

シリーズ解説

我が国の最先端研究開発
No. 23 理化学研究所(第2回)

16 RI ビームが拓く新時代—理化学研究所・RI ビームファクトリーの始動

安定な原子核と比べ陽子数・中性子数が極端に異なるエキゾチックな放射性原子核(RI)を研究する分野は、理化学研究所「RI ビームファクトリー(RIBF)」の誕生とともに新たな時代を迎えている。

櫻井博儀

解説 「匠」たちの足跡 第1回

21 原子力の歴史を構築した「多度津振動台」

原子力工学試験センターは多度津工学試験所に世界最大の大型振動台を設け、1982年からこの振動台による試験を開始。原子炉容器などの大型機器類が大地震時においても十分な余裕をもって耐震安全性、信頼性が確保されていることを実証した。

毛利嘉明



解説

33 シミュレーションの信頼性確保のあり方とは？—当学会としてのVerification & Validation への取り組み

シミュレーション技術の普及とともに、その信頼性の確保が重要になってきた。その品質管理のキーワードは検証と妥当性確認だ。

堀田亮年, 中田耕太郎, 佐田幸一

38 原子力発電所の設計と評価における地震安全の論理

学会の原子力発電所地震安全特別専門委員会では、地震時の安全確保の基本的考え方を整理し、地震安全の論理を取りまとめた。大橋弘忠

巻頭言

1 エネルギー基本計画における原子力の位置づけ

細野哲弘

時論

2 米印合意と日印間の原子力協力

日本は、核不拡散を二次的に考える原子力協力からの転換にリーダーシップを。浅田正彦

4 日本の自治体, 求められる科学・技術の戦略機能

独自政策を打ち出すドイツの都市。背景には中世からの歴史がある。高松平藏

解説

「量子ビーム発生と利用の最前線」—加速器・ビーム科学部会企画セッションから

量子ビームは物質の構造解析や微細加工、計測・評価等の有力なツールとして、さまざまな分野で幅広く利用されている。加速器・ビーム科学部会ではそれをテーマに、「春の年会」で企画セッションを開催した。ここではそのうち、下記の3テーマについて紹介する。

26 中性子利用鉄鋼評価技術の最近の進歩

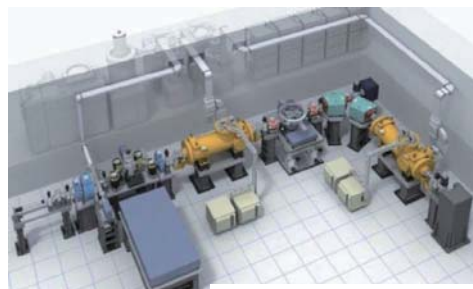
友田 陽

29 シンクロトロンに基づくスポット走査方式陽子線治療システム

平本和夫

31 超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発

浦川順治



小型高輝度光子ビーム源の3次元装置概念図

表紙の絵 「化学天秤のある理科室」 豊田静子

第41回「日展」へ出展された作品を掲載いたします。(表紙装丁は鈴木 新氏)

理科教育に長年携わって来たので、執着し描いた。今はあまり使われないうるぐら器具を画材にし、実験台上に構成してみた。私なりの世界観を描いてみたく、青を基調に理科室の空気や静寂を表現した。ガラスの質感を出すのが難しかった。

解説 みんなでわかってシリーズ

43 時空の創生：超弦理論から原子核へ (1) 超弦理論と素粒子

超弦理論は、物質と力を記述している素粒子がすべて小さな「ひも」から構成されているとする仮説である。これは素粒子論、宇宙論、重力理論、物性理論、そして原子核物理学へと多彩な応用がなされている。

橋本幸士

連載講座 実験炉物理(4) 未来へのメッセージ 次世代の安全基盤の確立に向けて

48 NCA における臨界実験

東芝の臨界実験装置 NCA は、軽水炉燃料の開発や解析コードの検証、制御棒等の中性子吸収材の開発を目的として運転を継続している。これまでの成果と今後について紹介する。

三橋偉司

連載講座 ICRP 新勧告—新しい放射線防護の考え方と基準(8) 最終回

54 環境の放射線防護

2007年勧告では「環境の防護」が新たに取上げられ、放射線の環境防護の枠組みが提示された。それを、ヒトを対象とした防護体系との関係の中でどのように位置づけるかについての議論が続いている。

酒井一夫

原子力外交シリーズ(1)

59 日本原子力外交の課題

原子力外交の対象はエネルギー、放射線利用のみならず、国の安全保障そのものに直接に関係している。

遠藤哲也

談話室

61 豊かさと科学技術、そして原発

原発推進の論理の中には、自然や環境を資源とみなす合理主義的な態度と人間讃歌の発想がみえる。

佐田 務

63 ニュージーランドの暮らしと語学ブラッシュアップ(その2)

