」の2点が重要である。

「深層防護」は、防護のために異なる考え方を組み合わせ、それぞれの考え方のみでも防護できる能力を持たせ、さらにこれらの考え方を実現させる機器を複数設けたり、種類を変えて設けたりして、手厚く守るという方法である。原子力プラントでは広く採用されている考え



第2図 故障率と時間との関係

方であり、この場合、運転時には設計段階で想定された運転方法を守ることが大切である。「自動化」は、人の関与を排するという考え方であり、これも原子力プラントでは広く採用されている。

しかし、トラブルを防止するには、これらの考え方の問題点も把握しておくことが大切である。「深層防護」では、例えば保守を行った作業員のエラーにより、予測できない共通の原因による故障の可能性が増大したり、一つの機能を複数の同じ機器で果たさせているために、そのうちの一つの機器が故障しても全体にはその影響は現れずシステムの挙動が運転員に理解されにくくなるという問題がある。これはエラーや不具合の影響がすぐに現れないため、これらの欠陥を見落としたまま運転を継続するという問題につながる。

「自動化」では、設計段階では想定していないトラブルとなった場合に、自動化に基づく結果を人間が理解できるだけの時間がなくなり、人が対応することを困難にするという問題につながる。

それでは、このような考え方を駆使して設計・運転される原子炉について、トラブルや事故を防ぐにはどうすればよいのだろうか。事業者の視点からは、潜在的な原因を除く努力を継続的なプロセスとすることである¹⁾。このために、人的モデル、工学モデルおよび組織モデルという方法論がある。また、稼動している原子炉の安全上の重要性を相対的に示す指標としてリスク解析がある。この両者を組み合わせたリスク管理を継続的なプロセスとすることにより、トラブルや事故の発生を最小限にとどめることが期待できる。

冒頭で述べたトラブル対応の例のように、トラブルは設計を進歩させ安全性の向上に役立つことは間違いない。しかし、トラブルがなければ安全性の向上は図れないかというところではない。トラブルという結果がなくとも安全性の向上を図ることは可能である。それは当事者の技術的な想像力と、それを生かす継続的なリスク管理を行うことである。

Ⅲ. 公衆から見たトラブル

ここで視点を事業者から公衆に変えてトラブルを考えてみたい。公衆にとりトラブルは「不安」の元凶である。この「不安」を食品不安の観点から、日本学術会議副会長の唐木英明氏が示唆に富む話をされている²⁾。

人は、安全や安心よりも、危険や不安に対して大きく反応する。それは動物である人間にとって「危険から逃れる」ための判断が一番大切だからである。この判断は一瞬でしないと命が危ないため、直感で判断して行動する。そのため、危険情報や食料などの利益情報には反応するが、安全情報は反応しなくとも実害がないためほとんど無視される。また、経験者以外が自分で判断したら死ぬことになるため信頼する人に従う。さらに、理性的な判断は時間がかかるため前例に従うといった行動様式が生まれることになる。このような人間の根源的な特徴を踏まえると、本当に「危険」なことは、科学的根拠のないことを信じること、そして人間の本能を利用して危険情報を氾濫させることといえる。先生は、これを避けるには、情報が本当か疑い、自分で確認することが重要であると述べられている。

原子力に対する漠然とした不安もその根は実は同じではないかと思われる。しかし、原子力という簡単には理解できないことの「確認」をどうすればよいのだろうか。

事業者がなすべきことは、「確認」に必要な情報を細大漏らさず公表すること、すなわち公衆が知りたいことを包み隠さず提示する姿勢を貫くことであり、透明性に対して疑念を抱かれないように努めることである。

一方、公衆にとって、理解できないことを「確認」する方法としては、事業者の誠意あるいは技術能力に着目すればよい。具体的には、透明性が確保されているか。トラブルの発生がないか。トラブルが避けられない以上、発生したトラブルを事業者は技術的に理解しているか。これは言い換えればどのような質問にもきちんと矛盾なく回答しているかとも言える。そして、技術的な改善を図ったか。これらの着目点がすべて実行されていれば、その事業者は信頼に値するといえる。

それでは、「もんじゅ」の性能試験再開時はどうであったか見ておきたい。性能試験の第一段階である「炉心確認試験」時において、32項目のトラブルが発生している。これらは即日で外部に情報発信し、技術的意味についても説明している。これらのトラブルの中で原子炉プラン

トの安全性を脅かすものはなかった。「もんじゅ」は研究開発段階にあるため、高速増殖炉用に開発中の検出器がトラブルの原因になったり、またプラントのある部分の挙動がそれまでと変わったことを運転員に単純に認識させるためだけに警報が鳴ったりしている。これらは冒頭に述べたバスタブ曲線の初期故障期にあたるものであったり、あるいは本来100%出力運転まで見た上で設定されるべき警報レベルを、未調整のまま運転せざるを得ない性能試験段階であるために生じたものであったりしている。

このような段階で公衆の信頼を得る上で事業者がなすべき重要なことは、透明性を確保すると同時に、発生したトラブルの技術的な意味を述べることである。現在の設計・運転管理の下で原子炉の安全に影響を及ぼすような事故が生ずることは極めて少ない。このような状況では発生したトラブルは安全とは無関係であるとして切り捨てられてしまう可能性がある。しかし、単純な初期故障として機器の調整で終わらせてしまってもよいトラブルと、安全には直接影響しないが運転上再発を防止すべきトラブルとを区別し、後者について技術的な対応を図っていくという態度を示し続けることが重要である。

このような観点から「もんじゅ」で発生した32項目のトラブルを見てみると、5月27日に発生した「補給水タンク水位高」警報の発報が後者に該当するトラブルであるといえる。また、透明性を確保する方法として、第3図に示すように、トラブルに関するすべての情報をホームページに掲載し、知りたいと思う人にすべての情報が届くシステムを運用することも意味がある。なお、第3図には日本原子力研究開発機構のホームページから本稿で対象とした情報にアクセスする手順を示した。

Ⅳ. まとめ

トラブルは避けられない以上、事業者の行動様式としては、その負の側面を正に転換させる技術的努力を強力に推し進めることと同時に、公衆の安全を第一に考えて行動しているという透明性を維持することに軸足を置くべきである。その結果として、フランスのナトリウム冷



すべての情報をホームページにて公開：
<http://www.jaea.go.jp/>

第3図 炉心確認試験に関する情報の公開

却高速増殖炉フェニックスが閉鎖された現在、技術的貢献を国際的に期待されているという事実を踏まえ、「もんじゅ」をきちんと動かすこと、すなわち将来の世代が準国産エネルギー源を確保するための完成度の高い技術選択肢を残すという大変価値のある技術開発を推し進めることができる。

—参考資料—

- 1) ジェームズ・リーズン, 組織事故, 日科技連, (1999).
- 2) 唐木英明, “食品不安の時代”, 学士会会報 第880号, (2010).

著者紹介

此村 守(このむら・まもる)



日本原子力研究開発機構 FBR プラント
工学研究センター
(専門分野/関心分野) 炉心動特性解析, プラント設計

新刊紹介

地球システム環境化学

鹿園直建著, 266 p. (2010.10), 東京大学出版会.
(定価5,670円) ISBN 978-4-13-060755-1

近年, 地球温暖化, 気候変動, 土地利用改変(土地利用状況の変遷), 越境汚染等の地球環境問題および地球の資源に関連する問題は, これまでの社会環境の持続的な発展のために解決しなければならない重要なテーマである。

本書では, 地下環境を含めた地表環境を対象に, 地球環境・資源問題についての科学的理解を得るために必要な基礎的な事象と基本的な考え方を紹介している。具体的には, 地球表層で起こっている現象について, 化学的な視点から, ミクロ(岩石と水との反応)からマクロ(地球規模での物質の循環)までの環境領域を対象に解説している。

第1章では, 地球表層システムの概要を示し, 第2章では, 地球表層環境における物質の反応場として水と土壌・岩石に着目し, 鉱物の溶解度, 酸化還元条件, 元素分配等について, 化学平衡論として取りまとめている。第3章では, 物質移動に関する支配要因[溶解・沈殿・吸着・拡散・バイオミネラリゼーション(生物による無機鉱物の生成)等]について, 対象とする環境ごとにまとめ, 説明している。第4章では, シ

ステム解析として, 地下水・土壌・熱水系・海水系での物質動態に関しての各種のモデルについて紹介している。つまり, 物質動態の基礎から解析までを詳細に解説している。第5章では, より大きな環境領域での炭素・硫黄・酸素・微量元素の地球化学サイクルについて説明している。第6章では, 地球表層での環境問題に触れ, その中で, 放射性廃棄物の地中埋設処分における地下環境の天然バリアとしての役割, 関係する現象を取り上げている。

このような構成は, 従来の地球環境関係の書籍と異なる。特に, モデル解析を組み込んだ点は, 物質動態を定量的な視点で評価検討することが重要であることが強調され, 地球環境問題を取り扱う基本スタンスとして貴重なメッセージである。これは, 著者のこれまでの授業を通しての経験に基づくものと考えられる。また, もう1つの特徴は, 地下を含めた地表環境における放射性核種の移行動態について述べられている点である。つまり, 環境の基礎を含めて放射性核種の環境での動態について体系的にまとめられている。大学院生レベルから理解できる内容であり, 関連分野の会員に一読をお勧めする。

