

シリーズ解説

我が国の最先端研究開発

No. 26 放射線医学総合研究所
(第2回)

18 低線量影響としての放射線適応応答 —放射線防護へのインパクト

低い線量の放射線を照射すると、高線量放射線に対する抵抗性が獲得されることがある。こうした放射線適応応答は、防御的生体応答の一つとして知られている。そのメカニズムが近年、遺伝子レベルで解析されるようになった。

王冰, Guillaume Vares, 酒井一夫

解説 「匠」たちの足跡 第4回

29 プルトニウム転換技術開発施設 —マイクロ波加熱直接脱硝法による 世界初の混合転換プロセスの実用化

日本が独自に開発したマイクロ波加熱直接脱硝法は、核拡散抵抗性に優れた特性をもつ。この技術はプルトニウム・ウラン混合転換プロセスの中核技術として採用され、プルトニウム転換技術開発施設で開発運転が行われている。



吉元勝起

プルトニウム転換技術
開発施設の主工程室

報告

34 「災害の防止」の歴史的考察と法の 在るべき姿—原子炉等規制法の 「災害の防止」は放射線「障害の防止」 から始まった

原子炉等規制法は、「障害の防止」を法目的とすることされていたが、「災害の防止」へと変更された。その変遷の過程をたどるとともに、放射線障害の防止を法目的とする法改正案を提言する。

西脇由弘

会議報告

39 原子力法制システムの国際化の 潮流—シンポジウム「原子力法制シス テムの改革に向けて」 諸葛宗男, 菅原慎悦

巻頭言

1 原子力発電立地県における技術者の育成

城野政弘

時論

2 日本の外交・安全保障戦略の観点からみたベトナム原子力プロジェクト

ベトナムでの原子力プロジェクトが動き出した。そこでは日米口の協力が、鍵となる。

畔蒜泰助

4 原子力立地地域との相互理解

原子力に携わる者は、地元の意見にはひとかたならぬ神経を使う。

森本英雄

解説

14 「国際原子力開発」ベトナムの原子力発電導入に向けて—官民一体となった受注活動の経緯

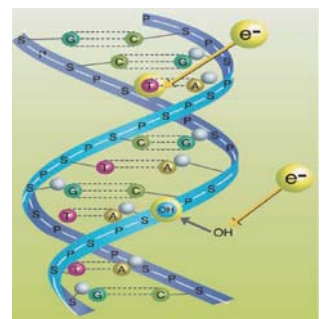
「ジャパンイニシアティブ」というキーワードの下で政府、電気事業者、メーカーが一致団結し、戦略的な対応をとるために国際原子力開発株式会社を設立した。

高橋祐治

24 原子力利用の一つである「放射線滅菌」について—量子ビームテクノロジーの有効活用の実例

放射線滅菌とは、量子ビームであるガンマ線、電子線、エックス線を照射することによって、物質中の微生物を殺滅または除去するもの。その原理や歴史、対象物および滅菌方法、今後の動向等について解説する。

隅谷尚一



微生物死滅の概念図

表紙の絵 「早春の埠頭」 製作者 頭川 徹

【製作者より】ここは、小さな頃からよく遊んだ場所である。今は単純で力強く動き続けるクレーンを自分に見立てた。自然から学ぶことが多く、自然とのかかわりを、絵を通して描きとどめておきたいと思っている。そんな風景のひとつまでである。

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)

報告

40 高速増殖炉燃料設計が取り扱うべき範囲と内容

JNESは、高速増殖炉燃料技術基準の基本的考え方をまとめた。ここでは、燃料の機能と対応する安全要求および原子炉施設の安全設計・安全評価と燃料設計の関連について解説する。

中江延男, 馬場利和, 上村勝一郎

45 Asian Nuclear Prospect (ANUP) —2010に参加して—インドの基礎基盤技術の蓄積と実用高速炉開発が現実に

インドの原子力開発、特に高速炉開発が加速してきた。技術基盤も着実に蓄積されてきている。

田中 知, 井上 正, 池田泰久

連載講座 実験炉物理(7/最終回)未来へのメッセージ 次世代の安全基盤の確立に向けて

55 実験と解析の接点

最終回のテーマは「解析」。これは仮想的な世界における作業と、実物の原子炉が存在する実世界の接点に位置するものだ。今回は炉物理実験と解析技術の関係を解説する。

山本章夫

講演

47 国際的な不拡散・保障措置・核セキュリティの動向—我が国の果たすべき役割についての考察のきっかけとして

—昨年オバマが行った核セキュリティに関する演説は大きなうねりとなり、世界を動かしていった。核不拡散・核セキュリティ体制が世界的に強まる中で、我が国が果たすべき役割とは何か。

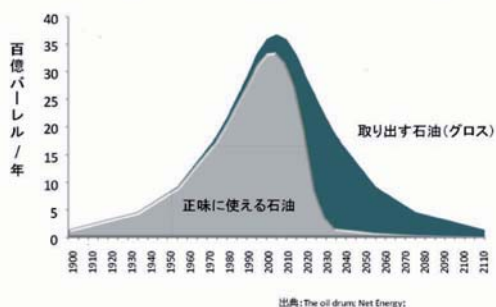
木村直人

51 オイルピーク—正味に使えるエネルギーの今後

石油の可採年数は、残り42年。取り出すエネルギーが少なくてすむ石油の生産は、すでにピークを迎えた。

天野 治

石油を取り出すのに、石油を使い、正味に使える石油が減る



出典: The oil drums, Net Energy

6 NEWS

- 原子力委、新原子力大綱策定に着手
- 関電美浜1号機、40年目以降の運転へ
- 2009年度の原子力シェアは11.8%
- 青森県と関係閣僚が核燃料サイクル協議会
- 東北電の東通1号、16か月運転を申請
- 高速炉サイクル実用化研究の中間取りまとめ
- 関電とEDFが包括協力協定
- 産業界と規制当局が意見交換
- 「原子力人材育成ネットワーク」が発足
- 学会会議・高レベル処分検討会が審議を開始
- 関電美浜1号の後継機を調査
- 海外ニュース

ATOMOS Special

世界の原子力事情(11)

61 アラブ首長国連邦の原子力事情

UAEは濃縮や再処理は行わない政策を公表し、意欲的な原子力発電導入計画を展開中だ。

斉藤健彦

会議報告

66 「Top Fuel」から見る燃料開発の最先端

山崎正俊

ジャーナリストの視点

67 「原子力」が持つ二面性

太田匡彦

54 From Editors

60 書評『解析の延長がわかれば特殊相対論がわかる』

仁科浩二郎

68 会報 会告, 原子力関係会議案内, 主催・共催行事, 人事公募, 支部便り, 英文論文誌(Vol.48, No. 2)目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

学会誌記事の評価をお願いします

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

学会誌ホームページはこちら

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

原子力発電立地県における技術者の育成



福井工業大学学長

城野 政弘(じょうの・まさひろ)

1968年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了，工学博士。大阪大学教授，工学部長，副学長等を歴任，2004年福井工業大学教授，副学長を経て2007年より現職

地球温暖化問題解決策の一つとして近年，原子力発電の見直しが世界各国で行われ，わが国においても原子力産業は，低炭素社会の実現や成長の柱として改めて高い期待を集めている。そのためには，国のエネルギー政策や産官学の技術開発が重要であることはもちろんであるが，原子力産業を支える人材育成はそれにもまして重要である。

本学は，戦後間もない1950年に福井地方の産業を支える技術者の育成を目標とした北陸電気学校に始まり，1965年電気工学科，機械工学科の2学科をもつ大学を開設。北陸地方の産業界と共に生きるための研究開発と人材育成を使命とし，現在は産業全般に関連する学部8学科，大学院5専攻を有している。

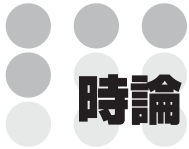
ところで，原子力人材育成に関してはよく知られているとおり，2002年入学生の募集停止をした近畿大学理工学部原子炉工学科を最後に，日本の各大学から原子力を冠する学科が消滅した。これはスリーマイル島事故等により，世論が反原発に振れ，原子力を志望する学生が激減していったからだと言われている。これにより着実に原子力を推進してきたわが国においては，高等教育機関での原子力人材育成が行えなくなったことが大きな問題となっていた。

一方，福井県は世界有数の原子力発電立地地域であることから，本学は2005年に原子力技術応用工学科を設置した。ほぼ時期を同じくして，東京大学大学院，福井大学大学院等が原子力を冠する専攻を開設しているが，当時，日本唯一の原子力を冠する学部学科であり，現在でも西日本唯一の原子力を冠する学科である。この開設は福井の地にある本学が地域の産業に貢献し，福井の原子力関連施設に人材を供給する義務があるとの強い意思の表れであった。なお，この年，福井県のエネルギー研究開発拠点化計画が始まり，本学の原子力人材育成は，日本原子力研究開発機構，若狭湾エネルギー研究開発センター等研究機関の協力も受けて開始した。同計画は原子力発電のみでなく，関連する産業の起業，発展をも目的としており，本学でも関連分野での人材育成も視野に入れ教育を行っている。

本学では，専門分野での知識とともに，「創造力」「人間力」「共生力」を備えた人材の育成を教育目標としている。創造力は新しいものに挑戦する力，人間力は人間として何が正しいかを判断する力，共生力は他者とともに生きる力であり，安全性や倫理観の求められる原子力分野の教育では，特に人間力が重要であると考えている。実際の教育では国の原子力人材育成プログラム，学生支援プログラムの支援も受けて教育システムの充実を図ってきた。低学年生から高学年生が一緒になって学ぶ寺子屋式授業，実験と座学を融合させたハイブリッド型授業，原子力現場で働く卒業生と本学在学生在が対話する原子力塾などがその例である。なおその過程で，原子力学会倫理委員会の方々には倫理教育で大変お世話になっている。記して感謝を申し上げる。

本学の原子力技術応用工学科は，開設以来，定員を充足することに苦勞してきたが，近年は定員を超えた入学者があり，また就職状況も良好である。原子力への期待の表れとともに，本学の教育システムが社会に理解され，社会から評価され始めたからだと自負しているところである。

(2011年 1月5日 記)



日本の外交・安全保障戦略の観点からみた ベトナム原子力プロジェクト



畔蒜 泰助(あびる・たいすけ)

東京財団研究員

1969年、東京出身。モスクワ国際関係大学院修士課程修了。2005年より現職。東京財団「資源エネルギーと日本の外交」プロジェクト・リーダー。「ユーラシア情報ネットワーク」プロジェクト・メンバー。著書に「今のロシア」がある。

はじめに

2010年11月1日付けの日本経済新聞は10月31日、菅直人首相がベトナムのグエン・タン・ズン首相と会談し、同国が南部ニャトアン省の2か所で進める計4基の原子力発電所建設計画のうち、第2期工事(2基)の建設を日本企業が受注することで合意したと報じた。

ただ、関係者の話を総合すると、現実には「まずは優先交渉権を得た」という段階であり、これで日本企業の受注が最終的に確定した訳ではないようだ。

ベトナム原発計画受注活動の窓口の役割を担うべく、資源エネルギー庁の主導で2010年10月22日に正式発足した「国際原子力開発」には、東京電力を始めとする9電力のほか、BWR(沸騰水型原子炉)の技術を有する東芝、日立製作所、PWR(加圧水型原子炉)の技術を有する三菱重工という3大プラントメーカーも出資という形で参画している。

よって、ベトナム側の意向次第で、PWRでもBWRでもどちらの炉型でも提供が可能だが、現時点では炉型の選択もまだである。また、ベトナム側が発注する際の条件として出している6項目のうち、日本単独では難しい核燃料供給の調達先や使用済み核燃料の取扱いの方法なども決まっていない。

関係者によると、およそ1年間をめどに、日本原子力発電がベトナム電力公社(EVN)と共同で行う原発導入可能性調査(FS)を完了させ、ベトナム政府に正式提案を行う予定とのことである。

ところで現在、日本やベトナムを含むアジア太平洋地域における外交・安全保障環境をつぶさに眺めると、本プロジェクトには、我が国のインフラ輸出による経済成長戦略としての位置づけにとどまらない外交・安全保障戦略上の意義を有するものであることがわかる。

そこで、以下本稿では、我が国がベトナムでの原発建設計画に参画することの外交・安全保障上の意義を明らかにすると共に、1年後にもベトナム政府に提出されるであろう正式提案を作り上げる際に留意すべきポイントを指摘したい。

ロシアは潜水艦売却で第一サイトを受注

2010年2月9日付けの日本経済新聞が1面トップで「原発受注 日本、ベトナムでも敗退」と報じたのは記憶に新しい。前述の南部ニャトアン省の2か所で進める計4基の原発建設プロジェクトのうち、第1期工事2基の受注をロシアが確実にしたとの報道だった。

当初この案件は、日本とフランスが最有力候補と見られていたが、ロシアに割って入られた形となった。この逆転劇の背景には、ベトナムを取り巻く安全保障問題があった。

2009年12月15日、ベトナムのズン首相がモスクワを訪問して、ドミトリー・メドヴェージェフ大統領、ウラジーミル・プーチン首相らと会談。その後、ズン首相は記者団の前で、潜水艦、航空機などのロシア製兵器を購入する契約を締結したと発表したのである。

報道によると、20億ドル相当のキロ級ディーゼル型潜水艦6隻を含む大型契約という。これは35年前のベトナム戦争終結以降、ハノイが行った最大の兵器購入。ベトナムが潜水艦を保有するのは史上初である。

また同時期、ベトナムのフン・クアン・タン国防相も米国、カナダ、フランスを歴訪。ズン首相がモスクワでロシア製兵器購入を発表した15日には、ワシントンでロバート・ゲーツ国防長官と会談している。ベトナム国防省の訪米は03年以来2回目のことだった。

ベトナムがかつての同盟国のロシアを筆頭に、冷戦時代に戦火を交えた米仏なども軍事分野での関係強化に動き出した背景には、急拡大する中国の海軍力への懸念がある。

ベトナムと中国はともに、南シナ海の南沙諸島などの領有権を主張し対立しているが、急拡大する経済力を背景に、ここ数年、中国は海軍力の増強を急ピッチで進めている。こうした中国の動きに対抗すべく、ベトナムも本格的な海軍力の強化に着手したのである。

そんなベトナムの要請にいち早く応じたのが、冷戦時代に海軍補給基地としてカムラン湾を租借していたロシアだった。ソ連軍のカムラン湾租借には当時、フィリピン

に駐留していた米軍に対抗する意味合いがあったが、米軍もフィリピン側の要請で1991年に完全撤退、ロシアも2002年にカムラン湾の租借契約を打ち切っている。

それがベトナムに潜水艦6隻を売却するとともに、それに伴う海軍基地や補修・メンテナンス施設、通信センターの建設などのインフラ整備に加え、ベトナム人専門家の訓練まで請負い、ロシアは再びベトナムの安全保障に深く関与することになった。2010年10月には、ロシア海軍司令官がカムラン湾にロシア太平洋艦隊の補給基地を復活させる可能性さえ示唆している。

米国も南シナ海問題に積極関与へ

米国はブッシュ前政権時に、中東地域を中心とした「テロとの戦い」に忙殺され、東アジアへの関与の度合いを低下させざるを得なかった。そんな空隙を突き、中国は急ピッチで海軍力の増強を進めている。

オバマ政権は、発足当時から東アジアへの「再関与」方針を表明したが、2010年3月に訪中したジェームズ・スタインバーグ国務副長官が、中国政府高官から「中国は、今や中国の核心的利益(core interest)の一部である南シナ海へのいかなる介入も容認しない」と宣言され、事態の深刻さを再認識させられたとあってよい。

2010年7月、クリントン米国務長官はベトナムで行われたASEAN Regional Forum (ARF) 会合において、「南シナ海で争われている主権要求の平和的な解決が、米国の国益(national interests)である」と演説し、中国の動きを強くけん制した。さらに2010年8月、米国は原子力空母「ジョージ・ワシントン」を南シナ海に派遣し、ベトナム海軍との合同軍事演習を実施している。

そんな中、2010年7月、ASEANは、中国、日本、韓国、豪州、ニュージーランド、インドの6カ国と結成した東アジアサミット(EAS)に米国とロシアを正式メンバーに招待すると発表した。EASへの米ロ同時加盟を積極的に後押ししたのは、他でもない、2010年のASEAN議長国のベトナムだった。この11月30日には、東アジアサミット(EAS)がベトナムのハノイで開催され、米国とロシアの2011年からの参加が正式決定している。

ベトナム原発計画で鍵となる日米同盟+ロシア

以上、見てきたように、ベトナムが東アジアサミット(EAS)への米ロ同時加盟を積極的に後押ししたのは、中国海軍の南シナ海での活発な動きを抑制するという安全保障戦略上の狙いがあった。つまり、ベトナムの原発建設計画は、アジア太平洋地域で明確になってきた戦略環境の変化、すなわち、政治・経済・軍事面での中国の影響力の拡大の動きと密接にリンクしたもののなのだ。

とすれば、尖閣諸島問題に象徴される中国への懸念を共有する我が国にとっても、ベトナム原発建設計画への

参画は、アジア太平洋地域における戦略環境の変化に適応した新たな外交・安全保障戦略を構築・遂行する絶好の機会となり得る。また、そのような戦略観を反映させた提案を行うべきであろう。より具体的にいえば、ベトナム原発建設計画を巡り、《日米同盟+ロシア》の協力関係の構築を念頭に置いた提案である。

その意味で、冒頭で言及した「日本がベトナム原発建設計画の第2期工事の受注を決めた」と報じた11月1日付けの日本経済新聞の3面に「第三国協力で日米作業部会」という見出しの記事が掲載されたのは注目に値する。これによると、

- ・日米両政府は第三国の原子力平和利用で協力を推進するため、原子力協力を議論する「日米原子力運営委員会」のもとに作業部会を設置した。原子力発電所の導入国へのインフラ整備や企業の投資支援についての日米協力のあり方を検討する。
 - ・新設した「国際原子力協力に関する作業部会」は年内をめどに第1回会合を開く。中東やアジア、東京で原発の導入が見込まれ、作業部会では人材育成や制度・インフラ整備について検討する。
- という。

この発表のタイミングからして、ベトナム原発計画での日米協力が念頭に置かれているとみて、間違いない。実際、企業レベルでも、東芝が米ウェスティングハウスを傘下に収め、日立製作所も米GEと原子力部門を統合していることから、日米の原子力産業は事実上一体化している。

一方、ロシアとの間では、2009年5月、プーチン首相が来日した際、日ロ原子力協力協定に調印している。2006年以降、資源エネルギー庁の全面的な支援の下、日本企業がカザフスタンでウラン鉱山の開発権益を相次いで獲得。日ロ原子力協力協定の締結は、カザフ産天然ウランの濃縮役務を、地理的にも近く、世界最大のウラン濃縮の余剰能力を有するロシアに委託することを大前提としたものである。

そして2010年7月、日本企業がカザフで調達する天然ウランをロシアのウラン濃縮施設で濃縮し、それを更にロシア極東港経由で日本を含むアジア太平洋地域に輸送する所謂「ロシア極東港ルート」のFSを実施する計画を資源エネルギー省が発表している。この延長線上で、ロシア極東から日本経由でベトナムへの核燃料の海上輸送が始まれば、東シナ海、南シナ海のシーレーンの確保という点でも日米とロシアの利害は一致する。

我が国の外交・安全保障戦略としての《日米同盟+ロシア》というコンセプトを、一年後にもベトナム政府に提出する正式提案にどう具現化させられるか、注意して見守りたい。

(2010年12月17日記)



原子力立地地域との相互理解



森本 英雄(もりもと・ひでお)

資源エネルギー庁 原子力立地・核燃料
サイクル産業課長

1985年通産省入省。英国留学、OECD 原子力機関、国際協力事業団、内閣府原子力委員会事務局、北海道経済産業局等を経て、2008年より現職。原子力発電所及びサイクル施設の立地地域との調整等を担当。

原子力に携わる者にとって、地元の意見にはひとかたならぬ神経を使う。この例として誰しも思いつくのは、原子力発電所の立地受け入れであろう。この立地同意は大がかりで時間もかかるが、比較的しっかりとした手続きができています。

一方、初期の立地同意ばかりが地元同意ではない。発電所の運転段階になると、自治体と電力会社が結ぶ安全協定に基づく様々な同意の取得案件が発生し(多くは規制上の許認可事項の発生時)、さらに、安全協定に明記はされていないものの原子力施設の運転等に関して事実上、地元の同意取り付けなくして進めることができない場合もある。また、これらの同意取得の必要性もさることながら、地元事情のタイミング次第では、事業者が地元同意の申し入れすらできない場合がある。

本稿では、立地地域との関係についての「べき論」を述べることは小職の能力の及ばぬところであるので、自らの立地地域との業務において地域の思いや事業者の思いに触れた経験を通じての雑感を述べることとなる点をご容赦いただきたい。

1. 地元同意に関する案件

(1) 原子力発電所の新増設

原子力発電所の新増設に当たっては、国の重要電源地点指定というプロセスにおいて(以前は電源開発基本計画への組み入れ)、立地都道府県の知事の意見照会があり、また立地市町村長の同意も必要である。この国の手続きとしての自治体の意見聴取以外にも、電力会社が行う地権者からの用地取得や漁業補償等さまざまなものがあり、これらの同意なくして発電所の立地は不可能であるので、それらを一つ一つ進めていくことが、原子力施設の立地のプロセスとなっている。

去る11月19日に、九州電力川内発電所3号機の増設に関し、地元鹿児島県知事から異議ない旨の回答がなされた。ここに至るには、九州電力による計画の発表、環境影響評価の実施や漁協との補償交渉、また平成22年5月には国による第一次公開ヒアリングが開催され、地元からの意見聴取も行われている。地元の意見は最終的には

知事の同意の判断に集約されているというものの、そこに至るには、川内発電所1,2号機の20数年にわたる着実な運転と地元経済への貢献、住民の信頼等が同意形成に欠かせないものであったことは言うまでもない。

一方、地元にとって初めての原子力発電所となる初号機の立地地点では、建設に至るまでに、同意プロセスに加え、より多くの乗り越えねばならない課題もある。山口県上関町に中国電力が建設を計画する上関発電所は、平成13年に知事の同意を得ているが、昨年からは始まった現地工事に対して、これを阻止する反対運動が続き、埋め立て工事は進んでいない。中国電力は、国、自治体そして地元の推進団体とともに、工事の推進に向け懸命の努力を続けている。

(2) 施設の改造、運転の変更等

原子力発電所は電気を製造する施設であるから、一般の工場と同様に、その操業上必要な設備の取替や増強、運転方法の変更等が行われる。

この例として、最近のものではプルサーマルの実施、定期検査間隔の延長や使用済燃料保管施設の増強等がある。特にプルサーマルについては、プルトニウムという核物質を使用することに対する拒否反応に加えて、核燃料サイクルの是非論も発電所立地地域に持ち込まれて、大きな反対運動が発生した。プルサーマルは地元で特段の工事発注がなく、反対派から「石油ストーブにガソリンを入れるようなもの」と煽られれば、地元としてはできれば受け入れたくない、との気持ちになりかねない。そのような状況では、たとえ首長自身が政策上の必要性や安全性を理解したとしても、その同意には政治的な決断が必要であることは否めない。プルサーマルに関しては、これまでに9つの発電所で地元の同意をいただいているが、その過程においてはそれぞれの地域においてご尽力があった結果と考える。

(3) 再起動等

さまざまなトラブルや不祥事を起した後の発電所の再起動のためには地元の了解を得ることが、たとえ安全協定上は不要であっても、事実上必要となる。さらに、再起動に向けての論点が安全上のものであり、かつその法

律上の判断機関である原子力・安全保安院が安全上問題がないとした後も、自治体の同意が得られないために長期にわたり運転再開ができない事態が発生する可能性がある。こうした事態には解決のための明文化されたルールがないこともあり、関係者は一層神経を使い、説明の実施や関係者との調整に手間をかけることとなる。

2. 立地地域の思い

さて、こうした難しさがある反面、立地地域の自治体首長や地元住民の方から話を伺う中で、心を打たれることが少なからずあることも立地の業務に携わる醍醐味である。

これまでの自らの経験の範囲ではあるが、「原子力発電の安全性に関する判断は専門家に委ねるので、政治的なリスクは自分が引き受ける」とおっしゃった知事、国のエネルギー安全保障の観点からの原子力の必要性を（推進役の国の職員である自分に）力説された町長、また、「かつて町の中で当たり前のように原子力反対が叫ばれていたが、自ら原子力について長い時間をかけて勉強を続け、今では原子力の必要性に深い理解を持つようになった」と言われたご婦人のご発言等が強く印象に残っている。こうしたお話を伺うと、むしろこちらの方が原子力の必要性について改めて感じつつ身の引き締まる思いであり、また同時に強く励まされるところでもある。

原子力について反対する意見は皆無になることが難しい中、立地自治体議会をはじめ、常に原子力に関する賛否の議論は起こりうる。いったん発電所ができ、安定した運転が続く限りはその存在について、改めて甲論乙駁の議論をせずとも済む。それだけに、他にも数多の案件を抱える地元自治体とすれば、原子力に関して賛否が激しく議論される事態に発展しかねない新たな論点はないに越したことはない、との考えを持ったとしても致し方ないことであろう。

立地地域がこうした悩みを抱えつつも、反対意見に打ち勝って事業者の意図する新たな工事や運転を認めようという考えを持ってもらうには、まず必要性について大義名分があることが重要である。さらに、その安全性について一点の曇りもない説明が付き、地元にとっての目に見えるメリットがあること。そして何よりも、それに至るためには、国や事業者が地元を裏切ることはないという信頼感があってのことであることは言うまでもないことである。

プルサーマルの地元同意に関連して、ある地点では同意を得るまでに、国は、その必要性について資源エネルギー庁が約20回、安全性について原子力・安全保安院が

10回以上、現地での説明を行ったことがある。これらは国によるものなので、これ以外に電力会社による地区説明会での説明や社員による立地地域の全戸を対象とする訪問説明が行われている。

こうした説明においては、自治体や議会での議論のためのものに加えて、住民にも丁寧に説明を行うことで理解を求めるのであるが、地元での議論は、必ずしも技術的安全性のみに限られず、広い意味での住民の賛意の集約が必要となる。安全規制においては、厳格に安全性に関する判断が行われるわけであるが、一方で住民が求めるのは、抽象的な安心感であり、信頼である。このため、それを民意として斟酌しようとする議会や首長は、慎重な対応を取る場合が多い。原子力について諸手を挙げて賛成の市民ばかり（あるいは議会議員）であれば、首長は国や事業者からいちいち説明を聞かずとも一言『賛成』と述べれば済むかもしれない。しかし、原子力については基本的に新たなことや安全性を減じることを市民は賛成とは言いにくい。ましてや反対派があおればなおのことである。

かくして、原子力発電所の操業に関することも、場合によっては民意に委ねられることとなり、それ故に関係者はその影響の極小化に神経を使うのである。しかし、むしろ大きな枠組みとしては、地元の思いも汲みとりつつ、相互に相手を尊重する相互理解の関係へと発展させることを目指して関係者が努力を行うことが重要であろう。

原子力政策大綱（平成17年11月10日閣議決定）では国と地方との関係について、国と事業者は早い段階で地元説明を行い、自治体に協力すべしとし、その協力を前提とすれば自治体も国や事業者の説明を活かして判断をしてほしいとしている。これは、相互に相手の取り組みを尊重しつつ、理解を深めるといふ、地道な活動を通して、相互の関係が成り立つ、という趣旨であると解する。

小職も、様々な案件の中で、ややもすれば、「一体なぜここまでやらねばならないのか？」との気持ちが生じることもある中で、改めて地元との相互理解の本来の趣旨に立ち返り、また立地地域で伺った心打たれる言葉の数々に励まされつつ、業務に当たっている。

今後、原子力に関する最大の課題のひとつである高レベル廃棄物処分場の立地を行うため、まずは文献調査に向けた取り組みが進められているが、そこでは、より一層のそして処分開始までの息の長い地元との相互理解の取り組みが欠かせないことから、そのために、NUMOのみならず、国自らがそして自分自身が前面に立って努力を重ねていきたいと考える次第である。

(2010年 12月30日 記)



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

原子力委、新原子力大綱策定に着手

原子力委員会は12月21日、「原子力政策大綱」を見直す策定会議の初会合を開いた。現行の大綱は05年の策定から約5年を迎えており、同委員会は7月より有識者との意見交換、原子力施設立地地域および電力消費地での「大綱の見直し」の必要性についてご意見を聴く会、国民からの意見募集を行ってきた。これらの意見や国内外の情勢、06年より実施してきた政策評価の結果などから、これから約1年かけて新たな大綱の策定を目指すとした。国際化に伴う人材育成や海外受注、さらに原子力安全、核不拡散、核セキュリティへ取り組みなどについての議論を深めていく方針だ。

大綱策定の検討にあたっては、原子力委員会委員を含む26人からなる「新大綱策定会議」を設置した。近藤駿介・原子力委員会委員長が議長を務める。委員は、専門分野や原子力を巡る意見の多様性の確保などに配慮して選定した。必要に応じ、原子力委員会が小委員会等の設置および構成員を決める。議事は原則公開し、議事録も会議終了後、原子力委員会ホームページ等で速やかに公開する。また、意見募集やご意見を聴く会の開催などにより広く国民の意見を聴取して、調査審議に反映させる。

(資料提供・日本原子力産業協会)

関電美浜1号機の40年目以降の運転へ、福井県と美浜町が了承

西川一誠・福井県知事と山口治太郎・美浜町長は11月8日、関西電力・美浜原子力発電所1号機(PWR, 34万kW)の40年目以降の運転方針を了承。同機は、11月28日に1970年の営業運転開始から40年を迎えた。商業用原子炉が40年目以降の運転に入るのは、2010年3月の日本原子力発電・敦賀1号機に続き、国内では2基目で、PWRでは美浜1号機が初めてとなる。

関西電力は2009年11月、美浜1号機の40年目以降の運転継続を決定、高経年化技術評価および長期保守管理方針を策定し、これらに基づく保安規定変更を国に申請するとともに、地元福井県、美浜町などに了解を求めた。

高経年化技術評価では、運転開始から60年の期間を仮定して評価を行っており、現在の保全活動に加え、一部の機器に追加保全策を講じることで、40年目以降もプラントを健全に維持できることが確認されている。原子力安全・保安院では、専門家会合での検討、立入検査を踏

まえ、2010年6月に、同評価に基づく美浜発電所の保安規定変更を認可した。これを受けて、関西電力は、同1号機の今後の運転期間を、「最長で10年程度とする」運転方針を決定、地元自治体に対し報告した。

一方、福井県ではこれまでも、立地地域の立場から、美浜3号機事故の経験も踏まえ、高経年化対策の重要性を強く訴えてきており、既に40年目運転入りした原電敦賀1号機も含めて、3～5年程度を目途とした事業者、国による「中間安全確認」の実施などを求めている。

関西電力では、今回の地元了承を受け、「中間安全確認」について、「信頼の確保の観点から大変重要」との考えから、確実に取り組むとするとともに、電力の安定供給確保、地域の発展に向け、今後、美浜1号機の後継機設置の可能性も検討していくとしている。

(同)

2009年度原子力シェア11.8%、資源エネルギー庁発表

資源エネルギー庁が11月9日に発表したエネルギー需給実績速報によると、09年度の国内最終エネルギー消費は、対前年度比2.3%減、これに伴いエネルギー起源CO₂排出量も同5.6%減となった。

09年度の1次エネルギー国内供給総量は、2万482PJ(ペタ<10の15乗>ジュール)、対前年度比5.0%減となり、化石エネルギーのシェアは81.9%で同1.5ポイント減。

そのうち最も多い資源は石油、次いで石炭、いずれも供給総量に占める割合は前年度より微減しており、3位の天然ガスでは逆に微増した。原子力では、供給量が2411PJで同7.2%増、シェアは11.8%で同1.4ポイント増、水力、再生可能・未活用エネルギーはいずれもシェア3.2%で前年度からほぼ横ばい。

エネルギー起源CO₂排出量は10億7,500万トノー

CO₂、対前年度比5.6%減、対90年度比では1.5%増。また、今回の取りまとめに用いた統計に基づくと、09年度の国内エネルギー自給率は、原子力を国産と見た場合19.1%で対前年度1.6ポイント増、原子力を輸入と見た

場合に7.3%で同0.2ポイント増。石油依存度は45.3%で同1.1ポイント減。

(同)

青森県と関係閣僚、政権交代後初めて核燃料サイクル協議会開催

青森県と核燃料サイクル政策関連の政府閣僚らが協議を行う「核燃料サイクル協議会」が11月15日、都内ホテルで開かれた。同協議会開催は、2009年の政権交代から初めて。出席者は、三村申吾知事のほか、仙谷由人官房長官、海江田万里科学技術政策担当相、松本龍防災担当相、高木義明文科相、大島章宏経産相、清水正孝電事連会長ら。

協議会で三村知事は、10年頃から開始することとなっている第二再処理工場の検討を着実に進め、その円滑な実現に向けた研究開発を強化するよう求めるなど、核燃料サイクルを「確固たる国家戦略」として推進するよう要望した。高レベル放射性廃棄物の最終処分場については、「一刻も早く」実現するよう、国が前面に立った不撤退の決意での取組みを要請。六ヶ所再処理工場のしゅん

工延期に鑑み、安定運転技術の確立に向け支援を図るなど、事業の着実な推進を、さらに、原子力施設の立地を活かした試験研究・人材育成も求めた。

これに対し、関係閣僚らは、「中長期的にブレない」強固な国家戦略として、核燃料サイクル政策を推進していくとし、最終処分、サイクル事業などについても、着実に取り組んでいく姿勢を示した。

知事は、電源立地地域対策交付金の維持・充実にも言及したが、国側は地元からの要望を踏まえ、地域振興につながるよう対応を検討していくなどと回答した。

また、清水電事連会長は、新たな工程に沿って、再処理工場が確実にしゅん工するよう、電力、日本原燃と一体となって、「最大限の努力を傾注する」などと述べた。

(同)

東北電力・東通1号、次期定検後の16か月運転を申請

東北電力は11月10日、東通原子力発電所1号機(BWR、110万kW)の次回定期検査終了後の運転期間を現行の13か月以内から16か月以内へと、3か月延長するための保安規定変更申請などの法令上手続きを原子力安全・保安院に行った。2009年1月の新検査制度に基づくもので、今回が初の事例。

新検査制度では、重要な機器の技術評価などを踏まえ、従来の13か月以内から、18か月以内、24か月以内に延長することが可能となっている。

東北電力では10月までに、東通1号機の運転期間延長

に係わる機器について、技術的な評価を行った結果、機器の点検・検査の間隔を26か月としても問題ないことを確認するとともに、燃料交換の間隔の評価も考慮して、18か月は運転可能と評価し、地元自治体に説明を行っている。

国による審査が通れば、同機は11年2月～6月頃を予定する次回定期検査の終了後、長期サイクル運転に入る初のプラントになる。

(同)

高速炉サイクル実用化研究、中間取りまとめを報告

日本原子力開発機構は11月16日の原子力委員会で、高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT)プロジェクトにおける中間取りまとめの概要を説明した。それを受けて文部科学省と経済産業省は中間評価についての進め方を報告した。

革新技術の可能性判断の結果、炉システムにおいて、コンパクト化原子炉構造、ポンプ組込型中間熱交換器の2課題を新たに採用した。直管2重伝熱管蒸気発生器は代替技術の防護管付き伝熱管を採用し、高燃焼度炉心燃

料については検討を継続するとしている。

今後、文部科学省および経済産業省が、外部有識者により構成される合同評価委員会を開催し、そこでの意見を踏まえて評価結果をまとめる。

2011年1月中旬までに3回の合同評価委員会を開いて革新技術の採否等判断結果を取りまとめ、2011年1月から3月の合同評価委員会では、今後の研究開発計画についての評価を行い、最終的な取りまとめを行う。

(同)

関西電力と EDF が包括協力協定、高経年化等の技術交流・情報交換

関西電力は11月17日、フランス電力会社(EDF)と、原子力分野における情報交換を主とする包括協力協定を締結した。同社は EDF と MOX 燃料の導入や耐震安全評価など双方の関心事項について情報交換を行うとともに、88年には全社包括協定を締結し、火力発電や送電分野の情報も交換してきた。

今回、今後の原子力事業において、プラントの高経年化に伴う設備の経年劣化やプルサーマルなどの分野で、長期的かつ継続的な技術交流が必要になることから、協定内容のより一層の充実が必要との考えで両社が一致し

たもの。ジャック・レガルド EDF 発電・エンジニアリング担当上級副社長補佐と豊松秀己・原子力事業本部長が協定書に調印した。

協定の期間は5年間で、プラントの運用・保守、高経年化、原子燃料などの技術的テーマ、発電所現場での課題などについて、情報交換、相互訪問する。

また、同社大飯原子力発電所とフランス南西部にある EDF ゴルフェッシュ原子力発電所と94年に締結した姉妹発電所交流協定についても、同日付で更新した。

(同)

産業界と規制当局で意見交換、新検査制度と規制高度化を議論

原子力安全について、産業界代表と規制側とが意見交換を行う「原子力安全規制ラウンドテーブル」(事務局＝原子力安全・保安院/原産協会)が11月18日、都内で開かれた。7月に続いて2回目の開催で、今回は、新検査制度の定着と安全規制の高度化に向けた取組がテーマ。産業界からは、電事連、日本原子力技術協会(原技協)、電力中央研究所、日本電機工業会、新金属協会、原産協会が参加。

新検査制度について、電事連の武藤栄・原子力開発対策委員長は、電力各社による保全計画の策定、運転中の状態監視、手入れ前状態確認、保全の有効性評価、次期サイクルへの反映といった保全活動のPDCAの取組などを述べた上で、保全活動の継続改善に電事連で積極的に取り組む姿勢を強調した。

これらに対し、保安院は、新制度の運用に際し、膨大な数の機器類の管理、人員の作業管理に触れた上で、知

見を次のサイクルに伝承していく重要性などを述べた。また、原子力安全基盤機構は、先般の東北電力東通1号機の長期サイクル運転を行う保全計画届出に関連し、電力が審査の経験を共有し、効率的な制度運用がなされるよう要望した。