—語学学校と仲間たち

松田美夜子

6 NEWS

- 菅改造内閣が発足
- 福島第一発電所3号機、プルサーマルを開始
- 民主連立初の本格予算
- 立地対策交付金の使途拡大へ
- リサイクル燃料施設が着工
- 経産省、ウラン施設のクリアランス整備
- 日本原燃、再処理工場のしゅん工時期を延期
- 東大原子力 GCOE が国際サマースクール
- 石油製品中の硫黄濃度を高精度に測定可能に
- JMTR 第166運転サイクルの取扱いについて
- 民間の円卓会議、原子力行政の見直しを提言
- 原産、インドとの原子力利用協力で報告書
- 高レベル処分シンポジウムを12月に開催
- 海外ニュース

会議報告

65 高経年化対策における国際協力

滝沢真之、村上佳菜

66 原子力水素技術開発専門家会議

ST-NH 2

塩沢周策

67 新たな原子力拡大への動きへの期待

松井一秋、川島正俊

Relay Essay ドナウ川の畔から(6)

68 そんな楽園

—愛犬と暮らす人々 田中雅子



定点“感”測⑬

69 喧嘩(けんか)綱のある風景

山田島 稔

53 新刊紹介『Nuclear Reactor Physics Experiments』

山根義宏

58 新刊紹介『知らないと怖い環境問題』

工藤和彦

70 会報 原子力関係会議案内、主催・共催行事、人事公募、意見受付公告、英文論文誌(Vol.47, No.11)目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

エネルギー基本計画における原子力の位置づけ



資源エネルギー庁長官

細野 哲弘(ほその・てつひろ)

1976年京都大学経済学部卒業後、通商産業省(現：経済産業省)入省。資源エネルギー庁次長、製造産業局長、特許庁長官を経て今年8月から現職。

エネルギー基本計画とは、エネルギー政策基本法に基づく、エネルギー需給に関する基本的な計画であり、少なくとも3年毎に見直しを実施しています。

昨今、資源・エネルギーを取り巻く情勢は、①我が国のエネルギー安定供給に係る内外の制約要因が一層まわりつつある点、②エネルギー需給構造を中長期的に低炭素型に変革する強力な取組が必要となってきた点、③エネルギー・環境分野に経済成長の牽引車としての役割が強く期待されるようになった点等において、大きく変化しています。

このような情勢の変化を踏まえ、6月18日に閣議決定された新しいエネルギー基本計画は、エネルギー・環境分野で経済成長・雇用拡大を実現するという視点を追加したことや、いくつかの大胆な数値目標の設定を行ったこと等に特徴があります。数値目標の一つとして、電源構成に占めるゼロ・エミッション電源(原子力及び再生可能エネルギー由来)比率を2020年までに約50%、さらに2030年までに約70%とすることを掲げており、この目標の実現に最大の役割を果たすことが期待されるのが原子力発電です。原子力は供給安定性と経済性に優れた準国産エネルギーであり、また、発電過程においてCO₂を排出しない低炭素電源であることから、我が国の中長期的な基幹電源と位置づけています。こうした認識の下、今回のエネルギー基本計画においては、安全の確保を大前提に、国民の理解と信頼を得つつ、核燃料サイクルを含めた原子力利用を着実に進めていくとの基本方針に沿って、原子力発電の更なる推進に取り組むこととしています。

ゼロ・エミッション電源目標を実現するため、原子力発電に関する具体的な目標としては、原子力発電所の増設・リプレースについて、2020年までに9基、2030年までに少なくとも14基以上、設備利用率についても、2020年までに約85%、2030年までに世界最高水準の約90%を目指すこととしています。

さらに、核燃料サイクルの早期確立のため、六ヶ所の再処理工場の円滑な竣工・操業開始、計画どおりのプルサーマルの実施、高速増殖炉サイクルの実用化に向けた技術開発等に取り組むとともに、高レベル放射性廃棄物等の処分事業の推進に向けた取組を強化することとしています。

他方、今回のエネルギー基本計画が着目する経済成長という観点からも、原子力は重要な柱です。原子力発電に関心を示す国が世界的に増加する中、2030年までに世界の原子力発電所の設備容量が現在の約2倍に拡大するとの予測もあります。こうした需要を日本に取り込むことができれば、我が国の経済成長の強力な牽引役となることが期待されます。

このため、エネルギー基本計画においては、世界のエネルギー安定供給や地球温暖化対策に加え、日本の経済成長に貢献するための重要な政策として、我が国の原子力産業の国際展開を積極的に進めることとしています。

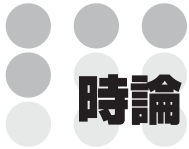
具体的には、例えば新規導入国市場について、UAEでの経験も踏まえ、システム輸出として、建設、運転から法整備まで含めた一体的な対応が必要であると、国際原子力開発(仮称)の設立等による官民一体となった一元的な受注体制を構築することとしています。また、日本貿易保険のリスク補完機能の強化、新規導入国の人材育成、規制体系を含めた制度整備への支援といった新たな課題にも目を向けています。このような取組を通じた原子力産業の国際展開は、我が国の原子力産業の技術・人材など原子力発電基盤を維持・強化するとともに、諸外国との共通基盤を構築するとの観点からも重要です。

