

新会長あいさつ

学会が本来あるべき姿を取り戻すために



平成 26 年度会長

藤田 玲子 (ふじた・れいこ)

2011年3月11日の東日本大震災に伴う東京電力(株)福島第一原子力発電所事故から3年半が経ちました。いまだ避難されている方々が多くおられることについて心からお悔やみとお詫びを申し上げます。

日本原子力学会は2012年6月に「東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会(学会事故調)」と「福島特別プロジェクト」を立ち上げました。学会事故調は本年3月8日に報告書を出版しましたが、その中で多くの提言を致しました。特に「背後要因のうち組織的なものに関して」は学会として真摯に取り組まなくてはならない課題であると考えております。専門家集団としての学会・学術界の取り組むべき項目として、「学会が果たすべき責務の再認識」、「学会における自由な議論」、「安全研究の強化」、「学際的取組みの強化」などを挙げました。学会として摘出した提言に向けた更なる活動推進と働きかけを実行していくことが本年の第一のミッションと考えています。提言の実行につきましては新たに発足させました“東京電力福島第一原子力発電所廃炉検討委員会”の下で実行していきます。

福島を深く反省し、二度と重大事故を起こさないために学会員の安全に対する意識を高め、福島第一原子力発電所の事故を教訓として日々の研究や技術開発などの業務に十二分に活かしていくことが重要です。

本会は昨年度、定款の改訂、倫理規程および行動指針の改訂を行いました。今年4月には“エネルギー基本計画”が閣議決定されました。その中で“原子力発電は重要なベースロード電源”と位置付けられました。しかしながら、原子力発電に対する国民の見方はいまだ厳しく、原子力の根本的な課題に真摯に取り組む必要があります。すなわち、原子力発電は安全性と放射性廃棄物の処理・処分が適正に実施されることによって初めて重要なベースロード電源を担うことができることを肝に銘じ進めていくことが重要です。

本会として、福島の再生、復興および廃炉と並行して、福島を契機として原子力発電を進めて行くために根本的に解決しなくてはならない課題に取り組むたいと考えています。すなわち、原子力の新たな分野を開拓し、学術的な研究に取り組んでいきます。

原子力災害の当事国として軽水炉の安全性のあるべき姿に改めて誠実に向き合い、学術的に取り組むべき課題を明確にし、“究極に安全な軽水炉”を概念から見直し、研究していきたいと考えております。

また、原子力に最も根本的な課題である“高レベル放射性廃棄物”について、新たな学術的なアプローチによる研究に着手し、願わくば、大幅な廃棄物低減を目指す検討を開始します。

これらの学術的な研究には今まで以上に広く関連分野との連携が重要なことは言うまでもありません。積極的に他の学会へアプローチし教を乞うことも大切です。他の学会との共同作業によって初めて、原子力の立ち位置が明確になり、新たな境界領域の研究が生まれ、学術的に発展していくと信じております。

最後に、従来から続けております、福島の住民の方々の立場に立った正確な情報提供および発信や国と住民の間に立つインターフェースの役割を担っている「福島特別プロジェクト」を引き続き、福島の再生のため積極的に進めて行きます。“福島の再生、復興なくして原子力の再生なし”という言葉に胸に地道に研究活動の推進・協力を継続・強化していきます。ご支援ご協力をどうぞ、よろしくお願い申し上げます。

(2014年7月8日記)

巻頭言

1 快適な日々をありがとう

金美齡

新会長あいさつ

前付 学会が本来あるべき姿を取り戻すために

藤田玲子

座談会

10 もんじゅの過去・今・これから

エネルギー基本計画で、「もんじゅ」を進めることが明確になった。現場は今、どうなっているのか。一方で、日米原子力協力協定の改定が2018年に迫る。この時まで「もんじゅ」が運転を再開していなければ、日本に認められている核燃料サイクル政策の実行に悪影響を及ぼす可能性がある。

向 和夫, 荒井眞伸, 伊藤和寛, 大河内 靖
(司会) 澤田哲生



解説

17 日米原子力協定の歴史と今後の課題 (2) 交渉の開始と交渉上の主要な論点 —協定の実質合意から発効まで—

1982年に始まった日米原子力協定交渉は難航したが、6年がかりの交渉で発効へとこぎつけた。合意へ導いた最大の要因は、レーガン氏と中曽根氏の信頼関係だった。

遠藤哲也

24 原子力黎明期における国産原子炉開発 構想と湯川秀樹らの関与

日本の原子力黎明期に国産原子炉開発構想があった。そこには「民主・自主・公開」を貫こうとする湯川秀樹らの熱意が込められていた。しかし、その構想は外国からの導入路線へと変化していく。

澤田哲生

時論

2 IPCCの2度シナリオは実現できるのか?

その実現のためには国際協調と技術革新の両面で、奇跡的な変化が必要である。

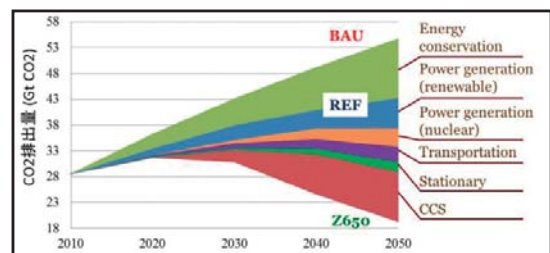
杉山大志

解説

44 地球温暖化防止のための長期エネルギービジョン(1)長期ビジョンに基づくエネルギーシステム構成

地球温暖化抑制のための新たな二酸化炭素排出シナリオとして、長期的な気候変動被害が避けられると同時に、短期的により多くのCO₂排出を許容するZ650が提示された。

氏田博士, 段烽軍, 湯原哲夫



各シナリオにおけるCO₂排出量

30 地震PRA実施基準の改定—3.11の教訓の反映(1)地震PRAの全体概要と改定の要点

福島原発事故をふまえて、2007年に定めた地震PRA実施基準を改定した。その内容を4回に分けて紹介する。

平野光将, 高田毅士, 成宮祥介

35 軽水炉のシビアアクシデントに関する核燃料研究の状況と課題

核燃料部会の溶融燃料サブワーキンググループは、シビアアクシデントに関する炉内外試験、核分裂生成物放出試験、溶融燃料の挙動に関する試験、材料間の反応に関する試験などについて調べた。

核燃料部会 溶融燃料サブワーキンググループ

41 保障措置のための使用済燃料中の核物質質量評価—燃焼計算コード検証委員会の活動

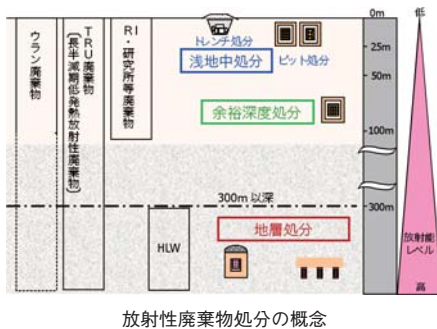
六ヶ所再処理工場へ搬入された使用済燃料中の核物質質量は、燃焼計算コードで計算される。一方、再処理の過程では物理的に計量される。題記委員会は、計算値と計量値の差を受け払い間差異 (SRD) 発生要因を検討した。
 名内泰志, 笹原昭博

連載 放射性廃棄物概論—施設の運転および廃止措置により発生する放射性廃棄物の対策

49 第1回 放射性廃棄物対策の概要

前回の連載講座「放射性廃棄物の処分」から約10年が経過し、この期間に安全評価上の検討項目、安全評価手法など、放射性廃棄物処分の対策は大きく進展した。今回の講座では、最新情報も含めた放射性廃棄物の処理処分に関する現状を紹介する。

長尾誠也, 山本正史



放射性廃棄物処分の概念

報告

59 アジアの将来の環をつなぐ原子力人材—東南アジアの学生と交流して得たこと

林 亮太

61 フランスとわが国の放射性廃棄物の処理処分について—フランス原子力学会との合同セッションより

塚本政樹

ジャーナリストの視点

64 今も自問自答の日々

根元良弘

理事会だより

65 平成26年度理事会新執行部が活動開始

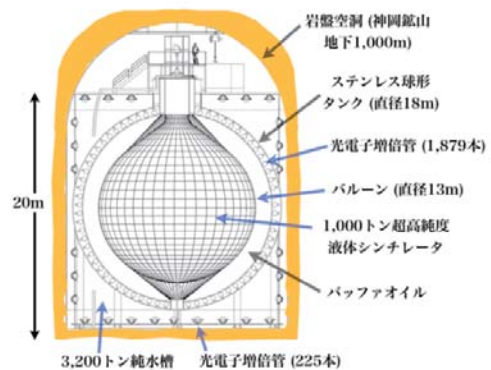
4 NEWS

- 規制委, 川内原発の審査書を了承
- 汚染水対策で凍土壁が本格着工
- 事故後の作業従事者に疫学的研究
- 電中研がリスク研究センター
- 漏えい箇所特定でロボット実証試験
- NUMO 新理事長に近藤駿介氏
- 海外ニュース

サイエンス

54 原子炉ニュートリノの研究から地球内部の観測へ—ニュートリノ科学を推進するカムランド実験

自然界に大量に存在するニュートリノは物質とほとんど反応しないため、その性質は神秘的なベールに包まれていた。しかし近年飛躍的な研究の進展により、興味深い性質が明らかとなってきた。今回は最先端のニュートリノ研究を推進するカムランド実験を紹介する。
 白井淳平



カムランド検出器

29 From Editors

66 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 標準意見受付公告, 英文論文誌 (Vol.51, No.9) 目次, 和文論文誌 (Vol.13, No.3) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会ホームページの「目安箱」(<http://www.aesj.or.jp/publication/meyasu.html>) にお寄せください。

学会誌ホームページはこちら

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

快適な日々をありがとう

巻頭言



評論家

金美齡 (きん・びれい)

台北出身。早稲田大学大学院文学研究科博士課程単位修了。多くの大学で講師を歴任、早稲田大学では20年以上英語教育に携わる。テレビを始め、新聞・雑誌など各種メディアにおいて、家族・子育て・教育・社会・政治等、幅広い分野にわたって様々な提言を行っている。

大型台風8号のニュースが刻々と流れる中、クール便で京都から鍵善良房のお菓子が届いた。即冷蔵庫に収めた。数日前、葛切が食べたいと言ったばかりだった。この季節になると鍵善の葛切が1週間ほど横浜のデパートに出品されることがある、と曾て京都近辺の企業で働いていたスタッフが言う。残念ながら、贈られたのは「れもんかん」と竹筒入りの水羊羹だった。そういえば去年も同じ物を頂いた。葛切は物流にのせるのが困難なのか、今度聞いてみよう。

かねてから節電を実践し、家中のスイッチだけでなく、テレビ局の控室も、スタジオに出る際はオフにするよう心がけている。東日本大震災後、節電が当たり前となったが、「即脱原発」と叫ぶ瞬間湯沸器のような反応をする消費者はそれまで節電を心がけていたのだろうか。

1959年に留学生として来日し、半世紀を超えた。私たち、一握りの台湾人留学生は敢えて海外流浪の道を選び、蒋介石政権に異を唱えていた。ブラック・リストに載った面々は、よくヴェルディの初期の作品「ナブッコ」の「行け、我が想い、黄金の翼に乗って」を歌った。バビロンの虜囚になぞらえ、望郷の思いを託したのだ。1992年、民主化の流れに沿って、リストが解禁されるまで、31年の長きに至って故郷の土を踏むことがなかった。

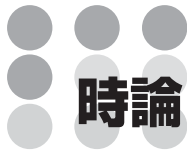
あの有名な合唱曲は、いつ聴いても心を揺さぶる。5月30日、NHKホールで一人、亡夫や亡くなったリーダー(昭和大学名誉教授 黄昭堂)の顔が次々に浮び、涙が止まらなかった。黄氏は少々ヴァイオリンを弾き、音程が確かだった。亡夫も高校時代、男声合唱団をやっていたので、二人はひとときわ声高らかにハモっていた。当時の野党(民進党)が脱原発を主張していた頃、黄氏は「原発問題は与党に反対する道具にはならない。台湾の電力事情を冷静に考えるべきだ」と言っていた。

朝、起きると真っ先にCDをかける。出かけない日、テレビでニュースを見る以外は、一日中音楽を聴いている。BOSEは小型なのによく働いてくれる。どれだけの電力を消費するのか判らないが、電気が無ければ動かない。手づくりのロイヤル・ミルクティはガスだが、トーストを焼くのは電気、それも三回手間をかける。先ず適当な焼き目をつけてバターを塗る。バターがじっくり浸み込むようもう一度焼く。真ん中をくり抜いて食する。残った端にチーズやら鮎のリエットなどを塗り、もう一度焼く。これが朝食の儀式で、一つも抜かせない。最後にオレンジ一つもマストである。こうして幸せな一日が始まる。BGMはバロック、続いてモーツァルト、ショパン、そしてベートーヴェン。時間的な余裕のある午後はオペラを聴く。

オペラはヴェルディ。一つ選ぶとすれば「リゴレット」。去年スカラ座が東京で公演した。数年前、ニューヨークのメトロポリタン・オペラ・ハウスで三回も観た。メトロで有名なのはシャガールの壁画だが、私は大小同じデザインのシャンデリアが好きだ。場所によってサイズは違うが、実に見事だ。開演5分前、平土間の天井から下がっているシャンデリアが目の前をスルスルと上がって収納される、その瞬間「さあこれから至福の時間が始まる」と期待に胸が膨らむ。これも全て電気でコントロールされている。

節電は一応心がけているが、例外は常にある。口が裂けても「脱原発」とは言わない。黙々とインフラを維持している方々にも心から敬意を表し、感謝を捧げたい。

(2014年7月10日記)



IPCC の 2 度シナリオは実現できるのか？



杉山 大志 (すぎやま・たいし)

電力中央研究所 社会経済研究所
上席研究員

東京大学大学院工学研究科修士課程修了。産業構造審議会環境部会専門委員、IPCC 第 5 次評価報告書第 3 部会総括執筆責任者を兼ねる。専門は温暖化防止政策。

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、4月13日、ドイツ・ベルリンで開催された総会で新たな報告書を発表した。筆者は、日本から唯一人、統括執筆責任者として参加した。

今回の IPCC 報告書では、「地球温暖化を 2 度以下に抑制するシナリオ」(以下、2 度シナリオ)について詳しく報告されている。

一部報道では、「IPCC は、2 度シナリオは実現可能であり、世界はそれを目指すべきであると提言した」というものがある。だがこれは間違いである。IPCC は「提言」はしていない。そもそも提言することは禁じられているからである。IPCC は、2 度シナリオとは、どのような技術的対応を意味するかということ、および、その実現のための前提条件について記述している。

あるいは、「IPCC は、2 度シナリオは技術的に可能であり、コストも安く済むことを示した」という報道もあるが、これも誤りである。2 度シナリオの実現のためには、現状からみると、技術と政治の両面で奇跡的ともいえる変化が必要である。これは不可能ではないが、決して容易ではない。以下に説明する。

2 度シナリオとは

IPCC 報告では、いわゆる「2 度シナリオ」が注目を集めている。その骨子は以下のとおりである：

(1) 地球温暖化を産業革命前に比べて 2 度以下に抑制することは、おおむね、2050 年までに世界全体で 2010 年時点に比べて 40～70%の排出削減を意味する。このとき、再生可能エネルギー、原子力、CCS(発電所などから排出される CO₂を地中に埋める技術、carbon capture and storage)の合計による低排出エネルギー供給は 2010 年時点の 3 倍から 4 倍に達する。

(2) このような 2 度シナリオが実現するための条件は、世界の国々が一致協力して排出削減に取り組むこと、および、多くの温暖化対策技術が進歩し普及することである。つまり国際協調と技術革新の両者が条件となる。

前述したように、IPCC は、政策を分析することを義務付けられているが、政策提言は禁止されている (be policy relevant without policy prescriptive)。今回も 2 度シナリオを提言したのではなく、2 度シナリオが実現するための条件を検討して提示した。

2 つの前提条件

ここから先、どのような判断をするかは政治に委ねられる。上記の 1 点目は分かり易いが、2 点めについては説明がある。「国際協調と技術革新の両者」とは、どういうことだろうか？

まず、国際協調について。IPCC 自身が注釈をつけているように、IPCC のシナリオは、現実を大幅に単純化した数値モデルに依存している。そこでは、資源量や技術の効率・コスト等は考慮されている。だが安全保障と国際競争の懸念については一切考慮されていない。これは極めて重要な限界である。なぜなら現在、世界諸国のエネルギー選択において、この両者は最重要な要因だからだ。IPCC が示唆しているのは、2 度というシナリオが実現するためには、諸国が、安全保障や国際競争の懸念を全くすることなく、ひたすら温室効果ガス排出削減に励むことが条件になる、ということである。2 度シナリオでは、例えば中国が、石炭利用を極端に減らして天然ガスを海外から大規模に輸入し、さらには、高価な太陽光発電を大規模に普及させることを想定する。残念ながら、今の世界情勢はこれとはかけ離れている。

では技術革新はどうか。これについても、2 度シナリオには、首をかしげざるを得ない条件がつく。それは、21 世紀後半において、バイオエネルギーと CCS が、現在の石炭や石油に匹敵するような規模で普及するという想定である。これについても IPCC 自身が注釈をつけている。バイオエネルギーは生態系保全や食料安全保障との衝突が懸念されている。CCS については、いまだ商用化されておらず、また具体的な技術開発は遅々として進んでいない。

こうしてみると、2度シナリオは提示されたものの、その実現のためには国際協調と技術革新の両面で、現状からみると奇跡的な変化が必要であることが分かる。

コストは安い、無限大か？

IPCCではコスト試算も行っている。それによると、2度シナリオにおいて、国際協調と技術開発が理想通り進む場合でも、温暖化対策のために、2030年において世界のGDPの1～4%程度の消費が失われるとしている。これだけでも、例えば日本のGDPの1～4%といえば5兆円から20兆円だから、相当な金額である。だが技術革新が停滞したり、国際協調が不完全な場合には、このコストはさらに跳ね上がる。コストは容易にこの数倍になるし、コストが無限大、すなわち実現不可能と試算される場合もある。以上の検討を踏まえて、2度シナリオの実現は極めて難しいのではないかと、との見解があることも記載されている。

コストについては、世界経済全体が成長することを考えれば、わずかであるという意見もある。例えば、2100年までに世界経済規模が現在の3倍、つまり300%になるであろうから、温暖化対策として数%を犠牲にすることは大したことではないという意見である。ただしこれも、上述のような理想的な温暖化対策の実施を前提にした議論である。実際には、コストは無限大にもなりうる。

またしても露呈する国際協調の限界

皮肉なことに、今回のベルリンにおけるIPCC総会で、まさに国際協調が難しいことがまたしても露呈した。「気候変動枠組条約」に関する記述と、「所得区別の排出量」に関する記述の2点を巡って、先進国と途上国の対立が先鋭化した。

途上国にとって、気候変動枠組条約は南北問題を踏まえており、先進国の責任を迫りやすいので、肯定的に見てきた。先進国は、まさにその点を問題視しており、途上国にも排出削減の負担を負わせようとしてきた。今回もこの対立構造が現れた。

所得区別の排出量が争点になったのは、そのような記述をすると、中所得の新興国、特に中国の排出が急増してきたことがはっきりして、同じ「途上国」に分類されるとはいつても、最貧国とは全く違うことが明らかになってしまうからである。中国などの新興国は排出削減の義務を負わされることを警戒してこのような記述に反対した。先進国は、逆の立場から、その記述に賛成した。

この2点についてはもともとの原稿には詳しく記述してあったが、最終的に採択されたものからは記述がほとんど削除されてしまった。

政治と科学の出会いの場所

今回、報告書に圧力をかけたのは、上述の先進国・途

上国の対立構造だけではない。イギリス・ドイツなどの欧州諸国は、2度シナリオについて前向きに書くように強く求め、それは随所に反映された。このように、IPCCは、建前は科学的な報告書ということになっているが、上述のように、実際にはかなり政治の影響を受ける。ただしこの交渉対象となっているのは要約^a部分であって、本文^bまでは交渉対象にならない。このため、要約部分は政治的に随分書き換えられてしまうが、本文は比較的政治の影響を受けずに公表される。実はシナリオは報告書の一部にすぎず、2,000ページにわたる本文には、今後の温暖化対策を考えるうえで有用な情報が満載されている。

原子力についての記述

原子力については、全般に、情報が淡々とまとめられていて、特に目立つ記述はない。一部、発電量全体に占める割合が下がってきた、リスクの問題があるといったネガティブな記述もあるが、ベースロードとしての低排出電源であり、温暖化対策に寄与する旨も記述されている(Nuclear energy is a mature low - GHG emission source of base load power, but its share of global electricity generation has been declining (since 1993) . Nuclear energy could make an increasing contribution to low - carbon energy supply, but a variety of barriers and risks exist: SPM4.2.2)。全体としては、再エネ・CCSと並ぶ低排出電源であること(SPM・6章)、福島での事故以降、原子力の計画を縮小した国もあるが、中国、インド、ロシア、韓国など、原子力発電に最も積極的だった多くの国々では、若干の規模縮小はあったものの開発を継続しており、多くの他の国々も開発に意欲を見せていること(1章)、安全性の改良を含む新型の原子力技術の開発が進んでいること(7章)なども記述されている。いくつかのリーク記事ではこのネガティブな面だけを取り出してIPCCの総意であるかのように報道しているが、これは誤りである。

なお、前述の2度シナリオにおいてはバイオエネルギーやCCSに比べて原子力は目立たない。だがこれは、数値モデル上で「負のCO₂排出」にするためにはバイオエネルギーとCCSの組み合わせしか解に入らなかったという理由にすぎず、これらの技術が他に比べて特段有望であるという訳ではない。また数値モデルの多くは原子力については、経済性の評価というよりは、導入量についての任意の想定をおいている。原子力の導入量についてどう想定するかは研究グループによって大きく異なっている。(2014年6月20日記)

^a正確には、政策決定者向け要約(Summary for Policy Makers: SPM)という。

^b正確には、16章にわたる本文および技術的要約(Technical Summary TS)



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。

規制委，新規制基準に基づく川内原発の審査書を了承

原子力規制委員会は7月16日、九州電力の川内原子力発電所1、2号機を対象とした「発電用原子炉設置変更許可申請書に関する審査書案」を了承した。新しい規制基準に基づいて川内原発の安全性を審査したもので、418ページからなる。地震・津波対策や火山などの自然現象への対策、重大事故時の対策や対処能力、テロ対策などについて、九州電力が提出していた申請内容は新しい基準に適合していると判断した。同委では8月15

日まで、国民からの意見を受け付ける。

なお九州電力は同日、「当社としては今後とも、同委員会の審査に真摯かつ丁寧に対応するとともに、さらなる安全性・信頼性向上への取組みを自主的かつ継続的に進め、原子力発電所の安全確保に万全を期していく」とのコメントを公表した。

（原子力学会編集委員会）

福島第一発電所汚染水対策で凍土壁が本格着工

東京電力福島第一原子力発電所で6月2日、原子炉建屋内への汚染水の地下水流入を低減する凍土遮水壁の設置工事が開始された。1～4号機を取り囲む延長約1,500mに凍結管を1mピッチで設置し、氷点下数十℃

の冷却剤を循環させ凍土壁を造成するもの。14年度末にも凍結開始、15年度上期に凍結完了する計画だ。

（資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ）

福島事故後の緊急作業従事者に疫学的研究

厚生労働省は6月4日、福島第一原子力発電所の緊急作業従事者に対する疫学的研究のあり方について、専門家による検討を踏まえ報告書を取りまとめた。原子力事故対応に伴い11年3月14日～12月16日、緊急被ばく線量限度が100mSvから250mSvに引き上げられており、この間に174人が通常作業の5年間線量限度となる100mSvを超えた。報告書では緊急作業従事者約2万人全員を対象集団とし、原則として対象者の生涯にわたり、過去の研究で放射線影響の可能性があるとされている固形がん、白血病など可能な限り網羅し、心理的影響も含め調査を行う。

対象者は原子力発電所の従事者であることから、事故

前の通常被ばく線量や将来他の発電所で放射線業務に従事した場合の被ばく線量を把握するため、放射線影響協会が運営する中央登録センターからのデータ提供や、医療被ばくの把握も必要となる。また、被ばく実効線量が100mSvを超える従事者には染色体の検査を行うことで、放射線による生体影響に関する評価に資することが期待できるとしている。

厚生労働省では今回取りまとめた報告書を踏まえて、14年度から対象集団の1割（約2千人）を対象としたベースライン研究を開始。15年度以降の本格的な研究に向けた準備を進めていく。

東北電力，東通1号機の適合性審査申請

東北電力は6月10日、東通原子力発電所1号機の新規制基準への適合性審査を原子力規制委員会に申請した。同社ではその前日に立地自治体より、申請を行う上での事前了解を得ている。これにより13年7月に新基準が施行されてから、適合性審査が申請されたプラント

は9社19基となった。

東通1号機は規制委員会では敷地内の破砕帯評価が途上となっており、同委では一定の見解取りまとめを新基準に関する審査入りの条件としている。同機は11年2月より定期検査中。

衆参両院規制委人事案に同意 石渡, 田中の2氏就任へ

2014年9月で任期満了となる原子力規制委員会の島崎邦彦委員と大島賢三委員の2氏の後任として、田中知氏と石渡明氏を充てる人事案が6月10日に衆議院本

会議で、また11日の参議院本会議でも賛成多数により、いずれも同意された。

電力各社体制を整備し取組み, リスク情報活用して自主的な安全性向上へ

原子力発電所をもつ電力8社(北海道, 東北, 東京, 中部, 北陸, 中国, 四国, 日本原子力発電)は6月13日、原子力の安全性向上に向けた各社の取組みを公表した。経済産業省に置かれた事業者による自主的かつ継続的な安全性向上を検討するワーキンググループによる提言を踏まえ、リスクマネジメントの強化、PRAの活用、リスクコミュニケーションの充実について、各社の施策と実施スケジュールを取りまとめたもの。

リスクマネジメントに関しては、各社とも経営トップの関与する社内体制の整備・強化を図ることとしており、東北電力では社長を委員長とする「原子力リスク検

討委員会」を7月にも発足させ、原子力リスクの分析・評価や、リスク低減に向けた対応策など、原子力リスクマネジメント全般について指揮・管理していく。また、実践に当たって社内横断的な部門で構成する「特定課題検討チーム」の設置、リスクコミュニケーションの強化も図っていくとしている。

原電では海外の良好事例や国際標準を参考として、新たに安全性向上の取組み状況を定量的に監視する項目を設定し指標化する「パフォーマンス改善モデル」を導入し、継続的な改善のPDCAサイクルを確実に回していくとしている。

リスク研究センターを発足へ, 電中研が中核組織

電力中央研究所は6月13日、事業者による自主的な安全性向上の取組みに必要な研究開発の中核となる「原子力リスク研究センター」を、14年度上期中を目途に設置すると発表した。

福島第一原子力発電所事故を踏まえ、大地震や大津波、竜巻など低頻度ながら被害をもたらす事象の解明を行い、リスク低減対策に確率論的リスク評価手法

(PRA)も積極的に活用する総合的リスク評価を行い、原子力の安全性向上につなげていく。

また、成果の現場への適用、規格基準化など、具体的な取組みへの反映を念頭に「研究開発ロードマップ」を策定し、「研究開発と成果利用のサイクル」を回すことにより、高い安全性の実現に貢献していく方針だ。

原子力小委, エネ基本計画受け政策の具体化議論に着手

新たなエネルギー基本計画の具体化に向け、分野ごとの検討を行う委員会の一つとなる原子力小委員会が6月19日、初会合を開催した。同小委では安全確保のために必要な技術・人材のあり方について議論していく。初会合では資源エネルギー庁より、今後の原子力利用にあたっての論点として、(1)福島の再生・復興に向けた取

組み、(2)原子力依存度低減に向けた課題、(3)不断の安全性向上の追及、(4)技術・人材の維持・発展、(5)競争環境下における原子力事業のあり方、(6)使用済み燃料問題の解決に向けた取組みと核燃料サイクル政策の推進、(7)国民・自治体との信頼関係構築、(8)政界の原子力平和利用と核不拡散への貢献——が示された。

改正原子力委員会設置法が成立

原子力委員会の所掌事項を見直し、定員を5名から3名に減員する改正原子力委員会設置法が6月20日の参議院本会議で成立した。施行は公布から6か月以内の

政令で定める日。施行前に現在の委員は一旦辞職し、施行後最初の例外として委員長のほか、任命される2名の委員の任期は1人が1年6か月、1人が3年となる。

格納容器漏えい箇所特定に向けロボット実証試験

東京電力は6月24日、格納容器漏えい箇所の特定と補修に関する技術を研究開発するため開発中のトーラス室壁面調査装置の実証試験を行うことを明らかにした。福島第一2号機のトーラス室壁面(東壁面北側)を対象に、カメラ映像を得るための水中遊泳ロボット、超音波ソナーによるドップラー計測映像を得るための床面走行ロボットの2つの装置の性能を約1か月かけて実証す

る。水中遊泳ロボットはトーラス室東壁面北側建屋貫通部(5箇所)の状況や滞留水の流れの有無をカメラ撮影し画像で確認する。床面走行ロボットは同じ建屋貫通部の1か所を選定してトーラス室床面に下したロボットから超音波ソナーで計測し、滞留水の流れの有無が確認できるかを実証する。

ITER 向け製作、超伝導導体が初完成

日本原子力研究開発機構は6月23日、ITER 主要機器の電磁石(中心ソレノイド)で用いる高性能超伝導導体全49本のうち、最初の5本を完成させたと発表した。これらの導体は次の製作工程を担当する米国に25日より、引き渡しを開始。国際合意された製作分担に基づくITER 用機器が初めて海外にわたることとなり、ITER 計画における日本の貢献として重要な節目となった。

中心ソレノイドは、変圧器の原理でITER プラズマ中に大電流を流しプラズマ閉じ込め磁場を作るための超伝導磁石で、総重量は953トン。そのうち、日本が担当

する導体の重量は約700トンに及ぶ。

製作は直径0.83mmの超伝導素線と銅線を5段階に分けて撚り合わせるが、20年間の運転期間で6万回の「繰り返し電磁力」を受けることにより、徐々に性能が低下する課題があった。原子力機構はこの性能低下が、導体を構成する一部の超伝導素線の変形が原因で起こることを突き止め、撚り方の改良を施し高性能化を実現した。

導体の製作は17年まで行い、定期的に米国へ輸送される。

NUMO 新理事長に近藤駿介氏が就任

原子力発電環境整備機構(NUMO)の新理事長に近藤駿介氏が就任した。7月1日付で、同社の役員人事は特定放射性廃棄物最終処分法に基づき、経済産業相の認可を受ける。副理事長には元関西電力社長の藤洋作氏が、また専務理事には前副理事長の西塔雅彦氏が就任した。

近藤理事長は就任会見で、高レベル放射性廃棄物処分は「原子力の利益を享受した現世代として最大限の努力」

が必要との認識を示し、国や事業者とも連携し技術開発や情報提供に取り組んでいく姿勢を表明した。

また、組織再編では広報活動と立地活動を一体的に行うことにより対話活動を着実かつ効果的に進めるため、「広報部」と「立地部」を統合し「地域交流部」を設置。ガバナンス強化を図るため、「企画部」を「事業計画部」に改めた。

海外ニュース (情報提供：日本原子力産業協会)

〔米国〕

環境庁が温室効果ガス排出規制案、 「原子力、技術的に有望」

米環境保護庁(EPA)は6月2日、国内で稼働する火力発電所など電力部門が同国全体の温室効果ガスの約3分の1を排出していることから、2030年までに同部門の排出量を05年水準から30%削減するという同国初のガイドライン、「クリーン電力計画」を提案した。15年6月までに最終規則として公布するため、公聴会を7

月中旬に4か所で開催するほか、一般からのコメント募集で120日間を設定している。

これはオバマ大統領が提唱する温暖化防止行動計画の重要な一部分という位置付けで、各州や電力部門ですでに進行中の活動に基づき、それらを一層効率化する「常識的なステップ」を2030年までに実行に移すという内容。具体的にはCO₂排出量を05年レベルの30%分削減するほか、粒子汚染物質や窒素酸化物、二酸化硫黄を25%以上削減する。また、エネルギーの効率化や電力システムへのデマンド軽減により電気代を約8%縮小するとしている。

これらの実行に際し、各州政府はそれぞれの状況に最も適した発電ミックスの選択など、独自の経路による目標達成プランの策定が許される。ただし、それらは2016年6月までにEPAに提出しなければならない。

GAOが次世代炉研究で調査、原型炉の建設活動勧告

高温ガス炉（HTGR）など米国における次世代原子炉の研究開発について調査していた米国政府監査院（GAO）は6月23日、「次世代原子力プラント（NGNP）」プロジェクトの下で原型炉建設プランの再開に向けた戦略を練るよう米エネルギー省（DOE）に勧告する報告書を公表した。2021会計年度末までに原型炉を開発するという同プロジェクトの目標達成を断念した原因が産業界とのコスト分担問題であったことから、これを解決するアクションが必要だと言明している。

GAOは連邦議会の要請に基づき、政府機関の財務検査や政策プログラムの評価を通じて予算の執行状況を監査する機関。今回はDOE原子力局（NE）による先進的な原子炉設計の研究開発活動に関して、そのアプローチ手法と優先対象の決め方などを審査した。NEのアプローチでは対象技術を①HTGR、②ナトリウム冷却高速炉、③溶融塩冷却高速炉——に絞る一方で、その他の新型原子炉技術にも予算を提供。産業界や学会などと協同で複数の原子炉技術研究を支援し、その成果を産業界のために次のステップである建設と商業化につなげるのが究極の目標となっていた。

こうしたアプローチは米国の将来的なエネルギー政策の変更に対応可能という柔軟性が評価される一方で、DOEの原子力諮問委員会からは「原型炉建設を保证するために対象技術の数を絞るべきだ」との批判があった。NEは資金提供する優先順位やプログラムを設定する際、内外の審査記録を活用。支援技術の中でもHTGRは短期的に建設・商業化に移行する可能性が最も高く、NEは2005年エネルギー政策法に基づくNGNPプロジェクトの下で同技術の研究開発を推進していた。

しかし、DOEはいくつかの問題点を理由に同技術を原型炉の設置段階に進めないことを2011年に決定。例として、NEと産業界の間のコスト分担レベルや、コスト分担すべき段階や特定の活動といった点で両者が合意に至らなかったことを挙げた。NEはその後もNGNPプロジェクトの研究開発を継続するも、設置段階を再始動させるのに必要な課題克服戦略を策定していない。

こうした現状からGAOは、NGNPの原型炉建設というエネルギー政策法が課した要件を満たす準備として、初期設計のパラメータ選定、あるいは選定予定スケ

ジュールについて議会に報告すべきであるとDOEに勧告。同報告書はその際、課題点に関する最新情報、プロジェクトの第2段階への移行を阻むその他の課題の概要を含めるべきだとした。具体的には①官民パートナーシップの構築状況、②再開の正当化条件を含めたプロジェクト戦略、③サイト選定やコスト分担といった課題への取組みにおける必要に応じた法案提出——を挙げている。

〔アルゼンチン〕

国内で3基目のアトーチア2号機が初臨界

アルゼンチンで原子力開発を担当する計画投資サーピス省は6月3日、同国で3基目の原子炉となるアトーチア原子力発電所2号機が初臨界を達成したと発表した。今後は出力レベルごとに機器システムの性能確認試験を実施し、商業運転の開始を目指す。

首都ブエノスアイレスから115kmの地点に立地する同炉は、独シーメンス社が設計した出力74.5万kWの加圧重水炉。1982年に着工したが、資金難により94年から06年まで建設作業が中断した。しかし、03年にC・フェルナンデス現大統領の夫であるN・キルチネル前大統領は国家的な原子力開発計画の推進を提唱。作業が再開されたという経緯に基づき、同炉の呼称は5月29日付けで「N・キルチネル原発」に改められた。これに伴い1号機（加圧重水炉、35.7万kW）も、前世紀に現政権の与党を率いて大統領選に3回当選したJ・ペロン氏の名が付けられることになった。

2号機の初臨界達成後、事業者の国営原子力発電会社（NA-SA）の社長に伴われて計画省のJ・デビド大臣が同発電所を視察。発電所スタッフの労をねぎらうとともに、建設作業が重要な節目を迎えたことは国家的なプロジェクトが成熟の域に達したことを意味するとコメントした。

〔英国〕

中国と民生用原子力等で協力強化、中国製原子炉導入も視野に

英国エネルギー気候変動省（DECC）は6月17日、英国と中国の両政府が民生用原子力と温暖化防止の両分野における協力強化で協定に調印したと発表した。英国が進める原子力新設計画への中国企業参入に道を拓くとともに、将来的に中国製原子炉の導入も視野に入れた内容。現在、英国で最も進展しているヒンクリーポイントC計画に、中国の原子力2企業が30～40%出資する

という昨年10月の両国政府間の協力覚書が具体化することになる。このような中国からの投資拡大により、英国政府は今後数年間に国内で数億ポンド規模の経済効果が期待できるとしている。

これら協定への調印は、中国の李克強首相によるD・キャメロン首相との年次会談に合わせて英国で行われた。両国政府の共同声明によると、今回の両国間の戦略的連携強化分野の中でもエネルギー分野の協調は主要な柱という位置付け。クリーンで低炭素なエネルギーへの移行、将来にわたる潤沢で盤石なエネルギー供給が目的であることから、両国の民生用原子力協力強化を歓迎するとした。

今後は両国の企業が双方の民生用エネルギー・プロジェクトに参加可能になるため、英国の原子力新設計画に対する中国の投資と参加、その他の原発サイト開発を中国企業が主導する道が拓かれる。また、英国規制当局による厳しい要件を満たせば、中国製の原子炉を中国が英国で所有・運転する可能性もあると明言。この連携を通じて英国に参入する企業は英国原子力市場におけるビジネスチャンスを最大限に活かす最良の立場を将来的に占めるとの認識で両国は一致した。

また、両国とも可能な限り早急にシンクリーポイントC計画を成功に導けるよう協同準備を整えているところ。原子燃料供給チェーンでより良い協力関係を築くための協定調印や、廃棄物処理・廃止措置を含めた分野の協力促進で合意に達したことを歓迎している。