規制の高度化については、電事連より、学会等での法制度に関する検討にも言及し、①安全審査での品質保証の考え方、②安全審査関係文書の統合・最新化、③検査制度での品質保証、④運転開始前の総合的レビュー、⑤外部専門機関の活用、⑥発電炉以外の施設に係わる規制手法——が課題に掲げられた。また、社会受容に関するやりとりもあった。これに対し、保安院は、事業者とのコミュニケーションをとりつつ検討していくなどとした。

(同)

「原子力人材育成ネットワーク」発足、産学官で機関横断的に

産学官一体となった原子力人材育成体制の構築を目指す「原子力人材育成ネットワーク」の設立会合が11月19日、東京・千代田区のKKRホテルで開かれた。これまでの個々の関連機関や個別の連携による取組を、機関横断的活動を通じて、より効率的かつ効果的に推進させ、原子力に係わる社会的基盤の拡大整備、学生等の原子力志向の促進、原子力界を支える人材の確保を図るもの。

原子力人材育成を巡っては、原産協会の「原子力人材育成関係者協議会」が2010年4月、これを戦略的に進めるための中核的恒常機関、いわゆるハブ機能の設立など、計10項目の提言を示しており、今回設立したネットワークは、このハブ機能に係わる活動と合わせ、提言の中から、緊急性かつ実現性の高いものについて実施すべく、関係府省呼びかけのもと、誕生することとなった。

設立会合に伴い行われた同ネットワークの初回運営委員会(委員長＝服部拓也・原産協会理事長)では、当面の活動方針を確認、具体的には、初等・中等教育段階、高等教育段階、人材国際化、新規導入国対象海外人材育成、実務段階のそれぞれについて、分科会を設置し、活動開始に当たっての各機関連携、情報共有を進める。海外人材育成については、「国際原子力協力協議会」(経済産業省)が分科会の機能を担う。ネットワーク活動は、原産協会と日本原子力研究開発機構が当面、共同事務局として実施する。

本ネットワークでは既に、ホームページ(<http://nutec.jaea.go.jp/network/>)を開設し、周知に努めており、HPにリストアップされた参加予定機関は、学校、電気事業者、メーカー、研究機関・学会、原子力団体、

行政庁で、計57機関となっている。

ネットワーク運営委員長を務める服部・原産協会理事は、設立に際し、「世界標準となる原子力人材育成体

系を整備し、日本ブランドとして見えるようにしていくことが重要」とし、多くの関係機関の参加を期待するコメントを発表した。(同)

学術会議・高レベル処分検討会が審議開始

日本学術会議は、原子力委員会からの「高レベル放射性廃棄物の処分の取組における国民に対する説明や情報提供のあり方についての提言のとりまとめ」の審議依頼を受け、「高レベル放射性廃棄物の処分に関する検討委員会」を発足させた。第1回委員会は11月18日に開催され、今田高俊・東京工業大学社会理工学研究科長が委員長に決定した。

活動期間は2011年9月までで、2011年4月ごろを目途に報告素案作成、9月ごろに報告書を作成して原子力委員会に報告する予定。

審議に当たっては、人文・社会科学と自然科学の全分野から高レベル放射性廃棄物の処分の取組における国民

に対する説明や情報提供のあり方について検討する。高レベル廃棄物の地層処分の技術的信頼性についても評価を加え、今後の原子力政策に寄与することを目指すとしている。また、委員会外部からも意見聴取を行って検討を深めていく。

なお、学術会議では6月に設立し、すでに審議が進行している「放射性廃棄物と人間社会小委員会」(委員長＝木村逸郎・大阪科学技術センター顧問/京都大学名誉教授)との連携を重視し、効率的な審議進行を行うことにしている。

(同)

関西電力・美浜1号機、後継機の調査を開始

関西電力は11月24日、美浜1号機(PWR, 34万kW)の後継機設置の可能性にかかる自主的調査を開始した。

美浜1号機の後継機設置に関する可能性検討調査は、動植物調査と地形・地質調査からなり、期間は約1年間を予定している。動植物調査では、発電所から半径約5km内の陸生物調査と発電所周辺海岸線約5kmを行う。地形・地質調査では、発電所敷地内およびその周辺の陸域については、飛行機からのレーザー計測による

地形測量、海域については調査船に取り付けた測深機等により海底の地形測量を行うほか、ボーリング調査、地表踏査により、地質状況や岩石の性状を確認する。

関西電力では、3月に発表した「グループ長期成長戦略2030」で、原子力プラントの将来的な新設・リプレースをうたっている。

(同)

IAEA が原子力新興国の安全規制の技術支援で国際会議—10月に東京で、JNES のホストにより開催

IAEA は10月26日から3日間、東京の日本科学未来館で、原子力安全規制に関する技術支援機関(TSO)に焦点を当てた第2回国際会議(国際 TSO 会議)を開催した(=写真)。原子力カルネッサンスを背景として、新規に原子力開発を進める国々や既存の原子力発電計画を拡大しようとする国々が増大する中で、原子力安全規制に関する基盤整備を技術的に支援しようというのが、この会合のねらい。日本の TSO である(独)原子力安全基盤機構(JNES)はホスト機関として、原子力安全・保安院の協力を得て会議の運営に当たった。

会合には45ヵ国、5国際機関の130名を含む230名が参加。IAEA のフローリー事務次長をはじめ、米国、フランス、ドイツ、中国、ロシア、ベルギー、ベトナム、UAE、ヨルダン、ポーランド等の原子力安全規制機関及び TSO



第2回国際 TSO 会議会場

のトップや、経済産業省副大臣、原子力安全・保安院長等が参加して、議論を行った。

本会議では、とりわけ新興国の原子力安全規制体制を

構築するために、人材育成を含めた安全基盤整備や、最近、関心が高まってきている核セキュリティ対策に各国のTSOがどのような技術支援・協力ができるか等を検討。

原子力安全の更なる向上のための今後の国際協力の方向付けが行われた。

(資料提供：原子力安全基盤機構)

Mo-99/Tc-99mの加速器による製造技術—放医研の研究グループ確立

ガン、脳・心臓疾患などの診断に有用な核医学診断。この検査に用いられる放射性同位元素の60%以上を占めるテクネシウム(Tc)99mの原料であるモリブデン(Mo)99は、カナダ、欧州等に設置された数少ない専用の原子炉で高濃縮ウランにより製造される。ただ、原子炉の老朽化や火山噴火による空路障害などによる供給不足が世界規模で課題となっている。放射線医学総合研究所分子イメージング研究センターの藤林靖久センター長の研究グループは、国内製薬企業が保有する中型加速器を活用し、実用的なMo-99の製造技術の開発に成功した。

加速器によるMo-99、Tc-99mの製造だが、ターゲットに金属固体であるMoを用いる必要がある。同研究グループでは、Moを水溶液化することで流動性を確保し、照射用ターゲット容器の中で直前に乾燥・固体化させる方法を考案した。その結果、Moターゲットを遠隔

的に準備でき、検査に十分なMo-99、Tc-99mを製造することができるようになった。照射後ももう一度水溶液化し、Tc-99mを取り出した後に再び利用することも可能だ。

また、全国130カ所以上でFDG-PET(陽電子断層撮影法)診断に用いられている超小型加速器を用いて簡便かつ効率的に繰り返しTc-99mを直接製造できるシステムの試作にも成功した。

藤林センター長の話「加速器では原子炉とは違って放射性副生成物はほとんどなく、“きれい”なMo-99製造技術といえます。関連する特許申請を終え、日本メジフィジックス(株)と実用化を目指した共同研究契約を締結しています」

(資料提供：科学新聞)

原産協会、日独原子力専門家会合を開催

原産協会は10月28日、第17回日独原子力専門家会合を青森県弘前市で開催した。両国の政府、電力、メーカー、研究機関等からの専門家計24名が個人の資格で参加し、両国の原子力政策・開発の現状、将来展望、燃料サイクルのバックエンドおよび耐震設計等について、情報・意見交換した。会合の共同議長は、秋元勇巳・三菱マテリアル名誉顧問、マンフレッド・ポップ・カールスルーエ工科大学上級顧問。

ドイツではメルケル政権が、原子力発電の寿命延長を平均12年延長したが、再生可能エネルギー重視の風潮が強くなり、2050年に全電力の8割を再生可能エネルギーでまかなうエネルギー戦略を策定している。風力・太陽の再生可能エネルギーによる出力変動が激しいため、電力の供給調整を行うために原子炉も負荷変動させていることも紹介された。

原子力は依然として再生可能エネルギー時代までの

「橋渡し」としての役割であるが、ポップ氏は「欧州のイタリアやスウェーデンで原子力政策が見直されており、ドイツもやがてそうなることを期待する」と語った。

さらにドイツ側から、パイロット再処理プラントWAKからの高レベル液体廃棄物約60m³について、ガラス固化プラントVEKで2009年から2010年にかけてガラス固化を終え、123本のキャニスタに収納したと報告した。

高レベル廃棄物処分場立地については活発な議論が行われた。ドイツでは30年前に政府が地質的に適切な場所(岩塩層)を選定し、ゴアレーベンに絞って調査を続けてきた。ポップ氏は、処分場問題は極めて政治的問題であると前置きした上で、「最終処分場を見つけることが原子力理解の鍵である」と強調した。

(資料提供：日本原子力産業協会)

原産協会がクリアランスベンチを設置

原産協会は、日本原子力発電会社・東海原子力発電所の廃止措置に伴って出てきた、燃料取替機からの鉄スクラップを鉄脚に製造し直した2人がけベンチを購入し、PR用ベンチとして説明プレートと共に、東京・港区の事務所入口に11月10日設置した。

原子力発電所の廃止措置や運転・補修に伴って発生するもののうち、「放射性物質として扱う必要のないもの」を、法令等で規定された手続きに基づいて、資源としてリサイクル可能な有価物(スクラップ金属など)や一般の廃棄物として取り扱えるようにすることを、「クリアラ

ンス」という。海外では既に多くの国でクリアランス制度が運用されており、我が国でも05年度に法令が改正され、同制度が導入された。クリアランスはリサイクルを推進するものであり、地球環境への負荷低減、我が国が目指す循環型社会形成に寄与することから、原産協会としても制度定着に向けた普及と理解促進活動に取り組んでおり、今回はその一環。

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10月～12月の番組は以下の通り。

- ・ともに考える原子力・放射線—原産協会の理解促進活動(10/18公開)

このクリアランス制度 PR 用ベンチは、原産協会の会員から要望があれば、各種イベントなどでの利用に貸出している。

貸出申込みは、原産協会総務部(電話03-6812-7100)まで。

(同)

- ・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—高速増殖原型炉「もんじゅ」のいま(12/15公開)

(同)

海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[米国]

エンタジー社が V・ヤンキー炉の売却を検討

米国のエンタジー社は11月4日、バーモント・ヤンキー原子力発電所(BWR, 65万kW)の売却を検討していると発表した。同社は1972年に運開した同炉を2002年にバーモント・ヤンキー原子力発電会社から購入。2012年3月に現在の40年の運転認可が期限切れとなることから、さらに20年の運転延長認可を米原子力規制委員会から取得する手続き、および地元電力会社との長期的な電力購入交渉も継続中だとしている。

また、売却理由は単純に株主の利益を考慮したためと説明し、現在の従業員の雇用継続も保証する方針だと明言した。

しかし、同炉では2007年に冷却塔が倒壊したほか、2010年1月には配管からトリチウム漏れが検出されるなど、州民の心象が悪化。翌2月には州議会上院が「ヤンキー炉の運転認可延長は認めない」との票決を下していた。11月2日の中間選挙で州議会議員が入れ替わったものの、2月の票決を認可延長非承認に導いたP・シュムリン上院議長は新たに同州知事に選出されている。

エンタジー社はその2日後に売却提案を公表しており、同社が現状下での認可延長を断念したと見る向きが大勢だ。同炉の引き取り手が現れるかどうかは微妙な状況だ。

[フランス]

アレバ社と原子力庁、ナトリウム高速炉を協同設計へ

アレバ社とフランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)は11月9日、第4世代の新型ナトリウム冷却高速炉の協同設計で合意に達した。

「ASTRID」の呼称で開発中の高速炉について原型炉の初期設計研究を行うという計画で、2012年までに予備設計の第1段階を完了した後、2014年までにその第2段階および詳細設計段階を終了。フランス政府は2017年に実証炉の建設に進むか否かの判断を下すことになる。

CEAは1950年代から高速炉開発に着手。高速増殖原型炉フェニックスおよび実証炉スーパーフェニックスで得られた豊富な経験を元に、フランスではナトリウム冷却による高速炉(SFR)技術の完全な成熟を目指す方針だ。

このため、第4世代炉の長期的オプションとしてガス冷却高速実験炉「ALLEGRO」の事業可能性調査を並行して進める一方、ASTRIDをSFRの基準炉と位置付けて開発しているもの。順調に進めば2020年以降に運開し、高レベル廃棄物の燃焼・減容に活用することになる。

今回の計画は、2006年6月に制定された「放射性廃棄物及び放射性物質の持続可能な管理に関する計画法」と、2010年9月にCEAとフランス政府が結んだ「将来投資プログラム」に関する合意に基づいており、同プログラムの下で立ち上げられた最初の産業パートナーシッ

プとなる。この時の合意で、政府は17年に設計の詳細段階が完了するまでに6億5,200万ユーロをASTRID計画に提供すると約束していた。

具体的な作業分担としては、アレバ社が原子炉設計に関する特殊な経験と技術を生かし、ASTRID炉の原子力蒸気供給系と補助装置および計装制御(I&C)系を設計。CEAの研究開発チームはプロジェクト全体の管理のほか、炉心と燃料の設計を担当する。土木工事やタービン系など、その他のエンジニアリング作業については分担仕分けの最終段階中だとしている。

同計画では、高速中性子炉(FNR)が次の4つの第4世代原子炉・基準をクリアできるよう、革新的な設計の実証炉を建設することを目標としている。すなわち、①高度な核物質リサイクル、②EPRと同等の盤石な安全性をASTRIDで実証、③運転者の高い信頼性と有用性、④核不拡散上の規制項目との整合性。

ASTRIDの稼働により60万kW程度の発電が期待されるが、商業炉の初号機を建設する前に、それまでのFNR以降の技術革新をテストする実証施設が必要となるとしている。

[英国]

ロールス・ロイス社、中国から原子力機器製造を受注

英国のロールス・ロイス社は11月5日、中国で建設中の原子炉8基に計装制御(I&C)系機器を供給する契約を中国核電工程有限公司(CNPEC)から受注したと発表した。

フランスから導入したPWR技術をベースに、中国が国産化を進めているCPR1000用の制御棒操作系(RCS)6台と中性子計測系(NIS)8台をフランスのメイランの施設で製造する予定で、契約総額は3,500万ポンド程度。中国広東核電集团有限公司(CGNPC)が建設中の紅沿河原子力発電所5,6号機、防城港1,2号機、陽江3~6号機プロジェクトで使用されることになる。

同社によると、同社の中国原子力市場への供給は90年代初頭に始まっており、近年では福建省の寧徳および福清の両発電所や浙江省の方家山発電所を含めた10基の原子炉建設計画でもRCSとNISを納入予定だ。

英国においては2008年7月、これまでの原子力潜水艦製造から大規模な成長が見込まれる民生用原子炉市場への参入を表明。2009年7月には、英国政府が国内原子力供給チェーン再開発・強化戦略の一環として設置した「先進的原子力機器製造研究センター(NAMRC)」で、参加企業30社の連合を取りまとめる役割を担っている。

[リトアニア]

ヴィサギナス原発の入札者選定作業はじまる

リトアニアは、計画中の新規原子力発電所の戦略的投資企業の入札選定作業を開始した。同プロジェクトを実現できる電力企業が過半数株を保有する見込みである。入札者を明らかにしていないが、リトアニア・エネルギー省は11月11日、戦略的投資企業から出された「拘束力のある提案」の分析作業を開始したと発表した。同時に、地域のパートナーもプロジェクトへの参加提案を提出している。

プロジェクトの目標は、リトアニアの約70%の電力を供給していたイグナリナ原子力発電所(RBMK2基)の閉鎖に伴い、同原発に隣接して新たにヴィサギナス原子力発電所を建設することである。新しい原子力発電所は、環境影響評価によれば、出力は最大360万kWで、1基または2基の大型炉からなり、冷却は湖が冷却塔、あるいはそれらの混合方式を想定している。

地域のエネルギー・ミックスの主要部分として原子力を復活させることは、バルト3国(リトアニア、ラトビア、エストニア)のロシアへのエネルギー依存を大幅に低下させる。

同プロジェクトの初期には、ラトビアとエストニアは共にリトアニアの計画を強く支持し、同等の出資を考えていた。ポーランドも当初、同計画に参画していたが、その後、独自の原子力発電計画を打ち出した。いったんは、4カ国による持株会社としてリトアニア電力機構(LEOLT)が設立されたが、2009年末に解散された。現在、リトアニアのヴィサギナス原子力発電会社(VAE)がプロジェクト会社として同計画を継承している。

VAEは2009年12月、新規発電設備の開発や原子力発電所の運転経験のある企業に対しリトアニアへの投資を呼びかけた。

リトアニアのエネルギー大臣は11月11日、「年内に戦略的投資家を選び、2011年中に独占的交渉を完了させる」と述べた。リトアニアはヴィサギナスの株を34%保有する考えで、過半数株は主要投資家が保有することになる。

一方、リトアニア国境近くの2ヶ所で、ロシア製原子力発電所の計画が具体化しつつある。リトアニアのすぐ南では、ベラルーシがロシア製加圧水型炉2基の建設準備を進めている。リトアニアのすぐ西では、カリーニングラード(ロシアの飛び地)で2011年4月、バルティック原子力発電所の建設が始まる予定である。

[中国]

アレバ社が中国の2社とサイクル分野で大型契約

アレバ社は11月4日、中国核工業集团公司(CNNC)および中国広東核電集団有限公司(CGNPC)と、燃料供給と使用済み燃料のリサイクル、および燃料棒部品の製造企業設立など3件の大型契約を締結した。

中国の胡錦濤国家主席のバリ公式訪問に合わせて、両国の国家元首立ち会いの下で調印したもの。大規模な原子力開発を進める中国は燃料サイクルの確立も視野に入れており、先月もベルギーとMOX燃料製造施設の建設で協力枠組み協定に調印した。国内ではすでに、甘粛省蘭州で440kg(重金属換算)/日の再処理パイロットプラントを調整・試験中のほか、2020年に商業用再処理施設の操業開始を目指しているという。

今回、アレバ社が中国と結んだ契約の一つ目は、CGNPCに2万トンの天然ウランを10年間で納入するというもので、契約総額は35億ドルとなっている。

2件目は使用済み燃料処理とリサイクルに関するCNNCとの企業間協力合意。中国が計画する大規模な商用再処理事業に対する協力として、2009年12月に両社が交渉を始めていた案件で、すでに商業契約に進む最終段階にあるとしている。

もう1件では、アレバ社とCNNCが折半で燃料棒用のジルコニウム管の製造販売会社を上海で設立する。「CNNCアレバ上海製管(CAST)社」との名称で、12年末から事業を開始する計画である。

ロシアと田湾3・4号機 VVWR 導入で契約

中国核工業集团公司(CNNC)は11月25日、傘下の江蘇核電公司(JNPC)とロシアのアトムストロイエクスポート(ASE)社が田湾原子力発電所3、4号機に100万kW級のロシア型PWR(VVWR)を導入することで11月23日に契約を結んだと発表した。調印には、中国の温家宝首相とロシアのV・プーチン首相が立ち会った。

田湾発電所ではすでに、1、2号機としてVVERが稼働中。3、4号機の建設については2010年3月の中露首脳合意に基づいて、9月にJNPCの上部機関とASE社が技術設計契約の実施契約を締結していた。

同発電所ではさらに、5～8号機まで建設することが決定済み。CNNCの子会社として発電所建設計画の初期計画や評価、コンサルティング、設計エンジニアリング、環境評価、資機材調達等を担当する中国核電工程有限公司(CNPE)はすでに、5～8号機までのEPC(設計・

調達・建設)契約をJNPCと結んでいる。5、6号機の炉型はCP1000となる予定。7、8号機に関してはすでに、敷地の確保、炉心の設置位置も決ったが、炉型については政府の技術路線戦略に基づき今後4年以内に決定するとしている。

[EC]

放射性廃棄物の最終処分で指令案提案、4年以内に計画の提示を要請

欧州連合(EU)の政策執行機関である欧州委員会(EC)は11月3日、放射性廃棄物最終処分の安全基準となるEU指令案をEU加盟国に提案した。原子炉および医療・研究施設から出る使用済み燃料と放射性廃棄物が最終処分に至るすべての段階で、各国が国際的な安全基準を適用するよう法的拘束力をもたせるほか、各国がいつ頃、どこで、どのような処分場を建設する方針であるかを示した「国家計画」を2015年末までに策定・提出するよう求めている。2003年に提示した同様の指令案と比較すると、処分スケジュールに年限を設けない緩やかな内容で、域内共通の管理・法制度構築に向けたEUの決意が滲み出たものになっている。

ECが2003年にEU閣僚理事会に提出した指令案では、(1)2008年までに廃棄物の最終処分サイトを決定、(2)高レベル廃棄物(HLW)については2018年までに処分場の操業を開始、(3)低・中レベル廃棄物は2013年までに操業開始——などを義務付けていたため、加盟国が反発。ECは翌2004年、欧州議会の作成した「具体的な年限を明記しない修正案」を再び理事会にかけたが、最終的な採択には至らなかった。

今回の案では、加盟国は同指令案が理事会で採択されてから2年以内(2013年)に同指令を国内法に盛り込むほか、4年以内(2015年末)に「国家計画」を提出しなければならない。

ただし同計画は、加盟国が4年以内に処分場サイトを選定するよう意図したものではなく、複数の候補地に関する分析活動や、いつ頃までに決定を下すかなど、処分場の建設開発計画について加盟国に文書で説明させるのが趣旨だ。

また、原子力を利用するすべての加盟国に対して、あらゆる段階の使用済み燃料と放射性廃棄物の管理と最終処分について、国際原子力機関(IAEA)の安全基準に照らして策定した共通の基準を適用させる法的強制力を持つ枠組みとなる。

「国際原子力開発」ベトナムの原子力発電導入に向けて 官民一体となった受注活動の経緯

国際原子力開発(株) 高橋 祐治

「ジャパンイニシアティブ」というキーワードの下で、政府、電気事業者、メーカーが一致団結して戦略的な対応をとるべく国際原子力開発株式会社が設立された背景、ベトナムでの受注活動および今後の展望について記す。

I. はじめに

世界的にエネルギー安全保障、地球温暖化問題、経済発展などの観点から、原子力再評価の動きが加速している。電気事業者は国内における原子力施設の安定運転の実績を積み重ね、原子力に対する国民の皆様の理解醸成に努めつつ、産学官の英知を結集し、世界的な原子力利用の維持・拡大に向けた課題解決に率先して取り組んでいくことが必要である。

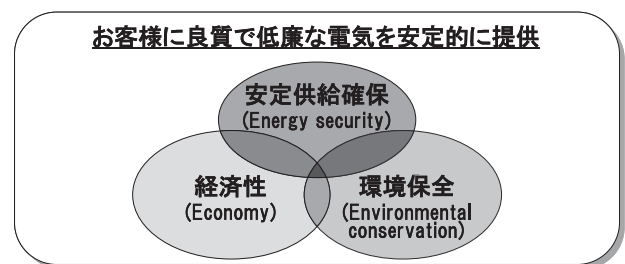
ここでは、原子力発電所の国際展開に関して、電気事業者の状況、国際原子力開発株式会社(以下「JINED」という)の設立に至った経緯、現在の取組み状況および今後の展望について紹介する。

II. 電気事業者の取組み

1. 国内における取組み

国際展開に言及するにあたっては、まずは、国内設備の安全・安定運転および稼働率向上をすすめることが前提となる。そのために、電気事業者は、お客様に良質で低廉な電気を安定、安全に提供するために、3つのE【安定供給性(Energy security)、環境保全(Environmental conservation)、経済性(Economy)】(第1図)の同時達成を目指して、二酸化炭素(CO₂)排出削減対策を進め、エネルギー寡消費社会の形成に向けた貢献に、最大限努力を行っている。

また、地球温暖化への対応や電力供給の安定性や経済性を考慮し、原子力を中心に、火力、水力等をバランスよく組み合わせ「電源のベストミックス」をすすめている。発電時にCO₂を排出しない原子力の重要性は高く、今後とも、わが国における地球温暖化対策の中心的な役



第1図 3つのE

割を果たすものとする。電気事業者は、原子力の推進を経営上の最重要課題として位置付け、国との連携のもと、安全確保を前提に地元の皆様をはじめとした国民の皆様のご理解を得つつ、「原子力立地の推進」、「設備利用率の向上」、「原子燃料サイクルの確立」、「バックエンド対策」等に最大限の努力を傾注しているところである。

なお、日本国内の原子力発電所の設備利用率は近年、原子力不祥事、予防保全による定期検査期間の長期化、中越沖地震等の影響により低迷している状況であるが、品質保証の充実等、原子力発電所の安全性・信頼性の向上を図ることを前提に、既設原子力発電所の活用方策として、新検査制度の円滑な推進、運転中保全の導入拡大、出力向上の推進等について積極的に取り組むことで科学的・合理的な運転・保守管理を確立し、2020年には設備利用率85%を目指すこととしている。

さらに、国内の原子力産業が活性化し、メーカーや部品供給会社などの経営基盤が安定することで、技術力の維持や優秀な人材の確保に繋がり、国内プラントの建設や保全の充実に繋がるものとする。

2. 国際的な取組み

わが国の原子力産業は、原子炉メーカーの優れた技術力や豊富な経験・ノウハウ、納期やコスト管理の正確さ、品質の高さはもとより、厳格な国内基準の下での電気事業者の運転・保守技術など、世界トップレベルの総

“International Nuclear Energy Development of Japan Co., Ltd.” Aiming at the Introduction of Nuclear Power Plant in Vietnam; Background of Ordering Operation by both the Public and Private Sectors : Yuji TAKAHASHI.

(2010年 12月 9日 受理)

合的技術力を保持している。

また、新規導入国の要請に的確に応えるために、関係機関が連携を密にし、一体となって一元的に取り組めるように、電気事業連合会、日本電機工業会の協力のもと、原子力産業協会によって、わが国の国際協力の中核機関としての役割を担う「一般財団法人原子力国際協力センター」(JICC)が2009年3月に設立された。

人材育成は、約40年にわたり実績があるわが国において最も貢献できる分野の一つであり、相手国の導入段階、ニーズに合わせたきめ細かい貢献が可能である。電気事業者は、これまで培ってきた経験やノウハウを活かして、人材育成の観点から、原子力新規導入国や導入拡大国に対して様々な形で協力してきている。具体的には、1992年度以降、国の国際研修事業や人材育成事業に協力して、ベトナムや中国などから研修生の受け入れや相手国への講師派遣を行っている。

Ⅲ. 国際展開の意義

実現性の高いプロジェクトとして確認された建設計画は、世界で74基、7,460万kW(原産協会調べ、2010年1月現在)。さらに、将来構想としては、37か国で合計299基、約304GW(世界原子力協会WNAデータ、2009年12月)。将来的には、中国やインドも国際市場に参加することが予想される。いずれにしても、原子力を営む上では、“Safety”, “Safeguard”, “Security”の3Sに加え、“Sustainability”も不可欠と考える。こうしたことは、すべてのプレーヤーが尊重し、確保することが不可欠であり、その上で、切磋琢磨することが望ましい。

わが国は、平和利用に徹した原子力技術の開発・運用を行っており、とりわけ非核兵器国として、唯一、濃縮、再処理といった機微技術の開発に取り組み、核燃料サイクルの確立を推進する中で保障措置などの国際的規範を厳格に遵守するとともに、プルトニウム利用計画などの情報を積極的に公開することで、国際社会の理解と信頼を得るための透明性の確保にも努めてきている。したがって、このような実績・経験を活用し、諸外国と共有することで、世界全体における原子力発電利用の拡大をすすめて、核不拡散体制を維持・強化する課題達成に貢献できる。

原子力新規導入国に対しては、多くの機関・団体の技術やノウハウを提供して定着させることが必要であり、国が主体となった国家プロジェクトとして取り組むことが必須である。電気事業者は、ユーザーの立場から、これまで40年にわたる原子力発電の設計、建設、運転、保守の各段階における豊富な経験を伝えることで、世界的な原子力安全の確保に貢献することが可能である。具体的には、相手国の電力公社等の実施主体に対して、プロジェクト管理、工程管理の支援や人材育成への協力、営業運転開始後の運転・保守への支援などが経験を活か

せる分野であると考えている。電気事業者は、海外における原子力の開発に携わることにより、低炭素社会の実現に向けた国際貢献や日本メーカーの経営基盤が安定することで、技術力の維持、優秀な人材確保につながり国内プラントの保全・リプレースに寄与するものと考えており、特に2010年10月31日に日越首脳会談で合意されたベトナムの原子力発電所建設プロジェクトへの参画には、日本としては初めての経験でもあり、大きな意義を感じている。さらに、メイド・イン・ジャパンの原子力が導入されていくことは、わが国の原子力産業の発展に貢献し、国内の電気事業の技術基盤の強化にもつながる。

一方、先進国、導入拡大国に対しては、多くの国を対象に二国間原子力協定の整備など環境整備が進められていることから、産業界が独自で商業ベースの展開を行っているが、電力事業者としては、約40年にわたるユーザーとしての建設や運転保守などにおける技術やノウハウを活かした支援が可能と考える。

なお、原子力発電の海外展開についても、火力発電で行っているように、技術やノウハウをビジネスとして展開していくことが考えられる。

さらに、海外展開を通じた国際的に通用する人材の育成や原子力技術の継承という視点においても意義は大きい。

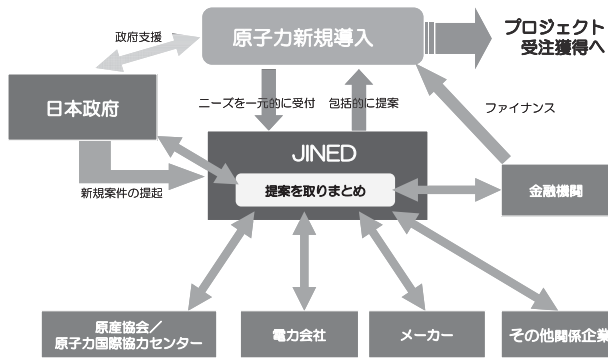
しかしながら、原子力の持つ特殊性、人材のリソース配分、様々なリスクヘッジなどに考慮するとともに、国内原子力施設の安定した運転実績を積み重ねていくことが前提となる。

Ⅳ. JINED の設立

これまでのベトナムへの協力・支援は、わが国の新規導入国支援のモデルケースとなるが、協力・支援については相手国のニーズに踏まえつつ、相手国において高い安全レベルで原子力発電所が運営されることが最終到達点と考えている。そのためにも、建設、運転、保守などの経験の蓄積が活用できること、すなわちわが国で実績のある炉が導入されることが望ましい。わが国の原子炉メーカーが各社の戦略に基づき海外建設市場を開拓している状況下で、政府および電気事業者も連携し「ジャパニニシアティブ」というキーワードの下で一致団結して戦略的な対応をとるべく2010年10月22日にJINEDが設立された。

第2図に示すとおり、原子力発電所新規導入国がわが国に期待するニーズに対し、わが国が提供できる原子力発電所の建設、運転保守、人材育成、発電所の運営等を、日本政府による制度整備や資金等に関する支援策と連携して、一元的・包括的に相手国に提案し、日本に発注頂けることが、JINEDの目指すところである。

さらに、相手のニーズに応じてBWRとPWRの2つ



第2図 国際原子力開発(JINED)の役割

の炉型と、運転・保守などに関するノウハウを提案できること、また、メーカー3社で取り組むという強みを活かし、協力的に知恵を出し合っていくことで、総合的な競争力のある提案ができると考えている。さらに、メーカーと電力が一体となって会社を設立したことで、新規導入国に対して、数十年にわたる建設・運転・保守の経験を活用することができるとともに、プラントメーカーとユーザー側の電力双方の視点から、相手の立場を理解した受注・提案活動が可能となっている。

V. ベトナムの原子力発電受注活動

1. 電気事業者によるベトナムへの協力・支援

電気事業者によるベトナムへの原子力導入に向けた協力については、(社)日本原子力産業協会(原産協会)(当時は(社)日本原子力産業会議(原産会議))と協力して10年以上実施してきている。例えば、要人・研修生の原子力発電所の視察や研修施設における研修、ベトナムでの原子力展示会開催や関係機関表敬訪問におけるミッション派遣等に協力し、原子力発電に対する理解促進活動を行っている。2001年には、当時のベトナム工業商工省(現在の商工省)からプレ・フィジビリティ・スタディー(プレFS)への協力要請があり、原産協会、メーカー、電力が協力して報告書を作成した。プレFSはその後ベトナム国内でレビューされ、投資報告書として、2009年11月にベトナム国会で承認された。これに基づき今後FSが開始される予定である。

電気事業者は、ベトナムへのFS実施主体を日本原電とし、FS準備の協力を行っている。例えば、国際原子力機関(IAEA)ガイドラインに準拠し、ベトナム側が考えるFSで実施すべき事項や他国の原子力発電所FS実績を加味してFS範囲を設定するため、「炉型候補の評価」、「立地地点の評価」、「経済性、財務評価」、「組織体制」、「人材育成計画」等について具体的な意見交換を実施中である。なお、日本原電ではベトナムやカザフスタン等、国際的な技術協力業務の推進のため、「国際協力技術開発チーム」を本店内に設置し、FSの準備・実施を含む、原子力発電導入等に係る具体的な国際技術協力を行っている。

2. 官民一体となった受注活動

2010年10月31日の日越首脳会談で、ニントゥアン省の原子力発電所第2サイト(第3図)における2基の建設については、日本をパートナーとすることが合意されたことについては、政府をはじめとするこれまで関係された皆様のご尽力・ご支援に感謝している。

この合意は5月以降の官民一体となったベトナム国への働きかけ、2010年8月の直嶋経済産業大臣および電力、メーカーTOPによるハイレベルミッション時の包括的な提案、ならびに10月のJINEDの設立による窓口の一本化など、これら一連のわが国の取組み姿勢を評価いただいたものと認識している。また、(1)日本の原子力に対する理解増進活動を含め、官民両面での長年にわたるわが国とベトナムとの間の緊密な協力関係、(2)政府および政府関係機関の全面的支援、(3)日越原子力協力パッケージの提案を含む官民一体での強力な働きかけ、などについて評価いただいたものと認識している。

今回のベトナムでの進展は、わが国原子力産業の海外展開にとって大きな第一歩であると同時に、安全で信頼できる原子力発電の実現を通じて、ベトナムの経済成長にも貢献するものと理解している。

2010年8月のハイレベルミッションの際、日本側はベトナムに対して、6つのニーズ(「先進実証技術の提供」「人材育成協力」「資金面での協力」「燃料安定供給」「放射性廃棄物処理・処分支援」「ベトナムの原子力産業発展支援」)に対応した包括的な提案を行っている。今後、ベトナム原子力2期計画の具体化に向けて、JINEDが一元的な対応を行うことになり、2021年運転開始に向けてベトナム電力公社(EVN)と具体的な進め方について議論していくところである。また、日本原子力発電(株)と、ベ



第3図 ベトナム国ニントゥアン省第二サイト

トナム電力公社にて、原子力発電所導入可能性調査が開始されることとなっている。

本プロジェクトは、EPC(Engineering, Procurement & Construction/エンジニアリング・資機材調達・建設)の受注、建設を経て運転開始まで10年、その後の運転を考えれば60年、70年の超長期プロジェクトである。また、新規に原子力発電を導入する国へ展開するプロジェクトであり、制度、人材、技術などのあらゆる分野での基盤整備が成功の成否を握る。

JINED は、ベトナムのニーズを一元的に受け付け、政府と連携しながら国内企業(原産協会/原子力国際協力センター、電力会社、メーカーなど)の提案を取りまとめ、包括的に提案を行う。電力会社は運転管理支援などを担い、メーカー・ゼネコンが主にエンジニアリング・資機材調達・建設(EPC)を担うことが基本となる。40年以上にわたる発電所の建設・運転・保守などの経験をもとに、相手国の要望をお聞きした上で、要望に応じた提案を行っていく。

わが国の原子力発電所は、安全性については、世界最高水準である。その優れた発電設備と運用ノウハウを世界に輸出することで、世界的な安全性の向上に貢献していくことが、わが国の責務と考えている。

したがって、例えばコスト競争になったとしても、安全をないがしろにする提案はあり得ない。同時に、原子

力発電所の設計では、建設する地点の特性も大いに影響する。国内の様々な地点で建設した経験を踏まえて、最適な提案ができると考えている。

VI. 最後に

現時点で具体的に提案を検討している国はないが、原子力発電新規導入国における日本としての原子力発電プロジェクトに関する提案活動を、経済産業省からの要請等も踏まえ、引き続き行っていく。

新たに原子力新規導入国において発電事業等への参画を求められた場合は、個社・個別案件ごとに判断することにはなるが、ベトナム同様、官民一体となって、まずは相手のニーズを聞き、相手の目線にたった対応策を提案するとともに、日本の強みである高い技術力に加え、「几帳面」「丁寧」に誠実で信頼感のある仕事ぶりをアピールし、信頼を得てまいりたい。

著者紹介

高橋祐治(たかはし・ゆうじ)