さらに、こうした原子力利用の拡大に対応し、世界の原子力の発展や安全確保のため、核不拡散、原子力安全、核セキュリティを確保するための国際的な取組を強化していくこととしています。

また、ウラン燃料に対する需要の増加が見込まれる中、ウラン燃料の安定供給確保のために、ウラン鉱山開発から、濃縮・再転換に至る我が国の供給面全体を強化することが重要です。

低炭素社会の実現や成長の柱として、原子力への期待はこれまでになく高まっています。このような内外における位置づけを踏まえ、「中長期的にブレない」確固たる国家戦略として、原子力を着実に推進し、エネルギー基本計画に掲げた目標の実現を目指してまいります。

(2010年 9月15日 記)



米印合意と日印間の原子力協力



浅田 正彦(あさだ・まさひこ)

国連安全保障理事会 北朝鮮制裁委員会
専門家パネル委員

英国・オックスフォード大学法学部客員研究員，外務省専門調査員(軍縮会議日本政府代表部)，岡山大学教授，京都大学大学院教授(現在，休職中)などを経て，現職。
『21世紀国際法の課題』などの著作あり。

はじめに

2005年7月のいわゆる米印合意(インドが核施設の軍民分離を行い，民生用核施設にIAEAの保障措置を適用することなどと引換えに，アメリカはインドへの原子力協力のために国内法および国際レジームとの調整を行うという合意)は，核不拡散体制に対する重大な挑戦であった。あれから5年が経過し，日本が同じ問題に直面しようとしている。この間の経緯と最近の動きをたどることで若干の問題提起を行いたい。

米印合意の問題点

2006年4月，内閣府の原子力委員会は，前年7月の米印合意について専門家からの意見聴取のため，国際問題懇談会を開催した。招請された専門家は異口同音に米印合意に対して慎重な意見を述べた。筆者は，出席者の中でも最も強く米印合意に反対の主張を行ったように思う。理由は，核不拡散の観点からも核軍縮の観点からも支持できないというものであり，次の諸点を指摘した。

①インドによる核施設の軍民分離は，軍事用核施設を認めることで事実上インドを核兵器国として扱うことになる。②民生用原子炉への外国からの燃料供給で，インド国産ウランの軍事用振向けが可能となり，インドの核製造能力が高まる。③民生用核施設に対する保障措置の適用も，未申告の核活動探知を目的とする追加議定書の適用も，軍事用核施設存在を認めた上で行われるので，核不拡散上ほとんど意味がない。④核実験モラトリアムは新たな措置ではないし，包括的核実験禁止条約(CTBT)には署名すらしていない。⑤兵器用核分裂性物質生産禁止条約(FMCT)のための協力は，生産モラトリアムの宣言すら拒否していることから疑問。⑥核不拡散条約(NPT)締約国は核の放棄と引換えに原子力協力の権利を獲得したのであり，核を放棄していない国に原子力協力の利益を与えることはNPT体制に悪影響を与える。⑦包括的保障措置協定すら締結していないインドと完全な原子力協力を行うことは追加議定書の普遍化にとってマイナス。⑧機微技術を放棄しないインドに燃料供給保証を与えることは，燃料供給保証によって機微技術を放棄させようとする取組みにとってマイナス。⑨中

国がパキスタンに同様の原子力協力を行うことになって，もこれに反対できない。

以上，少なくとも核不拡散・核軍縮の観点からは，米印合意にはほとんど正当化事由を見つけないことができる，というのが筆者の結論であった。

その後，アメリカは2006年12月に原子力法を改正して(ヘンリー・ハイド法)包括的保障措置要件をインドについて適用除外し，2008年9月には，核関連の輸出管理グループであるNSG^{a)}が同様の決定(包括的保障措置要件とNPT要件をインドとの関係で適用しない)をコンセンサスで行った。これを受けて米印原子力協力協定が米国議会で承認され，同協定は同年12月に発効した。NSGでの例外扱いを受けて，アメリカ以外にもこれまでにフランス，ロシア，イギリス，カナダを含む諸国がインドとの原子力協力協定(宣言)に署名している。1974年のインドによる核実験はカナダが提供したCIRUS研究炉から抽出されたプルトニウムを利用して行われたため，民生利用を定めた協定に違反したとして，カナダはその後インドとの協力を完全に終了した。同様にCIRUS研究炉に重水を提供していたため民生利用を定めた契約違反の疑いがあるとしていたアメリカ以上に厳しい対応をとった国であることから，カナダによる協定署名はとりわけ注目される。そして2010年6月下旬には，NSGにおけるインド例外化に最後まで慎重姿勢をとっていた日本もインドとの原子力協力協定交渉に入った。NSGでインドの例外扱いが承認され，多くの国がインドとの間に原子力協定を締結すれば，日本も既定の路線としてインドとの間の原子力協力へと向かうことになるのか。