一方、温暖化防止に関する協力促進協定は、両国がこの分野で初めて調印したもの。温室効果ガスの排出削減とエネルギー供給保障強化を目的とした両国による広範な協同作業の一部分で、2015年にパリで開催される国連気候変動枠組み条約・締約国会議の場で、法的拘束力を持った世界レベルの意欲的な対策策定で合意に達するよう努力を傾注する。

共同声明の中で英国は、原子力を将来的な低炭素エネルギー・ミックスで主要部分を担う確実で信頼性の高い技術であると表現。今回の声明はこの分野で中国側と協力を継続していく基盤になるとしたほか、廃棄物管理や廃止措置、研究開発などの民生用原子力に関する一層広範な課題について協同作業の拡大を期待するとしている。

〔フランス〕

原子力設備容量に上限設定、担当相がエネルギー移行法案

フランスのエコロジー・持続可能開発・エネルギー省のS・ロワイヤル大臣は6月18日、2050年までの長

期的なエネルギー政策を展望した同国の新たなエネルギー・モデルとなる「エネルギー移行法案」の概要を内閣に提案した。F・オランド大統領が公約した「2025年までに原子力発電シェアを50%まで削減する」方策として、エネルギー源を多様化するとともに、原子力の設備容量を現状レベルの6,320万kWに制限するなどのアクションを提示。今後は関係機関が審議した上で、2015年初頭の発効を目指して7月にも議会に提出する計画だ。

ロワイヤル大臣が提案した新しいエネルギー・モデルでは、地球温暖化防止とフランス国内のエネルギー消費量削減が主要な目的であり、国民や産業界、国などによる共同アクションの枠組み、および中長期的目標として次の5点を明示。すなわち、(1)温室効果ガスの排出量を2030年までに90年比で4割削減するというEUの目標に貢献、(2)30年までに化石燃料消費量を3割削減、(3)25年までに原子力発電シェアを50%まで削減、(4)30年までに再生可能エネルギーの発電シェアを40%に増加、(5)最終エネルギー消費量を50年までに半減——である。

原子力の項目では安全性、および国民への情報開示の強化がポイントとなる。このため、フランス原子力安全規制当局(ASN)による管理原則としてまず、(1)事業者による一義的責任、(2)安全性改善の継続、(3)ASNの独立性、(4)透明性と国民への情報開示——を列挙。その上で、高度な違反を犯した事業者への処罰権限をASNに与えることや、地元情報公開委員会を設置するなど具体的なアクションを提示している。

原子力発電シェアの削減については、閉鎖させる原発名を特定していない一方、総設備容量に6,320万kWという上限を設けると提案。このため国内の原子炉58基すべてを操業しているフランス電力(EDF)では、5年毎に区切った複数年プログラムの中で発電設備の調整戦略を策定し、議会審議にかけなければならなくなる。

アルストムがGEの買収案受入、原子力で合併事業

フランス大手重電機メーカーのアルストム社は23日、同社の取締役会が米重電大手GE社による修正版の買収提案の受け入れを満場一致で決めたと発表した。同提案でGE社は、フランス政府に原子力機器の製造関連で意思決定上の拒否権と、アルストム社の蒸気タービン「アラベル」技術の知的所有権も付与するなど、エネルギー事業でフランスのプレゼンス維持・強化に最大限配慮。アルストム社の発電・送配電事業買収により、世界的に競争力のある企業となるべく、2015年中にも手続

きを完了する考えだ。

GE 社が 4 月末にアルストム社に提示した買収案ではフランス政府が国内原子力産業の独立性などの点で懸念を表明していたことから、GE 社は 7 週間にわたって政府と協議。独シーメンス社と三菱重工業が 16 日、GE 社案に対抗する広範な事業提案をアルストム社に共同提案した後、19 日付けの修正提案として、アルストム社の資産を合併吸収するのではなく、資産査定額を据え置いたまま対等の立場で事業提携する内容を提示した。

GE 社は今後、当初の買収提案どおりアルストム社の火力発電および再生可能エネルギー・送配電事業を総額 169 億ドルで買収するが、手続き完了後に送配電事業と再生可能エネルギー事業のそれぞれについて、フランスを本拠地とする 50 対 50 の合併事業を立ち上げることになる。

また、原子力発電機器の製造・販売、および蒸気タービン機器についても「グローバルな原子力・フランス蒸気タービン連合」を創設し、フランスにおける関連技術の進展とセキュリティを保証する方針だ。GE 社とアルストム社が 50 対 50 の比率で出資するほか、フランス政府も優先株を保有。2 名の取締役指名と、原発技術とセキュリティに係わる問題について拒否権の発動が可能となる。

さらに、「アラベル」技術の知的所有権はフランス政府が完全所有する特定目的の組織に移転。仏アレバ社とフランス電力による原子力プロジェクトにアラベル技術を提供する意思が GE 社にない場合、フランス政府が第三者に同技術の使用許可を与えることができるとしている。

〔フィンランド〕

ハンヒキビ新設計画で「原則決定」を補足

フィンランドの雇用経済省(TEM)は 6 月 2 日、ハンヒキビ原子力発電所建設計画の「原則決定(DIP)」を補足する改定版の環境影響評価(EIA)報告書について見解を表明するとともに、DIP の補足申請を 8 月に予定されている政府審議に回すとの考えを示した。

TEM は EIA におけるいくつかの不明点を追加で説明するよう事業者のフェノボイマ社に通達。同社は原発からの温排水が植物相や動物相といった環境に及ぼす影響についてさらなる調査を実施し、遅くとも来年 6 月末までに結果を提出しなければならない。

同計画に関する DIP は 4 年前に政府と議会が承認したが、その後、フェノボイマ社は設計原子炉の出力を 120 万 kW に変更。最終的な受注企業であるロスアト

ム社が当初の DIP 申請書に候補として記載されていなかったことなどから、今年 2 月に改定版の EIA を TEM に提出していた。

また、フィンランド放射線・原子力安全庁(STUK)は 5 月 23 日、同計画の予備的な安全評価報告書を TEM に提出した。同報告書は、安全性に関する DIP の変更部分を補足する内容。同原発は安全に建設され得るとの見解を示す一方で、60 もの電力多消費企業が共同所有するフェノボイマ社に対しては、新設炉の安全性を評価・保証できるような組織体制と管理システムの構築が必要だと指摘した。

想定設計の変更については建設計画の進展のみならず、同社の組織体制や財源、運営面での展開にも大きく影響したと評価。規制当局に提出する包括的な文書の作成能力、要件を満たした設計の管理能力などに疑問を呈した。同社は DIP の有効期限である 15 年 6 月までに建設許可を申請する必要があるが、STUK は許認可手続きで次の段階に進む前に、同社が速やかに専門的知見と行動力を備えねばならないと言明している。

〔欧州〕

理事会代表委が安全指令改定を了承し、ピアレビュー導入

欧州理事会の常駐代表委員会(COREPER)は 6 月 11 日、2009 年の原子力安全指令を改定するという欧州委員会(EC)提案に加盟各国が合意したことを確認し、了承した。改定版安全指令は福島第一原発事故の教訓、その後 EU 域内の原子力発電所で行われたストレステスト、および最新の国際的な安全基準に基づいており、欧州議会も今年 4 月、同提案に対する支持見解を承認していた。欧州理事会が正式に同提案を採択すれば、2017 年から域内で 6 年毎のピアレビュー制度実施が義務付けられるほか、一般市民に対する原子力施設の安全情報公開を改善するなど、安全性と透明性の継続的な促進に寄与していくと見られている。

改定版の安全指令は、潜在的な原子力事故の影響を抑えるとともに、原子力施設の立地から設計、建設、起動、操業、廃止措置に至るすべての段階で安全確保に取り組むという目標を EU 全域レベルで導入することを目指す内容。昨年 6 月に EC が提案していたもので、各国規制当局の役割と独立性を一層強化するほか、原子力施設周辺の規制当局間で緊密に協力・協調、情報交換するよう促している。



左から荒井氏，向氏，澤田氏

「もんじゅの過去・今・これから」

(独)日本原子力研究開発機構 敦賀本部 プロジェクト推進アドバイザー 向 和夫
 同 敦賀本部 高速増殖炉研究開発センター プラント保全部 技術主席 荒井 眞伸
 同 敦賀本部 高速増殖炉研究開発センター プラント保全部 保修計画課 課長 伊藤 和寛
 同 敦賀本部 高速増殖炉研究開発センター 技術部 技術課 技術副主幹 大川内 靖

司会 東京工業大学 澤田 哲生 (本誌)

エネルギー基本計画で、「もんじゅ」を進めることが改めて明確になった。しかし、その運転再開時期については、いまだに不透明のまま。 「もんじゅ」をめぐる現場は今、どうなっているのか。一方で、日米原子力協力協定の改定が2018年に迫る。この時まで「もんじゅ」が運転を再開していなければ、日本に認められている核燃料サイクル政策の実行に悪影響を及ぼす可能性がある。これにどう対処していけばいいのか。

主要機器以外での点検項目で
 1万件近い手続き上のミスがあった

澤田 今日「もんじゅの過去・今・これから」という

テーマで、皆さんと議論を深めたいと思います。まず、このテーマを選んだ理由を述べます。原子力機構は新しい規制基準への対応、「もんじゅ」敷地内の断層問題、あるいは点検漏れなどの件でかなり苦労しているように見

えます。「もんじゅ」は、なぜこれほど長い時間をかけても、本格運転までこぎつけないのか。本格運転開始までには今、何が 필요한のか。さまざまな疑問があります。いまこそ当事者が語り、浮き彫りにされた課題を広く共有するべきだと思います。宝を持ち腐れにしないためにも。それがこの企画の趣旨です。

さて、1万点ほどの点検漏れがメディアで報じられました。まず、これについて。

荒井 今回の「もんじゅ」の保守管理の不備の問題では皆さんに大変ご心配をおかけしています。プラントの保全計画は、安全上重要な機器であろうが、そうでない機器であろうが、我々が決めた計画に則り、しっかり行うべきものです。しかし、その計画については、低温停止状態というプラント状態に適した点検内容に十分になっていなかったなど、そのような点を改善してきているところではあります。

ところで、「点検漏れ」と報道されましたが、「プラント安全にとって必要な点検をしなかった」わけではなく、現在のプラント状態でプラント安全に直結することのない設備について手続きの不適切さ等もあり計画どおり点検を行えなかったのが、「保守管理の不備」という言い方が適切だと思います。

一方で原子力発電所の事故には、さまざまなレベルのものがあります。例えば配管が破裂するような事故につながる可能性のある点検もあります。しかし、原子力機構で今回、問題になったことは、そのような大きな事故をもたらす可能性があるものではなく、「もんじゅ」の現在の長期間原子炉が低温停止状態では、プラント安全、性能維持には直接かかわらない機器で1年に1度は外観を確認した方がよいというものも多く問題になりました。なお、「もんじゅ」は平成22年に14年半ぶりの運転再開を果たし、炉心確認試験を計画どおり無事終了しています。その後燃料交換用機器の炉内中継装置が落下し、今も「もんじゅ」は止まっています。

澤田 直ちに大きな事故に結びつくような点検漏れはなかった。1万点の点検漏れは、例えば周辺機器などで行う点検だった。

荒井 そうです。工程が変更になった際に、設備の健全性は担保できていることをきちんと評価した上で、例えば点検を1年後に延ばしても健全性を担保できるという技術評価をするという手続きをとった上で点検を延ばすべきであったのに、その手続きを怠り、期間を過ぎた時点で点検を行ってしまったというのが、実情です。

澤田 そこは反省するところですね。

伊藤 しっかりと反省しています。

向 点検時期を変更する手続きが、ルールにのっとってきちんとなされていなかったものが、全体の4分の1から5分の1近くありました。それらの合計が1万点近くになります。残りはルールもきちんと守ってしっかり

やっていた。だから、原子炉が低温停止状態にある現在の「もんじゅ」においては、プラントが直ちに危険な状態になることはない、原子力規制委員会からも評価していただきました。しかし、管理や保安全管理の仕方に不十分などがあったという指摘をいただいた。それはその通りで、それが点検漏れと報じられました。

澤田 それは、安全文化の劣化だと指摘された。ではなぜ、そうなってしまったのですか。

伊藤 我々が作った保全計画では、点検する対象となる機器と、それを点検する間隔を決めています。さらに、点検間隔などを変更する際のルールをつくっていますが、ルールに沿った変更手続きを怠りました。さらに、その保全計画には、建設段階のものと供用開始した後のものがあります。しかし、「もんじゅ」はまだ建設段階なので、建設段階の保全計画しかありません。

澤田 ちょっと待ってください。「もんじゅ」はまだ、建設段階なんですか。

伊藤 そうです。規制上では、使用前検査に合格するまでは建設段階というカテゴリーに入ります。

澤田 でも動いたことがあるじゃないですか。

荒井 あれは試運転で、まだ建設段階なんです。

伊藤 これまで2度の試運転を行って今に至っているのですが、100%出力運転を行い、使用前検査に合格すると、そこで建設段階が終わり、供用開始となります。なお、今の保全計画は、例えば点検間隔なども、供用開始後の運転中のプラントを念頭において作ったものですが、工程変更により供用開始が遅延して、いまだ原子炉停止期間であっても、「運転中」のものをそのまま使っています。だから、例えば点検間隔なども、原子炉運転中の本来の設備機能が要求される状態ではないので、もっと長くするなどの整理をするべきですが、なされないままに、適用しているところがあります。

澤田 95年の試運転中にナトリウム漏れを起こし、それから長い時間が立ったために、そのような管理が甘くなったという印象があります。最近、原子力機構では職員を対象にアンケートを行い、「もんじゅ」の運転再開



左から大河内氏、伊藤氏

について聞いたところ、多数の職員が、「もんじゅプロジェクトを進める自信がない」と回答したとの報道がありました。職員はあまりやる気がないと報道もあったように思います。そうなんですか。

大川内 原子力機構が職員を対象に行ったアンケートの設問の意図が正しく伝わってなく、「もんじゅに配属された場合、「もんじゅ」のプロジェクトを進める自信がありますか」というものです。また「もんじゅ」に携わっている職員を除く全プロパー職員が回答対象で、その中には研究職や事務職も含まれます。

澤田 それはおかしいですよ。プラントオペレーションとは無縁の人に、「自分がプラントオペレーションをやれと言われて自信ありますか」と聞いているようなもので、「ない」と言うしかない。この質問の趣旨は何ですか。

大川内 この質問は研究職や事務職といった職種に関係なく、機構のみんなで「もんじゅ」のことを考えて、どうサポートしていくか、機構全体としてどうプロジェクトを進めるかということ職員一人ひとりが考えるきっかけにしてほしく、聞いたものです。

澤田 これはアンケートの設計がまずいのではないですか。

向 外部有識者(第三者)による「もんじゅ改革検証委員会」においてきちんと説明されたのですが、それが「もんじゅ」の所員がやる気がないというような誤解を招く報道になりました。

伊藤 この設問では「もんじゅ」職員は対象外になっています。けれども「もんじゅ」で働く私たちみんなは、何とか頑張って運転再開にこぎつけようという気持ちで一致しています。それは肌でも感じとることができます。

澤田 松浦理事長も核燃料サイクルについての思い入れが相当あり、だから「もんじゅ」を何とか動かさなければいけないということで、毎週のように敦賀へ出かけて所員と対話をされていると聞きます。その効果は上がっているのですか。所員の反応はどうでしょうか。

荒井 その効果は大きいと思います。松浦理事長の改革に対する真摯さと人柄とが、直接対話することにより伝わり、職員の気持ちを確かに動かしていると思います。職員には松浦理事長の思いと熱意がしっかりと伝わっています。これは現場の職員からも直接聞かれます。

澤田 4月にエネルギー基本計画が閣議決定され、「もんじゅ」については「廃棄物の減容、有害度の低減、核不拡散関連技術の向上のための国際的な研究拠点と位置付け、…もんじゅ研究計画に示された研究成果を取りまとめることを目指し、…国の責任の下、十分な対応を進める」と記載されました。このように位置づけられたのは、職員にとって励みになっていますか。

伊藤 もちろんそれは励みになっています。全体とし

て、将来の目標である運転再開へ向けて、やるべきことをやるという機運が盛り上がってきています。

澤田 ここにいる方々は保全やオペレーションに携わっている、あるいは携わっていた。そこで皆さんたちにお伺いしたいのですが、「もんじゅ」はいったい、いつごろ動かそうですか。もちろん、新しい規制にクリアするなどのいろんな条件が整わないと無理でしょうが、皆さんの相場観ではどうでしょうか。

伊藤 運転再開の前にいくつかのステップがあります。最初が原子力規制委員会から今、受けている事実上の停止命令の解除。次が新規規制基準への対応、その次に運転再開というステップになります。それに向かって確実に進んでいきます。

澤田 停止命令はどうやって解除してもらうのですか。

伊藤 保守管理の不備をきちんと直し、自らが行う品質保証活動や保全活動をきっちりとやっていくことです。

向 保安規定はもともと、安全にプラントを運営するために必要な基本的な事項を決めたものです。だから、最初は物理的で機械的なことがらを規定したものでしたが、QMS(品質マネジメントシステム)が盛り込まれたときから、安全文化のようなソフトなものが入ってきました。

伊藤 このため今の保安規定の中には、品質保証や安全文化の条項が入っています。

澤田 その安全文化というのは、どういう文言で入っているんですか。

伊藤 理事長が安全文化を醸成するための活動の方針を定め、本部の部長が活動の施策を立案し、それに基づいて現場が活動計画を立てて実施する仕組みです。1年間活動した後に評価をして、次の計画へ向けて改善していきます。

澤田 安全文化って何ですか。理事長は何て言っているのですか。

大川内 理事長は「安全道」と言っています。安全はここまでやれば完璧で、ここまでやれば終わりですというものではありません。その道を究めるという日本独特の考えで、常に上を目指して行ってほしいと言われていました。

向 もうこれで大丈夫だと思った時から、安全文化は劣化しはじめるということですよ。

荒井 「もんじゅ」は今、保安措置命令を受けて、性能試験の準備作業を止められています。保安措置命令を解除するためにはいくつか課題があります。一つはやるべき点検を全部やること、点検をしたらきちんとそれを記録に残すことです。これらが完全にはなされていなかったため、不十分な点検と評価したものはもう一回点検をやり直しています。もう一つは保全計画を見直すこと

で、身の丈に合った、自分たちでできる保全計画にすることです。

澤田 いつごろまでにやれそうなんですか。

荒井 検査対象機器は全部で4万8千あり、点検項目は9万6千あります。十分な点検になっているか点検記録をもう一回見直しているところです。不十分な点検については再度点検を行います。一日も早く終わるように取り組んでいます。

澤田 これらの点検は、普通の原子力発電所でも同じように、きちんとやっておられるわけでしょう。なぜ「もんじゅ」では、それができなかったのでしょうか。

荒井 電力は平成21年に保全計画を入れる前に、相当な準備をしてきました。また、電力は昔からの運転経験と、それに基づく保全の経験があります。その結果として、電力がやっている保守活動やノウハウはどんどんグレードアップしていきました。けれども私たちは、そこをキャッチアップできていませんでした。

澤田 とはいえ、「常陽」での経験はある。やはり発電炉と実験炉では違うということでしょうか。そもそも原型炉にどうして、商用発電炉と同等のものを求めなければいけないのでしょうか。特例はありえないのでしょうか。

向 軽水炉には膨大な運転経験があり、それをもとに保全計画を立ててきています。従来13ヵ月でやってきた定期検査の間隔を、18ヵ月や24ヵ月に延ばすことができたのは、軽水炉では十分な運転経験と保守経験があったからです。しかし、「もんじゅ」の場合は運転経験がないままに、軽水炉と同じステージに立ってしまいました。「常陽」の経験はあるが、「常陽」とは異なる「もんじゅ」特有の部分もあり、それは「もんじゅ」の運転経験を通じて評価し自分自身で作り上げていかなければならない部分があります。

だから今の段階で、100%完全な保全計画を作るというのではなく、例えば前回の試運転再開の時のように、それぞれの立場を踏まえた上で規制側がそばにいて、ある意味一緒に安全確認しながら立ち上げ、その間に必要な各試験をこなしながら、その中で適切な保守管理、運転管理というのを作り上げていくというのが理想的だとは思っています。規制体系を変えるというのではなく、今の規制の中で、国がきちんと確認しながらやっていくことはできると思います。

■ 日米原子力協定が2018年に改訂される 「もんじゅ」の動向がこれに影響を与える

澤田 エネルギー基本計画では、「もんじゅ」は国が責任を持ってやりますと言いました。そのために国がやるべきことが、そこにもあるような気がします。さて、荒井さんは定年まであと何年ですか。

荒井 7年です。

澤田 その間には何とか、「もんじゅ」を動かしたいですね。

荒井 私は6年後の2020年東京オリンピックの時には、「もんじゅ」をちゃんと動かしたいなと思っています。明確なマイルストーンがあるわけではありませんが。

澤田 素人的な考えからすると、長い間止まっていた「もんじゅ」は、あちこちがさびついているのではないかと懸念があります。現場を知っている人に聞きますが、本当のところはどうなんですか。

大川内 きちんと点検して手入れしているので、本当にぴかぴかです。モニターは最新のものではなく、旧式のものもありますが。例えるならば、高級外車を苦勞してやっと手に入れた。でも20年間、車庫に入ったままで、ずっとぴかぴかのまを維持してにらみ続けているようなものだと思います。

澤田 途中で少し、動いたのではないですか。

大川内 試しにエンジンをかけた程度のことです。ただ、車庫でアイドリングしたところで止まってしまいました。

澤田 一度も発電していないんですか。

荒井 平成7年の試運転の時は発電しました。平成22年の時には発電していません。

澤田 「もんじゅ」の炉心と1次系、2次系はそれぞれ別々のメーカーが作ったもので、メーカー間の連携があまりうまくいっていないということはありませんか。

向 「常陽」や「もんじゅ」、「ふげん」のような新型炉については、炉メーカー1社だけで責任を持って開発を担当するというようなことは無理でした。このため、我が国のメーカーのFBR技術習得ということで「常陽」と「もんじゅ」では、担当する系統を変えながら勉強していただいた経緯があります。「常陽」の場合は幹事会社を置きましたが、「もんじゅ」の場合は高速炉エンジニアリング株式会社をつくり、そこにメーカー4社のエンジニアが来て全体の設計調整をやった。ですから、各社が分担してやっているから動きにくいとかいうのはありません。

澤田 発注者であるかつての動燃と、設計や製作をしたメーカーとは技術力の差がある。要するに現場や機器を一番よく知っているのはメーカーではないかと。これは普通の軽水炉でも同様で、メーカーの人たちは自分たちの方が技術力を持っている、自分たちが作っているのだという意識があります。両者の関係はどうでしょうか。

向 ステージごとに異なります。「もんじゅ」では設計まではメーカーと、当時の動燃の設計担当者が一緒にやっていました。コンセプトや基本的な安全の考え方は動燃がまとめていましたが、技術開発分野では動燃もメーカーも一緒になってやりました。詳細設計では、動燃とメーカーで役割分担がありました。

ただ、止まっている時間が長くなる中で、設計に携わってきた当時の動燃やメーカーの担当者がどんどんいなくなってきた。私たちもメーカーも当時の技術力が維持できていない心配がある。今後、「もんじゅ」を動かす際には、当然不具合があると予想される。そんな時にメーカーがサポートできるかという心配があります。

荒井 私たち職員でも、「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故前に試運転をやった経験者は少なくなっている。一方で新しく入った職員や他部門から異動で来た職員、中途採用で他の会社から転籍してきた職員がいます。プロパー率は上がっています。

なお、今は過去の点検を調べているところで、これが終われば、新しく増えた職員とともに、試運転準備へ向けた活動をしていくことになり、おのずとモチベーションは上がっていくと思います。

澤田 今よりモチベーションを上げるためには何が必要でしょうか。

荒井 日々行う仕事に未来志向を感じる必要があると思います。

伊藤 自分のしていることの日々の成果が見えてくると、モチベーションにつながるのではないかと思います。

向 今までは、「もんじゅ」が本当に廃炉になるかもしれないという強い不安がありました。けれどもエネルギー基本計画で「もんじゅ」を使うことが明確になり、現場は本当にほっとしました。もう一つは、「もんじゅ」の再開のめどを示すこと。例えば3年かけて運転は再開するという大方針を示すこと。そして、それまでにやるべきことを全力を挙げてやれという大号令をかける。そういう具体的な将来が見えたら、もっとモチベーションは上がります。

澤田 そういう大号令が理事長からほしいですね。なお2018年に日米原子力協力協定の見直しがあります。それまでに日本は、核燃料サイクルの中核施設である「もんじゅ」を動かさなければならぬと思います。そうでないと、この日米原子力協力協定の中にフルセットで入っている日本の核燃料サイクルについて、日本はやる気がないと言われかねません。2018年までに「もんじゅ」を動かせと誰か言わないのでしょうか。これは政治の責任です。下手をすると、せっかく勝ち取ったサイクルフルセットを断念させられかねません。

向 それを言うのは政治だと思います。日米原子力協力協定で今の日本が獲得した権利を国がきちんと保護するためには、六ヶ所の施設と「もんじゅ」は動かさなければなりません。

澤田 遅くとも2017年までに動かさなければだめですよ。そういうことをぶち上げないと。政治家もよくわかっていませんから。

向 そうですね。この協定は、アメリカから外交で勝

ち得た貴重な成果ですから。それと同じことを韓国が今、欲しがっています。日本ができないのなら、韓国がやると訴えています。だから、次の日米交渉をきちんと成立させるためには、六ヶ所と「もんじゅ」は少なくとも動かしておかないとアメリカは本気にしてくれません。そうでないと、ただプルトニウムをため込むだけだと批判される。少なくとも動くという展望が見えないとだめですね。

澤田 「もんじゅ」を動かす。そのために経営層がアクションできませんか。皆さんが、やる気満々だということが見えてくれば、いろいろと手はあるのでは。

荒井 現場からすると、最初のステップが「もんじゅ」の運転再開に向けた準備作業禁止の保安措置命令の解除です。

澤田 規制はいまだに、過去の履歴のうんぬんにこだわっている。大切なのは今の状況や、今やっている検査の方ではないでしょうか。

荒井 今は、点検の方法も見直してやり直しています。過去の悪さ分についての検査での指摘は厳しく、担当者は委縮している部分があります。それが個人の自信や誇りの喪失につながっている可能性もあります。過去の悪さ分については一定の総括をしたうえで、できるのであれば、今やっていること、これからやるところを見て、評価をしてもらえればと思います。

澤田 規制庁が、「もんじゅ」は未熟だから、よりよい保守管理を目指して一緒に改善していこうと、前向きに指導するようにはならないでしょうか。原子力規制委員会、原子力規制庁と事業者との間に、コミュニケーションが欠如していると思います。例えば米国のNRCは、事業者とともに改善に取り組むという姿勢でやっています。

向 NRCは途中から、そう変わりましたね。

澤田 NRCは技術力があり、よい人材を確保している。きちんと技術を知っている人がいる。翻って日本の規制側の人材の技術力は、どうでしょうか。本来の規制のあり方からずれてはいないでしょうか。さて、もう一度聞きます。モチベーションを上げるためには何が必要か。

荒井 「もんじゅ」を実際に運転して、リアルに物が動いて運転して保守することで、職員の技術力が向上し、さらにはその経験を共有していく。その道筋をつけるためにも、数年後までには「もんじゅ」を運転再開するという目標を明示することでしょう。

澤田 2018年の交渉時には、もう運転しているという実績を見せないとだめですよ。そうでないと、この日米交渉がうまくいかない可能性が大いにあります。今から2年のうちに動かそう——私の持論です。

「もんじゅ」は世界の財産

荒井 エネルギー基本計画では「もんじゅ」の廃棄物減容の方が注目されています。これも「もんじゅ」がきちんと100%で運転して初めて、増殖の性能も廃棄物減容の能力を持っていることも確認できる道筋に入る。我々とはとにかく、100%の出力できっちりと運転し続ける。そしてちゃんとメンテナンスしてまた立ち上げる。これをする、これが現場の人間にとっては一番大切だと思います。それを海外の人やメーカーの人とともに現場を経験して、一緒に技術を伝承していく。

「もんじゅ」の運転を始めると、いろんなことが起こります。わずかですが蒸気が漏れたりすることもあるかもしれません。その時にきちんと原因を見つけて対応していく。その過程で現場の技術者に本当の技術力が身についていく。FBRはやはり、人類のためにはどうしても必要な技術です。そのためには、その利用を成し遂げられる人と技術を育てていく、これがものすごく大切なことだと思います。

伊藤 私は高速炉がやりたくて動燃に入りました。「もんじゅ」を動かす、しかも増殖する、ウラン238を効率よく使って将来のエネルギーにつなげていくということは、とても大事な使命だと思います。

澤田 「パンドラの約束」という映画では、EBR(実験的増殖炉)やIFR(一体型高速炉)の先に第4世代原子炉の話が出てくる。けれども「もんじゅ」こそが、第4世代原子炉の入り口にいる存在ではないですか。何でそういう話をしないのでしょうか。「もんじゅ」は増殖だけではなく、廃棄物減容もできるし、燃焼度も軽水炉より3倍程度高い。つまり、第4世代原子炉に向けてのいろいろな可能性が目前にある。第4世代の入り口に位置しているのが「もんじゅ」であり、EBRどころではない。そんなアピールをもっと広げていきませんか。

大川内 自前の技術で自由に使えるものがもう目の前にあって、それを使いながら自分たちで技術力を蓄えて将来、いざとなったときにちゃんとそれがすぐ使えるというのが理想だと思います。

澤田 2018年に間に合わせないと。早く動かして国際研究拠点という形であの地域を盛り上げていきたいではありませんか。地元には、「もんじゅ」の運転再開を支持するサポーターもたくさんいらっしゃると思います。

向 ロシア、インド、中国を別にすれば、高速炉といったら「もんじゅ」しかない。運転すれば世界中から人が集まってくる。技術共有や継承の基盤となります。また、廃棄物の減容化をしようというのであれば、「もんじゅ」だけで全量処理できるわけではなくて、高速炉を数基つくらなければいけません。そのためにも、技術実証の場としての「もんじゅ」は重要な意味を持ちます。

さらにもう一つ。「もんじゅ」をきちんと動かすことによって、世の中に高速炉は本当に動く、きちんと電気も出すし、いろんなこともできるということを示すことができる。これが必要性、可能性を示す一番いい手段だと思います。

澤田 福井県は「もんじゅ」を核として国際研究拠点にするという大きな政策をもっています。もし「もんじゅ」が動かないと、その根底が崩れる。そういった地域振興の意味や日本国としての位置づけ、そして世界の期待からも。それに早く応えてください。皆さんのやる気があることを、どんどんと伝えていかなければ。

編集部 ナトリウム漏れから20年近く止まっているというのは、「もんじゅ」をめぐる経営責任の真空地帯があったからだと思います。具体的に言うならば、外環境を自分に合わせるように働きかけていくという戦略が、当事者に欠けていたのではないのでしょうか。

澤田 そんなことはないでしょう。国も「もんじゅ」の必要性を位置づけてきていたし、声は小さいけれども、「もんじゅ」は必要だと言う人は外野にもいる。

編集部 けれども、命をかけてまで「もんじゅ」を動かすぞというような戦略や意欲を持った強力な人はいませんでした。

向 20年止まっている間には、「もんじゅ」自身ではどうにもできない空白部分があります。その時の政治情勢や経済情勢において、そこまでして「もんじゅ」は動かさなくても別に誰も困るわけじゃないというようなものはあったかもしれません。結果として運転再開まで14年半という非常に長い時間がかかりました。

編集部 そのときの鍵を握っていたのは、現場ではなくトップマネジメントです。彼らが命をかけてやったかどうか、道筋に影響を与えたと思います。

澤田 今回のエネルギー基本計画では、国家の基本政策として「もんじゅ」が位置づけられました。けれども、それで安心していませんか。今の位置づけだけだと、何の保障もないと思います。「もんじゅ」の運転再開を、誰かが後押ししてくれると思っているのではないですか。“私たちはどうしてもやりたいのだ”という気概を見せないと、本当にやる気があるのかと見られかねない。真剣な思いを役所や政治家にまで、伝えなければならぬ。

日本の「もんじゅ」は、第4世代炉の入り口に位置しています。これを動かせば、世界中の研究者がここに集まってきます。これを動かす意義はとても大きい。だから、運転再開に至る過程にある障害を除いてくださいと強く訴えることが、大切ではないのでしょうか。

荒井 そのためにはまず、現場では今の保安措置命令を解除してもらうために、全力を尽くすこと。そして、次の性能試験の準備を目指すことで、現場の人間の士気はもっと上がると思います。

それから地元は、「もんじゅ」の運転再開については、原子力機構というより、国の役割が重要だと考えており、両者の話し合いになってきたところがあります。

編集部 そこにはガバナンスの真空がある。

向 今は、西川知事と河瀬市長と美浜の山口町長のお三方は、日本のためにも「もんじゅ」を早く進めてもらわなくてはとはっきりと明言されています。

澤田 「もんじゅ」は人も物もきちんとしていることがよくわかりました。最後に一言ずつ。

大川内 原型炉である「もんじゅ」は、今は、いわば仮免許のようなものだと思います。教習所の中では仮免許で運転はしているけれど、一般道に出て運転したことはない。けれども、あなたたち一般道で運転した経験がないから危ないと。一般道に出て絶対には事故を起こさない運転テクニックを身につけてから出てくださいと言われていたような気がします。私たちがステップごとに到達すべき点がもっと、クリアになっていればと思います。

伊藤 我々が外部へ情報発信していくというときに、どういうツールがあるのかというのをよく考えなければいけない。今回の学会誌企画も、その一つだと思います。自分としては未来志向でいきたいと思っておりますので、応援をよろしくお願いします。

荒井 新規制基準を始めとしてFBRの規制体系はどうあるかとの検討が必要だと思います。これは「もんじゅ」を動かして、その経験を活用してつくっていくものだと思います。

澤田 本来はそうですね。

荒井 今は、現行の軽水炉の規制体系をベースにやっていますが、「もんじゅ」での運転経験を踏まえて、どう管理していくのか必要に応じて変えていかなければいけない。

澤田 そこは重要ですね。みんなはそう思っていない。規制をまずがちりやらないと何もできないというのは、大きな間違いですね。

荒井 今まで、FBR 発電炉は規制したことがない分野であり、どう管理していくかの経験がない。もしかしたら、軽水炉の規制をそのまま適用することは、適切な管理とならない可能性もありうる。今の軽水炉の規制は、世界一厳しい水準の安全を目指しています。その思

想をベースにした高速炉の規制についての議論が十分に行われなければなりません。行われないうまま、今の軽水炉の規制をそのまま適用するのは問題だと思います。高速炉の規制体系がどうあると適切なものか、その妥当性を確認していくことも、「もんじゅ」の役割の一つだろうと思っています。

向 機構内について目を向けると、規制が厳しくなっても、現場の職員には委縮することなく頑張してほしいと思います。皆さん、時間がなくて大変なのはわかるけど、自分たちが担当している設備は、その設計まで含めて詳細に勉強して、その設備の背後にある技術体系を理解しておいてほしい。そして試運転の時には、自分が責任を持って性能試験まで持っていくという自信と十分な能力を身につけてほしい。

社外に目を向けると、一般の人は、「もんじゅ」を動かさなくても誰も困らないと思っているかもしれない。けれども、例えば2018年の日米原子力協力協定で核燃料サイクルをする権利が全部剥奪されたら、日本は本当に三流国に落ちる。それを責任をもって進めるのは外交であり、国です。また本当に、将来の日本だけでなく人類全体のエネルギーに結びつく大きな課題です。だから、この改定交渉までに、国は何としてでも、「もんじゅ」を動かすのだという決意を、国民に対して発信してほしい。それが一つの「もんじゅ」の具体的目標になると思います。

澤田 国もそうですが、現場からの声も、もっと世の中に届けた方がいいと思います。「もんじゅ」は人も物もきちんと整えていること、第4世代炉の先駆けとなる存在であること、廃棄物減容の役割も果たすということ。これらを、いろんなチャネルを通じて世の中に発信してください。

編集部 軽水炉の再稼働すら厳しいのに、「もんじゅ」の運転再開なんかもってのほかだということではなく、むしろ、軽水炉の再稼働すら厳しいのに、「もんじゅ」が運転再開までこぎつけた。こういうふうにしなればいけないと思います。外環境にいかにか働きかけることができるか。ここに、当事者たちの意欲と真価が問われていると思います。

澤田 そういう気持ちをしっかりと持ち続けていただきたいです。ありがとうございました。

(編集協力：佐田 務)

解説

日米原子力協定(1988年)の歴史と今後の課題

第2回 交渉の開始と交渉上の主要な論点

—協定の実質合意から発効まで—

元原子力委員会委員長代理 遠藤 哲也

レーガン政権の下でようやく始まった日米原子力協定交渉は難航した。米側は、日本の原子力活動に包括事前同意方式を認めることには同意したものの、具体的な個々の点については厳しく、また行政府部内でもさまざまな異論が出てきた。何とか正式に署名にこぎつけたものの、その後の議会審議は波乱の連続であった。

プルトニウム空輸に対するアラスカ州からの反対、核不拡散強硬派からの反対などで審議は予断を許さなかった。この波瀾を何とか乗り切ったのは、レーガン大統領の決断、レーガン・中曽根の信頼関係によるところが大きかった。この協定が発効したのは、1988年7月であり、正式交渉が始まってから6年もの年月が経っていた。

I. 協定交渉の始まり(1982年8月～84年9月)

核不拡散政策は、米国の政権にとって共和党、民主党の党派を超えた伝統的な政策であった。かつ、1978年に成立したNNPA(Nuclear Non-Proliferation Act)は厳然として存在しているので、いずれの政権もその法律に縛られていた。そうは言うものの、政権によって核不拡散政策の執行は相当に異なり、これによって日本の原子力政策は大きな影響をうけた。カーター大統領時代の東海再処理問題がそうであったし、MB#10(Material Balance #10の略語。米国の行政規則)による使用済燃料再処理のための英仏への燃料搬出がそうであった。

したがって、レーガン大統領の対外原子力協力方針(1982年6月)によって、日本とユーラトム諸国に対し、「包括事前同意」方式が提案されたことは、日本にとって歓迎すべきことで、ここに交渉の幕が切っておとされることとなった。交渉は、1982年8月から84年9月まで10回の代表レベルで行われたが、特段の進展はみられず行詰りの状態が続いた。(フェーズI)

Historical Analysis of Japan-US Nuclear Cooperation Agreement (1988) and Issues toward Future (2) ; Start of Negotiations and Key Negotiation Points—From Substantive Consensus to Effective Agreement : Tetsuya ENDO.