(金沢大学環日本海域環境研究センター・長尾誠也)



講演

フェニックスから「もんじゅ」へ：高速炉開発と日本の役割

(2) 開発段階の高速炉の安全評価と規制の役割

原子力安全基盤機構 遠藤 寛

高速増殖原型炉「もんじゅ」は、1995年12月のナトリウム漏えい事故以後、運転を停止していたが、2010年5月6日に運転を再開し、炉心確認試験を完了した。今後、40%出力でのプラント確認試験や100%出力までの出力上昇試験が計画され、中・長期的には、高性能炉心や「もんじゅ」次期炉(高速実証炉)の安全審査が行われる予定である。原子力安全基盤機構(JNES)は、わが国のTSO(Technical and Scientific Support Organization)として、原子力安全・保安院(NISA)が行う各種の高速炉安全規制を多面的かつ積極的に支援している。

I. はじめに

2010年5月8日午前10時36分、日本原子力研究開発機構(JAEA)の高速増殖原型炉「もんじゅ」は、14年5ヶ月ぶりに臨界に到達した。その後、約3ヶ月間にわたる炉心確認試験では、1%以下の核出力条件で、余剰反応度や炉停止余裕などの安全上重要な炉心核特性が測定された。

原子力安全・保安院(NISA)は、炉心確認試験および今後の40%出力および100%出力試験など起動試験全体を立会い検査の対象として、安全な運転が確保されることを厳格に確認する計画である。起動試験を経て運転を達成した後は、高性能炉心の安全審査が、さらに中・長期的には、高速実証炉の安全審査などが今後の高速炉の規制課題となる。

原子力安全基盤機構(JNES)はわが国のTSO(Technical and Scientific Support Organization)として、NISAが行うもんじゅおよび高速実証炉の安全規制を多面的かつ積極的に支援している。本稿では、ここ数年間にわたりJNESが行ってきたもんじゅの安全規制支援活動と関連する安全研究の成果を紹介する。また、もんじゅ高性能炉心や高速実証炉の安全規制への取組みの考え方について述べる。

II. 高速増殖原型炉「もんじゅ」に対する安全規制支援

1. もんじゅの燃料組成変更に伴う安全審査

運転開始前における規制活動は、燃料変更に伴う設置変更許可申請に対する安全審査、炉心設工認、アクシデントマネジメント(AM)策や保安規定の妥当性確認、保安検査や立入検査など、広範多岐にわたっている。

JAEAは、長期に保存した燃料の組成変更に伴って、2006年10月にもんじゅの設置変更許可申請を国に提出した。提出された設置変更許可申請に対し、NISAは、2007年7月に至るまでの約9ヶ月間にわたり1次審査を行った。JNESは、保安院の要請によって、設置変更許可申請の技術的妥当性の確認に協力し、約50回の技術審査に同席して、燃料設計、炉心設計、安全解析などの専門的知見に基づいて国が行う安全審査を支援した。

(1) 燃料、炉心設計の妥当性評価

燃料設計については、長期にわたる燃料の保管中に ^{241}Pu が崩壊し ^{241}Am が蓄積した効果に着目し、融点などの燃料物性への悪影響がないことを確認した。また、炉心設計については、JNES独自の解析コードを用いてクロスチェック解析を行い、最大線出力密度、ドップラー係数やナトリウム密度係数など、安全上重要な核特性を評価した。この結果、 ^{241}Pu の減少と ^{241}Am の増加によって冷却材密度係数やボイド反応度が増加するにもかかわらず、最大過剰反応度や炉停止余裕などが核的制限条件を満足することを確認した。

(2) 安全評価

ドップラー係数の絶対値の減少やナトリウム密度係数の増加などが、運転時の異常な過渡変化、事故および5

Phenix to Monju : FBR Development and Japan Role ; (2) Safety Evaluation and Regulation for the Fast Breeder Reactor in Japan : Hiroshi ENDO.

(2010年 11月 9日 受理)

項事象(発生頻度は極めて低いが結果が重大であると想定される事象)へ及ぼす影響を精査し、JNESによるクロスチェック解析も併せ、JAEAが行った安全解析結果の妥当性を確認した。

(3) 5項事象の評価

NISAは、2007年7月の第46回原子力安全委員会に1次審査結果を諮問し、原子炉安全専門審査会111部会において2次審査が行われ、2008年2月19日に、JAEAに対して設置変更を許可した。

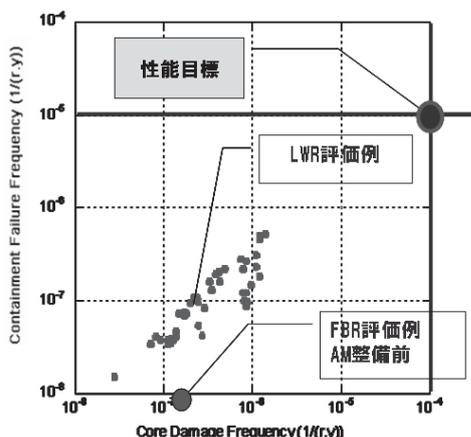
JNESは、2次審査においてもNISAに対する技術的支援を行った。特に、設置変更許可申請書添付書類十に記載された5項事象の一つである1次冷却材流量減少時反応度抑制機能喪失事象(ULOF)での機械的エネルギーに着目し、JNESは独自の解析評価を行った。この結果、「ULOF起因過程では有意な機械的エネルギー放出の可能性は僅少であり、むしろ遷移過程での評価が重要である」との結論を原子力安全委員会に報告した。

2. アクシデントマネジメント策の妥当性評価

JAEAは、もんじゅを対象としたAM整備を推進し、2008年3月にその整備結果をNISAに報告した。JNESは、レベル1および2のPSA(確率的安全評価)を実施し、JAEAが整備したAM策の技術的妥当性を評価した。

この結果、AM整備前においても、炉心損傷頻度(CDF)および格納容器機能喪失頻度(CFF)は、それぞれ、 2.7×10^{-7} /炉年、 9.2×10^{-9} /炉年と評価され、わが国の安全目標(案)に対応する発電炉の性能目標の指標値(CDF: 10^{-4} /年程度およびCFF: 10^{-5} /年程度)を十分下回っていることを確認した。また、AM策によってCDFおよびCFFの両者が低減されることを定量的に確認した。

わが国の軽水炉についてJNESが評価したCDF-CFF相関を、典型的な高速炉プラントと比較して第1図に示す。第1図に示すように、高速炉のCDFは軽水炉の平



第1図 CDF/CF 相関における軽水炉と高速炉との比較

均的なCDF値に対応している。一方、高速炉のCDFについては、ナトリウムの1気圧での沸点(約900°C)が水の沸点(約100°C)より大きいことに起因して、軽水炉のCCF値より約1桁程度小さい値を示すことが特徴的である。

3. 安全総点検結果の妥当性評価

JAEAは、2009年11月に「高速増殖原型炉もんじゅ安全性総点検に係る対処および報告について(第5回報告)」を国に提出した。NISAは、運転管理、設備改善、長期停止設備の健全性、新知見の反映などの観点から、その妥当性を総合的に評価した。

JNESは、これらの評価項目の中で、特に「長期停止設備の健全性に」に着目し、リスク情報を用いて、設備点検の妥当性を評価した。ここでは、FV重要度(対象機器の故障をなくした場合のCDF低減指標)およびRAW重要度(対象機器が故障した場合のCDF増加指標)を用いて、点検対象の充足性と検査方法の妥当性を評価した。特にFVおよびRAW重要度両者が大きい設備については、国の使用前検査が行われているなど、長期保管設備の健全性確認が適正に行われていることを確認した。

4. 本格的な運転段階での規制課題

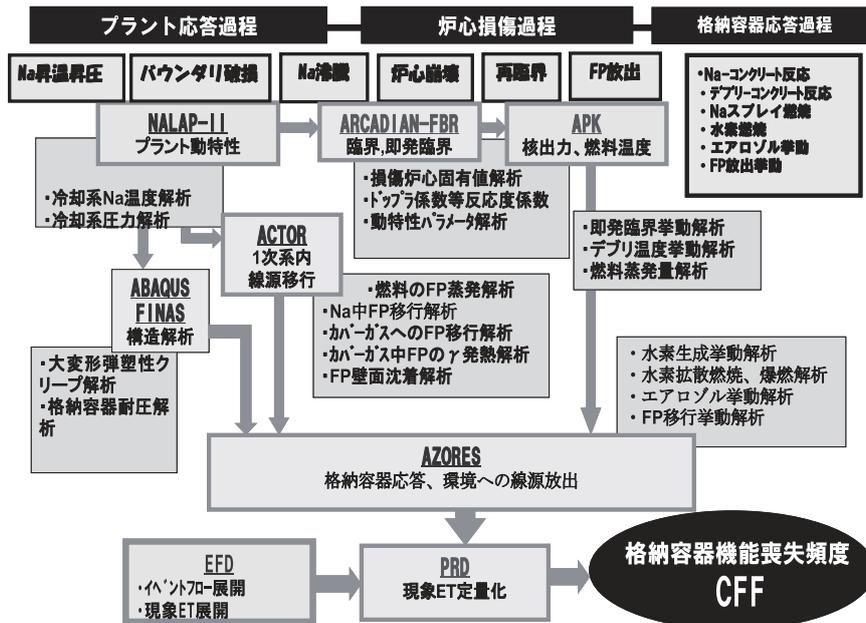
もんじゅの本格的な運転段階においては、リスク情報を用いた保安規定や保全計画の妥当性確認、水・蒸気系など長期保管設備の健全性確認、炉心およびプラント動特性試験の妥当性確認、起動試験の安全確保前の防災訓練、トラブル事象への対応等が重要な規制課題である。