中国とパキスタンの原子力協力

2010年6月のNSGでは，正式な議題にはならなかったが，中国によるパキスタンへの2基の原子炉提供の問題が若干議論されたようである。パキスタンもインドと同様，NPTの非締約国で包括的保障措置協定を締結していないので，NSGのガイドラインによれば，NSGのメンバーである中国によるパキスタンへの原子力専用品^{a)}Nuclear Suppliers Group(原子力供給国グループ)。1974年のインドの核実験を契機に1975年に結成された国家グループ。

の輸出は認められない。中国は、いわゆる「祖父条項^{b)}」に依拠して、2004年の同国のNSG加盟時にすでに契約されていたものであるとして正当化しようとしているようであるが、加盟時に今回の原子炉提供が合意されていたということはないようである。したがって、中国としては、アメリカがインドについて行ったように、新たにNSGにおいて例外化を求めるか、NSGのガイドラインを事実上無視するかはわからない。しかし、前者の場合、インドに続いてパキスタンまで例外扱いするということになれば、NSGが包括的保障措置要件を課していることの意味の大半が失われることになるし、後者の場合には、NSGガイドラインの規範性が大いに傷つくことになり、いずれにしてもNSGの形骸化が助長されることになる。

しかし、そもそもの問題は、インドの例外化を求めたアメリカとそれを認めたNSGにある。インドとパキスタンには、少なくとも核不拡散・核軍縮の観点からみる限り、AQカーンの存在に象徴される輸出管理の杜撰さを除けば、NPT非締約国であること、核実験を実施したこと、CTBTに署名していないこと、核分裂性物質の生産モラトリアムを宣言していないことなど、多くの共通点がある。インドの例外化を見て、パキスタンが「自国も」と思ったとしても不思議ではない。実際パキスタンは、2006年3月にアメリカに対して同様の扱いを求めて断られている。パキスタンが年来の友好国である中国にアプローチするのは誰が見ても明らかだったはずである。

パキスタンは、インドとの平等扱いを求めると同時に、インド例外化そのものにも反対した。インドの民生用核施設への燃料供給によって、インドの国産ウランが兵器用に回されることになるので、パキスタンも対抗上、核分裂性物質の生産を拡大する必要に迫られると主張した。そして実際パキスタンは、プルトニウム生産能力を拡大しているといわれる。パキスタンが軍縮会議におけるFMCT交渉に最も強く反対している国であることは、以上の経緯からすればむしろ当然かもしれない。

インドと同等の扱いに期待をもったのはパキスタンだけではなからう。インド・パキスタンと共にNPT非締約国であるイスラエルも同様な期待をもったであろう。実際同国は、原子力の本格導入について公に語り始めており、インド例外化がNSGで議論されていた2007年3月には、インドとイスラエルを含むこととなる一般的なクライテリア・ベースの例外化についての提案まで行っている。このように、米印合意とそれに伴うNSGにおける例外化の措置は、インドに留まらない大きな影響を及ぼしているのである。

2010年 NPT 再検討会議

米印合意に伴う不拡散措置の規範性の低下は、NPT

^{b)}規則制定前の既得権益につき、例外扱いを認める条項。

との関係でも生じている。2010年5月に開かれたNPT再検討会議では、非同盟諸国による米印合意批判を受けて、議長より、「現在のまたは新たな[原子力]供給取決め」は包括的保障措置と核放棄の約束の受諾を要件とする、との最終文書案が示されたが、これにアメリカが強く反発し、「現在のまたは」という文言を削除しない限り、最終文書全体の採択をブロックするとまで主張した。「現在の供給取決め」ということになれば、米印合意を廃棄しなければならないというのである。しかし、新たな原子力供給取決めには包括的保障措置と核放棄の受諾を条件とするというルールは、NPT延長会議(1995年)の際に約束したものである。米印合意がそれに違反したという事実はどうなるのであろうか。いったん既成事実を作りさえすれば、違反の事実は過去のものとなり無視してよいというのであれば、同じ再検討会議でアメリカが繰り返した「脱退国も脱退前の違反には責任を負う」という主張と矛盾することにならないか。この矛盾を解決する唯一の方法は、NPT延長会議での包括的保障措置要件にかかる約束は政治的約束に過ぎず、米印合意は法的な義務の違反ではないと主張することであろう(その主張自体は正しい)。しかし、そのような論理は、NPT関連会合における合意の規範性を大きく損なうことになる。