国際原子力開発株式会社業務執行取締役
(専門分野)原子力発電技術



我が国の最先端研究開発

シリーズ解説 第26回

低線量影響としての放射線適応応答

放射線防護へのインパクト

(独)放射線医学総合研究所 王 冰, Guillaume VARES, 酒井 一夫

「放射線」という言葉は、原爆などを連想して、「危険で有害なもの」という印象を与えることが少なくない。事実、高い線量の放射線は、生体に対して有害な影響を与える。しかしながら、最近の研究によって、低線量放射線には異なる側面があることが明らかになりつつある。一例として、放射線適応応答が挙げられる。放射線適応応答は、低線量放射線の事前照射によってその後の高線量放射線に対する抵抗性が獲得される現象であり、低線量特異的な防御的生体応答の一つである。現在、放射線防護体系の根拠となっている「しきい値なしの線形(Linear No Threshold: LNT)モデル」は、単純で堅実な放射線リスク評価の考え方であるものの、低線量放射線に特有な生体防御機構の存在と相容れない。科学的知見に基づく、現実的かつ合理的な放射線防護の基準作りが求められている。一方、放射線適応応答のメカニズムを明らかにすることによって、放射線リスクの低減化を図る積極的放射線防護や放射線治療応用へ向けた新たな研究の展開が期待されている。放射線適応応答の研究は、その発見以来、長い間現象論的な議論にとどまっていたが、ようやく近年、遺伝子レベルの解析が進むようになった。放射線医学総合研究所(放医研)放射線防護研究センターでは、第2期中期計画(平成18~22年度)において、マイクロアレイ技術(高密度で遺伝子断片(プローブ: 探り針)を固定したガラス板(マイクロアレイ)を用いて、遺伝子の発現活性(mRNAの量)を網羅的に測定する技術)やRNA干渉技術を用いて新たな角度から、放射線適応応答の分子メカニズムに迫る研究を実施し、関連遺伝子を明らかにしてきた。本稿では、放射線適応応答研究の概要を解説するとともに、放医研における研究成果の一端を紹介する。

I. はじめに

医療や様々な産業における放射線利用の拡大、そして宇宙開発などによって、人類と放射線の関わりはますます広く、深くなってきた。それにともない、放射線のヒトの健康に対するリスクを正確に評価することも、同様に重要性を増している。

現在の放射線防護体系において、「放射線発がんや遺伝的影響のリスクは総線量に直線比例する」とする、いわゆるしきい値なし直線仮説(linear no threshold, LNTモデル)に基づいて低線量放射線のリスクが評価されて

いるため、その影響は蓄積するとされ、またどんなに微量であっても有害であるという考え方で管理されてきた。このような考え方は、しばしば科学的真実と受け入れられて、公衆の低線量放射線に対する不安感の要因になってきた。ところが最近の研究により、条件によっては、生体は放射線に対する防御(障害が抑制される)メカニズムが誘導されることが明らかになってきた。あらかじめ低線量放射線を浴びることにより、その後の放射線被ばくに対して抵抗性を獲得するという、放射線適応応答はその一つである。放射線適応応答の発見は、放射線影響の蓄積性を否定するものであり、低線量放射線の防護の考え方に大きなインパクトを与えた。

放射線適応応答の概念は、1984年に米国カリフォルニア大学の Olivieri らによって、培地にトリチウム標識されたチミジンを加えてヒトのリンパ球を培養(低線量 β

Radioadaptive Response as One of the Specific Effects Induced by Low-dose Irradiations; Its Impact on Radiation Protection: Bing WANG, Guillaume VARES, Kazuo SAKAI.
(2010年 11月10日 受理)

線処理)しておくこと、その後、高線量 X 線 (1.5 Gy) を照射した際に誘発される染色体異常の頻度がほぼ半減することが観察され、初めて報告された。そしてより一般化され、放射線適応応答は「あらかじめ少量の放射線で生体 (細胞あるいは動物) を照射することにより、その後の高線量照射に対する抵抗性が誘導されること」と定義された。実験条件を記載する際に、しばしば少量の事前照射を priming dose、その後の高線量照射を challenge dose と呼んでいる。

放射線適応応答は、放射線の生体への影響が高線量の場合と低線量の場合で大きく異なることを示していることから、放射線生物学における一つの基礎研究分野として深く興味を持たれている。また、各種疾患の原因となる細胞障害や組織障害の軽減等、放射線適応応答の新たな医療応用に向けて可能性が検討されている。

初期の放射線適応応答の研究は、主に現象論を中心に進められてきた。Olivieri らにより放射線適応応答が発見されて以来、様々な実験系で類似の現象が見出されている。細胞レベルの研究では、末梢血リンパ球を始め、正常細胞やがん細胞において、染色体異常、DNA の二本鎖切断 (Double Strand Break: DSB)、姉妹染色分体交換、微小核形成、突然変異、形質転換、細胞死などを指標とした放射線適応応答が報告されている。マウスなどの動物個体を用いた研究はまだ数少ないが、発がん (リンパ腫)、致死および胎児被ばくによる奇形発生などを指標として、放射線適応応答が報告されている。

その後、詳細な観察と分析により、放射線適応応答の特徴とメカニズムがしだいに明らかにされるようになってきた。放射線適応応答を評価する指標 (影響の種類) が多岐にわたることから、そのメカニズムを統一的に理解することは容易ではないが、メカニズム解明の手掛りとなる知見は蓄積されつつある。放射線適応応答の特徴として、低線量事前照射から抵抗性の獲得までに一定の時間を要すること、抵抗性の誘導に最適な線量と線量率が存在すること、遺伝子発現の誘導とタンパク質合成が必要であること、遺伝的背景 (用いている細胞や動物個体もっている全遺伝子の構造や機能) に依存することなどは、共通している。一方、すべての場合に共通して観られるものではないが、放射線適応応答条件下で、DNA 修復能力の増強、抗酸化機能の亢進、免疫刺激などが起こっていることが報告されている。放射線適応応答の分子メカニズムについてはまだ発展途上の段階であり、適応応答関連遺伝子として p53 遺伝子 (放射線に対する生体応答において多くの重要な役割を果たしている遺伝子。「ゲノムの守護神」と呼ばれている) が唯一確認されているのみである。

II. 放医研放射線防護研究センターにおける最近の研究成果

放射線適応応答の研究は、その発見以来、長い間現象論の議論にとどまっていた。また、放射線適応応答のメカニズム研究は、そのほとんどが培養細胞レベルのものであった。しかしながら、放射線適応応答はもとより、低線量放射線の生体影響研究に求められるものは、まずは個体影響の解明であり、最終的には低線量放射線のリスク評価である。したがって、細胞レベルで得られた知見は、個体レベルの実験へ展開し、個体レベルで検証しなければならない。このような意図に基づき、放医研放射線防護研究センターでは、細胞および個体レベルの放射線適応応答の分子メカニズムを第 2 期中期計画 (平成 18~22 年度) の重要な研究テーマの一つとして位置づけて実施してきた。本章では、マイクロアレイ技術 (高密度で遺伝子断片 (プローブ: 探り針) を固定したガラス板 (マイクロアレイ) を用いて、遺伝子の発現活性 (mRNA の量) を網羅的に測定する技術) や RNA 干渉技術を用い、放射線適応応答の分子メカニズムに迫ることを試み、いくつかの関連遺伝子を明らかにした。以下にその概要を紹介する。

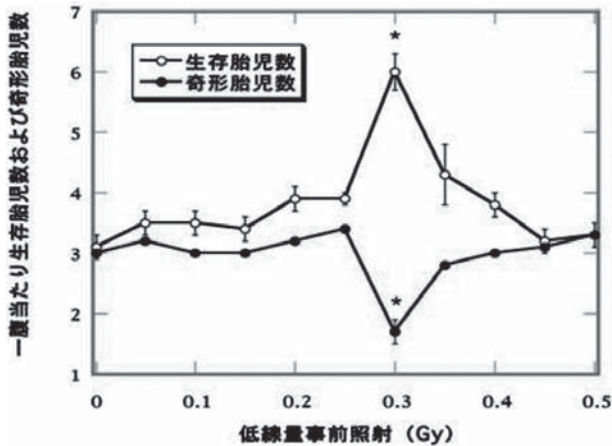
1. マウス器官形成後期における発生異常を指標とした放射線適応応答

(1) 実験系および観察される現象

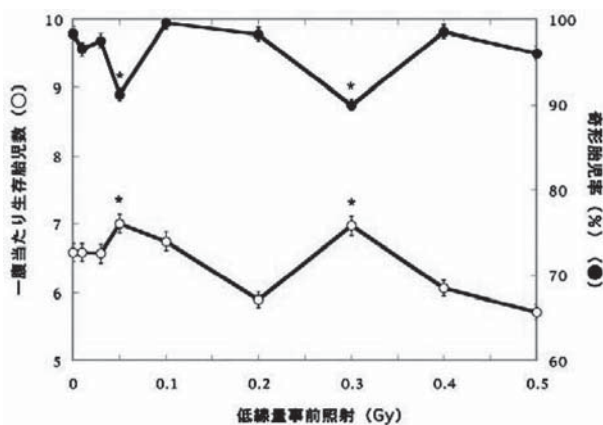
胎児の放射線感受性は器官形成期 (主な臓器の基本構造が作られる時期、ヒトでは受精後 3~8 週間) に高い。マウスを用いた実験で、中高線量 (数 Gy) の胎内被ばくによる胎児死亡や器官奇形はよくみられる障害である。ICR 系マウス (毒性試験や薬効試験によく用いられる系統。米国の Institute of Cancer Research で生産されたことから ICR と命名された) において、胎齢 12 日に中高線量にさらされると、四肢や尾部の奇形が高頻度で観察される。しかし、その 1 日前の胎齢 11 日に、0.3 Gy の X 線で事前照射しておくこと、翌日 (胎齢 12 日) の 5 Gy の X 線照射による胎児死亡および四肢奇形の障害は軽減される。我々は、このようなマウス胎児における致死および発生異常を指標とした放射線適応応答の実験系を確立することにより、哺乳類が発生する途中段階での放射線適応応答の存在を初めて明らかにした (第 1 図)。

(2) メカニズム解明へのアプローチ

がん抑制遺伝子の産物として知られている p53 は放射線により活性化され、細胞死 (アポトーシス) を引き起こす。マウス器官形成後期における放射線誘発致死および器官奇形の原因は、放射線により誘導された過剰な p53 依存性アポトーシスであることを、我々は既に明らかにしてきた。そこで、マウス胎児における放射線



第1図 マウス胎児の死亡と四肢奇形発生を指標とした放射線適応応答



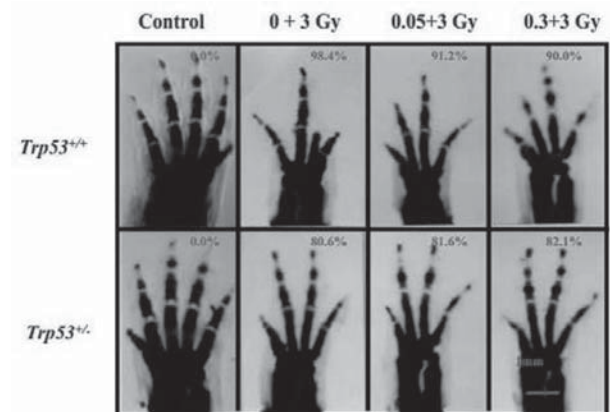
第2図 p 53遺伝子が正常であればC57BLマウスにも放射線適応応答は観察される(有効な線量は0.05 Gyと0.3 Gy)

適応応答のメカニズムは、事前照射によって過剰なアポトーシスが抑制されることではないかと考え、これを検証するために p 53遺伝子が半分欠損した(ヘテロ型)マウス(C57BL系)を用いて、放射線適応応答を調べた。

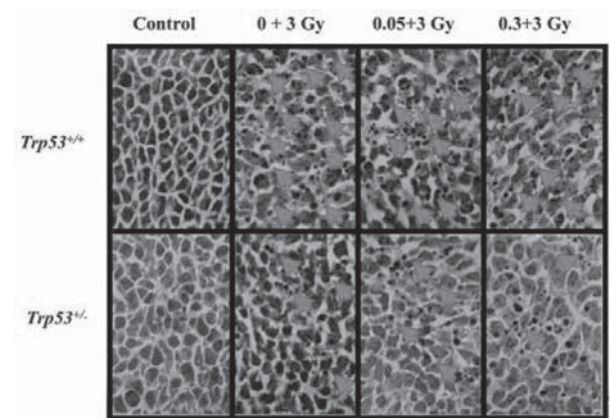
(a) p 53遺伝子の関与

p 53遺伝子ヘテロ型マウスを用いて実験を行い、正常型マウスと比較したところ、第2図に示す通り、0.05 Gyおよび0.3 Gyの事前照射により、正常型マウスに放射線適応応答は観察されるものの、p 53遺伝子ヘテロ型マウスには観察されないことがわかった。このことは、マウス胎児における放射線適応応答は、正常な p 53遺伝子が必要とすることを示している。

第3, 4図は、それぞれ事前照射した後、高線量放射線照射したマウスおよび事前照射せずに高線量放射線照射したマウスから採取した組織標本を用い、アポトーシスで死滅した細胞を標識した代表的イメージである。マウス胎児における放射線適応応答に p 53遺伝子が重要な役割を果たしていることがわかったとともに、p 53依存性の放射線誘発アポトーシスの抑制が四肢奇形低下の原因であることを示している。



第3図 正常型および p 53遺伝子ヘテロ型 C57BLマウスの肢趾骨染色写真



第4図 正常型および p 53遺伝子ヘテロ型 C57BLマウスの肢趾におけるアポトーシス細胞染色像

マウス胎児において手足の指が発生してくる部位から細胞を集めて構築した培養系(肢芽細胞培養系)を用い、放射線適応応答(アポトーシスの抑制)が観察される条件下で、p 53タンパク質の発現とリン酸化(p 53にリン酸基が付加されることにより活性化されることが知られている)を調べた。その結果、事前照射なしに高線量放射線で照射した場合、p 53タンパク質の発現量とリン酸化がともに増加することが観察された一方、あらかじめ低線量放射線で事前照射しておくことにより、発現量とリン酸化がともに抑制されることを観察した。この結果、低線量放射線で事前照射された細胞においては、高線量放射線照射による p 53の発現と活性化が抑制されることによりアポトーシスが抑制され、その結果、放射線誘発致死および四肢奇形が低下したと考えられた。

(b) 放射線適応応答関連遺伝子の網羅的探索

マウス胎児における放射線適応応答において、p 53以外に機能する遺伝子を明らかにするため、我々はマイクロアレイを用いて放射線適応応答条件下で特異的に発現変動する遺伝子を網羅的に探索した。

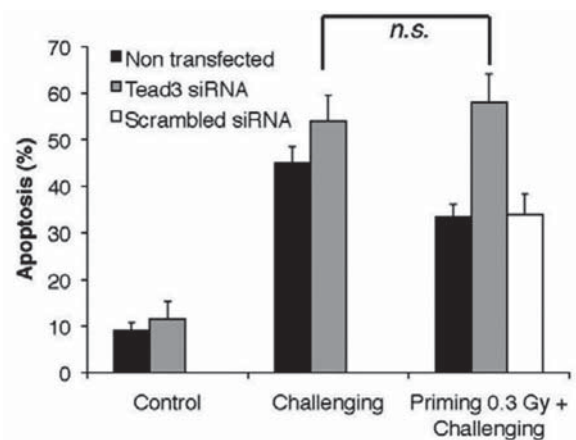
放射線適応応答を誘導するためには、事前照射の線量および線量率が一定の範囲内にある必要がある(ICR系

マウスでは、0.3 Gy の事前照射で放射線適応応答は誘導されるが、0.5 Gy では誘導されない。また有効な線量率は0.18~0.98 Gy/m および3.5~4.6 Gy/m である。妊娠11日目のマウス(ICR系)を用いて、線量と線量率の組合せを数通り変えて、放射線適応応答が誘導される条件下および非条件下で事前照射を行った。高線量放射線に対する抵抗性が誘導されると考えられる1日後にマウス胎児を帝王切開で採取し、全身からRNAを抽出し、遺伝子発現プロファイルの解析を行った。用いたマイクロアレイは、13,982個の遺伝子発現を一度に解析できる能力をもち、(CodeLink社のMouse 20 K bioarrayという製品)、これを用いて放射線適応応答条件下で特異的に発現変動する、861個の遺伝子を抽出した。多数のデータベースを総合し、遺伝子発現変動の生物学的意義を解析するために開発されたDAVIDと呼ばれるアルゴリズムを用いて、これら変動遺伝子の機能を調べた結果、細胞内および細胞間情報伝達に機能する遺伝子が多いことがわかった。また、861個の変動遺伝子の中にp53と機能的に関連している遺伝子が顕著に多く含まれていたことから、マイクロアレイを用いた分子レベルの解析によって、放射線適応応答におけるp53の関与が改めて確認されたと考えられた(第5図)。

(c) 胚芽細胞培養系を用いた、放射線適応応答関連候補遺伝子の同定

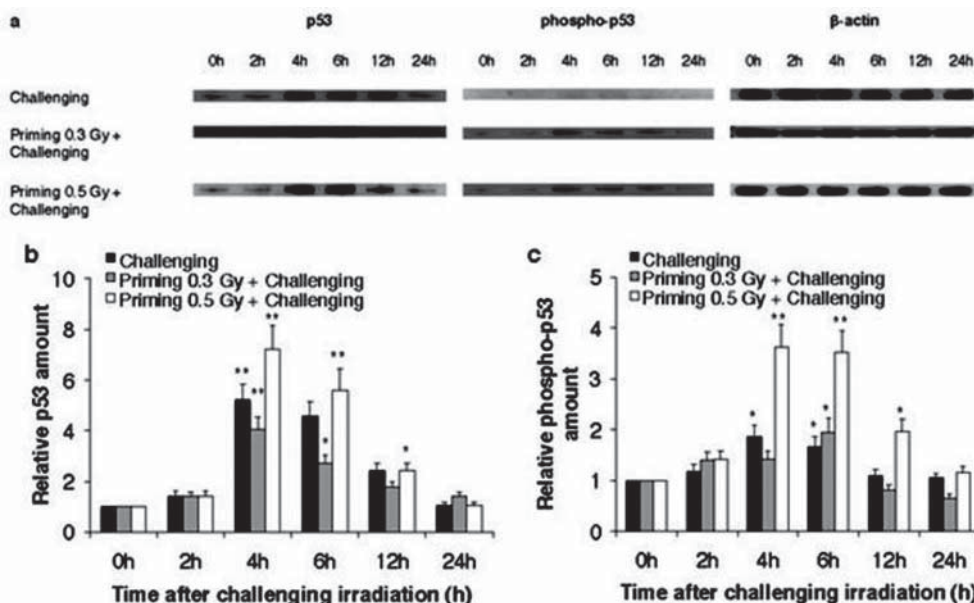
861個の放射線適応応答条件下特異的な変動遺伝子の中から、アポトーシス制御や胎児発生に関与することが文献情報等で明らかであり、また発現変動がマイクロアレイ以外の方法(通常はポリメラーゼ連鎖反応(PCR)を用いる方法)で再確認できた遺伝子を3個選び出し(遺伝子名: Tead3, Csf1, Cacna1a)、放射線適応応答関連候補遺伝子とした。これら3個の遺伝子が、実際に放射

線適応応答に機能しているかどうか調べるため、我々はRNA干渉法と呼ばれる遺伝子機能抑制技術を用いて、マウス胚芽細胞培養系におけるこれら3つの遺伝子の一つずつ不活化した。その結果、Tead3, Csf1およびCacna1aの3つの遺伝子すべてについて、不活化により放射線適応応答が観察できなくなる(すなわち、事前照射することにより、高線量放射線照射後のアポトーシス細胞数が減少した)ことがわかった。このことは、マウス胎児の放射線適応応答にTead3, Csf1およびCacna1aの3つの遺伝子が必要とされていることを示している。特に、Tead3タンパク発現量は放射線適応応答条件下で著しく増大すること、またアポトーシス制



第6図 RNA干渉法でTead3遺伝子を不活化(ノックダウン)した際の放射線適応応答の消失

黒いバーはコントロール(無処理細胞のアポトーシス)、灰色のバーはTead3遺伝子を不活化するRNA分子が導入された細胞のアポトーシス、および白いバーはコントロール(いかなる遺伝子も不活化しないRNA分子が導入された細胞のアポトーシス)を表している。



第5図 適応応答条件下および非条件下におけるp53リン酸化の違い

御に関する機能がよく調べられて明らかであることから、その重要性は高いと考えられる(第6図)。

2. 培養細胞における突然変異を指標とした放射線適応応答

(1) 実験系および観察される現象

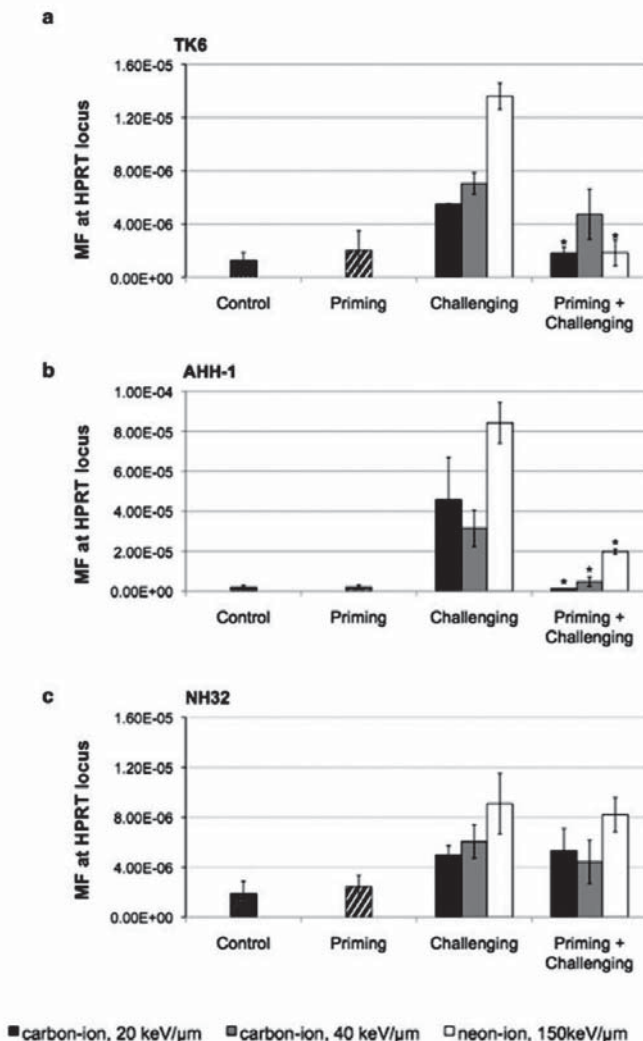
ヒトリンパ芽球に由来する培養細胞, TK 6, AHH-1, および NH 32を用い, 0.02~0.1 Gy の X 線 で事前照射を行い, その6時間後に高線量放射線照射を行った。そして6-チオグアニンという薬剤(毒)存在下で培養し, HPRT (Hypoxanthineguanine phosphoribosyltransferase) 遺伝子に突然変異をもつことによって6-チオグアニンに対する耐性を獲得した細胞を計数(耐性を獲得した細胞は目に見えるコロニーを形成する)することにより突然変異率を算出した。TK 6 は p 53 遺伝子が正常, AHH-1 はヘテロ, NH 32 は完全に欠損している。

これまでに培養細胞を用いた放射線適応応答の実験は数多く報告されているが, 高 LET 放射線を用いた実験は例が少ない。そこで, 我々は重粒子線誘発突然変異

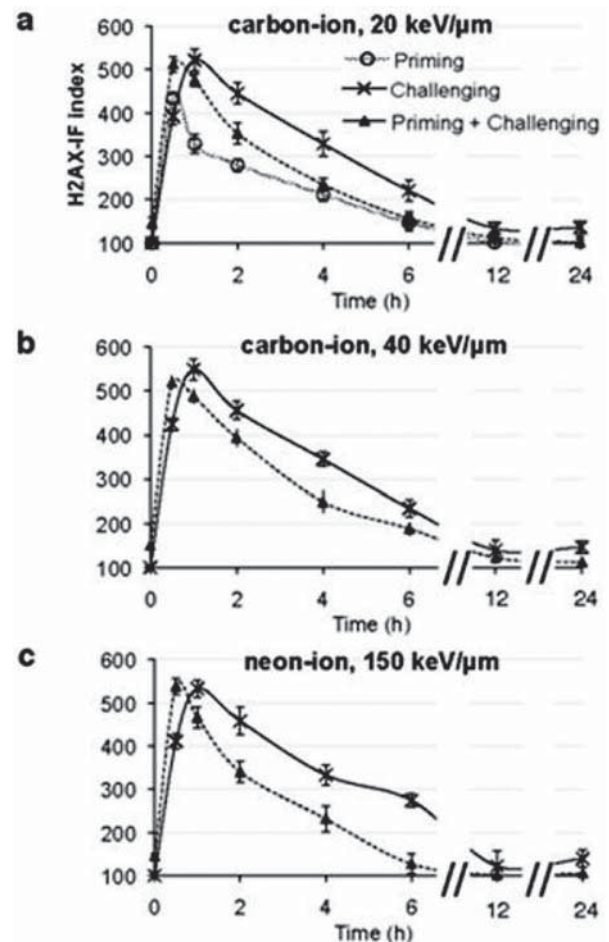
(HPRT 遺伝子)を指標とした放射線適応応答を調べた。すなわち, 0.02~0.1 Gy の X 線事前照射を行い, その6時間後に1 Gy の重粒子線照射(炭素線: 20および40 keV/ μm , ネオン線: 150 keV/ μm)を行った。その結果, 正常な p 53 遺伝子を有する細胞(TK 6, AHH-1)において, X 線事前照射を行うことにより, 重粒子線単独照射に比べて, 顕著に HPRT 遺伝子の突然変異率が低下することがわかった(第7図)。このことから, 正常な p 53 を有する細胞においては, 低線量 X 線の事前照射により, その後の重粒子線照射による突然変異誘発が低減されることがわかった。

(2) メカニズム解明へのアプローチ

観察された放射線適応応答のメカニズムを調べるため, DSB 数の指標である γH2AX タンパク質の量の変動を重粒子線照射後経時的に調べた。その結果, TK 6 および AHH-1 では事前照射することにより γH2AX タンパク質量の減少が早くなること, また24 h 後の残存量が少なくなることが観察された(第8図)。この結果は, 放射線適応応答が効率的な DSB 修復の誘導により起きていることを示唆するものである。(一方, 我々はこの現象には, 細胞周期の変動や放射線誘導アポトーシスは関連していないことを示唆するデータを得ている。)



第7図 p 53 のステータスが異なるリンパ芽球細胞の放射線適応応答(突然変異率が指標)



第8図 p 53 正常型リンパ芽球細胞(TK 6)の適応応答条件下でみられる γH2AX の変動

細胞に放射線を照射すると、様々な応答が誘導される。放射線誘発 DSB は最も重篤な DNA 損傷であり、特に高 LET 粒子線はクラスター損傷と呼ばれる、多くの DNA 損傷が重複した複雑な損傷を生成すると考えられている。培養細胞における放射線適応応答のメカニズムは、高線量放射線によるゲノム DNA に生成される DSB を速やかに認識し、修復することと示唆された。これは、高い線量の放射線を被ばくした後の遺伝的安定性の維持と癌化の抑制を考える上で、重要なヒントを与えていると思われる。

Ⅲ. おわりに

上述の通り、生体は低い線量の放射線に反応して放射線抵抗性を獲得することが明らかになってきており、またその分子メカニズムも少しずつであるが解明されつつある。これらの知見は、低い放射線照射によって、障害発生のリスクが低減されている可能性を示唆するものであり、放射線防護上の観点から大変に興味深い。

現在の放射線防護体系は、一般化がなされ、ヒト集団に対して一律な規制を課すものとなっている。しかし、放射線適応応答は遺伝的バックグラウンドに影響され、大きな個人差が存在していることが明らかにされている。放射線感受性の個人差に配慮したきめ細かな放射線防護が今後の課題として検討され始めている。

— 参考資料 —

- 1) G. Vares, B. Wang, M. Nenoï, *et al.*, "Radiation-induced adaptive response with reference to evidence and significance: A review", *Indian J. Radiat. Res.*, **3**, 16-34 (2009).
- 2) B. Wang, "Involvement of p 53 dependent apoptosis in radiation teratogenesis and in the radioadaptive response in the late organogenesis of mice", *J. Radiat. Res.*, **42**, 1-10 (2001).
- 3) G. Vares, B. Wang, M. Nenoï, *et al.*, "Adaptive response in embryogenesis: VI. Comparative microarray analysis of gene expression in mouse fetuses", *Int. J. Radiat. Biol.*, **85**, 70-86 (2009).

- 4) 根井 充編, 放医研シンポジウムシリーズ: 第3回放射線防護センターシンポジウム「生き物はどのようにして放射線に立ち向かうか—DNA 損傷応答と適応応答」, 2009年3月刊行.
- 5) G. Vares, B. Wang, M. Nenoï, *et al.*, "Gene silencing of Tead 3 abrogates radiation-induced adaptive response in cultured mouse limb bud cells", *J. Radiat. Res.*, (2010), In press.
- 6) G. Vares, B. Wang, M. Nenoï, *et al.*, "Mutagenic adaptive response to high-LET radiation in human lymphoblastoid cells exposed to X-rays", *Mutat. Res.*, (2010), In press.

著者紹介

王 冰(わん・びん)



(独)放射線医学総合研究所
放射線防護研究センター
(専門分野/関心分野)放射線防護, 低線量影響

Guillaume Vares(ぎょうむ・ばれす)



(独)放射線医学総合研究所
放射線防護研究センター
(専門分野/関心分野)低線量影響, 放射線発がん

根井 充(ねのい・みつる)



(独)放射線医学総合研究所
放射線防護研究センター
(専門分野/関心分野)低線量放射線の生物影響

酒井一夫(さかい・かずお)



(独)放射線医学総合研究所
放射線防護研究センター
(専門分野/関心分野)放射線生物学, 放射線防護の根拠となる放射線生体影響の解明。

原子力利用の一つである「放射線滅菌」について 量子ビームテクノロジーの有効活用の実例

関西電子ビーム(株) 隅谷 尚一

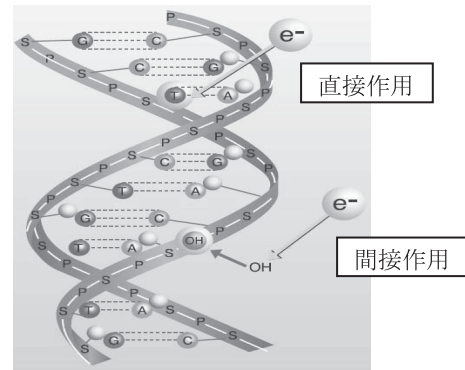
放射線利用に関する講演会やセミナーで依頼され、放射線滅菌について説明した際、「殺菌と滅菌の違いは？」と質問されることがある。殺菌は、文字どおり菌を殺すことで対象や程度を含まない概念であり、滅菌とは、物質中のすべての微生物を殺滅または除去することである。この滅菌を量子ビームであるガンマ線、電子線、エックス線の照射で処理するのが放射線滅菌である。今回、この放射線滅菌について、その原理や歴史、対象物および滅菌方法、今後の動向等について解説する。

I. 放射線滅菌とは

2005年、国は原子力政策大綱を今後の原子力政策の基本方針と定め、その中の原子力利用の推進には放射線利用¹⁾も含まれている。放射線利用の経済規模としては、工業利用分野の割合が一番多く、そのうち放射線滅菌は2005年で約1,703億円と内閣府調査²⁾で報告されている。また、放射線滅菌は、主にガンマ線、電子線が利用されており、既に確立された技術である。しかし、医療機器や衛生用品等の身近な製品に利用されているものの、放射線分野を含む原子力専門家でも放射線滅菌の知識・情報は不足しているのが現状である。

1. 放射線滅菌の原理

放射線(ガンマ線、電子線、X線)の照射により、微生物の遺伝子(DNA)または細胞膜がダメージを受けることで微生物は死滅する。放射線による微生物死滅の概念図を第1図に示す。高エネルギー電子を含む放射線は、直接作用として、直接に生物のDNAに作用して1本鎖切断や致命度の高い2本鎖切断を引き起こす。間接作用として、DNA分子にラジカルを生成させ、自らの分子内あるいは他の分子間および近接するタンパク質との架橋反応を起こし、DNAやタンパクの機能を失活させる。また、水分子との反応では、分解過程で活性酸素を生成させ、攻撃性の強いOHラジカル等が間接的にDNA分子の切断や修飾を起こし失活に寄与する。この直接作用と間接作用により微生物は死滅すると考えられている³⁾。



第1図 微生物死滅の概念図

2. 滅菌と無菌との関係

滅菌はすべての微生物を死滅させる処理であるが、理論的な概念は確率的なものである。そのため、1回の滅菌処理を実施することによって、存在する生菌数が1/10に減少すると仮定すると、毎回1/10であるから、処理回数を重ねても生菌数は毎回1/10ずつ減少していくだけで決してゼロ(無菌)にはならない。この1/10に減少させるのに必要な処理量をその滅菌法のD値という。

生菌数と線量の関係は指数関数で表され、次式で示される。

$$N_t = N_0 \times 10^{-kt}$$

ここで、 N_t : t の処理後に生き残った菌数

N_0 : 初発菌数

k : 死滅係数

t : 処理量

国際的には、滅菌保証レベル、これを SAL (sterility assurance level) として、医療機器の場合は 10^{-6} レベルが採用されている。すなわち、滅菌保証 10^{-6} レベルとは、滅菌した個々の医療機器に、1個の微生物が生き残る確率が百万分の1であることを意味している。すなわち、

この状態を事実上無菌と考えている。ちなみに、この 10^{-6} という値は、原子力専門家には馴染みがあり、原子炉施設の安全リスクの定量的目標として提示されている値である。

3. 放射線滅菌の歴史

放射線滅菌の歴史は、原子力発電の歴史より古く、1895年にレントゲンがX線を発見し、その翌年にミンチがミュヘン医学雑誌にX線の殺菌作用を発表⁴⁾したことから始まった。しかし、その後、基礎的な研究が行われたが、実用化されたのは1956年、米国でエチコン社が腸線縫合糸の滅菌に電子線照射装置を利用してからである。電子線滅菌が採用された理由は、腸線縫合糸の熱変形を避けねばならないため熱滅菌が採用できなかったことや殺菌剤の糸内面への浸透は構造上困難であったためである。1960年代には国際原子力機関(IAEA)が国際会議を開催し、医療機器の放射線滅菌に関する指針を作成した。

わが国では、1970年代から一部の医療機器としてディスプレイ(使い捨て)注射器等から徐々に放射線滅菌が採用され、1980年代から大規模のCo-60ガンマ線施設が、1990年代から大規模の電子線照射施設が建設された。1998年には当時の厚生省から放射線滅菌バリデーションガイドライン(バリデーションは「有効化審査」, 「妥当性評価」, 「適格性審査」等と訳されているが、後述II-3節で詳細説明する)が通達され、2007年にはISO改訂を踏まえ、放射線滅菌線量の設定方法が改訂されている。その後、ISO 11137-1(2006)「ヘルスケア製品の滅菌—放射線—第1部: 医療機器の滅菌プロセスの開発、バリデーション及び日常管理の要求事項」が、2010年にJIS(JIS T 0806-1)として制定された。

II. 滅菌方法

1. 各滅菌方法の比較

滅菌にはさまざまな方法があるが、電子線滅菌、ガンマ線滅菌、酸化エチレンガス(EOG: ethylene oxide gas)滅菌、高圧蒸気滅菌が主たるものである。第1表に各滅菌方法の比較を示す。

国内の滅菌医療機器の各滅菌法の割合は、放射線滅菌(電子線滅菌、ガンマ線滅菌)が約60%、EOG滅菌が約30%、高圧蒸気滅菌が約10%との統計資料⁵⁾が示されているが、売上げベースではEOG滅菌の方が放射線滅菌より割合が多いという統計資料もある。

EOG滅菌については、EOGが発ガン性物質であることや処理時間がかかること、また、無菌検査が必要であることから、徐々に利用割合が減少している。また、地方自治体(東京都、愛知県、大阪府等)が条例により大気への排出を規制しており、環境規制も厳しくなっている。

第1表 各滅菌方法の比較

項目	電子線滅菌	ガンマ線滅菌	酸化エチレンガス(EOG)滅菌	高圧蒸気滅菌
滅菌方法	電子加速器により加速された電子を対象物に照射し、滅菌。	線源より放射されたガンマ線を対象物に照射し、滅菌。	対象物を容器内に入れ、EOGを暴露し、滅菌。	対象物を高圧蒸気釜に入れ、高圧蒸気(～約130℃)により滅菌。
対象物の特徴	透過性が強い ため、包装の上から滅菌が可能。 樹脂の変色等はガンマ線より少ない。	透過性が強い ため、包装の上から滅菌が可能。 樹脂は変色等が発生しやすい。	特殊な包装材料以外、包装の上からの滅菌は不可。 大型品等に対応。	耐熱性材料以外は不可。
処理時間	数秒～数十秒	数時間	十数時間	数時間
後処理	不要	不要	脱ガス処理が必要。 無菌検査が必要。	乾燥処理が必要。 無菌検査が必要。
その他(問題点等)		放射性物質である線源の処理が必要。	発がん性物質であるEOGの排出規制あり。	

放射線滅菌は、最終梱包のまま滅菌ができ、確実性・信頼性の高い滅菌方法であるため、利用割合が増加している。また、大手の医療機器製造会社の一部では自社製品を滅菌するため、商業用として国内最大の10 MeV電子線照射装置を採用するなど、処理時間が短くできる電子線滅菌が増加傾向にあり、その透過能力の高さから、従来、滅菌処理できなかった医療機器製品の滅菌にも適用が広がってきている。

放射線滅菌の長所を以下に列挙する。

- (1) 滅菌の確実性・信頼性が高い。
- (2) 常温で滅菌ができる。
- (3) 最終梱包のまま滅菌が可能である。
- (4) 滅菌バリデーションの実施が容易である。
- (5) 工程管理が容易である。
- (6) 無菌性の確認が容易である。

ただし、放射線滅菌にも以下の短所がある。

- (1) ガンマ線の線源であるCo-60(半減期約5.3年)を海外から購入する必要がある。
- (2) 使用済みの線源は(社)日本アイソトープ協会での回収・保管されているが、放射性廃棄物の処理・処分ははまだ実施されていない。
- (3) フッ化物ポリマーやセルロース類等の放射線で劣化しやすい材質があり、放射線滅菌を適用後の品質変化には特に注意する必要がある。