Ⅲ. もんじゅ高性能炉心や高速実証炉での規制課題

1. 規制課題と安全解析手法の開発

もんじゅ炉心の高性能化においては、燃料や炉心変更に伴う安全審査が重要な規制課題である。ここでは、燃料設計の妥当性評価の観点から、燃料技術基準の整備が不可欠である。また、安全審査に伴う燃料の機械設計、炉心設計の妥当性評価や炉心損傷事故解析を含む添付書類十記載の事故事象の安全評価、PSAなどが課題であり、従来の安全評価手法を高度化する必要がある。JNESでは、主要な安全解析手法の整備を計画的に進めている。第2図には、レベル2 PSAや炉心損傷挙動解析に用いる解析コード群を示す。

高速実証炉に関しては、燃料基準に加えて原子炉構造に係る合理的な技術基準の整備、5項事象の安全評価方針やナトリウム冷却高速炉に特有な線源評価方針など、安全審査要件の整備を進める必要がある。JNESでは、これらの安全審査要件について、試験研究など基礎的な研究も含め、広範な検討を行っている。



第2図 JNESで整備している安全解析コード群

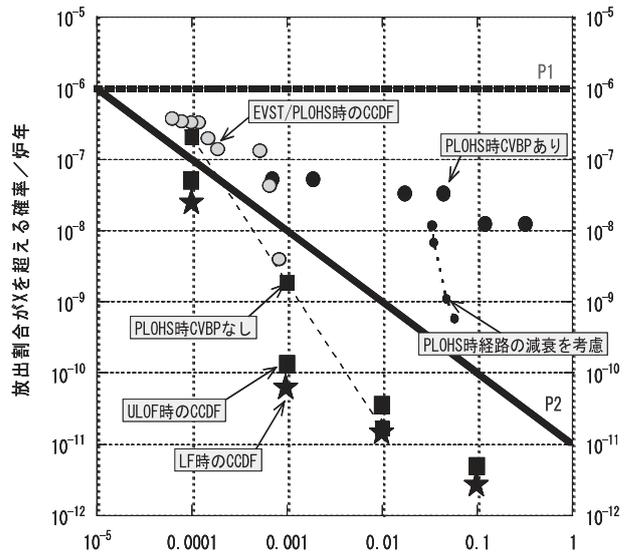
2. 5項事象の評価方針の検討

もんじゅの高速炉安全審査では、1980年に原子力安全委員会が策定した「高速炉の安全評価の考え方」に従い、「技術的には発生するとは考えられないが、高速炉の運転経験が少ないことを考慮してその事故影響を確認すべき事象」(5項事象)が定義され、ULOFなどの炉心損傷事象が選定されている。

高速実証炉の安全審査においても、「5項事象、あるいはこれと類似した事象概念」に基いて炉心損傷事故の評価が要求されるものと考えられる。JNESでは、典型的な炉型炉の内的事象を対象として、崩壊熱除去機能喪失事象(PLOHS)、ULOF、集合体事故(LF)、炉容器外燃料貯蔵槽におけるPLOHS(EVST)に対するレベル1および2のPSAを行い、これらの事象のリスクを比較し、高速実証炉の5項事象の評価論理を検討している。

本検討では、リスクの指標として、事故時の環境への放射性物質放出割合の超過確率(CCDF)を採用した。各事象のCCDFの評価結果を第3図に比較する。図中の直線P1は、INSAGやわが国の性能目標等の議論を参照して設定した環境への放射性物質放出割合の制限目安値[10⁻⁶/炉年]であり、P2は炉内インベントリーの1%放出に対し、3桁の余裕を考慮して設定した等リスク曲線である。

第3図に示すように、PLOHS事象では、1次/2次系間の境界破損に起因した格納容器バイパス事象(CVBP)が発生するため、評価事象中最大のリスクを示し、EVSTに起因するリスクはPLOHSに準ずる。しかし、ULOFやLFのリスクは、PLOHSの3桁以上小さくなり、CCDFは等リスク曲線P2を1桁以上下回る。したがって、CCDFをリスク指標とした場合は、原子



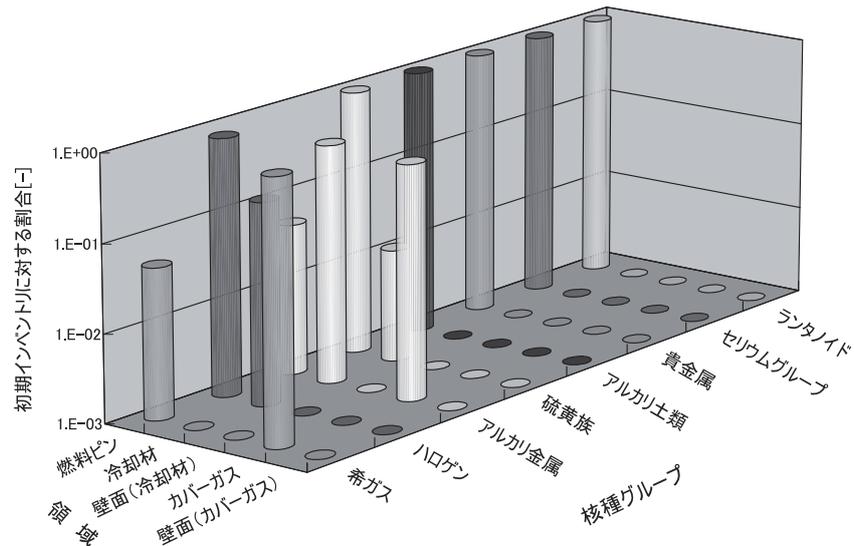
X, 炉内放射性物質の環境への放出割合
第3図 主要な炉心損傷事象のCCDF比較

炉本体および燃料貯蔵槽のPLOHSが5項事象の評価対象の候補になり得る。

3. 評価線源の検討

高速炉の評価線源の設定に関する規制課題として、ナトリウム(Na)と同族であるため気相への移行量が格段に大きいセシウム(Cs)の挙動とこれの位置づけが挙げられる。

CsはNaと化学的に類似した性質を有するアルカリ金属であり、Na中に溶解するもののNaと同等の蒸気圧で気相に放出される。第4図に、炉心損傷事故が生じた場合のカバーガス空間に放出される核分裂生成物(FP)の放出割合を示す。第4図に示すように、Csの放



第4図 燃料破損時の1次系でのFP分布

出量は希ガスについて大きくなる。一方、現在の評価線源で考慮されるヨウ素(I)は、Naと反応して蒸気圧の小さいNaIを形成するため、気相への移行量は極めて小さい。

現在のナトリウム冷却高速炉では、立地評価や重大・仮想事故での評価線源の設定において軽水炉の線源設定論理が踏襲され、Csの移行挙動の特徴が考慮されていない。このため、今後の高速炉の安全審査においては、Csの移行挙動の特徴を考慮した評価線源の設定論理を確立する必要がある。JNESでは、このような観点から、CS挙動に関する北海道大学との共同研究を行っている。

IV. まとめ

JNESでは、上述した研究開発段階炉(高速炉)に係る研究課題を、①設計・建設段階に必要とされる研究、②運転段階の安全確保に必要な研究、③規制の高度化に必

要な研究の3カテゴリーに分類し、もんじゅ、もんじゅ高性能炉心、高速実証炉の各システムへの反映先と研究工程、重要度と緊急度、大学での実施可能性などについて整理した。また、これらの課題について、本学会の熱流動部会に設置された「高速炉安全性」特別専門員会(主査：杉山憲一郎北大教授)において3年間にわたり議論し、広く原子力学会員に訴求できるロードマップとしてまとめた。これらの議論の結果は、学会報告書として出版予定である。

著者紹介

遠藤 寛(えんどう・ひろし)



原子力安全基盤機構 原子力システム安全部
(専門分野)高速炉の安全設計, 炉心損傷事故評価, レベル2 PSA など

講演

フェニックスから「もんじゅ」へ：高速炉開発と日本の役割

(3) 小型炉市場・4S 開発現状・原子力 GDP モデル

(株)東芝 飯田 式彦

分散電源を必要としている世界の市場と必要とするエネルギーを提供できる小型の原子炉4S (Super Safe Small and Simple)の開発現状について述べる。また、原子力新興国が求める原子力システムへの要望について、これまでの4S開発経験を通して得た知見に基づき評価・整理した。評価にあたり、それらの国を経済形態や技術姿勢を国民1人当たりのGDPで分類し、分類ごとに原子力システムへの要望をまとめた(以下、原子力GDPモデルと呼称)。