同様に危うい論理は、パキスタンと原子力協力を行う中国にも、そしてインドと原子力協力を行おうとしている日本にも求められるかも知れない。なぜなら、2010年NPT再検討会議の最終文書は、上記の米国の主張を容れて、「新たな[原子力]供給取決め」には包括的保障措置の受諾を要件とする、とされたからである(ただし厳密に言えば最終文書のこの部分はコンセンサス採択されていない)。すでに取決めを行った国はよく、今後は認めないというアメリカの態度は、NPTにおける核兵器の保有とも通ずる先発国の論理であり毅然としないが、不拡散の観点から日本がいかに行動すべきかは別問題である。

おわりに

「原子力カルネッサンス」が語られる中、日本が原子力の国際展開に積極的に向かうこと自体に問題はないし、日本の技術水準に照らせばそうあるべきであろう。とりわけ原子力の新規導入国との関係で、日本が核不拡散や核セキュリティ、原子力安全の面においてリーダーシップをとることができるのであれば、これに優ることはない。日本の原子力産業が世界に向けて発展していくことは重要である。しかし、同時に日本には、経済や二国間関係の優先で不拡散問題を二次的に考えるという昨今の国際的な趨勢にストップをかけるべくリーダーシップを発揮するという重要な任務もあるのではなからうか。インドとの協力関係も、そのような視点からの検討が望まれる。

(2010年 7月25日 記)



日本の自治体、求められる科学・技術の戦略機能



高松 平藏(たかまつ・へいそう)

ドイツ在住ジャーナリスト
京都経済新聞社などを経て、2002年からドイツ・エアランゲン市に。著書に『エコライフ ドイツと日本どう違う』(妻・アンドレアとの共著)、『ドイツの地方都市はなぜ元気なのか』がある。1969年生まれ。

地方分権の議論が日本ではかまびすしいが、筆者が住むドイツから見た時に、物足りなく感じることもある。

ドイツはご承知のように連邦制の国であり、歴史的にも地方分権の国だ。基本的に自治体は自らダイナミックに大小のイノベーションをおこしていかなければ、生きながらえないということになる。こういう前提にたつドイツ自治体を見てみると、日本の自治体には戦略性と一体感をもっと必要なのではないかと思えるのだ。

これは地方における科学や技術といった分野でも同様だ。例えば筆者が拠点にしているエアランゲン市という町がある。バイエルン州の北部に位置する人口10万人の都市だが、同市は10年余り前から医療都市政策を展開してきた。市内には医療技術に特化したベンチャー・インキュベーターがあり、数年前からは近隣の都市と連携し、「メディカル・バレー」なるクラスターを生成。今年の1月には連邦教育研究省によるクラスター・コンテストでトップ5のうちのひとつに選ばれた。

医療都市政策の発端は1990年代半ばまで遡る。東西ドイツ統一後、しばらく好景気にわくが、エアランゲンも例外ではなかった。しかしやがて、景気は後退。同市の経済も落ち込んだ。そこで当時の同市の経済の責任者、シーグフリート・バライス博士が辣腕をふるった。ドイツには社員の代表でつくられる経済組織があるが、その組織と一緒に3年間かけて、同市の経済的強みを調査。そこで見えたのが医療分野だった。

そもそも同市は大学町で大学病院もある。さらに戦後、グローバル企業のシーメンスが同市を拠点のひとつにし、医療分野の開発部署をおいた。また80年代には同市が位置するバイエルン州のパイロットプロジェクトとしてハイテク関係のビジネス・インキュベーターも作られていた。しかも、同市は人口10万人。面積も約77平方キロメートルと「それほど広くない町」であるため、物理的に「産官学」の人材の交流が活発に行われる素地はあった。

鳥瞰スキャン

医療都市をみると、ドイツらしさが見出せる。まずは調査で町全体を把握し、技術や経済のポテンシャルを見

出した点だ。「調査した」と一言でいってしまえば、「なるほど」と肯くだけでおわりそうになるが、ドイツでは町全体を鳥瞰的にスキャンするかのような態度が何かにつけしばしば見られる。その背景を見るにはドイツの都市の歴史に触れねばならないだろう。

ドイツの都市の原風景は中世に発達した城塞都市だ。壁でぐるりと囲まれた都市は、いわば人工空間といえるわけだが、人々はこの限られた空間で生活しなければならない。当然、この人工空間を管理する必要が生じる。そのためどうしても町全体を常に把握し、分類・位置づけするようなことが必要だったのではないかと思える。

そういった態度と整合性を見出せるのが、文書主義だろう。中世以来、各都市は町についての膨大な文書を残している。そのため、ドイツのどの町にも歴史アーカイブが必ずある。人間の行動様式は案外500年ぐらい前のものを引きずっていることが多いが、こういう歴史的性癖とでもいえるものは今も会社や個人に引き継がれている。個人を見ると、小学校の通知簿からきっちりファイリングしており、このファイルがなければ、自分の存在が消えるといわんばかりだ。戦時中のユダヤ人迫害の状況についての資料があればほど残っているのも、当時、各「職場」でドイツ人が「まじめに」文書づくりをした結果と考えるとわかりやすい。