なお、放射線による材料劣化に関しては、放射線滅菌に適合した医療用高分子材料の開発が、近年著しい展開を見せている。高分子材料そのものに起因する照射後の

物理的劣化や着色、臭気の発生、溶出物の増加等は、いろいろな技術によりそのメカニズムを含めて解明されつつある。また、製造工程管理を徹底し、微生物汚染を低減化できれば、滅菌線量の引き下げも可能となり材料選択の幅を広げることも可能である。

また、放射線滅菌の施設は、規模が大きく、専門の放射線取扱主任者の資格者も必要となる。大手の医療機器製造会社の一部では、ガンマ線照射施設や電子線照射施設を自ら所有して運営しているものの、一般的には、処理量や運用管理面等を考慮すると、アウトソーシングの方がコスト面を含めて有利と考えられる。

2. 滅菌対象物

放射線滅菌の対象物としては、照射線量範囲で機能低下が許容値以内のものに適用可能であり、医療機器、梱包材料・容器、理化学機器・検査用品、衛生用品、化粧品関連等に適用されている。

なお、第2図に滅菌対象物(例)を示す。

- (1) 医療機器：注射針、縫合糸、人工透析器(ダイアライザー)、真空採血管、カテーテル類、留置針、人工関節、他
- (2) 梱包材料・容器：点眼容器、医薬品容器、バッグインボックス、食品容器、木串・竹串、他
- (3) 理化学機器・検査用品：シャーレ、フラスコ、ピペット、遠沈管、マルチプレート、食品検査袋、滅菌袋、培地、他
- (4) 衛生用品：創傷材料、ガーゼ類、マスク類、綿棒、他
- (5) 化粧品関連(原料、容器、用品)：フェイスマスク、ベントナイト、原料容器・蓋、製品容器・キャップ、他
- (6) その他：実験用動物飼料、他

上記のうち、医療機器については、ディスプレイ製品化により、放射線滅菌済み医療機器の割合が増加している。また、衛生用品や食品容器にも放射線滅菌が採用されており、身近な製品に幅広く適用されている。



第2図 滅菌対象物(例)

3. 滅菌バリデーション

高度な品質、有効性、安全性が求められる医薬品や医療機器の製造の分野において、バリデーション(validation)は、「有効化審査」、「妥当性評価」、「適格性審査」等と訳されている。厚生労働省の「医療用具の製造管理及び品質管理規則」では、バリデーションを「製造所の構造設備並びに手順、工程その他の製造管理及び品質管理の方法が期待される結果を与えることを検証し、これを文書とすることをいう」と定義している。これは、品質に適合する製品を恒常的に製造するためには「科学的に証明された考えに基づき、規定の品質を達成できるよう製造工程を検証し、これらを文書化し保存する」ということである。

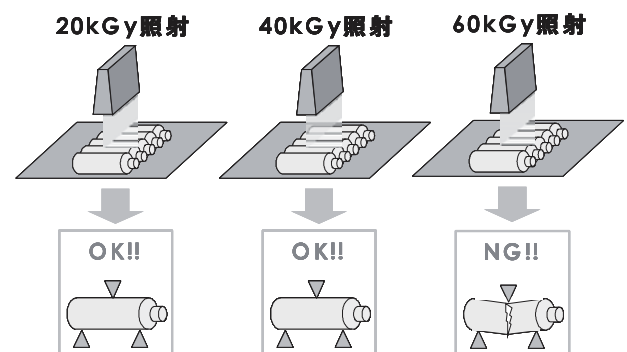
医療機器のバリデーションとして、「医療用具の滅菌バリデーションに関するガイドラインについて」(平成10年5月1日付け医薬監第69号監視指導課長通知)、「医療機器の放射線滅菌バリデーションガイドラインの取扱いについて」(薬食監麻発第0612008号)および「医療機器の放射線滅菌の滅菌線量設定の根拠に関する基準について」(薬食機発第0612005号)に定められている方法について以下のとおり説明する。ただし、この滅菌バリデーションは滅菌レベルとして最高レベルを要求される医療機器に対するものであり、医療機器以外の梱包材料・容器、理化学機器・検査用品、衛生用品、化粧品関連等ではそれぞれの製品の要求に従った滅菌レベルを設定し、この滅菌バリデーション方法の一部を確認することで対応できる。

(1) 製品適格性の確認

製品または材料に対し、第3図に示すように、段階的に電子線を照射する。製品への影響度合いを確認して、最大許容線量を設定する。なお、医療機器の場合、6ヵ月以上の経時確認を実施する必要がある。

(2) 設備適格性の確認

- ・据付時適格性の確認(IQ: installation qualification)
線源稼動システムあるいは電子ビーム特性を確認して、照射装置およびコンベアの運転手順、照射方法を決定する。
- ・運転時適格性の確認(OQ: operational qualification)



第3図 段階線量照射(例)

計測および制御機器，記録装置，線量測定システムの校正を確認する。均一な物質を照射容器に入れ，線量分布評価を行う。照射装置の線量分布測定を確認する。

(3) バイオバーデン測定

バイオバーデンとは試料に付着している微生物の数のことである。ISO 11137-2(2006)の方法1を用いる場合は，製品の製造3ロットより，各10個以上の製品を準備し，あらかじめ設定した回収方法にて回収した製品試料に付着している微生物数を測定する。各ロットの平均と全ロットの平均を考慮し，平均バイオバーデンを決定する。

(4) 検定線量試験

方法1を用いる場合は，平均バイオバーデンより求めた検定線量を製品に照射し，無菌試験を実施する。規定陽性数以内であれば試験合格となり，滅菌線量が決定する。医療機器の場合は，平均バイオバーデン数が1.64以下の場合であっても15 kGy が滅菌線量となる。

(5) 稼動性能適格性の確認(PQ: performance qualification)

製品の梱包内の配置または照射容器への積載形態を決定する。照射時における製品線量分布の確認として，第4図に示すように，線量計を用いて，最終梱包形態における製品内部の線量分布(最大/最小線量部位)を確認する。線量の変動範囲を決定し，最大許容線量と滅菌線量を満たす照射条件を決定する。

(6) 日常監視と管理

線量計による線量の監視，製品トラッキング(追跡調査できる)システム，Co-60ガンマ線源を利用する場合は線源減衰に応じたサイクル時間の補正の管理を行う。

4. 滅菌施設

滅菌施設を説明するため，電子線照射施設の例⁶⁾を第5図に示す。

(1) 電子線照射装置

第5図に示す施設の主要部である電子線照射装置は，商業レベルで最高の加速エネルギーである10 MeV 電子加速器である。

ここで，種々のエネルギー電子線と Co-60ガンマ線，X線の透過力の違いを第6図に示す。電子線の透過力は，深度線量分布曲線で示される。電子線は表面から内部に進むにつれ散乱電子の寄与により線量は増加し，線

量ピークを示してから徐々に減少する。10 MeV 電子の有効飛程は，4.0 g/cm²程度であり，両面照射により8.6 g/cm²程度までの厚さの製品を有効に照射することができる。医療機器(ディスプレイ製品)の平均密度を0.2 g/cm³とすると両面照射で約40 cm 程度のケースの照射が可能となる。ちなみに，電子線はガンマ線と比べ線量率が高く，短時間で照射を完了することができる。

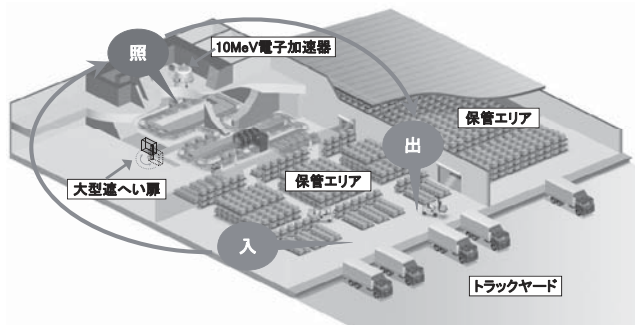
(2) 製品の搬出入

搬出入においては，一般的にはトラック輸送が主流であり，第5図に示すように，大型トラックの寄付けを容易とした物流センターのようなトラックヤードが設置されており，複数台のトラックから同時に搬出入できる。搬出入管理では被照射物の保管管理において，未照射と照射済を明確に区分し，混在させないことが品質管理上重要である。このため，物理的に保管エリアを区分するとともに全体を管理する操業管理システムと連携した保管管理システムにより，保管場所のアドレス管理，入荷日時管理などを行い，高効率かつ高信頼性を確保する。

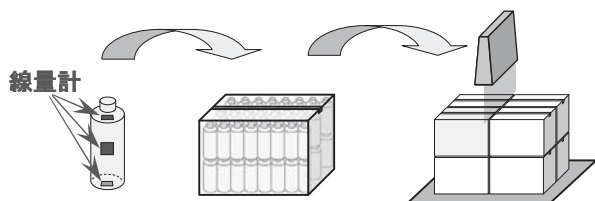
(3) 搬送コンベアシステム

搬送コンベアシステムは，第5図に示すように，照射室内で被照射物に効率よく電子線を照射し，搬出するためのシステムである。被照射物に与える線量は，電子加速器の出力とコンベア速度により制御される。

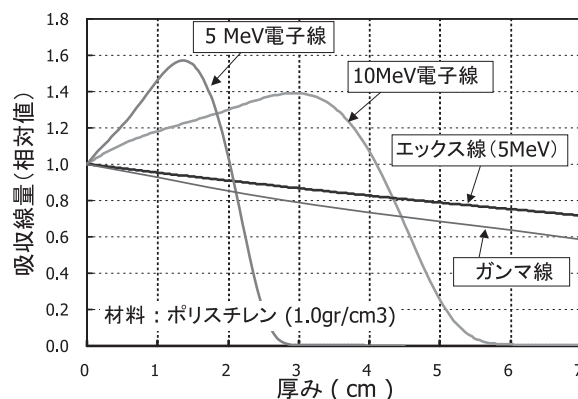
なお，施設の安全対策として，運転中に照射室外を法令で定める線量率以下とするように遮へいされており，



第5図 電子線照射施設(例)



第4図 線量分布試験(例)



第6図 各放射線の透過性能

電子線照射装置を安全に自動停止できるようにインターロックを用いた安全システムにより、装置や周辺環境を安全に保護している。

Ⅲ. 今後の動向

放射線滅菌の需要は、今後も医療機器を中心に堅実に増加すると予想される。また、医療機器に用いられているフッ素樹脂の放射線による材質劣化問題に関しては、材料劣化がないか、または少ない代替材料の開発により今後解決されていくと考えている。医療機器以外の分野でも、滅菌処理で他の製品と品質レベルの差を付けることにより製品価値を高めることができるため、梱包材料・容器、理化学機器、衛生用品、化粧品関連等への利用もさらに広がっていくと思われる。

なお、本稿は放射線滅菌についての説明であったが、放射線利用には材料改質の分野がある。この分野は1960年代のポリエチレンの放射線による橋かけによる耐熱性の改善から始まり、電線被覆材の耐熱性の改善、自動車タイヤの加工、発泡材・熱収縮材の製造、フッ素樹脂の微粒化による耐摩耗材の製造、半導体の特性改善等⁷⁾幅広く行われている。橋かけでは、創傷被覆材のように、材料改質と滅菌分野にまたがるものもある。この材料改質の分野は今後も研究開発が進展し、さらに工業分野で多くの放射線を利用した新製品開発が期待される。最近では二酸化炭素低減を考慮して、化学触媒等の化学物質を利用せず、電子線照射を有効利用した天然素材(キトサン、クラゲ等)から医療機器や化粧品を製造することも注目されている。

最後に、農業分野の放射線滅菌として、海外の施設でよく利用されているのが食品照射である。2005年で約30の国・地域で約40品目に食品照射が実用化され、その量は年間約40万トンになる。照射食品の安全性・有効性については、FAO(国際食糧農業機関)およびWHO(世界保健機関)により確認されている。食品照射が特に注目される理由に、それが低熱量処理であるため熱による変化が少なく、生鮮食品にも利用が可能である点、化学薬品処理のような残留毒性や環境への負荷の問題がないことである。わが国は馬鈴薯の芽止めを目的とした食品照

射を世界に先駆けて実施したが、その後、多くの国で香辛料等の食品へ適用が増加したにもかかわらず、わが国では馬鈴薯の芽止めだけに留まっているのが現状である。今後、食品安全性の向上や、一般の方々の放射線利用の理解促進のために、食品照射の議論が広がることが望まれる⁸⁾。

この食品照射のように、放射線利用に関する正しい理解がないまま今日を迎え、国際的な流れに乗り遅れている現状もある。放射線滅菌に関しては、科学的・技術的なメリットが正しく理解され、リスク管理を踏まえた経済的な視点からも、今後、放射線滅菌の適用が確実に広がっていくことを期待する。

—参考資料—

- 1) 原子力委員会, 原子力政策大綱, p.39-41(2005).
- 2) 原子力研究バックエンド推進センター, 放射線利用の経済効果と新量子ビームに関する調査研究報告書, (2008).
- 3) 日本医療機器学会(監修), 小林寛伊(編集), 医療現場の滅菌(改訂第3版), p.85-86(2008).
- 4) F. Minck, *Munchener Medizin Wochenschr.*, 1896; 5: 101.
- 5) 細瀬和成, 他, 滅菌医療用具の市場動向と滅菌バリデーション, p.3-30(2000).
- 6) 戸羽豊, 他, 福井県における受託照射用10 MeV 電子線照射施設の建設, 放射線と産業, 第120号, p.27-30(2008).
- 7) 幕内恵三, ポリマー放射線加工(第2版), p.10(2005).
- 8) 日本原子力産業協会, ガッテン食品照射, p.9-14(2009).

著者紹介

隅谷尚一(すみにたに・なおかず)



関西電子ビーム株
(専門分野)放射性廃棄物, 放射線管理, 放射線利用

プルトニウム転換技術開発施設

マイクロ波加熱直接脱硝法による 世界初の混合転換プロセスの実用化

日本原子力研究開発機構 吉元 勝起

1977年の日米再処理交渉を機に、基本設計まで終えていたシュウ酸沈殿法によるプルトニウム単体転換プロセスは、日米再処理交渉によって断念を余儀なくされたことから、核不拡散上の観点から、プルトニウムとウランの混合溶液を転換する新たな方法の開発が必要となった。

日本が独自に開発したマイクロ波加熱直接脱硝法は、電子レンジと同じ原理を応用した日本独自の技術である。マイクロ波加熱直接脱硝法を核拡散抵抗性に優れたプルトニウム・ウラン混合転換プロセスの中核技術として採用し、東海再処理工場に隣接してプルトニウム転換技術開発施設を建設し、1986年より開発運転を行っている。この技術を短期間にいかに育み、開花させるに至った経緯について、その歴史的背景等を交えながら解説する。

I. 日米再処理交渉…

平和目的と称して1974年5月に行われたインドの核爆発実験により、米国は商業再処理とプルトニウムの軽水炉利用の無期限延期など、核不拡散政策を強化することとなった。その当時、日米原子力協定の下で米国から輸入した濃縮ウラン燃料を含む使用済燃料を用いたホット試験を予定していた日本初の再処理工場である東海再処理工場の運転の障壁となった。

日米原子力協定では、日本で使用済燃料を再処理する前には事前に米国との共同決定を必要としていた。この共同決定に際し、保障措置上の問題から、東海再処理工場に核不拡散効果が大きいと考えられる工程への設計変更を要求する米側と、エネルギー資源の不足から早急に再処理を実施したいとする日本との間で精力的な交渉が行われた。度重なる交渉の結果、東海再処理工場は既定の単体抽出法で2年間99トンまで運転すること、両国が合意すれば混合抽出法に切り替えること等について合意し、両国は1977年9月12日に日米共同決定に署名することとなった。この結果、1977年9月22日に東海再処理工場のホット試験を始めることができた。

II. 単体転換から混合転換へ^{*1}

日米原子力交渉から遡ること3年前の1974年6月、日

The World's First Success of Practical Pu-U Co-Conversion Process Using a Microwave heating Direct De-Nitration Method (Plutonium Conversion Development Facility):
Katsunobu YOSHIMOTO.

(2010年 11月24日 受理)

本は使用済燃料から再処理によって抽出されたプルトニウムを英仏と同様に、シュウ酸沈殿法を用いた酸化物粉末への単体転換施設の研究・設計を開始していた。単体転換施設の設計は、1975年5月に概念設計を開始し、1976年12月には詳細設計へと進んでいたが、日米再処理交渉の結果を受け、単体転換の断念を決断することとなった。この方針転換により、急きよ、核不拡散性に優れたプルトニウム-ウラン混合転換技術の開発を1977年9月より開始した。

混合転換法としては、(1)ウラン粉末の製造工程として技術が確立していたアンモニア沈殿法を応用したアンモニア共沈殿法^{*2}、(2)硝酸ウランの脱硝法として再処理工場で採用されている流動床を応用した流動床直接脱硝法^{*3}、(3)共沈殿法と流動床法を組み合わせたCO-PRECAL法^{*4}(米国GE社)、(4)共沈殿法にプルトニウムの酸化数調整工程を加えたAUPuC法^{*5}(独ALKEM社)を候補として検討が行われた。

III. マイクロ波加熱直接脱硝法の発見！

プルトニウムの単体転換から混合転換へと大きく方針転換することになり、しかも2年という期限の中で混合転換技術の開発を進めなければならないという極限状態の中、技術者達は上述した各種混合転換技術の開発に精力的に取り組んだ。その中でウランを用いたアンモニア共沈殿法での機器開発を進めていく中で、生成される微細沈殿粒子(ADU)の汜過プロセスにおいて思うような結果が出ず、混合転換試験への移行が懸念されていた。

ちょうど、その頃、別プロジェクトで使用していた電子レンジ(市販品)が捨てられようとしているのを目にし

た技術者の「ADUを加熱し水分を除去したら…？」の
とっさの閃きが、後のマイクロ波加熱直接脱硝法(以下
MH法と称する)の開発に繋がるとは、その時の技術者
も思いはしなかったことであろう…。この閃きをADU
の加熱に電子レンジを使用したところ、ADUは突沸を
起こし、電子レンジ内に飛び散り、拳句の果てには放電
により加熱容器が割れてしまい、もはやこれまでと落胆
し、試験に使用されずに残ったウラン溶液を直接乾燥さ
せようと電子レンジへと入れ、スイッチをONにしたと
ころ、電子レンジ内にウランが飛び散ることなく、山吹
色に輝く三酸化ウランの脱硝体が生成していた。これこ
そが、まさかの偶然により、MH法が見出された瞬間で
あった。

IV. マイクロ波加熱直接脱硝法の開発

偶然発見されたMH法については、ただちにウラン
試験を実施することとなり、試薬等を必要とせずに直
接、乾固体が得られるという大きな利点があることなど
から、1977年12月、他の混合転換法と並行して、開発を
行うこととなった。その後、プルトニウム-ウラン混合
溶液で同様の試験を行ったところ、良好な結果が得られ
たことから、1978年1月より、アンモニア共沈殿法、流
動床直接脱硝法、MH法の3法に絞って試験が進められ
ることとなった。

このうち、アンモニア共沈殿法とMH法については、
小規模工学試験を進める目的で、プルトニウム燃料第二
開発室に混合転換試験設備が設置された。

当該設備を用いた試験結果については、米国技術者を
交えた議論・検証が行われた。その結果、我が国が独自
に開発したMH法による混合転換技術は、極めて核拡
散抵抗性が高く、核不拡散を懸念する米国政府に対し
て、我が国が推し進めるプルトニウムの平和利用につ
いて理解が得られ、我が国における原子力開発の前に立
ちふさがった壁を打ち破り、大きな一歩を踏み出すこと
が可能となった(1980年2月)。

単体転換から混合転換へと踏み出した技術者の前に、
次なる壁としてプルトニウムとウランの混合比を幾つに
するかといったことについて議論されることとなった。
米国からは、プルトニウム/ウラン=1/2が適当である
との提案がなされたが、我が国は燃料製造上の技術的な理
由(主に富化度調整の問題)からプルトニウム/ウラン=
1/1を主張した。協議の結果、我が国が主張したプルト
ニウム/ウラン=1/1が受け入れられた(1980年3月)。

V. 回想：小泉ベーカリー……

捨てられようとしていた電子レンジから「種」が見出
されたMH法は、その後、多くの人たちにより生まれ、
偶然から見出された種は芽を出し、1979年7月より2
kgMOX試験設備を用いて再処理工場から回収されたプ

ルトニウムを用いたMH法の確認試験を行った。この
時、作られたプルトニウム・ウランの混合脱硝体は、ち
ょうど「カルメ焼き」に似ていたことから、MH法の開発
の先陣に立ち指揮していた当時のプルトニウム燃料部長代
理であり、転換技術開発班の班長であった小泉益道氏(故
人)から名をとり、「小泉ベーカリーのカルメ焼き」と命
名された。同年10月、小泉ベーカリーの噂を聞きつけた
米国調査団が大挙して「小泉ベーカリーのカルメ焼き」を
確かめようと来日し、来日した米国調査団の目の前で
ケーキカット宜しく、脱硝体をカットし、米国調査団一
行を驚愕させたその時こそ、MH法が大輪の花を咲かせ
た時といえよう。

その後、本技術開発に対し、1981年には米国原子力学
会より学会賞、1983年には日本原子力学会より学会特別
賞を授与されることとなった。

VI. マイクロ波加熱直接脱硝法の特徴

MH法は、使用済燃料の再処理により回収された硝酸
プルトニウム溶液と硝酸ウラン溶液を混合した後、マ
イクロ波を照射することによって脱硝酸化物を得る手法
であり、その過程は溶液から固体までのプロセスをマ
イクロ波による加熱の1工程で実施する非常にシンプルで
ありながら多くの利点を有するものであった。

(1) プロセスが短い

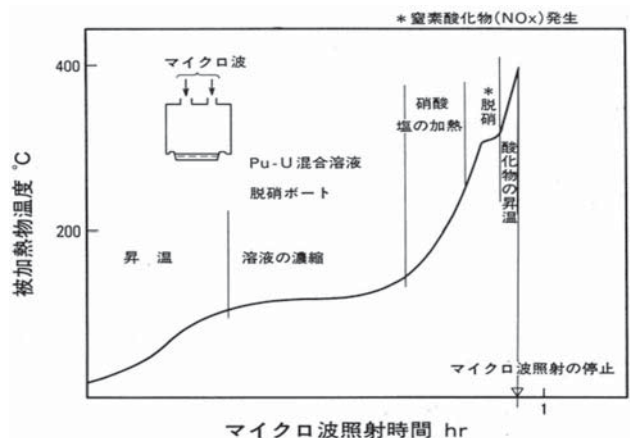
溶液の昇温、溶液の濃縮、硝酸塩の加熱、脱硝、酸化
物の昇温をマイクロ波による加熱の1工程で置き換える
ことできる。(第1図参照)

(2) 廃液の発生量が少ない

沈殿物の生成に必要な試薬を必要とせず、プルトニ
ウム+ウラン溶液を濃度の高いまま直接脱硝するため廃
液の発生量が少ない。

(3) 得られる粉末の特性が良い

熱分解反応の際に生じるNO_xガスにより、脱硝酸化
物は多孔質で微細な粒子の集合体となっている。このた
め、容易に破碎でき、高密度ペレットの製造に有利な高
い活性度の粉末が得られる。



第1図 MH法による脱硝の過程

Ⅶ. プルトニウム転換技術開発施設の建設

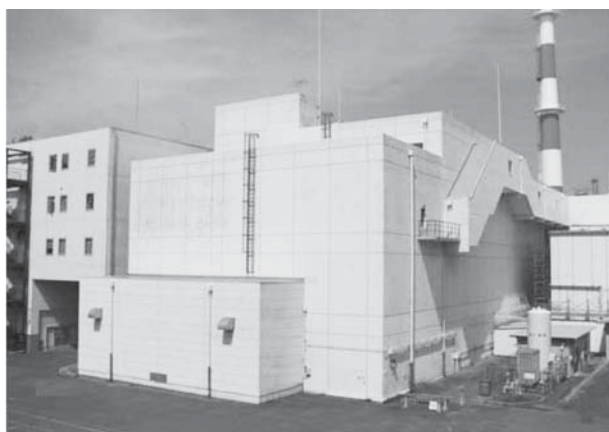
1977年には、東海再処理工場にて回収したプルトニウムをシュウ酸沈殿法(単体転換法)により酸化物粉末に転換する施設の詳細設計が終了し、安全審査に必要な各種資料作成等の業務が始まっていた。

しかしながら、日米原子力交渉の結果を受けて単体転換は断念され、MH法による混合転換の目処が得られた後、1978年12月に混合転換施設への設計変更に踏み切り、再度、混合転換施設の詳細設計を進めることとなり、1980年2月に終了した。1980年7月には、国際核燃料サイクル評価委員会(INFCE)等の評価を受けて、混合転換施設の建設が日米間で口上書交換の形で合意され、東海再処理工場の南側に施設の建設が開始された。

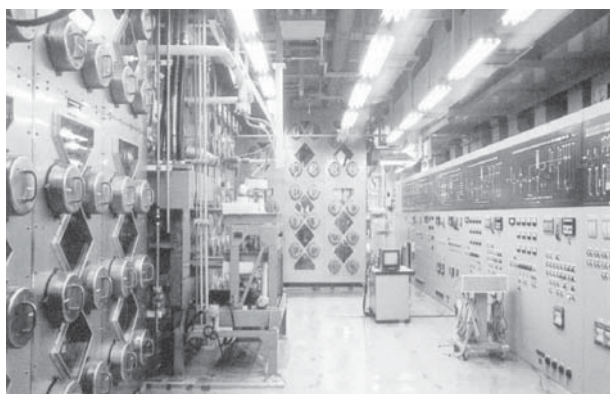
プルトニウム転換技術開発施設は地下1階、地上4階の鉄筋コンクリート造であり、建築面積は約1,200 m²、延床面積は約5,000 m²である。外観を第2図、主工程室の様子を第3図に示す。主工程設備の据付は1981年11月に開始され、翌年8月からは通水作動試験を行い、施設は1983年2月に終了した。

Ⅷ. プルトニウム転換工程の概要

東海再処理工場の分離精製工程で使用済燃料から回収



第2図 プルトニウム転換技術開発施設の遠景



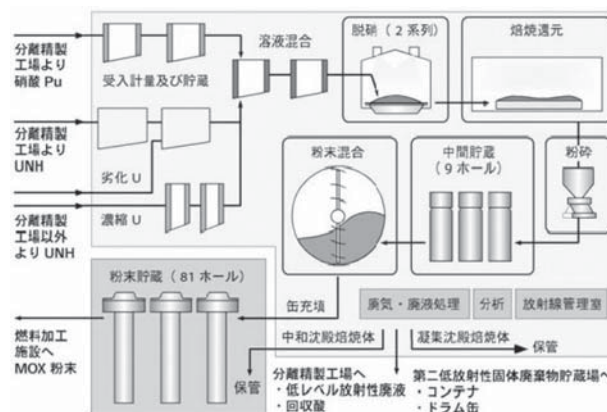
第3図 主工程室

された硝酸プルトニウム溶液、および回収された硝酸ウラニル溶液または分離精製工場以外で精製された硝酸ウラニル溶液を受入れ、混合槽でプルトニウムとウランとの比が1:1以下になるように混合し、約2 kg(Pu+U)の溶液がマイクロ波加熱脱硝器内で直接加熱脱硝され、プルトニウム・ウラン混合脱硝体(PuO₂+UO₃)が生成する。マイクロ波加熱脱硝器は2系列有しており、2系列で5回脱硝することで10 kgMOX/dの処理能力を持っている。

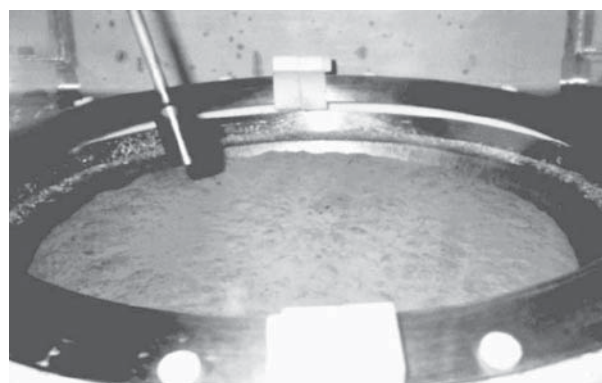
生成されたプルトニウム・ウラン脱硝体は、破碎され気流輸送装置により、焙焼還元工程に送る。焙焼還元工程では750℃で焙焼(PuO₂+UO₃→PuO₂+U₃O₈)されたのち、水素還元(PuO₂+U₃O₈→PuO₂+UO₂)が行われる。焙焼還元された粉末は、粉碎工程にて均一な粒径の粉末となる。その後、中間貯蔵工程を経て混合機へと気送し、回転羽により粉末を均一に混合する。混合機によって、1ロット当たりのサイズが大きくなった混合粉末は、アルミニウム製の粉末缶に1缶当たり2.5 kgずつ封入する。そして、粉末が充填された粉末缶4缶を貯蔵容器と呼ばれる容器に収納し、施設内の貯蔵ホールにて保管し、燃料製造施設からの混合粉末供給の要請に応じて、適時、払い出しが行われる。(第4、5図参照)

Ⅸ. 試験運転と開発運転

1983年4月にはウラン試験を開始し、マイクロ波出力



第4図 施設および工程の概要



第5図 プルトニウム・ウラン混合脱硝体

に対する脱硝体や焙焼還元温度に対する焙焼還元粉の物性評価並びに粉末の取扱いに対する不具合の改善等を行った。1983年10月には分離精製工場から硝酸プルトニウム溶液を受入れ、ホット試験を開始し、さらにプルトニウムの崩壊熱に起因するO/M比(PuおよびUと酸素の原子数の比)が上昇することが判明したことから、中間貯蔵工程で使用されている保管容器の材質をステンレス鋼からアルミニウムに変更するとともに、内部に放熱用のフィンを設けてO/M比を安定させるなどの改善を行い、1986年には設計通り10 kgMOX/dの処理能力を達成し、使用前検査に合格し、開発運転段階に移行した。

その後の開発運転では、新型転換炉「ふげん」、高速実験炉「常陽」、高速原型炉「もんじゅ」用原料粉末の14.5 tMOXを2009年までに安定的に製造し燃料加工施設に提供するとともに、これらの運転を通じて工学規模での実証を行った。また、この開発運転の期間中、脱硝反応の基礎データの取得、運転効率向上のためのマイクロ波透過性窒化ケイ素セラミック製脱硝皿の開発、MOX粉末貯蔵容器の再利用技術開発、計量管理・保障措置技術開発等の高度化のための開発を行った。

このように家庭用の電子レンジを用いた実験から始まったMH法は、その後、小規模試験設備によって工学規模での確証を行い、その知見は実証施設であるプルトニウム転換技術開発施設へと引き継がれ、原料粉末の製造を通じて、工学的規模での実証を行い、核拡散抵抗性が高い日本独自の転換技術として確立した。

X. 民間再処理工場への技術移転

民間再処理工場である日本原燃(株)の六ヶ所再処理施設の転換施設への技術移転は、1985年の「ウラン及びプルトニウム転換・貯蔵施設」の概念設計から始まる。この概念設計では先に述べた各種混合転換法に加え、世界で唯一工学的に実証されたMH法も含めて改めて実証性、安全性、操作性などの技術的な評価結果を提示し、日本原燃(株)はMH法の採用を決定した。

1987年から1989年にかけて、基本設計にかかわるコンサルティングを実施し、ホット試験と技術開発運転を通じて得られた技術データを提供した。

1990年から1998年にかけては、商用規模でのスケールアップ(10 kgMOX/d→90 kgMOX/d)に伴う技術的問題の解決を目的として、人形峠事業所でウラン粉末を用いて「マイクロ波加熱法による混合転換技術開発試験研究」や「マイクロ波加熱法による混合転換技術確証試験」を実施し、機器内粉末滞留量、廃棄物発生量の把握や約700時間のシステム試験を実施し、片系1日45 kgUの定格処理能力がほぼ得られることを確認した。

プルトニウム転換技術開発施設の技術開発運転によって得られたMOX粉末の物性値や、センサやケーブル等の耐硝酸性に関する知見などについて技術協力をを行うと

ともに、1993年からは個別機器に関わる詳細情報のほか、グローブボックス内機器の保守性、貯蔵中のMOX粉末の物性変化の有無、気流輸送設備の内部観察結果等を提供した。

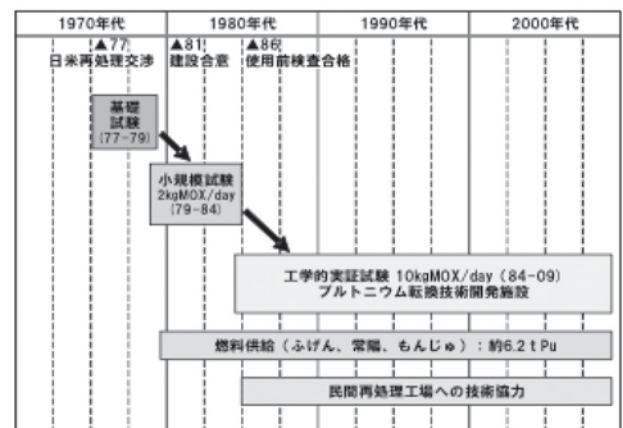
人的協力については、1983年から日本原燃(株)の研修生を48名受け入れ、最長で3年間のOJTにより混合転換に関わる専門知識、MOX粉末の取扱い技術、主工程/廃棄物処理工程/ユーティリティー工程の運転技術、撤去更新技術、許認可対応補助、保障措置対応補助等の研修を行った。また、1988年以降、プルトニウム転換技術開発施設の開発に携わった原子力機構の技術者が混合転換に関わる知識、技術、ノウハウを確実に移転するため日本原燃(株)に延べ約20名を派遣している。

このようにハード、ソフト両面からの協力によって、六ヶ所再処理工場のウラン・プルトニウム混合脱硝施設は2005年5月にウラン試験が終了し、2007年7月にはプルトニウムを使ったアクティブ試験も終了したことでマイクロ波加熱直接脱硝法による混合転換プロセスの技術移転がほぼ終了した。(第6図参照)

XI. プルトニウム転換技術が果たした役割

プルトニウム転換技術開発施設は、1983年10月のホット試験開始以来、2010年11月で27年が経過する。この間、我が国で最初の再処理工場と、燃料加工施設を繋ぐプルトニウムリサイクルの要として、大きなトラブルもなく円滑な運転を継続できたことは、多くの諸先輩方が「マイクロ波加熱脱硝法」を国産技術として定着させるべく、国内外を奔走し、今日に至る道筋を定めてくださった努力の結果の賜物である。

「MH法」は、日米原子力交渉によって、国外にも技術的蓄積がほとんどない混合転換への変更を余儀なくされ、課題が山積みの中、背水の陣で臨んだ技術者達の結束力が生み出した技術といっても過言ではない。前述したように偶然、余ったウラン溶液を電子レンジで直接乾燥しようと加熱したのが「MH法」発見の第一歩であっ



第6図 マイクロ波加熱直接脱硝法の歩み

たが、その後は一瀉千里、数ヶ月足らずでプロセス成立性を評価し、少資源国である日本の「プルトニウムリサイクル」という命題のもとに、官民一体、職員・協力会社員および多くのメーカー出向者が一丸となって、建設・試運転・技術開発運転が進められ、プルトニウム転換技術開発施設は非核兵器保有国として唯一、使用済燃料の再処理および核燃料サイクルの実現を果たした象徴的な施設となった。また、六ヶ所再処理工場への技術移転も円滑に進められ歴史的に大きな役割を果たすことができた。

XII. 新たな歴史の構築へ…

将来の燃料製造技術として、燃料製造コストの大幅低減と遠隔操作を必要とする超ウラン元素のリサイクル燃料製造に対応できるショートプロセスの開発が進められている。このショートプロセスは、プルトニウム溶液とウラン溶液の混合段階でその混合比を原子炉の燃料仕様の合わせ、その後、MH法により脱硝、焙焼還元、造粒を行い、そのまま成形・焼結してMOXペレットを得る方法である。この方法は、現行の23工程あるペレット製造プロセスを8工程に削減することができる革新的な技術である。

現在、プルトニウム転換技術開発施設では、このショートプロセスを実現するための要素技術である溶液のプルトニウム富化度調整技術開発、粉末流動性改良技術開発を進めており、今後も核燃料サイクルの一翼を担う施設としてその役割を果たし、新たな歴史を構築していきたい。

(用語の説明)

- *¹単体転換，混合転換： 単体転換では、硝酸プルトニウム溶液を二酸化プルトニウム粉末に転換し、別に製造した二酸化ウラン粉末と混合してMOX粉末を得る。混合転換では、溶液段階でプルトニウムとウランを混合することにより、二酸化プルトニウム粉末の状態を経ることなくMOX粉末を得る。MOX粉末からプルトニウムを取り出すためには、含有するウランを取り除く必要があるため、軍事利用への障害が高い。
- *²アンモニア共沈殿法： Pu・U混合溶液にアンモニア水を加え、Pu・U共沈殿物を生成し、これをろ過・焙焼・還元しPuO₂・UO₂の粉末を得る。
- *³流動床直接脱硝法： Pu・U混合溶液を濃縮したのち、流動ガス(N₂ガス)とともに流動床中で加熱して脱硝し、その後、焙焼・還元しPuO₂・UO₂の粉末を得る。
- *⁴CO-PRECAL法： Pu・U混合溶液に過剰なアンモニア水を加え、生成した沈殿スラリーをN₂ガス・金属球とともに焙焼流動床で焙焼・微粉化し、その後、還元しPuO₂・UO₂の粉末を得る。
- *⁵AUPuC法： Puの原子価を6価に調整したPu・U混合溶液にアンモニアガス、炭酸ガスを供給し沈殿物を生成する。これをろ過し、焙焼炉のH₂-N₂ガス中で加熱しPuO₂・UO₂の粉末を得る。

—参考資料—

- 1) “マイクロ波加熱直接脱硝法による混合転換プロセスの実証20年の歩み—プルトニウム転換技術開発施設の運転経験と技術開発”，サイクル機構技報 No. 24, (2004.9).
- 2) “燃料製造システムの要素技術開発(1)—ペレット法燃料製造技術”，サイクル機構技報 No. 24別冊, (2004.11).