(2014年6月6日 受理)

■前回のタイトル

第1回 協定交渉の背景

交渉はなぜ難航したのか。一つは、米側の強い主張にあった。米側は包括事前同意方式を導入するためには、NNPAに規定されているすべての要件が満たされなければならないとして、1968年の日米協定に含まれていなかった次のような新たな規制を要求してきた。

- ・平和目的核爆発の「研究」の禁止
- ・高濃縮(濃縮度20%以上)に関する事前同意
- ・貯蔵(プルトニウム、高濃縮ウラン等)に関する事前同意
- ・核物質防護措置(PP)
- ・米国提供の施設・材料から作られた派生物質に対する規制
- ・機微技術に関する規制
- ・輸出規制(第三国移転に関する事前同意の対象範囲の拡大)
- ・再処理、形状の内容の変更に関する事前同意

しかも、新たな規制権の拡大は、行政取極めなどによる日本側の政府意図の表明ではなく、協定に基づく法律的にバインディングなコミットメントでなければならぬとした。

今一つは、日本側の態度であった。日本としては「包括同意」の導入は大いに歓迎するが、その代償として米国が一方向的に作った国内法(NNPA)を他国に押し付けて来るのは甚だ釈然としないという感じがあった。また、政策の意図表明ならともかく、要件を義務として受け入れるためには協定の改訂が必要であり、そのためには国会の承認が必要であった。ところが国会承認となると、

原子力の平和利用についてばかりでなく、それに関連して日米間のもろもろの核問題が取り上げられ大きな政治問題になりかねないので、何とかして国会承認を必要としない政府間限りの行政取極めで処理できないだろうか考えた。これが当時の日本政府関係機関および関係業界の一般的な考え方で、ともかく政府取極めによるアプローチでできるだけ押ししてみようとの方針であった。

II. 本格的な交渉(1985年5月～87年1月)

これまでの協議を通じて、協定改訂を行わずに日米双方の要請、すなわち米側にとってはNNPAに基づく規制権の拡大、日本側にとっては包括同意制度の導入を同等に満たすことが困難なことがはっきりしてきた。今や日本としては、協定改訂を行い米国の規制権の拡大強化を甘受するとともに包括同意制度を導入するか、それとも協定はそのままにして従来どおりの個別同意方式を継続するかを決断する必要が出てきた。

この背景には六ヶ所村再処理工場の立地手続が本格化してきたことや、協定を改訂するならば日本の原子力活動に好意的なレーガン政権中に行うのが得策だと考えたことなどがあげられる。

かくして1985年5月と7月の2回の予備交渉を経て、11月から代表レベルの協議が再開され、その後、両国間で事務レベルも含めて精力的に交渉が行われた。特に1986年に入ってからは、ほぼ毎月といったペースで折衝が続けられ、1987年1月17日、日米双方の交渉代表レベルで実質的な合意が得られた。(イニシアル)(フェーズII)

1. 交渉上の主要な論点

(1) 包括同意の安定性の確保—包括同意の一方的停止権の問題—

米側としては、日本に対し包括同意を認めるものの、特定の場合にはこれを停止できる仕組みを設けることがNNPA上に必要であり、しかも協定の有効期間が30年もの長い期間であることから、その間に何が起こるかを予測できないと主張し、特定の場合として核拡散の危険の著しい増大とか国家安全保障に対する重大な脅威をあげた。

これに対し、日本側としては協定を改定して包括同意制度を導入しても、これが米国の判断のみによって一方的に停止されるというのでは包括同意導入の意味がない。協定は原子力の平和利用のための国際協力の枠組みを作るためのものだから、核不拡散の危険を防止するために包括同意を一時停止するというのは理解できるが、今一つの法律的に内容が特定しにくい国家安全保障上の理由による停止は受け入れにくい。そもそも国家安全保障の観点からの脅威といっても、日米原子力協定上関係

があるのは、究極的には核不拡散に帰結するのではないか。したがって核拡散の防止との観点からで十分ではないかと反論した。

しかしながら、米側はこの国家安全保障という表現を盛り込まなければ、NNPA上も米国議会との関係でも承認を得ることはできない。現時点では国家安全保障のみに関係する異常事態は特定できないが、協定の有効期間30年を考えると絶対に無いとは言えないと強く反論した。

この問題について、日米間で激しい議論を行った結果、国家安全保障という表現を認めなければ交渉妥結に至らないと判断し、やむを得ずこれを受け入れた。しかし、日本側としては、あくまでも包括同意の安定性を強く望んでいたため、この一方的な停止権の発動に対していくつかの歯止めを盛り込み、停止権が恣意的に行使されないような仕組みを作ることを始めた。すなわち、包括同意が停止されるのは、例外的に最も極端な場合に限られ、かかる停止の決定は政府の最高レベル(大統領および総理のレベル)で行われ、必要最小限の範囲と機関に限定されるなどの歯止めが盛り込まれた。(文末[参考] 1988年日米協定実施取極 第3条2.)

(2) 包括同意の自動性—将来の施設を包括同意の対象とする仕組みの確立—

日本として包括同意方式の導入について留意したもう一つの問題は、将来運転が開始される施設をいかにして円滑に包括同意の対象にするかという問題であった。

この背景には、すでに述べた1977年の東海再処理交渉の苦い経験があった。東海再処理施設の場合、まさに施設が完成し、運転を開始しようとしたときに、米国から1968年日米原子力協定改正議定書(1973年)の第8条c(第1回; 文末[参考])によって「待った」がかかったのである。このような経験を持つ日本としては、将来、例えば六ヶ所村の再処理施設が完成して運転を開始しようとした時点で、再び「待った」がかかるような事態はぜひとも避けたい、何とか自動的に包括同意の対象とする仕組みを確立したいと考えた。この点は将来、六ヶ所再処理工場に続く、いわゆる第二再処理工場を建設する計画が具体化した場合にもあてはまる。

一方、米側としても日本の考え方に理解を示したが、米側の関心は将来の施設にどのような保障措置が適用されるかという問題であった。

このような観点から、日米双方で検討した結果、日米間であらかじめ施設の種類別(商業規模の再処理施設、プルトニウム燃料加工施設およびプルトニウムの貯蔵施設)に適用されるべき保障措置の指針となる保障措置概念(Safeguards Concepts)を作成し²⁾、この保障措置概念に沿った保障措置がIAEAによって講じられる場合には、将来の施設についても自動的に包括同意の対象と

なるような仕組みを作ることで合意した。すなわち、この合意に従い、日本側から新規施設の追加については、日本側から新規施設にかかる日本とIAEAとの間の保障措置が日米間で了解された保障措置概念に従っている旨を米国側に通知する、米国側(国務省)は通知を受け取ったあと、通知に必要な事項が記載されているか否かを確認する。これは政策判断でなく、重要確認行為である。

(3) 双務性の確保—原子力対外協力における平和利用の確保—

従来の日米原子力協定では、米国から日本への一方的な資機材、核燃料の供給を前提としており、そのため再処理の共同決定や使用済燃料の管轄外移転の事前同意は米国の日本に対する片務的なものになっていた。これを双務的なものにする必要があった。

日本については、保障措置の適用が明記されているのに対し、米国については直接に規定されていなかった。NPT上の核兵器国と非核兵器国の不平等性を考慮しても、協定に基づいて移転される核物質等については、保障措置および国内計量管理の摘要義務を双務的に規定する必要があった。協定の改訂により、規制権を双務的なものとし、日本の原子力の対外協力上、名実ともに、平和利用を確保することが必要であった。

特に保障措置については、日本から米国に移転される核物質(例えば、研究炉の使用済燃料を米国に返還する場合等が該当する)や、日本から米国に移転された原子力資機材の派生物質についても、米国と、IAEAとの保障措置協定、並びに、IAEA保障措置の適用されていない場合にとられる補助的処置の対象とすることとされた。NPT上、核兵器国である米国は、IAEAの包括的保障措置(INFCIRC-153)の適用を受けておらず、IAEAに自発的に申告した(ボランタリー・サブミッション)核物質や施設(適格施設)のうち、IAEAが自らの判断で選んだ施設(選択施設)に対してのみ、保障措置がかかっている。したがって、日本から米国に移転された核物質等はIAEAが保障措置を適用していない施設に置かれる可能性がある。このような場合に備えて、保障措置の補助措置が規定された。この補助措置には、当該核物質を担保するために、他の核物質で代替して保障する代替措置や、当該核物質の追跡及び計量のためのデータの提供などの措置も含まれる。(なお、日米協定に基づき、協定対象物については、米国への通告がなされ、それによって国際管理が米国でも行われている。毎年、日米協定に基づく在庫目録の交換が行われている。)

(4) プルトニウム輸送問題

米側は、英仏から日本へのプルトニウムの返還輸送に対して、核物質防護(PP)の観点から、一定の提供に従った航空輸送のみを包括同意の対象とし、海上輸送については従来どおり個別合意の対象とし包括同意の対象

とすることはできないと主張した。これは1984年秋にフランスから日本に晴新丸という船を使ってプルトニウム輸送を行った際の経験に鑑み、海上輸送では輸送時間が長いこと、運搬船の洋上護衛が大変なことなどから、これまでも少量のプルトニウム輸送について使用していた航空輸送を優先させたものであった。

日米間で話し合った結果、航空輸送の場合に、核物質防護上守られるべき要件について包括同意の対象とすることで合意をみた。しかしながら、後述するように協定の米国議会での審議の過程で、プルトニウムの航空輸送が事実上困難になり、日米の更なる合意によってプルトニウムおよびMOXの海上輸送についても、一定の要件の下で包括同意化されることとなった。

III. 協定の実質合意から発効まで

1. 実質合意から正式署名まで

日米原子力協定は1987年1月、難交渉の末、ようやく両国間代表レベルで実質合意に達した。次のステップは正式署名であり、次いでそれぞれの議会の承認を得て、正式に発効させることである。一般的に言うと、二国間協定や条約は実質合意から正式署名までに行われる、主として法律的なチェック(日本の場合は、内閣法制局による審査)であって、それほど時間がかかるものではない。しかし、この日米原子力協定は例外であった。米国において、その過程が非常に難航し、再交渉の可能性さえ、ささやかれたほどであった。

(1) 署名に至る米国の国内手続き

米国の場合、原子力協定の交渉から発効までの一連の手続きについては、米国原子力法(1954年)に規定されている。具体的に言うと、原子力協定は国務長官が、エネルギー省長官の技術的援助と同意を得て、軍備管理軍縮庁(ACDA)長官(現在ACDAは国務省に統合されている)と協議の上交渉することになっている。米国原子力規制委員会(NRC)との協議を経た後、国務長官とエネルギー省長官は共同で、両省、NRCおよびACDA長官の意見および勧告を付して大統領に提出する。この間、国防省、大統領国家安全保障会議(NSC)も意見を申し述べることができる。大統領は、協定の実施が米国の防衛と安全を促進し、不当な危険をもたらすものでない旨を文書で決定しなければならないことになっている。これらの手続きを経て、正式署名となるのである。

(2) アラスカ州の動き

実質合意を経て、正式署名に向けての作業を進めている最中、1987年3月初めに、プルトニウム利用反対を主張する米国核管理協会(Nuclear Control Institute)の報告書が発表され、大きな影響を及ぼした。会長はレーベンソールという人で、かつて核不拡散強硬派のグレン上院議員のスタッフを務めたこともあり、NNPAの実際の起案者の一人であった。

この報告書は、この協定の中で万人に分かりやすいプルトニウム輸送問題に焦点を当て、協定が発効すれば欧州から日本へのプルトニウムの航空輸送が頻繁に行われることになるが、この航空輸送のための容器はいまだ開発されていない。以前行われた輸送容器の試験は失敗に終わっており、いずれにせよプルトニウムの航空輸送は技術的にも多くの課題が残されており、したがって現時点での協定の締結は時期尚早とする非常に批判的な内容であった。

この報告書は、アラスカ州などで大きく報道され、これを契機にプルトニウム輸送問題が注目を集めるようになった。例えば、4月初めには、アラスカ州のカウパー州知事がシュルツ国務長官に書簡を送り、この協定はアラスカの環境のみならず、アラスカ州民の健康や安全に重大な影響を与えかねないものであるとして、国務省およびエネルギー省に対して協定を連邦議会に提出する前に環境影響評価書を作成するよう要請した。仮に環境影響評価書を作成することになれば、最低でも1年、場合によっては2年以上かかるといわれていたので、協定の正式署名が大幅に遅れるのではないかと懸念する声が聞かれた。

これに対し、シュルツ国務長官は4月末に本協定はアラスカ州およびその他の米国民の健康、安全ならびに環境に対して何の危険も及ぼすものでない旨、また本協定の米議会提出前に環境影響評価書は必ずしも必要ではないとの立場を明らかにした。このような動きは何とか押さえ込まれたものの、これは協定が議会で提出された後、議会審議が難航することを予想させるものであった。

(3) 米行政政府部内からの不協和音

原子力協定交渉にかかわる米国側の責任官庁は第一に国務省であり、次いでエネルギー省である。エネルギー省は、新協定が核不拡散レジームおよび日米原子力協力関係の強化に貢献するといった国務省の立場を全面的に支持し、日本の原子力計画に米国が持続的に参加することが、米国の影響力を維持する方法であると考えていた。国務省とエネルギー省の足並みは完全に揃っていたが、署名に至る他の関係省庁との協議、調整過程において多くの不協和音が出てきた。

一つは、米国原子力規制委員会(NRC)の反対であり、主な理由は、例えば次のとおりであった。そのいくつかは正に上述した日米交渉の主要争点であった。

①将来運転される施設について、具体的にどのような保障措置が適用されるのかわからないにもかかわらず、これらの施設を自動的に包括同意の対象にするのは問題ではないか。

②米国に与えられた包括同意の一方的停止権は発動に種々の制約が課され、なかなか発動できない仕組みになっているのは問題ではないか。

③日本のプルトニウム関連施設に対するIAEAの保障措置は技術的にまだ十分に開発されていないのではないか。例えば、毎年800トンの使用済み燃料を再処理する場合、200～300kgのプルトニウムの在庫誤差(MUF: Material Unaccounted For)が出る可能性がある。毎年確認できないプルトニウムが数百kgも出てくる可能性があるのは、保障措置の観点からも、安全保障の側面からも問題である。十分な保障措置が開発されるまでは、従来どおりの個別承認のほうが望ましい。

今一つは、国防省からの反対であった。国防省は、協定と米国の安全保障と核拡散に関連した問題について国務省に助言する立場にあるが、主な反対理由は、例えば次のとおりであった。

①非核兵器国の日本に30年間もプルトニウムの使用を認め、また建設準備中の再処理施設に対しても先取り承認を与えるのは安全保障上かつ核不拡散政策上も問題である。

②包括同意を一時的に停止させる米国の権限に前例のない制限が課せられている。

③核ジャックの危険性。(輸送中のプルトニウムに対する核物質防護策がなまぬるい。)

国防省の反対を代表したのは、ワインバーガー国防長官であり、リチャード・パール国防次官補(注:ネオ・コンの旗頭の一人)であった。ワインバーガー長官はシュルツ国務長官に反対の書簡を送っている。(1987年4月)

これらの懸念、反対に関しては米国行政政府内部の調整段階で生じた問題なので、日本側としては少なくとも直接にかつ表向きには何らかの対応を行う立場にはなかった。これに対して、国務省、エネルギー省、軍備管理軍縮庁が共同して反論したことは、日本側にとって幸いであった。また、新協定に反対していたワインバーガー長官が1987年11月に更迭され(パール次官補も辞任)、前国家安全保障担当(NRC)大統領補佐官のカールッチ氏が新国防長官に任命され、新協定案に支持の立場をとったことで、行政政府部内で国防省等の問題提起は一段落した。

このように、米国の国内手続の処理に予想以上の時間がかかり、1987年9月になっても協定案はレーガン大統領に提出されていない状況にあった。このため、1987年9月21日に行われた日米首脳会談で、中曽根総理により、米国側に迅速な処理を要請した次第であった。

(4) 大統領の承認と協定の正式署名

紆余曲折を経たが、1987年10月28日、レーガン大統領は本協定を承認し、米国原子力法上必要とされる文書による決定を行い、正式署名のための米国の国内手続は完了した。

正式署名は1987年11月4日、東京で倉成外務大臣とマンズフィールド駐日大使の間で行われた。

(1) 署名から発効まで一波乱の議会審議—

1954年米国原子力法(修正を含む)第123条は、米国議会における原子力協力協定の審議手続を規定しているが(原子力協定はこのために通称123協定ともよばれる)、同上によれば原子力協力協定は継続会期中の90日間(上・下両院のいずれかの院が4日間以上休会している場合は、当該休会期間は参入されない)の議会審議を終了した後であって、かつ当該期間中に、審議対象となっている協定(案)に賛成しない旨の共同決議が成立しなかった場合でないとして発効できないことになっている。

日米原子力協定も、米側での発効要件を満たすためには、上記の議会審議を経なければならないが、協定は東京での署名のわずか5日後、すなわち11月9日に米議会に提出された。異例の速さと言ってよい。

(2) 波乱の幕開けと協定反対派の動き

日米原子力協定に対する米議会筋の反対は、2種類あった。一つはプルトニウムの航空輸送に対する反対で、アラスカ州選出の上院議員(共和党)で、上院外交委員会の有力メンバーであるマコウスキー氏に代表されるものであった。プルトニウムの航空輸送については、墜落しても壊れない堅固な輸送容器がまだ開発されていないというのが反対の主な理由であった。

今一つは、核不拡散強硬派の議員による反対で、この協定は30年もの長きにわたり日本に包括同意を認めているが、これは米国原子力法及びNNPAの要件を十分に満たしておらず、またプルトニウムの利用が増えれば、核拡散、核テロの危険が大きくなるなどが反対の理由であった。核不拡散強硬派には民主党議員が多く、グレン、クランストン上院議員、ウォルピ下院議員などがリーダーであった。

まずプルトニウムの航空輸送問題については、マコウスキー上院議員は協定が議会に提出されるや否や(11月23日)、当時上院で審議中であったエネルギー・水資源開発歳出法案に関連して、実スケールの輸送物を積載した航空機の最高巡航高度からの落下試験の実施などを含む修正案を提案した。このマコウスキー条項は、あまりにも非現実的として日本側に深刻な衝撃を与えたが、マコウスキー議員の立場は他州選出の議員には理解されやすく、同議員の政治力もあって、若干の修正を施されたのち、包括予算調整法のライダー(註:当該法案とは直接関係のない事項を追加する米国議会独特の立法形式)として12月22日に成立した。これをもって、プルトニウムの航空輸送は事実上難しいものとなってしまった。しかし、最終的に成立したマコウスキー条項には、次のような注目すべき規定が含まれている。すなわち、輸送の代替経路と代替手段として「原子力平和協力協定による米国の同意権の下にある外国から外国へのプルトニウム輸送に関して、大統領は、輸送の代替経路および海上輸送を含む代替手段について、取決めを結ぶため最大限

努力する権限をもつ。」この規定が、後述するようにその後、プルトニウムの海上輸送についても包括同意の対象である道を開くこととなった。

他方、核不拡散強硬派議員も早速に反対運動を開始し、12月中旬には上・下両院の外交委員会の公聴会が引き続いて開催され、これらを通じて米議会内の協定反対の雰囲気急速に高まってきた。いずれにせよ、このままでは議会による協定の承認が危ぶまれる状況になってきた。

(3) 米行政府及び協定支持派の動き

このように協定反対の動きは予想以上に早く、かつ大規模に展開されていったが、これに対し米行政府、議会の協定支持派が手をこまねいていたわけではなかった。

米行政府の分析によれば、米議会の大部分の議員は協定を支持するとも反対するとも決めていない、いわば中立の立場であり、これらの人を中心に協定の意義や重要性を説明していけば、必ず理解と支持を得られると考えているようであった。このような状況下での米側交渉代表ケネディ大使の活躍は大変なものであった。こうした中で、レーガン大統領からバル上院外交委員長へ書簡が発出され、また米政界で声望の高いマンスフィールド駐日米国大使(元民主党上院院内総務)からも関係議員に対し、協定への支持を求める書簡が発出されたりした。

日本側も、政府においても民間原子力業界においても米国の関係筋に対し、協定支持を訴えた。オール・ジャパンの体制であった。

(4) 大詰めの議会審議と議会承認、協定の発効

前述したとおり、本協定の支持派、反対派ともにそれぞれ活発な動きを展開し、形勢は二転三転、審議は難航したが、時間は刻々と過ぎていった。米国原子力法上、90議会日を経過すれば原子力法第123条の原子力協定は承認反対の決議がない限り自動的に議会で承認されるからである。

この終盤戦で注目されたのはマコウスキー上院議員の動きであった。同議員はアラスカ州選出の立場からプルトニウム航空輸送に反対し、したがって本協定に反対してきたが、プルトニウム輸送について代替案として海上輸送が認められるならば協定には賛成であるとの立場を明らかにした。プルトニウム輸送問題について、マコウスキー議員からみて満足のゆく方向が示されつつあったからである。同議員が反対から賛成に回ったことは議場の雰囲気に大きく影響したことは言うまでもない。

いずれにせよ、3月21日、米国議会の上院本会議において、バード上院議員(民主党院内総務)の発議により、かねて提出されていた日米原子力協定不承認決議案の審議、続いて投票が行われた。投票結果は、賛成(すなわち、協定に対する反対)30票、反対(すなわち、協定に対する支持)53票で不承認決議案は否決された。この逆転採決は、日本の関係者のみならず、米国政府関係

者、議会関係者をも少なからず驚かせた。

結局、この投票の結果、上院として本協定を支持することが実質上承認された。また、その後、下院においては協定を巡って特段の動きが起こされることなく、かくして本協定の米議会審議に必要とされる90日議会は1988年4月25日無事終了した。

日本の国会審議の状況は省略するが(1988年5月12日衆議院本会議、5月25日参議院本会議採択)、日米両国の国会、議会の承認を終え、1988年6月17日外交上の公文が交換され、30日後の1988年7月17日に協定が発効した。

IV. 協定発効後の動き—プルトニウム海上輸送の包括化—

1. 海上輸送が代替案として浮上してきた背景

プルトニウムの航空輸送は、輸送時間が短く、かつ緊急事態対策も容易なので、核物質防護(核ジャック、核テロ防護等)の観点から一番望ましい方法と考えられていた。これは、これまでの経験、特にごく最近ではすでに述べた1984年の晴新丸のケースからもわかるし、また本協定の米議会審議の際に議会に提出された米国防省のプルトニウム輸送の安全評価報告書(1988年3月)も民間機によるノン・ストップ飛行が最前の策としている。

ちなみに、海外から日本へのプルトニウム輸送は、海外からの購入も含めれば1965年から実施されており、英仏での日本の使用済み燃料の再処理による回収プルトニウムの輸送は、1970年以来、航空輸送が8回、海上輸送が7回実施されていた。

本日米協定の実施取極によって、同取極付属書5の指針に沿った航空輸送には米国の包括同意が与えられることになったが、前述のとおり協定の米議会審議の過程を通じて種々問題が出てきた。特にプルトニウム航空輸送の輸送容器に関し、航空機の衝突試験など厳しい条件を義務付けるマコウスキー条項が成立したことにより、航空輸送は実際上非常に厳しくなってきた。また、プルトニウムの日本国内の受け入れ空港についても、輸送機をボーイング747-400とした場合、3,000メートル級の滑走路を必要とすることなどから、技術的にもプルトニウムということから政治的にも空港決定に苦慮していた。そこで、引き続き航空輸送を第一の選択肢としつつも、海上輸送について検討を進める現実の必要性が生じていた。

他方、米側の方もマコウスキー修正条項の可決は、米議会が航空輸送よりも海上輸送の方を選んだともみなすことができるもので、マコウスキー上院議員は米政府に対し引き続き海上輸送を研究するよう圧力をかけ続けた。上述の国防省報告は航空輸送をベストとしながらも、然るべき措置を講じれば海上輸送も可能であるとの結論を下していた。代替オプションとしての海上輸送の

可能性、そして海上輸送も航空輸送とともに包括同意の対象とする可能性が浮かび上がってきたのである。

2. 日米協議

このように日米双方ともプルトニウム輸送方法について認識を同じくしはじめていたが、具体的なきっかけは1988年5月に米国のリチャード・ケネディ大使から筆者宛に書簡が寄せられ、海上輸送の包括化について米側として考慮する用意があると積極的な姿勢を示してきたことであった。更に、ケネディ大使と筆者との間の非公式会談が行われ、1988年11月の大統領選挙も念頭に入れて、レーガン政権中にやろうではないかということになった。このような動きに対して、日本政府部内の一部には何をいまさら海上輸送かといった批判的な空気があったことも事実だが、大勢は渡りに船といった状況であった。

その後事務的な協議が行われ、日米原子力協定実施取極付属書5を改定して、次のような内容を含む海上輸送の方針が追加され、包括同意が与えられることとなった。主な内容として(1)輸送船は専用船であること、輸送船は自然の災害や社会の騒乱を避ける輸送経路を通り、緊急時以外は無寄港であること、(2)武装護衛者が同乗すること、(3)原則として護衛船が同行すること等である。(文末[参考] 付属書5 B. 海上輸送)

そこで、護衛船をいかなる船舶にするかについてだが、海上輸送の指針にある護衛船は、盗取や妨害行為を防止し、輸送船やその積荷を防護することを目的としたもので、これは言い換えれば、海上における犯罪の予防や鎮圧を目的とするものである。日本では、これは正に海上保安庁の第一義的任務と考えられたので、護衛船には海上保安庁の巡視船が適切であると判断し、他方、米側もそれに対応可能とした。(日米間で自衛隊艦船の使用について議論されたことは、全くなかった。)ところが日本国内の防衛関係者の一部から、海上保安庁にはヨーロッパから無寄港で日本に帰って来られる足の長い巡視船はないではないか、これには海上自衛隊の自衛艦を使うのが最も適切であるとの議論が出され大論争となった。しかしながら、プルトニウムと自衛艦の海外派遣の組み合わせは政治的に余りにもセンシティブなので、日本政府部内での協議の結果、海上保安庁の巡視船を使うことを決定し、新しく建造することとなった。これが、その後1993年「あかつき丸」の護衛に派遣された「しきしま」である。(註：6,500トン。建造費はヘリ2機の購入も含めて全部で203億円)

今一つは、護衛船の同行について例外規定が設けられていることである。すなわち武装護衛船による護衛のないことを効果的に補填する代替安全措施がとられる場合には、護衛船の同行は必要とされないことになっている。例えばMOX燃料の場合など、プルトニウムの形

状、輸送の形態などにより必ずしも護衛船を同行させなくとも適切な代替安全措置が設けられれば適切な防護の確保がはかられ得ると考えたことから設けられたものである。ただし、代替安全措置およびプルトニウム単体海上輸送の場合の護衛の具体的な内容については日米間で協議されることになっている。なおこれらの論点は、日米の交渉代表者間のサイドレターで確認されている。

V. 第2回の締めくくり

日米原子力協定の成立には、日本の核不拡散体制の順守、協力があげられるが、最も重要なのは日米の信頼関係であったと思う。その後の日米間の原子力協力は順調に推移しており、協定は空気のような存在にさえなっている。

日米協定は遠からず(2018年7月)満期を迎えるが、引き続いて包括同意方式を維持していくには、日本が世界の原子力を巡る情勢の下で何を為すべきかを考えてゆかなければならない。

[参考] 1988年日米協定実施取極 第3条2.

「いずれの一方の当事国政府も、他方の当事国政府による核兵器の不拡散に関する条約に対する重大な違反若しくは同条約からの脱退又は機関との保障措置協定、この実施取極若しくは協力協定に対する重大な違反のような例外的事件に起因する核拡散の危険又は自国の国家安全保障に対する脅威の著しい増大を防止するため、第1条において与える同意の全部又は一部を停止することができる。そのような停止に関する決定は、核不拡散又は国家安全保障の見地からの例外的に懸念すべき最も極端な状況下に限り、かつ、政府の最高レベルにおいて行われるものとし、また、両当事国政府が受け入れることのできる態様でそのような例外的事件を処理するために必要とされる最小限の範囲及び最小限の期間に限り適用される。

[参考] 付属書5 輸送ガイドラインB(概要)

B. 海上輸送

1. 輸送船は、専用船により、英国または仏国から日本の港まで、自然災害や社会騒乱の生じている地域を避けて実施される。輸送船は無寄港で航海する。

2. 個々の船積み前に輸送計画が作成される。この計画は荷送人、荷受人及び運送人の間の調整、ならびに両当事国政府及び移転国政府、さらに必要があれば第三国政府の事前の協力と援助を得て作成される。輸送計画には、次の事項を含む。

- (a)(i) 乗務員から独立した武装護衛者が乗船し、積荷を常時監視する。
- (ii) 輸送計画に規定された代替防護措置が、武装船がない場合に、それを有効に代替しない場合には、出発

から到着まで武装護衛船による護衛が行われる。

- (b) 輸送に主要な責任を有する者の信頼性を確認する。
- (c) 港では、盗取や妨害行為を防ぐため警察等の協力を得て船への接近を制限する。
- (d) 船上では積荷の移動を防止するため、船倉入口やクレーンを不動作状態にする等の措置が取られる。また、事故時にも位置を確認できるよう個々の輸送容器またはコンテナに应答器あるいは発信器を装備する。
- (e) 輸送船には、通常の航海用通信機器とは別に、信頼性のある通信系を装備し、オペレーションセンターとの間で暗号による船の位置及び積荷の状況の自動送信ならびに護衛者との独立通信を確保する。
- (f) オペレーションセンターを設置し、出発から到着まで継続的に船の位置及び積荷の状況を監視するとともに、関係当局と通信経路を確立する。
- (g) 事前に輸送船乗務員、護衛者、護衛船及びオペレーションセンター要員の取るべき行動を定めた詳細な緊急時計画を作成する。
- (h) 上記の防護措置の効果的な実施のために必要な計画が作成されたことを双方の関係当局が確認する。

<交渉代表者間のサイドレター>

- ・個々の海上輸送前に、米国政府は、その協力と援助の性質と範囲について通報する。
- ・MOX燃料を除いては、プルトニウム海上輸送は、空輸用の新容器の開発・認定がなされなかった場合に限り利用される。
- ・MOX燃料の海上輸送に関しては、ガイドラインBが適用される。輸送計画の作成前に、両当事国政府はガイドラインB2(a)(ii)による代替措置に関して協議する。
- ・ガイドラインB2(a)(ii)による代替措置は、双方にとって満足すべきものであること。
- ・武装護衛船は、海上保安庁または沿岸警備隊の船舶、あるいは他の権限ある公船で、輸送及び積荷を保護し盗取や妨害行為を防ぐ十分な能力を有するものであるべきこと。
- ・輸送計画及び緊急時計画の詳細は、極秘扱いとする。
- ・輸送に際しては、危険物海上輸送の国際規則及びIAEA輸送ガイドラインの要件に適合すること。

— 参考資料 —

- 1) 本解説の記述は、「日米原子力協定(1988年)の成立経緯と今後の問題点(改訂版)、平成26年1月、公益財団法人日本国際問題研究所」をもとに手を加えたものである。
- 2) 1987年11月14日付 保障措置概念に関する口上書。

著者紹介

遠藤哲也(えんどう・てつや)

本誌, 56[8].p.32(2014)参照。

原子力黎明期における国産原子炉開発構想と湯川秀樹らの関与

東京工業大学 澤田 哲生

日本の原子力黎明期に日本学術会議を軸に発電用の国産原子炉開発構想があった。それは天然ウラン重水炉であった。そこには原子力研究開発に「民主・自主・公開」を貫こうとする湯川秀樹をはじめとする基礎物理学者らの熱意が込められていた。しかし、湯川の原子力委員在任中に自主開発から外国からの導入路線に大きく傾いて行った。そのことが原子力ムラの形成にも関係している。この間の事情を京都大学基礎物理学研究所の所蔵する湯川史料を中心に論考した。

I. あらすじ

1954年[S29]までには、当時の日本学術会議の基礎物理学者を中心に、独自に発電用国産原子炉を開発する機運が高まっていた。ところが寝耳に水ともいふべき1954年3月4日の原子力予算の唐突な出現。時をほぼ同じくして、同年3月1日に米国がビキニ環礁で水爆実験を実施した。その結果、第五福竜丸の被爆事件があった。3月14日に焼津港に帰港後、乗組員の被爆のみならず“原子まぐろ”が極めて大きな社会問題になった。このような相次ぐ2つの事件にもかかわらず、物理学者を中心とする原子力研究開発への意気込みは衰えることがなかった。それは、第五福竜丸事件直後に行われた座談会「活かせ原子力！」(『文芸春秋』昭和29年5月号)にも如実に表れている。その座談会の登壇者は、坂田昌一、菊池正士、湯川秀樹、佐治淑夫である。初代原子力委員湯川秀樹博士の在任中(1956[S31].1.1～1957[S32].3.29)に、国産原子炉の開発路線から、外国の既存ないしは建設中の原子炉を輸入するという路線変更があった。

本稿では、それに関連する史料に基づいて、物理学者らが何を切っ掛けに、またどのような理由と心情をもって、原子力の平和利用への積極的な関与から遠退いていったかを論考する。

II. 背景

今から10年前、2003年10月22日に米国ワシントンD.C.のウオーターゲートホテルで、“Atoms for Peace +50”と銘打つ国際会議が開催された。そのなかで、2003年度のエンリコフェルミ賞の授与式があった。エ

Japanese Original Nuclear Reactor Concepts and Theoretical Physicists : Tetsuo SAWADA.