I. 海水の淡水化

21世紀は「水」の世紀ともいわれる。日本に暮らすと水は無限にあるように感じられるが、地球上の水で人が生活に使える水は0.8%に限られる。しかも、2025年には世界の人口の40%が深刻な水不足に直面すると予測されている。一方で地球の全水量の96.5%は海が占める。このため海水から淡水を造る技術の重要性がますます増大している。東芝は原子力の電気を使って海水をポンプで昇圧し、逆浸透膜を通して淡水を生産する原子力海水脱塩プラントの開発を(財)電力中央研究所とともに1989年から続けてきた。海水脱塩プラントまたは地下水脱塩プラントは北アフリカや中近東に近々のニーズがあるが、今後世界各地でそのニーズが拡大することは確実である。大口径のパイプラインが中東地域の広大な砂漠をのたうちまわっているとおり、水の輸送コストは高いため、需要地に近接した脱塩プラントに魅力がある。このために、求められている電気出力は最大で50 MWeである。しかし、それによる造水量は日に16万トンにも達する。

この電気を原子炉で供給する場合、電気出力は50 MWe以下で、原子炉には容易な運転性と高い安全性が求められた。特に、90年代当時、これから原子力を導入する北アフリカや中東の国々は、原子炉の運転員がいなかったため、燃料の交換作業の容易性、定期的な検査・保守の容易性などが切実な課題とされた。

II. 遠隔地の電源

2004年に米国アラスカ州の先住民都市 Galena 市から招聘を受けた。その都市は遠隔地にあり、利用しているディーゼル発電機の燃料や車のガソリンを春夏は船で、秋冬は空から運んでいる。そのため燃料輸送費が高く、住民は最低でも35円/kWhの高い発電コストの負担を余儀なくされている。あわせてディーゼル発電機の排ガスによる環境汚染が課題であった。アラスカにはこうした都市が100箇所以上ある。2009年には、よく似た環境のカナダ北部のコミュニティから相談を受けた。燃料輸送が困難であり、実に発電コストは100円/kWhに達している市があった。アラスカの鉱山会社にも同様なニーズがあり、そこでは50 MWeの出力を求められた。

要請された原子炉の仕様は、燃料を輸送する必要がないこと、少人数で原子炉を運転できること、また原子炉の出力は10 MWeから50 MWeまでの小型炉である。また、アラスカ特有の環境意識のためか、廃棄物としての使用済みの燃料を使用後にサイトから持ち出すことを条件とされた。

III. オイルサンドなど非在来型石油抽出

カナダのアルバータ州には非在来型石油と呼ばれるオイルサンドが大量に埋蔵されている。オイルサンドを抽出するには、オイルサンドを含む鉱床を長時間加熱するための高温の水蒸気が必要である。現在、この水蒸気を得るために大量の天然ガスが消費され、排出される炭酸ガスがカナダの環境改善の重荷になっている。これに、環境税を課すかどうかを政府で検討されている。2008年、アルバータ州の石油組合が環境保全を目的として、天然ガスに代わる原子炉による高温蒸気を利用するため

Phenix to Monju: FBR Development and Japan Role; (3) Small reactor's market, Current status of 4S development, Nuclear market analysis by GDP capita: Norihiko HANDA. (2010年 10月 4日 受理)

の研究に着手した。

要請された原子炉の仕様は、熱出力140 MWtを2基、蒸気温度310℃以上である。この蒸気温度を得るためには、液体金属冷却炉の利用が適している。ちなみに、140 MWtは電気出力に換算するとほぼ50 MWeに相当する。一方、米国とヨルダンではオイルシェールから石油を抽出するプロジェクトが始動している。この場合350℃以上の蒸気が必要であり、液体金属冷却炉の運転温度に近づく。また、蒸気を必要としている石油会社のニーズは安価な蒸気そのものであり、原子炉の運転にはコミットしない方針としている。そのため、蒸気の供給側で原子炉の運転を行う必要がある。

IV. 水素製造

水素社会の必要性がうたわれて久しいが、その実現には炭酸ガスを排出することなく効率的に水素を製造できる方法の開発が必要である。製造方法の1つは水の電気分解だが、高温の水蒸気を利用できれば、電気分解の効率が改善される。東芝の高温水蒸気電解セルを使うと、10 MWeの電気と450℃の蒸気で3,000 m³/hの水素を発生させることができる。この新しい電解セルは、イットリア安定化ジルコニア(YSZ)を10 μmまで薄膜化した電解質を採用し、水素極と酸素極は、電極上でのイオン化触媒活性、電子導電性およびガス拡散性の観点から構造の工夫をしている。2007年には当時、本方式では世界最大規模の0.13 m³/hの水素製造試験に成功した。

水素製造に適する原子炉に求められる仕様は、450℃を超える高温の蒸気供給である。

V. 多目的利用小型高速炉4Sの開発状況

これまで述べたように、運転が容易で、燃料交換が不要で、メンテナンス量も少なく、高温の蒸気が使え、電気出力換算で50 MWe以下の原子炉が世界のニーズに適合する多目的利用の原子炉としてふさわしい。

燃料を交換することなく長期間運転するために、これまでにない新しい技術を必要とした。このため高速中性子により天然ウランまたは劣化ウランを核分裂性物質に転換する技術、炉心の燃焼部位を順次移動させる技術、燃料密度の高い金属燃料技術、稠密に燃料を配置する技術、これらの要素からなる炉心全体を環状の反射体で制御する技術を開発し、実証してきた。そして、実際に炉心を組み立て、2005年には旧日本原子力研究所の高速中性子臨界試験装置で臨界を達成した。

これらの実績を踏まえて、原子炉の米国許認可を取得するため、2007年10月から米国原子力規制委員会(NRC)の事前審査を開始している。同じ時期に大型の高速炉機器試験施設を東芝の磯子エンジニアリングセンターに設置し、NRCが特に関心を示している複数の機器(電磁ポンプ、漏洩検出器付き二重管蒸気発生器)の検証試験を

行っている。この際、NRCの要求する高い品質管理のもとで試験データを取得し、分析する手法を重視した。

また、誰でもが納得しうる設計の妥当性検証のために複数の機関、申請者とは独立した複数の専門家による第三者評価を要求された。日米5機関の専門家による独立評価を実施してこの要求に応じた。

事前審査中、申請者、NRC両方で課題と認識したテーマに設計指針と安全解析とその判断条件がある。Na冷却炉の一般安全指針は、米国では実際にクリンチリバー高速増殖炉(CRBRP)の指針に参照利用した1975年以降、1989年に部分的に改定したあと、手がつけられていない。最新の軽水炉で話題とされている過酷事故対策、航空機落下対策、退避計画、静的システムの審査上の位置づけ、デジタル制御関連などは、Na冷却炉指針への反映は行われてこなかった。それは、安全解析の分野でも同様である。事前審査中に申請者自ら、現在の軽水炉審査の状況を反映した新しい指針を提案した。これに対して、NRCからは申請者とは独立した機関による指針の策定を条件とされた。現在、米国原子力学会を主体とする新しいNa冷却炉設計指針を策定するための活動が始まっている。

VI. 原子力 GDP モデルへと展開

現在、追設を含めて原子力発電を導入したいと表明している国は60カ国を超える。このような国々から公式に表明されている導入条件だけではなく、それらの国の潜在的な要望または願望について統一的な視点で分析を行うことにより輸出戦略に対する視野を拡大できよう。

このために、まず国民1人当たりのGDP(国内総生産を人口で割った値)を世界の国々の人々の経済意識を特徴づける指標と仮定する。原子力導入を表明している注目国の個人1人当たりのGDPを第1表に示す。

国民1人当たりのGDPが増大するにつれて、すなわち1人当たりの所得が増えるにつれて、消費意識あるいは工業技術への取組み姿勢が変わることが知られている。それを日本のミネラルウォーターの消費量と市場推移(ガソリンより高価な飲料水を水道水の代わりに購入する消費意識を分析)に着目し、GDPの帯域ごとに、経済形態、消費形態、工業技術への取組み姿勢を分析した研究結果が報告されている¹⁾。その報告によると、日本を対象にしたこの分析結果は世界の国々にも普遍的に適用しうるとされ、第2表に示す普遍的な分類表を得ている。

例えば、国民1人当たりのGDPが50万円の中国では、生活必需消費から選択消費に移行する境界にあり、技術姿勢は先行技術を真似る段階から自前化を図る段階に移行しつつあることがわかる。UAEの応札に勝利した韓国では、国民1人当たりのGDPは190万円であり、先行技術の自前化を終了し、それを改良、改善する技術