著者紹介

吉元勝起(よしもと・かつのぶ)

(独)日本原子力研究開発機構





「災害の防止」の歴史的考察と法の在るべき姿

原子炉等規制法の「災害の防止」は放射線「障害の防止」から始まった

東京大学 西脇 由弘

昭和30年代初頭において、原子炉等規制法は、放射線障害の防止に関する法律を上位法とし、「障害の防止」を法目的とすることから議論が始まった。この法律の法目的が「災害の防止」となった過程を明らかにするとともに、法制定当初の議論に戻り、諸外国の原子炉規制と同様に、放射線障害の防止を直接の法目的とするための原子炉等規制法の改正について考察する。

I. 原子力基本法における原子炉の管理と放射線障害の防止

昭和30年10月1日に、中曽根康弘を委員長とし、民主党、自由党、社会党右派、社会党左派の4党派による超党派の委員からなる衆参両院合同の原子力合同委員会が発足した。同年10月19日に開催された第四回の同合同委員会において、経済企画庁から、原子力基本法案要綱第一次(案)¹⁾が示された。この要綱第一次(案)の備考には「放射性物質による障害防止に関しては、…放射線障害防止の一般法とすべきであるとの意見もあるので、…別個の法律を制定することが妥当と考えられる」とされ、放射線障害の防止に関する項目は含まれていなかったが、同合同委員会での議論の過程で、「原子力に関する基本に関係あるものは全部基本法に入れること²⁾との考え方が示された。

昭和30年10月28日の第8回原子力合同委員会において、前日の27日に策定された原子力基本法案要綱(菅田試案)¹⁾が示された。同要綱(案)には、初めて、放射線障害の防止が盛り込まれたが、審議の過程において、「放射線障害防止」の条項については、「別に法律をもって定める」こととしているが、原子炉中心の保安の観点でまとめあげることに協議を決めた²⁾とされ、原子炉の保安については、放射線障害の防止の観点から別法の一般法によることとされた。

また、同要綱(案)においては、放射線による障害の防止には目的規定が置かれているが、原子炉の管理には目的規定はなく、また、放射線障害の防止は一条の規定でかつ別法によるとされているが、原子炉の管理は、三条にわたりかつ別法で定めるとされていないことから、原子炉の管理、すなわち、原子炉の建設等の許可や操作開

始の認可は、米法にならい、原子力基本法を直接の法的根拠として実施することが想定されていた可能性が高い。

昭和30年11月30日から衆議院法制局を含め上記要綱(案)を法文化する作業に入り、同年12月2日の第17回原子力合同委員会に提出された原子力基本法案(第一次案)¹⁾において、原子炉の管理の各条に「別に法律で定めるところにより」が挿入され、別法で具体的な規制手続きが定められることが明示された。

昭和30年12月13日の衆議院科学技術振興対策特別委員会に原子力基本法案が提出され、中曽根康弘議員の法案提案理由の説明において、原子炉の管理は、「放射線に関する、安全措置法によってこれを規定しておく予定であります」との説明がなされており、また、放射線による障害の防止を規定している「第八章は、…レントゲンから原子炉による中性子線まで入ることになります」と説明されており、原子炉の管理の上位法として、放射線による障害の防止法を位置づけていたことが裏付けられる。

II. 放射線障害防止法の制定経緯

放射線障害防止法の基となった放射性物質取締法案は、昭和27年、総理大臣を会長とする科学技術行政協議会の放射性同位元素部会に放射性物質取締法案検討小委員会を設け、原子力基本法に先立ち早くから法案の検討を開始し、昭和29年1月の第60回の同協議会に「放射性物質による障害予防勧告」を報告している。昭和30年11月9日、上記小委員会は、それまでの要綱案の審議結果を科学技術行政協議会総会に放射性物質等取締法案要綱案³⁾として提出した。この要綱案は、技術的立法であることから、新設された総理府原子力局において法案を準備することとなり⁴⁾、昭和30年11月17日の第12回原子力合同委員会において、放射線障害防止法案要綱(最終案)⁴⁾が了解・決定された。

昭和30年12月16日の衆議院科学技術振興対策特別委員

The Investigation of Prevention of a Disaster, and a Proposal for the Revision of the Nuclear Reactor Regulation Law : Yoshihiro NISHIWAKI

(2010年 8月31日 受理)

会において中曽根康弘議員は、「炉の設置やその他については、外国以上の管理を、放射線障害防止法案の内容に規定してありまして、…今度は炉と一緒にして、レントゲンも嚴重に取り締まるようになろうと思います」と答弁しており、検討されている放射線障害防止法案は、レントゲン装置や原子炉も包摂した法律とする方向で検討が進んでいたことが分かる。

その後、昭和31年1月20日の第7回原子力委員会定例会に、昭和31年1月7日に作成された放射線障害防止法案(第一次案)³⁾が提出されているが、この内容は上記要綱(案)を踏襲し、同法案の適用範囲はすべての放射線や装置等を含むものとなっており修正されていない。同法案は、高度の技術立法であり、政令、府令案等の作成には相当の専門的知識が必要とされるため、科学技術庁原子力局に放射線障害防止法案技術基準検討小委員会が設置⁵⁾され、作成作業に学識経験者を参加させ、その意見を原案に反映させることによって技術的正確性を期することとなった。この調整の結果、昭和31年12月28日の第55回原子力委員会定例会において、放射線障害防止法案第2次案が提出され、厚生省等関係省庁の所管問題を背景とした意見に基づき、主務大臣を科学技術庁長官とし、エックス線に対する取締りは除外するとの方針が決定⁶⁾された。

翌昭和32年2月22日の第12回原子力委員会に、この除外を明確にするために名称が変更された「放射性同位元素等の放射線による障害の防止に関する法律案要綱」が提出された⁷⁾。ここに至り、原子力基本法第三条(定義)第五項は放射線全体を包摂するものであるものの、放射線障害防止法案の規制対象から、エックス線やレントゲン装置等は除外され、同法の適用範囲は放射性同位元素に限り、具体的には政令でこれを定めるとの修正がなされた。

こうして、「放射性同位元素等の放射線による障害の防止に関する法律(以下、「放射線障害防止法」と略す)案」は、昭和32年3月26日の閣議了解を経て同年4月9日に国会に提出され、同年5月18日に可決成立する。

Ⅲ. 原子炉等規制法の制定経緯

原子力基本法の成立後、放射線障害防止法の検討と並行して、原子炉の管理を具体化する法律についての検討が行われた。

昭和31年2月2日に、原子力合同委員会事務局において、核原料物質および核燃料物質管理法案要綱³⁾が作成され、同年3月1日の原子力合同委員会にて検討審議する予定であったが、国会審議があわただしく合同委員会は開催、審議されず、科学技術庁の発足とともに、同庁の原子力局に委ねられ、次期通常国会に提出すべく準備が進められることとなった⁹⁾。

同要綱においては、「科学技術庁長官は、原子炉の位

置、構造及び設備並びに原子炉操作の方法が総理府令で定める技術上の基準に適合し、かつ、障害の防止上支障がないものであることを認めたものでなければ、前項の許可をしてはならない」とされ、また、「原子炉に関する放射線障害防止については、前各条に規定するもののほか、放射線障害防止法の規定を準用する」とされている。この時点では、核原料物質及び核燃料物質管理法案の法目的は、「災害の防止」ではなく、放射線「障害の防止」であり、原子炉の建設の許可に当たっては、放射線障害の防止上支障がないものであることを保安上の許認可基準とし、運転段階の原子炉の操作においては、放射線障害防止法の遵守を義務付けるという、放射線障害防止法を同法案の上位法とする法体系が予定されていた。

なお、現行原子炉等規制法においては、第二十四条第一項の許可の基準は、政省令へ具体的な基準を定める委任の規定がないが、同要綱においては、許可基準として、障害の防止とともに、「総理府令で定める技術上の基準」があげられており、政令で許可基準を策定する予定であったことが分かる。

しかし、前述の昭和31年12月28日の放射線障害防止法の規制対象を放射性同位元素に限定するという措置を受け、原子炉等規制法案についても検討が行われた結果、昭和32年4月11日の第14回原子力委員会定例会で、初めて、「災害の防止」を許認可基準とする原子炉等規制法案の概要⁸⁾が示された。この概要の前文は、「原子力開発の事業に従事する人々に付する障害ばかりでなく、広く公衆に対する障害の発生を未然に防止する」とともに、「原子炉等については暴走、爆発等の発生するおそれがないよう設備、運転方法等についても万全の措置を講じる」とされており、放射線障害の防止と、原子炉等の暴走、爆発等を防止するために規制を行うことが示され、原子炉の「指定、許可の際の措置」および「保安規定」に、「災害の防止」を許認可基準とすることがうたわれた。

このような議論や経緯を経て、原子炉等規制法案は、昭和31年12月から4月という極めて短期間の間に、放射線障害防止法を上位法としない、また、放射線「障害の防止」から「災害の防止」を法目的とする法案に内容が改められ、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(以下、原子炉等規制法と略す)」は、昭和32年4月23日に国会に提出された。このように、数ヶ月の間で、原子炉等規制法の法目的が、(放射線)「障害の防止」から「災害の防止」に置き換えられたが、放射線障害防止法を原子炉等規制法の上位法としないという決定は、原子炉等規制法の法目的が「障害の防止」ではなくともよいということの意味するだけで、なぜ「災害の防止」としたのかということに対する答えを与えてはいない。山内喜明弁護士から聴したところ、「原子炉等規制法は高圧ガス取締法を参考としつつ法案が作成された」とのことであり、そうすれば、高圧ガス取締法は爆発などを

想定し、その法目的が「災害を防止するため」とされており、原子炉等規制法もこれにならったとの推論もありうる。

また、伊原義徳元科学技術事務次官から聴したところ、「原子炉の暴走などの事故に関する知識は、学者のみならず行政官にもあり、これを防止しなければならないと考えていたこと」および「原子炉等の検討を担当していた管理課は工業技術院出身者が主体で、放射線に関する検討をしていたアイソトープ課は厚生省出身者が主体で、放射線被ばくに関する基準などは相互に連絡を取りつつ検討したが、原子炉の検討を行っている管理課の活動の方が活発かつ主流であり、放射線障害防止法を原子炉等規制法の上位法とするような話し合いは行われていなかった」とのことであり、原子炉については放射線障害の防止に加え、暴走事故などを防ぐ必要性が認識されていたこと、および、行政サイドでは両法を関連付ける作業は行われていなかったことがうかがえる。なお、後者については、昭和31年3月17日の衆議院科学技術振興対策特別委員会において、原子力合同委員会の理事でもあった志村茂治議員が、エクス線を重視する学者側と原子炉による放射線を重視する政府側との調整がうまくいっていないのではないかとこの質問に対し、佐々木義武政府委員が「立法の内容は、エクス線といわゆるアイソトープと両方合せた法律でございまして、決してエクス線の方は取りはずすというような原案にはなっておりません」と答弁しており、放射線障害防止法を上位法としつつも、学者と政府内部とでは意見の相違があったことが裏付けられる。

「災害の防止」がいかなるものであるかについては、昭和32年5月11日の衆議院科学技術振興対策特別委員会における原子炉等規制法の国会での法案審議の過程で、石野久男議員の「災害の防止」の概念が明確ではないかという趣旨の質問に対し、佐々木義武政府委員は、「許可の段階でしぼる。それから設計、工事方法の認可でしぼる。それから施設そのものができたときに検査をする。それから中間試験と申しますか、試験行程においてしぼっていく。…従いまして、災害は、これくらいいろいろ置いてやりますれば、まずまず防げるのではないかというふうに考えてこの法案を提案した次第であります」と答弁し、「災害の防止」がいかなるものであるかについての具体的な説明はなく、段階規制で「災害を防止」していくとの考えを明らかにしている。

また、昭和32年5月8日の衆議院科学技術振興対策特別委員会において、石野久男議員の「災害の防止」の政省令化が必要ではないかとの質問に対し、有澤廣巳説明員が、「炉の場合も、やはり一般論的な基準をここで特に設けたならば、かえってそのために適当な処置が行いにくいような形になりはしないか、こういうふうな感じをもってこれを読んだものですから、これでいいように実

は考えたのです」と答えており、「災害の防止」については、申請ごとの個別の判断になり、一般的な基準を設けることは適当ではない旨答弁している。この答弁に続き、佐々木政府委員は、「災害の防止の点に関しましては、これは技術的な面がただいまどんどん進歩している最中でございますので、…政令であらかじめ定めておくよりは、時代の進運に応じて行政処分がとれるようにしておいた方が、かえって現実的ではなからうかという趣旨」であると答弁しており、「災害の防止」に関する技術基準については、技術が進歩を理由として、「災害の防止」に関する技術基準を政令で定めるのは現実的ではない旨答弁している。

昭和32年4月18日に国会に提出された原子炉等規制法は、このような国会審議を経て、「災害の防止」の「災害」とはいかなるものか、あるいは、「災害」と放射線障害防止との関係はいかなるものかなどを明確に定義しないまま、同年5月18日に可決、成立する。

Ⅳ. 原子炉等規制法における平常時被ばくの規制構造

前記のような経緯を経て制定された原子炉等規制法において、現在、平常時被ばくが、どのように安全審査されているのかを概括する。

原子炉等規制法の設置許可において、許可の基準は法第二十四条第一項第四号であるが、これを具体化した政省令は存在せず、原子力安全委員会の指針類にも、努力目標である「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」が定められているだけであり、周辺公衆の放射線被ばくに関する設置許可の基準が存在しない。

実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則(以下「実用炉則」と略す)第一条(定義)第六号に、「周辺監視区域」が定義されている。「周辺監視区域」は管理区域の周辺の区域であって、周辺監視区域の外側のいかなる場所においても線量当量限度を超えるおそれのない区域をいうこととされている。そしてこの線量当量限度は、線量限度告示において、第三条第一項「実用炉規則第一条第二項第六号…の経済産業大臣の定める線量当量限度は次のとおりとする」と定められ、具体的な線量当量限度等が示されている。これらの周辺監視区域の規定は、実用炉則第一条を根拠としており、単に定義規定に過ぎない。なお、周辺監視区域については、原子炉等規制法第三十五条第一項の保全のために構ずべき措置を受けた実用炉則第八条第三項において、人の居住を禁止すること、および、業務上立ち入る者以外の立入を制限することが求められている。

また、同じく原子炉等規制法第三十五条第一項を受けた実用炉則第十五条第一項第四号および第七号において、廃棄施設や排水施設において放射性物質を排出する場合は、その濃度を監視することにより、周辺監視区域

外の放射性物質の濃度が経産大臣の定める濃度限度を超えないよう定められており、この濃度限度は、線量限度告示第九条において定められている。特に、外部放射線および内部放射線により被ばくする可能性がある場合は、同条第一項第六号により、その総量が年間で1ミリシーベルトを超えないような放射性物質の濃度を濃度限度とすることが定められている。すなわち、周辺監視区域外の周辺公衆の放射線被ばくについては、原子炉等規制法第二十四条第一項第四号の「災害の防止」から直裁に規制されているのではなく、運転管理段階での放射性物質の放出の管理によって担保される法構造となっている。このため、設置許可においては、周辺監視区域は、申請書本文の記載事項とはされていない。

このような法構造をとっていることから、平常時被ばくの観点からは、仮に、放射性廃棄物の放出量を大きくしても、周辺監視区域内の人の居住や立入を制限できれば、周辺監視区域を拡大することで対応が可能となることとなる。

V. 諸外国の原子力規制の法目的

我が国の原子炉等規制法の法目的は、「災害の防止」であるが、IAEAなどの国際機関や諸外国の原子炉規制の法目的はいかなるものとなっているか概括する。

IEAEは、安全基準基本安全原則(No.SF-1)において、「基本安全目的は、人および環境を電離放射線の有害な影響から防護すること」としている。EURATOMは、「原子力施設の原子力の安全性確保のための欧州共同体枠組みを制定する2009年6月25日の閣僚理事会指令(2009/71/EURATOM)」において、「原子力安全」とは、「原子力施設において最適な運転条件の達成、事故防止および事故影響の軽減によって、これらに起因する放射線から労働者および公衆を保護すること」としている。米国は、1954年原子力法において、「原料物質、副産物および特殊核物質の処理および利用は、国家防衛および安全保障に備え、かつ、公衆の健康および安全を保護するために、公益上規制されなければならない」としている。フランスは、原子力に関する透明性および安全性に関する法律において、原子力に関する安全保障とは、原子力の安全、放射線防護、および、放射線を利用した犯罪の防止等であるとし、放射線防護は、「人に対する電離放射線の直接的又は間接的に有害な影響(環境に与える損害を含む)が及ぶことを防止し、又はその影響を減少させることを目的とした予防および監視の規則、手続きおよび方法の総体をいう」としている。ドイツでは、原子力法の法目的に、「生命、健康および財産を原子力の危険および電離放射線の有害な作用から防護し、原子力又は電離放射線によって引き起こされる被害を除去すること」と定めている。フィンランドの原子力エネルギー法では、その法目的を、「原子力エネルギーの利用は、

安全でなければならない、人々に危害を与えてはならない、または環境あるいは財産に損害を与えてはならない」としている。

これら諸外国の原子力規制の法目的には、公衆の健康および安全の保護や電離放射線の影響の防護が直裁に含まれており、人に対する放射線障害の防止の観点が明示的に組み込まれている。

VI. 在るべき原子炉等規制法の姿

我が国の場合、法第二十四条の許可基準は、「核燃料物質、核燃料物質によって汚染されたもの、…による災害の防止上支障がないものであること」とされており、核燃料物質等による災害、すなわち核燃料物質等からの放射線による被ばくも、災害の防止の概念には含まれていると思われるが、放射線障害の防止は直接的な表現で法目的に明示されてはいない。原子炉等規制法の法目的は、「災害を防止し、…公共の安全を図るために」とされており、同法の直接の保護法益は公共の利益であり、個人個人の利益は反射的利益に過ぎないとの議論もありうる。また、前章で述べたように、設置許可の安全審査では、線量目標値指針を満足する見通しが得られたことをもって十分に周辺公衆の被ばくが抑えられ、運転管理段階での放出管理を前提に周辺監視区域外における被ばく線量限度を超えない技術的見通しが得られたとしている。

諸外国の法制を参考とし、原子炉の安全確保の目的は、究極には放射線の影響の防護であることを考えると、我が国の原子炉等規制法も、放射線障害の防止を直裁に記載することが望ましい。

かかる観点から、周辺公衆の放射線被ばくの防止(放射線業務従事者や事故時の被ばくについてはここでは触れない)を直接の法目的とするための原子炉等規制法改正案について、以下考察する。

まず、原子炉等規制法第一条(目的)を、下記のように変更する。

…これらによる原子力の災害及び放射線の障害を防止し、及び核燃料物質を防護して、国民の安全を図るために、…

もっとも、現行法令の「災害」には放射線障害も含まれ、改正後はこれを抜かなければならないとする論もあるが、この場合には、改正案の「災害」を「原子力の災害」などとし、限定を行えばよい。また、公共の利益の保護から、個人の障害の防止を法目的とするため、「公共」を「国民」に変更している。

次に、周辺監視区域の定義を行う必要がある。原子炉等規制法第二条(定義)に、次の一項を追加する。

この法律において、「周辺監視区域」とは、以下の区域をいう。

- 一、人が居住しない区域。
- 二、境界にさく又は標識を設ける等の方法によって周

辺監視区域に業務上立ち入る者以外の者の立入を制限する区域。ただし、当該区域に人が立ち入るおそれがないことが明らかな場合は、この限りではない。

原子炉等規制法第二十四条第一項第四号の許可基準も、法目的の改正に合わせ、第五項として一項追加して放射線障害の防止の観点を付け加えたうえで、具体的な技術基準は政令にて定める旨の記載を追加し、下記のように変更する。

四. 原子炉施設の位置、構造及び設備が、政令で定める原子炉による災害の防止に関する基準に適合していること。

五. 原子炉施設の位置、構造及び設備が、政令で定める放射線による障害の防止に関する基準に適合していること。

上記第五号に基づく政令を、施行令第十一条に枝番を新設し、次のように定める。

法第二十四条第一項第五号に規定する政令で定める基準は、周辺監視区域の外側のいかなる場所においてもその場所における線量が、主務省令で定める線量限度を超えないようにすること。

上記の線量限度を定めるため、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示第三条を、下記に改める。

施行令第十一条第二項の線量限度は、次のとおりとする。(以下、具体的線量限度の変更はなく、略す)

上記の法手当てを行うことによって、原子炉等規制法は、放射線障害の防止をも直接の法目的とすることが明らかになり、原子炉の設置許可をする初期の設計段階から、周辺監視区域外の線量限度を一定以下におさえ、もって放射線による障害から、周辺公衆の健康と安全を確保するという法構造をとることができる。

もっとも、設置許可段階で周辺監視区域外の被ばく線量限度を定めても、実際には、運転管理段階の放射性物質等の放出管理によらなければならないとの見方もあろう。しかし、設置許可段階で、放出管理を仮定し運転管理に枠組みを与えることは、段階規制を一層確実にすることになり、また、現在その必要性が述べられている包括的安全解析報告書の導入によって、この設置許可の性格を明確にすることになる。

Ⅶ. 結 論

原子力規制の目的を放射線障害の防止であるとするこは、安全目標の導入への道筋を付けることにつながる。また、原子力の安全性と規制との関係が明確になり、国民の規制への信頼性向上、ひいては、事故・トラブルの評価や対応の円滑化にも結びついていこう。さらに、環境放射線モニタリングにより原子力の安全性・危険性の「見える化」を図れば、規制の結果としての信頼性を総体として確認する手段となることから、その導入を検討することが望まれる。

— 参 考 資 料 —

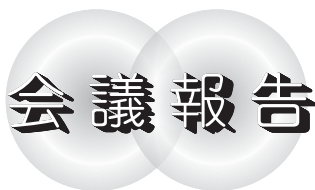
- 1) 日本原子力研究所編「原子力諸法案の生まれるまで」(東京大学総合図書館, L 80:291): 第六分冊第三編其の二第二, pp.30, 47~53, 60~66.
- 2) 日本原子力研究所編「原子力諸法案の生まれるまで」(東京大学総合図書館, L 80:291): 第三分冊第二編第一部, pp.21, 54, 356~357.
- 3) 日本原子力研究所編「原子力諸法案の生まれるまで」(東京大学総合図書館, L 80:291): 第七分冊第三編其の二第八, pp.18~31, 32~49, 120~126.
- 4) 原子力委員会月報 Vol. 2, No. 7「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律案」(昭和32年7月).
- 5) 原子力委員会月報 Vol. 2, No. 1「放射線障害防止法案技術検討小委員会の設置」(昭和32年1月).
- 6) 原子力委員会月報 Vol. 2, No. 3「原子力委員会日誌」(昭和32年3月).
- 7) 原子力委員会月報 Vol. 2, No. 5「原子力委員会日誌」(昭和32年5月).
- 8) 原子力委員会月報 Vol. 2, No. 5「核原料物質, 核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律案の概要について」(昭和32年5月).

著 者 紹 介

西脇由弘(にしわき・よしひろ)



東京大学
(専門分野/関心分野)原子力の法工学/原子力規制の在り方



原子力法制システムの国際化の潮流 シンポジウム「原子力法制システムの改革に向けて」概要 Toward a Japanese Nuclear Regulation System's Reform

2010年8月25日(東京大学 鉄門講堂)

東京大学原子力法制研究会の成果報告会として、表題のシンポジウムが開かれたのでその概要を報告する。

1. 原子力安全規制体制の有り方

(講演者 東大・城山英明教授)

規制行政庁の独立性確保のあり方

我が国の規制権限は当初は集約されていたが、推進と規制の一本化が重視され、現在は規制権限が推進省庁に分散している。しかし、最近では社会環境の変化もあって、国内外から安全規制の行政組織の独立性が不十分との議論がある。一方では産業政策の観点から欠けており、安全性の観点から過度の独立性を有しているとの指摘もある。したがって、規制の独立性と推進行政の双方とも強化する必要があるが、規制の独立性強化の選択肢としては4通りの方法がある。

- (1) 国家行政組織法上の3条委員会(例：国交省の運輸安全委員会)
- (2) 内閣府外局委員会(例：公正取引委員会、国家公安委員会)
- (3) 内閣府等に庁として設置(例：金融庁、消費者庁)
- (4) 資源エネルギー庁の「特別の機関」を経済産業省の「特別の機関」に変更

また、電事法と原子炉等規制法の2本立てで規制している実用炉の安全規制は、透明性向上と法手続きの簡素化の観点から、原子炉等規制法にできるだけ一本化することが望ましい。

ダブルチェック問題

我が国は原子力の経験を積み重ねており、行政庁の安全審査を再度、原子力安全委員会が審査するダブルチェックは重複感が強い。その目的は、規制と推進の一貫化による行政庁の監視にあるのだから、ダブルチェックを廃し、規制行政全体の監査を強化すべき。さらに内閣府に規制行政権限が集約されれば、別途の監査の方法を検討すべき。

2. 安全協定と地方自治体の役割

(講演者 東大・菅原慎悦)

我が国では国が一元的に原子力安全の規制権限を持つが、関係自治体は事業者との間で安全協定を締結し、さまざまな関与を行っている。こうした自治体の関与は、住民への情報伝達や安全に対する信頼向上等の点で積極的に評価できる一方、運転再開時等の了解手続きの不透明さや、公的な枠組み外での関与であること、等の課題

もある。国と地方の役割分担の改善策として4つの選択肢が考えられる。((2)~(4)案はいずれも(1)案が前提)

- (1) 独立規制機関+説明責任明確化案(規制行政庁の独立性を確保した上で、立地地域等への説明責任を明確化し、自治体が現在行っている役割の一部を新規規制機関が代替する。)
- (2) 日本版地域情報委員会設置案(フランスの例にならない、自治体や地域関係者等が参加する委員会を各地域に設置する。)
- (3) 環境モニタリング法定化案(自治体を実施している環境モニタリングを法定化し、国から自治体への説明責任、自治体から住民への説明義務を明確化する。)
- (4) 規制機関と自治体との協議法定化案(規制機関が結論を出す前に、自治体との協議を制度上可能とする。自治体が住民の不安等を具体的に伝え、規制側が的確に評価・応答する仕組みが期待される。)

いずれの案も特長を有する一方、多くの論点がある。また、地域振興や交付金等をめぐる課題は、別途検討を要する。

3. 技術と法の構造分科会の活動の社会的側面

(講演者 東大・西脇由弘客員教授)

審査基準である指針類の問題点

安全審査に用いている安全委員会の指針によるのではなく、行政庁が許可基準を政省令化すべき。

行政の専門的能力

我が国の原子力規制機関の能力は、諸外国と比べ高いといえず、専門性の向上を図るか、専門機関であるJNESへ責任と権限を委譲すべき。

法令から見た官民関係の再構築

国の技術基準の性能規定化が進められているが、定型化した構造・強度の設計と検査に民間の第三者機関を導入・活用し、工事認可と使用前検査を簡素化すべき。

運転管理の時代の規制のあり方

規制の重点を、後段規制へ、そして機能・性能の重視にシフトし、複雑化した検査制度を統合し、事業者の日常の行為全般を対象とした「事業者監視型検査」を導入すべき。

品質保証に対する検査

検査要領を明確かつ透明化し、品質保証の形式的検査でなく、その実行状況を検査すべき。

(東大・諸葛宗男, 菅原慎悦, 2010年10月27日 記)



高速増殖炉燃料設計が取り扱うべき範囲と内容

(独)原子力安全基盤機構 中江 延男, 馬場 利和, 上村勝一郎

「高速炉燃料設計屋は何を考え、何をなすべきか」との観点から、原子力安全基盤機構(Japan Nuclear Energy Safety Organization: JNES)では高速増殖炉燃料設計が取り扱うべき範囲および内容について検討を進めている。その結果を踏まえて、高速増殖炉燃料技術基準の基本的考え方をまとめた。本稿では、燃料の機能と対応する安全要求および原子炉施設の安全設計・安全評価と燃料設計の関連について解説し、燃料に対する要求事項を取りまとめた技術基準の基本的考え方について報告する。高速増殖炉燃料を対象とした報告であるが、その基本的考え方は軽水炉燃料にも適用可能である。

I. 燃料の機能と対応する安全要求

燃料は取替え品であり、仮に破損しても交換すればよいので重要視する必要はないといわれる場合がある。燃料屋からすれば大きな誤解であり、このような見解は改めるべきであると思う。燃料は原子炉の中で破損せずに燃焼することのみが要求されている訳ではない。ここでは、JNESが検討を進めている高速炉燃料技術基準の基本的考え方を基に燃料が有している機能を明確化し、その機能に対する安全要求について解説する。

1. 燃料の機能

燃料は原子炉において中性子と熱の発生源であることから制御棒や冷却材と近接しており、原子炉の基本的安全要求である「停止」、「冷却」と密接な関係にある。また、自ら放射性物質である核分裂生成物(Fission Product: FP)を内包している。すなわち、放射性物質の「閉じ込め」機能も担っている。核分裂により発生した中性子は炉心反応度に影響するため制御棒によってその数が制限されなくてはならない。発生した熱は炉心内での異常発熱を押しやるため炉心から取り出されなければならない。また、燃焼により発生した多量の放射性物質は閉じ込められなくてはならない。このように、燃料は放射性物質の閉じ込め機能を有している以外に原子炉の停止および冷却機能にも深く関わっている。

2. 対応する安全要求

燃料への安全要求は次のとおり整理される。すなわち、原子炉の停止機能に関連して、燃料は制御棒の挿入経路を維持すること。原子炉の冷却機能に関連して、燃料は冷却可能形状を維持すること。そして、放射性物質

の閉じ込め機能に関連して、燃料は破損しないこと。

制御棒挿入経路の維持や冷却材流入経路の維持は通常運転時はもちろんのこと、運転時の異常な過渡変化時、事故時、地震時にも要求されるものである。これらの機能は異常時(運転時の異常な過渡変化時および事故時)でも正常に作動することが前提で安全評価がなされる。このため、これらの機能の有効性は安全設計によって確認されなければならない。

II. 原子炉施設の安全設計・安全評価と燃料設計との関連

1. 原子炉施設の安全設計とは

(1) 原子炉施設の安全設計

原子炉施設の安全設計とは、原子炉施設の安全性確保のために施される設計のことをいう。原子力安全委員会の「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」(以下、「安全設計審査指針」という)には安全設計の妥当性について判断する際の基礎が示されている。「安全設計審査指針」の指針11(炉心設計)、指針13(原子炉の特性)、指針17(原子炉停止系の停止能力)、指針24(残留熱を除去する系統)、指針36(安全保護系の過渡時の機能)および指針48(電気系統)では、安全設計の妥当性を判断する際の基礎(あるいは目標)として「燃料許容設計限界を超えない設計であること」が示されている。すなわち、安全設計の目標として「燃料許容設計限界」が設定されている。

「燃料許容設計限界」の定義は「安全設計審査指針」(Ⅲ.用語の定義)に記載されており、「燃料許容設計限界とは、原子炉の設計と関連して、燃料の損傷が安全上許容される程度であり、かつ、継続して原子炉の運転をすることができる限界をいう。」とされている。ここで、「継続して原子炉の運転をすることができる」に関しては、「必ずしもそのままの状態から原子炉を運転することを意味するものではなく故障箇所の修理及び必要な場合における燃料の検査・交換を行った後に運転を再開す

Scope and Content Covered by LMFBR Fuel Design: Nobuo NAKAE, Toshikazu BABA, Katsuichiro KAMI-MURA

(2010年 9月28日 受理)

ることも含む。」と解説されている。しかし、「燃料の損傷が安全上許容される程度であり」に関する解説はない。このため、燃料破損が許容されるのか否かについては定かではない。ここでは、安全上許容される程度の燃料破損は認められると考えられるとして論を進めるが、今後とも継続して検討する必要がある。

(2) 燃料設計

「安全設計審査指針」の指針12(燃料設計)において燃料設計に関する要求事項が記載されている。すなわち、「燃料集合体は、原子炉内における使用期間中に生じ得る種々の因子を考慮しても、その健全性を失うことがない設計であること。燃料集合体は、輸送及び取扱ひ中に過度の変形を生じない設計であること。」としている。ここで、「原子炉内における使用期間中に生じ得る種々の因子を考慮しても、その健全性を失うことがない」とは、すべての既知の被覆管破損機構が網羅され、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時に被覆管は破損しないことと解釈される。すなわち、原子炉施設の安全設計では燃料破損の許容が明確ではないが、燃料設計では燃料破損は許容されない。また、燃料設計ではすべての既知の被覆管破損機構が考慮されなくてはならないが、原子炉施設の安全設計ではそこまで要求されていない。

2. 原子炉施設の安全評価

安全評価とは異常状態を想定した解析を行うことにより安全設計の妥当性を評価することをいう。「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」(以下、「安全評価審査指針」という)には安全評価の妥当性について判断する際の基礎が示されている。また、「高速増殖炉の安全性の評価の考え方」(以下、「高速炉指針」という)では、「安全評価審査指針」を参考とすることができると記載されており、それを参考に安全評価の妥当性について判断する際の基礎が示されている。すなわち、運転時の異常な過渡変化に対して、「想定した事象の発生に伴う過渡現象は、炉心が損傷に至る前に収束され、炉心は通常運転に復帰できる状態が維持されなければならない」としている。

この安全評価における判断基準と原子炉施設の安全設計の妥当性を評価する際の判断基準である燃料許容設計限界とを比較する。「炉心が損傷に至る前に収束」が「燃料の損傷が安全上許容される程度」に、「炉心は通常運転に復帰できる状態が維持」が「継続して原子炉の運転をすることができる」にそれぞれ対応すると考えれば両者は同じものであると捉えることができる。原子炉施設の安全設計も安全評価もその目的はともに安全設計の妥当性を評価することであるため、両者の判断基準は同じであるべきといえる。

一方、事故に対しては、「想定した事故事象によって外乱が原子炉施設に加わっても、事象に応じて炉心の溶

融の恐れがないこと及び放射線による敷地周辺への影響が大きくなるようFP放散に対する障壁の設計が妥当であることを確認しなければならない」としている。これを受けて具体的な判断基準として、「炉心は大きな損傷に至ることなく、かつ十分な冷却が可能であること」、「原子炉格納容器の漏洩率は、適切な値以下に維持されること」、「周辺の公衆に対し、著しい放射線被ばくのリスクを与えないこと」が示されている。1番目は制御棒挿入経路の維持および冷却可能形状の維持に対応している。2番目については燃料に関係する事項ではない。3番目は事故時に破損する燃料について被ばく評価上適切に考慮することが対応する。これを、ここでは「燃料破損の考慮」と呼ぶことにする。

3. 燃料許容設計限界の位置付け

燃料許容設計限界は、原子炉の炉心設計等の妥当性や安全保護系のレベルの設定などの根拠となる。また、原子炉施設の安全評価に際し、運転時の異常な過渡変化時の評価結果の妥当性を判断する根拠となる。このことから、燃料の設計基準をベースに重要な因子を抽出したものを対応させることができる。

「高速炉指針」では、運転時の異常な過渡変化時の具体的な判断基準として以下が示されている。

- (1) 燃料被覆管は機械的に破損しないこと(被覆管最高温度は830℃未満)
- (2) 冷却材は沸騰しないこと(炉心ナトリウム温度はナトリウムの沸点未満)
- (3) 燃料最高温度が燃料溶融温度を下回ること(燃料最高温度は燃料融点未満)

これを受けて、「もんじゅ」では(1)~(3)を具体化したものとして上記の括弧内で示したものを燃料許容設計限界として定めている。

燃料許容設計限界は、炉心その他関連系統設備の安全設計および運転時の異常な過渡変化に対する安全評価の観点において燃料設計と強い相関関係にあると考えるのが適切である。

4. 原子炉施設の安全設計・安全評価と燃料設計との関連

燃料許容設計限界と燃料設計の妥当性を判断するための根拠となる燃料設計基準との関連を明確にできれば、この節の命題に答えることになる。

燃料設計ではすべての既知の被覆管破損機構が考慮されなくてはならないのに対し、原子炉施設の安全設計・安全評価では代表的な事象が起きたとした場合の燃料の損傷の程度を評価すればよい。すなわち、燃料許容設計限界は、代表的な事象が起きたとした場合の燃料の損傷の程度について判断する場合の根拠に対応することになる。原子炉施設において想定される代表的な異常事象と

して炉心の出力が上昇する事象(Transient Over Power: TOP)および冷却材流量が減少する事象(Loss of Flow: LOF)の2つのタイプの事象が対応する。したがって、これらの事象が起きた場合に燃料が損傷(破損)に至る燃料損傷(破損)モードを設定し、関連する判断基準を燃料許容設計限界として決めればよい。しかし、このようなプロセスの過程で設定される燃料損傷(破損)モードは、燃料設計において考慮される既知の被覆管破損機構のいずれかに対応しなければならない。

TOP型事象およびLOF型事象時の燃料ふるまいは次のとおりである。TOP型事象時には燃料温度が急激に上昇する。その結果、燃料の熱膨張、燃料過渡時スエリングが顕著となるほか、燃料溶融の可能性もある。この場合、損傷(破損)モードとしてペレット-被覆管機械的相互作用(pellet-cladding mechanical interaction: PCMI)破損、溶融燃料による被覆管破損が考えられる。そこで、燃料許容設計限界として、「もんじゅ」では「燃料最高温度は燃料融点未満」が設定されている。これにより、溶融燃料による被覆管破損は防止できる。また、この燃料許容設計限界の下では「もんじゅ」燃料ではスミア密度(ペレット-被覆管ギャップ部を考慮した密度)が低いこと等の理由によりPCMI破損は回避できる。LOF型事象時には被覆管温度の急激な上昇、内圧の上昇、さらには、冷却材が沸騰する可能性がある。この場合、急速加熱クリープによるクリープ破損や被覆管焼損が考えられる。そこで、燃料許容設計限界として、「もんじゅ」では「被覆管最高温度は830℃未満」および「炉心ナトリウム温度はナトリウムの沸点未満」が設定されている。これにより、急速加熱クリープによるクリープ破損や被覆管焼損は防止できる。ここで、被覆管最高温度制限値である830℃は、照射済燃料被覆管の急速加熱試験データから求まる強度下限値を「もんじゅ」燃焼末期内圧条件に適用し裕度をもたせて設定されている。