(2014年 7月8日 受理)

ンリコフェルミ賞は、日本でいえば、さしずめ仁科賞である。受賞者は3名。うち2名は高名な物理学者のレイモンド・デイビスとジョン・バーコール。二人ともニュートリノ物理の権威であった。3人目は、リバモア研究所のシーモア・サック博士で、その受賞理由は『核兵器の信頼性の向上を通じて米ソ二超大国間の核抑止に貢献したこと』であった¹⁾。エンリコフェルミ賞の懐の深さと同時に、科学技術大国アメリカでは、物理と原子力工学の間に双方向の交流や刺激があり、足腰の強さを感じた。そして今私は、戦後70年の中で、物理学などの基礎科学と原子力工学の間にあるなんとなくよそよそしい関係は、そろそろ歩み寄りをもって改善されなければならないと改めて思う。それが、科学技術創造立国を標榜する日本では必ず必要になるのではないかと強く感じるのである。

III. 日本の国産原子炉—その構想と問題点

2008～2010年に実施された科学研究助成事業に、“湯川・朝永・坂田記念史料の整理および史料記述データベースの整備(Databases of Memorial Archives of H. Yukawa, S. Tomonaga, and S. Sakata)研究課題番号: 20240073”がある。この事業によって整備された湯川関連史料に、『国産原子炉に関する問題点について』と題する資料がある(史料識別番号: c111-019-008)。この資料は手書きガリ版刷りである。資料の作成者や作成年月日は未詳。ただし、データベース上は1956年の原子力委員会資料として分類されている。したがって、湯川が原子力委員就任(1956年1月1日)以降、同年冬頃までに配布された資料だと推察される。この文書を以下に再録する。

国産原子炉に関する問題点について

1. (目的) 国産原子炉製造の目的は、大別すると次の2になる。

(イ)(建設目的)：製造を自らの手で行うことにより、炉の設計、建設技術ならびに燃料、材料、機械装置等これに関連するものの製造技術を確立する。

(ロ)(使用目的)：炉を、基礎実験、要員訓練、放射性同位元素生産、プルトニウム生産、原子力発電試験等に用いる。

(ロ)の目的達成の一環としてウオーターボイラー型ならびにスイミングプール型実験炉を米国より輸入して、主として基礎実験、要員訓練にあて、またCP-5型実験炉を米国より輸入して材料試験にあてることになっている。したがって、国産炉の使用目的は、できればこれらと不必要な重複を起こさないことが望ましい。

2. (型ならびに出力)：差し当たり考えられる種類としては、次のものがある。

(イ)熱出力1万kW程度の天然ウラン重水炉

これは、設計技術の確立、及び建設経験の培養には役立つがCP-5より中性子密度が低いので、単なる材料試験炉としては性能が劣る。従って、放射性同位元素の生産に重点を置くとともに、冷却材の温度を上げて、発電炉の基礎試験が行えるよう設計することが望ましい。なお、技術的に充分確信がもてぬ場合には当初1000kW程度で運転し、経験が蓄積されるに従って出力を増加して行くことも考慮される。

(ロ)熱出力1,000kW程度の天然ウラン重水炉および同程度の天然ウラン黒鉛型実験炉各1基

これは(イ)と同じ目的に役立つが前述のものより、製造についての技術的難点はやや少ないと考えられる。しかし、(イ)と比較して経費、工期等については、それ程大きな減少は望めないであろう。原子炉建設と経験の培養ということを主目的とすれば、この程度でも充分であるが、使用目的が明確でないうらみがある。

(ハ)熱出力5乃至10万kW程度の天然ウラン重水型炉
これは設計技術の研究にはなるが、むしろプルトニウム及び放射性同位元素の生産を目的とするものというべきであろう。

しかしながらいまだに世界各国とも商業採算に足る原子力発電を完成しておらず、各種型式の発電炉について、その優劣を検討中である現状においては、わが国将来の発電炉に、如何なる型式を採用すべきかを決定することは極めて困難である。いずれの型を採用するにしても将来の発電炉は濃縮ウランまたはプルトニウムを、不可欠とすると考えられるので、プルトニウム生産に重点を置いた発電試験炉を製造することも考えられる。しかしこのためには、相当高度の技術を必要とするので、実

験炉を使用して、この関係の技術を開発しなければならず、従って、期間は長期となり、また経費も増加する。

昭和32年12月に発行された『31年度版原子力白書』に下記のような記述がある(第2章 原子炉の設置 §1 研究用原子炉 1-1 経緯²⁾。

29年12月から約3ヵ月間欧米諸国の原子力開発状況を調査して帰国した調査団の報告は、従来の考え方を大幅に変更するものであった。すなわち、わが国で建設すべき原子炉として(1)天然ウラン重水型を第1次主要目標とすることには変わりはないが、(2)その目的は多目的とし、出力はなるべく大きく(たとえば数千ないし1万kW程度)することが必要であり、(3)出力数十kW程度の小型研究炉は第1号炉に必要な技術者の訓練や、材料検査等に寄与し、その建設を促進すると思われるので、濃縮ウランを用いた研究用原子炉の建設を上記第1号炉と並行して考えるべきであるとの結論に達し、米国政府からの濃縮ウラン提供の申し出とともに、研究用原子炉の輸入という問題が大きく浮び上った。(傍点は筆者による)

つまり、この白書では31年度内(昭和32年3月31日まで)では、いまだ国産原子炉は天然ウラン重水炉と明記してある。湯川が原子力委員を辞したのは昭和32年3月29日である。ちなみに上記の研究用原子炉が米国から輸入したウオーターボイラー型のJRR-1である(昭和32年8月27日初臨界)。

同2章 §2 動力用原子炉の調査には、次の記載がある。

32年1月になって、訪英原子力調査団の英国における調査報告と米国の視察報告が原子力委員会に提出された。その要旨は次のとおりである。

すなわち地震対策、安全度の問題、原子炉の寿命、および発電所の負荷調整等については、今後十分検討する必要があるが、英国型原子力発電所の実用性は相当明確となってきたり、新鋭火力発電所に比べ現在のところ若干高いように思われるが、将来の火力発電用燃料費が上昇する傾向を考慮すれば、すでに経済ベースに合う点にきたものと考えられる。

IV. 自主開発路線の原点

1. 原子力三原則

日本学術会議が、我が国における原子力平和利用の基本理念として『民主・自主・公開』に係る声明を出したのは、1954年の4月23日である。それは、同年3月に、当時の自由党、改進黨、日本自由党の3党が突如として国会に提出した原子力予算が可決されたことへの、危惧と反発があった。日本学術会議第三九委員会は2つの提

案をし、総会に諮って激烈な論議の末、議決された。

議決1は、ビキニ事件に言及し、原爆実験の禁止について世界各国の科学者の協力を求めたものである。議決2は、平和目的の原子力の研究について、次の3項目の実行を求めたものである。

- ・原子力の研究、開発および利用の情報は完全に公開され、国民に周知されること。
- ・原子力研究は民主的な運営によってなされ、能力あるすべての研究者の十分な協力を求めること。
- ・原子力の研究と利用は、自主性ある運営のもとに行われるべきこと。

2. 突然の原子力予算と科学者の本音

この原子力三原則が議決された頃に、学術会議系の物理学者が座談会を行った記録が2つある。一件は、岩波の『科学』の5月号であり、もう一件は『文芸春秋』5月号である。どちらも座談の中で、ビキニ事件が話題になっているので、収録はビキニ事件以降に行われている。両者にはほぼ共通する要点は、(1)突然の原子力予算への戸惑いと反発が表明されていること、(2)日本独自の原子力開発路線を堅持していくこと一年月を要しても民主・自主・公開を貫くこと、(3)自主開発の原子炉としては、ノルウェー方式の天然ウラン重水減速型を採用すること、などである。また論調の特徴としては、次の2点がある。

- ・ビキニ事件で乗組員の被爆や原子マグロをめぐるで社会が騒然としていたこと、ならびに突然の原子力予算に対する反感があったにもかかわらず、自主開発路線への熱意はまったく衰えていない。そればかりか、むしろ自分たちがしっかりやらなければいけないという意気込みが感じられる。
- ・自主研究開発の中心にいるのは、日本学術会議であり第三九委員会つまり、湯川・朝永・坂田・武谷らを核心とした基礎物理学研究者たちであるという自負に満ちていることである。

また、彼らが自主開発にこだわった理由は次の2点である。

- 1) 自主開発によって、原子炉の設計、各種の製造技術、運転経験などをすべて自分たちで掌握すること。
- 2) 設計、製造、運転にわたって、秘密条項をなくして公開原則を実践すること。

原子炉を輸入することは、とりわけ軍事の機密条項に関わる部分が含まれるのではないかとという危惧が強く示されている。その心情的背景には、戦後占領下でGHQによって、サイクロトロン等の実験施設が強制的に廃棄され、一部研究も禁止されたことが記憶に浅くない実体験として、湯川らの研究者にあったからではないかと推察できる。

『文芸春秋』昭和29年5月号に掲載された「活かせ原子力！」(座談会の実施は3月19日)は、6節(出し抜かれた学術会議/三階造って二階造らず/世界政府への移行/原子まぐる事件/原子力の平和利用/原子力を危険視するな!)10ページからなる。主な発言を記す。

○出し抜かれた学術会議

前年度に学術会議では、茅-伏見提案の決議が流れたことを受けて、原子力問題を扱う第三九委員会を立ち上げた。今年(1954年)の2月27日に公聴会を開いたが、3月3日に原子力予算が可決され、学界で慎重に議論していたことが、突如、社会に出て非常に驚いていると坂田が発言している。湯川はそれを受けて、「私は京都におったのだが、新聞を見て原子力予算成立を知ってびっくりしたわけです」と言う。坂田はさらに、学界がぐずぐずしていたわけではなく、2つの基本的態度をすでに決めていると発言している。それは、

- 1) 占領下に、仁科先生と荒勝先生の提案で、原爆を経験した日本人として、原子力の国際管理がぜひ確立されるよう内外に声明を発したこと。
- 2) 第三九委員会を立ち上げたこと。

○三階造って二階造らず

湯川は従来、基礎研究には熱心ではなかった政治家が、「原子力となればすぐに熱心になるというのは、どうもわれわれとしては不満なのです」と言う。菊池は、突如出た原子力予算の使途を方々駆け回って聞いたところ、科学研究所(理化学研究所のこと)救済費との説がでたが、だんだんそうではないと分かってきて、「改進黨の中曾根さんは、科研救済費ではない、原子炉を作ることだと言ったそうです」と言っている。湯川はさらに、万一、爆弾研究に繋がるようなものであれば、学界が協力する必要はない。ただし、「問題の本質は秘密研究では困る」のだと強調している。「それは一番いやなこと」とも。また坂田は、昨年共同利用の国立原子核研究所の設立を政府に勧告したが、予算が削減され計画が遅れている。それにも関わらず、原子炉の方に予算がつくというのは不合理だといひ、二階(原子核研究所)ができないうちに、三階(原子炉)ができることだと皮肉っている。また、この座談会の前日(3月18日)に原子核研究者が希望している基礎的な条件を原子核特別委員会で決めたという。

- 1) 平和目的に限り、原子兵器の研究は一切行わない。
- 2) 一切の研究結果等の情報は公開すべし。またそのためには外国の秘密情報を一切用いない。
- 3) 能力ある研究者は、何人といえども立ち入り、参加協力を妨げる処置をとってはならない。

○原子力の平和利用

菊池は原子力の導入により、社会的な革命が起こって来る。原子力のもつ社会的な意味が経済的な意味より大

きくはないかと思うという。佐治は、原子力を単純な量的資源と考えるのは間違いで、質的なものがそこから発展して来ることをつかむ必要があるという。また、原子力は石炭等と同じように資源の面から考えてはならないという。これを受けて菊池は、ウランの精錬や原子炉の技術がまだ幼稚なので、今後どんどん発展していったら、コストが今の電力より桁違いに安くなると、やはり問題は大きいと指摘している。

○原子力を危険視するな！

冒頭で、坂田が「いま原子力と言われておるのは、ウランウム、プルトニウム、それから水爆ですけども、もっとほかの原子力の利用法も出て来るかもしれないわけですね」と切り出す。そしてソヴィエトが行った水爆は、起爆にウランウムを用いていない可能性を指摘する。「そうだとすると、ウランウムは水爆には要らなくなって、今度はウランウムの平和利用がどんどん進む可能性がある。」「水爆の起爆薬がウランウムではなくって、三重水素のようにパイルで作る必要のないもので爆弾が構成されると、爆弾を作る方と平和利用の方とは全然分離されてしまう。」菊池が同意して、「そうすると、それをエネルギーに使う」と発言。そこへ湯川は、異論はないが非常に矛盾した気持ちをもっていていると言ひ、「もし爆弾を起こす元のもものがわれわれの素粒子論で研究しているものと関係があると、それはたちまち秘密になって、ソヴィエトからもアメリカからも全然情報が入って来ないということになると、われわれは研究者としては非常に困るわけです」と、軍事に関連する秘密条項によって、基礎研究の進展に障害が生まれる可能性を非常に危惧している。この背景には、戦後占領下にGHQが、原子核研究を全面禁止し、サイクロトロンを破壊した記憶が働いているのではないだろうか。

湯川は、この座談の最終で次のように語っている。

「そういうふうには日本の場合とはくに感情的に動くべき理由は無いぶんありますけれども、そんなら、たとえば原子力の平和的利用を始めようと言っても、すぐ始められるか、始めればすぐできるかと言うと、そうではない。実際早くせよと主張しても、できるはずない。やはり相当の年月がかかることで、とくに日本の場合では相当かかるに決っているのです。その効果についても同様なわけです。だからそういう点もわかってもらわないと困るですね。」

ノルウェーの天然ウラン重水減速型の採用については、岩波科学誌の座談会のなかで繰り返し言及されている。『座談会 日本の原子力研究をどう進めるか』は、8節(今までのいきさつ/日本の原子力研究は何から発足するか/日本のウラン資源/重水生産と原子炉の設計/その他の原子炉に関する技術/アメリカの原子力政策/検討委員会の設立/原子力憲章)9ページで構成されて

いる。登壇者は、伏見康治、朝永振一郎、田中慎次郎、武谷三男、杉本朝雄、渡邊武男、富山小太郎である。この座談は、『プロメテウスの火』³⁾に採録されている。

3. 原子力利用準備調査会

原子力政策の根本方針を審議するために、内閣に原子力利用準備調査会を置くことが1954年5月11日の閣議で決定された。準備調査会は、原子力委員会の前身であり、関係閣僚と学識経験者によって組織された。次の方針が定められた。会長が副総理緒方竹虎、副会長は愛知揆一経済審議庁長官、大蔵大臣、文部大臣、石川一郎経団連会長、茅誠司日本学術会議会長、藤岡由夫日本学術会議第四部会長。この準備調査会は年度内に以下の方針を決定した⁴⁾。

- 1) わが国将来のエネルギー供給その他のために原子力の平和的な利用を行うものとする。
- 2) 前項の目的に資するため、小型実験用原子炉を築造することを目標として、これに関連する調査研究および技術の確立等を行うものとする。

1954年度の原子力予算は通産省工業技術院の補助金であり、1954年6月19日に原子力予算打合会を実施した。この打合会の決定により、1954年12月から約3ヵ月間、欧米各国に派遣され海外の原子力事情が調査された。この調査団の報告が1955年5月提出されて以下の勧告がなされた。

- 1) わが国に建設される小型実験炉は天然ウラン重水型とし出力は1万kW程度とすべきこと
- 2) 日米原子力研究協定を締結すること
- 3) 原子力開発の統括機関を早急に整えること
- 4) 原子力開発の実施機関を至急創設すること
- 5) 放射線に対する安全対策を講ずること

当時の国際的な関心は、ロシア、イギリスの実用的な動力炉の成果に注目が集まっていた。ロシアはオブニンスク原子力発電所には、APS-1という黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉(RBMK 原型炉)が設置され、1954年の12月1日に商用運転を開始した。総発電量は6千kWであった。イギリスのコールダーホール原子力発電所1号機は黒鉛減速炭酸ガス冷却原子炉(マグノックス炉)で、1956年8月27日に始めてグリッドに接続され、10月17日に商用運転を開始した。総発電量は6万kWであった。

V. 原子力平和利用調査議員団に対する米原子力委員長ストローク氏の言明—ひとつの分水嶺、国産原子炉開発路線から導入路線へ

「原子力平和利用調査議員団に対する米原子力委員長

ストロース氏の言明」という原子力委員会向け資料が作成されたのは、昭和31年(1956年)9月27日午後5時、於ワシントン米原子力委員会本部であり。報告者は、在米大使館一等書記官科学アタッシュの向坊隆である。調査団の有田喜一団長が、日本の原子力基本法の理念、特に“原子力に関する諸問題には、秘密は含まれてはならず、すべての原子力情報は公開されるべき”ことを強調した上で、動力用原子炉を米国から輸入する可能性について質している。

これに対して、ストロース氏は同日(27日)には、明言を避け翌28日に、AECの幹部ボーゲル氏、グッドマン博士より以下の回答を得ている。「昨日の会見後、AECにおいて関係者を集めて検討せる結果、現在建設又は計画中の非軍事的動力炉の殆んど全部、即ち次の型の動力炉は秘密なしに提供しようとの結論に達した」として、5炉型を提示している。

1. PWR型(加圧水型 Pressurized Water Reactor)
2. BWR型(沸騰水型 Boiling Water Reactor)
3. SGR型(ナトリウム・グラファイト型 Sodium Graphite Reactor)
4. HRE型(水溶液均質炉 Aqueous Homogeneous-Reactor)
5. FBR型(高速中性子型 Fast Breeder Reactor)

さらに次の尚書きがある。「なお、LMFR(Liquid Metal Fast Reactor)外一、二の型はまだ完全に公開し得る段階に達していないか、近い将来には非軍事用動力炉はすべて公開し得る見込みである。」

この文書の意味するところは、英国がコールダーホール炉の運転開始目前にあって、米国にも提供(輸出)できる炉があることを公式に伝えたことである。しかも、炉型は5タイプも提示している。

この文書は原子力委員会の公文書であり、原子力委員会HPのアーカイブとして閲覧できるが、湯川史料として興味深いのは、この文書には珍しく湯川直筆の書き込みがある。赤ペンで下線が引かれ、余白になぐり書きが見られる。しかもそのなぐり書きには、?や!のマークが多く付されている。

下線箇所とコメントを記す。

- 1) 今迄に発表された協定から我々の諒解する処では、同協定には秘密情報の提供が含まれ、従ってこの秘密を守るべきことが受入国に対して要求される。(有田団長の発言の一部)
- 2) 現在米国の非軍事的原子炉(civilian power Reactor)(ストロース委員長の発言の一部)
湯川は二重の赤線を引き、余白に「現在のCPRとは何を意味するや?!」と疑問をあらわにしている。
- 3) 現在秘密になっているのは、燃料の製作と加工(production and fabrication of nuclear fuel)に関するものと、使用済原子炉燃料の化学的回収処理

(Chemical Reprocessing)に関するものだけであり……(ストロース委員長の発言の一部)

湯川は余白に「本質的にはこれは凡てではないか?!」と書き込んでいる。

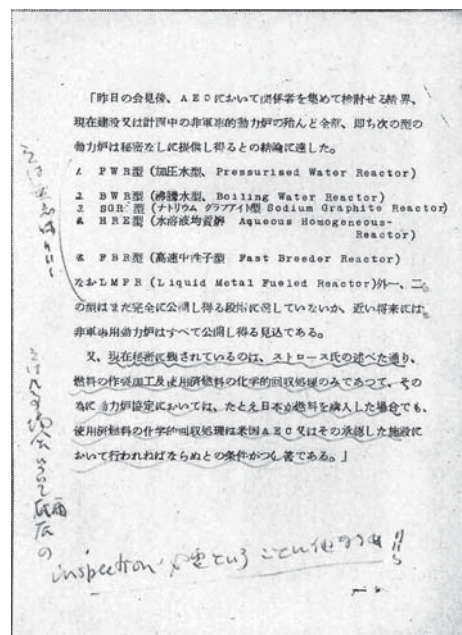
- 4) 5炉型の箇所には、赤い弧線でこれらを一括りにし、余白に「これは無意味!!」と記している。
- 5) 又、現在秘密に残されているのは、ストロース氏の述べた通り、燃料の作成加工及使用済燃料の化学的回収処理のみであって、その為に動力炉協定においては、たとえ日本が燃料を購入した場合でも、使用済燃料の化学的回収処理は米国AEC又はその承認した施設において行われねばならぬとの条件がつく筈である。

湯川のコメントは「これは凡その場合について○○のinspection必要ということに他ならぬ!!」(○○は不鮮明)である。(第1図参照)

このように、湯川の手書きコメントには感情の横溢が見られ、そこに、国産路線から外国の既存炉型路線への傾倒に対する、警戒と反発が見られると思う。

VI. おわりに

日本の原子力黎明期の国産原子炉構想の具体像と基礎物理学者、特に素粒子論グループの関与が明らかになった。物理学者らは極めて真摯に国産原子炉の研究開発に取り組みようとしていた。2件の座談会記事からは、原子力予算が唐突に社会に出現したが、物理学者らには巷間いわれるような“札東でひっぱたかれた”ような屈辱感あまり見られない。むしろ、日本学術会議が決定した『民主・自主・公開』の原則を貫くことになお一層邁進しようとする熱意が感じられる。原子力と原子核の関係で



第1図 湯川史料 c112-014-011に見られる書き込み

“三階造って二階造らず”は、その後、各大学に創設される原子核工学科、原子力工学科にもみられる傾向である⁶⁾。

V章に記載した、向坊報告に湯川がやや感情的とも思える反発を示したあたりが、物理学者が原子力から離れて行く岐路、つまり原子力ムラ形成の原点だったのではないだろうか。

湯川が原子力委員在任中であった頃、1956年[S31]5月16～30日まで、読売新聞社の招待で英国からクリストファー・ヒントン卿(英国原子力公社)が来日し、正力の頭の中では“英国がコールドホール発電炉を動かしたことが大きな意味をもち”、一気にコールドホール型の輸入に傾いて行ったとされる⁷⁾。この点についても調査をする予定である。

なお、その後この国産原子炉構想は、基礎物理学者の手を離れ、幾多の議論を経て変様し新型転換炉(ATR)として陽の目を見た。しかし、ATR原型炉『ふげん』がすでに廃炉過程にあることは周知のところである。

本調査にあたっては、さまざまな便宜を図って頂いた京都大学基礎物理学研究所の早川尚男氏、有田紗絵子氏、図書館の皆さま、小沼通二氏、坂東昌子氏に心より感謝申し上げます。

－参考文献－

- 1) 澤田哲生, 「Atoms for Peace +50 —自然体の科学と技術の融合: Atoms for Prosperity」, 日本原子力学会誌, 46 [2], 130 (2004).
- 2) <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/wp1956/sb2020101.htm>
- 3) 朝永振一郎, 江沢洋(編), 「プロメテウスの火」, みすず書房, (2012).
- 4) 2)と同じ, /sb10102.htm
- 5) 京都大学基礎物理学研究所 湯川史料 分類番号 c112-014-011.
- 6) T. Sawada, “Sociological Aspects of 3.11 Fukushima Daiichi Accident Aftermath and the Genshiryoku-mura,” PBNC2014-405.
- 7) 日本原子力産業会議, 森一久(編), 「原子力は、いま—上—」, 中央公論事業出版, p.89, (1986).

著者紹介



澤田哲生 (さわだ・てつお)
東京工業大学・原子炉工学研究所
(専門分野/関心分野) 原子核工学, 原子力の初等中等教育



From Editors 編集委員会からのお知らせ

－最近の編集委員会の話題より－
(8月4日第2回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・英文誌の2013年インパクトファクターが1.452となったことが報告された。
- ・英文誌は7月期に16論文、和文誌は5論文が投稿された。英文誌10月号入稿済。11-12月号HTTR特集入稿中。1月号公開済み。掲載待ち時間が長期化していることへの対応が検討された。
- ・福島事故関連論文10編を無料公開プロモーション中。
- ・英文誌キーワード一覧を見直すこととした。
- ・Progress in Nuclear Science and Technology 掲載論文にDOI記号を付すために、ジャパンリンクセンターへの入会が承認された。
- ・原子力学会賞論文賞の推薦方針を確認した。

【学会誌関係】

- ・編集長より新年度方針に沿った編集企画について説明があった。学会誌編集委員は毎月1件の記事企画を提案するよう依頼があった。
- ・以前掲載していた「匠たちの足跡」の解説記事は震災後止めていたが、再開することとした。過去に受賞した歴史構築賞の一覧から、記事候補を10件程度抽出した。
- ・来年3月号に掲載予定の「他学会における震災および福島事故の取り組み」記事の打診状況の報告があった。現状、6つの学会から執筆可の回答があった。
- ・座談会「福島第一原子力発電所の炉心溶融のメカニズムと現状」の進め方について報告があった。掲載は11月号、遅くとも12月号の予定。

編集委員会連絡先 < hensyu@aesj.or.jp >

地震 PRA 実施基準の改定— 3.11 の教訓の反映

第 1 回 地震 PRA の全体概要と改定の要点

標準委員会 リスク専門部会 地震 PRA 分科会

平野 光將, 高田 毅士, 成宮 祥介

“原子力発電所の地震を起因とした確率論的リスク評価実施基準：2007”を最新知見，特に，東北地方太平洋沖地震とその後に相次いで襲来した津波により，福島第一原子力発電所（1F）の炉心溶融，放射性物質の放出に至った深刻な事故からの教訓や知見を最大限反映するとともに，品質や透明性の確保がより適切に行われるよう改定した。4 回のシリーズで解説する。

I. 改定の趣旨

原子力発電所の出力運転状態における地震を起因として発生する事故に関する確率論的リスク評価（Probabilistic Risk Assessment：PRA）の有すべき要件及びそれを満たす具体的方法を，PRA 実施の手順を踏まえて実施基準として規定した，“原子力発電所の地震を起因とした確率論的リスク評価実施基準：2007”（2007 年版）を発行後 5 年目の改定時期を迎えて，最新知見を踏まえた地震 PRA 技術の向上を反映するとともに，品質や透明性の確保がより適切に行われるよう改定すべく準備していた 2011 年 3 月に，我が国の観測史上最大規模の東北地方太平洋沖地震が発生し，東北地方の原子力発電所を初めとする多くの産業施設に甚大な影響を及ぼした。そこには，地震の影響に関する情報が多くあることから，様々な機関の調査，分析を待ち，2007 年版改定作業を 2012 年 7 月に開始した。

すなわち，改定に当たっては，特に，東北地方太平洋沖地震とその後に相次いで襲来した津波により，福島第一原子力発電所（以下，1F）の炉心溶融，放射性物質の放出に至った深刻な事故からの教訓や知見を最大限反映することとした。

改定に当たっては，まず 2007 年版改定に必要な課題を抽出し，それらを実施基準として規定することが短期

に可能なものと，技術開発なども伴い規格化を中長期に進めていくものに仕分けし，前者は本実施基準の規定に記載することとし，中長期的な課題については，関連する研究，技術開発の動向などを附属書（参考）に記載することで，利用者との情報共有を図った。

さらに，地震により誘起される事象は，内部火災，内部溢水，そして津波との重畳など多岐多様な事故様態を示すので，2007 年版では適用範囲外としていた，それらの地震随件事象の PRA が可能なように，本実施基準において担うべき点は規定した。

以上の改定を行った本実施基準を用いて地震あるいは地震随件事象に対する PRA を行うことにより，より広い範囲の事象に対して原子力発電所の脆弱点抽出並びに安全性向上を図るリスク情報を得ることができる。

II. 改定地震 PRA 実施基準の構成

最新の実施基準の形式に合わせて，以下の構成とした。

1. 適用範囲
2. 引用規格
3. 用語及び定義，略語
4. 評価手順
5. サイト・プラント情報の収集・分析と事故シナリオの概括的分析
6. 地震ハザード評価
7. 建屋・機器フラジリティ評価
8. 事故シーケンス評価
9. 文書化

附属書（規定）

附属書（参考）

解説

なお，附属書（参考）は，本体に規定・記載した事柄，

Revision of the AESJ Standard for Seismic Probabilistic Risk Assessment (PRA)—Updating requirements based on the Lessons learned from the Fukushima Dai-ichi NPP Accidents (1) ; Summary of Seismic PRA Methodology and Outline of the Updated Points : Mitsumasa HIRANO, Tsuyoshi TAKADA, Yoshiyuki NARUMIYA.

(2014 年 5 月 29 日 受理)

及びこれらに関連した事柄を説明するものであり、実施基準の一部ではない。

2007 年版は約 700 ページであったが、本文+附属書(規定)が適用範囲の拡大、考慮事項の明確化により増加したことに加え、評価例などを附属書(参考)として充実したことにより 1,000 ページを超える大部となった。

III. 主要な改定点

上記の構成に従って、本実施基準の概要を主要な改定点を中心に説明する。

1. 適用範囲

この標準は、出力運転状態にある軽水型原子力発電所を対象とする PRA のうち、地震に起因して炉心の重大な損傷に至る事故シーケンスに着目し、それらの発生頻度を求めるレベル 1PRA、使用済燃料プール内の燃料の重大な損傷に至る事故シーケンスの発生頻度並びに地震に起因して格納容器機能喪失に至る事故シーケンスを同定する方法の有すべき要件及びそれを満たす具体的方法を、実施手順を踏まえて実施基準として規定する。加えて、この標準は、地震により発生する内部火災、内部溢水及び津波に起因する事象の PRA を実施する際に必要な地震ハザード評価は本標準の方法を用いるよう規定し、また、それらの PRA で対象とする建屋・機器フラジリティ評価に係わる規定も含んでいる。

○主要な改定点は適用範囲の拡張である。

- ① 2007 年版で対象としていた炉心損傷評価に加えて、使用済燃料プール内の燃料損傷評価も対象とした。
- ② 地震により誘起される事象は、内部火災、内部溢水、そして津波との重畳など多岐多様な事故様態を示すが、これらの地震随件事象 PRA を実施する際の地震ハザード評価方法及び対象となる機器・構造物のフラジリティ評価方法を提供できるようにした。例えば、地震と津波の重畳の PRA の場合には地震動震源モデルと津波震源モデルを整合させる考え方、津波対策の機器(防潮堤、水密扉など)のフラジリティ評価方法を規定している。
- ③ 1F 事故を踏まえると、複数基立地サイトにおける地震の広範な影響による事故シナリオをどのように評価するかが課題である。本実施基準では、このうち次のような影響については、現時点で可能な範囲で対象とした。
 - a) 隣接する原子炉との設備、人員などの共有、融通による影響(例えば、当該原子炉を評価する場合に、共有設備の使用、シビアアクシデント(SA)対策の繋ぎ込みなどに伴う災害対策要員の確保、電源融通などによる影響を考慮する)
 - b) 原子炉間の損傷の相関性の影響(例えば、サイト内で少なくとも 1 基以上の原子炉で炉心損傷が発生する頻度を評価する場合に、損傷の相関性の影響を

考慮する)

- c) 隣接する原子炉において重大事故の発生を想定した場合の当該原子炉への影響(例えば、隣接原子炉で炉心損傷が発生している状態で当該原子炉を評価する場合に、共有設備が既に使用され、隣接原子炉の緊急時対応に災害対策要員が割かれ、隣接原子炉からの波及影響(水素爆発による影響など)により当該原子炉の安全機能が影響を受ける、放射性物質の影響により当該原子炉の緊急時対応に支障(防護具着用によるコミュニケーションの低下などの影響を考慮する))

2. 引用規格

2007 年版以降に発行された幾つかの標準を引用して、本実施基準の規定の一部を構成した。引用規格と本実施基準の規定に相違がある場合は、本実施基準の規定を優先する。

3. 用語及び定義、略語

用語の定義は、AESJ-SC-RK003 原子力発電所の確率的リスク評価標準で共通に使用される用語の定義を用いることとし、地震 PRA 特有の用語のみを定義した。

4. 評価手順

4.1 地震 PRA の評価手順

地震 PRA は、第 1 図に示す評価手順に従い、サイト・プラント情報の収集・分析、事故シナリオの概括的分析、地震ハザード評価、建屋・機器フラジリティ評価及び事故シーケンス評価を実施し、調査と評価の内容及び結果については文書化を行うが、各箇条に求める調査・評価の結果は、フィードバックすることが必要であることを明記した。

4.2 地震 PRA の品質の確保

地震 PRA の品質を確保するため、専門家判断の活用、ピアレビュー及び品質保証活動を実施するが、附属書 A(規定)地震 PRA の品質を確保するための方策に加え、附属書 B(参考)地震 PRA の品質を確保するための具体的な方策に関する留意事項を充実させた。

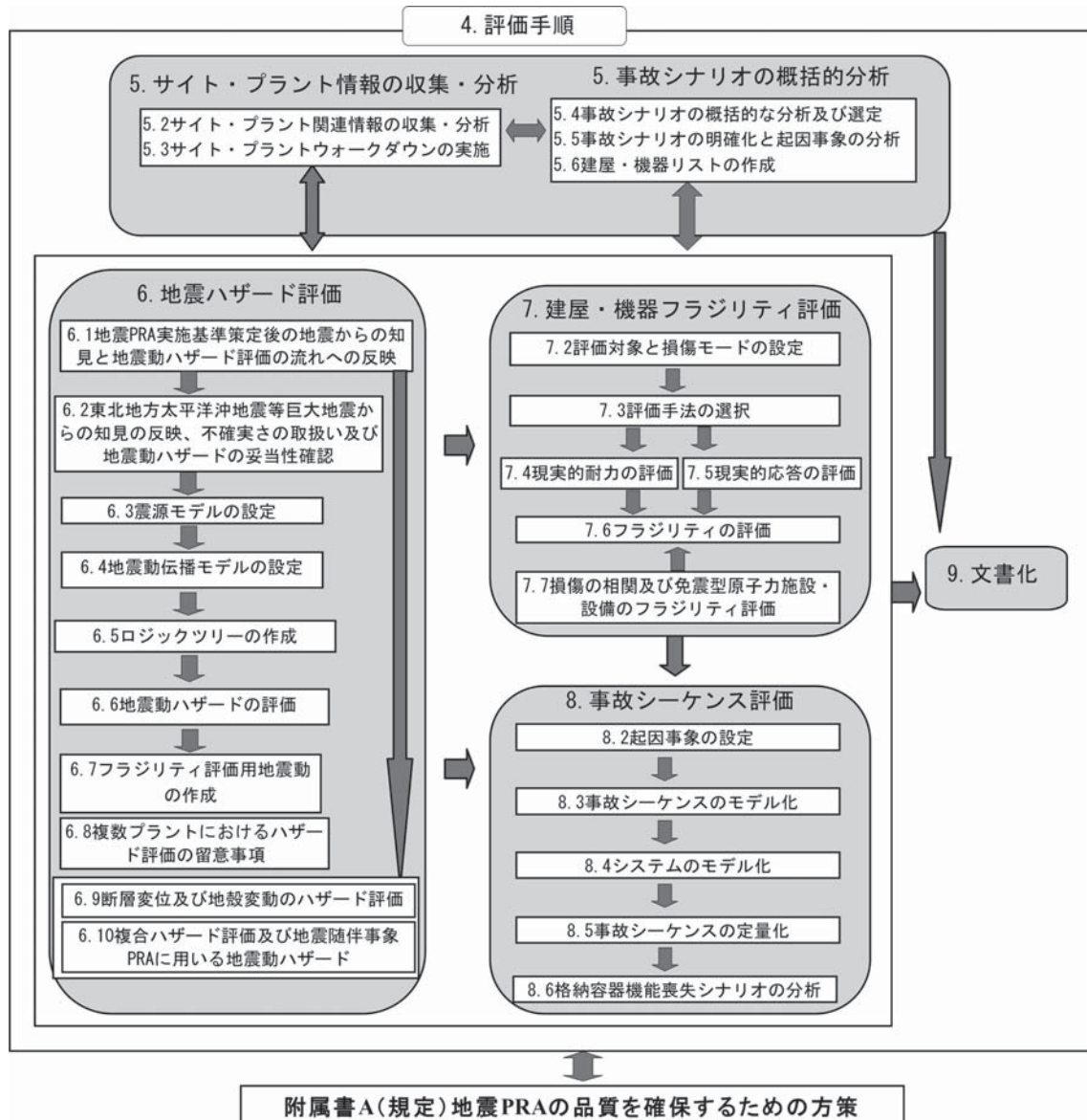
5. サイト・プラント情報の収集・分析と事故シナリオの概括的分析

5.1 サイト・プラント情報の収集・分析と事故シナリオの概括的分析の流れ

第 2 図に示す 5.2～5.6 の手順で実施するが、以下にその概要を説明する。

5.2 サイト・プラント情報の収集・分析

地震 PRA を実施するにあたり必要となるサイトの状況、設計、運転管理などサイト及びプラント関連の固有の情報を幅広く収集するが、新たに、既存の地震 PRA に関する情報、東北地方太平洋沖地震をはじめとする原子力プラント以外も含めた国内外の震害事例、並びに、地震・津波の重畳、SA 設備・緊急対策設備、同一サイト内複数プラントの影響、余震の影響等に関連する文献



第1図 地震PRAの評価手順図(実施基準図4.1)

などの情報も収集することを求め、具体的に活用すべき情報として、附属書C(参考)評価に必要な情報の情報源、附属書D(参考)国内の震害事例、附属書E(参考)地震ハザード評価関連情報の収集及び分析、附属書F(参考)耐震設計審査指針の改定に伴う原子力発電所の耐震バックチェック資料、附属書G(参考)地震本部における情報及び新たな知見などにまとめた。

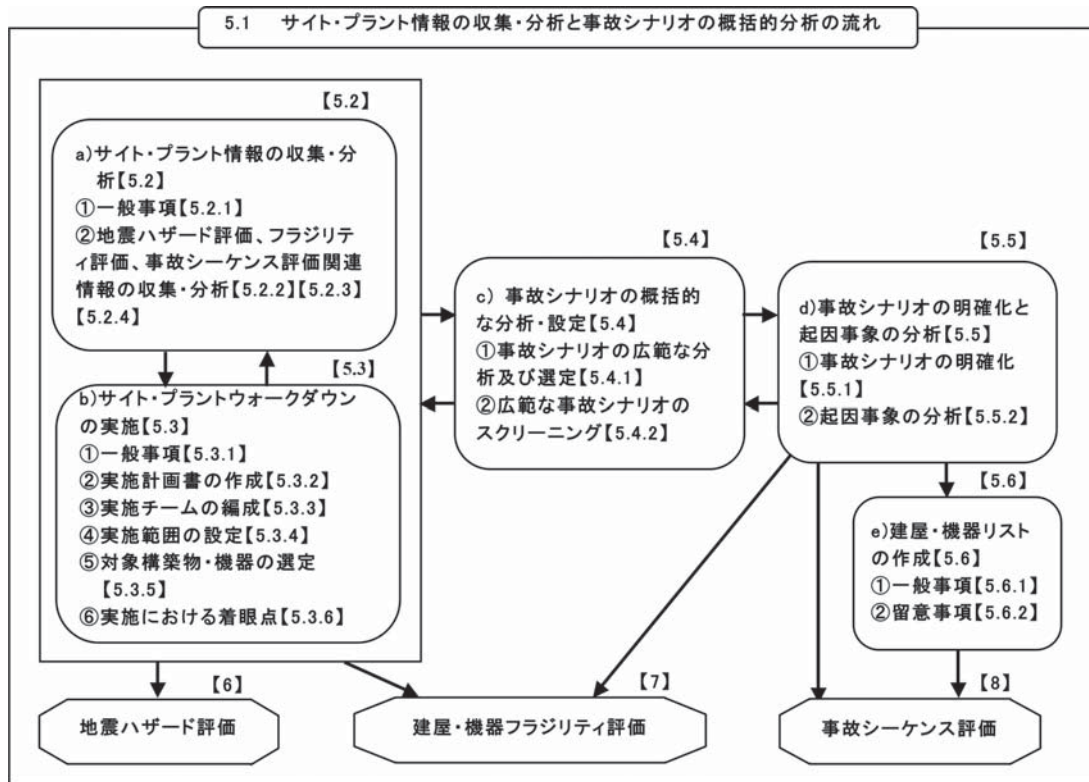
これらは地震PRA実施時に最新情報に更新する必要があること、また、サイト・プラント固有でない情報を評価に用いる場合には、当該プラントとの類似点及び相違点を分析し、それらの情報が当該プラントに適用できることを説明することを明記した。

5.3 サイト・プラントウォークダウンの実施

サイト・プラントウォークダウンでは、机上で行うプラント情報(設計情報又は設計、建設、運転時の検査、評価に関する情報の調査など)の収集からは十分に得られない情報の収集を実施する。2007年版のプラント

ウォークダウンをサイト・プラントウォークダウンとし、その実効的な実施のために、国内外での実績を踏まえて、実施計画書の作成、実施チームの編成、実施範囲の設定、対象構築物・機器の選定などの綿密な事前準備を求めるとともに、耐震安全性、地震動による設備間の相互干渉、地震による2次的影響、地震後のアクセス性の確認など実施における着眼点を具体的に記載するとともに、それに補足する附属書H(参考)サイト・プラントウォークダウン実施の際のチェックシートの例、附属書J(参考)アクセス性の確認方法の例を充実させた。

また、2007年版では耐震性が未確認のため対象外としたSA対策設備、配管及び運転員による復旧操作に関連する機器も対象とするとともに、地震随伴事象で対象とする構築物・機器を対象に含めることを推奨し、例示(例えば、津波防護施設・設備等、津波により漂流物となる可能性のある設備等)した。



第2図 プラント情報の収集・分析と事故シナリオの概括的分析のフロー図(実施基準図5.1)

5.4 事故シナリオの概括的な分析及び設定

次のような地震時特有の事故シナリオを見落としなく抽出及び設定する。

- ① 阪地震動という共通要因によって安全上、重要な構築物・系統・機器 (SSCs) が同時損傷し、複数の異常発生防止系 (PS) 及び/又は異常影響緩和系 (MS) の安全機能が喪失する可能性がある。PRA の観点からは、PS の損傷は起因事象を生じさせ、MS の損傷は緩和機能を喪失させるが、複数の PS 及び/又は複数の MS の同時損傷は、複雑な事故シナリオとなる。
- ② 設計地震動を大きく超える地震動に対しては、重要な SSCs (例えば、原子炉建屋、原子炉圧力容器など) の損傷によって炉心損傷に直結する事故シナリオが生じる可能性がある。
- ③ 地震起因の直接的な損傷による事故シナリオだけでなく、間接的な影響(地震動による2次的影響(斜面崩壊、クレーン落下)、水素爆発による複数基への影響、復旧作業の阻害など)による事故シナリオが生じる。

ここでは、複数の安全上重要な SSCs の同時損傷に着目すること及び SA 対策の考慮、緊急時対策所における緊急時の復旧対応、複数基立地、地盤変状の影響などの新たな課題を特出する形で記述した。

5.5 事故シナリオの明確化と起因事象の分析

地震時特有の事故シナリオに着目して、地震を起因として重大な燃料の損傷に至る可能性のある起因事象を分

析、整理、分類するとともに、起因事象に関わる SSCs 及び緩和設備を分析する。

放置すれば炉心損傷に至る一つの損傷(例えば、原子炉冷却材バウンダリーを構成する1本の配管破断 (LOCA)、SGの1本の伝熱管破断 (SGTR)、外部電源喪失など)によるものを単一故障起因事象と、それらが複数同時に発生する場合(例えば、原子炉冷却材バウンダリーを構成する複数本の配管破断、SGの複数本の伝熱管破断、LOCAと2次系配管破損の同時発生など)を多重故障起因事象と定義し、特に多重故障起因事象に対する事故シナリオの明確化を求め、参考とすべき情報を附属書CS(参考)成功基準の例、附属書CW(参考)イベントツリーの作成例、附属書CY(参考)フォールトツリーの例などにまとめた。

5.6 建屋・機器リストの作成

地震PRAで対象とする建屋・機器リストを作成するが、地震PRAの一連の作業(特に、簡条5、簡条7、簡条8)の中でフィードバックをかけて最終化することを明示した。

なお、津波、火災、溢水などの地震随件事象評価を視野に入れ、評価に必要な機器などを建屋・機器リストに追加することを推奨した。

6. 地震ハザード評価

第2回「地震ハザード評価の概要と改定の要点(仮題)」で解説する。

主な改定点は、地震ハザード評価の枠組みに大きな影響を及ぼした、新潟県中越沖地震と東北地方太平洋沖地

震から得られた知見を中心に、以下を地震ハザード評価手法に反映したことである。

- ①サイト周辺の深部地下構造のモデル化の地震動評価への影響
- ②巨大地震に伴う大きな余震や誘発地震の扱い方
- ③地殻変動ハザードと断層変位ハザードの評価
- ④地震動と津波の重畳
- ⑤複数基立地の取り扱い 等

7. 建屋・機器フラジリティ評価

第3回「建屋・機器フラジリティ評価の概要と改定の要点(仮題)」で解説する。

主な改定点は、1F事故及びそれを踏まえた安全強化対策を考慮して、以下を規定したことである。

- ①現実的地震応答解析に用いる解析モデルは、地震観測記録のシミュレーション解析等や使用実績に基づき、建物・構築物の3次元応答やそれが安全上重要な機器・配管系に及ぼす影響に留意し、損傷限界までの現実的応答の評価に適したものとし、3次元応答による影響として、床の変形、ねじれ及びロッキング等に配慮すること。
- ②可搬式SA対策設備及びそれらの搬入路、使用済燃料プール、免震重要棟などのフラジリティ評価
- ③地震起因の斜面崩壊による建屋や施設への影響を斜面の安定性による間接評価のみならず、崩壊後の土塊の移動や構造物への衝突による衝撃力などを考慮した直接評価
- ④本震以外の余震及び断層変位に起因した地盤変状によるフラジリティ評価
- ⑤津波をはじめとする地震随件事象PRAに関連する要求事項、例えば、本震経験後の津波による現実的耐力評価及び応答評価に資するために、本震による構造的損傷後の影響を必要に応じて評価すること。

8. 事故シーケンス評価

第4回「事故シーケンス評価の概要と改定のポイント(仮題)」で解説する。

主な改定点は、以下の新たな考え方の取りまとめ、あるいは内容の充実である。

- ①使用済燃料プール内燃料の損傷に至る事故シーケンスのスクリーニング方法と発生頻度評価方法
- ②複数システムの同時機能喪失の重要な組み合わせを見落とさないための考え方と、考慮すべき安全上重要な複数システムの同時機能喪失とその事故シーケンス展開の例示
- ③可搬式SA対策設備とその運転員操作を緩和機能として適切に考慮するために必要な、設備の耐震性、アクセス性、対応までの時間余裕、実施体制などに

対する要求事項

- ④新たな課題のうち炉心損傷頻度評価の具体的な手法が確立されていないものについては、それらの課題(余震、リレーチャタリング、地盤変状など)の影響程度を把握するための感度解析の導入

9. 文書化

地震PRAの結果の利用、更新、専門家によるレビューにおいて、PRAの内容及び結果の妥当性が容易に理解できるよう、PRAの目的、評価範囲、用いた手法、条件、モデル、パラメータ、評価結果等を文書化するが、附属書DS(参考)文書化における記載項目の例に具体的に記載すべき項目を示した。

また、この実施基準は利用目的などに応じて複数の選択肢を示したり、利用に際しての留意事項を記載している項目があるので、報告書にはそれらの選択の理由や留意事項への対応を記載することを求めた。

原子力発電所の安全性を客観的に且つ定量的に評価できる手段としてPRAの活用は重要であるが、特に1F事故を契機に、外的事象さらに外的事象の重畳事象が目され、そのPRA手法の必要性が高まった。本改定実施基準が地震起因の様々な事象の分析、評価に用いられ、原子力発電所の安全性向上に活用されれば幸いである。

— 参考資料 —

- 1) AESJ-SC-P006:2007, 原子力発電所の地震を起因とした確率的リスク評価実施基準:2007.
- 2) AESJ-SC-P006:2014, 原子力発電所の地震を起因とした確率的リスク評価実施基準:2014.