科学の夜長

鳥瞰的に町をスキャンし、分類・位置づけた上に、なんらかの形にするという性癖は「科学の夜長」という地域イベントでも発揮される。

「科学の夜長」とは、エアランゲン市と隣接するフルト市(人口11万人)、ニュルンベルク市(人口50万人)の3都市を舞台に、2年ごとに行われているイベント。企画・運営しているのはニュルンベルクにある文化事業専門の企業だが、市や州が大きく関わる半ば公的な事業である。その内容をひとことでいえば、ある土曜日の夜に3都市内の大学、企業、研究機関、病院といった組織や施設が門戸を開き、誰もが自由に見て回れるというものだ。門戸を開く側も、ただドアを開けるだけではない。

例えば研究機関であれば、こういった研究をしているのかを分かりやすく説明できるようにしつらえる。子供向けにはロゴのはいった風船などを手渡すようなこともする。いわば、3つの町全体がメッセ会場で、各機関や施設はそのままブースになっているかたちだ。2003年に初めて行われたが、毎回120~150の機関や組織が参加し、「各ブース」をまわる巡回バスも運行される。この取組みはいうなれば、どこに、どんな科学資源が地元にあるのかを顕在化させる仕掛けになっており、この時に作られるパンフレットは地元の科学資源を分類したカタログにすら見えてくる。

ある地域のポテンシャルを把握し、分類・分析の上、その地域の研究開発機能を市場につなげていくという方法が「クラスター政策」といえるが、実はドイツの町に対する姿勢をみるとクラスターというのは、親和性の高い手法だといえる。エアランゲン周辺がメディカル・バレーとして存在感のあるクラスターになっていることはすでに述べたが、他方、商工会議所や企業が協力し、やはりエアランゲン周辺の技術力を調査したことがある。その結果、ドイツ全国のオートメーションにまつわる企業の10%が同地方に集中していることが判明。「オートメーション・バレー」という切り口からもう一つのクラスターを生成する動きもある。

戦略部門がある

地域の科学や技術を鳥瞰的に把握・分析するという方法論のほかに、自治体運営で大切なのが戦略部門がきちんと機能しているかという点である。

まずはエアランゲンの医療都市の基礎をつくったバライス博士のポストを見てみよう。同氏は経済部署の責任者である。日本の自治体でいえば局長などのポストにあたるだろうか。だが日本の「局長」はあくまでも行政マンだ。それに対してドイツの場合、「経済大臣」というような位置づけにあり、政治的な立場をもつ。

政治と行政の違いを単純化すれば、政治とは国や自治体を運営していくときの戦略立案が仕事であり、行政とは、いわば戦術部門である。このような理解から、再び日独の様子を見てみると、ドイツの自治体には政治的立場の経済大臣、つまり経済の戦略家がいることになる。それに対して日本の自治体の経済部署には戦術家しかいないことになる。しかも戦術部門を担う行政マンに着目すると、もともと教育と職業の関連性の高いドイツには、原則的に行政にも専門の教育を受けた専門家が揃う。加えて日本のように人事異動がない。換言すれば、日本の自治体は戦術部門すら実は構造的に脆弱であるといえる。ただ、中央集権の日本ではカネも中央からおりてきたが、「戦略」である政策も一緒におりてきた。仕組みとしては自治体には戦術部門だけあればよかったとい

えるだろう。

ところで、「経済大臣」であったバライス博士は実は現市長である。1996年の市長選に立候補し、見事に当選。「経済大臣」から「首相」になったようなもので、医療都市というコンセプトは「経済大臣」時代の調査をもとにうちたてた政策だった。しかも、これまで2度ばかり、同市の年間キャンペーンを行っている。文化政策的な手法で、大学、企業、NPOのほかに地元メディアの協力のもと、「医療都市」としての町のアイデンティティを構築してきている。

広域政策と科学・技術

近年、欧州は拡大傾向にあるが、これに伴いドイツの自治体は自らの存在感を高めなければ生き残れないという危機感を持っている。国を越えて欧州をにらんでいるのだ。そのひとつの解決方法が広域連携である。たとえば「欧州ニュルンベルク・メトロポリタン地域」はニュルンベルク周辺の30余りの自治体の連携政策で、人口規模は350万人相当になる。エアランゲン市もこの中に含まれている。このやり方はEUと同様、各自治体は独立しつつ、連合を組む政治的手法である。そして存在感を高めるために、代表がブリュッセルへ向かうこともある。また常に文化や経済の様々な取組みを行っている。

そんな活動のひとつに「科学デー」がある。毎年1回、同地域内のある町で行われるセミナーと交流会だ。形式的には誰でも参加できるものだが、実質は招待制の交流会で、地元の企業、研究機関、大学から人が集う。2007年から毎年行われているが、これによって、科学という側面から広域地域のアイデンティティを確立しようというわけだ。