第1表 注目した国の国民1人当たりのGDP

国名	GDP*	国名	GDP*	国名	GDP*	国名	GDP*	国名	GDP*
ノルウェー	94386	シンガポール	38972	ハンガリー	15522	ブラジル	8295	インドネシア	2238
オランダ	52499	日本	38457	ラトビア	14963	アルゼンチン	8171	エジプト	2162
スイス	68433	スペイン	35116	リビア	14479	マレーシア	8118	モンゴル	1975
スウェーデン	52180	イスラエル	28408	リトアニア	14085	ブルガリア	6560	フィリピン	1845
フィンランド	51588	スロベニア	27148	ポーランド	13846	南アフリカ	5684	ヨルダン	1719
アメリカ	47439	カタール	21389	クウェート	13358	中国	5000	ナイジェリア	1402
ベルギー	47289	チェコ	20759	ロシア	11806	イラン	4600	イエメン	1171
オーストラリア	46824	韓国	19136	ベネズエラ	11388	アルジェリア	4588	セネガル	1066
フランス	46037	UAE	18193	トルコ	10479	タイ	4116	シリア	1043
カナダ	45085	スロバキア	17646	メキシコ	10199	チュニジア	3955	ベトナム	1042
ドイツ	44728	エストニア	17532	バハレーン	10025	ウクライナ	3909	パキスタン	1022
イギリス	43733	台湾	16987	ルーマニア	9310	イラク	3007	インド	1017/1900
イタリア	38996	クロアチア	15633	カザフスタン	8718	モロッコ	2827	ガーナ	739

*国民一人当たりのGDP 出典：IMF World Economic Outlook 2009 を利用して表を作成した
 中東諸国については、石油価格の急騰する直前の1999年GDPを記載した
 中国については、東部地区で原子力発電所の運転ないしは建設している主要ないくつかの省を平均した
 中国全体の平均のひとりあたりのGDPは3259\$である
 インドも州ごとに格差があり平均は1000\$規模であるがデリー準州は1900\$

第2表 国民1人当たりのGDPと消費形態

分類	小分類	経済形態	消費形態	技術姿勢
分類Ⅰ	GDP<50万円	追いつけ型	生活必需消費	先行技術を真似る
分類Ⅱ	50万円<GDP<200万円	追いつけ型	生活必需消費から選択消費へ移行	先行技術を自前化
分類Ⅲ	200万円<GDP<400万円	一部産業でトップランナーに	選択消費	先行技術の改良、改善
分類Ⅳ	GDP~400万円	トップランナーから転落	選択消費の中に新価値観、付加価値重視が芽生える	技術停滞
	GDP>400万円	新産業創出		技術革新

姿勢の段階に移行した。日本は1995年以降、国民1人当たりのGDPは減少しており、トップランナーから転落し、技術姿勢は停滞したと分類される。ただし、消費形態には環境意識など新しい価値観が生まれている。

第2表では技術姿勢までが分析されているが、必ずしも裕福ではない遠隔地などの4S市場を調査した経験は、実は、第2表の分類では、特に分類ⅠやⅡに属す国々に相当する地域の原子力に対する潜在的な要望または願望を直接聞いていたことにもなる。それを第3表に改めて示す。筆者はこれを原子力GDPモデルと呼んでいる。

第3表によると、分類Ⅰ、Ⅱの国々は、安価な建設コスト、建設と運転の実績あるプラント、施設の運転、運転・保守の容易性、許認可支援、使用済み燃料の引き取りを重視している。一方、分類Ⅲ、Ⅳの国々は、安価な建設コストを望みつつ一連の技術的な付加価値(テロ対策、過酷事故対策、単純性、多様性、廃棄物処理)を重視している。また、技術の自前化については、近いうちに分類ⅠからⅡに移行する国の経済姿勢、技術姿勢の必

然でもある。

国民1人当たりのGDPに応じて、それらの国が求める潜在的な要望または願望が浮き彫りにされた。願望している原子炉とその導入の方式、範囲はGDPレベルで異なるのである。

Ⅶ. おわりに

最近、米国で見直されている小型原子炉モジュールによる中・大型発電所は、モジュール炉の特徴を生かした基幹電源の可能性として、米国の一部には期待がある。それが導入されるためには単基の大型原子炉で構成した大型発電所と比べてコストで優位でなければならない。しかし、ひとたび、世界に目を転じれば、小型のしかも多目的なエネルギーニーズが数多くの地域にある。地域ごとの要求は明確であり、小型Na冷却高速炉4Sが要求に対応すべく開発された。コストは既存のエネルギー施設のコストに比べて優位であればよい。それは例えば、遠隔地の電源であれば100円/kWhを十分に下回れば魅力と映る。

第3表 原子力 GDP モデル

分類	小分類	要望、願望
分類Ⅰ	GDP<50万円	安価な建設コスト 建設・運転実績
分類Ⅱ	50万円<GDP < 200万円	施設の運転 運転・保守の容易性 許認可支援 使用済み燃料の引き取り 燃料供給 技術の模倣から自前化
分類Ⅲ	200万円<GDP < 400万円	安価な建設コスト 付加価値
分類Ⅳ	GDP~400万円	テロ対策 過酷事故対策 発電性能向上
	GDP>400万円	単純性 多様性 廃棄物処理

一方、別の観点からの要求がある。始めて原子炉を運用する必ずしも裕福ではないそれらの地域からは、運転委託、容易な運転性、簡素な保守、燃料交換なし、使用済み燃料の引き取り、許認可支援、将来大きな産業へ発展させるための協力が要望された。

これらの要望のセットはもっと普遍化できるので、世界の国々を国民1人当たりのGDPを指標にして分類し、原子力GDPモデルを作成した。それを使って各国が願望している原子炉とその導入の方式、範囲はGDPレベルで異なることを示した。

—参考資料—

- 1) 飯田式彦, “原子力輸出の際の一指針”, 季報エネルギー総合工学, 33[1], 21(2010).

著者紹介

飯田式彦(はんだ・のりひこ)



(株)東芝 原子力事業部
(専門分野/関心分野)高速炉システム, 原子力安全



私の 主張

なぜ CFD 検証を日本の国家戦略として進めなくてはならないか？ (CFD4NRS-3)

東京大学 岡本 孝司

はじめに

原子力発電所の安全解析や安全評価を実施する上において、冷却材の伝熱流動を正確に把握することはコアとなる技術である。原子力発電所の安全は、伝熱流動解析評価によって担保されているといっても過言ではない。旧日本原子力研究所や世界中の原子力機関における数多くの膨大な実験データベースと、それらを元にしたシミュレーションコードによって原子力発電所の安全評価が実施されてきている。

1980年代から、数値シミュレーションを取り巻く環境は大きく変化している。ハードウェアの進歩は目覚しく、当時のスパコンよりも、現在の安価なパソコンの方が桁違いに優れた性能を持っている。64 kB で数万円もしたメモリーも、今では16 GB のメモリーが数千円で買える。単価で考えると6桁も安くなっている。ソフトウェアも大幅に進歩し、直接数値シミュレーションなどのナビアストークス方程式を直接解くような計算も進んできている。

一方、安全審査においては、大幅な保守性をもった30年前のコードがいまだに利用されていることもある。一部、最新のシミュレーションコードを利用しようとする動きもあるが、古いコードで安全審査をパスすることができる現状では、新しいコードを用いる動機があまり大きくない。もちろん、適切な保守性を持った最新のコードを用いると、より安全で、より効率の良い発電所の設計が可能となる。しかし、これらの最新のコードを安全審査に用いようとする、労力が大幅に掛かることから、敬遠されてきているのも事実であろう。日本国内では、米国製の古い青銅製の武器で十分戦えるので、新しい鉄製の武器を使わなくてもよいという状況にあるように思える。ただ、鉄製の武器は、まだ十分に研げないのも確かである。

原子力発電所をアジアをはじめとする世界に提供しようとする場合、価格競争力や、安全性を担保するためにも、より優れたシミュレーション手法で、より安全で合理的な設計を行うことが重要である。最新コードのソース提供を止める動きも出てきており、韓国などでは、独自コードの開発が国を挙げて進められている。米国においても、産業界や大学を巻き込んだ、シミュレーションコードの開発と検証の大規模プロジェクトが進められている。

このような背景のもと、数値流体シミュレーション

(Computer Fluid Dynamics)を、原子力発電所や中間貯蔵施設などの原子力関連設備の設計に用いる動きが加速されてきている。CFDを用いることで、より安全で、合理的な設計が可能となり、価格でも、安全性でも原子力プラントの競争力が大幅に高まることが期待されており、世界中で開発が推進されてきている。一方、CFDのV&V(Verification & Validation)をどうやって担保するかという非常に難しい課題に直面してきている。これは、CFDで計算された結果が、十分な精度を持って正しくシミュレーションできていることを証明することに他ならない。CFDのV&Vに関する標準を米国機械学会が制定するなど、様々な活動が推進されている。

数年後に、鉄製の武器が十分に鋭利なものに研ぎあがったときに、なまくら青銅器で、鉄製の武器に対抗できるか、はなはだ不安がある。

CFD4NRS-3

CFD4NRSは、原子力安全解析にCFDを用いる場合の、検証をどのように担保していくかを議論するために、4年前に初めて開催された国際会議である。この第3回目として、CFD4NRS-3が、米国NRCとNEA主催でワシントンDC近郊のロックビルで2010年9月14~16日に開催された。会議場はNRC本部から道を挟んだホテルで行われ、NRC本部の見学会なども行われた。20カ国を超える世界中の国々から、180名の参加者が集い、原子力安全解析のためのCFDの現状と、その検証に関して熱心な議論が重ねられた。