燃料許容設計限界に対応する燃料設計判断基準については以下のとおりである。「燃料最高温度は燃料融点未満」に対応する燃料設計判断基準は「燃料溶融を許容しない場合は、燃料中心温度が燃料融点に達しないこと。また、燃料溶融を許容する場合は、燃料溶融割合(範囲)が燃料溶融破損に到らない程度に制限されること」である。「被覆管最高温度は830℃未満」に対応する燃料設計判断基準は「クリープ寿命分数和(各区分における温度、応力から得られるクリープ破断時間と区分された時間との比を足し合わせたもの)を許容値以下に保つこと」である。「炉心ナトリウム温度はナトリウムの沸点未満」に対応する燃料設計判断基準は「冷却材温度をナトリウムの沸点未満とすること」である。

LOF型事象時の「被覆管最高温度は830℃未満」と「クリープ寿命分数和を許容値(通常は1.0が設定される)以下に保つこと」とは異なる表現であるが、いずれもクリー

プ破損の防止を規定するものである。これは、安全評価では炉心全体での挙動を解析するコードが使用され、その出力は温度が一般的であり、クリープ寿命分数和を算出することはしていない。このため、安全評価の判断基準としてクリープ破損に対応する被覆管温度の上限値が設定されている。

以上より、原子炉施設の安全設計・安全評価と燃料設計の関連として、燃料設計側は原子炉施設の安全設計・安全評価における代表事象に対応する燃料許容設計限界を燃料設計基準に基づき設定する役割を担っている。

Ⅲ. 燃料技術基準の基本的考え方

軽水炉燃料を対象とした燃料技術基準は米国NRCが定めているSRP(Standard Review Plan)¹⁾やフランスの規制当局が承認した事業者の規格(RCC)のうち、燃料集合体の設計と製造に関するものとしてRCC-C²⁾がある。ただし、高速炉燃料を対象としたものは著者が発表したもの³⁾以外は見当たらない。なお、高速炉の安全設計基準として米国ANSが発行したもの⁴⁾がある。

1. 燃料技術基準が取り扱うべき範囲

I章およびII章で記載したとおり、燃料設計は原子炉の基本的安全要求である停止、冷却、閉じ込めと密接な関係にあり、かつ、原子炉施設の安全評価とも関連する。このため、燃料設計のための指針となる燃料技術基準が取り扱うべき範囲として以下の事項が考えられる。

燃料設計に関連するもの(原子炉設置許可申請書添付書類八での記載事項)として、

- (1) 通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、輸送及び取り扱い時に燃料健全性を維持するための燃料機械設計
- (2) 通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、事故時及び地震時に制御棒挿入性(挿入経路の確保)を維持するための設計
- (3) 通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、事故時及び地震時に冷却性(冷却可能な形状の確保)を維持するための設計

安全評価(原子炉施設の安全評価のうち、燃料に関する事項を縮約)に関連するもの(原子炉設置許可申請書添付書類十での記載事項)として、

- (4) 運転時の異常な過渡変化時及び事故時の原子炉施設の安全性の確認のための安全評価において燃料に関連する評価

ここで、設計とは、燃料機械設計以外に炉心変形解析(炉心における温度分布や照射量分布に起因する炉心湾曲などの炉心の変形の解析)などによる設計を含む。原子炉施設の安全評価のうち燃料に関連する事項とは、運転時の異常な過渡変化時の判断基準のうち燃料に係るもの(燃料許容設計限界の維持)及び事故時の判断基準のう

ち燃料に関連するもの(燃料破損の考慮)を意味する。

2. 燃料技術基準の内容

以下の事項を確認することである。すなわち、安全設計に関連して、

- (1) 燃料系統の損傷が燃料健全性を阻害するほど深刻ではないこと(燃料健全性の維持)
- (2) 燃料系統の損傷が制御棒挿入経路を阻害するほど深刻ではないこと(制御棒挿入経路の維持)
- (3) 燃料系統の損傷が冷却可能な形状を阻害するほど深刻ではないこと(冷却可能な形状の維持)

安全評価に関連して、

- (4) 運転時の異常な過渡変化が起こっても、炉心は通常運転に復帰できる状態に維持されること(燃料許容設計限界の維持)
- (5) 事故が起こっても、炉心の損傷の恐れがないことおよびFPの放散が抑制されること(燃料破損の考慮)

ここで、「燃料系統」とは、炉心燃料集合体、ブランケット燃料集合体および制御棒案内管をいう。「燃料系統の損傷」とは、燃料系統において応力や変形等が生じる状態をいう。「燃料健全性の維持」とは、被覆管の破損(燃料要素で漏洩が生じ、FPのバリアが破壊された状態)及び過度の寸法変化(原子炉での使用に耐えない程度に変形した状態)が生じないことをいう。「燃料許容設計限界の維持」とは、運転時の異常な過渡変化が生じたとしても、炉心が通常運転に復帰できる限界の維持に対応する。「燃料破損の考慮」とは、事故時には燃料破損は許容されるが、破損本数や破損規模は放射線による敷地周辺への影響を過小評価しないよう考慮することをいう。

上記の事項を確認するための燃料設計基準(評価項目および判断基準)が必要となる。燃料技術基準においては燃料設計基準を、(1)~(3)が燃料系統の損傷に関連することからこれらをまとめて燃料系統の損傷とし、(4)、(5)が異常時の燃料破損に関連することからこれらをまとめて異常時の燃料破損として、2つに区分する。

(1) 設計評価項目

燃料設計・安全評価の目的および評価項目に相当する損傷(破損)モードとの対応関係を第1, 2表に示す。

(2) 判断基準

判断基準として、要求事項、解釈および具体的な判断基準を考慮する。要求事項とは、基本的に要求される事項であって燃料仕様や使用条件が変化したとしても基本的には変わらないと考えられる範囲のものに対応している。解釈とは、要求事項に関する説明および具体的な判断基準と対比すべき評価結果を導出する際に考慮すべき照射挙動等の事項に対応している。具体的な判断基準とは、要求事項を具体化したものである。具体的な判断基準(数値)は申請者(事業者もしくは設計者)によって個別

第1表 目的と評価項目(損傷モード)との対応

燃料設計・安全評価の目的	評価項目(損傷モード)
1)燃料健全性の維持	i)各種の応力・歪による過大な変形による破損 ii)PCMIによる破損 iii)燃料過熱による機械的破損 iv)プレナムガス内圧による被覆管クリープ損傷 v)被覆管疲労損傷 vi)擦り痕による被覆管破損 vii)冷却材沸騰による被覆管焼損 viii)過大な加速度による過度の変形
2)制御棒挿入経路の維持	i)温度、照射、荷重による燃料集合体の変形 ii)地震時の燃料集合体の変形
3)冷却可能な形状の維持	i)温度、照射、荷重による燃料要素の変形 ii)BDI*による冷却材流路変形 iii)燃料集合体浮き上がりによる冷却能力低下 iv)地震時の燃料集合体浮き上がりによる冷却能力低下

*BDI(Bundle-Duct Interaction：燃料要素束とラッパ管との相互作用)

第2表 目的と評価項目(破損モード)との対応

燃料設計・安全評価の目的	評価項目(破損モード)
4)燃料許容設計限界の維持	i)LOF型事象およびTOP型事象時のプレナムガス内圧による被覆管の機械的破損 ii)LOF型事象時の冷却材沸騰による被覆管焼損 iii)TOP型事象時の燃料溶融による被覆管の機械的破損
5)燃料破損の考慮	i)燃料取替取扱い中に燃料移送ポットが破損し冷却能力不足による被覆管破損

に定められるべきものでありその妥当性を規制側が確認する。ここでは、それぞれの評価項目に対する要求事項のみを第3表に示す。

IV. 最後に

原子炉施設の安全設計・安全評価については、基本的な要求事項が「安全設計審査指針」、「安全評価審査指針」に示されている。JNESではこれらを踏まえて、燃料に関する各要求事項の相互の関係について燃料の機能と対応する安全要求という観点から、原子炉施設の安全設計・安全評価と燃料設計との関係を整理した。その結果を踏まえて高速増殖炉燃料技術基準の基本的考え方を提

案した。提案した技術基準の基本的考え方では燃料設計が取り扱うべき範囲と内容を明確に示した。また、こ

第3表 評価項目に対する要求事項

評価項目	要求事項
各種の応力・歪による過大な変形による破損	被覆管および燃料集合体に生じる応力・歪を燃料の健全性が維持される範囲に保つこと
PCMIによる破損	燃料ペレットと被覆管の相互作用によるPCMI破損を防止すること
燃料過熱による機械的破損	燃料過熱によって被覆管が機械的に破損しないこと
プレナムガス内圧による被覆管クリープ損傷	被覆管の累積クリープ損傷を燃料の健全性が維持される範囲に保つこと
被覆管疲労損傷	被覆管の累積疲労サイクルを燃料の健全性が維持される範囲に保つこと
擦り痕による被覆管破損	被覆管の擦り痕を燃料健全性の維持が可能な範囲に保つこと
冷却材沸騰による被覆管焼損	冷却材の沸騰によって被覆管が焼損しないこと
過大な加速度による過度の変形	輸送・取扱い時に過大な加速度が加わることによる変形を燃料健全性の維持が可能な範囲に保つこと
温度、照射、荷重による燃料集合体の変形	燃料集合体の変形を制御棒が挿入可能な範囲に保つこと ここで、「制御棒が挿入可能な範囲」とは安全解析で仮定した能力(挿入時間等)を下回ることがないことである。
地震時の燃料集合体の変形	燃料集合体の変形を制御棒が挿入可能な範囲に保つこと ここで、「制御棒が挿入可能な範囲」とは安全解析で仮定した能力(挿入時間等)を下回ることがないことである。
温度、照射、荷重による燃料要素の変形	燃料要素間の流路の変形量を冷却可能な範囲に保つこと
BDIによる冷却材流路変形	燃料要素間隔を冷却可能な範囲に保つこと
燃料集合体の浮き上がりによる冷却能力低下	燃料集合体が有意に浮き上がらないこと
地震時の燃料集合体の浮き上がりによる冷却能力低下	燃料集合体が有意に浮き上がらないこと
LOF型事象およびTOP型事象時のプレナムガス内圧による被覆管の機械的破損	プレナムガス内圧による被覆管クリープ損傷に起因する破損が起らないこと
LOF型事象時の冷却材沸騰による被覆管焼損	冷却材の沸騰に伴う被覆管の過熱による焼損が起らないこと
TOP型事象時の燃料溶融による被覆管の機械的破損	燃料溶融による被覆管の機械的破損が起らないこと
燃料取替取扱い中に燃料移送ポットが破損し冷却能力不足による被覆管破損	燃料取扱い時における燃料破損時の破損本数および破損状態を過小評価しないこと

で提案した技術基準の基本的考え方は高速増殖原型炉「もんじゅ」燃料を対象に検討したものである。今後、「もんじゅ」燃料の高度化や高速増殖実証炉計画があることから、それらを見据えた検討に取り組んでいる。また、ここで述べた基本的考え方は軽水炉燃料にも適用可能と考える。

最後に、高速炉および軽水炉の燃料設計や炉心安全評価の専門家の方々から意見を頂ければ幸いである。

本報告を作成するに当たり、原子力安全基盤機構内に設置した高速炉燃料技術基準検討会のメンバーである関本東工大教授(委員長)、石野東大名誉教授、岩田東大大学院教授、西口神奈川工科大教授、山中阪大大学院教授から貴重な意見を頂戴した。また、日本原子力研究開発機構、電力中央研究所をはじめ国内関係メーカーの高速炉燃料の専門家の協力を頂いた。ここに厚く感謝の意を表します。

—参考資料—

- 1) Standard Review Plan, USNRC, NUREG-0800(Rev. 3 March 2007).
- 2) ASN web site (<http://www.asn.fr/>).
- 3) N. Nakae, T. Baba, K. Kamimura, "Basis of Technical Standard on Fuel for Sodium-Cooled Fast Breeder Reactor," To be published in *J. Nucl. Sci. Technol.*
- 4) USANS, "General safety design criteria for a liquid metal reactor nuclear power plant," published by the American Nuclear Society, ANSI/ANS-54.1-1989, (1989).

著者紹介

中江延男(なかえ・のぶお)



(独)原子力安全基盤機構, 東京工業大学(専門分野)核燃料工学, 高速炉燃料設計, 高速炉および核燃料サイクル

馬場利和(ばば・としかず)



(独)原子力安全基盤機構(専門分野)軽水炉燃料設計, 燃料安全規制, 軽水炉燃料安全研究

上村勝一郎(かみむら・かついちろう)



(独)原子力安全基盤機構(専門分野)燃料安全規制, 燃料国際基準化, 燃料安全研究



Asian Nuclear Prospect (ANUP)-2010に参加して インドの基礎基盤技術の蓄積と実用高速炉開発が現実

東京大学 田中 知, 電力中央研究所 井上 正, 東京工業大学 池田泰久

2010年10月9～14日までインドのマハーバリプラムで開催された ANUP-2010の会議の概要をまとめたものである。インドの原子力開発、特に高速炉開発はかなり進展している。ロシアやフランスも着実に研究開発を進めており、いずれも2020年代にプラントの運転を目指している。各国とも基礎研究から実用化開発を実施あるいは計画している。それに対し、日本の次世代再処理と高速炉の技術開発はどの方向を目指しているのかが明確ではない。原子力先進国から脱落する可能性は？今一度、燃料サイクルの技術開発について考え直す時期ではないだろうか。

本会議の概要

再処理・リサイクル部会が立ち上げ、2008年10月に神戸で第1回を開催したアジアの核燃料サイクルの国際会議 (Asian Nuclear Prospect: ANUP) の第2回が、インドの南西部チェンナイ南方のマハーバリプラム (マーマラップラム) で10月10～14日開催された。

参加者約360名、海外参加者はフランス、ドイツ、米国、ロシア、中国、韓国、日本などから約50名。日本からは当学会副会長田中 知はじめ15名が参加した。インドの First Breeder Test Reactor (FBTR) の25周年記念式典と Prototype Fast Breeder Reactor (PFBR) のお披露目を兼ねて盛大に開催された。インド、ロシアなどの FBR の研究開発の進捗と日本の FBR 研究開発の停滞が極めて対照的であった。また、フランス、EU、米国の着実な基礎研究の推進も注目された。一方、日本は「もんじゅ」の再立ち上げをアピールできず、燃料交換機のトラブルが強調されて、負の印象を与えたこと、また六ヶ所再処理工場の操業が2年延期したことを説明せざるを得ず、日本の核燃料サイクルの構築の遅れを印象付ける結果となったことは非常に残念であった。

また、今回は IAEA が共催になりサポートしたが、アジア地域において原子力の導入を希望しているインドネシア、ベトナムや今後、導入を検討するであろうマレーシア、タイなどの参加が全くなかったのは惜まれる。

会議冒頭ではインド原子力学会、前会長と前々会長が挨拶し、インド原子力学会がこの国際会議へ力を入れていることがうかがえた。午前中前半は、プレナリーがあり、その後、テクニカルセッションが2つに分かれて行われた。ウラン採掘のフロントエンドから再処理・バックエンドまでテーマは広きにわたり、原子力の持続的な成長と高速炉開発に焦点が絞られていた。特に開催国の

インドと BN-800 などに振動充填燃料を装荷する高速炉開発を推進するロシアの積極性は目を見張るものがあった。韓国も乾式再処理を中心に高速炉開発を推進する姿勢がうかがえた。

各国の FBR 開発状況

フランスは軽水炉トリウム燃料の使用と2020年からの高速炉のパイロットプラントの建設 (ASTRID 計画) など積極的な姿勢をアピールした。特に、ASTRID 計画では第4世代炉とマイナーアクチニド (MA) 含有燃料製造施設、その燃料のリサイクル施設を2020年頃に稼働させるとして、本年9月に数百億円の設計費を計上したことが報告された。これが実現すれば次世代原子炉システム、MA 含有燃料サイクルの開発の中心となっていくことが予想できる。米国は政権交代の影響が色濃く示されたが、基礎研究を地道に続ける姿勢が示された。

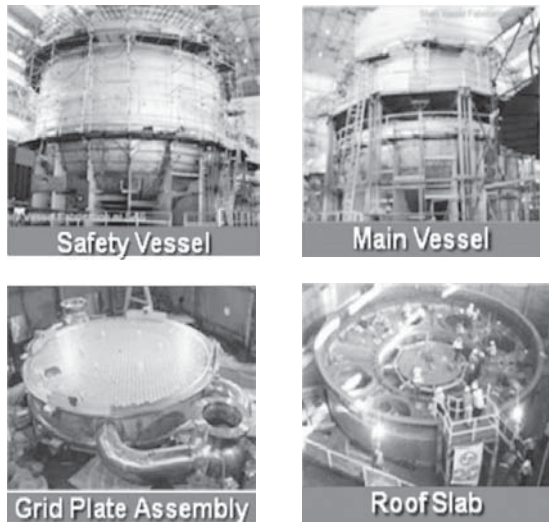
日本は、「もんじゅ」やその後の研究開発のシナリオが明示されず、高速炉や核燃料サイクルを推進する積極的な姿勢・ビジョンを打ち出せなかった感がある。残念ながら何人かの出席者からは、日本は15年前と話していることが変わらないとの印象をもちられることもあった。

インドの開発状況

最終日には FBTR と PFBR、そこで用いる要素技術開発のサイト見学があった。インドは高速増殖試験炉 (FBTR、熱出力40 MWt) を順調に25年運転した経験をもとに PFBR の建設を行っており、それが最終段階に入っている。現場では、上部から炉容器を覗くことができ、まさに炉内に隔壁 (高温プレナムと低温プレナムを隔離する半径方向の壁) の溶接作業が行われていた。第1図に PFBR の炉安全容器、主容器やルーフスラブの製作の状況を示す。また第2、3図には伸びを逃す独自の設計をした蒸気発生器の概念図とその中の配管の組立ての状況を示す。既報¹⁾にもあるように、2011年臨界、2012年商業運転を予定している。引き続き2012年からは同型、同出力の twin (2基) のプラントの建設に掛かり、さらにその後も、twin プラントを計画している。

ANUP 2010: 2nd International Conference on Asian Nuclear Prospect: Satoru TANAKA, Tadashi INOUE, Yasuhisa IKEDA.

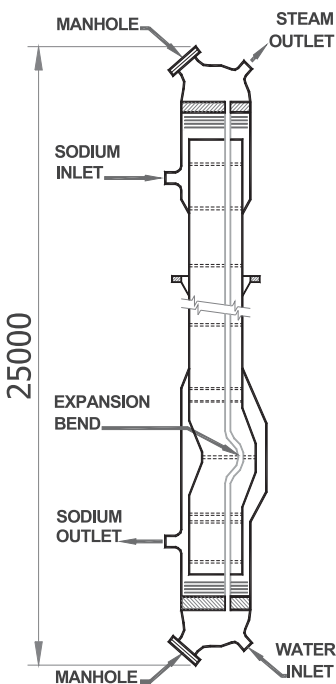
(2010年12月1日 受理)

第1図 PFBRの建設状況²⁾

次にサイクル技術に関して紹介する。現在稼働している加圧水型重水炉(PHWR)再処理工場は Trombay で30 t/yのプラントが1964年に運開, Tarapur に100 t/yのプラントが1975年に, Kalpakkam に100 t/yのプラントが1998年に運開している。これをみても我が国と異なり, 10, 20年に一プラントを建設することで着実に技術

蓄積を図っている。また, ガラス固化技術についても現在, Trombay と Tarapur の2か所で運転中であり, 現在, 3か所目の施設を Kalpakkam に建設している。

高速炉サイクル技術についても, 過去20年にわたって化学プロセス, 装置開発, 安全性について開発を行ってきて, 2003年にパイロット施設(CORAL)の運転を開始した。FBTRで, 155 GWd/t 燃焼したPuを70%含む炭化物燃料を2年冷却後再処理し, このほかFBTRで使った各種の燃料を再処理したことで, 高速炉再処理技術の可能性が実証できたとしている。この実績を踏まえ, PFBR用の使用済み燃料再処

第2図 PFBRの蒸気発生器²⁾

第3図 蒸気発生器内の配管

理実証施設を建設(この1, 2年に着手の模様)することである。また, インドはFBR燃料の第2段階として金属燃料を使うことを予定しており, FBTRの次サイクルから金属燃料(Puを含む3元燃料)を照射する。この燃料の乾式再処理用にパイロット処理施設を2014年に建設を始め, 2017年からホット試験に着手する計画である。インドの原子力開発が基礎研究から装置開発まで幅広く技術開発をしていることを印象づけた。

会議の印象

このような中, 筆者たちが本会議に参加した印象は, フランスは中国の800トン規模の次期再処理工場の建設協力の契約を締結するなど, 世界でのプレゼンスを含め先頭を走っており, インドは高速炉やそのサイクル技術など一部実用化も目前である。インドにはこれらの技術の実用化のための材料開発, 検出技術開発, 検査技術開発, 炉システムの熱流動試験など自前で開発しており, 技術基盤が着実に蓄積されていることを感じる。さらに, 研究開発機関である Indira Gandhi Centre for Atomic Research (IGCAR)と建設企業体が一体となって推進しており, 技術開発力, マインドとも大きな勢いを感じられる。このような中, 我が国では(FaCTにあるような)小型化, コストダウンのための革新技術の概念ばかり追い求め, インドに見られるような基礎, 基盤となるベース技術の蓄積も現在ではかなり低下しており, 技術開発基盤の薄さが露見している。今回の発表や見学を通して, 我が国の技術開発の大幅な遅れを感じるとともに, 開発速度も速くない中, 今後, 高速炉やそのサイクル技術開発, 戦略やシナリオをどうするのか, どうしていくのか, 大きな課題を突き付けられた感を強く抱いた次第である。

来年9月に名古屋で開催されるGLOBAL 2011で日本がどう戦略的にプレゼンテーションをするべきかを考える良い機会にしたい。

インドの印象

とはいえ, チェンナイからマハーバリプラムへの道路やマハーバリプラムの街にはまだ, 裸足の人や物乞いの人が多く見られ, PFBRの最先端の技術とのアンバランスが極めて印象的であった。特に, ANUPが開催されたホテルやIGCARは欧米のシステムが整えられているのに対し, 一歩, 街へ出ると極めて貧しい状況は, タク自動車やIT企業などの先進企業と社会状況が異次元であると感じた。

—参考文献—

- 1) 日本原子力学会誌, 52[9], 536(2010).
- 2) B.Raj, "Fast reactor programme in India", ANUP 2010, (2008).

講演

国際的な不拡散・保障措置・核セキュリティの動向 我が国の果たすべき役割についての考察のきっかけとして

文部科学省 木村 直人

原子力エネルギーの有用性が見直されてきた、いわゆる原子力ルネッサンスのただ中で、昨年、オバマ大統領が行った核セキュリティに関する演説は、その後、大きなうねりとなり、世界を動かしていった。世界的な核不拡散・核セキュリティ体制強化の流れの中で我が国がどのように取り組んできているのか、核セキュリティサミットの開催に代表される世界の動きを俯瞰しながら、本分野における我が国の最新の政策動向を解説する。

I. はじめに

温暖化問題や世界のエネルギー事情を解決する有力な手段として、近年、原子力エネルギー利用が見直され、導入に向けた動きが進みはじめるという、いわゆるルネッサンスを迎えたという声もある一方で、原子力利用の拡大に伴う核拡散の懸念を述べる見方もある。このような中で、原子力の平和利用に徹してきた我が国において、主に科学技術の視点から核不拡散や核セキュリティ対策を担当している筆者から見た、この分野を巡る世界の動向について報告する(本稿は、日本原子力学会「2010年秋の大会」での講演内容に基づくものである)。

II. 核セキュリティサミット

2009年4月のオバマ大統領によるブラハ演説から始まった核セキュリティ強化への政治レベルでの大きな流れは、オバマ自身が提唱した核セキュリティサミットの開催に向かって世界各国を巻き込んでいった。2010年4月に開催された同サミットは、47か国および3国際機関の代表を集め、活発な議論が行われた。サミット終了に際し、核テロ対策の強化に向け、今後取り組むべき措置等について記したコミュニケおよび作業計画が採択された。なお、次回のサミットは、2012年に韓国で開催することになった。

我が国代表として出席した鳩山総理(当時)は、非核兵器国の道を進むことが唯一の被爆国としての我が国の道義的責任であると考え、核廃絶の先頭に立ってきたことを述べるとともに、核テロ防止に貢献するためのイニシアティブとして、アジア諸国を始めとする各国の核セ

The Recent International Trends in Nuclear Non-proliferation, Safeguards, and Nuclear Security: Naohito KIMURA.

(2010年 10月12日 受理)

コミュニケの概要(本文)

1. 核兵器に使用されている核物質を含むすべての核物質および原子力施設に対する効果的なセキュリティの維持については、国家の基本的責任を確認。
2. 核セキュリティの向上のため、国際社会として協調的に作業し、必要に応じて支援の要請および提供を行うよう要請。
3. 高濃縮ウランと分離プルトニウムには特別な予防措置が必要。技術的・経済的に実行可能な場合における高濃縮ウランの使用最小化を奨励。
4. 既存の国際約束の完全履行奨励。未参加の国際約束へ早期加入に向けて行動。
5. 核物質防護条約および核テロ防止条約を支持。
6. IAEAの重要な役割を再確認。IAEAの核セキュリティに関する活動の実施に必要な資源等を確保するよう行動。
7. 国連および核テロ対抗グローバル・イニシアティブ等の貢献を認識。

キュリティ人材育成のためのセンター(「核不拡散・核セキュリティ総合支援センター」)の設置や、核物質計量管理の高度化に資する測定技術や不正取引等された核物質の起源の特定に資する核検知・核鑑識技術の日米研究協力の開始を発表した。

III. NPT 運用検討会議

NPT(核不拡散条約)運用検討会議は、1970年の発効以来25年が経過した1995年に、条約の無期限延長が決定して以来、5年に1回開催されている。前回(2005年)の会議では、議題の設定の段階から途上国の反発により対立が起り、実質事項に関する合意文書を採択すること

ができなかった。このため、今次2010年会議においては、何らかの成果を残さなければいけないという雰囲気が全体に流れる中での議論が進められた。主な争点は、新たな核軍縮措置、地域の核問題の取扱い、NPT 脱退問題、IAEA 追加議定書の普遍化・標準化などであった。

今次会議では、前回できなかった最終文書のコンセンサス採択など、一定の評価ができる部分はあるものの、イラン問題への言及がない。条約の遵守・脱退に対しての言及が弱いなどの指摘もあり、NPT 条約自体の有効性の検証も含め、次回検討会議に向けての課題はまだまだ

NPT 運用検討会議の最終文書における主要点 (核軍縮)

- ・2000年の核軍縮に関する「明確な約束」を再確認
- ・核兵器の使用における国際人道法等の遵守の必要性を再確認
- ・不可逆性、検証可能性および透明性の原則の確認
- ・2014年の運用検討会議準備委員会へ核軍縮の進捗報告
- ・核兵器国による標準化された定期報告の様式に関する迅速な合意を奨励
- ・軍縮不拡散教育に関する国連事務総長勧告の実施を奨励

(核不拡散)

- ・北朝鮮に、2005年の六者会合「共同声明」で求められている義務の履行等を強く要請
- ・追加議定書未締結国に対して、締結奨励
- ・IAEA が各国の国内計量管理制度整備を支援することを奨励

(平和利用)

- ・IAEA の活動に対し、今後5年間で1億ドルの追加拠出を奨励
- ・原子力発電を含む原子力エネルギーの開発にあたり、保障措置、原子力安全および核セキュリティへのコミットメントおよび実施の確保
- ・核燃料サイクルに関する多国間アプローチについての議論をIAEA の場で継続

(その他)

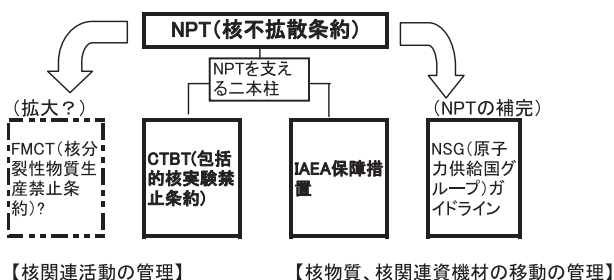
- ・中東決議の実施に関して、2012年の国際会議開催を支持

が多いと考えることが適当であろう。

IV. 保障措置を巡る議論

保障措置については、NPT の実効性を担保する上で重要な手段である。我が国は1977年からIAEA の保障措置を受入れ(包括的保障措置協定:CSA)、国内原子力施設において査察などの保障措置活動が行われている。一方で、イランや北朝鮮の核開発問題で顕在化したように、これまで実施されてきた申告ベースの保障措置活動では、申告せずに秘密裏に実施されている原子力活動を検証できないという弱点がある。このため、1997年には追加議定書(AP)という形でIAEA にさらなる権限を与え、原子力施設以外の施設への立入りを認める補完的アクセスという概念と核物質の計量管理に留まらず、研究開発活動の内容や輸出入情報など、より幅広い情報を申告することを国に求める拡大申告の制度が導入され、我が国をはじめ実施に移されている。AP については、保障措置の標準であると先進国側は常に主張する一方で、途上国は、AP は自主的に受入れを判断するものであると反論しており、常に議論は紛糾している。

我が国は、核兵器国以外で唯一民生用の核燃料サイクル施設を保有している。このため、プルトニウムをはじめ、扱う核燃料の量も膨大なものになると同時に、IAEA の査察資源の最大の消費国でもある。このため、IAEA は懸念国に対して役割を果たすべきだとする国々からは、IAEA の資源削減のための取組が要請されている。さらに、大量のプルトニウムを保有していることから、海外からは疑念を持たれる可能性があることは常に忘れてはならない視点であろう。実際、報道では、9月のIAEA 総会において、イランが我が国の保有するプルトニウムについて懸念を示すなどの動きもある。一方で、我が国は、2004年に申告された核物質について核兵器への転用の兆候はなく、未申告の核物質や原子力活動もなく、国全体として原子力活動が平和裡に実施されているというIAEA からの評価(拡大結論という)を得て以来、統合保障措置の段階に移行した。従来の保障措置は、施設を対象に査察などの立入りなどが行われており、その査察業務量は非常に膨大なものであったが。統合保障措置は、複数の施設(サイト)をまとめて一つの施設と見なして保障措置を適用することにより査察の頻度を減少させるサイトレベル保障措置への移行作業が順次進んでおり、究極的には国を一つのサイトとして保障措置を適用する国レベル保障措置への移行を目標として我が国とIAEA 側で協議を進めている。これにより、相当程度のIAEA 査察量が減るとともに、減らした資源を他の懸念国向けの査察などへと有効利用することが可能になることが期待されている。



V. CTBT(包括的核実験禁止条約)と FMCT(核分裂性物質生産禁止条約)

CTBTは、NPTの実効性を担保する上でのもう一つのツールである。残念ながら、発効には米国、インド、パキスタン等の批准が必要であり、現在、発効の目処は立っていない。本条約は、地下核実験を含むすべての核実験を禁止することを目的として1996年に採択されたものであり、我が国も1997年に批准している。条約の遵守を検証するための国際監視制度や現地査察からなる検証制度を設けており、我が国も日本原子力研究開発機構(JAEA)や日本気象協会が国際監視制度に基づく観測所(放射性核種、地震など)を設置し、CTBT体制の強化に貢献している。

多くの途上国が求めている核兵器の廃絶が究極の目標だとすると、この目標と現在のNPT体制との間に位置すると考えられるものが、FMCTである。今次NPT運用検討会議においては、CD(軍縮会議)においてFMCTの交渉を直ちに開始すべきことに合意すると同時に、核兵器国が、軍事目的には不要としたすべての核分裂性物質のストックをIAEAに申告するよう奨励するなど、一定の前進は見られたが、今後の交渉開始には予断を許さない。また、核兵器国のうち中国を除く4カ国は生産モラトリアムを実施しているが、中国はこれに反対しているという状況についても留意する必要がある。

VI. その他の論点

1. 経済発展と不拡散政策のバランス

今後、我が国が経済的に発展していく上で、我が国の技術、製品の輸出による市場の拡大を図っていくことは重要な課題である。原子力分野においても、これまで平和利用を進めてきた我が国の技術と経験を世界展開に展開し、新規導入国のニーズや国際社会の要請に応えると同時に、核不拡散・セキュリティ体制の強化に貢献していくことが必要である。現在、原子力発電技術を世界で有するのは我が国企業を中心に4社(日立・GE、東芝・ウェスティングハウス、三菱重工・AREVA連携、ROSATOM)であるといわれている。このような現状の中、原子力ビジネスを展開しようとする我が国が果たすべき役割と責任には非常に重いことを自覚しなければならない。このため、ただハードを売るだけではなく、原子力安全、核不拡散、保障措置、核セキュリティにかかる「人材・技術」をプラントとともにトータルパッケージとして提供していくことが核不拡散・核セキュリティ体制を構築すると同時に、地域のエネルギーの安定供給を可能とする上で有効であり、我が国はオールジャパン体制を組んで推進することとしている。文部科学省では、「核不拡散・核セキュリティ総合支援センター」を設置し、アジア地域を中心とした原子力導入国を対象とし

て、核不拡散や核セキュリティに関する人材育成プログラムを提供すべく現在準備を進めているところである。

原子力関連の物資や資機材を二国間でやりとりするに当たっては、二国間協定を締結して、我が国から輸出された物資などが平和目的以外に利用されないように担保することが必要である。さらに、我が国は原子力供給グループ(NSG)により策定されたガイドラインに基づいて原子力関連資機材・技術の輸出管理を行い、核拡散を防止している。我が国は既に欧米の先進国をはじめとして二国間協定を結んでいるが、上述した状況の中で、資源国や原子力発電の導入を意図している国との協定締結の動きが進んでいる。カザフスタン、ヨルダンや、ベトナム、インドなどとの協定交渉がこれに当たる。ここで、留意しなければいけない点は、特に非NPT国家との原子力協力協定である。インドはNPT条約に加盟していない実質的な核兵器国であり、IAEAによる保障措置も一部の施設においてしか実施されていない状況にある。この中で我が国から移転された核物質や資機材が平和利用を確実に担保されているということを常に確認できるよう留意しなければならないことは自明の理である。今後も、非NPT国家との協力のあり方について議論は絶えないだろう。

また、今後、原子力分野における日韓関係の強化も重要な課題である。現在、協定交渉が進められているが、1991年に締結された朝鮮半島の非核化に関する共同宣言の中で、韓国は濃縮・再処理施設の保有をしないことをうたっており、協定中に関連技術の移転に関連する規定を盛り込むか否かは、様々な側面からの検討が必要であろう。ちなみに、先に協定が成立している米韓協定(現在改定交渉中)については韓国に移転された核物質を再処理することについて、米国は韓国への同意を与えていない。一方で、韓国は使用済燃料を発電所サイト内に貯蔵している状態が続いており、特に再処理へのニーズは高いことが想像される。現在、米韓の間でも厳しい交渉が続いていると仄聞するが、朝鮮半島を巡る情勢、東アジアを巡る情勢、さらにインド、パキスタン、中東までをにらんだ情勢分析の中で、米韓協定改定交渉がどのような結末を迎えるのかは注目に値する。

2. 核鑑識技術の開発

核物質の不法盗取などが年々増大してきており、核テロの脅威が増大している中、これを抑止する手段が求められている。核鑑識の技術はこれを実現する一つの有望な手段である。核鑑識は、核物質の同位体比や含まれる不純物を分析することにより、それが作られた産地や時期を特定することにより、抑止効果をもたらそうとするものである。我が国は、3年後を目処に一定の成果を上げるべく、ウランやプルトニウムの年代測定技術、同位体測定技術、粒子形状および不純物分析に必要な技術開発を行う。また、核鑑識を有効に実施させるためには、

核物質の属性を特定可能とするデータベースの構築が最大の課題である。一部の国では既にデータベース整備が行われているが、情報の機微性やフォーマットの違いなどにより相互利用が可能な段階に至っていない。我が国も、まずは国内施設などの核物質のデータベースを構築し、将来的には国際的な核鑑識ネットワークへの貢献を目指すこととしている。いうまでもないが、核鑑識は犯罪捜査手法の一つであり、その実施は捜査機関に委ねられることになる。本年10月には我が国でも国際ワークショップを初めて開催し、今後の核鑑識技術開発の国際協力による進め方について議論が行われたところである。

3. 研究炉燃料の低濃縮化に向けた取組み

中性子の利用を目的とする研究炉の燃料については、これまでウラン濃縮度90%程度の高濃縮ウランが用いられてきたが、核兵器への転用が容易なこともあり、転用が困難な濃縮度20%未満の低濃縮ウランを研究炉に使うべきであるという政策(地球的規模脅威削減イニシアティブ：GTRI)が米国の政策として進められている。我が国はこの政策に協力し、日本原子力研究開発機構や大学の研究炉で使用していた米国起源の高濃縮燃料の一部について、米国への返還を行うとともに、低濃縮ウランを燃料とする炉への設置変更などを行ってきている。なお、研究炉はその規模が小さいことなどから教育訓練用に非常に取扱いが容易であるという特性がある。こういった特性を活かす上で、一定規模の濃縮燃料が必要な研究炉があることには配慮が必要であろう。

4. 燃料供給保証

燃料供給保証に関しては、2003年のエルバラダイIAEA事務局長(当時)の提唱をきっかけとして議論が盛んとなり、複数の提案が並び立つ状況の中、ロシアの提案した国際ウラン濃縮センター構想と米国NTIが提案したIAEA核燃料バンク構想が実現に向けた動きを示している。燃料供給保証はもともと濃縮・再処理を放棄した国に対して核燃料の供給を保証しようとしたものであったが、これは原子力利用の奪い得ない権利の剥奪を意図するものであるという途上国側の強い反発の中、核燃料サイクル建設を選択しなかった国への支援としての燃料供給の保証という言い方へと緩やかにシフトしてきている。

我が国は、昨年の日米首脳の共同声明の中で「核燃料供給保証を含む民生原子力協力のための新たな枠組みを推進する方法の探求に取り組む。また、揺りかごから墓場までの核燃料管理がこの枠組みの重要な要素の一つとなりうることにつき一致する。」ことがうたわれており、この方向に沿って、フロントエンドのみならず、バックエンドに至るまで平和利用が担保されるべく積極的に枠組み構築に参加していくことが必要であろう。

Ⅶ. 学会の果たす役割の重要性

このような状況の中で、我が国は、経済成長や環境・エネルギー問題の解決といった視点と核不拡散のリスクを最小化するというバランスのとれた、原子力利用の推進をモットーに掲げ同時に、これを推進してきたところである。

しかしながら、残念なことに、核不拡散という理念と実施に講じられるべき政策をトータルパッケージとして考えられることのできる人材が我が国にはほとんどいないのが現状である。したがって、今後、本分野における教育、特に高等教育の果たす役割は非常に大きいものがある。現状を俯瞰的にフォローしながら、今後の向かうべき方向性を分析していくといった総合的な能力をこの分野で発揮できる人材の育成が急務である。文部科学省だけではなく、関連する学会の果たすべき役割も非常に大きい。核不拡散を語るものは技術のバックグラウンドを理解すべきであり、原子力技術を志すものは常に核不拡散を念頭に置かなければいけない。日本は原子力先進国であるからこそ、些細なことから国際的な批判にさらされる可能性をはらんで日々の活動を行っていることを、関係者が常に肝に銘じておく必要があるのではないだろうか。今後の核不拡散・セキュリティ教育の推進に当たって、日本原子力学会におかれても活発な活動が展開されることを大いに期待したい。核不拡散・核セキュリティを巡る話題については、ここで取り上げたものだけでもまだまだ議論を重ねる必要のあるものばかりであるし、これら以外にもまだまだ書ききれないほどの話題がある。紙面の都合で割愛せざるを得ないのは残念であるが、次の機会に譲ることにしたい。(本稿において意見にかかる部分は筆者の個人的見解であり、いかなる組織を代表したものではないことを申し添える。)

—参考資料—

- 1) 外務省 HP:「核セキュリティサミットの概要」http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kaku_secu/2010/index.html
- 2) 日本原子力研究開発機構 HP:「核鑑識に関する国際ワークショップの開催について」<http://www.jaea.go.jp/04/np/activity/2010-10-05/announce.html>
- 3) 文部科学省 HP:「保障措置について」http://www.mext.go.jp/a_menu/anzenkakuho/hoshou/index.html

著者紹介

木村直人(きむら なおひと)



文部科学省
(専門分野/関心分野) 科学技術による国際的な核不拡散・核セキュリティ問題の解決

講演

オイルピーク

正味に使えるエネルギーの今後

もったいない学会 天野 治

「原子力総合シンポジウム2010(2010年5月26日, 日本学術会議講堂)でオイルピークについて講演し, 数名の方から本質がわかったと声をかけていただいた。シンポジウムに参加されなかった皆様にもポイントをわかりやすく伝えたく, 本稿をまとめた。2006年10月に掲載された「石油の代替エネルギーをEPRから考える」でのグロスの評価から今回は正味に使える量の検討を行った。石油の可採年数は, 推定埋蔵量を現在の年間生産量で除すことで評価され, 残り42年である。本当はどうだろうか。取り出すエネルギーの少ない easy oil は既に生産ピークを迎えたことは国際エネルギー機関(IEA)も認めている。

I. 概要

石油を取り出すのに手近な石油を使うため, 正味に使える石油が減る。正味に使える石油の生産推移とその推定の根拠と信頼性も含めて紹介し, 今後の幅広い議論のたたき台としたい。

II. ラビットリミット

石油を取り出すのに, エネルギー(例えば近場の石油)がかかる。取り出す以上に, 取り出すために石油がかかるのは意味がない。これを端的にあらわしたものが, 第1図のラビットリミットである。

第2図に示すように地球には, 約9兆バーレルを超える石油があると推定されている。我々は約1兆バーレルを使った。残りは8兆バーレルである。しかし, ラビットリミットはどこか。ASPO^{a)}などの組織は, 2兆バーレルがラビットリミットとみている。2兆バーレルのうちの半分を使ったので, 石油の生産ピークを迎えたことになり, すなわちオイルピークである。ラビットリミットが2.4兆バーレルという意見もある。後述する正味のエネルギーを考えると, 2兆バーレルも2.4兆バーレルも大差のないことがわかる。

III. 石油の生成と質

石油の生成は, ジュラ紀, 白亜紀の二酸化炭素濃度が今より10倍も高く, 温度が10℃も高い時期で, 植物にとっては良い環境で100mを超える巨木が繁茂していた時期といわれている。ジュラ紀, 白亜紀は, 超大陸パンゲアがマントルの大移動に伴って, 一つの大陸から約1億年

The Peak Oil; How is the Net Energy Production in Future: Osamu AMANO.