著者紹介



平野光将 (ひらの・みつまさ)

東京都市大学

(専門分野/関心分野) 原子力安全工学, リスク評価, 原子力危機管理



高田毅士 (たかだ・つよし)

東京大学

(専門分野/関心分野) リスク評価, 設計論, 耐震工学, リスクコミュニケーション, 技術説明学



成宮祥介 (なるみや・よしゆき)

関西電力(株)

(専門分野/関心分野) リスク評価, 民間規格

軽水炉のシビアアクシデントに関する 核燃料研究の状況と課題

核燃料部会 溶融燃料サブワーキンググループ

核燃料部会は、福島第一原子力発電所の廃止措置や今後のシビアアクシデント対策に関する研究開発等に対して基礎データを提供することを目的として、2012年7月に溶融燃料サブワーキンググループを設置し、シビアアクシデントに関する国内外の既往研究のうち、炉内外試験、核分裂生成物放出試験、溶融燃料の挙動に関する試験、材料間の反応に関する試験など、核燃料に関するものについて調査し、今後の課題を取りまとめた。本稿では、溶融燃料サブワーキンググループの活動の成果を紹介する。

I. 背景と目的

福島第一原子力発電所(1F)1～3号機で起きたシビアアクシデント(SA)では、炉心の溶融が生じ、溶融物の一部は压力容器を貫通して格納容器底部に達したものと見られている。現在、1F1～3号機からの燃料デブリの取出しに向けて、がれきの除去、格納容器内部の観察、炉内状況の推定など、様々な現地作業や研究開発が精力的に進められている。また、1F事故を受けて、SA解析コードの改良やSA模擬試験など、SA対策に関する新たな研究開発が国内でも始められている。これらを効率的に進めるためには、言うまでもなく、関連する既往研究を調査し、それらの成果を十分に活用することが重要である。

そこで、核燃料部会は、「溶融事故における核燃料関連の課題検討ワーキンググループ」の下に溶融燃料サブワーキンググループ(SWG)を2012年7月に設置し、1Fの廃止措置や今後のSA対策に関する研究開発等に対して基礎データを提供することを目的として、SAにおける事象進展、溶融燃料の生成過程と特性、およびモデリング等に関する国内外の既往研究を調査することとした。なお、SAに関しては、様々な視点から数多くの研究が行われているが、溶融燃料SWGでは特に核燃料に関するものに絞って調査した。既に一通りの文献調査を終えており、現在、調査報告書のドラフトを取りまとめ、国内の専門家によるレビューを受けたところである。最終的な報告書は、調査結果がSAに関する種々の

研究に活用されるように、公刊物として発行する予定である。

本稿では、溶融燃料SWGの活動の成果を紹介する。

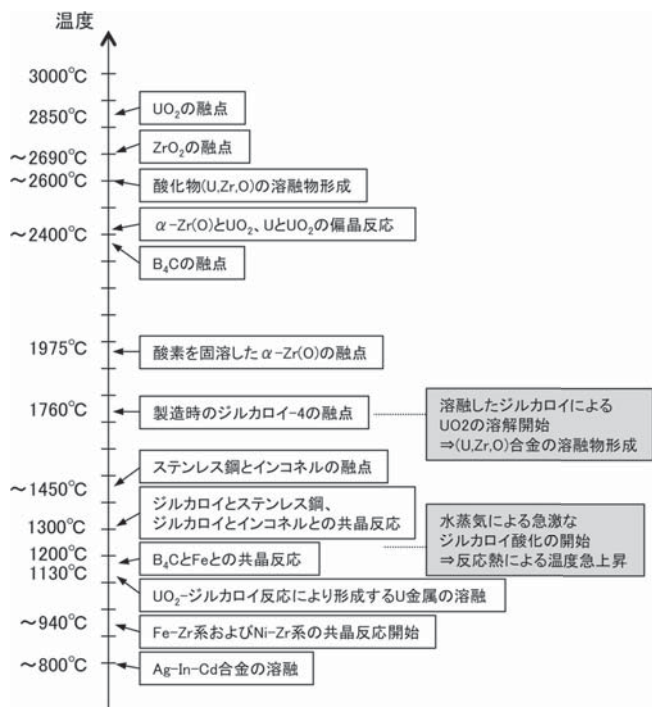
II. SAの事象推移の概要

軽水炉のSA事象の推移は、原子炉の型式や起因事象によって若干の違いがあるものの、概ね次のとおりと考えられている。SAの起因となる冷却材喪失事故や全電源喪失事故では、制御棒の挿入や負の反応度フィードバックにより原子炉の核分裂連鎖反応は停止するものの、崩壊熱の除去に失敗すると、燃料集合体、制御棒およびその他の炉内構造材の温度が上昇し、これらが相互に反応して一部が溶融する。第1図に、炉内の燃料・材料の間で液相を形成する反応の開始温度を示す。1,200℃を超えるような温度では、水蒸気によるジルカロイ被覆管の酸化反応の反応熱によって炉内の温度が急上昇し、被覆管や構造材の融点を超え、さらには燃料ペレットの溶融に至る。損傷が拡大して初期の形状を保持できなくなった炉心では、燃料棒の破損と崩落、溶融物の流下と再凝固などによって熱伝達が劣化した領域が形成され、その内部では一定規模の溶融物のプールが生じる。溶融物が压力容器底部(下部ヘッド)に移行し、熱的な損傷によって压力容器が破損すると、破損孔を通じて溶融物が流下し、格納容器底部のコンクリートと反応する。これらの一連の現象によって、様々な酸化物や合金など(以下、溶融燃料あるいは燃料デブリと呼ぶ)が形成される。

このようなSA時の原子炉内の挙動は、1979年の米国スリーマイル島原子力発電所2号機(TMI-2)における炉心溶融事故の後の炉内状況の分析や解析などによって明らかにされた。また、TMI-2事故以来、近年に至

Status and Issues on Nuclear Fuel Research in the Field of LWR Severe Accident : Division of Nuclear Fuel, Molten Fuel Sub-Working Group.

(2014年5月30日受理)



第1図 軽水炉のシビアアクシデントにおいて液相を形成する化学反応の開始温度
(P. Hofman, J. Nucl. Mater., 270 (1999) 194.)

るまで、研究炉等を用いたSA模擬試験や炉外燃料加熱試験などが米国、欧州、日本などで行われており、燃料集合体の破損・溶融過程や核分裂生成物(FP)の放出挙動などが詳細に調べられた。これらの試験結果はSA解析コードにも反映されている。

Ⅲ. 調査対象

溶融燃料SWGが調査対象としたSA事象進展に関する既往研究は次のとおりである。

- TMI-2事故： 事象進展の概要、炉内物質の特徴、FPの挙動、炉内物質の取出しなど
- 炉内総合試験： STEP, ACRR-ST, ACRR-DF, PBF-SFD, FLHT, LOFT-FP, Phebus-SFD, Phebus-FP(第1表参照)
- 炉外加熱試験： NIELS, CORA, SANDIA-XR, CODEX, QUENCH(第2表参照)
- FP放出に関する炉外加熱試験： ORNL-HI/VI, Heva, Vercors, Vercors HT-RT, VEGA(第3表参照)
- 溶融燃料挙動試験： RASPLAV, MASCA, 溶融燃料-コンクリート相互作用(MCCI)関連試験, 燃料-冷却材相互作用(FCI)関連試験
- 材料間の反応試験： ジルカロイ/水蒸気, ジルカロイ/UO₂, ジルカロイ/構造材, ジルカロイ/制御材, UO₂/構造材, UO₂/制御材, UO₂/水蒸気, 制御材/構造材, 制御材/水蒸気, 構造材/水蒸気
- SA解析コード： MELCOR, THALES,

SAMPSON など

Ⅳ. 調査結果の概要

1. TMI-2事故および炉内総合試験

TMI-2の分析結果や除染作業等については、米国原子力学会のNuclear Technology誌の特集号(1989年のvol.87)を始め、多くの報告書が公刊されている。炉内総合試験は、SA時の燃料溶融進展過程やFP放出挙動などを調べるため、燃料棒または燃料集合体を原子炉内で加熱したもので、水蒸気によるジルカロイ被覆管の酸化反応による温度上昇やFPの放出挙動などを含む、SAの事象進展の総合的な理解に大きく寄与した。これまでに行われた炉内総合試験を第1表に示すが、着目する現象に応じて、燃料棒の本数や長さ、圧力、制御棒の種類などの試験条件が異なっており、各々特徴ある試験となっている。これらの多くは、TMI-2事故後の1980年代に実施されたが、CEAのPhebus-FP試験を最後に現在は実施されていない。また、PWRを模擬した試験が多く、B₄C制御棒を使用した試験はACRR-DFとPhebus-FPの2例のみである。

2. 炉外加熱試験

炉外加熱試験は、未照射の燃料棒または集合体を電気ヒータで加熱することにより溶融進展挙動を調べる試験であり、水蒸気によるジルカロイ被覆管の酸化反応による温度上昇など、SAの初期過程の理解を中心としたものである。これらを第2表に示す。PWRを模擬した試験が多い炉内総合試験とは対照的に、BWRの模擬も考慮してB₄C制御棒を組み入れた試験も比較的多く実施されている。これらのうちXR試験は、BWRのSA初期過程において溶融金属が燃料集合体下部および炉心支持板を通じて排出される挙動の解明を目的としたもので、制御棒ブレードや燃料バンドルを模擬した試験部の上部から、ステンレス鋼とB₄Cの共晶溶融物や溶融ジルカロイを流下させた試験である。CODEX試験とQUENCH試験では、大破断LOCAや使用済燃料プールのSAを考慮して、空気侵入が被覆管破損に及ぼす影響も調べられている。なお、現在まで継続されている試験は燃料ペレットを装荷しないQUENCH試験のみとなっている。

3. FP放出に関する炉外加熱試験

FPの放出に関する炉外加熱試験は、照射済燃料のセグメントを炉外で高温まで加熱し、その際に放出されるFPの量を計測することで、SA時のFP放出挙動を詳細に調べたものである。主な試験パラメータは、加熱温度、雰囲気、圧力などである。これまでに実施された試験(第3表参照)の結果、次のことがわかった。希ガス、Cs、Iは同様の放出速度を示す。Te、Sbは揮発性と見

第1表 炉内総合試験

試験名	PBF-SFD	STEP	ACRR-DF	ACRR-ST	NRU-FLHT	LOFT-FP	Phebus-SFD	ACRR-MP	Phebus-FP	(参考) TMI-2
施設	PBF/INEL	TREAT/ANL	ACRR/SNL	ACRR/SNL	NRU/AECL	LOFT/INEL	Phebus/CEA	ACRR/SNL	Phebus/CEA	発電炉 (PWR)
年代	1982-1985	1984-1985	1984-1986	1985-1989	1985-1987	1984-1985	1986-1989	1989-1992	1993-2004	1979
目的	燃料破損過程, FP放出	FP放出	燃料破損過程	還元雰囲気下でのFP放出	実長の燃料破損過程	初期の炉心損傷過程	初期の炉心損傷過程	後期の溶融進展過程	後期の溶融進展過程, FP放出	—
試験回数	4	4	4	2	4	2	6	2	5	—
燃焼度	0-38 GWd/t	31-36 GWd/t	未照射	47 GWd/t	0-28 GWd/t	0.4-1.4 GWd/t	未照射	未照射	0-38 GWd/t	0.9 GWd/t
燃料棒本数	28 ~ 32	4	9 ~ 14	4	11 ~ 12	11 × 11	21	UO ₂ /ZrO ₂ デブリベット ~ 3kg	20 (FP T4 は デブリベット試験)	全炉心
燃料棒長さ	0.914 m	1 m	0.50 m	0.15 m	4 m	1.67 m	0.8 m	—	1 m	3.6 m
制御棒	Ag-In-Cd	Ag-In-Cd	Ag-In-Cd/B4C	なし	なし	Ag-In-Cd	Ag-In-Cd	Ag, In	Ag-In-Cd/B4C	Ag-In-Cd
圧力	6.8-7.0 MPa	0.16-8MPa	0.7-2.0 MPa	0.2-2.0 MPa	1.4 MPa	0.3-1.4 MPa	0.5-3.5 MPa	0.1 MPa	0.2 MPa	5-15 MPa
最高温度	>2800 K	~ 2900 K	~ 2700 K	~ 2500 K	2300-2600 K	2400-3000 K	~ 2750 K	~ 3400 K	>2800 K	>3000 K

第2表 炉外加熱試験

試験名	NIELS	CORA	SANDIA-XR	CODEX	QUENCH
実施機関	KfK	KfK	SNL	KFKI (Hungary)	KIT (FZK)
年代	1982-1986	1987-1992	1993-1996	1995-2002	1997-
目的	初期の溶融進展過程	初期の溶融進展過程	BWRの金属溶融物の排出挙動	初期の溶融進展過程	注水時の水素発生, 空気侵入の影響, B4C
試験回数	23	19	3	7	16 (継続中)
燃焼度	未照射 UO ₂	未照射 UO ₂	未照射 UO ₂	未照射 UO ₂	被覆管のみ
燃料棒本数	1 ~ 9	25 ~ 59	64	7 ~ 9	~ 20
燃料棒長さ	0.4 m	1.0 m	1.0 m	0.6 m	1.0 m
制御棒	Ag-In-Cd	Ag-In-Cd/B4C	B4C	B4C	Ag-In-Cd/B4C
圧力	0.1 MPa	0.2-1.0 MPa	0.1 MPa	—	—
最高温度	2523 K	2300 ~ 2500 K	~ 2300 K	~ 2000 K	1800 ~ 2400 K

第3表 FP放出に関する炉外加熱試験

試験名	HI	VI	HEVA	VERCORS	VERCORS HT-RT	VEGA
実施機関	ORNL	ORNL	CEA	CEA	CEA	JAERI
目的	燃料からのFP放出挙動	縦置き, 雰囲気の影響	雰囲気の影響	雰囲気の影響	高燃焼度, 高温(溶融)	圧力, MOX, 雰囲気の影響
試験回数	6	7	8	6	8	10
燃焼度	10 ~ 40 GWd/t	40 ~ 47 GWd/t	19 ~ 37 GWd/t	28 ~ 55 GWd/t	37 ~ 72 GWd/t	43 ~ 56 GWd/t
セグメント長さ	152 ~ 203 mm	152 mm	(ペレット3個)	(ペレット3個)	(ペレット3個)	~ 20 mm
最高温度	1675 ~ 2275 K	2300 ~ 2720 K	1900 ~ 2370 K	2130 ~ 2620 K	2423 ~ 2970 K	2773 ~ 3123 K
圧力	0.1 MPa	0.1 MPa	0.1 MPa	0.1 MPa	0.1 MPa	0.1 ~ 1 MPa
雰囲気ガス	水蒸気	水蒸気, 水素, 水素+水蒸気, 空気+水蒸気	水蒸気, 水蒸気+水素, 水素+水蒸気	水蒸気, 水素, 空気+水蒸気, 水素+水蒸気	水蒸気, 水素, 空気	He, He + 水蒸気

なせるが、未酸化の被覆管に一旦保持され、被覆管酸化時に放出される。これらの揮発性物質は約 2,600K 以上ではほぼ全量が燃料から放出される。中揮発性の FP である Mo, Rh, Ba の放出率は揮発性物質の約半分となるが、雰囲気(酸化性/還元性)に影響されやすい。Mo の放出率は酸化雰囲気では増加するが、Ba と Rh の放出率は還元雰囲気が増加する。低揮発性物質の Ru, Ce, Np, Eu, Sr は放出率が低く、3 ~ 10% が放出される。非揮発性の Zr, Nb, La, Nd は 2,600K 以下では放出されない。これらの知見のほか、燃料溶融の影響、雰囲気による放出挙動の違いなどについて低揮発性 FP も含めてデータが得られている。これらのデータを基に、CORSOR-M, CORSOR-BOOTH, ORNL-BOOTH 等いくつかの FP 放出モデルが開発され、SA 解析コードに組み込まれている。

4. 溶融燃料挙動試験

SA の後期過程(炉心損傷が進展し、燃料溶融の規模が拡大した段階)では、溶融燃料(コリウム)の下部ヘッドにおける挙動、下部ヘッドに残留した冷却水との相互作用(FCI)、圧力容器との相互作用、コンクリートとの相互作用(MCCI)が重要であり、これらについても多くの研究例がある。RASPLAV および MASCA 試験は、コリウムと圧力容器との相互作用、下部ヘッドにおけるコリウムの熱流動・成層化などに関する試験である。MASCA 試験では、U 酸化物と Zr 酸化物との溶融物(酸化物層)と Fe を主成分とする溶融金属層が分離して成層化する現象について調べられた。この結果、酸化物層と金属層の上下関係は、酸化物層の酸素量(酸化割合)によって変わり、酸素が少ない場合には金属 U が生成して金属層に移行するため、金属層の密度が上がり金属層が下になることなどが明らかにされた。

FARO, KROTOS, ALPHA, COMET 等の試験は、コリウムが冷却材に注入された時の冷却・凝固挙動、水

蒸気爆発の条件、凝固物の粒径などに関する試験である。MCCI に関する試験には、SURC, ACE, MACE, COTELS, OECD/MCCI, VULCANO 等がある。MCCI に関係する現象には、コンクリートの高温挙動と分解、溶融物プールのガスバブルによる攪拌・熱流動、コンクリートの溶融と溶融物への混合、溶融物の凝固に伴う溶融物組成の変化、溶融物プールの上面および溶融物-コンクリート界面に形成されるクラスト層の挙動(クラック、伝熱など)、金属成分の酸化および酸化反応に伴う発熱などがある。MCCI の特徴はこれらが強く関連し合っている点にある。また、コンクリートには、ケイ質系、玄武岩系、石灰質系などいくつかの種類があり、MCCI 挙動がコンクリートの種類によって異なる点にも注意が必要である。

5. 材料間の反応試験

UO₂, ジルカロイ, 構造材(ステンレス鋼, インコネル), 制御材(Ag-In-Cd, B₄C, Hf)および水蒸気との反応は、SA の現象理解とモデリングの基礎となる。これらの組み合わせに対して多くの研究が行われており、各々の反応速度が温度の関数として定式化されている。また、高温における UO₂ とジルカロイとの反応を説明するため、2,950℃までの U-Zr-O 系の 3 元系状態図が得られている。1990 年代には B₄C とステンレス鋼および B₄C とジルカロイとの反応が多く調べられており、2000 年代からは B₄C と水蒸気との反応に関する研究が行われている。これらの結果、B₄C と水蒸気との反応は複雑で、水素、メタン、一酸化炭素等のガス発生を伴うことが明らかになった。最近では、使用済燃料プールにおける SA などを想定し、空気侵入がジルカロイの酸化反応に及ぼす影響に関する研究が進められている。

6. SA 解析コード

SA 解析コードは、SA 時の熱水力、溶融進展挙動、

FPの環境への放出などを総合的に解析する総合解析コード、および限定された現象を機構論的に解析する詳細コードの2種類に大別される。前者には、MAAP, MELCOR, THALES, ASTEC等、後者には、SCDAP/RELAP, ICARE, SAMPSON等がある。これらのコードでは、燃料破損挙動、溶融・リロケーション・凝固挙動、化学反応(発熱と生成物)、デブリベッドの挙動、燃料-冷却材反応、溶融燃料の压力容器からの漏洩、FPの挙動などが解析目的に合わせてモデル化されているが、改良の余地があると考えられる。

V. 今後の課題

1. 1F事故の事象進展の解明

今後、1Fの廃止措置が進み、格納容器内部の状況が明らかにされてゆくことが期待される。これらをもとに、1F事故の事象進展の全貌を解明してゆき、明らかになった情報を、逐次、世界の軽水炉の安全性向上のために活用してゆく必要がある。1F事故の事象進展の解明においては、BWR特有の事象進展の研究や1F事故特有の事項に関する評価が重要となろう。第4表は、TMI-2事故(PWR)と1F事故(BWR)の相違点とこれらが溶融燃料の特性に及ぼす影響を検討する際の視点をまとめたものである。BWR特有の事象進展は、炉内総合試験や炉外加熱試験で試験例はあるものの、B₄C制御棒/チャンネルボックス/燃料棒の間の化学的相互作用、ZrやFe濃度の高い溶融燃料の再配置やMCCI等の挙動、貫通孔の多い压力容器下部の溶融燃料の貫通などについては、既往研究では十分ではないため、一層の研究が必要と考えられる。数時間にわたったと考えられる溶融継続時間や海水注入など1F事故特有の事項について

は、これらが溶融燃料の特性やFP放出挙動に及ぼす影響を試験や解析によって推定し、評価する必要がある。なお、1F事故プラント内部の観察や溶融燃料等のサンプリングが可能となれば、これらの詳細な分析によって到達最高温度や温度履歴など事象進展解明のための重要な手がかりが得られるものと期待される。

2. SA現象理解の深化

1F事故を契機として、規制基準の改訂、事業者による自主的な安全性向上への取組み、SA関連研究の進展など、軽水炉の安全性向上を取り巻く状況が大きく変化している。このような状況にあつては、BWRや1F事故特有の事項に留まらず、SAに関する様々な現象の理解の深化、およびSA現象のモデリングと解析コードの高度化が重要である。SAに関する現象については、これまでに述べたように、多くの炉内総合試験、炉外加熱試験、溶融燃料挙動試験が実施されてきたが、今後は、燃料、構造材料、冷却材からなる多元系の化学反応を含む現象について理解を深めるため、炉内の事象については次のような試験やモデリングなどが望まれる。

- 溶融前の燃料破損とペレット分散挙動、FP放出挙動(特に高燃焼度)
- 制御棒破損・溶融挙動
- ステンレス鋼、ジルカロイ、制御材、UO₂等の間の反応の進展
- 溶融燃料の成層化挙動およびFP放出挙動に及ぼす雰囲気や溶融燃料組成の影響
- MCCIにおける溶融燃料の組成、ガス発生量、反応速度、冷却性、雰囲気などの影響
- 格納容器の損傷防止対策、停止中の原子炉や使用済燃

第4表 TMI-2事故(PWR)と1F事故(BWR)の相違点とこれらが溶融燃料の特性に及ぼす影響を検討する際の視点

項目	TMI-2(PWR)	1F(BWR)	溶融燃料の特性に及ぼす影響を検討する際の視点	
燃料 構造材	燃料構造	スパーサグリッド	チャンネルボックス	炉内にジルカロイ量が多く、溶融燃料中のZr濃度が高い？ 溶融燃料による压力容器の貫通、溶融燃料とコンクリートとの反応等に影響？
	制御棒	Ag-In-Cd / SS被覆	B4C / SS被覆	制御棒-チャンネルボックス-燃料棒の間の化学的相互作用。 ホウ素とFeとの共晶反応が貴金属FPの挙動に影響？ B4Cと水蒸気との反応によるCO ₂ やH ₂ ガス発生の影響？
	燃料 燃焼度	UO ₂ 運転開始後3ヶ月	Gdを含有、一部にMOX 新燃料~高燃焼度	MOXやGdは燃料デブリの性状等には大きくは影響しない？ 溶融燃料中のFP量が多い。水の放射線分解に要配慮？
炉内構造	炉容器下部構造	炉心支持板、 計装案内管など	炉心支持板、 制御棒案内管/駆動軸他	炉容器下部構造の鋼材の量が多く、下部ヘッダの溶融燃料のFe濃度が高い？ 溶融燃料による压力容器の貫通、溶融燃料とコンクリートとの反応等に影響？ 貴金属FPを多く含む？
事象進展	溶融継続時間	1~2時間	数時間	炉内の溶融領域の割合が大きい？ 揮発性FPの放出が大？ 燃料デブリの一部が緻密化？ 溶融燃料の一部は压力容器の下に落下、コンクリートと反応。
	圧力	> 50気圧	大気圧~数気圧	圧力は冶金学的な反応には大きくは影響しない？
	海水注入	なし	あり	海水成分の挙動は不明。FP放出挙動や溶融燃料の性状への影響は？ 冷却時のFPの浸出挙動や保管容器の腐食等に影響？
取出しまでの期間	事故発生から取出し完了までに10年	取出し着手までに10年程度を想定	冷却期間が長期化すると燃料デブリの性状に変化？ FPの浸出に影響？	

燃料貯蔵プールにおける燃料損傷防止などに関しても、関連する現象の理解の深化、モデリングと解析コードの高度化が重要となろう。格納容器の損傷防止対策については、溶融燃料の压力容器からの流下・分散挙動の研究やコアキャッチャ概念の検討などが考えられる。停止中の原子炉や使用済燃料貯蔵プールにおける燃料損傷防止については、崩壊熱が低いこと、多くの既往研究では空気侵入を想定していないこと等から、空気を含む雰囲気における燃料破損・溶融挙動、溶融燃料の流動と構造材との反応、FP放出挙動などに関する研究が重要となろう。

SA現象理解の基礎となる UO_2 、ジルカロイ、構造材(ステンレス鋼、インコネル)、制御材(Ag-In-Cd, B_4C , Hf)および水蒸気間の反応については、これらの組み合わせについて多くの研究が行われてきた。今後は、 UO_2 -ジルカロイ-ステンレス鋼、ジルカロイ-ステンレス鋼- B_4C など3つ以上の組み合わせに関する研究を進め、SA現象理解の深化に努めることが望まれる。

(執筆担当：(電中研)尾形孝成)

－ 参考資料 －

本稿は溶融燃料SWGによる非常に多くの文献の調査結果が基になっているが、全てを引用することができないので、ここではSAに関する総論を挙げておく。

- 1) Nuclear Safety in Light Water Reactors, ed. by B.R. Sehgal, Elsevier, (2012).
- 2) In-Vessel Core Degradation in LWR Severe Accidents: A State of the Art Report to CSNI January 1991, NEA/CSNI/R (91) 12, OECD/NEA, (1991).
- 3) In-Vessel Core Degradation Code Validation Matrix, NEA/CSNI/R (95) 21 OECD/NEA, (1996).
- 4) 軽水炉のシビアアクシデント研究の現状, 日本原子力学会誌, vol.35, No.9, (1993).
- 5) シビアアクシデント研究に関するCSARP計画の成果, 日本原子力学会誌, vol.39, No.2, (1997).1)

溶融燃料SWGメンバー(五十音順, 敬称略, ○: リーダー)

浅賀健男(JAEA), 宇根勝巳(NFD), 大石佑治(阪大), 太田宏一(電中研), 大脇理夫(原燃工), ○尾形孝成(電中研), 小澤正明(原子力規制庁), 木戸俊哉(NDC), 草ヶ谷和幸(GNF-J), 工藤保(JAEA), 柴田裕樹(JAEA), 鈴木嘉章(JANSI), 園田健(電中研), 中村勤也(電中研), 三輪周平(JAEA)

学会誌への投稿記事の採否に関する判断基準

日本原子力学会 編集委員会

学会誌への投稿は、記事原稿の作成に先立ち、記事提案書(学会HPに記載)の提出が必要となります。提出された記事提案書は編集委員会で審議し、通過したものについて記事原稿を提出していただくことにしています。

投稿記事の内容については著者に責任がありますが、記事提案書の審議において、投稿記事が下記のいずれかに該当すると判断した場合は、学会誌に掲載することをお断りすることにしています。なお、記事提案書に基づいて執筆された記事原稿につきましても、下記のいずれかに該当すると判断した場合や、記事提案書と異なる内容の原稿が提出された場合は、掲載することをお断りすることにしています。

- (1) 事実を無視し、あるいは歪曲した意見。
- (2) 真偽が不明な内容を含む場合。
- (3) 文章に論理性がない場合。文章が意味不明な場合。
- (4) 掲載することにより、学会の品位に傷がつく恐れがある場合。
- (5) 良識に欠けると思われる意見。例えば、個人あるいは組織の中傷・誹謗、一方的な極め付けなど。
- (6) 美醜、好悪に類する判断に依拠している場合。
- (7) すでに掲載された記事と同様の内容である場合。
- (8) 商業的な広告・宣伝などを目的とする場合。
- (9) 会員にとって掲載する価値がない場合。
- (10) 余り期間を空けない同一者からの投稿。

(注1) 記事提案書の審議結果については約1か月で事務局よりお知らせいたします。

(注2) 掲載否の場合、該当事由の番号をお知らせしますが、それ以上の説明は致しません。

(改定 2012年6月1日)

解説

保障措置のための使用済燃料中の核物質質量評価 燃焼計算コード検証委員会の活動

電力中央研究所 名内 泰志, 笹原 昭博

原子力発電所から日本原燃(株)六ヶ所再処理工場(RRP)へ使用済燃料集合体を搬出する際、核物質であるウラン、プルトニウム同位体の重量の燃焼計算コードによる計算値が報告される。一方、再処理の過程では、これらの核物質質量が物理的に計量される。計算値と計量値の差を受け払い間差異(Shipper and Receiver Difference : SRD)という。電力中央研究所は、産官学の専門家を集めて委員会を設け、SRD 発生の要因を検討した。燃焼計算コードは新設計の燃料集合体の導入等に応じて更新され、核物質質量は燃料の使用時期毎の燃焼計算コードで評価されている。更新でより詳細な燃焼計算手法の導入が進み、将来 SRD が減少する傾向にあることを確認した。

I. はじめに

日本は核兵器不拡散条約(NPT)に加盟しており、国内の電力会社や原子燃料メーカー等の原子力事業者は、ウラン(U)やプルトニウム(Pu)等の核物質を適切に管理する義務を負っている。一方、国及び国際原子力機関(IAEA)は、核物質が平和目的にのみ使用され、軍事目的に転用されていないこと、未申告の核物質がないことを、核物質の入った容器の封じ込め監視や、物理的な計量(重量測定等)により、検認(これを保障措置と呼ぶ)する。

原子力事業所間で核物質である核燃料を移動する際は、その払い出した核物質の量と受け取った核物質の量が妥当な範囲で合致する必要がある。この核物質の払い出し量と受け取り量との間の差異をSRDという。

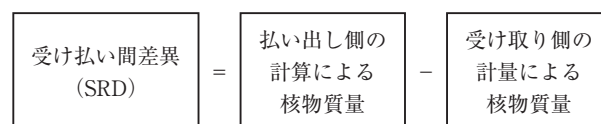
国内の原子力発電所から日本原燃(株)六ヶ所再処理工場(RRP)に核燃料が輸送、処理される場合は、RRPでは再処理工程で、重量測定、元素分析等により複数の燃料集合体の核物質質量をまとめて計量し、それを受け取り量とする。

一方、各発電所では、計量管理単位である燃料集合体毎に核物質質量を計算する。RRPで計量にかかった燃料集合体の核物質質量計算値を合算し、これを払い出し量とする。この両者の差をもってSRDとしている(第1図)。

核物質質量の計算値にも、計量値にも誤差はあるため、通常はSRDが生じる。RRPでは平成18～19年度に実際の使用済燃料を処理する最終試験(アクティブ試験)が実施され、この試験に使用された燃料のSRDが評価された。この値はIAEAに報告され、適切な範囲にある

Estimation of Amount of Nuclear Material in Spent Fuel for SRD ; Activity of the Committee on Burn-up Calculation Code Verification : Yasushi NAUCHI, Akihiro SASAHARA.