さて、ここにきて筆者は最近、一時帰国し、全国の公立鉱工業試験研究機関の取組みを聞く機会に恵まれた。いずれも地元の科学や技術力をうまく引き出していくための方策であり、刺激的であった。ただ取組みの奥に戦略としての自治体の政策が私には見えてこなかった。同時に、合言葉のように公立試験機関はどういう役割に徹すべきかという課題が提示されることが多かった。これは、各地で科学や技術にまつわる戦略としての確固たる政策がもともとないために生じる課題ではないかと思えてならなかった。

地方分権はいうまでもなく、自治体が自ら戦略を立て、愛国心ならぬ愛郷心ともいえる観念の部分を含む町の形を明確に造形していかねば成り立たない仕組みだ。それを鑑みると、地方分権の議論の中には、自治体が科学や技術の分野でも戦略、つまり科学や技術を政治的に組み立てていくような構造がある。

(2010年 8月5日記)



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

菅改造内閣が発足

菅改造内閣が9月17日に発足し、経済産業大臣には大畠章宏氏、文部科学大臣には高木義明氏が就任した。また科学技術政策を所掌する内閣府科学技術担当大臣には海江田万里氏、原子力安全委員会を所掌する内閣府防災担当大臣には松本龍氏が就任した。松本氏は環境大臣との兼務となる。なお大畠大

臣は就任後の記者会見で、菅総理から原発などのインフラ・システム輸出を進めることと、原子力安全・保安院のあり方を含めて体制整備を検討することの指示をうけたと報告。安全を確保するためにはどのような体制が望ましいかを検討した上で、見直す必要があると指摘した。

福島第一発電所3号機、プルサーマルを開始

東京電力は9月23日、福島第一原子力発電所3号機でプルサーマル発電を始めた。同社にとって初のプルサーマル発電で、国内では九州電力の玄海原発3号機、四国電力の伊方原発3号機に続く3基目となる。今後は出力を定格出力まで上昇させて調整運

転を続けたのち、10月下旬に経済産業省の総合負荷性能検査を受け、本格的な運転に入る予定。なお佐藤雄平・福島県知事は8月6日、同機のプルサーマル実施を受け入れる考えを表明していた。

民主連立初の本格予算—経産省は原子力10%増、文科省は前年度並み

政権交代後、民主党・国民新党による連立政権初の本格的な予算編成となる11年度概算要求が8月31日までに、各府省より出そろった。今回の概算要求に当たっては、今年6月に打ち出した「新成長戦略」の着実な実行をめざし設定された「元氣な日本復活特別枠」に、各府省が経済成長、雇用拡大、人材育成などに通じる施策を精査し、要望額として計上している。原子力関連では、経済産業省が1,924億円(対10年度比9.7%増)、文部科学省が2,197億円(同0.1%増)を要求した。

経産省は、総額で1兆4,586億円(同2.4%増)、うち一般会計が4,119億円(同0.2%増)、エネルギー対策特別会計が7,579億円(同8.5%増)を計上した。概算要求額確定に先立ち行われた産業構造審議会総会(会長=米倉弘昌・日本経済団体連合会会長)の冒頭、直嶋正行大臣は、わが国経済・産業を取り巻く課題として、(1)特定の産業への過度の依存、(2)日本

企業の「ビジネスモデル」転換の遅れ、(3)わが国の「事業拠点としての魅力」喪失——を、指摘した上で、「新成長戦略」、「産業構造ビジョン2010」の実現に向けた施策を強力に推進すべく、11年度重点政策「新成長戦略アクション100」を同審議会に諮り、了承を受けた。

その中で、資源・エネルギー関連では、今年6月に策定された「エネルギー基本計画」の実現に不可欠な政策群を着実に実施すべく、エネルギー特会の要求額は、本年度より642億円の増額、原子力についても、「エネルギーの安定供給と低炭素社会の実現に不可欠」との位置付けから、安全の確保と国民の理解・信頼を前提に、積極的推進を図るよう、同170億円増額している。具体的には、電源立地地域対策交付金が、発電量に応じた傾斜配分など、さらなる制度改善を目指し、同7.3%増額となる1,177億円を要求しているほか、発電用新型炉等技術開発で73億

円(同32.0%増)、次世代軽水炉等技術開発で21億円(同8.2%増)新型ガラス溶融炉開発で24億円(同36.1%増)など、核燃料サイクル早期確立に向けた取組み強化を図る。

また、原子力安全・保安院では、今年度より微減となる総額321億円を要求、うち原子力安全関係は287億円となっている。

文科省は、一般会計で5兆8,348億円(同4.3%増)、エネルギー特会で1,418億円(同0.5%増)を要求した。

原子力分野は、高速増殖炉サイクル技術で408億

円(同3.1%減)、ITER計画推進で117億円(同18.5%増)を計上しているが、「特別枠」として、「高度な3S『人材・技術』を活かした日本発原子力の国際展開」で154億円、「日本発の重粒子線がん治療技術の高度化・海外展開」で22億円をそれぞれ要望しており、わが国の強み・特色を活かした施策パッケージを通じ、原子力導入国への核不拡散・核セキュリティの強化支援、医療分野での「安心」技術の発信などにより、「人材・技術」の世界展開を図る。