日本は最先端のCFD技術を持っている。従来から大学や産業界で様々なCFDコードが開発されてきた。しかし、驚くことに、CFD4NRSへの日本人参加者は非常に少ない。一方、韓国からは20名を超える参加者がおり、その勢いはあなどれない。

数多くの発表が行われたが、CFDベンチマーク問題に関する議論が大きなトピックとして取り扱われた。今回取り上げられたベンチマーク問題は、ティ-（3方向分岐管継手）における高温・低温流体混合問題である。数多くの機関が参加し、熱電対やPIV(Particle Image Velocimetry)による実験結果との比較が行われ、その特徴が議論された。参加機関は多岐にわたっているが、使われたコードは、STAR-CCM+やFLUENTといった商用コードが非常に多かった。境界条件を適切に設定できたか、LES(Large Eddy Simulation)のパラメータ設

定が適切であったかなどの要因が結果を左右したのではとも思われる。なお、実験や計算においては、境界条件の設定が結果に対してセンシティブである。

なお、著者はこの会議に招待されており、検証に利用されることの多い PIV データの精度と限界について招待講演を行った。上記のベンチマーク問題でも PIV データを正として CFD との差異を評価しているが、その誤差評価が重要であることを指摘した。実験そのものの不確かさだけでなく、PIV では画像処理において不確かさが導入される。PIV に対するベンチマークとして、PIV Challenge ワークショップ(www.pivchallenge.org)を過去に 3 回実施してきた実績や経験から、PIV の限界と将来性を議論することができた。なお、CFD との比較では、平均量だけでは不十分で、空間周波数特性や時間周波数特性における比較が重要となる。その一つの方法としての POD(正規直交分解)に関する紹介が行われた。CFD の V&V を高度化するためには、よりどころとなる実験データの詳細化、高精度化が避けて通れない。

これらの講演以外にも、検証実験の精度に関する議論、二相流 CFD のためのパラメータに関する議論、知識マネジメントに関する議論など幅広く CFD とその V&V に関する議論が行われた。その中でも、CFD の検証をどのように考えるかが重要であることを改めて確認した。

ガラパゴス化？

前述のように、日本の CFD 技術は世界でもトップクラスである。流体工学の国際会議や、原子力工学の国際会議では、日本からも CFD に関する数多くの講演があり、世界からも注目されている。一方、商用ベースの著名な CFD コードは、英国や米国が発祥であり、日本発の世界的な CFD コードはまだない。

ガラパゴス化とは、技術的には非常に発達しているにもかかわらず、国内の特殊な規制などの影響で世界標準にはなれず、技術的には劣る世界標準の技術が世界を席巻していることをさす。携帯電話において、非常に優れた日本の携帯が世界では全く使われずに、Nokia や LG に大幅に遅れをとっている状況が有名である。原子力分野の CFD も明らかにガラパゴス化していませんか？

車や飛行機では、普通に使われるようになった鉄製の武器であるが、原子力安全に使おうとすると、万一にも折れては困るので、やはり十分に研いでおく必要がある。世界中で研磨合戦が繰り広げられているときに、日本は、なんとなく傍観しているようにも思えるのが残念である。

どうすれば良いのだろうか？

CFD や熱流動シミュレーション技術は、原子力安全の根幹を成す技術となっていくことは誰の目からも明らかである。ここがしっかり説明できないと、世界戦略の中で後塵を拝することになる。原子力システムは韓国が受注し、日本は下請けになってしまう。個々の機器を売るより、システムを売るほうが、明らかに儲かるし、技術的にも優位に立てる。原子力システムを売るためには、シミュレーション技術で世界最先端である必要がある。今からでも遅くはないので、産官学が一体となって、日本のシミュレーション技術を世界一にすることが必要と考える。

鍵は、V&V、特に Validation(検証)にある。実機規模の大規模実験ができる装置を日本原子力研究開発機構などが持っている。これらを有効活用して、最先端のシミュレーション技術を検証するためのデータを取得することができる。バルクなデータだけではなく、高精度な詳細データを取得することも優位性を保つためには必須である。この10年で流体計測技術は大幅に進歩している。CFD 検証に耐えうる、十分な精度を持った、時間・空間方向に詳細なデータを採ることが、戦略として重要であろう。これらの詳細データは、知的財産となる。優れた数値シミュレーション手法だけではなく、その検証データも戦略財産となりうる。詳細な計算と実験の双方が揃うことが重要である。

中越沖地震後に、多度津の振動台があれば、と何度思ったことであろうか。大規模施設は一度壊すと、二度と作れない。原子力世界戦略の中で、シミュレーションとその V&V、特に検証を推進することがどうしても必要であると強く感じる。日本製の優れた刀を、産官学が協力して研ぎあげるのは今しかない。

(2010年 10月25日 記)

活動報告

アクチノイド元素の化学・物理実習を体験
J-ACTINET サマースクール2010

日本アクチノイドネットワーク

日本アクチノイドネットワーク(J-ACTINET)は、その活動の一環として、若手研究者・技術者を対象にアクチノイド研究の体験的理解のための機会を提供することを目的としている。昨年度の日本原子力研究開発機構および東北大学金属材料研究所において開催されたサマースクール2009に引き続き、今年度はサマースクール2010を8月31日から9月4日までの4日間開催した。今年度は、関西地区の原子力関係機関(京都大学、大阪大学、福井大学、SPRING-8、原子力研究開発機構、原子燃料工業(株))が連携して開催した。昨年度のサマースクールで好評であった体験実習を取り上げ、今年度は実物観察および操作体験等の実習を物理および化学の両分野について企画した。化学実習として、アメリカシウム、ネプツニウムを用いた溶媒抽出実験および高温溶融塩中におけるウランイオンの酸化還元挙動観察、物理実習として、ウラン模擬照射済み燃料の物性測定および化合物解析実習を実施した。また、発電所用燃料ペレットの製造工程、大型放射光ビームラインおよび研究用原子炉施設の見学実習も行った。一方、講義においては、アクチノイドの基礎科学から先端科学、再処理工学、および燃料工学についてアクチノイドが関与する分野についてバランスよく学べるように工夫した。

今回は原子力関係学部を有する大学に限らず、核化学、放射化学関連の分野などにも参加者を公募した。その結果、全国の大学・大学院および民間企業から当初の定員を超える26名が参加した。

化学実習について、保安教育を受講した参加者は、アメリカシウムおよびネプツニウムを含む硝酸水溶液を、抽出剤を含む有機溶液に抽出し、ガンマ線スペクトロメリーによって分配比を決定する実験を行った。参加者のうち2/3は放射線業務従事者として登録され、アメリカシウムを含む溶液を実際に触れる体験をした。化学を専攻している学生にとっては比較的なじみやすい実験であったものの、アクチノイドを使用した経験を持つ参加者はほとんどおらず、参加者は慎重に試料を取り扱った。溶媒抽出実験を湿式再処理の基礎実験として実習した一方、溶融塩電解実験を乾式再処理の基礎実験として行った。高温の溶融塩中に溶存するウランイオンの色を目視および吸光分光法によって確認し、電解によってウランイオンが還元されていく様子を目視および吸光分光法によって確認した。電解によってウランの色が変化したこ

とに驚いた様子であったが、電気化学的なエネルギーによってウランの原子価が変化することを理解した。

大阪大学における物理実習について、保安教育を受講した参加者は、ウラン模擬照射済み燃料のSEM・EDXを観察し、模擬燃料の組成を決定するとともに熱伝導率を算出した。また、レーザーフラッシュ法測定装置をはじめとする材料物性測定装置の見学を行った。

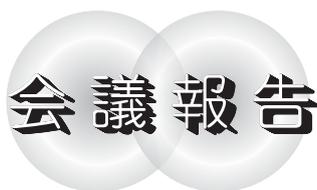
原子燃料工業(株)にて燃料ペレットの照射挙動についての講義を受講し、ペレットおよび燃料集合体の製造工程を見学した。参加者は、粉末ウランから燃料集合体が製造されていく様子を興味深く観察していた。

SPRING-8施設内において、核共鳴散乱実験、XAFS構造解析、X線非弾性散乱実験、結晶成長のその場観察などの研究をするためにデザインされたビームラインBL-11 XUおよびRI棟内を見学した。また、原子力機構が建設した軟X線アンジュレータビームラインBL-23 SUを見学し、巨大な装置を用いたアクチノイド元素の電子状態や構造解明研究の説明に聞き入っていた。さらに、2011年完成予定の国家基幹技術であるX線自由電子レーザーXFEL施設を見学した。

スクール終了後のアンケート結果および実習を通じて以下のことが明らかになった。昨年度に引き続き、見学実習体験は参加者にとって有意義であり好評であった。実習レポートには実験結果のまとめのみならず、多くの考察が行われており、参加者が興味を持ち実習に取り組んでいたことを示すものである。一方、今後の課題として、実験をするための十分な時間を確保するのが困難である、もっと自分たちで作業をしたい、実習対応する現場スタッフの人員不足など、企画者側における問題点も挙げられた。テーマを絞ってもう少しゆとりを持って実習することも今後の課題となった。