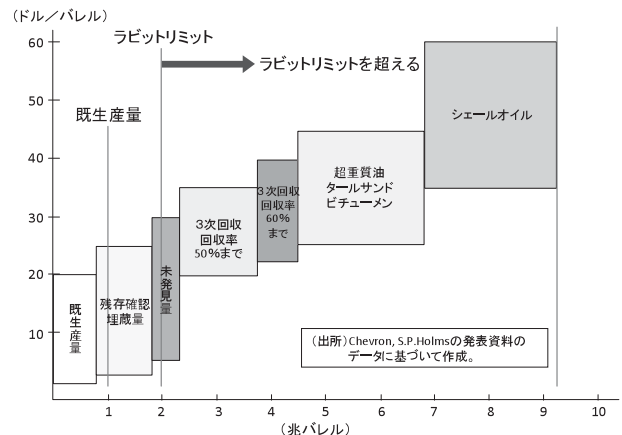
(2010年 8月30日 受理)

ウサギを捕まえるためのエネルギーが捕まえたウサギのエネルギーより大きいならば, いくらウサギがいたとしても, インディアンは生きていけない。



出典: Folke Gunther, <http://www.holon.se/folke/kurs/logexp/rabbit.shtml>

第1図 ラビットリミット



出典: 第1回 需給部会配布資料(日本エネルギー経済研究所)

第2図 地球にある石油とラビットリミット (これまではコストの観点)

以上かけて, 現在の6大陸に分割した時期でもあり, 地表では, 地震・洪水・地殻変動が繰り返し起こったと推定されている。巨木は川に流され, 東京湾のような内海

^{a)} ASPO: Association peak oil and gas, オイルピークおよびガスを考える国際的で学術的な組織でスウェーデンのウプサラ大学に拠点がある。日本に支部はないが, もったいない学会が ASPO を紹介するなど連携活動している。

に酸欠状態でヘドロ状に堆積し、石油化したものと考えられている。内海になりやすかったところ、マンツルの沈み込みのあった場所が大油田地帯である。

できた石油(液体状)は水より軽いので、どんどん上がってきて、帽子状の泥岩の下の砂岩質に蓄積する。1億年をかけて、どんどん上がってきて、その場所の圧力が高まる。この状態でボーリングすると、石油が自噴する。これが1次回収である。油層の1/4も取り出すと、圧力がなくなり、河川水や海水を大量に注入して圧力を高めて取り出す。これが2次回収である。しかし、さらに油層の1/5も取り出すと、粘性の低い石油はなくなり、ドロドロした成分になる。ドロドロ成分の粘性を下げるために、高温の蒸気や超臨界の二酸化炭素を注入してその中に溶け込ませて油分を取り出す。取り出すために多くの石油がかかり、取り出す石油は微々たるものになる。これが3次回収である。

第2図のラビットリミットを超えるのは、未発見分の一部で発見される油田は、規模が小さく、深いものになる可能性が高いため、取り出すエネルギーが増える。第2図の次の大きな量は3次回収を50%あるいは、60%まで実施した場合である。3次回収で量的にとることは可能であるが、ラビットリミットを下回るのは難しい。さらに超重質油、タールサンド、ビチューメン等は、固体状の石油である。オイルシェールはシェール岩層にしみ込んだ固体状の石油であり、石炭のように掘り出し、液体の石油として抽出するなど取り出すまでにエネルギーがかかる。オイルシェールなど地表の近くなどごく一部の条件の良いものは、ラビットリミットを下回るものもあるが、大半はラビットリミットを超える。

IV. 正味に使える石油

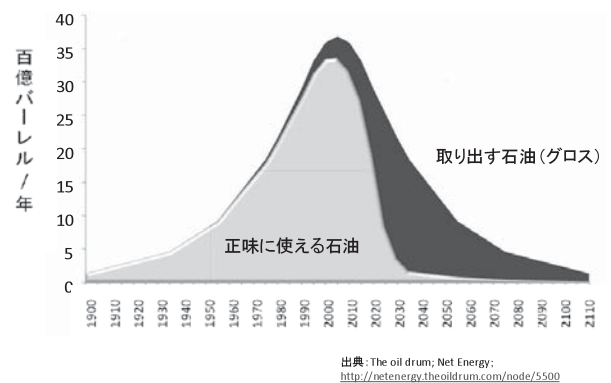
取り出す石油(出力)を取り出すためにかかる資材や運転・補修エネルギー(入力)で除したものが、エネルギー収支比、EPR(Energy Profit Ratio)である。出力と入力の差分はネット(正味)エネルギーと称する。エネルギー収支はLCA in Energyで、Life Cycle Assessment(LCA)の一つであり、二酸化炭素を評価するLCA in CO₂が有名であるが、手法、考え方は双方とも同じで、原単位が異なる。

EPRを用いて、正味に使える石油を検討すると、正味に使える石油は取り出す石油(oil out)—取り出すためにかかる石油(oil in)であらわされる。EPR = oil out / oil inであり、EPRの数値が下がると正味に使える石油の量が減少する。

米国の石油は、自噴していた時のEPRは100程度(1930年代)、2次回収初期で30程度、2000年には11に、2005年には8程度に減少している。EPRが減少することは正味に使える石油が減少することを意味する。

米国のEPRの推移をベースに正味の石油の推移を示

石油を取り出すのに、石油を使い、正味に使える石油が減る



第3図 正味に使える石油

したのが、第3図である。濃い釣鐘状がグロスの石油の生産量の推定であり、淡い色で右肩が急激に下がるのが、正味に使える石油の生産量の推移である。世界の石油の平均のEPRは20程度であるので、正味に使える石油の生産の急激な減少は米国の推定より10年から15年程度右にずれる可能性がある。しかしメキシコ湾の石油流出事故でもわかるように、石油の生産として海底下1,600mなど取り出すのに多くのエネルギーがかかることを対象にするなど、世界の石油のEPRが急激に悪くなる可能性もあり、その場合にはそれほどずれない。

V. 正味に使える天然ガス

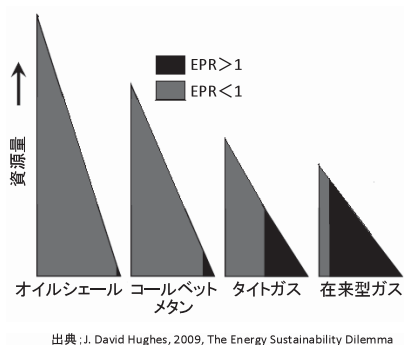
在来型の天然ガスは、石油に随伴した油田ガス、ガスだけが残ったガス田ガス、水に溶け込んだ水溶性ガスがある。これらは、気体で取り出す、液体で取り出すなど、取り出すのが容易なガスである。

米国やカナダ等は生産の拡大から非在来型の天然ガスの採掘を拡大している。非在来型はシェールガス、コールベッドメタン、タイトガスなどであり、量的には、在来型の5倍程度あるが、シェール岩や石炭層の隙間に閉じ込められたり付着したりして、非在来型ガスは気体のガスというより、固体状のガスであり、取り出すのに多くのエネルギーがかかる。高水圧や爆破で多くの割れ目を作り、その割れ目に沿って水圧をかけ、他方から水とともに取り出す。

地表表面など、条件の良いところではラビットリミットを超えるが、これらの非在来型天然ガスの大半はラビットリミットを上回る。すなわち、正味に使える天然ガス量がマイナスになる。第4図にその量と質を示すが、黒い部分がラビットリミットを下回る量である。

第3図と同じように、今後の天然ガス生産のEPRの推移予測から、正味に使える天然ガスの量を求めることができる。

カナダの国エネルギーボード(Canadian National Energy Board)のレポートを元に、1GJ(ギガジュール)の天然ガスを得るのに、かかった費用の推移を the oil



出典: J. David Hughes, 2009, The Energy Sustainability Dilemma

第4図 天然ガス資源別のEPR

drum^{b)}がまとめた。1 GJを得るのに採掘などにかかる費用を1 GJの天然ガスのコストで割ることでEPRを求めており、いくつかの天然ガス田の詳細な調査をベースにしている。その結果、カナダでの天然ガスのEPRが1になるラビットリミットは、2015年と推定されている。すなわち、カナダでの正味の天然ガスの正味の生産は2015年頃終了と予想される。この手法は産業連関表の使い方と同じであり、1997年から2005年までのデータ群を回帰分析で求め、R²は0.9038である^{c)}。

Ⅵ. ラビットリミットを下回る世界のエネルギー

ラビットリミットを超えない石油、天然ガス、石炭などの化石燃料、風力・太陽光などの再生エネルギー、原子力の供給予測を第5図に示す。この図はPaul Chefurka(カナダ)が「World Energy to 2050—Forty

^{b)} ウェブベースでオイルピーク、持続可能性、その後の社会を考えるシンクタンクで、非営利団体で米国コロラド大学に拠点がある。

^{c)} 回帰直線がどの程度データにフィットしているかを評価する指標で、1に近づくほどデータにフィットしていると判断される。

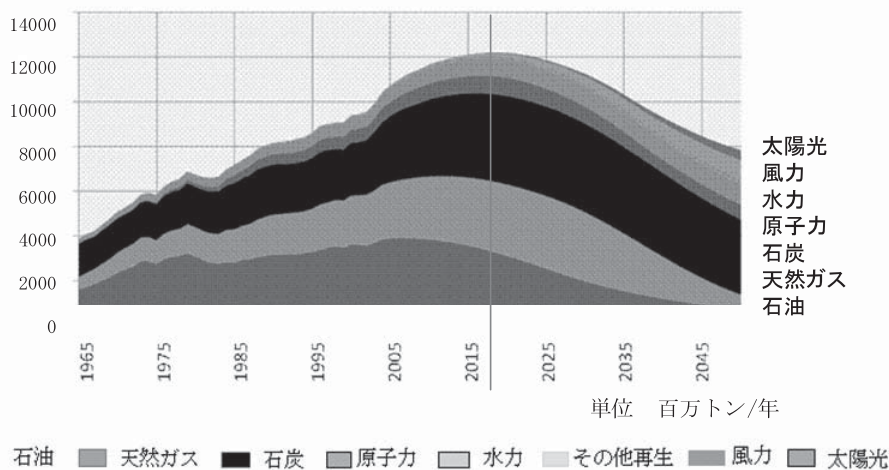
Years of Decline」で発表しているものであるが、筆者が基調講演を行った「国際会議 GLOBAL 2009(パリ)」で仏アレバ社が別の基調講演でこの図を紹介していた。

この図から、世界全体として2005年のラビットリミットを下回る、安いオイルの減少のために、天然ガス、石炭の生産を増やすが、石油の減少を補うまでにはいたらない。天然ガスの生産もそれほど増やすことはできず、2030年から急激に減少する。石炭も増産するが、2020年頃が生産のピークとなり、当面そのまま推移する。なお、この図はグロスの量であり、正味に使える量は、全体がEPRを10とすると取り出すのに1割かかり、ネットエネルギーは9割になる。

わが国では、資源の質の状況の評価のレポートが少ない。これから増えてくる非在来型の石油、天然ガスの質を理解する必要があり、その分析にEPRおよびネットエネルギー分析は有用と考える。

Ⅶ. まとめ

- (1) 石油の生成から、取り出すために、圧力の高い状態で取り出す1次回収や海水や河川水を注入して取り出す2次回収が取り出すエネルギーが少ない。
- (2) このように取り出すためにかかるエネルギーの読者への理解をたすけるために、ラビットリミットを導入した。
- (3) 石油は量的には、残り8兆バーレルあるが、ラビットリミットを下回るのは、残り1兆バーレルであり、オイルピークとなる
- (4) 正味に使える石油は、今後のEPRの低下予測により、2020年頃から激減する。
- (5) 石油の供給減少を天然ガス、石炭で補うが、ラビットリミットから考えると、量的には2020年頃から全体のピークを迎える。



今後、10年は天然ガス、石炭が主流に、2020年過ぎから全体として急激に減少

出典: Paul Chefurka(カナダ), 「World Energy to 2050 -- Forty Years of Decline」

第5図 ラビットリミットを超えない世界のエネルギー供給(グロス)予測

—参考資料—

- 1) 天野 治, “石油の代替エネルギーをEPRから考える”, 日本原子力学会誌, 48[10], 759(2006).
- 2) C. A.S. Hall, et al., *Revising the Limit to Growth after Oil Peak*, (2009).
- 3) NEA *URANIUM 2007, Resources, Production and Demand, also known as the Red Book*, (2007).
- 4) 天野 治, 石油ピーク後をどう生きるか, 愛智出版, (2010).

—著者紹介—

天野 治(あまの・おさむ)



もったいない学会理事
(専門分野)エネルギー収支分析, 燃料サイクルエネルギー分析, 人材育成

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—
(1月7日第7回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・英文誌の海外出版社との共同出版について、編集委員に行った第2回目のアンケート結果に基づき、検討を進めた。審査料として少額の課金を付すケースを支持する人が最も多かった。

- ・英文誌のインパクトファクター向上策について、検討を始めることとした。
- ・英文誌4月号のFR09特集号の進捗状況が報告された。

【学会誌関係】

- ・刊行物に関する規程、学会誌・論文誌に関する規約、投稿規定の改定案を確認し、了承された。
- ・編集委員会運営内規の見直しによる編集委員会のグループ名、記号等の変更はH23年4月から実施することにした。
- ・次年度の学会誌のページ数管理、予算について説明があった。
- ・2011年4月号～2012年3月号の表紙に採用する作品の報告があり、表紙装丁デザイン案について意見交換した。

編集委員会連絡先<<hensyu@aesj.or.jp>>

連載
講座実験炉物理：未来へのメッセージ
次世代の安全基盤の確立に向けて

第7回(最終回) 実験と解析の接点

名古屋大学 山本 章夫

I. はじめに

炉物理実験は何のために行うのであろうか？現代において、この答えを一言でまとめると、「解析手法の妥当性を検証し、解析による予測精度を向上させるため」ということになるだろう。本連載講座では、国内のいくつかの臨界実験装置において、実験炉物理に焦点を当て、その過去・現在・未来について紹介してきた。最終回は、「解析」という、ある意味では仮想的な世界における作業と、実物の原子炉が存在する実世界の接点という観点から、炉物理実験と解析技術の関係を解説し、解析技術の発展における炉物理実験の重要性について述べる。

II. 炉物理実験解析の必要性

原子炉は潜在的に危険性を秘めた装置であるといえる。そのため、開発にあたってもっとも確実なアプローチは、最終的に目標とする実機の原子炉と同一の幾何形状・組成・温度状態を再現する極低出力の臨界実験装置を用いて、その特性を詳細に把握することである。

しかし、実機炉心をそのまま模擬するためには臨界実験装置が当然ながら非常に大型になり、また、そのような臨界実験装置は特定の炉型の特性確認のみにしか使用できない。さらに、事前に精度の良い解析を行わないと、そのような臨界実験そのものに危険性が内包される可能性がある。以上の理由から、この「実験的アプローチ」だけに頼って原子炉を開発するのはきわめて効率が悪いといわざるを得ない。

したがって、安全にかつ効率よく原子炉の設計を行う

Experimental Reactor Physics "Past, Present and Future"
—Towards Establishment of Safety Basis in Next
Generation (7); Interface between Experiments and
Analysis: Akio YAMAMOTO.

(2010年 6月18日 受理)

各回タイトル

- 第1回 KUCA における炉物理実験
- 第2回 臨界安全と未臨界度測定
- 第3回 実機炉心における実験炉物理手法開発
- 第4回 NCA における臨界実験
- 第5回 JAEA の熱炉体系炉物理実験
- 第6回 JAEA の高速炉体系炉物理実験

ためには、(1)目標とする炉心の特性をよく模擬できるが、スケールは小さい臨界実験を実施し、(2)その臨界実験を解析することで核計算コードの妥当性を検証し、(3)妥当性が確認された核計算コードで対象とする炉心の解析を行う、という3段階のステップを踏むことが必要となる。原子炉の性能が設計で担保されることを考えると、臨界実験の解析を通じて解析手法の精度を確認し、必要に応じて解析手法を改良するというステップは、実機炉心の設計において不可欠なステップであるといえる。

さて、炉物理実験は核計算コードの検証を行うために不可欠なデータを提供するものであり、実験解析を通じて検証を行った核計算コードを用いて炉心の設計をするというロジックは一見、無理がないもののように見える。しかし、実際には、「核計算コードの妥当性を確認する」ことは、文章としての明瞭さとは裏腹に、それほど自明なことでもない。

例えば、軽水炉のウラン燃料を装荷する炉心を設計することを考えよう。では、この設計に用いる核計算コードは、どのような炉物理実験の解析を行い、精度を検証すればよいのであろうか？均質ウラン水溶液系における臨界実験の解析結果が良くあっていたら問題ないといえるのだろうか？(使用している核燃料物質は同じである)それとも、高濃縮ウランの板状燃料の臨界実験ではどうだろう？(濃縮ウランの非均質燃料という点では同じである)ウラン燃料棒を使用した小型炉心では？(燃料棒を使用する点では同じ)。

結局のところ、実験がどの程度対象とする炉心の核特性を模擬しているのか、言い換えると、実験の解析を行うことで、どの程度実機炉心における予測の不確定性を低減できるのか、ということを引きちんと検討しないと、この問題には決着がつけられないことがわかる。

さて、実機炉心の起動時に実施する炉物理試験では、炉心核計算コードで予測した解析値を試験結果と照らし合わせることにより、予測値の妥当性を確認する。調べてみれば臨界実験などの解析で「演習し、実力をつけたあと」、本番の試験(炉物理試験)を受けるようなものであり、なおかつ確実に「優」をとる必要がある。ちなみに「不可」だと設計の見直しとなり、原子炉の運転に支障が

生じる。また、「良」「可」であっても、設計手法の改良が検討事項になることもある。学生時代に単位の取得に悩んだ方は、このような状況がいかに大変であるか、おわかりいただけると思う。炉心設計は毎サイクル必ず行われるので、つねに「トレーニングしておく必要がある」点がその特徴の一つでもあるといえる。

Ⅲ. 解析からみた実験の分類

1. モックアップ実験とベンチマーク実験

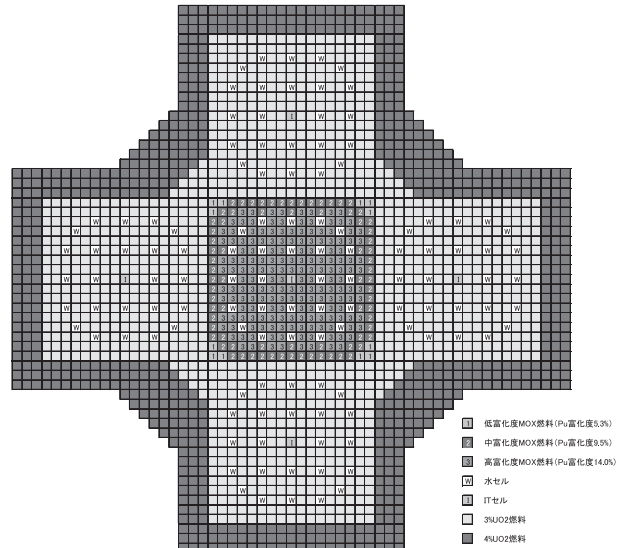
臨界実験は、モックアップ実験とベンチマーク実験に大別される。両者の違いは、実験と解析の関係を考える上で重要なので、ここで改めて説明する。

モックアップ実験は、設計対象とする原子炉、あるいは装荷燃料の特徴をできるだけ忠実に模擬する実験である。そのため、一般に実験体系は大きくなり、また、複雑になる。モックアップ実験の一例として、高速炉体系では、米国 ANL と旧動燃が1978年から1987年に行った Jupiter 臨界実験¹⁾、軽水炉体系では、ベルギーの Mol 研究所においてプルサーマル炉心の模擬臨界実験を行った VIP 臨界実験^{2,3)}。第1、2図にVIP臨界実験の体系図を示す。

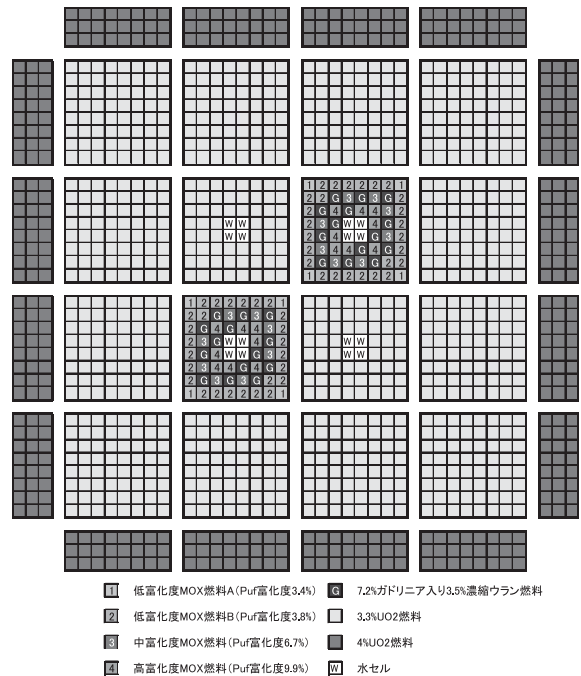
PWRにおいては、17×17型MOX燃料集合体、BWRにおいては、8×8MOX燃料集合体が模擬されている。また、PWRにおいては、実機と同様に、集合体が隙間なく配置されており、一方、BWRにおいては、集合体間に存在する制御棒挿入用の水ギャップが考慮されている。さらに、運転状態では水密度が低くなるため、この効果も減速材中に挿入されたアルミ製のマイクロロッドあるいはマイクロチューブを用いて模擬されている。

つまり、モックアップ実験は実機に使用される燃料設計をできるだけ忠実に反映しており、その体系の解析を行うことで、実機にできるだけ近い条件で解析手法を検証することを目的としているのである。核計算の誤差は、核データの誤差および解析手法の誤差に大別されるが、モックアップ実験は、この2つの誤差を分離するのではなく、特定の条件の下で、これらをまとめた形で評価することを目的としているといえる。なお、実機炉心の起動時に低出力で実施する、いわゆる炉物理試験は、実験ではないが、解析結果の確認のために実施するモックアップ試験であると考えられることもできるだろう。

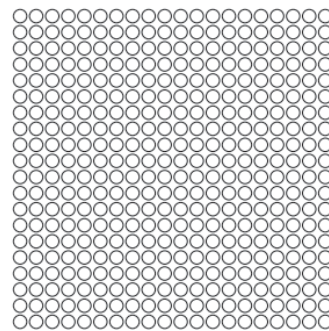
一方、ベンチマーク実験は、特定の原子炉タイプ(例えば、FBR、PWRやBWR)を対象とするというより、より広い意味で核データと解析手法の検証を行うためのデータを提供することを目的としている。例えば、日本原子力研究開発機構のTCA⁴⁾や京都大学臨界集合体KUCA⁵⁾での実験の多くは、このベンチマーク実験に分類される。TCAにおける臨界実験体系の一例を第3図



第1図 VIP 臨界実験 (PWR)



第2図 VIP 臨界実験 (BWR)



第3図 TCA 臨界実験体系(例)

に示す。

ベンチマーク実験は、その性格上、モックアップ実験とはかなり異なった実験体系が求められる。実験解析を

行っているとしばしば遭遇することであるが、ある誤差と別の誤差が打ち消しあって、特定の体系では非常に良好な予測精度が得られることがある。しかし、これは見かけ上のことであり、例えば、中性子のエネルギースペクトルが変化するなど、条件が変わった場合、相殺されていた誤差が顕在化することがよくある。したがって、ベンチマーク実験では、核データや解析手法を広く検証するために、実験条件を系統的に変化させる必要がある。系統的に変化させるべき実験パラメータとしては、燃料組成 (^{235}U 濃縮度, Pu 富化度, Pu 組成), 燃料対減速材体積比, 減速材の種類, 温度, 吸収材の種類などがあげられる。

これらすべてのパラメータについて系統的な実験を行うのが理想ではあるが、実際は実験装置や時間の制約から難しい。例えば、燃料組成について系統的な実験を行うためには多様な燃料を用意する必要がある(費用面から一般的に難しい)。また、ピン状燃料を用いた実験において燃料対減速材体積比を系統的に変更するためには、燃料棒を保持する炉心支持板の変更あるいは減速材の種類の変更, 減速材の排除棒の使用などハードウェアの改修を含む大がかりな変更が必要となる。温度についても大気圧で沸点以上の実験をするためには、加圧機構が必要となる。京都大学臨界集合体(KUCA)⁴⁾や日本原子力研究開発機構のFCA⁶⁾で採用されている固体減速架台は、燃料の種類, 減速材対燃料体積比といったパラメータを変更することが容易であり、この観点からその重要性が再認識されるべきであろう。

さて、系統的な実験を行う際に重要なことは、対象とする実験パラメータ以外の条件をできるだけ変化させないことである。これは意外に難しい。例えば、燃料対減速材体積比を変更することを考える。この場合、中性子スペクトルが変動することに伴い、炉心の無限増倍率は変化する。その結果、臨界となる炉心のサイズが変わることとなるが、炉心のサイズは、中性子漏洩量に影響を与える。このような一連の実験結果を解析し、実効増倍率の予測結果に特定の誤差傾向が見られた場合、その原因が無増倍率の予測誤差に起因するのか、それとも中性子漏洩量の予測誤差に起因するのかを正確に見極めるのは難しい場合がある。同様の理由から、ベンチマーク実験はできるだけ均質な、つまり多種類の燃料が入らない形で実施することが望ましい。多種多様な燃料が用いられている場合、解析誤差の要因分析が困難になる。

2. 実験解析の種類と項目

原子炉の設計にあたっては、解析による予測を用いる。したがって、炉物理実験は、解析が原子炉の安全性および性能を担保できるよう、様々な項目について、検証に用いる実験データを与える必要がある。主要な炉物理実験項目と、検証の対象となる原子炉の性能の関係を第1表に示す。

第1表 炉物理実験項目と検証の対象となる原子炉の性能

実験(試験)項目	検証の対象となる原子炉の性能
実効増倍率(臨界量)	臨界性, 炉心寿命
反応率比(例: ^{238}U の捕獲と ^{239}Pu の核分裂の比)	転換比, 炉心寿命
温度変化, 減速材密度変化に伴う実効増倍率の変化	反応度係数(減速材温度係数, 減速材ボイド係数, ドップラー係数), 固有の安全性
核分裂率分布	局所燃料棒出力
動特性パラメータ(遅発中性子割合)	動特性
吸収材価値	制御棒反応度価値
同位体組成	臨界性, 転換比, 炉心寿命

なお、炉物理実験で得られる結果と解析結果を照らし合わせる際には、比較する物理量が同じものであるかどうかについての考察が必要である。例えば、もっとも基本的な炉心特性量である炉心の実効増倍率は、ある理想的な条件(核分裂で発生した中性子のみで体系内の中性子数が維持されるような仮想的な定常状態)における炉心内の中性子生成率と消滅率の比である。未臨界度が深い実験体系において測定した炉心の「実効増倍率」は、外部中性子源による中性子生成の寄与が大きくなるため、このような仮定を満たしていない場合がある。つまり、測定で得られた「実効増倍率」は計算で得られる実効増倍率とは異なる物理量になっている可能性がある。

また、燃料棒出力の測定は通常、燃料棒の核分裂率を測定することにより行う。一方、集合体計算コードなど炉心解析で使用する場合には、特に指定しない限り燃料棒の発熱率が燃料棒出力として出力される。核種ごとに核分裂あたりの発熱量は異なるので、これらを直接比較することはできない。このような行き違いをなくすためには、炉物理実験および解析手法についての物理的な理解が不可欠である。

IV. 解析技術と炉物理実験の関係

1. 解析技術と実験ニーズの変化

フェルミがシカゴパイルを臨界にした当時は、原子炉のもっとも基礎的な物理量である臨界量でさえ、解析では精度よく求めることができなかつたと推定される(蛇足ではあるが、遅発中性子割合が正確に知られていなかった当時、そもそも臨界実験を行うこと自体がかなりの冒険だったはずである)。そのため、原子炉開発の初期においては、実験データを用いて解析手法の検証をするというよりも、実験そのものによって原子炉の特性を

把握する「実験的アプローチ」がとられていた。

また、初期の動力炉の建設が行われていた1960年代半ばに出版されたラマーシュの『原子炉の初等理論』⁷⁾において、「原子炉寿命の計算結果が数百パーセントもの誤差を含むこともまれではない」という記述があるように、燃焼や温度フィードバックといった複雑な現象を取り扱わざるを得ない商用原子炉の性能予測も、当時は類似のタイプの原子炉の運転データに大きく依存していたであろうことは容易に類推できる。

しかし、この半世紀の間、デジタルコンピュータの発達とあいまって、解析技術は大幅に精緻化された。このため、原子力開発の初期のように「臨界実験で実機原子炉の特性を予測する」必要性は従来に比べると低くなったといえる。つまり、モックアップ実験については、解析手法の進歩に伴ってその意義は低下してきているといえるだろう。

では、これは、炉物理試験を精緻な核計算コードで代替できることを意味しているのであろうか？このような議論は、炉心解析分野のみならず、原子力の他の分野、ひいては一般の工学分野に共通するものである。例えば、自動車の開発においては、費用も時間もかかる風洞実験や衝突実験を解析で代替することで、設計費用を抑制しつつ、従来では考えられなかった数の設計案を検討することが可能となり、これが安全性や経済性の向上に顕著に寄与している。

炉心解析分野においても、解析モデルにおける近似が少ない連続エネルギーモンテカルロコードが低コストで利用できるようになり、これを実験代わりに使用できるのではないかという議論がある。私見ではあるが、この答えはある観点からはyes、別の観点からはnoであると考えている。

連続エネルギーモンテカルロ法は解析手法の観点からは確かに近似が少ないが(近似がないのではなく、少ないだけであることに注意)、測定値を元にして評価されている核データをもとに計算を行っており、その計算精度は核データの精度に大きく依存することとなる。

核データについても、原子力開発の初期と比べると比較にならないほどの進歩がみられるが、本来的に断面積のエネルギー依存性を測定し、そのデータを元に詳細なエネルギー依存の(微分的な)評価値を決めるというある意味、労働集約的な作業が不可欠であり、現在でもその評価値の改善は継続的な課題である。したがって、連続エネルギーモンテカルロコードといえども、実験と等価な解析結果を与えるわけではないことは明らかである。

さて、モンテカルロコードは(核データが与えられれば)、中性子の挙動に関して精緻に解析することが可能である。このことを考えると、従来行われていた核計算コードの検証のあり方を変えることも可能なのかもしれない。前述のように、現在は炉物理実験の結果を検証す

べき解析手法で直接評価し、その結果から核計算コードの妥当性を確認している。これは、核データおよび解析手法の誤差を分離することなく、一体として検証を行うことに相当する。このアプローチは長い経験があり、これまで成功裏に用いられてきた。

これに対し、連続エネルギーモンテカルロコードが解析手法として精緻な結果を出すのであれば(必ずしも真の解でないかもしれないことに注意)、核データとして同一のものをを用い、核データに起因する差異をなくした上で、モンテカルロコードとの比較によってまず解析手法の検証を行い、解析手法の妥当性を検証した上で、実験解析を行って核データを含む形で核計算コードを検証する方法が考えられる。

このアプローチの有利な点は、様々な条件において解析手法を検証できることにある。前述のように、ある解析手法の検証を行う場合には、様々な実験パラメータを系統的に変更して実験を行い、解析と比較することが望ましいが、実際には時間や費用の制約の面から、すべてを網羅する系統的な実験を行うことは現実的ではない。これに対して、モンテカルロコードでは、先の条件を系統的に変更して解析することは容易であり、さらに、実験では得られないような詳細な核特性(例えば、群ごとの微視的実効断面積、反応率、中性子スペクトルの空間分布など)を直接比較することもできる。このような詳細な比較により、いわゆる誤差の相殺が生じているのかどうかを明らかにすることができる。

このアプローチを行う場合、核データの妥当性を系統的にどのように評価するのかという問題は依然として残る。これに対しては、後述する炉物理実験のデータベース化が非常に大きな意義を持ってくるといえる。つまり、これまでの炉物理実験の蓄積により、系統性をできるだけ担保することが可能になりつつあるということである。

これまでの議論は、モックアップ実験とベンチマーク実験に関する意義が、大きく変化していることを示唆している。つまり、前述のように、特定の体系の特性を忠実に再現することを目的とするモックアップ実験については、連続エネルギーモンテカルロコードの使用により、かなりの部分を代替できる可能性があるのに対して、断面積データの妥当性を総合的に(積分的に)評価するベンチマーク実験の必要性はいささかも減じていない。前述のように、核データの微分的な評価値の精度にまだ向上の余地がある現状では、連続エネルギーモンテカルロコードの信頼性評価のために、その重要性はより増しているともいえる。

2. 解析のための実験、実験のための解析

炉物理実験の大きな目的の一つは、核計算コードのための検証データの取得、つまり「解析のための実験」であ

る。一方、炉物理実験を安全にかつ効率よく行うためには、実験の計画をきちんと立てる必要がある。つまり、「実験のための解析」も必要となる。

炉物理実験の結果を核計算コードの検証に使う場合、どのような体系で、どのような項目について実験を行えばよいのかをよく検討する必要がある。例えば、MOX 炉心の設計に使うコードの検証として、ウラン燃料の水溶液系の実験よりは、ウラン燃料のピンタイプの実験が好ましく、さらに MOX 燃料のピンタイプの実験が好ましいことは直感的に明らかであろう。つまり、どのような実験を行えばもっとも効果的に核計算コードを検証できるのか、を検討できることが望ましい。このためには、どのような実験が対象とする原子炉と「似ているのか」、を定量的に表す指標が必要となる。

この考えに基づいて用いられているものが、感度解析と代表性因子である⁸⁾。感度解析は、「どの核種のどの種類のどのエネルギーの断面積が対象とする核特性値に影響を与えているか」を表す感度係数を求めるものである。仮に臨界実験体系における感度係数が対象とする炉心のそれと同一の場合、臨界実験は核的には対象炉心を完全に再現しているといえ、核計算手法の検証という観点からは理想的な実験になっている。また、感度係数ができるだけ対象とする炉心に近くなるように実験体系を選ぶことにより、同じ手間をかけて実験を行うにしても、より効果的な実験が可能となる。実験と対象とする炉心がどの程度近いかを表すパラメータが代表性因子と呼ばれるもので、以下のように定義される。

$$\gamma^2 = 1 - \frac{\Delta S' V \Delta S}{S' V S} \quad (1)$$

ここで、 γ ：代表性因子、 S ：対象とする炉心における感度係数からなるベクトル、 ΔS ：実験体系と対象とする炉心の感度係数の差異からなるベクトル、 V ：断面積の共分散行列である。

代表性因子が1に近いほど、実験体系と対象とする炉心は核的に類似している。代表性因子を1に近づけるためには、上述したように、実験体系と対象とする体系の感度係数ができるだけ近くなるように実験体系を設定することが重要であり、代表性因子はその定量的指標として用いることができる。

V. 実験データベースと解析

炉物理実験の実施には非常に手間も費用もかかる。その意味では、これまでに世界各国で実施されてきた様々な炉物理実験は非常に貴重な財産であるといえる。各国の臨界実験装置が廃止されつつある中、既存の炉物理実験をデータベース化し、後世に残す取組みが NEA/OECD を中心として行われている。ICSBEP⁹⁾は、主として臨界安全性の核計算コードの検証を主眼として、

様々な臨界実験データを集めたものであり、収納されたデータは熱炉から高速炉体系に及ぶ幅広いスペクトル、U、MOX など種々の燃料組成をカバーしていることから、核データなどのベンチマーク計算に活用することができる。また、IRPhEP¹⁰⁾はモックアップ試験を含む各種の臨界実験をデータベース化しており、解析手法の検証に使用することができる。

ICSBEP や IRPhEP といった広範囲な炉物理実験データベースを活用することで、これまでは大変な労力を要していた幅広い実験体系に対する検証計算が可能となってきた。これにより、従来は系統的に調査することが困難であった²³⁵U 濃縮度に対する実効増倍率の解析誤差の依存性などが明らかになりつつある。

VI. まとめ

本稿では、核計算コードの検証と臨界実験の関係について述べてきた。実験計画を立てるためには解析が必要で、また核計算コードの検証を行うためには炉物理実験の結果が必要であることは、炉物理実験と解析が不可分の関係にあることを示している。

解析手法の進展に伴い、より基礎的なデータを与えるベンチマークタイプの炉物理実験がより重要になりつつあり、核データの誤差が依然として無視できない現状では、新しい臨界実験データの重要性はいささかも失われていないといえる。

炉心解析はあくまでも理想化された「仮想」の世界を扱っているものである。一方、解析の目的は現実世界の原子炉の性能を予測するものであることから、解析だけで閉じることはあり得ないと筆者は考える。臨界集合体を用いた炉物理実験、あるいは実機における炉物理試験の結果と解析の比較は、解析という「仮想的な世界」と「実際の世界」の橋渡しをするものなのである。

— 参考資料 —

- 1) M. Ishikawa, "Consistency Evaluation of JUPITER Experiment and Analysis for Large FBR Cores," *Proc. Int. Conf. on the Physics of Reactors (PHYSOR 96)*, Mito, Japan, Sep., 1996, (1996).
- 2) M. Mori, M. Kawamura, K. Yamate, *Nucl. Sci. Eng.*, **121**, 41 (1995).
- 3) E. Saji, H. Shirayanagi, *Nucl. Sci. Eng.*, **121**, 52 (1995).
- 4) 外池幸太郎, 本連載講座第5回, 日本原子力学会誌, **52** [12], 819 (2010).
- 5) 代谷誠治, 本連載講座第1回, 日本原子力学会誌, **52** [8], 490 (2010).
- 6) 岡嶋成晃, 本連載講座第6回, 日本原子力学会誌, **53** [1], 50 (2010).
- 7) ラマーシュ, 原子炉の初等理論, 吉岡書店, (1976).