(2014年6月11日 受理)



第1図 RRPでの再処理での受け払い間差異(SRD)評価

と了承されたが、使用済燃料再処理の本格化を前に、事業者はSRD低減に向けた継続的な努力をIAEAから求められた。このため、払い出し側の核物質質量の誤差要因である燃焼計算(原子炉内の燃料の核変換をシミュレーションする計算コードを用いた計算)に関する調査が必要となった。

電力中央研究所は、「燃焼計算コード検証委員会」を平成21年4月～平成24年3月の期間設置し、RRPで再処理された燃料の燃焼計算の問題点と、今後の改善方法を議論した。委員会は、大学、研究機関等の燃焼計算と保障措置の専門家および、電気事業、原子燃料メーカー等の産官学からのオブザーバで構成された。以下ではPuのSRDに関する評価方法と本委員会が検討した内容について概要を紹介する。

II. SRD の評価手法

1. 発電所での燃焼計算

PWRにおいては、運転期間中、原子炉の出力や炉内温度、中性子束分布を測定する。この測定から各燃料集合体の出力分布と燃焼度分布が得られる。一方、燃料集合体のタイプ毎に設計データ(形状と組成)を用いて水平方向2次元の燃焼計算(集合体燃焼計算)を実施し、いろいろな燃焼度に対するUとPuの同位体組成の計算値をまとめたデータベース(同位体テーブル)を用意する。測定で得られた燃料集合体の高さ方向(軸方向)位置の燃焼度に対応するPuやUの同位体組成を、この同位体テーブルより抽出して、燃料集合体全体で高さ方向に積分する

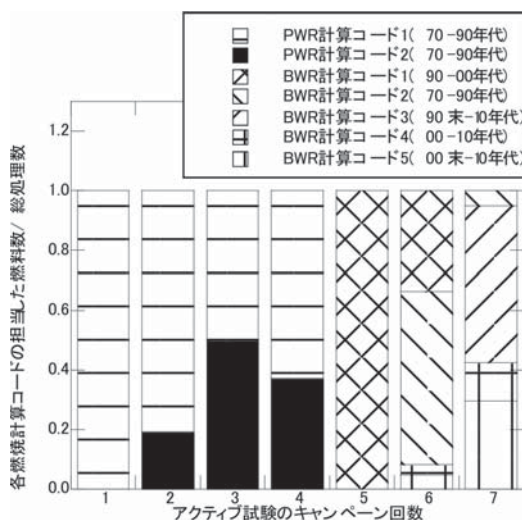
ことで、燃料集合体に含まれるPuとU量を得る。この量を払い出し量とする。

BWRでは、炉心全体の熱出力、冷却材流量、中性子束分布等の実測値をもとに、プラントに設置された専用の計算コード(プロセス計算機)を用いて燃料集合体毎の出力分布、ボイド率分布、流量分布を求める。これを運転時間で積分することで、運転サイクル毎に燃料集合体の燃焼度と、履歴ボイド率(ボイド率の運転サイクルの期間での平均値)分布を求める。一方、燃料集合体の燃焼度と履歴ボイド率をパラメータに燃料集合体水平方向を2次元でモデル化した集合体燃焼計算を行って、同位体テーブルを作成し、この同位体テーブルから燃焼度と履歴ボイド率に応じたPuやU量を得て、燃料集合体全体で高さ方向に積分することで、PuとUの払い出し量とする。

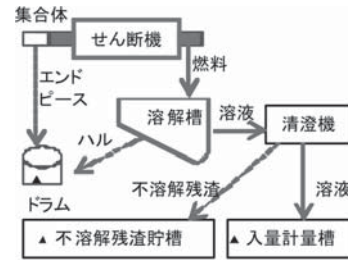
同位体テーブル等は新しい種類の燃料集合体の導入等を機に更新されている。テーブルの作成に用いる燃焼計算は、1970年代から現在に至るまで、計算モデルや核反応データベース(核データライブラリー)の改良・改善が進められている。そのため、RRPアクティブ試験に供された燃料集合体の中では、第2図に示すように、70年代に使われた燃焼計算コードで核物質量を評価された燃料と、現行コードで核物質量を評価された燃料が混在している。

2. 受け入れ側の計量分析

RRPでは、1回の作業(1キャンペーン)で数十から数百体の燃料集合体がアクティブ試験で用いられ、SRDはキャンペーン毎に評価された。第3図に示すように、燃料集合体はせん断された後、溶解槽に送られて硝酸溶液で溶解される。この溶液は清澄機で不溶解残渣と分離された後、入量計量槽に移され、質量分析法等によってPuやUの濃度、同位体比、容量が測定される。不溶解残渣を含む廃液や燃料被覆管せん断片(ハル)、エンド



第2図 RRPアクティブ試験に供された燃料集合体の核物質量評価に用いられた各種燃焼計算コード割合



▲ の箇所で計量

第3図 RRPの計量点の概要

ピースに付着した核物質についても計量が行われ、配管等に付着した成分も評価されている。RRPでは、IAEAもこれらの検認を実施しており、RRPとIAEAの核物質計量値はよく合致している。

II.1節で述べたように、RRPのアクティブ試験では、同じキャンペーンでも様々な燃焼計算コードで組成が評価された燃料集合体が同時に処理され、それらをまとめた条件でSRDが評価されている。

III. SRDの発生要因の検討

1. PWRの燃焼計算の調査

PWRにおける出力・燃焼度分布の計算は、取替炉心設計値と中性子束測定値等との照合によってその精度が確認されているため、SRDの主要因は同位体テーブルを作成している燃料集合体の燃焼計算にあると考えられた。

1970年代から使用されていた旧来の燃焼計算コードには、計算機性能や記憶媒体の容量の制限のため、現在と比較すると多くの近似が使われている。委員会で検討した結果、Puの生成量に影響した項目として、以下が抽出された。

- (1) 核物質の燃焼に伴う核変換の計算で用いる燃焼チェーンで ^{238}Pu の生成を考慮していなかった。1970年代当時、使用済燃料の燃焼度が低かったため、炉心管理では ^{238}Pu の生成まで考慮する必要が小さかったからである。
- (2) 燃料性能は同様であるが、ペレット径が少し異なる二種類ペレットが用いられているが、一部のプラントで両者を同等に取り扱う近似を用いてPu量が算出された。ペレット径の違いによりPuの生成量も数%変化する。
- (3) 中性子吸収体挿入履歴の考慮が詳細ではなかった。ガドリニウム添加燃料の導入以前は、燃料集合体には運転サイクル初期の反応度を抑制するためにハウケイ酸ガラス等で構成される中性子吸収体が挿入されていることが多かったが、中性子吸収体の挿入により中性子スペクトルが変化するため、Puの生成量に影響する。

以上の項目の各々について影響を評価し、Puの生成量は、(1)と(3)の考慮で増加し、(2)の考慮で減少すること

を確認した。次にこれらの事項のSRDへの影響を調査した。アクティブ試験に供された燃料集合体の軸方向の燃焼度分布の実測データは、すでに炉心管理で活用済みのため処分されている。そのため再計算するに当たっては別途、設計計算の燃焼度分布を用い、補正係数を導入することで、旧燃焼計算コードと同様の計算を、現在の燃焼計算コードで実施し、(但し、(1)~(3)の項目を考慮した計算)、SRDを再評価した。その結果、第4図に示すようにPuのSRDが減少(改善)することを確認した。

2. BWRの燃焼計算の調査

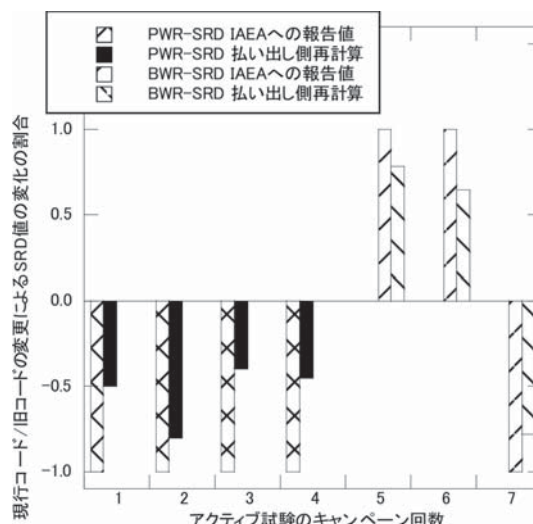
BWRでは、プロセス計算機と、燃料集合体燃焼計算コードにSRDの要因が求められた。プロセス計算機を用いた3次元炉心計算による集合体燃焼度、ボイド率の評価では、中性子束測定値を用いているため、SRDに影響を与える燃焼度、履歴ボイド率の誤差は出にくく、また炉心や燃料集合体の幾何学的な製造公差、炉心熱出力の誤差がSRDに与える影響も少ないことを確認した。そこで集合体燃焼計算コードを調査した。現行の国内の燃料集合体燃焼計算コードは3種類あるが、ベンチマーク計算によりこれらの差は±3%以内であることを確認した。これら現行の計算コードは、燃焼計算の詳細化やガドリニウム(Gd)入り燃料の幾何学モデルの詳細化等の改良が進められている。そのため、改良前の旧コードで評価されたSRDと現コードで再計算したSRDの比較を行った。

BWRもPWRと同様に、アクティブ試験に供された燃料集合体の軸方向の燃焼度分布等の実測データは、すでに炉心管理に活用済みのため処分されている。そのため、再計算するに当たっては別途、代表的な燃焼度分布、履歴ボイド率を用いて新/旧燃焼計算コードの解析の比較を行い、それを基に近似的に現行燃焼計算コードによる払い出し量として評価した。これを第4図に示す。現行燃焼計算コードにおいて核データライブラリーや計算手法の更新により、PuのSRDが減少することが確認された。

また、BWRの核物質質量の評価で、さらに詳細な燃焼履歴を将来取り入れることで、PuのSRDがさらに減少し、改善する見込みであることを解析により確認した。

IV. 今後への提言

PWR, BWRを通じて、燃焼計算コードは、核データ処理の精緻化、中性子エネルギー群構造の最適化、燃焼チェーンの拡大などが進められており、燃焼計算の精度が向上する方向にある。今後は、核種生成量に関する計算ベンチマーク、使用済燃料の照射後試験データ等との比較、そしてRRPでの再処理事業の進展に伴い評価の進むSRDの傾向を分析、議論し、各燃焼計算コードの手法の改善に反映していくことが望ましい。さらに改善された燃焼計算コードで払い出し量を再計算すること



第4図 燃焼度・履歴ボイド率等を仮定した現行の集合体燃焼計算コードで再計算したSRDの改善状況

で、評価済みのSRDの改善も期待できるので、その集合体燃焼計算の入力データとして

- ・初期ウラン重量を含む燃料集合体の製造仕様、
- ・3次元炉心計算に用いる熱水力計算用データ、
- ・燃料装荷配置及び中性子吸収体の挿入履歴、
- ・炉心熱出力、制御棒位置、測定中性子束分布、等のデータ保管を提言した。

V. 結び

SRDの発生要因として燃焼計算を分析し、その主要因を特定し、今後SRDの低減が期待できる方向にあることを示した。本委員会の活動状況は、国を通じてIAEAへ報告され、IAEAも同活動を、我が国の保障措置に対する積極的な取り組みとして認めている。また、本委員会の提言に応じて、各電力会社は、将来のSRD再検討に必要な炉心運転情報の保存手段を準備している。今後、SRDが評価された際は、それを分析し、燃焼計算へフィードバックすることが望ましい。産官学を集めた本委員会は、そうした将来の議論の場の礎となるものである。

著者紹介



名内泰志 (なうち・やすし)
電力中央研究所
(専門分野)原子炉物理, 放射線計測



笹原昭博 (ささはら・あきひろ)
電力中央研究所
(専門分野)原子炉物理, 核燃料工学

地球温暖化防止のための長期エネルギービジョン

第1回 長期ビジョンに基づくエネルギーシステム構成

キャノングローバル戦略研究所 氏田 博士, 段 烽 軍, 湯原 哲夫

地球温暖化抑制のための新たな二酸化炭素排出シナリオとして、長期的な気候変動被害が避けられると同時に、短期的により多くのCO₂排出を許容するZ650を提示した。このシナリオをベースに、エネルギーモデルを用いて世界全体のエネルギーシステムのコストをミニマムとする最適化により世界で共有できる2100年までの長期ビジョンを検討した。その考え方と検討プロセスを概説する。モデルシミュレーションで得られた長期的な1次エネルギー構成は、現在の化石燃料中心(8割)から、2100年には再生可能と原子力エネルギーによる低炭素化かつ多元化する方向(合計7割)に変化していく。このビジョンは、現状政策の延長で得られるエネルギー構成より持続可能性が高く、しかも現状と将来見通しのある技術によって実現可能である。

I. はじめに

1992年6月の地球サミットにおいて気候変動枠組条約が採択されて以降、温暖化抑制に係わる国際的な議論が進められてきている。1997年の第3回締約国会議(COP3)においては京都議定書が採択され、初めて法的拘束力のある数値目標が設定された。その後、第1約束期間が終了する2012年に向けて、新たな気候レジームの検討が行われてきた。しかし、2009年のCOP15で予定していた国際合意が達成できず、それ以降、気候変動に関する国際交渉は混迷状態に陥っている。2010年のカンクン合意と2011年のダーバン合意が得られ、適応、資金、検証方式等の個別分野で一定の進展がみられたが、新たな気候レジームの確立には至っていない、科学的な検証が不十分と指摘されている。その原因の一つは、共通目標の不在である。産業革命前のレベルからの温度上昇を2℃以内に抑えるべきであるという数値目標はある程度共有されてはいるが、それを実現するための温室効果ガス排出経路について共通認識が得られていない。

G8サミットでは、気候変動政府間パネル(IPCC)第4次評価報告書を根拠に、2050年に1990年ベースで温室効果ガス排出を50%削減の目標を提唱したが、実現可能性が低いと同時に、科学的な検証が不十分と指摘されている。

Examination of a Globally Sharable Mid- to Long-Term Vision for a New Climate Regime (1) ; Long-Term Energy System Composition : Hiroshi UJITA, Fengjun DUAN, Tetsuo YUHARA.

(2014年6月2日 受理)

一方、最近の気候変動科学の分野では、IPCCの従来型安定化シナリオと異なるアプローチの研究が多く行われ¹⁾、長期的な気温上昇は、排出経路の依存性はあまり高くなく、むしろ累積排出量に主に支配されるということが、気候変動政府間パネルの第5次報告、IPCC-AR5²⁾において明確に指摘された。すなわち、当面の排出量が大きくても、将来における低排出が実現できれば、長期的な気温上昇を既存の低排出シナリオと同等以下にできる可能性があるということになる。Matsunoら³⁾は、このいわゆるオーバーシュートシナリオを進展させ、近い将来に排出総量が地球吸収能力以下に低減できれば、大気中の温室効果ガス濃度も気温も長期的に緩やかに減少すると指摘し、22世紀の半ばにゼロエミッションの実現を前提に、21世紀における累積CO₂排出総量制約を650GtCに抑えるZ650シナリオを提案した。このシナリオの将来気候変動を簡易気象モデルにより検証した結果、21世紀初期における多くの排出により、大気中のCO₂濃度は一度530ppm程度に上がるが、その後の大幅排出削減によって徐々に低下していき、長期的に380ppm程度に安定することが示された。対応する気温上昇については、短期的には産業革命前のレベルから2.3℃のピークに達するが、その後、徐々に低下していき1.8℃前後に安定する。このようにすることで、地球温暖化の主要な影響要因であるグリーンランド氷床融解や海面上昇などに対して、従来のIPCC450ppmシナリオと同程度とすることが可能となる。すなわち、Z650シナリオは、長期的な気候変動被害が小さく、～2050年においてはCO₂排出制限が緩やかであることから、国際的な合意に達する可能性も高い。このシナリオ

をベースに、エネルギーシステムの解析により世界で共有できる長期ビジョンを構築した⁴⁾。シリーズ第1回(本稿)ではその概要を、シリーズ第2回では様々なサーベイと考察を述べる。

II. エネルギーモデルとシナリオ

エネルギーシステム解析には、地球環境総合評価モデル GRAPE⁵⁾(Global Relationship Assessment to Protect Environment)のエネルギーモジュールを用いる。世界全体のエネルギーシステムが線形計画法によりモデル化されており、長期にわたるエネルギー需給とエネルギー技術の経済合理的な導入規模が決定される。計算期間は2000年から2150年であり、目的関数は、全計算期間における割引後のシステム総コスト(割引率は世界共通で5%)である。エネルギー需要をシナリオで与えたとともに、資源量制約、エネルギー需給バランス制約、CO₂排出量制約等を条件として、エネルギーコストを最小化するように、エネルギーの供給構造と転換構造を求める。

1. モデル基本設定

世界を、①カナダ(CAN)、②米国(USA)、③西欧(WEU)、④日本(JPN)、⑤オセアニア(OCE)、⑥中欧(CEU)、⑦東欧(EEU)、⑧ロシア(RUS)、⑨中国(CHN)、⑩インド(IND)、⑪東南アジア(SEA)、⑫中東北アフリカ(MEA)、⑬サハラ以南アフリカ(SSA)、⑭ブラジル(BRA)、⑮その他ラテンアメリカ(OLA)の15地域に分割し、それぞれの人口と経済の見通しを国際連合などの予測⁶⁾に基づいて作成した(第1, 2図)。集計分析のために、京都議定書のAnnex I国とNon Annex I国の定義に従って、上述したカナダからロシアまでの8国(地域)を先進国とし、残りの7国(地域)を途上国としている。人口の見通しは国連の中位推計に準拠し、経済成長も中庸成長を仮定して、しかも途上国における一人当たりGDPが先進国にキャッチアップするように設定した。

2. パラメータ設定

1次エネルギー供給には、石炭、原油、天然ガス、天然ウラン、バイオマス、水力、地熱、太陽光、風力を扱う。化石燃料の資源量は、既存研究^{7,8)}を参照して、上述した15地域ごとに10段階の生産コストを設定した。天然ウランの資源総量は1,500万トンで、5段階の生産コストに分けており、供給コストに全地域共通で鉱石生産コストのほかに燃料サイクルコストを計上している。再生可能エネルギーの資源量は、World Energy Council 2007⁹⁾などの文献を参考にして作成しており、バイオマスの供給コストは化石燃料と同様に、地域ごと生産量ごとの生産コストを設定している。

発電技術には、石炭火力、石炭ガス化複合(IGCC)、

石油火力、天然ガス火力、バイオマス火力、原子力、水力、地熱、太陽光、風力、燃料電池が考慮されており、CO₂回収貯蔵(CCS)の適用が2030年から導入開始、高速増殖炉(FBR)技術が2050年から導入開始と想定している。

発電以外のエネルギー転換には、石油精製、バイオマス液化(エタノール製造)、石炭液化(メタノール製造)、水素製造が考慮されている。水素製造には、天然ガス改質、石炭ガス化、電気分解などの技術オプションを想定し、転換効率とコストを設定している。発電または水素製造時に回収されたCO₂は、石油増進回収法、廃ガス田、帯水層などにより貯留すると想定している。

最終エネルギー需要は、運輸需要、定置需要(産業と民生の非電力、熱需要)、電力需要に分類する。運輸需要は、燃料として石油、エタノール、メタノール、水素、電気自動車用電力が消費される。そのため、各種燃料に対応する自動車の車両コストを計算している。定置需要は、石油、天然ガス、石炭、バイオマス、メタノール、水素が消費される。また、ヒートポンプ(HP)の導入により電力を熱に変換して定置需要の省エネを実施する。

3. シナリオ設定

本研究で外生的に作成した3つのシナリオに長期エネルギー需要を仮定し、供給と転換構造を予測する。

成り行き、Business As Usualシナリオ(BAU)は、現在までのエネルギーと環境政策の継続を仮定するシナリオである。最終エネルギー需要は、過去のトレンドの延長で、GDPの成長とともに増加する。世界全体の総エネルギー需要は、2000年の6.8ギガトン石油換算(Gtoe)から、2030年に12 Gtoe、2050年に15.5 Gtoe、さらに2100年に22 Gtoeへと増加していく。現在の国際エネルギー需給情勢から見ると、このシナリオは実現性が極めて低く、あくまで参照ケースである。

参考とする省エネ、Referenceシナリオ(REF)は、各地域において需要サイドの省エネが推進されるが、温暖化抑制のための積極的なCO₂排出削減策は実施しないシナリオである。省エネの度合いは、IEAの研究¹⁰⁾を参照しつつ、現状想定されているような技術開発が着実に実現・普及していく程度のものを想定している。世界全体の総エネルギー需要は、2030年に11.1 Gtoe、2050年に13.7 Gtoe、2100年に17.8 Gtoeとなっており、BAUと比べて最終的に約2割の省エネが実現できている。このシナリオが、本研究の基準ケースになる。

Z650は、REFをベースに、21世紀における世界の累積CO₂排出量を650GtC以内に抑制するシナリオである。本研究はエネルギーシステムのみを解析するため、上記のCO₂排出総量から、土地利用などによる排出分を差し引いたエネルギー起源CO₂排出の許容量を算出

し、エネルギーモデルの制約条件としている。なお、本研究で分析するCO₂削減は、各地域内における技術対策のみであり、排出権取引やグリーン開発メカニズム(CDM)などの国際協調の枠組みは考慮していない。最終エネルギー需要をREFと同様に仮定している。

III. 結果と考察

上記した長期のシミュレーションの結果について、2100年までのエネルギービジョン、2050年までのCO₂排出及び経済性を検討していく。

1. 長期エネルギービジョン

第3図には、3つのシナリオにおける世界の1次エネルギー構成の推移を示している。

BAUでは、化石燃料を中心に1次エネルギー供給総量が大幅に増加していき、2100年には2000年の3倍以上となり、その大部分は化石燃料によって供給されている。このようなエネルギー構成は、数字の上では実現可能であるが2150年までに総化石資源量の約7割を使い果たすことになるため、需給バランスの逼迫による価格上昇や資源争奪によるエネルギーセキュリティ等の経済社会の持続可能性を脅かす問題が容易に予想できる。

一方、REFでは、各地域における省エネの推進により、1次エネルギー供給総量は、急速増加の後、緩やかに増加していき、2030年、2050年と2100年にそれぞれ2000年の1.5、1.8と2.2倍になる。この効果は、主に産業における高効率生産プロセス、民生における省エネ家電や断熱建築、運輸における燃費向上とハイブリッドなどによって実現できている。しかし、CO₂排出制約がないため、エネルギー構成には、依然として化石燃料が中心となる。

これらのシナリオに対して、Z650では1次エネルギー供給総量こそREFと同等であるが、エネルギー構成は顕著に非化石燃料化していく。化石燃料と原子力と再生可能エネルギーの割合は、2000年の8:1:1から、2030年の7:1:2、2050年の5:2:3、2100年の3:2:5になる。

この1次エネルギー構成を実現するために、運輸部門において、乗用車などのライトデューティビークルの電気化とトラックやバスなどのヘビーデューティビークルのバイオ燃料シフトが必要になる。また、産業民生の熱源について、ガスシフトやバイオ燃料と水素の利用また産業CCSの推進が不可欠である。純粋に石油を消費する内燃機関が乗用車に占めるシェアは、計算当初のほぼ100%から、2030年に90%、2050年に67%と減少していき、2100年に1%未満になる。電気も石油も消費するプラグインハイブリッド車は、中間代替となっており、同シェアが2050年に20%を超え、2070年のピーク時に50%強に達するが、2100年に14%前後に留まる。

電気自動車のシェアは、2050年に9%弱であるが、その後、急激に増加し、2100年時点で約85%になる。

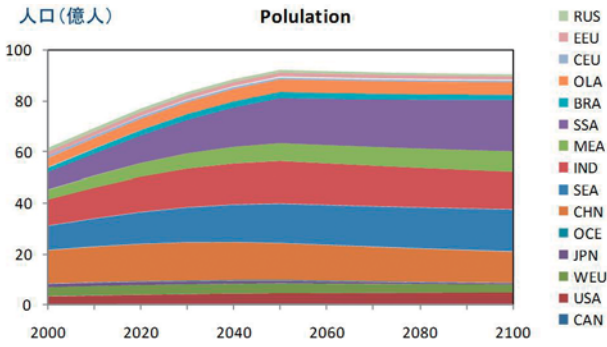
電力部門に必要な努力は第4図に示す電源構成から分析でき、全体として2000年の化石燃料中心から、クリーン化していくと同時に、多元化していく傾向がみられる。化石燃料の利用は、2040年にピークに達してから徐々に減少するが、電源の1割以上を維持する。しかし、利用技術が大きく変化し、2040年に半分強、2050年以後にはほぼすべてがCCSをつけなければならない。原子力発電は着実に増加していくが、2070年代を境に軽水炉(LWR)中心からFBR中心に転換する。風力は2020年から大幅に導入し次第にシェアを拡大していき、太陽エネルギーが今世紀後半に主要電源の一つとなる。再生可能エネルギーは、2050年に電源の4割弱から2100年には約6割を占める。原子力、CCS付きの火力、安定している水力及びバイオマスが基幹電源になっている。

地域別の1次エネルギー構成を第5図に示している。先進国のエネルギー需要は、21世紀中にほぼ一定しているが、化石燃料が占めるシェアが徐々に低下し、その代わりに再生可能エネルギーの割合が増加していく。原子力は、前期に少しずつ増えて、2050年には2000年レベルからほぼ4割増になり、その後安定する。一方、途上国において、エネルギー需要が大幅に伸びていて、前半には化石燃料が主役になるが、2040年前後にピークに達してから徐々に減少する。それに対して、後半の主役である再生可能エネルギーは、2020年から大幅導入が始まり、その後、次第に拡大していく。原子力の急速な普及は、2030年から始まり、安定する後半の規模は2000年レベルの50倍ほどに上る。

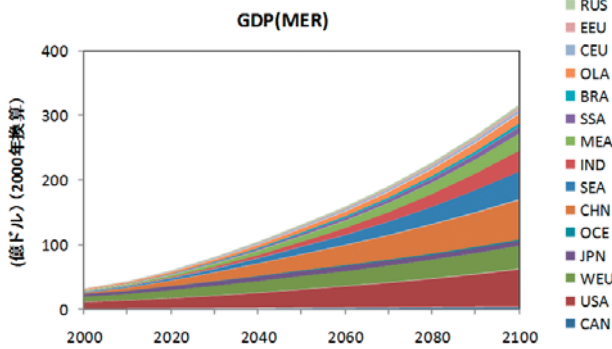
上述したように、現状技術と将来見通しのある技術に基づいて想定したエネルギーモデルの最適化により、気象科学の最新研究結果により提示されたCO₂排出制約を満たす長期エネルギービジョンは得られた。しかし、それを実現するために、産業民生と運輸部門における燃料転換を推進するとともに、電力部門において原子力と再生可能エネルギーの大規模導入が不可欠であり、CCSの早期導入も必要である。また、これらの努力は先進国もだが、途上国ではさらなる努力が要求される。

2. エネルギー起源CO₂排出推移

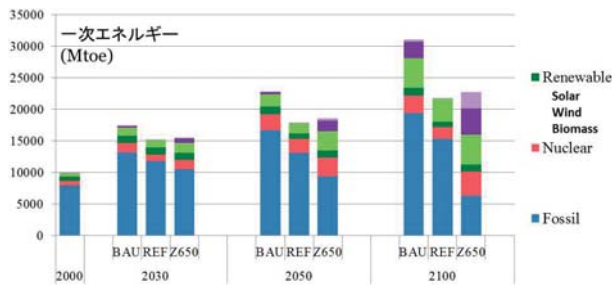
CO₂排出量の目標は主に2050年までで議論されている。ここでは、各シナリオにおける2050年までのCO₂排出量を、第6図に示す。化石燃料中心にエネルギー消費が大幅に増加するBAUでは、エネルギー起源CO₂排出量も大幅に伸びていく。世界の排出総量は、2000年の230億トン弱から、2030年の420億トン強、さらに2050年の540億トン弱に増えつつある。それに対して、各地域で積極的に省エネを推進するREFでは、エ



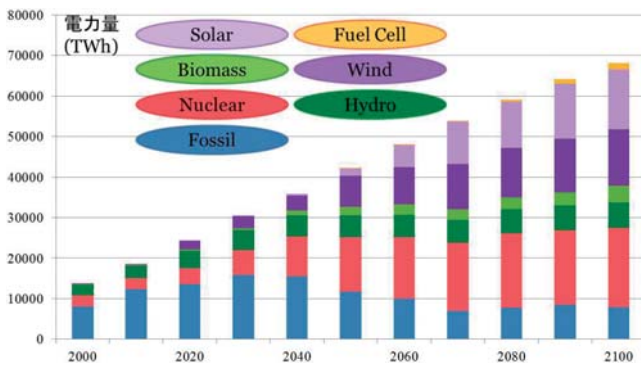
第1図 エネルギーモデルにおける人口推移



第2図 エネルギーモデルにおける経済見通し



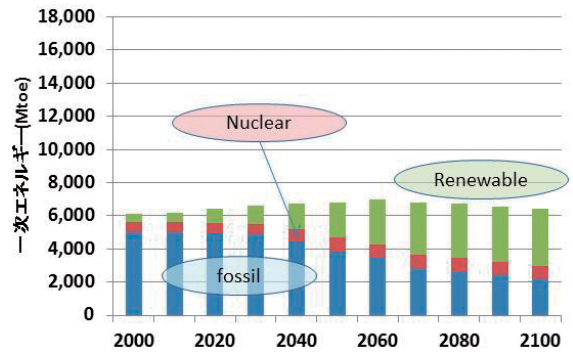
第3図 各シナリオにおける世界の一次エネルギー構成



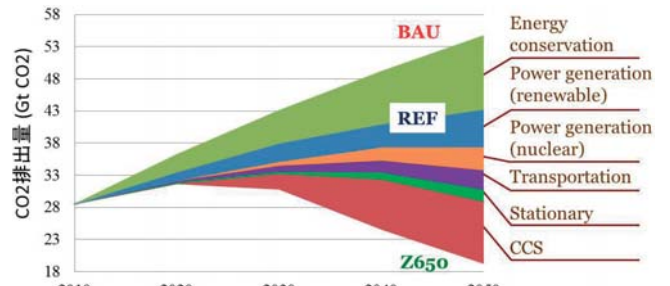
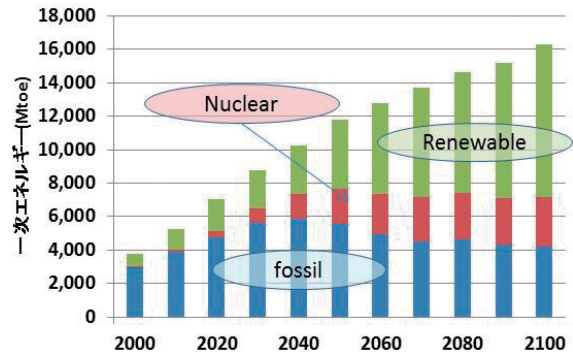
第4図 Z650における世界の電源構成

エネルギー起源 CO₂ の排出量の増加率が低くなるものの傾向は変わらず、2030年と2050年にそれぞれ330億トンと420億トンになる。

一方、21世紀中の排出総量を制約するZ650では、エネルギー構成の脱炭素化により、エネルギー起源CO₂排出が大幅に抑制できる。当面は増加傾向が続くが、



第5図 Z650における地域の一次エネルギー構成 (上：先進国；下：途上国)



第6図 各シナリオにおけるCO₂排出量

2020～2030年に310億トンのピークに達してから減少していき、2050年の排出量は190億トンになり、1990年比と2005年比に換算すれば、それぞれ1.00と0.75になる。つまり、エネルギーシステム総コスト最小化により、2050年時点の全世界エネルギー起源CO₂排出総量を、1990年レベルに抑えればあるいは2005年と比べて25%削減すれば、長期的な排出制約条件を満たせる。この結果は、G8サミットで挙げられていた2050年に50%削減の政治目標を無理して実現させる必要がないことを示唆している。

IV. まとめ

気候変動科学の最新研究は、地球温暖化抑制のための新たな二酸化炭素排出シナリオとして、長期的な気候変動被害が避けられると同時に、短期的により多くのCO₂を排出できるZ650を提示した。このシナリオをベースに、エネルギーモデルを用いて世界全体のエネルギーシステムコストミニマム最適化により世界共有できる中長

期ビジョンを検討した。

モデル解析で得られた長期的な1次エネルギー構成は、現在の化石燃料中心(8割)から2100年では低炭素化かつ多元化する方向に変化していく。その中で、再生可能エネルギー(5割)とともに原子力(2割)も重要な役割を果たす。このビジョンは、現状政策の延長で得られるエネルギー構成より持続可能性が高く、しかも現状と将来見通しのある技術によって実現可能である。また途上国において、エネルギー構成の低炭素化と多元化プロセスが先進国より数十年遅れるが、経済成長に伴うエネルギー消費の大幅増加することもあり、長期的には先進国同等あるいはそれ以上の低炭素化と多元化が必要となる。

— 参考資料 —

- 1) Committee on Stabilization Targets for Atmospheric Greenhouse Gas Concentration; National Research Council. Climate stabilization targets: emissions, concentrations, and impacts over decades to millennia. The National Academies Press 2010.
- 2) Summary for Policymaker of Fifth Analysis Report on Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- 3) T.Matsuno, K.Maruyama, J.Tsutsui, Stabilization of atmospheric carbon dioxide via zero emissions—An alternative way to a stable global environment. Proceedings of the Japan Academy; Series B 2012;88:368-395.
- 4) 段烽軍, 湯原哲夫, 氏田博士, 都筑和泰, 新たな気候変動レジームのための世界共有できる中長期ビジョンの検討, Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 34, No. 3.
- 5) A.Kurosawa, H.Yagita, Z.Weisheng, K.Tokimatsu, Y.Yanagisawa, Analysis of carbon emission stabilization

targets and adaptation by assessment model. The Energy Journal 1999;20 (Special I), 157-176.

- 6) United Nations. Dept. of Economic and Social Affairs. Population Division. World population to 2300. United Nations, 2004.
- 7) IEA. World Energy Outlook 2009.
- 8) H-H.Rogner, An assessment of world hydrocarbon resources, Annu. Rev. Energy Environ., 22, 217-262, (1997).
- 9) World Energy Council 2007, 2007 survey of energy resources.
- 10) IEA. Investments and Mitigation Costs, Mitigation costs in the WEO 2009 450 Scenario, Potential and costs to reduce fuel consumption in passenger car transport. 2009. <http://www.iea.org/weo/investments.asp>.