J-ACTINETでは、この活動を強化するべく、今後、サマースクールのみならず、ウィンタースクールの開催、ならびに本J-ACTINETと姉妹関係にあたる欧州ACTINETのサマースクールへの派遣により、講義と実習および国際経験の機会を増加させ、原子力研究開発および原子力産業の発展に必須であるアクチノイド科学に係るより実践的な研究者・技術者の育成に貢献したいと考えている。

(京都大学原子炉実験所・上原章寛、2010年11月24日記)



2010日本放射化学会年会・第54回放射化学討論会報告

The Annual Meeting of the Japan Society of Nuclear and Radiochemical Sciences 2010/The 54th Symp. on Radiochemistry

2010年9月27～29日(吹田市, 大阪)

2010年9月27日から29日の3日間, 大阪大学吹田キャンパス内の銀杏会館にて「2010日本放射化学会年会・第54回放射化学討論会」が開催された。主催は日本放射化学会で, 日本化学会, 日本分析化学会, 日本原子力学会, 日本薬学会に共催いただいた。放射化学討論会は, 放射化学ならびにその関連分野の学術討論会であり, 日本の放射化学研究の中心として毎年秋に開催されている。1999年にはこの討論会を母体として, 日本放射化学会(The Japan Society of Nuclear and Radiochemical Sciences)が設立され, それ以来, 本討論会は日本放射化学会の年会となり, 「日本放射化学会年会・放射化学討論会」として開催されている。本年2010年には第54回目となる長い歴史を持つ討論会の一つである。

日本放射化学会では近年, 研究分野並びに討論会自体の活性化を目的として様々な新しい取り組みを進めてきた。今年の本討論会では, ①公募セッション, ②副座長制, ③イブニング・ポスターセッション, ④エントリー制の若手優秀発表賞の4点の新しい試みを行った。

公募セッションとしては, 結果としてK1「放射化分析の現状と将来」とK2「RI製造・利用の新展開—医学薬学利用を中心に」の2件のセッションが採択され, 執り行われた。京都大学原子炉実験所の研究炉の再開や近年の核医学の話題性の向上等, いずれの分野もトピックスのある分野であったため, 参加者も多く, 非常に盛んな議論が行われた。学会後, 「ひとつの分野に関して集中してじっくりと話を聴くことができ非常に良かった」という意見を頂いている。

また, 今回は「若手座長の導入」が若手の会から提案された。「討論会における若手の積極的な参加」は, 非常に望ましいことであったため, 全分野の一般講演に本来の座長に加えて副座長を置くことにした。副座長は, ドクターコースの学生からドクター取得後間もない研究者を対象とした。その成果に関しては, いろいろと意見もあると思うが, 初めての試みとしては良い結果であったのではないかと考えており, 実行委員会としては来年以降も続いていくことを望んでいる。

そして, 本討論会最大の目玉といてもいいと思われるのが, イブニング・ポスターセッションであった。近年, その重要性が増しつつあるポスターセッションの充実を目的として, ポスターセッションを夕方に行い, その際に, おいしいワインとビール, チュウハイと少々のおつまみを用意させていただいた。これによりポスター

セッションでの議論が深まる等の成果があったかどうかは定かではないが, 参加者からは非常に高評価をいただいた。また, ポスターセッションを2日間行ったことも, 議論の充実に繋がったと考えている。

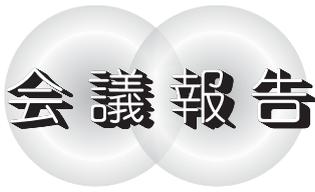
毎年, 討論会の事務局が主催している若手優秀発表賞に関しては今回, 学生, ポスドクの方々に, より積極的に, 意識してよりよい発表の実現に努力してほしいと考え, エントリー制を導入することにした。このような小さな賞であっても研究成果の「受賞暦」のひとつとなり, 若い研究者にとって就職や奨学金の免除等にメリットがあると考えられるが, 予想よりも少ないエントリー数であったことは非常に残念であった。

本討論会の総参加人数は230名, そのうち学会参加人数は217名(一般148名, 学生69名)で, その他に協賛企業の方々から展示活動をしていただいた。懇親会参加人数は118名でイブニング・ポスターセッションの時よりも上質のワインをより多数用意し, 非常に好評であった。

本討論会の特別講演は「小惑星探査機「はやぶさ」の初期分析でめざすもの(阪大院理・土山明)」と「Chemistry of superheavy elements—Experimental achievements and perspectives(原子力機構, ドイツ重イオン研究所・Matthias Schädel)」の2件であった。前者は, いま大きな話題となっている「はやぶさ」に関する貴重なお話であり, 後者はまさに超重元素化学研究のハイライトであった。双方とも多くの聴衆に非常に大きな興味を持って聴かれていた。さらに, 日本放射化学会の学会賞の受賞講演として「放射線ならびにアイソトープを駆使した植物生理学の研究(東大院農・中西友子)」(学会賞), 「炭化系セラミックス材料における高エネルギーイオンのホットアトム化学的過程に関する研究(静岡大理放射研・大矢恭久)」(奨励賞), 「テクネチウム錯体の合成と性質に関する研究(阪大院理・吉村崇)」(奨励賞)の3件の講演があった。一般講演として, 54件の口頭発表, 57件のポスター発表があり, それに加えて, 公募セッションK1で13件, K2で10件の口頭発表がなされた。プログラムでは時間的にタイトな箇所もあったが, 討論会全体を通してほぼ予定通り進めることができた。

最後になったが, 今回の討論会では多くの企業から協賛をいただき, 上記で述べた新しい試みを実現することができた。ここにあらためて深く感謝の意を表したい。

(大阪大学・篠原 厚, 笠松良崇,
2010年10月20日 記)



原子力分野におけるスーパーコンピューティングと モンテカルロ・シミュレーション

Joint Int. Conf. on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2010 (SNA + MC 2010)

2010年10月17～21日(学術総合センター, 東京)

「原子力分野におけるスーパーコンピューティングとモンテカルロ・シミュレーション」合同国際会議(SNA + MC 2010)が、日本原子力研究開発機構主催、OECD/NEA、日本原子力学会および同計算科学技術部会共催で開催された。SNA は第1回が1990年に水戸で開催されて今回が第7回目、MC は第1回が2000年にリスボンで開催されて今回が第3回目となる。27ヵ国から377名(うち、学生49名)、海外からは156名(うち、学生22名)が参加し、8件の招待講演、259件の口述発表および75件のポスター発表を行い、最先端の原子力分野のシミュレーションや粒子輸送モンテカルロ・シミュレーションの理論と応用に関する研究について活発な議論が行われた。主な海外からの参加者は、米国46名、フランス25名、ドイツ14名、スイス12名、等であったが、アジアからも中国、韓国各8名、台湾、サウジアラビア各3名、マレーシア1名、アフリカからも、アルジェリア、南アフリカ各1名の参加があった。これらを通して、欧米はもちろんのこと、アジア、アフリカ地域まで計算科学の重要性が高まっていることがうかがえた。

SNA と MC の合同開催は今回が初めてであったが、幅広い分野の研究者が一堂に会し、共通の課題について議論できることなどが評価され、次回も SNA+MC 2013 として、フランス CEA 主催で、2013年にパリで合同開催となる予定である。以下、本会議の概要を報告する。

プレナリーセッション(招待講演)

オープニングセッションでは、近藤原子力委員長による「日本における原子力研究開発の戦略」と題する基調講演があり、原子力の研究開発の推進のためにシミュレーションが必要不可欠であるとの指摘があった。

18日(月)には、日・米・欧のスーパーコンピュータ開発の動向について、横川氏(理研)、J. Gonnord 氏(フランス CEA)、E. L. Goh 氏(米国 SGI 社)、19日(火)には、原子力分野における先進的スーパーコンピューティングについて、越塚教授(東大)、V. Bulatov 氏(米国 LLNL)、W. Tang 教授(米国 Princeton Univ.)、20日(水)には、モンテカルロ計算手法の進展について、F. B. Brown 氏(米国 LANL)、X. G. Xu 氏(米国 RPI)による招待講演が行われた。クロージングセッションでは、竹田敏一本会議 Technical Program Committee 議長(福井大)より会議が総括された。

テクニカルセッション

53のオーラルセッションと3つのポスターセッションが、最大で7セッションが同時進行で開催された。

SNA では、炉物理、熱流動計算、核燃料、原子炉構造材料等についての最新の研究成果が発表され、有意義な情報交換・議論が行われた。近年の超並列計算機の発達を反映し、従来より大規模な計算化が進み、時間軸や空間の高精細化が可能となり、実現象を詳細に再現する計算結果が数多く紹介されたほか、原子力という複雑・複合系を取り扱うことから、マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション手法の開発が一つの大きな潮流となっていた。