- 8) T. Sano, T. Takeda, *J. Nucl. Sci. Technol.* **43**, 1465 (2006).
- 9) ICSBEP 2009-HANDBOOK, NEA-1486, (2009).
- 10) *International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments*, 4 th-ed., NEA/NSC/DOC (2006)1, March 2009 Ed., OECD/NEA (2009).

著者紹介

山本章夫(やまもと・あきお)



名古屋大学

(専門分野/関心分野)原子炉物理, 特に炉心解析手法の開発, 原子力教育, エネルギー・環境教育。

書評

解析的延長がわかれば
特殊相対論がわかる

小林啓祐著, 248 p. (2009. 6), 工学社.

(定価2,300円) ISBN 978-4-7775-1447-2

相対性理論への入門書の方式には, 当評者の見るところ2つある。一つは大学生向け物理教科書に見られるもので, マイケルソンとモーレイによる歴史的な実験事実から説き起こす。定速で相対運動をする2つの座標系の, 片方で発せられた光の速度について, 両座標系の間で差が認められなかった, という事実に注目・立式して, ローレンツ変換の公式に至る。評者もこれで学んだし, 物理の解説としては正統的だろうが, 速度にまつわる既存概念の放棄を要求されるから読者はまず, 十分落ち着いて考え得る状態に自分を置く必要がある。この点が難点である。

対照的な第2の方式では, 座標軸の回転に伴う変換公式を用いてローレンツ変換に至る。これは代数的な演算に達者な読者には気楽であろう。本書は後者である。上記の回転公式に加えて, 座標軸上の数値を複素数にまで拡張して演算を行い, よく知られたローレンツ変換公式に到達する。著者はこの結果は同変換公式に「似ている」のではなく, 「一致するのだ」と力説。書名にある『解析的延長』とは, 例えば, 扱う実変数 t を純虚数 it に置き換えて演算することを指している。

「しかし, そのような置き換えは許されるのか? 物理的には何を意味するのだ?」という読者もいるかもしれない。そ

の方には, 次の言葉(山内恭彦先生, 『物理数学』[岩波全書, 1950年刊]の序)を紹介しよう。「数学というのはなかなか, よく出来ていて, 2トン積みのトラックに4トンくらい積んでも, 結構走ることが多い」。

そこで上の読者にはひとまず, 運算腕力と厳密性が抜群の, この著者の言を信頼して式の操作を続け, 得られる公式が上述の第1導出方式で得られる公式と一致することを楽しんだ上で, 徐々に考えることを勧めたい。実験例でも相対論が顔を出すこの頃なのだから[高速飛翔する鏡, 本誌, Vol.52, p.80(2010)]まず親しむことである。

本書は冒頭まず全書の構成を予告して本論に入る。各章の結果にはまとめがある。前述のマイケルソンとモーレイの実験にも丁寧な紹介がある。相対論からの公式($E=MC^2$)の実例として, 世上, 混同されがちな原爆の放出エネルギーの質量相当量と, 飛散したウラン質量との格段の差を数値で示す。歴史的挿話や, しばしば語られる相対論のパラドックスも紹介。付録には複素函数論解説もあり, 親切な入門書である。読者には紙と鉛筆を机上に置き, 著者がさも簡単そうに述べる演算を確かめつつ読むことを勧める。得られる結果の考察・検討にも心遣いの感じられる, 行き届いた書である。

(元名古屋大学・仁科浩二郎)



ATOMOS Special

UAE 編

世界の原子力事情 第11回

アラブ首長国連邦(UAE)の原子力事情

UAE 連邦政府原子力規制局 齊藤 健彦

I. UAE の概要

アラブ首長国連邦(United Arab Emirates: UAE)はアラビア半島南東のアラビア湾(ペルシャ湾)入り口に位置し、ホルムズ海峡を挟んでイランに面している(第1図)。UAEはアブダビとドバイを含む7つの首長国からなる連邦国であり、1971年に英国から独立した。首都はアブダビで、国土面積は日本の約5分の1、人口は連邦全体で約500万人。住民の約85%は近隣の中東各国やアジア、アフリカ、ヨーロッパからの外国人居住者が占めている。

2009年1月の“Oil and Gas Journal”によると、UAEは世界で7番目の原油埋蔵量を有し、6番目の天然ガス埋蔵量があると記されている。石油を通じ、日本とも関係の深い国である。連邦の原油、天然ガス確認可採埋蔵量のそれぞれ94%、93%がアブダビ首長国に集中している。石油・天然ガス生産量、輸出収入においてもアブダビは他の首長国に抜きん出ており、連邦予算の大部分をアブダビが支出し、特に国防予算は同国が全額負担している。

II. UAE のエネルギー事情と原子力発電

UAEは豊富な原油と天然ガスの埋蔵量を有すが、発電に用いている天然ガスの取り出しコストが高く、また、硫黄分が多いうえ、近年、天然ガスを使った発電と天然ガスを原料とした工業化の増大で、天然ガスは問題を抱えている。また、近年の経済発展により、電力および水の供給が困難な状況になりつつあり、経済発展はつまり可能性も秘めている。代替燃料を模索するUAEは原子力発電の可能性を追求し、2008年4月「UAEの原子力平和利用の評価と潜在的開発に関する政策(Policy of the United Arab Emirates on the Evaluation and Potential Development of Peaceful Nuclear Energy)」と題する白書を公表した。

白書は、まずUAEの将来の電力需要の伸びを示して原子力発電導入の必要性を説き、引き続いて、政府の6項目にわたる原子力平和利用に関する原則を記している(第2図)。また、核拡散防止のために、国内での核濃縮

Nuclear Power Program at the United Arab Emirates (UAE): Takehiko SAITO.

(2010年 10月19日 受理)

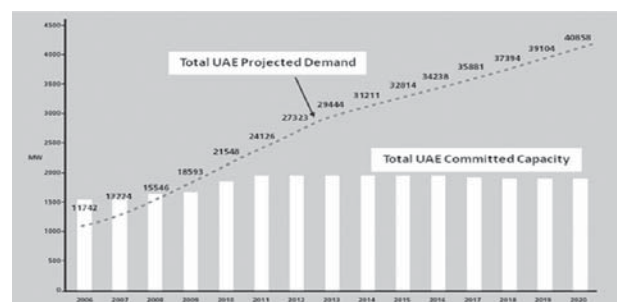
や再処理能力の開発を放棄し、核燃料は海外から調達することを明言しており、原発導入と核兵器開発の関連性を完全に払拭しようとしている。

白書で述べられた原子力発電導入(原子力平和利用)のための原則として、以下を明記している。

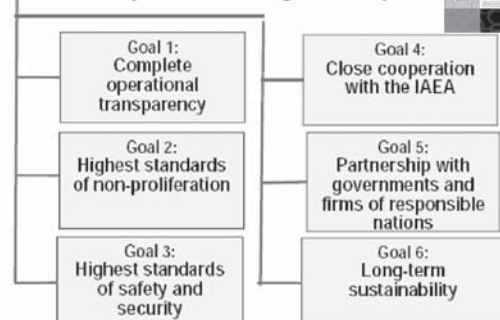
- (1) 運営の完全な透明性を保証する。
- (2) 最高水準の核拡散防止策を保証する。
- (3) 最高水準の安全とセキュリティを保証する。



第1図 アラブ首長国連邦(UAE)の地理的位置



UAE White Paper: Guiding Principles



第2図 UAE 白書：電力需要—供給と原子力導入 6 原則

- (4) IAEA と直接連携をとり、IAEA の基準に従う。
 (5) 責任ある供給国の政府および企業、国際機関と協力する。
 (6) 長期持続可能な原子力平和利用計画を実施する。

原子力発電は、実証された、環境面で優れ、経済的にも競争力のあるオプションとして取り上げられ、原子力発電により UAE の電力のかなりのベースロードをまかない、UAE の経済と将来のエネルギーセキュリティに寄与できると判断された。それゆえ、約14の原子力発電プラントで、20 GWe をまかない、その1/4を2020年までに運転するとの計画が示された。白書の公表に引き続いて、UAE 政府は国際原子力機関(IAEA)、および各国政府(米、英、仏、露、中、韓、日、独)との協議を開始した。UAE は IAEA との核不拡散協定をすでに2003年に批准していたが、2008年半ばには IAEA 大使を任命した。

この原子力発電計画を実施する組織として Emirates Nuclear Energy Corporation (ENEC) がアブダビ首長国政府の公的組織として設立され(2009年)、具体的に原子力発電プラントを UAE 内に建設する活動が始まった。UAE 原子力発電所建設のため、ENEC は世界の9つの会社に声をかけ、このうち、2009年の半ばには、Areva (EPR)、日立-GE (ABWR)、KEPCO を代表とする韓国連合 (APR 1400) の3社に絞りこんだ。ENEC は、グローバルな総合 AE (計画マネジメント、エンジニアリング、建設、運営) である CH2M Hill 社に、UAE 原発導入計画の運営をまかせた。2009年の12月末、ENEC は、APR 1400 を4基、1つのサイトに建設する契約を韓国連合と交わした。この契約は、プラント4基の建設、核燃料の供給・装荷と許認可試運転を含むもので、総額約200億 USドルにのぼるものであった。韓国連合は、60年間のプラント運転で、更に約200億 USドルの契約を期待している。

Ⅲ. 原子力先進国からの協力および国際協定

UAE は原子力インフラがないところで、早期に原子力発電を導入するため、白書で原子力発電導入の6原則の(4)と(5)に掲げたごとく、IAEA を含む外国からの協力を大きく頼っている。

これまでに米国は、UAE と2国間 Nuclear Energy Cooperation Agreement を2009年1月に締結し、韓国も同年6月に締結している。フランスも同年 Nuclear Cooperation Agreement を UAE と締結した。また、英国は UAE との間に Memorandum of Understanding (MOU) on Nuclear Energy Cooperation に署名し、日本も Memorandum of Cooperation (MOC) on Cooperation in Peaceful Use of Nuclear Energy in UAE に2009年1月に署名している。日本と UAE との MOC の概要を第1表に示す。

第1表 日本と UAE の原子力協力文書の概要

○署名日	2009年1月19日
○文書名	日本国経済産業省とアラブ首長国連邦外務省とのアラブ首長国連邦における原子力発電開発についての協力文書
○署名者	日本：吉川経済産業副大臣 UAE：アルアリヤーニ外務次官
○協力のスコープ	・原子力発電開発の準備、計画、推進に対する支援 ・原子力発電開発に係る訓練、基盤整備、人材育成 ・原子力安全、放射線防護、緊急時対応、放射性廃棄物管理 ・原子力発電所の防護(セキュリティ) ・一般公衆への啓蒙及び教育 ・その他両者で合意した協力
○本文書に係る窓口	日本：経済産業省資源エネルギー庁原子力政策課 UAE：外務省
○本文書に基づく協力の期間	署名から3年間(両者の合意により延長可能)

2009年8月、UAE は IAEA に原子力安全条約 (IAEA Convention on Nuclear Safety)、使用済み核燃料管理および放射性廃棄物管理の安全に関する条約に加盟する準備ができていた旨連絡した。第2表に、UAE が結んでいる原子力関係国際条約等の締結状況を示す。

Ⅳ. UAE 原子力規制機関と開発機関の正式発足

2009年10月、原子力エネルギーの平和利用に関する連邦法が発効し、核物質の許認可とコントロールのシステムの開発を供給するとともに、UAE 原子力エネルギーセクター全体を監督する独立した UAE 連邦政府の原子力規制局 (FANR: Federal Authority of Nuclear Regulation) が確立された。またこの法律により、UAE 国内でウラン濃縮施設や使用済み燃料の再処理施設の開発、建設、運転を行わないことを明確に規定した。

2009年11月には、前記の ENEC もアブダビ首長国政府の独立した開発機関として法的に正式設立された。ENEC は、原子力計画の開発を監督すると同時に、国内的、世界的に原子力部門で政策的投資をするアブダビ政府の腕となる (FANR は連邦政府の機関)。

FANR および ENEC の2010年9月末の人員を第3表に示す。表には、UAE 国籍のスタッフの割合も記した。この表でわかるように、規制側も開発側も UAE 国籍以外のスタッフに頼っていることがわかる。筆者の属する FANR では2010年10月現在、計51名の外国人スタッフが働いており、トップは、元米国 NRC の Dr. Travers が務めている。技術系のスタッフの多くは、米・加・英・仏・スウェーデン等の原発先進国からきているが、日本人は筆者一人である。

第2表 UAEの原子力関係国際条約等締結状況

条約等	状況
IAEA Convention on Early Notification of Nuclear Accident	1987年締結
IAEA Convention on Assistance in Case of Nuclear Accident or Radiological Emergency	1987年締結
IAEA Treaty on Non-Proliferation of Nuclear Weapons	1995年締結
UN Comprehensive Test Ban Treaty	2000年署名 未発効
IAEA Comprehensive Safeguards Agreement	2003年締結
IAEA Convention on Physical Protection of Nuclear Material	2003年締結
UN Security Council Resolution 1540	2004年締結
UN International Convention for Suppression of Acts of Nuclear Terrorism	2005年締結
IAEA Additional Protocol to Safeguards Agreement	2009年署名
IAEA Amendment to the Convention on the Physical Protection of Nuclear Material	2009年寄託
IAEA Convention on Nuclear Safety	2009年寄託
IAEA Joint Convention on the Safety of Spent Fuel and Rad. Waste	2009年寄託
NSG Export Guidelines	未署名
IAEA Vienna Convention on Civil Liability for Nuclear Damage	未署名
IAEA Protocol to Amend Convention on Civil Liability	未署名
IAEA Joint Protocol on the Application of the Vienna and Paris Conventions	適応外
IAEA Convention on Supplementary Compensation for Nuclear Damage	未発効

第3表 FANRとENECのスタッフ数(2010年10月現在)

組織名	スタッフ人数	UAE国籍 スタッフの割合
FANR	104人	51%
ENEC	226人	54%

V. 原子力関係の人材の育成

原子力発電所を建設し、許認可(規制)、運転していくための人材育成がUAEでの重要課題として認識されている。2009年に、ENEC、FANRおよびKUSTAR(Khalifa University of Science, Technology and Research)は、UAE原子力奨学制度を発足させた。この奨学制度により、UAE国民は世界の最高峰の大学で、原子力工学、機械工学、あるいは電気工学の学士、修士、博士を全額国の負担で取得することができるようになった。そこで勉強を終了したものは、成長していくUAEの原子力分野で活躍していく機会が与えられる。また、UAE国外ですでにUAE国籍の技術系エンジニアが、原子力の入門的教育や実用的なトレーニングを受けている。国内では、韓国KAIST(Korea Advanced Institute of Science & Technology)のサポートを得て、KUSTARにおいて原子力工学の授業が2011年より開始されることとなった(KAISTより4名の教授がKUSTARに常勤)。

VI. 初号機建設スケジュールと許認可プロセス

2010年11月現在、来月月末に受け取る予定の1&2号機建設許可申請書(CLA: Construction License Application)の審査準備作業に取りかかっている。初号機建設の全体スケジュール(第4表)と、安全審査を実施するFANRの技術部門の組織(第5表)を以下に示す。

原子力規制は、第3図に示すように、米国の規制体系と、原子力発電プラント原産国規制(Country of Origin 韓国規制: 米国規制に類似)体系に基づき実施される。現在、“Law”の部分は出来上がっており、“Regulation”は、FANR-REG-01からREG-24まで準備され、主要なものは既に公開意見聴取も実施済みである。その下の“Regulatory Guides(UAE)”は大部分、米国NRCのガイドを用いるべく準備中である。“Country of Origin”部は、韓国より英文版を入手している。一番下の、CLAをいかにレビューするかという“Review Instruction”は、米国NUREG-0800 Standard Review Plan(SRP)を参考にし、11月下旬の発行を目指して現在最終レビュー作業中である。

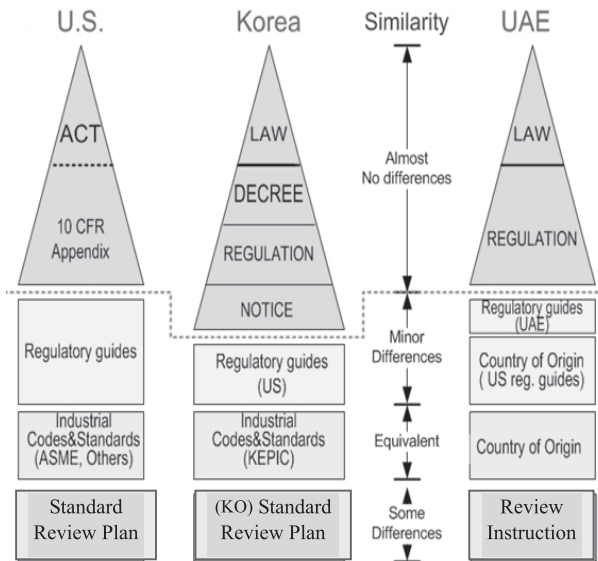
許認可に関しては現在、FANRとENECはCLAの記載内容の詳細についての最終調整を行っている。CLAの章立てを第6表に示す。特に、米国NRC Reg. Guide 1.70にない、18章(Human Factors Engineering)、19章(PRA and Severe Accident Evaluation)、Supplement-1(Independent Safety Verification)、Supplement-2(Operating Experience)と、12章に追加となっているEmergency Preparednessおよび、17章に追加のManagement Systemに注目いただきたい。これらは、最近の世界の動向を反映して、IAEAおよび米国の基準(Reg. Guide 1.206)等を考慮して取り入れられたものである。

第4表 UAE初号機の建設スケジュール

項目	年月
建設許可申請書(CLA)ENEC提出	2010年12月
建設認可	2012年6月
運転認可申請書(OLA)ENEC提出	2015年6月
運転許可	2016年12月
営業運転開始	2017年6月

第5表 FANRの技術部門の組織

部門(Division)	部	課
技術(Operation)	原子力安全(Nuclear Safety)	規制
		許認可
		安全評価
		検査
	放射線安全(Radiation Safety)	
	セキュリティ(Security)	
	セーフガード(Safeguards)	



第3図 原子力規制体系の比較(UAEと米国及び韓国)

第6表 UAEの建設許可申請書(CLA)の目次(章立て)

章番号	タイトル
1	Introduction and General Description of Plant
2	Site Envelope Characteristics
3	Design of Structures, Components, Equipment and Systems
4	Reactor
5	Reactor Coolant System and Connected Systems
6	Engineered Safety Features
7	Instrument and Controls
8	Electric Power
9	Auxiliary Systems
10	Steam and Power Conversion System
11	Radioactive Waste Management
12	Radiation Protection and Emergency Preparedness
13	Conduct of Operations
14	Initial Test Program
15	Transient and Accident Analyses
16	Technical Specifications
17	Management System and Quality Assurance Program
18	Human Factors Engineering
19	PRA and Severe Accident Evaluation
20	Security
21	Safeguards
S1	Independent Safety Verification
S2	Operating Experience Feedback

安全評価のため、前述のように、FANRは世界から人材を集めてはいるが、わが国のように国内で専門委員会等を開けないので、原子力先進国の技術支援機関(Technical Support Organization: TSO)の協力を得てCLAの評価を行い、FANRの安全評価書(Safety Evaluation Report)を作成する。また、前述のように、審査では原子力プラント原産国の規制局(RBCoO: Regulatory Body-Country of Origin)の審査を有効に用

い、主要な項目の審査に集中することが、UAEのポリシーである。このポリシーに従い、CLAの内容の各項目につき詳細な目次を用い、第7表に記した基準により審査のカテゴリー分類を実施している。

CLAは2010年末にENECより受理する予定であるが、これに備え、CLAの詳細目次の詰めと同時に、何がカテゴリー1審査(Full Review)の対象なのか分類を進めている。これらの審査のための指示書(Review Instruction, 第3図参照)の章立ては、USNRCのSRPに基づき、第8表のようになっている。この審査指示書は、11月末にFANRの審査のサポートをしてくれるTSOにも渡す予定である。

Ⅶ. 建設許認可および建設準備活動の現状

2010年4月に、ENECはUAE最初の4ユニット設置サイトとして、10の候補地のなかからUAE西部のカタル寄りのBrakaを望ましいサイト(第4図参照)として選定した。Brakaサイトの海水水温は、レファレンスプラントがある韓国新古里の海水温よりかなり高く、タービンコンデンサーや、補機冷却系の熱交換器は、新古里3&4号機のものよりかなり大きくなるが、地震に対してはBrakaサイトが対岸のイラン側と違い、アラビア半島の安定したプレートにのっているため、新古里サイトより有利である。

2010年7月にFANRはBrakaのサイト準備ライセンスの認可をENECに与えた。ENECはFANRのサイト認可に基づき土木工事をするためには、まだアブダビ首長国の環境庁から環境建設許可を受け取る必要がある。

ENECは1&2号機の工事認可申請書を2010年12月にFANRに提出し、サイト工事(安全系を除く)を開始する予定である。着工は工事認可が得られ次第、2012年に実施する計画となっている。

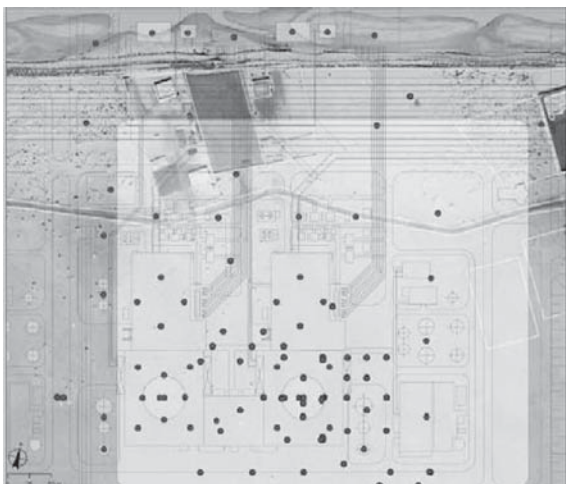
また、2010年7月には、サイト準備ライセンスと同時に、FANRはレファレンスプラントのものと同じであ

第7表 建設許可申請書の審査区分と分類基準

審査分類	分類基準
カテゴリー1 (Full Review)	新技術
	最近の知見
	公衆リスクに寄与大 サイト条件により影響を受けるもの
カテゴリー2	上記以外(レファレンスプラントでRBCoOレビュー済み。チェックのみ)

第8表 Review Instructionの章立て

1	評価対象(Areas of Review)
2	合格基準(Acceptance Criteria)
3	評価方法
4	評価結果
5	参考文献



第4図 1～4号機設置 Braka サイトの位置とボーリング状況

るという条件で、長納期機器、構造物等の製造開始を可能にする Limited Construction License を ENEC に与えた。第9表に、この Limited Construction License で認められた SSC (Structure, System and Component) の製造時期とテスト時期を示す。

VIII. 今後のスケジュール

既に述べたように、UAE では、2010年11月現在、12月に提出される予定の1, 2号機建設許可申請書作成 (ENEC) とそのレビュー準備 (FANR) に追われている。

第9表 Limited Construction License で認められた SSC

SSC 名	製造時期	試験時期
原子炉圧力容器	2010年9月 ～13年9月	2010年10月 ～14年3月
蒸気発生器	2010年7月 ～13年8月	2010年10月 ～14年4月
加圧器	2011年6月 ～13年11月	2011年7月 ～14年11月
原子炉冷却水系配管	2011年8月 ～13年11月	2011年7月 ～14年11月
体積制御系タンク	2012年5月 ～11月	2012年12月 ～13年1月
原子炉冷却ポンプ	検討中	検討中
炉心支持構造物	検討中	検討中
制御棒駆動機構	検討中	検討中
格納容器ライナー	2012年6月	2012年10月
格納容器ポストテンション系	2012年5月	2012年11月
ステンレス鋼ライナー	2012年2月	2012年7月
ディーゼル油移送ポンプ	2012年1月	2013年3月

1号機の着工は2012年末に、また2号機はその1年後に着工される計画である。営業運転開始は1号機は2017年、2号機は2018年を目指し、さらにその後、2019年と2020年に、3号機、4号機の商業運転開始が計画されている(第10表参照)。

第10表 UAE 4号機運転開始までの予定

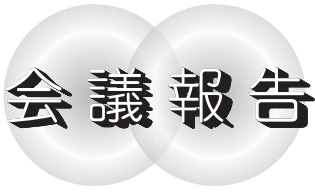
項目	時期
1, 2号機建設許可申請書 (CLA) 提出	2010年12月
1～4号機環境影響評価報告書提出	2010年12月
1号機建設許可および着工	2012年
2号機建設許可および着工	2013年
1, 2号機運転許可申請書 (OLA) 提出	2015年
1号機運転	2017年
2号機運転	2018年
3, 4号機建設許可申請書 (CLA) 提出	2012年
3, 4号機運転許可申請書 (OLA) 提出	2017年
3号機運転	2019年
4号機運転	2020年

著者紹介

斉藤健彦(さいとう・たけひこ)



UAE 連邦政府原子力規制局
(元原子力安全委員会, IAEA, 東芝)
(専門分野/関心分野) 原子力規制, 原子炉安全, 原子力プラント開発, 原子力プラント設計, 原子炉熱水力



『Top Fuel』から見る燃料開発の最先端

2010 LWR Fuel Performance Meeting/Top Fuel/WRFPM

2010年9月26～30日(米国フロリダ州オーランド)

会議の概要

軽水炉燃料に特化した国際会議『Top Fuel』が今年も盛大に開催された。当会議は元々、ANS(米国原子力学会)が主催する“LWR Fuel Performance Meeting”, ENS(欧州原子力学会)が主催する“Top Fuel”会議, AESJ(日本原子力学会)およびKNS(韓国原子力学会)が共催する“Water Reactor Fuel Performance Meeting”の3つが合わさったもので、毎年、米国、欧州、アジアの持ち回りで開催されている。が、ネーミングの妙からか、いずれも“Top Fuel”と称されることが多い。Top Fuelでは、材料開発・設計・評価など原子燃料関連のあらゆる面を対象とした最新の報告がなされ、燃料の照射実績、トラブル事例などの紹介もなされている。

本稿では、特に興味深い幾つかの発表について概要を紹介し、最新の原子炉燃料開発の動向の一端をお伝えできればと考える。

信頼性向上への取組み

今年米国“Zero by Ten”(2010年までに燃料破損をゼロにしようという業界の取組み)の最終年であり、これまでの活動の成果として燃料破損がどうなってきたか、今後どうあるべきか、が会議を通してのメインテーマであった。このため、燃料信頼性のセッションは特に注目度が高く、その中で各社がそれぞれ独自に改善プログラムを立ち上げ、燃料信頼性向上に取り組んでいることが報告された。その結果、米国では異物対策などにより燃料破損率は減少しているが、欧州では燃料破損がやや増加傾向とのことであった。また、IAEA(国際原子力機関)からは1994～2006年までの世界の軽水炉燃料破損事例について報告があり、平均の燃料破損率は 10^{-4} ～ 10^{-5} レベルであるが、例外的に日本だけは非常に破損率が低くなっていることが特筆された。詳細はIAEA-TECDOC-1445 “Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors.pdf”に記載されているという。

最新の被覆管開発

原子燃料における研究開発動向としては、やはりより高性能な被覆管材料の開発が中心である。主なものとして、

- ・ WEC(ウェスティングハウス社)の Optimized ZIRLO とさらに次の世代の AXION
- ・ AREVA 社の M5 の改良
- ・ KAERI(韓国原子力研究所)の HANA 合金

などについて、機械特性、照射特性、腐食特性、事故時評価など、さまざまな試験・評価結果が紹介され、い

ずれも精力的に開発が進められていることがうかがわれた。

わが国からは、関西電力、三菱原子燃料、原子燃料工業らの共同で開発されているJ合金についてシリーズ発表があり、実機での腐食特性も良好で計画が順調に進んでいることが示された。

数値計算との融合

原子燃料に限らず、近年のハードウェアの開発においては、ソフトウェア技術の発展を背景とした計算シミュレーションの活用が盛んである。当 Top Fuel においても、高度な計算機技術を駆使した挙動解析の紹介が目撃された。

特にPCI(原子炉運転中の制御棒操作などにより、局所的に過大な出力変化が生じた際、ペレットと被覆管が相互作用を起こして破損する事象)について、従来は実施不可能だった空間的・時間的に非常に詳細な炉心内の出力変化計算を実施し、PCI破損の予測・監視を可能とするシステムの紹介が何件もあった。これらによって、より柔軟な原子炉の運転操作が可能になるという。また被覆管そのものにも着目し、出力上昇時に被覆管で発生する応力を評価し、破損するしきい値を決める試みもあった。

他にも、被覆管にクラッドが付着することによる局所腐食に関して、サブチャンネル解析とCFD(計算流体力学)を用いてそのリスク評価を行う検討や、多次元の有限要素法を用いてペレット内の熱伝達分布を3次元で評価したものなどもあった。

まとめ

Top Fuelでは毎年、軽水炉燃料開発の最新の動向について数多くの貴重な情報が報告される。燃料の開発に関しては、やはり新たな被覆管材料の開発が主であるが、一方で、高度な計算機技術を駆使した数値シミュレーションの応用が特に目を引いた。今後はこれらハード・ソフトの融合だけでなく、機械設計と核設計や熱水力設計、さらには水化学との融合もますます重要となってくるだろう。これからの燃料開発には、そのような多様な要素を柔軟に組み合わせるセンスが必要となることを再認識した次第である。

なお、来年はアジアの順番であり、中国・四川省の成都で開催される予定である。

(原子燃料工業・山崎正俊、2010年10月28日記)

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

「原子力」が持つ二面性

朝日新聞 太田 匡彦

巨大カジノが立ち並ぶラスベガスの大通りでタクシーをつかまえ、5分ほど走るとその建物が見えてきた。そっけない研究所のような建物。だが、なかに入ると、キノコ雲をデザインした水着姿の「ミス原子爆弾」の等身大パネルが迎えてくれた。

「ATOMIC TESTING MUSEUM」

核実験博物館、とても訳せばいいのだろう。2005年7月、朝日新聞社が発行する週刊誌「AERA」の戦後60年企画の一貫で、米国人の原爆観を取材するため、私はその博物館を訪ねた。

ネバダ核実験場にあった警備員ブースを再現した入場券売り場で10ドル(当時)を支払い、パンフレットを受け取る。パンフレットには、館長のあいさつがこんなふうに記載されていた。

「博物館の見学は特別な体験を保証します。探検して、楽しんで！」

目玉は、核実験が疑似的に体験できるという「グラウンド・ゼロ・シアター」だった。数十人が入れるシアター内の照明が落とされると、カウントダウンが始まる。フラッシュのような閃光が走り、スクリーンにはオレンジ色を帯びたキノコ雲が映し出される。地鳴りのような轟音が響き、座席がガタガタと揺れ出す。スクリーンの下に据え付けられた噴気孔からは、生暖かい風が吹き出してくる。

ショーやカジノまでの時間をもてあました観光客を呼び込み、この日も平日だというのに結構な数の来場者がいた。だが、この博物館に来る人たちが、「被爆者」に触れる機会はない。黒こげの死体や大やけどをおった姿の写真はもちろんない。説明板などでも、その存在は全く無視されている。博物館のあり方から伝わってきたのは、原子力は偉大な発明であり、その技術を応用して米国がいかに強力な兵器を作り上げることに成功したか、という「原子力の輝かしい歴史」だった。

この博物館を訪問した日より数年前、私は読売新聞の記者として広島支局にいた。

主に広島市政を担当していた20世紀最後の夏は、ほとんど毎日のように被爆者の話を聞いて過ごした。蒸発するように死んでいった家族、黒こげになって横たわっていた友人、生き延びたもののひどい後障害に悩まされる自分、子どもを生む恐怖——。取材した内容を補強するため、広島平和記念資料館には何度も足を運んだ。そこでは、ぼろぼろになった衣服や溶けた酒ビン、ケロイドの標本が来館者を待ち受けていた。

その夏、原爆ドームを中心に、巨大な絶望が渦まいているかのような錯覚に陥った。だが、被爆者の老人

たちは必ず、取材の最後にはこんなふうに結んでくれた。

「いまは、命の尊さを感じます」

「若い人たちに期待したいですね」

「私たちにもまだまだできる」

被爆者たちは2度と絶望しないために、つらい記憶を語ってくれているのだと、私は気付かされた。

2009年4月、ブラハ。被爆者たちの60年余りにわたる行動が、一つの成果となって現れた。

「米国は、核保有国として、そして核兵器を使ったことがある唯一の核保有国として、行動する道義的責任がある」「核のない、平和で安全な世界を、米国が追求していくことを明確に宣言する」

その日、バラク・オバマ米大統領はそう演説し、核兵器のない世界へと歩み出す新たなビジョンを掲げたのだ。オバマ大統領はこの年、ノーベル平和賞を受賞。今年8月6日には、広島市の平和記念式に初めて、駐日米国大使が参列した。確実に、一つの流れができてはじめていた。

そんななかで、私がラスベガスの核実験博物館のことを久しぶりに思い出したのは、今年10月のことだった。9月半ばに米国が核爆発を伴わない「未臨界核実験」をネバダ核実験場で実施していた、という記事が新聞紙上に踊ったのだ。紙面を読みながら、ラスベガスの核実験博物館でウィリアム・ジョンソン館長(当時)が、米国人らしい屈託のない笑顔を浮かべながら語った内容がよみがえってきた。私が、博物館の存在意義を尋ねると、彼はこう答えた。

「核爆発の威力をシアターで感じてもらいたい。核兵器がいかに大切な存在か、ラスベガスに観光で訪れる人たちに知ってほしい」

「原子力」というものが持つ二面性は、歩み寄りようがないほど隔たっているのかも知れない。

(2010年12月12日 記)



太田 匡彦(おおた・まさひこ)

朝日新聞東京本社記者

1998年、東京大学文学卒。読売新聞東京本社に入り、広島総局、さいたま支局秩父通信部を経て、2001年9月に朝日新聞社に入社。東京本社経済部などを経て、2007年9月からAERA編集部。著書に『犬を殺すのは誰か ベット流通の闇』。現在は朝日新聞労働組合に出向中。