著者紹介

氏田博士 (うじた・ひろし)

キャノングローバル戦略研究所
(専門分野/関心分野) 地球温暖化問題, リスク論



段 烽 軍 (だん・ほうぐん)

キャノングローバル戦略研究所
(専門分野/関心分野) 地球温暖化問題, 海洋



湯原哲夫 (ゆはら・てつお)

キャノングローバル戦略研究所
(専門分野/関心分野) 地球温暖化問題, 構造力学, 海洋



連載
講座

放射性廃棄物概論

施設の運転および廃止措置により
発生する放射性廃棄物の対策

第1回 放射性廃棄物対策の概要

金沢大学 長尾 誠也,
原子力環境整備促進・資金管理センター 山本 正史

I. はじめに

本連載講座では、各種の放射性廃棄物の処分および原子力施設の廃止措置の概要を取りまとめて解説する。前回の連載講座「放射性廃棄物の処分」から約10年が経過し、この期間に安全評価上の検討項目、安全評価手法など、放射性廃棄物処分の全体を通して大きな進展が認められる。そのため、本連載講座では、最新の情報も含めた放射性廃棄物の処理処分に関する現状を紹介する。

II. 放射性廃棄物をめぐる最前線

2011年3月11日の東日本大震災とその後の東京電力福島第一原子力発電所事故が発生し、原子力発電所の再稼働や将来的なエネルギー政策の議論が進んでいる。2012年9月には、日本学術会議が、原子力委員会委員長からの「高レベル放射性廃棄物の処分に関する取り組み」に関する審議依頼に対する回答を報告した(日本学術会議, 2012)。高レベル放射性廃棄物の処分に関する政策の抜本的見直し、安全性に関する開かれた討論の場の確保、長期的な粘り強い取り組みの必要性の認識など、問題解決に向けた今後の取り組みが提言されている。この提言に関連する議論は多方面で展開されており、今後注視が必要である。

高レベル放射性廃棄物の最終処分については、平成12年に制定・公布された特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律に基づき、原子力発電環境整備機構が全国の市町村を対象に、処分地選定の第一段階の文献調査を行う地域の公募を行っていた。しかし、いまだ応募に至った市町村はなく、経済産業省の総合資源エネルギー

Introduction to Radioactive Waste—Management of Radioactive Waste from Operation and Decommissioning of Nuclear and Other Facilities (1) ; Perspective of Radioactive Waste Management : Seiya NAGAO, Masafumi YAMAMOTO.
(2014年4月30日受理)

調査会基本政策分科会では、2013年12月に処分地選定に関して、国が前面に立って最終処分に向けた取組を推進するとし、国の関与をより明確にしている。また、福島第一原子力発電所事故により放出された放射性核種の住宅地、農地、森林での除染作業により発生した廃棄物の仮置き場や中間貯蔵施設の設置など、除染廃棄物の処分に関連した課題にも注目が集まっている。このように、放射性廃棄物の発生源は多様であり、それぞれの適正な管理について、普遍的な視点から整理・解説し、学会員や関心者層に広く示していくことが重要である。

本連載講座は、放射性廃棄物の処理処分、原子力施設廃止措置に関しての全体像を理解するために、8回の連載を行う。第1回の本稿では、放射性廃棄物対策全般の概要、第2回目には「放射性廃棄物の管理」、第3回は「原子力施設の廃止措置」について解説する。それ以降は、「放射性廃棄物の処理」、「放射性廃棄物の処分」、「我が国の地層環境」、「地層処分システムの安全評価」と順次、紹介していく予定である。最終回には、放射性廃棄物処分の将来展望について、これまでの放射性廃棄物とともに、福島第一原子力発電所事故関係の廃棄物についても現状を報告する。

III. 放射性廃棄物の発生

1. 放射性廃棄物の概念と分類

放射性廃棄物とは、その名のとおり、「放射性」という属性と「廃棄物」の属性を同時に持つものをいう。一般的には、放射性物質の利用を伴う産業、医療、研究、教育などの活動の副産物として発生する不要物で、放射性物質によって有意に汚染されたものが放射性廃棄物となる。放射性廃棄物の種別・分類についてはさまざまな整理が以下のように行われている：(1)性状・物性によるもの(気体廃棄物、液体廃棄物、固体廃棄物、金属廃棄物、コンクリート廃棄物、発熱性／非発熱性廃棄物など)、(2)発生源の施設・運転形態などの区分によるもの(発電

所廃棄物, 再処理廃棄物, RI (放射性同位元素) 廃棄物, 運転廃棄物, 廃止措置廃棄物など), (3)汚染形態の区分によるもの(放射化廃棄物, (表面)汚染廃棄物), (4)含まれる放射性物質の種類および濃度によるもの(極低レベル廃棄物, 低レベル廃棄物, 高レベル廃棄物, 短寿命廃棄物, 長寿命廃棄物, 長半減期低発熱放射性廃棄物 (TRU 廃棄物), アルファ廃棄物, ウラン廃棄物など), (5)処分方法の区分によるもの(地層処分, 余裕深度処分, 浅地中処分(ピット処分, トレンチ処分))などがある。濃度が十分に低いものは, 放射性物質として扱う必要がないものになり, 通常の廃棄物として扱うことができる。このように, これらの廃棄物の名称は, 廃棄物の処理や処分における取り扱いの区分を示唆する場合もある。(第1表⁴⁾(2011))

「放射性」と「放射性でないもの」, 「廃棄物」と「廃棄物でないもの」の区別は, その境界付近ではややあいまいになってくる。典型的なものとして, 意図せずに濃縮された自然界の放射性物質を含む廃棄物, 原子力発電所からの使用済燃料などがある。使用済燃料は, 再処理して

有用なウランおよびプルトニウムなどを回収・利用するという政策と, ワンスルーで再処理しないという政策, さらに, 決定を先延ばしして将来の選択とするオプションがある。使用済燃料は, 再処理する場合には資源であり, 再処理を行わない場合は廃棄物となる。

2. 放射性廃棄物の発生量

放射性廃棄物を発生する主な施設は, 原子力発電施設やその燃料の供給・再処理に関連する, いわゆる原子燃料サイクル施設および, 放射性物質を使用した研究, 医療などの活動を行う施設からのものなどがある。また, 放射性廃棄物の処分は, 日本原燃株が, 原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物の処分を, 青森県上北郡六ヶ所村の低レベル放射性廃棄物埋設センターで1992年12月から行っている。主な施設における放射性廃棄物の貯蔵量・処分量は, 第2表⁴⁾のとおりであり, 発電炉からの廃棄物の貯蔵量は6年間で約1.2倍の増加にとどまっているのに対して, 研究施設等からの廃棄物の貯蔵量は, 約1.5倍に増加している。

高レベル放射性廃棄物は, わが国での再処理がまだ本格的には行われておらず, ガラス固化体としての貯蔵量は多くない。しかし, 潜在的な量として, 使用済燃料の形態で2010年度末現在, 約17,000トンが貯蔵されており, 既貯蔵分と合わせてガラス固化体約25,000本に相当する量がすでに発生しており, 今後の原子力発電量にほぼ比例して増加する。また, 原子力施設の廃止措置に伴う放射性廃棄物も潜在量として存在する。

IV. 放射性廃棄物の処分前管理

1. 処分前管理の概念

すべての放射性廃棄物は, 人および環境への影響が十分に小さくなるように適切に管理されなければならない。放射性廃棄物に対して適用される管理は, 広義には, 制度的・技術的な取り扱いのすべてを含む非常に幅の広い概念である。制度的なものとしては, 記録, 登録, 報告, 在庫管理などがあり, 技術的なものとしては, 収集, 分別, 物理的・化学的な処理(減容, 除染など), 固化, 容器封入, 輸送, 貯蔵, 処分などがある。処分の前に行われるすべての管理を総称して処分前管理という。(第1図)

放射線防護の観点から, 処分前管理の段階で放射性廃棄物による放射線の影響を受けるのは, 直接的に放射性廃棄物を取り扱っている放射線作業従事者が主体であり, 取り扱われる場所も, 各事業所の放射線管理区域内であることがほとんどである。このため, 必要に応じて取り扱い時における適切な放射線防護対策を適用することができる。放射線による影響は, 線源から人が受ける放射線の被ばく量に比例する。したがって, 放射性廃棄

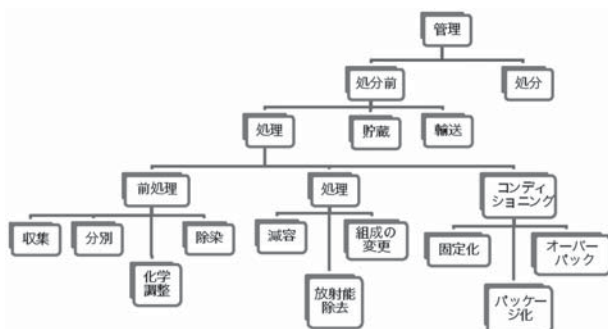
第1表 放射性廃棄物の概要と区分

廃棄物の種類	廃棄物の形態	廃棄物の概要
高レベル放射性廃棄物	ガラス固化体	再処理の過程において使用済燃料から分離される Sr-90, Cs-137 に代表される核分裂生成物と, Am-241, Np-237 に代表されるアクチノイドを含む放射能レベルの高い廃液をガラス固化したものの
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物 炉心等廃棄物	制御棒, 炉内構造物
	低レベル放射性廃棄物	廃液, フィルタ, 廃機材, 消耗品など
	極低レベル放射性廃棄物	コンクリート廃材, 金属廃材など
	長半減期低発熱放射性廃棄物 (TRU 廃棄物)	燃料体の部品など, 廃液, フィルタ
	ウラン廃棄物	スラッジ, フィルタ, 廃機材, 消耗品など
研究施設等廃棄物	廃液, 金属廃材, コンクリート廃材, プラスチック廃材, フィルタ, 使い捨ての注射器など	研究施設, 医療施設などから発生する放射性廃棄物
放射性物質として扱う必要のないもの (クリアランス相当の廃棄物)	コンクリート廃材, 金属廃材など	施設の運転, 解体に伴い発生する廃棄物で, 放射能濃度が放射線による障害の防止のための措置を必要としないもの

第2表 主要施設の放射性廃棄物の貯蔵量・処分量

区分	施設	廃棄物などの種別	単位	時点(年度末)		
				2004年度	2007年度	2010年度
貯蔵量	発電炉	固体廃棄物(貯蔵庫)	万本	約56	約63	約69
		蒸気発生器	基	29	29	32
	再処理	ガラス固化体	本	約1,100	約1,600	約1,700
		高レベル廃液	m ³	約400	約400	約380
研究施設等	低レベル固体廃棄物	万本	約44	約59	約66	
	液体廃棄物	m ³	約4,000	約5,400	約4,120	
処分量	日本原燃	低レベル廃棄物	万本	約17	約20	約23
	JAEA	JPDR 解体極低レベル廃棄物	トン	約1,670	約1,670	約1,670

注)本数は, ガラス固化体または200リットルドラム缶(相当を含む)の本数。
JAEA: (独)日本原子力研究開発機構, JPDR: 動力試験炉

第1図 放射性廃棄物の管理の概念図⁵⁾

物の管理に伴う放射線の被ばくを十分低いレベルにコントロールするためには、線源(放射性廃棄物に含まれる放射性物質)を遮蔽する、人が近づかない場所に置く、人が近づかないように監視・管理する、などの対策を行う必要がある。これらの対策についても広い意味での放射性廃棄物の処分前管理の中に含まれる。

2. 処分前管理の目的・役割

処分前管理では、放射性廃棄物の取り扱いを容易にするため、また、作業員および公衆の被ばくを最小化するため、減容、固化、表面除染などの処理が行われる。放射性廃棄物は、最終的には中間的な貯蔵・輸送を経て処分を行う必要がある、処分前管理の各段階で行われる選択が、その後の管理に与える影響について考慮する必要がある。

放射性廃棄物の最終的な処分について、具体的な対策を検討するためには、それぞれの対象とする放射性廃棄物の性状、特に廃棄物に含まれる放射性核種の種類と濃度を把握することが重要である。廃棄物中の放射能評価を含めて、最終的に処分される廃棄物の性状を適切に把握することによって、最適な処分システムの設計・運用が可能になり、用意された処分システムに適合しない廃棄物が処分されることを予防することもできる。これらの廃棄物の性状を知ることが、廃棄物特性評価といわれており、処分前管理の重要な役割の一つである。

3. 原子力施設の廃止措置

原子力施設の廃止措置は、施設の解体、保有する核燃料物質などの譲り渡し、放射性物質による汚染の除去、放射性廃棄物の廃棄などによって、原子力施設に対する規制を撤廃するものである。この過程で、処分前管理と類似した措置が行われる。国際原子力機関(IAEA)の安全基準の策定の中でも、一時は廃止措置が処分前管理の中で位置づけられていたこともある。役目を終えた原子力施設から、放射性廃棄物や放射性物質による汚染を適切に除去するという行為は、まさに処分前管理と共通し、技術的には同じカテゴリーで扱うことも不適切ではない。ただし、廃止措置の場合は、大量の放射性廃棄物

の発生を伴うことがあり、処分前管理だけでは十分ではなく、発生する放射性廃棄物の最終処分先の確保が重要になる。

V. 放射性廃棄物の処分

1. 処分の概念

放射性廃棄物の処分は、広義には「回収の意図なく、廃棄物を一掃すること」、狭義には「回収の意図なく、廃棄物を適切な施設に定置すること」を意味する。現在は行われなくなったが、ドラム缶などの容器に封入・固化などした低レベル放射性廃棄物を深海底に投入処分する海洋処分は、広義の処分に属し、1940年代から米国および英国で行われた。1960年代後半から1982年までは、国際的な管理・監視の枠組みの下で、低レベル放射性廃棄物に限って海洋処分が実施されたが、放射性廃棄物の海洋処分を全面的に禁止する国際世論を受けて、廃棄物などの海洋投入処分を国際的に規制する条約の改正が行われ、現在は禁止されている。わが国は、当初、低レベル放射性廃棄物の海洋処分を計画していたが、1993年11月の原子力委員会決定で、「政治的、社会的な見地をも加えた広範な観点から」国際条約での禁止への動きに賛同し、「今後、低レベル放射性廃棄物の処分の方針として海洋投棄は選択肢としないものとする」としている。

この当時はすでに六ヶ所村の低レベル放射性廃棄物埋設センターでの埋設処分が行われており、わが国の海洋処分政策は、1980年代半ばには実質的に断念された。その後、海洋処分に代わる処分方策として、陸地における処分を目指した検討がわが国でも本格的に実施されるようになり、陸地処分を実施するための技術開発、また、その安全規制の検討が並行して進められた。陸地処分は、海洋処分と同様に海外では1940年代から行われていたが、海洋処分の実施が困難になってからは、ほぼ唯一の処分オプションとなっている。

陸地処分の方法は、地中に放射性廃棄物を埋設するというもので、世界では、埋設の深さや廃棄物を定置・収納する処分施設の構造設計によって多様な処分システムが設計・運用されている。処分対象とする放射性廃棄物に含まれる放射性核種の種類と量に適した設計が行われるが、一般的には、低レベル・短寿命の核種を含むものは、処分深度、処分施設および処分後の管理期間に対する要求が相対的に小さく、浅地中トレンチ処分(地表から50m以内の深さで、廃棄物の固型化や処分施設などの人工バリアの要件がない処分方法)、浅地中ピット処分(同様の深さで、廃棄物の固型化や処分施設の機能(人工バリア)に一定の要求がある処分方法)などの方法で処分できる。より長寿命で放射能レベルが高い核種を含む放射性廃棄物については、処分施設の安全機能および深さへの要求がより大きくなる。また、潜在的な危険性を

有する期間も長くなるので、長期的な安全性の観点からの検討も必要になる。

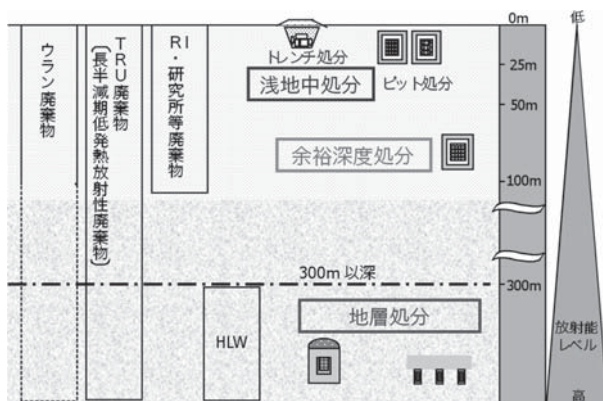
陸地処分による人に対する影響を十分に低く保つためには、生活圏として利用する環境大気、地表・地下水、土壌などへの放射性物質の移行を封じ込める、または抑制する必要がある。移行抑制などのバリアとしての効果を期待して、廃棄物の固化処理・容器封入・処分施設構造物など人工的な材料・手段による人工バリア、廃棄物が安置された場所から人の生活環境にいたる経路に存在する土壌・地層などの媒体からなる天然バリアなどを組み込んだ処分システムが設計され、運用されることになる。

このような処分システムの概念は、原子力委員会およびその下部の会議組織などで検討され、1980年代半ばから2000年代にかけて段階的に構築されてきた。(第2図)

2. 処分に関する政策・実施体制・規制基準などの整備

陸地処分の安全規制は、原子力安全委員会およびその下部の会議組織などで検討され、低レベル放射性廃棄物については、1980年代半ばにはその基本的な考え方が取りまとめられている。さらに、浅地中ピット処分については、1980年代後半までに処分における安全規制に関する基準値(代表的な放射性核種の濃度上限値)および「安全審査の基本的考え方」が整備された。この濃度上限値は、処分方法ごとに定められており、地層処分を除いては、それぞれの濃度上限値を下回る廃棄物でないことと処分できない。なお、わが国の規制では、濃度上限値を下回るものでも、それだけの条件で処分が可能となるものではない。処分は、廃棄物埋設事業として規制され、埋設事業の計画において、対象廃棄物および処分システムの設計条件を提示して埋設処分事業の申請を行い、安全審査上の要件を満足することを規制機関が確認した上で処分事業を実施する許可を得なければならない。

1980年代後半には、低レベル放射性廃棄物の埋設処



第2図 放射性廃棄物処分の概念

分に必要な法制度および安全規制の要件などが整備され、浅地中ピット処分の具体化を進めるための基盤が整備された。その後、1988年の事業許可申請、1990年の事業許可を経て、1992年12月に低レベル放射性廃棄物の浅地中ピット処分による埋設事業の操業が開始された。

高レベル放射性廃棄物は、ガラス固化した後、30年から50年間程度冷却のための貯蔵を行い、地下300m以深の安定した地層中に最終処分を行う地層処分の概念が提案された。低レベル放射性廃棄物は、種類ごとに処分方針が策定された。放射能レベルの比較的高いもの(原子炉の炉心から発生する放射化金属など)は、跡地利用による影響を考慮して、一般的な地下利用(地下施設・建物の基礎など)に対して十分余裕を持った深度への処分(余裕深度処分)を行う。放射能レベルの比較的低いものについては浅地中ピット処分を、放射能レベルの極めて低いものは浅地中トレンチ処分を行うとしている。再処理施設などから発生する超ウラン核種(TRU核種)を含む廃棄物およびウラン燃料加工施設などから発生するウラン廃棄物、ならびに医療機関や研究所などから発生するRI・研究所等廃棄物については、含まれる放射性物質の種類と濃度に応じて区分し、それぞれの種類と濃度に対応する処分を行うという全体の枠組みが示されている。

一方、安全規制の方でも対象廃棄物と処分概念に対応する検討が行われ、高レベル放射性廃棄物の安全審査指針やウラン廃棄物の処分に関する法令の一部を除いては、ほぼ検討を完了していた。しかし、福島第一原子力発電所事故を踏まえた安全規制改革において、原子力安全規制の役割を担う原子力規制委員会が創設され、放射性廃棄物関連施設については、同委員会が制定した核燃料施設等における新規規制基準(2013年12月18日施行)の適用を受けられるように見直されている。新規規制基準策定の過程で、余裕深度処分など、現在国内に存在しない施設に対する一部の基準については未整備となっている。

わが国では、廃棄物の処分を一つの事業として位置づけており、事業の実施および規制に関する法制度を整備し、その事業を行う事業主体が整備され、事業実施許可を得るための安全審査指針などが整備される必要がある。さらに、処分を実施する具体的な場所が用意されなければならない。低レベル放射性廃棄物の一部と高レベル放射性廃棄物については、これらの処分に必要な条件の一部が整っておらず、処分に向けて解決すべき課題となっている。

3. 廃棄物などの安全な管理の国際枠組み

(1) 放射性廃棄物などの管理に関する安全条約

低レベル放射性廃棄物の海洋処分が国際条約によって禁止されて間もなく、1997年には、使用済燃料および

放射性廃棄物の管理に関して高い水準の安全を世界的に達成し、維持することなどを目的とする「使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約」が起草された。この条約は、2001年に発効し、わが国は、2003年に加入している。この条約の主要な義務は、次のとおりである。

- (1) 使用済燃料および放射性廃棄物の管理の安全を確保するため、使用済燃料管理施設および放射性廃棄物の管理施設の立地、設計および建設、安全に関する評価などの各段階において適切な措置をとる。
- (2) この条約に基づく義務を履行するために必要な法令上、行政上その他の措置をとり、安全を規律するための法令上の枠組みを制定・維持し、その実施を任務とする規制機関を設立または指定する。
- (3) 使用済燃料または放射性廃棄物の他国への国境を越える移動が、相手国に事前に通報されかつ相手国の同意がある場合に限り認められ実施されることを確保する。
- (4) この条約に基づく義務を履行するために自国がとった措置に関する報告を提出し、当該報告を検討するための検討会合を開催する。

この検討会合は、3年を超えない期間ごとに開催される必要があり、その会合の事務局としての機能は、IAEAが提供することになっている。これまでに4回の検討会合が開催され、加盟各国が提出した国別報告書が審議されている。

(2) 放射性廃棄物の管理に関する国際基準

IAEAは、国連と密接な関係を有する国際機関として1957年に設立された。現在は新しい文書によって更新されているが、その設立当初から放射性廃棄物の処理処分に関する安全基準に関わる文書を検討・策定している。放射性廃棄物の処分に関しては、安全シリーズNo.5「海への放射性廃棄物の処分」(1961)およびNo.15「放射性廃棄物の地中への処分」(1965)が当初に刊行されている。海洋処分が行われなくなったので、安全シリーズNo.5の更新版は存在しないが、安全シリーズNo.15を更新する最新の安全基準文書として、SSR-5「放射性廃棄物の処分」(2011)が刊行されている。

現在有効なIAEAの安全基準文書は、基本的な安全の原理をまとめた安全原則の下に、7つに統合された一般的な安全要件と6種類の施設・活動に固有の安全要件が並立し、その下に個別の安全指針文書を策定するという体系でまとめられている。このような体系に至るには

幾つかの変遷があるが、統合化された一般的な安全要件によって重複と抜け落ちを回避し、個別の要件との関係が最適化されたものと考えられる。安全基準文書の策定に当たっては国際的なレビュープロセスが採用されており、規制の安定性を求める加盟国のニーズとも相まって国際的な安全規制の標準的な基盤を提供できる位置付けとなっている。この安全基準文書の体系の中で、廃止措置の要件は一般的な要件の一つとして、廃棄物の処分施設の要件は、個別の安全要件の一つとして組み込まれており、わが国の実施システムの検討や規制においても参照すべきものである。

VI. おわりに

本稿では、連載講座の第1回目のため、連載開始の意義、放射性廃棄物の定義・種類、処分に関する法律など、放射性廃棄物に関する基本的な項目について解説した。第2回目以降には、放射性廃棄物の処理・処分に関係した基本的な項目とともに、現状と課題点などについて、説明していく予定である。

— 参考資料 —

- 1) 日本学術会議、回答「高レベル放射性廃棄物処分について」、(2012)。
- 2) 長崎晋也、中山真一共編、放射性廃棄物の工学、オーム社、(2011)。
- 3) 小佐古敏荘、放射線安全学、オーム社、(2013)。
- 4) 日本国政府、使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約 日本国国別報告書、(2003, 2005, 2008, 2011)。
- 5) IAEA, IAEA Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2007 Edition, (2007)。
- 6) IAEA, Strategies and Processes for the Establishment of IAEA Safety Standards (SPSS) Version 2.1, 2013。

著者紹介



長尾誠也 (ながお・せいや)
金沢大学 環日本海域環境研究センター
(専門分野/関心分野) 放射化学・地球化学
/地層中における放射性核種の動態



山本正史 (やまもと・まさふみ)
原子力環境整備促進・資金管理センター
(専門分野/関心分野) 放射性廃棄物の処理・処分に関する諸問題

サイエンスよみもの

原子炉ニュートリノの研究から地球内部の観測へ ニュートリノ科学を推進するカムランド実験

東北大学 白井 淳平

ニュートリノは物質を構成する最も基本的な粒子(素粒子)の一つである。自然界には大量に存在するが電荷がなく、物質とほとんど反応しないため幽霊粒子とも呼ばれ、その性質は神秘的のベールに包まれていた。近年その研究は大きく進展し、興味深い性質が明らかになってきた。その解明には原子炉から大量に放出される原子炉ニュートリノが大きな役割を演じてきた。そして今やニュートリノを用いて地球内部を探る新たな観測方法が現実のものとなっている。本稿では最先端のニュートリノ研究を推進するカムランド実験(Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector)を紹介し、これまで何がわかったか、そして今後のニュートリノ研究について紹介する。

I. 謎の粒子ニュートリノ

ニュートリノはほかの素粒子と違って電荷がなく、どんな物質も難なく素通りしてしまう。また質量は桁はずれに小さい。その登場は1930年代の物理学者 W. パウリによる予言に始まる。原子核のベータ崩壊ではベータ線と娘核のほかに何も検出されないのに、放出されるベータ線のエネルギーが連続分布であることから、エネルギー保存則の危機を救うために、そして中性子が未発見だった当時、原子核が陽子と電子からできているという考えでは説明できない深刻な問題を解決するためにパウリはニュートリノを提唱した。それから F. ライネス(米国)らによる原子炉を使った実験でニュートリノが発見されるまで20年以上を要した。ニュートリノはその後3種類存在することが明らかとなり、反応で決まって現れる相棒の荷電粒子の名前をとって電子型、ミュー型、タウ型と呼ばれている。ニュートリノの質量はあまりに小さいため素粒子の標準理論ではゼロとされてきた。ゼロではないことがわかったのはごく最近のことであるが、その値がいくらなのかはいまだにわかっていない。そんなニュートリノであるが宇宙には莫大な数が飛び交っている。宇宙の誕生時に生まれたニュートリノのほか、星の中心で起こる熱核融合反応、重い星の最期を

飾る超新星爆発、宇宙線による大気との原子核反応、放射性元素のベータ崩壊など、自然界はニュートリノで満ち満ちている。

それらは特有のエネルギー分布を持つため検出できればさまざまな自然界のメカニズムの解明につなげることができる。

東北大学ニュートリノ科学研究センターではニュートリノの性質とニュートリノを用いた宇宙や自然の営みを明らかにすることを目的に研究が続けられている。本稿ではその一端を紹介する。

II. ニュートリノ振動とその検証

1. 太陽ニュートリノ問題

我々を取り巻く自然界で最も強いニュートリノの源は太陽である。太陽の中心では熱核融合反応によるエネルギーとともに膨大な数のニュートリノ(正確には電子ニュートリノ)が放出されその一部は地球にも飛来する。地球上での量は 1cm^2 当たり毎秒660億個にのぼる。ところが1960年代後半、その観測に初めて挑戦した R. デービス(米)らの実験によると、観測数が理論の予想と比べ大幅に少ないことがわかった。その後、多くの実験や理論の改良などあらゆる手だてがなされたが、観測と理論の食い違いは説明できなかった。これは太陽ニュートリノ問題と呼ばれ天文学で30年以上続いた難問であった。

太陽ニュートリノは電子ニュートリノとして生まれるので実験ではこのニュートリノを観測する。一方、素粒

Studies of Neutrinos from Reactors to the Earth Interior ; KamLAND experiment promoting the Neutrino Science ; Junpei SHIRAI.

(2014年5月30日 受理)

子の標準理論ではニュートリノの質量は厳密にゼロとされ、ニュートリノの種類が変わることはない。この難問を解決するにはニュートリノが質量をもち、観測にかからない別の種類のニュートリノに姿を変えると考えるしかなかった。ニュートリノは3種類あるが、それらは決まった質量を持つのではなく、3種類の異なる質量のニュートリノがある決まった割合で波のように重なった状態と考えられる。これは古典力学では説明できないが、量子力学では素粒子は「粒子」と「波」の性質を合わせ持つとされ実験的にも証明されている。するとニュートリノは質量の違う波の重ね合わせであり、振動数が異なるため時間とともに進むうちに互いの位相のずれを生じ、別の種類のニュートリノに姿を変えることが起こり得る。この「変身」は時間とともに周期的に起こるはずでニュートリノ振動と呼ばれている。このアイデアはロシアと日本の物理学者(B.ポンテコルボ, 牧, 中川, 坂田)によって提唱されたがこれを実験的に証明することは容易ではなかった。

1990年代に入り、太陽ニュートリノの観測の精度が上がるにつれ、ニュートリノ振動の解明はますます深刻な問題となった。太陽ニュートリノの観測実験ではニュートリノ振動が事実としても、通過する太陽の物質が振動に及ぼす効果を正しく評価する必要があるが、これが困難なため振動を特徴づける物理量(ニュートリノ質量の2乗差と混合角)を決めることができなかったからである。これを解決するには、ニュートリノの素性がよくわかっている人工のニュートリノを使った実験が決定的であり、次節で述べるように原子炉ニュートリノ実験が決め手となった。

2. 原子炉ニュートリノ実験

原子炉は極めて強力なニュートリノ発生源であり、しかもニュートリノの発生量とエネルギースペクトルがよくわかっている。周知のように、原子炉ではウランやプルトニウムなどの核分裂反応をうまく制御してエネルギーを取り出しているが、核分裂した後の原子核は中性子が過剰なため次々にベータ崩壊を引き起こし、そのたびにニュートリノ(正確には反電子ニュートリノ)が発生する。1回の核分裂で平均6個の反電子ニュートリノが発生するので、たとえば発電用原子炉(100万kW)では毎秒 10^{20} 個ものニュートリノが発生する。つまり原子炉は強力かつ100%純粋な反電子ニュートリノ源であり、その発生量は原子炉の運転時間とともに正確に知ることができる。さらに言えば、ニュートリノ振動はエネルギーが小さいほど見えやすくなる。原子炉ニュートリノは他の人工ニュートリノである加速器ニュートリノに比べてエネルギーがずっと低いため振動に対する感度は高く有利である。

このように原子炉は優れたニュートリノ源であるため、これを使ってニュートリノ振動の検証のための数多

くの実験がフランス、米国、旧ソ連で行われた。その方法は単純で、原子炉から一定の距離に検出器を置き、反電子ニュートリノを観測するのである。もしニュートリノ振動が本当ならばほかのニュートリノに変わるはずで、その分観測数が減り予測と食い違わずである。またニュートリノ振動はニュートリノのエネルギーにより現れ方が違うため、観測される原子炉ニュートリノのスペクトルは歪んで見えるはずである。

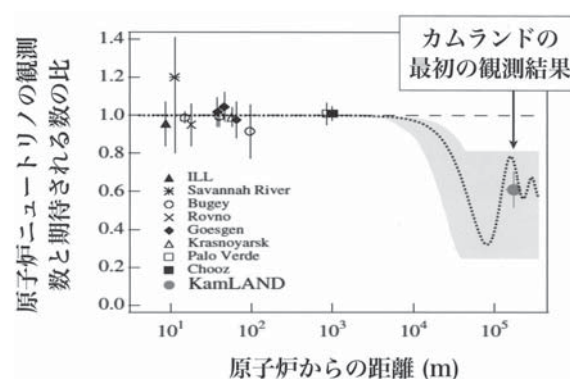
第1図に1990年代までに行われた原子炉ニュートリノ振動の実験結果を示す。縦軸はニュートリノの観測数と予測される観測数との比で、横軸は原子炉からの距離である。原子炉からのニュートリノが測定器まで飛ぶ間にニュートリノ振動が起こればその比は1から減るはずである。図からわかるように距離を1kmまで離れた1990年代当時の最高感度の実験でも観測数は予測と一致し、エネルギースペクトルの変化も見られなかった。ニュートリノ振動は観測されなかったのである。

それでは「ニュートリノ振動はない」と言えるのだろうか? 答えは「否」である。なぜなら検出器までの距離をもっと長くすれば検出は可能であると考えられたからである。しかし原子炉ニュートリノの強度は距離の2乗に反比例して急激に減る。そのため検出感度を上げるには極めて強力な原子炉と巨大な検出器が必要である。それは事実上不可能と考えられた(検出器は液体シンチレータを用いるがその規模は当時10トンクラスであった)。この困難に挑戦し、原子炉ニュートリノ振動の発見と精密測定に成功したのがカムランド実験である。次節にそれを述べる。

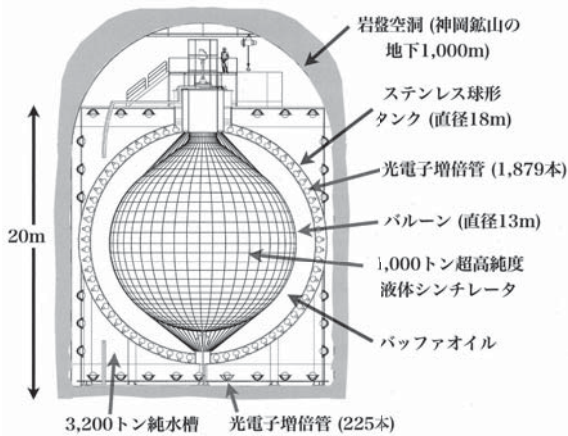
3. カムランドの挑戦

(1) 感度100倍の原子炉ニュートリノ実験

ほとんど反応しないニュートリノを確実にとらえるには、環境放射能が極めて低い空間で、大量の物質を用意し、微弱な信号をキャッチする高感度センサーを備えた検出器が必要である。カムランドは岐阜県神岡町の鉱山の地下1,000mにある岩盤空洞に建設された世界最大



第1図 カムランドとそれ以前の原子炉ニュートリノ実験による、ニュートリノの観測数と期待される数の比。ニュートリノ振動が起これば1である。灰色の丸はカムランドの最初の観測結果(次節)。



第2図 カムランド検出器

(1,000 トン)の液体シンチレータ検出器である(第2図参照)。そこはかつて超新星爆発ニュートリノを世界で初めて検出したカミオカンデ実験が行われた場所である。この大深度地下はニュートリノ検出にとって大敵である宇宙線が地上の10万分の1しかなく絶好の環境を提供する。

検出器の要である液体シンチレータは透明な有機混合液体で、直径18mのステンレスタンクの中心に設置された透明なナイロン製の袋(バルーン)に満たされている。バルーンの周囲は透明なミネラルオイルで囲まれている。液体シンチレータはニュートリノが反応を起こすとシンチレーション光(多数の光子)を放出する。これをタンク内面に設置した1,879本の光電子増倍管(直径50cmのスーパーカミオカンデ用光電子増倍管の改良型1,325本を含む)で検出しニュートリノ反応の時刻、位置、エネルギーをとらえる。タンクの外側は純水で満たされ、周囲の岩盤からの放射線を遮蔽するとともに内部に設置した光電子増倍管により宇宙線ミュー粒子を識別する。

カムランドから平均180kmの距離には柏崎、若狭湾(敦賀、美浜、大飯、高浜)、浜岡など多数の原子力発電所が存在し、全国の発電用原子炉の半分以上が集中している。その結果、あたかも熱出力80GWの巨大な原子炉が遠方に存在するのと同じ状況で原子炉ニュートリノ実験が行える。神岡は世界に類のないユニークな場所といえる。これによりカムランドはニュートリノ振動の検出感度でそれまでの実験を2桁上回る超高感度を実現した。

(2) 原子炉ニュートリノの検出原理

原子炉ニュートリノは液体シンチレータ中で水素原子と特有の反応を起こし、陽電子と中性子が生まれる。陽電子は他の電子と対消滅し2個の γ 線となり、中性子は別の陽子と結合して重陽子となり2.2MeVの γ 線を発生する。両者はごく短い時間内(平均200 μ s)に起こるのでこれを検出することで反電子ニュートリノを識別でき、さらに陽電子の信号から反電子ニュートリノのエネル

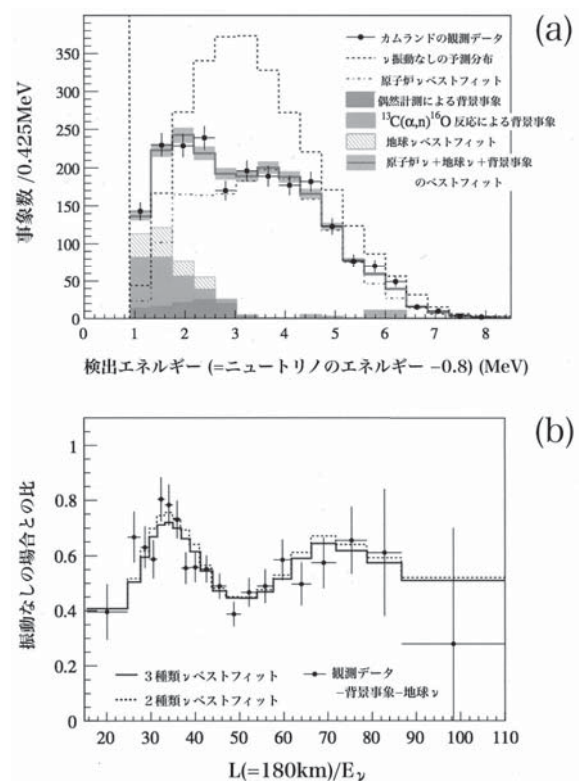
ギーもわかるのである。

この検出方法はF.ライネスが原子炉を使った実験でニュートリノを発見した際に用いた優れた手法で、それ以後の原子炉ニュートリノ実験でも採用されている。カムランドでは1,000トン液体シンチレータに残存する放射性不純物を極力排除するため、液体シンチレータの純化と実験装置の徹底的なクリーン化を行った。その結果、実験開始後の検出器内のウラン、トリウムの放射能が通常環境の1,000万分の1以下の極低放射能空間が実現した。

(3) カムランドの結果

カムランド実験は1998～2001年の建設期間を経て2002年にデータ採取を開始した。ほどなく原子炉ニュートリノが検出され、データの蓄積とともに観測数が期待値の約6割しかないことが明らかとなった(第1図参照)。それはまさに原子炉ニュートリノ振動の初の証拠であった¹⁾。この結果は太陽ニュートリノ問題を説明する複数の振動解も1つに決定し、太陽ニュートリノ問題の解決への決定打を与えた。また観測結果は大方の理論家の予想に反しニュートリノ混合角(3種類のニュートリノの重なり具合を表すパラメータ)が大きいことも示した。

第3図(a)に2002～2009年までにカムランドが観測したデータの解析結果を示す²⁾。観測数が振動なしの場合



第3図 (a)カムランドの観測による原子炉ニュートリノ事象のエネルギースペクトル；(b)原子炉までの平均距離L(180km)とニュートリノエネルギーとの比の分布
ニュートリノ振動がない場合は1である。

合の予測から大きく減少しているだけでなく、スペクトルも歪んでいることがわかる。ニュートリノ振動はもはや疑いがなくなった。第3図(b)は原子炉ニュートリノ以外の背景事象を差し引き、エネルギーの逆数として焼き直したもので、原子炉ニュートリノの「生存確率」に相当する。ほぼ2周期にわたる振動が捕らえられていることがわかる。これにより振動を特徴付ける物理量(ニュートリノ質量の2乗差と混合角)が世界最高感度で決定された。ここに太陽ニュートリノ問題は完全に解決した。

III. 地球ニュートリノ

1. この起こり：地球の熱源の謎

地球の内部は熱い。地球表面から放出される熱は観測から 47 ± 2 TW (1TW=1兆ワット) と評価されており、それは大型原子炉 15,000 台分の熱出力に相当する。その昔、ケルビン卿(英)は、地球が誕生期のマグマの海から現在に至る冷却期間を計算し、2000万～4000万年程度だと推測した。地球の年齢は46億年ではるかに長い。しかし今なお地球内部は熱く、地震、火山活動、そして大陸の移動、地磁気存在と反転など、極めて活発である。そのエネルギーがどこからくるのか？それは地球の進化と現在の内部構造を決定する地球ダイナミクスにおいて最も基本的かつ重要な物理量である。

地球内部の熱源として推測されたのが、地球上に微量(地殻で ppm 程度)ながら存在する放射性元素(主に ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K)である。それらの崩壊で解放されるエネルギー(放射化熱という)が熱源として重要というのである。これを確かめるには地球深部からサンプルを取り出し分析すれば良いがそれはまず不可能である。実際、これまでに行われたボーリング調査で到達した最大深度は約12kmであり、地球半径のわずか0.2%に過ぎない。地球内部の研究は地震波の速度分布を調べる物理的手法と、太陽系初期の古い隕石(炭素質コンドライト)等の分析による化学的手法が行われてきたが、いずれも間接的であり地球内部の熱源を直接調べる方法はなかった。

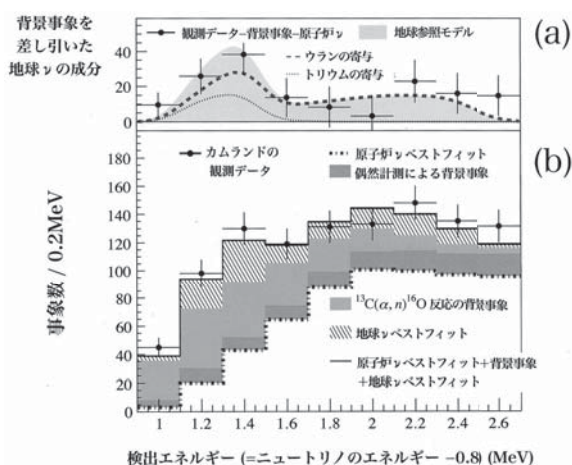
2. 地球ニュートリノ検出への挑戦と結果

地球内部の熱源の直接探索を可能にするのが地球ニュートリノである。すでに上げた3つの放射性元素は崩壊系列にベータ崩壊を含むため、反電子ニュートリノを放出する。それらは地球をほぼ素通りして出てくるので、これらを検出できれば熱源である放射性元素の量と分布を評価できるはずである。この考えは以前から地球物理学者の間にはあったが、地球ニュートリノのエネルギーがとても低いため(高々3.4MeV)環境放射能に邪魔されてしまい検出は不可能と思われてきた。これに初めて挑戦したのがカムランドである。地球ニュートリノは原子炉ニュートリノと同じ反電子ニュートリノなので、カムランドで検出が可能である。実際 ^{238}U と ^{232}Th の

ベータ崩壊では、一部の反電子ニュートリノがこの検出反応のしきい値(1.8MeV)を超える(^{40}K からのニュートリノはしきい値以下のため検出できない)。またそれぞれ特有のスペクトルを持つため ^{238}U と ^{232}Th 起源のニュートリノの量も区別できる。カムランドでは原子炉ニュートリノや環境放射能による背景事象の影響を注意深く差し引くことで検出に成功し、2005年に最初の論文がNatureに掲載された³⁾。この結果はニュートリノで地球内部を探る新たな研究手法の開拓を示す画期的なもので、地球物理学の分野に衝撃を与え、世界の主立った研究所で新たな観測計画が検討される端緒となった。