MC については、モンテカルロ計算手法、コード開発、アプリケーションにおける最新の研究成果が発表された。計算手法では、固有値計算の収束、バイアス、統計誤差評価、アンダーサンプリングの問題に焦点が当てられていた。また、遮へい分野で重要な分散低減法では、決定論/モンテカルロハイブリッド手法が有望視されている。コード開発では、物理モデルの改良、検証が精力的に続けられ、計算精度が向上している。アプリケーションでは、原子炉・遮へい解析のモデル化技術の進歩や中性子輸送と材料損傷を結合した解析など応用分野の拡がりが目立った。特に医療分野での進化は著しく、ナノ・ドジメトリーとそれに関連した研究は新たな研究分野を開拓していくことが期待される。

なお、会議で発表された論文は、USB メモリーに収納して会議プロシーディングスとし参加者に配布するとともに、厳格なピアレビューを経て、セレクトイッドペーパー集として Progress in Nuclear Science and Technology 第2巻として日本原子力学会より公刊される。

スチューデントアワード

若手研究者育成の観点から、学生を対象に最優秀論文(スチューデントアワード)4件を表彰した。44件の応募があり、論文審査にて10件の候補者に絞り、会議における発表内容を加味した審査によって4件を決定した。受賞者の内訳は、日本2名、オランダ、韓国各1名であった。

(日本原子力研究開発機構 森 貴正, 中島憲宏,
2010年11月18日 記)

原子力・放射線教育に高い関心

海外の動向に関する記事も好評

(10月号の Web アンケート結果)

「原子力学会誌」10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46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、各記事の内容及び書き方について、それぞれ5段階で評価していただいています。10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	時論(1)	小学校において原子力・放射線教育は可能か	4.28
2	巻頭インタビュー	「もんじゅ」から「はやぶさ」までを語りつくす！ 川端達夫文科相に聞く	4.11
3	ジャーナリストの視点	溝はなぜ埋まらない	4.06
4	解説(1)	世界の高速炉サイクル技術開発の動向(3) —革新的なナトリウム冷却高速炉サイクル技術と開発課題	3.94

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	ATOMOΣ Special	世界の原子力事情(10) アジア編 ベトナムの原子力事情	3.87
2	巻頭インタビュー	「もんじゅ」から「はやぶさ」までを語りつくす！ 川端達夫文科相に聞く	3.83
3	解説(5)	地球温暖化対策の方向性と原子力発電の役割—持続的な温暖化対策と取り組みに向けて	3.79
4	NEWS	NEWS 10月号	3.71

教育、世界の動向などが上位にきています。

2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 巻頭インタビュー「川端達夫文科相に聞く」に関して、川端大臣の略歴や考え方などが平易に述べられていて興味深かった。
- (2) 連載講座(2)「ICRP 新勧告—新しい放射線防護の考え方と基準(7)現存被ばく状況」に関して、ICRPの勧告を噛み砕いた内容で表現し、国内法への導入について考えさせられた。

3. 編集委員会からの回答

- (1) 時論で掲載した小学校における原子力・放射線教育については、読者から高い関心がありました。今後も、読者の方々の関心の高い記事の企画に努めていきたいと思えます。

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

原子力外交や科学技術の戦略に高い関心

表紙の新シリーズは好評

(11月号の Web アンケート結果)

「原子力学会誌」11月号に対して寄せられた Web アンケートの結果をご紹介します。今回は61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、各記事の内容及び書き方について、それぞれ5段階で評価していただいています。11月号で高く評価された記事について、「内容」、「書き方」に分けてそれぞれ上位4件をご紹介します。

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	原子力外交	原子力外交シリーズ(1) 日本原子力外交の課題	4.17
2	時論(2)	日本の自治体、求められる 科学・技術の戦略機能	4.10
3	解説(5)	みんなでわかってシリーズ 時空の創生：超弦理論から原子核へ(1)超弦理論と素粒子	4.06
4	連載講座 (2)	ICPR 新勧告—新しい放射線 防護の考え方と基準(8) 最終回 環境の放射線防護	4.00

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	Relay Essay	ドナウ川の畔から(6) そんな楽園—愛犬と暮らす人々	3.89
2	表紙	化学天秤のある理科室	3.88
3	談話室 (2)	ニュージーランドの暮らしと語 学ブラッシュアップ (その2)	3.74
4	時論(2)	日本の自治体、求められる 科学・技術の戦略機能	3.70

国際的な外交、紀行などが上位にきています。

2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) みんなでわかってシリーズ「時空の創生：超弦理論から原子核へ(2)」は非常に興味深い内容であり、原子力分野を広い視野で見ることができる。このような解説記事を今後も増やしてほしい。
- (2) 談話室「豊かさと科学技術、そして原発」は、現代社会にあつての科学技術について再考する良い機会となった。

3. 編集委員会からの回答

- (1) 原子力外交や科学技術に対する戦略に対して読者の関心が高いようです。
- (2) 「日展」へ出品された作品からなる表紙の新シリーズが今月も好評でした。

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

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

未来を見据えた2つの提案

NHK 報道局 山崎 淑行

海辺に張り付くように伸びた半島の道路をいくつかの集落をやり過ごして小一時間走った頃だろうか、岩場を迂回したカーブの先に突然現れた巨大な施設。「原発」との初の対面である。監視カメラを備えたフェンス、奥にそびえる威風なドーム、稜線に伸びる太い送電線。ある種の畏怖と好奇心を刺激するに十分な存在感は今も忘れない。初任地の福井県で原子力担当を拝命して以来14年あまり。経済産業省の記者クラブでも現場記者としては最も長い在籍になっているのではなかろうか。今回、伝統ある学会誌への寄稿のお話を頂いた。せっかくの機会、過去の経験から私が個人的に思う「未来を見据えた提案」なるものを大胆に書くこととお許し頂きたい。

提案1 = 「安全・安心」を商品化しよう

この10年あまりで何よりも変わったことは、世間の原子力に対する風向きだろう。もはや「冬の時代」という言葉を聞かなくなって久しい。地球温暖化対策とエネルギーの安定確保。世界的に進む原発導入計画の中で、日本勢の契約や納入の話題は紙面を賑わし、「国際原子力開発」の設置で官民連携の形も整おうとしている。こうした威勢に日本人として気を良くする一方、記者としては一抹の不安を感じる。過熱する商売合戦で「安全安心」が横に置かれはしなからうか、ということである。

日本は、長年「安全安心」に世論や地元から厳しい要求があった。品質管理から発電所の運営ノウハウ、情報公開から、技術者の育成など広範な分野で「安全安心」が求められた。私はそれらの経験がまさにソフトの商品だと思うのである。そして、原発導入する世界各国はこのソフトを必ず欲するのである。もちろん、ベトナムとの提携にも人材教育や運営支援といった「安全安心」に関わる要件が入っていることは知っている。私はこの色合いをもっと強めてパッケージ化を求めたい。そのメリットは何か。ひとつは国際世論対策である。世界各地に日本製の原発が増えると、当然、トラブルの総数も増えるだろう。ある未来ニュース、「A国の〇〇原発、放射能漏れで市民被ばく。プラントは日本製」。責任の所在はどうであれ、報道では、どこの国のメーカーかが扱われるであろう。その際、もしも日本が、である。プラントだけでなく「安全」の

輸出にも尽力していた国というイメージが確立されているなら、地元や国際世論の風当たりは幾分なりとも緩和するであろう。これは事後処理にも有効である。

また、被ばく国としての責務もある。原子力のリスクを体感する日本だからこそ、「安全」をもう一つの商品とすることが支持されるのではなかろうか。既に「原子力人材育成ネットワーク」や「国際原子力発電技術移転機構」もある。日本原子力研究開発機構も海外技術者に研修を行っている。これまではタダだったノウハウや人を「商品化」して有価とすることで、プラントのセールスストックの素材にもなるのである。

提案2 = 放射性廃棄物の消滅処理研究強化を！

「自然エネルギーは容量も小さく不安定で主流にはなれない」業界の方々とお話しする際に多く寄せられる意見。ちょっと50年前を振り返ってほしい。1960年頃、風力もソーラーも日常生活にあっただろうか。今や東京湾に巨大風力が回り、川崎の海浜にはメガソーラーが日を受け、電気自動車や家庭向けバッテリーが販売される。発電と周辺技術の進歩は速い。50年後は？ 私は、社会の受容に従って自然エネルギーも含めた各エネルギーの共存となっていると考える。そして、原子力がよりよいポジションを占めるには内包するリスクの解決を今から準備することが重要だと感じている。特に放射性廃棄物は原子力が市民から避けられる大きな理由、この解決なくして社会受容性は向上しない。だからこそ、消滅処理(核変換)の研究にもっと予算と人員を投入することを提言したい。世界的にプラントが増えれば、各国も必ず廃棄物の問題に直面する。「日本には、廃棄物を解決する技術がある」となれば大きな売り。何よりも原子力のイメージを一新するのである。長計の見直しの時期。ぜひ、ご検討を。

(2011年 1月19日 記)



山崎淑行(やまさき・よしゆき)

NHK 報道局 科学文化部 記者

関西学院大学経済学部卒、神戸大学国際協力研究科修士終了。福井局赴任後、2002年から現職。

エネルギー全般、温暖化対策などを担当。