第4図(b)に2012年までの観測データの解析結果を示す⁴⁾。横軸は検出エネルギーで地球ニュートリノが現れる0.9～2.6MeVで示してある。最大の背景事象は原子炉ニュートリノであるが(白色の部分)これまでの観測でよく理解されており差し引くことができる。次に重要なのは液体シンチレータ中に残存する放射性鉛 ^{210}Pb (カムランドの建設時に装置に混入したラドンの崩壊生成物)から生じる ^{210}Po が α 崩壊して引き起こす核反応($^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$)であった。これを正しく評価するとともに1,000トン液体シンチレータの蒸留純化を2度行い ^{210}Pb を徹底的に除去した。不幸にして2011年3月に発生した東日本大震災と福島第一原発事故に伴い全国の発電用原子炉が停止した。その結果、原子炉ニュートリノが激減し思いがけなくも地球ニュートリノ観測にとっては得難いクリーンな環境が実現した。第4図(a)は背景事象を差し引いて得られたスペクトルと、地球参照モデルによる予測との比較である。その結果、カムランドでの ^{238}U と ^{232}Th 起源の地球ニュートリノのフラックスとして $(3.4 \pm 0.8) \times 10^6 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ が得られた。

地球は地殻、マントル、コアの層構造をなし、地球上の ^{238}U , ^{232}Th は、その50%が地殻(ほとんどが大陸地殻)に存在し、コアにはゼロ、残りはマントルに分布す



第4図 カムランドによる地球ニュートリノ観測の結果
(a) 背景事象成分を差し引いた後の地球ニュートリノ成分と地球モデルの予測; (b) 観測事象と背景事象のエネルギー分布(0.9～2.6MeV)。

ると考えられ、複数のモデルが構築されている。また ^{238}U と ^{232}Th はほぼ一定の重量比($\text{U}/\text{Th}=3.9$)で分布することがわかっている。カムランドの観測結果から、 $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}$ の放射化熱が20TWであることがわかった。これに ^{40}K の評価4TWを加えると地球が放出する熱の約半分が放射化熱であり、すべてが放射化熱とするモデルは否定された。それは地球誕生以来の「原始の熱」が残っていることを示している。一方、地殻からの熱の寄与(7TW)を差し引くと地球の大部分を占めるマントルからの熱の寄与が見えてくる。カムランドの結果はマントルの構造と組成を与える複数のモデルにも制限を与えつつある。

カムランドの最初の観測から5年後にイタリアの実験グループが地球ニュートリノ検出に成功した。イタリアは大陸に囲まれており、大陸と海洋(^{238}U , ^{232}Th の量は大陸よりずっと少ない)の境に位置する日本とは際立って異なる環境にある。カムランドの結果と比べることで ^{238}U , ^{232}Th のマントル中の分布について重要な知見が得られるものと期待される。さらにハワイのように四方を海洋に囲まれ周囲に原子力発電所がない所で観測すれば、マントルからの寄与がより直接的に見えることが期待され、新たな観測計画が検討されている。

IV. 粒子と反粒子を結ぶニュートリノ

素粒子には電子と陽電子のように電荷が逆で、それ以外の性質が全く同じ「反粒子」が存在する。ところがニュートリノは電荷を持たないので、それ自体が反粒子である可能性(これをマヨラナ粒子という)がある。もしニュートリノがマヨラナ粒子ならば、ニュートリノの非常に小さな質量を説明し、同時に質量の極めて大きなニュートリノの存在が示唆される。この考え方は素粒子の標準理論をはるかに超える、宇宙誕生期の超高エネルギーの物理を示唆するもので大変魅力的であり、ニュートリノがマヨラナ粒子だと考える物理学者は多い。ニュートリノの基本的な性質に基づくこの問題の解明は素粒子物理学における最重要課題のひとつである。

現在のところニュートリノのマヨラナ性を検証する唯一可能な方法があり、ある種の原子核に起こる「2重ベータ崩壊」という現象が鍵となる。これは2つのベータ崩壊が同時に起こる大変まれな崩壊反応で、通常は2個の電子と2個のニュートリノが放出される。これは $2\nu\beta\beta$ 崩壊と呼ばれ実際に見つかっている。ところがニュートリノがマヨラナ粒子であると、ニュートリノが核内で消滅し2個の電子のみが放出される現象($0\nu\beta\beta$ 崩壊)も起こる。これは未発見であり、その探索には、大量の2重ベータ崩壊核を用意し、環境放射能を徹底的に排除したクリーンな検出器の製作が必要となる。これは容易ではないが、発見一番乗りを目指して世界の主な研究所で高感度探索実験が進行中である。

カムランドでは検出器のクリーンな環境を活かし、キセノン同位体核(^{136}Xe)を使った $0\nu\beta\beta$ 探索(カムランド禅実験, Zero Neutrino double beta decay)を2011年秋から行っている。この実験はカムランド検出器の中心に小型の透明な袋を設置し、300kgの ^{136}Xe を溶かした液体シンチレータを入れて観測する。検出器の変更が小規模なため原子炉ニュートリノや地球ニュートリノの観測も並行して行える。これまでの観測で未発見ながら、世界最高感度に相当する崩壊半減期のリミット(3.4×10^{25} 年(90%信頼度))⁴⁾が得られた。現在、感度の大幅な向上を目指して開発を続けている。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊が見つれば一大発見となるが、3種類のニュートリノ質量のパターンや質量の絶対値についても重要な知見が得られ、宇宙物理学にも大きく貢献することが期待されている。もっと述べたいが残念ながら紙面が尽きてしまった。興味をお持ちの方はWebページ⁶⁾を参照されたい。

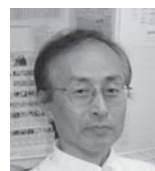
V. むすび

ニュートリノの研究は、素粒子物理学だけでなく、広く地球、太陽、宇宙の謎にまで迫るホットで夢のある知への挑戦である。カムランドは原子炉ニュートリノ振動の発見と精密測定、地球ニュートリノの初観測による地球物理学への貢献を行い、謎の解明に貢献してきた。そして究極の謎であるニュートリノ質量の解明に挑戦を続けている。ニュートリノ研究は基礎物理学で最も重要な研究分野の1つであり、我が国では加速器ニュートリノ実験を含め世界を大きくリードする研究が活発に行われている。今後のニュートリノ研究の進展と成果に少しでも関心を持っていただければ幸いである。

— 参考資料 —

- 1) K.Eguchi, *et al.*, First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Antineutrino Disappearance, *Phys.Rev.Lett.*, **90**, 021802 (2003).
- 2) A.Gando, *et al.*, Constraints on θ_{13} from a three-flavor oscillation analysis of reactor antineutrinos at KamLAND, *Phys.Rev.*, **D 83**, 052002 (2011).
- 3) T.Araki, *et al.*, Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND, *Nature*, **436**, 499-503 (2005).
- 4) A.Gando, *et al.*, Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND, *Phys.Rev.*, **D 88**, 033001 (2013).
- 5) A.Gando, *et al.*, Limit on Neutrinoless $\beta\beta$ Decay of ^{136}Xe from the First Phase of KamLAND-Zen and Comparison with the Positive Claim in ^{76}Ge , *Phys.Rev.Lett.*, **110**, 062502-1-5 (2013).
- 6) <http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/?cat=16>

著者紹介



白井淳平 (しらい・じゅんぺい)
東北大学 ニュートリノ科学研究センター
(専門分野/関心分野) 素粒子物理学/
ニュートリノ, 高エネルギー素粒子反応

報告

アジアの将来の環を繋ぐ原子力人材

東南アジアの学生と交流して得たこと

長岡技術科学大学 林 亮太

平成 25 年度文部科学省復興対策特別事業「国際原子力教育ネットワークによる戦略的原子力人材育成モデル事業」の活動の一環として、参加 16 大学から代表して 6 名の学生が、インドネシアのバンドン工科大学、マレーシアのマレーシア国民大学及びベトナムのハノイ工科大学を平成 26 年 2 月から 3 月にかけて訪問し研修した。この研修で、現地の学生達との交流を通じて得たことを中心に報告する。

1. はじめに

「国際原子力教育ネットワークによる戦略的原子力人材育成モデル事業」¹⁾では、原子力教育・研究に携わる国内の有志 16 大学が連携協力して、国内外の原子力人材を育成している。今回の活動では、16 大学から選抜された 6 名の学生が 2 班に分かれて海外研修事業を実施した(指導引率教官合計 4 名)。平成 25 年度は、東(京都市大)、大橋(山梨大)、岩崎(岡山大)の 3 名が平成 26 年(2014 年)2 月 27 日から 3 月 4 日にかけてインドネシア・マレーシアを訪問し、林(長岡技科大)、米岡(金沢大)、松井(福井大)の 3 名が同年 3 月 13 日から 14 日にかけてベトナムを訪問した。当初、タイへも訪問する予定であったが、現地の政治情勢混乱のため断念した。以下にそれぞれの国で実施した学生交流の成果について報告する。

2. 事前教育・事前準備内容

本研修の目的は、原子力安全の人材としての優れた国際感覚・高いコミュニケーション能力・情報発信能力を培うための、アジア諸国の方々との率直な意見交換や自由な交流を通じた国際的視野の拡大である。研修では、原子力エネルギーの導入に積極的な国の学生がどのような研究を行っているのか、原子力エネルギーの利用についての安全性や国益に関してどのような認識を持っているのかなどについて現地の学生と議論し見聞を広める。

選抜された学生は、それぞれの専門分野と関連付けて日本のエネルギー事情についての発表資料を作成した。インドネシア・マレーシア組は「エネルギー利用の変遷」、「発電の種類」、「発電毎のリスク」の三点について

まとめ、ベトナム組は「世界と日本の原子力エネルギー事情」、「東日本大震災後の環境放射能動態」、「将来の原子力業界での日本の役割」についてまとめて発表を行った。研修に参加した日本人学生のなかには、修士課程から原子力の分野で学び始めた者もあり、研究テーマは様々であった。研究発表ではそれぞれ「慣性閉じ込め核融合」、「磁場閉じ込め核融合」、「地熱ヒートポンプシステムの効率」、「砂質土中の熱輸送と含水率」、「環境放射能評価」、「次世代小型軽水炉の安全性向上」に関する発表を行った。

3. 東南アジア諸国での研修成果

本研修では、バンドン工科大学(インドネシア)、マレーシア国民大学(マレーシア)およびハノイ工科大学(ベトナム)で、各学生による研究成果発表と日本のエネルギー事情に関する合作の資料を用いた発表を行った。

(1) インドネシアでの研修成果

バンドン工科大学での発表会に参加した学生は原子核物理学部であり、試験炉での研究を目指している学生が多く、学生同士で技術的な意見交換をしている姿が目立った。しかし、日本のエネルギー事情に関する質疑応答では、本質的な供給エネルギー不足とインフラ整備不足に起因する頻繁な停電などの問題を混同したことが原因で、両国のエネルギー自給率に関する議論が紛糾する場面があった。原発問題などの各論について議論する前に、各国のエネルギー事情などの前提確認を丁寧に行う必要があると感じた。

バンドン工科大学の学生の発表では、BWR の炉心設計の最適化や燃料棒配置と減速材の材料に関するシミュレーション結果など、3 名の研究発表を聴いた。インドネシアの原子力教育とエネルギー事情の紹介の中では、2014 年中に原子力発電の実験炉建設のためのサイトを決定したいということや、今後 10 年で発電量を現在の

Nuclear Human Resources linking the future Asia: Ryota HAYASHI, Shuhei AZUMA, Akio OHASHI, Keisuke IWASAKI, Shuichiro YONEOKA, Shuhei MATSUI.

(2014 年 6 月 4 日 受理)

6倍にするという目標が紹介された。人口の増加や都市部の開発により、今後のさらなるエネルギー需要の増加が見込まれることから、政策として2025年を目処にエネルギー源のベストミックスの実現を目指しており、原子力だけでなく、バイオマス・太陽光・地熱などの再生可能エネルギーを導入する計画も進められていた。

(2) マレーシアでの研修成果

マレーシアでは原子力エネルギーの導入について意見が分かれており、物議を醸す原因となっている。そのため、日本のエネルギー事情に関する質疑は、原子力発電所が停止していることやリスクについての国民の認識を問われる内容が多くを占めた。また、国内の地方自治体や他国に対する日本政府の対応にも関心が集まった。政治色の強い議題だが、多くの国が原子力エネルギーの導入を検討するなか、次世代を担う学生同士として、議論の余地が十分にあると感じられた。

マレーシア国民大学での発表に参加した学生は理工学部であった。現地の学生による発表では薬剤師が扱うI-131の放射線量評価や河川の水・堆積物中の重金属と自然放射性物質の放射能濃度などについての発表が行われた。マレーシアのエネルギー事情に関する発表では、既存の発電所や電力網の整備について説明を受けた。マレーシアで生産される化石燃料は数十年で枯渇すると試算されており、原子力や自然エネルギーの導入を促進していくといった大まかな方針を示す内容であった。

(3) ベトナムでの研修成果

ベトナムでは経済成長と人口増加に伴ってエネルギー需要が急激に増加しており、現在の主力である水力発電と火力発電ではエネルギーの安定供給が困難とされている。そのため、2020年までに原子力エネルギーの導入を検討しており、原子力関連の技術や安全対策についての知識を有した人材育成に取り組んでいた。

ハノイ工科大学の原子力工学部の学生の発表では、事故時の原子炉の状況のシミュレーションコードや放射線利用関連のX線検出器の研究についての発表が行われ、原子力エネルギーの導入を見据えた研究が着実に進められていた。日本のエネルギー事情の発表では、福島第一原子力発電所事故についての発表に関して「現地の子供たちは野外で遊ぶことまでも制限される指導を受けているようだが、そのことについてはどのように感じるか」など、日本の子供たちを思いやるような質問があり、事故の影響への関心の高さだけでなく、日本人への心遣いを感じる場面もあった。

ベトナムのエネルギー事情についての発表では、エネルギー需給についてなどの喫緊の問題やエネルギー安全保障のための原子力エネルギーの導入の重要性について述べていた。計画中のNinh Thuan原子力発電所の早急な建設と運転が望まれる一方で、プロジェクトや原子力関連の法整備の遅延が懸念されていた。

4. まとめ

日本と東南アジア諸国の学生同士で、世界のエネルギー事情や原子力エネルギー利用のあり方について相互理解を深めた。研修で訪れたインドネシア・マレーシア、ベトナムでは、原子力エネルギーの導入が積極的に検討されていた。現地の学生達からは、急激に発展していく母国をより豊かで確かなものとするための原子力への強い期待が感じられた。原子力安全に対する意識も高く、放射線の安全利用や過酷事故時の対策についての研究が行われていた。バンドン工科大学では急遽100名以上が会議への参加を申し込むなど、彼らの積極的な態度から多大な刺激を受けた。原子力エネルギーの将来について真剣に議論するなかで、現地の学生と友好関係を築けたことを誇りに思う。また、研修関係者との交流も将来的な財産になると感じている。同じ原子力の分野でも専攻が異なり、食事や風呂の合間の会話すらも興味深いものばかりだった。事前準備での日本のエネルギー事情に関する発表資料を作成は、同年代の学生同士で互いに意見を出し合いながら日本を見つめ直す良い機会となった。

今回の研修を通して、日本は近い将来に彼らの国に原子力発電所を建設するのであれば、1970年代から経験してきた原子力エネルギーの利用に伴う恩恵と弊害をはっきりと認識し、先の過酷事故の教訓を活かすことで、新たに原子力エネルギーを導入する国に対して技術や経験的知識を駆使して協力していくことが重要だと感じた。

— 参考資料 —

- 1)「国際原子力教育ネットワークによる戦略的原子力人材育成モデル事業」<http://www.nr.titech.ac.jp/d-atom/Japanese/Events/index.html>

著者紹介(所属大学は研修当時のもの)

林 亮太(はやし・りょうた)

長岡技術科学大学 工学研究科 原子力システム
安全工学専攻

東 修平(あずま・しゅうへい)

京都大学 工学研究科 原子核工学専攻

大橋明生(おおはし・あきお)

山梨大学 医学工学総合教育部 機械システム工学専攻

岩崎佳介(いわさき・けいすけ)

岡山大学 環境生命科学研究科 社会基盤環境学専攻

米岡修一郎(よねおか・しゅういちろう)

金沢大学 理工学域 物質化学類

松井秀平(まつい・しゅうへい)

福井大学 工学研究科 原子力・エネルギー安全
工学専攻

報告

フランスとわが国の放射性廃棄物の処理処分について
フランス原子力学会との合同セッションより

電力中央研究所 塚本 政樹

日本原子力学会「2014年春の年会」でバックエンド部会(以下、BE部会)がフランス原子力学会バックエンド関係部門と合同で、「SFEN-AESJ joint session on “Waste Management” (フランス原子力学会との放射性廃棄物処理・処分合同セッション)」(以下、合同セッション)と称したセッションを行った。その際の発表内容をもとに、放射性廃棄物の処理・処分の現状および技術開発の進捗や計画、事業主体などに関するフランスの状況を中心に、一部わが国との比較を交えながら概説する。

1. 合同セッションの概要

フランス原子力学会(Société Française d'Énergie Nucléaire : SFEN)からは放射性廃棄物管理機関(Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs : ANDRA)のRichard Poisson氏、フランス原子力・代替エネルギー庁(Commissariat à l'énergie atomique : CEA) Thierry Advocat氏を招き、長尾前部会長の進行のもと、それぞれフランスにおける放射性廃棄物管理の概要、および廃止措置と研究開発の状況について講演頂いた。

それに対して、BE部会側からは原子力環境整備促進・資金管理センターの田辺博三氏から、日本の放射性廃棄物管理の現状について、関係機関の役割、廃棄物の発生量や分類および相当する処分概念、規制の検討状況、種々の廃棄物の処分実施主体等の概要紹介に加えて、最近のトピックスとして、規制の枠組みの再編成や原子力発電所の状況、福島第一原子力発電所の廃炉対策について紹介があった。日本原子力研究開発機構の梅木博之氏からは、研究機関の立場から、高レベル放射性廃棄物およびTRU廃棄物の検討状況と現在までの研究の進展、知識マネジメントシステム(KMS)について、また、原子力発電環境整備機構の藤原啓司氏からは、地層処分事業主体の立場から、地層処分事業の安全確保の考え方(いわゆる「2010年技術レポート」)の概要と、東日本大震災を受けての地層処分の安全性の再評価実施について紹介があった。

いずれの講演者の方々の方々の発表内容とも、多くの重要な情報を簡潔、かつわかりやすくまとめられており、聴講者にとっては短時間で両国の放射性廃棄物の処理・処分

Current Status of the Nuclear Waste Management System and Related R&D in France and Japan : Masaki TSUKAMOTO.

(2014年5月15日受理)

の現状の要点を理解するよい機会だったと考える。全講演についての概説が望ましいが、紙面の関係上、発表内容をもとにフランスの状況を中心に記載し、わが国が異なる状況にある場合について、特記していきたい。なお、各講演の概要については、BE部会誌「原子力バックエンド研究」にも会議参加報告として掲載¹⁾されるので、参照願いたい。

2. フランスの放射性廃棄物処理・処分の現状

Poisson氏によれば、ANDRAは廃棄物発生者とは独立したエネルギー相や環境相直轄の放射性廃棄物処分の実施主体として、低中レベル放射性廃棄物処分場の操業および高レベル放射性廃棄物処分の深地層処分研究の中心機関である。主要な廃棄物発生者であるAREVA社、フランス電力庁(Électricité de France)、CEAに加えて、小さな事業者も含めて約700もの国内事業者から発生する放射性廃棄物を取り扱っている。この点は、発電所運転廃棄物は日本原燃(株)、地層処分対象廃棄物は原子力発電環境整備機構、研究施設等廃棄物は日本原子力研究開発機構がそれぞれ受け持つというわが国の処分事業主体の体制と異なっている。

放射性廃棄物の分類に関しては、フランスでは放射性廃棄物は含まれる放射能の濃度で4段階、すなわち、極低レベル(VLL)、低レベル(LL)、中レベル(IL)、高レベル(HL)に分類され、さらに含有放射性核種の半減期が30年未満か以上により、短寿命と長寿命の廃棄物に分類される。具体的に主な放射性廃棄物をこの分類に当てはめるとおおよそ第1表ようになる。同表の最左欄は、放射性廃棄物に含まれる放射能のレベルで分類されており、諸外国同様、IAEAの分類に従っている。この点は、放射性廃棄物の発生元で分類する、すなわち、高レベル放射性廃棄物(高レベルガラス固化体)とそれ以

第1表 フランスの放射性廃棄物の分類と処分概念

レベル	短寿命廃棄物	長寿命廃棄物
VLL	施設解体作業で発生-浅地中処分	
LL	原子力発電所運転廃棄物 -浅地中処分	グラファイト, Ra含有 廃棄物-中深層処分
IL		再処理施設で発生する
HL	廃棄物-CIGEO 地層処分施設	

外の低レベル放射性廃棄物と分類され、それぞれ適切な処分概念が検討されるわが国のケースがむしろ特徴的と言えよう。

ANDRAは放射性廃棄物インベントリーに関する報告書を3年ごとに発刊している(最新版は2012年)。2009年の廃棄物物量として約1,151,000 m³という値が示されたが、うち90%近くは処分問題が解決しているとのことである。

フランスでは3か所に処分施設が存在する。うち、LLとILのレベルの廃棄物、すなわち低レベル廃棄物(LLW)、中レベル廃棄物(ILW)を受け入れたラマンシェ(La Manche)地方にある処分施設は受入可能容量527,000 m³が満杯になったため、1994年に閉鎖され、以降、数世紀にわたるモニタリングが計画されているとのことである。また、オーブ(Aube)サイトでは2か所の処分施設が稼働中で、LLWと極低レベルの廃棄物(VLLW)を受け入れている。さらに、恐らくは今後処分問題を解決すべき約10%の放射性廃棄物を対象として、2006年の「放射性廃棄物管理計画法」(以下、廃棄物管理法)に従って、HLレベルの高レベル廃棄物(HLW)と長寿命のILWを対象とした地層処分計画(CIGEOプロジェクト)が進められており、粘土層を有するビュールが計画中の処分施設の候補地と位置付けられている。同計画では、2015年に申請、2025年には一部建設開始が予定されているが、現状、住民との対話と将来的なエネルギー事情の変遷を考慮した法体系が重要な課題となっている。

わが国の地層処分事業は、藤原氏が紹介されたように、対象廃棄物の最終処分施設設置候補地の適性を文献調査するための概要調査地区選定に向けて、公募形式による地区選定段階にある。また、梅木氏の紹介にあった、安全な地層処分実施に必要な情報やデータ取得を目的とした北海道幌延および岐阜県東濃地方にある日本原子力研究開発機構の地下研究施設は、いずれも研究目的でのみ使用されている。

なお、フランスでは2030年代後半には、長寿命のLLWが総廃棄物量の約7%近くに達すると予想されており(放射能としては全体の0.007%)、Raを含有する放射性廃棄物(約48,000 m³)、グラファイト(約70,000 m³)、その他のLLWとしてビチューメン固化体や使用済密封線源(約33,000 m³)が主たるものとして挙げられており、現状、グラファイト廃棄物からの長半減期核種

や易動性核種の分離処理、Ra含有放射性廃棄物の浅地中処分、CIGEOプロジェクト処分施設の活用がオプションとなっている。2015年末にはこれらの廃棄物対策の戦略に関する報告書が取りまとめられる予定である。わが国も類似する放射性廃棄物を有している点で、発刊が待たれる。

加えて、ANDRAは原子力施設使用後の環境修復も行っているほか、前述の多くの小規模事業者の廃棄物管理の援助については再度紹介があり、わが国で教育、研究、医療の各機関や民間企業からの放射性廃棄物を管理する日本アイソトープ協会が果たしている役割も担っている。

3. CEAによる原子力施設廃止措置の現状と研究開発

Advocat氏が所属するCEA原子力/廃止措置部門は、原子力施設の廃止措置、施設解体および廃棄物の回収(Decommissioning/Dismantling & Waste Recovery: DD&R)と廃棄物管理最適化のための研究開発を目的として、将来の原子力技術開発や現行原子燃料サイクルの支援、老朽化原子力施設の廃止措置と廃棄物管理に加え、原子力の推進と産業界での活用、核融合や材料研究、原子炉やホットラボ施設の運転、教育・訓練をも担っている。同部門が手掛けた施設のうち、すでにSILOETTEとHARMONIEの2原子炉は廃止措置済みであり、現在、マルクール(Marcoul)原子力施設のPHENIX炉やUP1工場、カダラッシュ(Cadarache)原子力施設のPHEBUS炉をはじめとして多くの原子力施設が廃止措置対象となっている。また、サクレー(Saclay)原子力施設のOSIRIS研究炉が将来の対象となっている(第2表)。多くの原子力施設が廃止措置の対象であることから、異なる炉型の原子炉から加速器や照射機器、研究施設、再処理施設、古い廃棄物貯蔵施設など多種多様で、施設規模が大きく異なる、汚染区域が様々であり、廃棄物が多様といった点が、特有の課題として挙げられている。

わが国でも田辺氏が紹介された日本原子力発電(株)東海発電所の廃止措置や、中部電力(株)浜岡発電所1号機および2号機の廃止措置計画に加え、旧日本原子力研究所のJPDRをはじめとして、研究炉を含む多くの原子力施設が廃止措置完了、または廃止措置中である。

将来にわたるCEAによる廃止措置で発生し、処分対

第2表 CEAによる廃止措置対象の原子力施設名

実施済	実施中	将来
SILOETTE, HARMONIE	STE FAR, RM2, Bât. 18, LHA, ULYSSE, MELUSINE, SILOE, LAMA, STED, PHENIX, APM, UP1, PHEBUS, RAPSODIE, CFCa, Cryotraitement, ATUE, STED	OSIRIS

象となる廃棄物の容器の容積は 300,000 m³ 超と見積もられており、その 50 % 近くが VLLW である。長寿命および短寿命の LLW が、それぞれ約 16 %, 30 % を占め、長寿命の ILW は 6 % 以下、HLW に至っては約 0.12 % という内訳となっている。また、2007 年以來、CEA の廃止措置で発生した VLLW が毎年、10,000 ~ 17,000 m³ 程度がすでに埋設されている。ILW はビチューメン固化、あるいはコンクリート固化により容器に封入されるが、後者については α 核種含有や照射化合物圧縮体、マグネシウムを含む使用済燃料被覆管せん断片(以下、Mg ハル)、スラッジや濃縮物といった内容物によって容器の仕様が異なる。また、廃止措置廃棄物のうち照射化合物などは“DIADEM”ドラムと称する容器に封入されている。これら ILW は種類ごとにカダラッシュの CEDRA 施設やマルクールの各施設で中間貯蔵されている。

HLW はガラス固化されてキャニスターに封入され、マルクールの AVM 施設で貯蔵されている。

わが国では、原子力発電所の運転に伴う低レベル放射性廃棄物は六ヶ所の日本原燃「低レベル放射性廃棄物埋設センター」に埋設され、東海再処理工場運転に伴い発生した高レベル放射性ガラスや TRU 廃棄物が同工場内で保管されており、フランスからの返還高レベル放射性ガラスが日本原燃の「高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター」に貯蔵中であるなど、それぞれ適した保管や埋設処分が行われている。

なお、廃止措置の規制の枠組みや費用確保に関してはそれぞれ、2006 年の「原子力に関する安全および透明性に関する法律 (TSN 法)」, および廃棄物管理法に基づいた対策が講じられている。

最後に、CEA の DD&R に関わる研究開発例の紹介があった。廃止措置時のロボットや遠隔操作技術、切断や除染技術、放射性核種測定と定量、Mg ハルなどの処理技術、貯蔵・処分時の放射線分解や環境中での廃棄物容器の劣化などに関する基礎および応用研究の分野で、革新的な技術が用いられているとのことである。

また、最適な廃棄物の分類や管理に必要な、廃棄物容器に含まれる放射性核種の種類や量、位置を特定する廃棄物キャラクタリゼーション技術としては、 γ 線イメージング、 α カメラ、 γ 線スペクトロメトリー、パ

シブ中性子法などの非破壊法と β 線放出核種を対象とする破壊法が開発されている。特に、ホットセル内などのホットスポットの定量技術として、カメライメージと γ 線スペクトロメトリーを組み合わせた手法が紹介された。また、樹脂を含む ILW 容器が約 40,000 体発生するため、放射線分解による水素発生量の定量と、貯蔵・輸送・処分時の廃棄物容器の健全性の提示を目的とした、G 値の実測とモデル解析、実廃棄物容器からの水素発生量データによる実証の 3 段階のアプローチが取られている。これらの技術は、Mg ハルなど対象が異なる場合を除けば、いずれも国際的にも提唱されている技術であり、水素発生の問題はわが国の TRU 廃棄物のように金属や有機物を含む放射性廃棄物にも共通する課題であり、CEA と同様な解決策が検討されている。

4. 合同セッションを終えて

SFEN と BE 部会それぞれの講演者の方々の講演内容について特段の事前調整をせず、双方、合同セッションの場で伝えたいことを紹介頂いた。そのため、両国の相違などの詳細な比較が容易でなかった情報、短時間では入手できなかった情報もある。しかし、本合同セッションをきっかけとして、この先の情報交換が容易となった。今後の関係継続の中で双方が持つ技術や情報の相互利用、活用、協力、支援などの活動に結びつくことを期待したい。

— 参考資料 —

- 1) 吉田崇宏, 日本原子力学会「2014 年春の年会」バックエンド部会セッション「SFEN-AESJ joint session on “Waste Management”」参加報告, 原子力バックエンド研究, 21 (1), pp. 53-54, 2014 年 6 月 15 日.
<http://www.nuce-aesj.org/publishing/journal/vol21/Jnuce-Vol21-1-p53-54.pdf>

著者紹介

塚本政樹 (つかもと・まさき)
電力中央研究所 原子力技術研究所
(専門分野/関心分野) 放射化学/放射性廃棄物の処分



今も自問自答の日々

NHK 福島放送局 根元 良弘

福島に赴任して、ちょうど1年が経った。この間、ローカルニュースの責任者として取材指揮にあたってきたが、扱うニュースの多くが“原発事故”に関連するもので、重たい現実と日々向き合っている。

3年前、原発事故が起きた時、私は、原子力問題を担当する科学文化部のデスクとして、渋谷の放送センターの2階にいた。北海道で東方沖地震や奥尻の南西沖地震を経験していたが、この2つの地震とも明らかに質の異なる、もの凄い揺れだった。自ら原発の状況を知らせる1報原稿を書き、「全基スクラム」という情報が入ってきた時は、心底ホッとしたことを覚えている。その時は、それよりもとてつもない大津波の方を心配した。「10条通報」「15条」「原子力緊急事態」と、短時間に次々と情報が飛び込んで来たが、あらゆるものを根こそぎもっていく津波の威力を目の当たりにして、私は、放射性物質が外に漏れない状況であれば、まずは命に直結する余震、大津波への対応を優先すべきだと、考えた。

あれから3年、当時、自分はどのような報道をすべきだったのか、今も自問自答の日々が続いている。

「大本営発表」「垂れ流し」etc。当時の報道をめぐり、多くの批判を受けた。初動の情報の少ない段階では、公的機関、当事者の記者会見は基本的にそのまま中継することに事故前から決めていた。中継していれば、住民の安全に関わる重要な情報をリアルタイムで伝えることができると思ったからだ。しかし、当時の報道を振り返った時、報道全体のトーンとして、安全側に傾いていたことは否めない。目に見えない放射線、放射能に対しては元々恐怖心がある。誤った情報が流れば住民のパニックにつながるおそれがあると考えていた。大地震、大津波、その後も続く余震、現地は冬の厳しい寒さだ。先に待ち受ける事態をどこまで想像できていたかと問われれば、自責の念は強くある。しかし、その時自分は、努めて冷静に伝えようと心がけた。原発は次々に水素爆発し、何が起きたかわからない。NHK内であっても、あちこちで罵声が飛び交い、混乱している状況だった。だからこそ、逆に「冷静になろう、なろう」と思った。

福島ではいまでも12万人以上の人々が避難を余儀なくされている。そのことを思うと、自分自身が当時、局面局面で判断し、報じてきた内容が、福島の人たちにとって、どんな影響をもたらしたのか、と思わずにいられない。

福島の人の心に残っているのは、やはり事故直後の情報であって、その時の発表、報道内容が、彼らの人生を決めているかもしれない。

1ミリシーベルト、20ミリシーベルト、その数字の持つ意味、受け止めが人によって、あまりにも異なっている。何が正しくて、何が間違いか、軽々に言えない環境が福島にはある。その前提を作ってしまったのではないかと、東京で知ったかぶりをして、福島のためだと勝手に思い、報道していなかったか、振り返るたびに、そう思う。

最後に、この文章を見る人の多くが原子力関係者だと思うので、自戒を込めて書こうと思う。過酷な原発事故が起きた時、自分は何をすべきか、あの時、原子力関係者のうち、どれだけの人が考え、行動を起こしたのだろうか。あとから批判すること、ものをいうことはできるが、一番大変な時に、召集されようがされまいが、上司だろうがそうでないだろうが、明らかに間違いであるならば、毅然とした態度で行動することだと思ふ。それまで培ってきた原子力の知識、経験を命じられなければ使わないというのは、明らかに間違っている。

今でも思い出すが、事故から4日後の3月15日の夜に文部科学省が発表したモニタリング調査の結果で初めて北西方向の高線量地点の存在が明らかになった。しかし、その時の発表に具体的な地点名はなく番号だけだった。誰のための情報か、何のために情報を出すのか、思い馳せることができるかが問われる。

事故から3年以上がたち、福島以外の人たちは、原発事故の教訓をどう生かそうとしているのだろうか。全国から応援記者が福島に来るたびに話を聞くが、ほとんど福島のことなど意識したことがないという。いまでも防護服を着て歩いていると思っている人もいた。福島では事故は現在進行形である。原発を動かすことの重み、事故が起きることとはどういうことか、何度でも福島に足を運び、自分自身で実感してほしいと思う。

著者紹介

根元 良弘 (ねもと・よしひろ)

NHK

90年NHK入局。室蘭、札幌を経て98年から科学文化部。原子力、宇宙開発中心に取材。06年から科学文化部デスクとなり、福島第一原発事故の取材指揮を執る。13年6月から福島局ニュース副部長。



理事会だより



平成 26 年度理事会新執行部が活動開始

新執行部の選出

平成 26 年 6 月 20 日の第 2 回通常総会で新しい理事・監事 12 人が選出され、25 年度からの留任を加えて計 20 名の新執行部がスタートしました。

会長には新しく藤田玲子氏(東芝)、副会長には上塚寛氏(JAEA)、上坂充氏(東京大)、柴田洋二氏(日立 GE)が互選で選出されました。

26 年度から新しく福島担当と会員担当の理事が各 2 名指名されました。福島担当は本学会の最重要事業である東京電力福島第一原子力発電所事故後の環境修復・廃炉等を担当します。また、会員担当は会員の皆さまへのサービスの充実や会員増強方策などを検討していきます。

26 年度役員の担当業務は下記のとおりです。

役職(担当業務)	氏名	所属
会長	藤田玲子	東芝
副会長	上塚 寛	JAEA
副会長	上坂 充	東京大
副会長	柴田洋二	日立 GE
理事(企画)	田中治邦	日本原燃
理事(企画)	駒野康男	三菱原子力エンジ
理事(総務、標準)	百々 隆	JANSI
理事(総務)	小林正彦	東芝
理事(財務、国際)	梅木博之	JAEA
理事(財務、会員)	石隈和雄	日本原電
理事(部会等運営)	出光一哉	九州大
理事(部会等、標準)	森 治嗣	北海道大
理事(編集、会員)	高橋 信	東北大
理事(編集)	岡嶋成晃	JAEA
理事(広報、福島)	田中隆則	エネ総工研
理事(広報、教育)	岡田往子	東京都市大
理事(教育、国際)	小西哲之	京都大
理事(福島)	井上 正	電中研
監事	高杉正博	関西電力
監事	松田将省	日立

(名前斜字は任期 2 年目)

今後、この欄にて各担当理事の活動やメッセージなども報告していく予定です。

今月は新会長からのメッセージです。

理事会だよりへのご意見ご提案の送り先
rijikaidayori@aesj.or.jp

藤田新会長のメッセージ

私の会長に就任に際しまして、「透明性の向上」と「根本的な経営改善」をお願いしたいと考えています。

「透明性の向上」の施策としては 2 点あります。

第 1 点としましては理事会で討議されている内容を学会員にきちんと情報提供することです。どのような形で情報提供するかは広報情報委員会や企画委員会にお任せします。8 月号から学会誌に理事会のページができましたが、さらに、理事会での討議の内容や学会活動の方針が分かるようにしたいと考えています。例えば、学会 HP に議事録を掲載するなどを検討したいと考えています。合わせて、学会員の情報のデータベースを整備したいと考えています。また、HP につきましては、専門の方をお願いしてその充実を図り、学会員へのサービスの向上を目指します。

第 2 点としては、学会として発信するプレスリリースを充実します。学会本来の役割である部会や専門委員会での調査や研究の成果、年会や大会のトピックスを分かりやすくプレスリリースすることも実施したいと考えています。また、合わせて会長・副会長や部会長経験者などからなる諮問委員会を立ち上げ、重要な案件はコメントを頂戴する体制も整えたいと考えています。

2 つめは「根本的な経営改善」です。これは「経営改善特別小委員会」に既にお願していることですが、学会が 5 年後には債務超過にならないように理事の方々全員に認識していただき、抜本的に学会の経営体質を改善することにご協力いただきたいと考えています。

具体的には、まず、大きな赤字を出す可能性のある事業の見直しですが、リストラだけですと組織は衰退してしまいます。そこで、学会として魅力ある活動を発掘していくことが重要です。これは口で言うことは簡単でも実行に移すことは非常に難しいテーマです。シニアの方にご協力いただく賛助会員勧誘活動や廃炉・除染技術などの資格取得のための講習などは有力な候補と考えています。しかしながら、実現可能性から考えると他にいくつかの候補を持つ必要があります。会費収入以外に経営を支えるアイデアとしてあと 2~3 件位は必要です。部会主催の国際会議や出版事業、若い会員が参加したくなる企画など。

東京電力福島第一原子力発電所事故から 3 年半がたち、本会も定期的な活動に目を向けられるようになりました。皆様のご協力をよろしくお願い致します。