(資料提供：日本原子力産業協会)

立地対策交付金，保育・介護人件費も対象に用途拡大へ

資源エネルギー庁は8月31日、電源立地地域対策交付金の用途について、これまで認められなかった当該自治体の保育・介護事業に携わる職員の人件費も含め充当できるよう、10月の運用開始を目指し、制度改正に着手することとした。

昨年の政府事業仕分けにおいて、本交付金に関する自治体の裁量を拡大すべきとの指摘を受け、同庁

では、立地地域での意見交換会での要望等を踏まえ、既に年度当初より、用途拡大が進められている。

今回の制度改正により、立地地域で、直接保育・介護に従事する職員以外の保育園園長や病院の経理職員、これら事業の企画・管理に係わる自治体職員の人件費のほか、当該部門の庁舎の建設・改修費などにも充当できることとなる。

(同)

リサイクル燃料施設が着工

リサイクル燃料貯蔵会社は8月31日、使用済み燃料中間貯蔵施設(青森・むつ市=完成予想図)の工事を開始した。27日に、原子力安全・保安院より、設計および工事の方法について認可を受け、着工となったもの。事業開始は、12年7月の予定。

使用済み燃料中間貯蔵施設「リサイクル燃料備蓄センター」は、東京電力と日本原子力発電会社の原子力発電に伴う使用済み燃料を、再処理までの間、貯蔵するもので、当初は3,000トン規模の建屋1棟

を建設し、最終的に5,000トン規模の貯蔵量に拡大する。

また、保安院は、両電力より申請された貯蔵容器の輸送容器としての設計についても合わせて承認した。中間貯蔵施設に搬出する貯蔵容器は、輸送容器としての機能も併せ持つよう、専門家会合の検討を踏まえ、健全性評価に関する技術基準が定められている。

(同)

経産省，ウラン施設のクリアランス整備へ

経済産業省の総合資源エネルギー調査会・廃棄物安全小委員会(委員長=石樽顕吉・日本アイソトープ協会常務理事)は8月30日、ウラン取扱施設のクリアランス制度の整備に関する考え方を取りまとめた。同省では、所要の省令整備に向け、10月6日まで、パブリックコメントを実施している。核燃料加工施設の設備機器の解体撤去に伴い発生する金属系

廃棄物の再生利用・処分に向け、原子炉施設同様、放射能濃度の基準値を定めるとともに、国が、測定・評価の方法と、これに基づく評価結果の2段階で確認を行う検認制度を示したものの。

既に運転を終了した日本原子力研究開発機構のウラン濃縮原型プラントでは、遠心分離機の解体撤去に伴い、2043年度までに累計で約6,500トン、日本

原燃六ヶ所ウラン濃縮工場では、新型遠心機導入に伴い、49年度までに約6万3,000トンの金属廃棄物の発生がそれぞれ見込まれている。さらに、燃料加工メーカーでも、08年度末現在で、廃棄物約4万本(200リットルドラム缶)が蓄積されており、クリアランス開始が喫緊の課題だ。

これら状況を踏まえ、同小委員会は、専門家ワーキンググループを設置し、今年1月より技術的検討

を行ってきた。今回、取りまとめられたクリアランス制度整備に関する報告書案では、加工施設から発生する金属を検認対象とし、ウラン5核種を評価対象核種として検討を行い、クリアランス判断基準となる放射能濃度値を示している。

WG報告書では、クリアランス物の再生利用実績を積み、一般市場へ拡大していくことが重要としている。(同)

日本原燃、再処理工場のしゅん工時期を2012年10月に変更

日本原燃は9月10日、青森県六ヶ所村の再処理工場のしゅん工時期を、これまでの「2010年10月」から「2012年10月」に変更する旨を発表した。今回の工程見直しでは、アクティブ試験(実際の使用済燃料を用いた試験)については、安全を最優先にして慎重に進めるとともに、試験を確実に成功させるために下記の方策に取り組むこととした。

- (1) ガラス溶融炉の温度管理を確実なものとするため、温度計の追加設置工事などの必要な設備改善を行う。
- (2) ガラス固化試験は、東海村にある実規模試験施設(KMOC)と実機の比較検証(事前確認試験)を実施し、段階的にデータを確認しながら慎重に進める。

(3) これまでの現場経験を踏まえた確実に実行できる作業計画と、裕度を持たせた全体工程を策定する。

(4) 安定運転に万全を期すため、固化セル内の機器点検を継続して実施する。

また合わせて、財務体質の強化を図り、安定した経営基盤を構築するために、第三者割当の募集株式発行による4,000億円の増資を実施することも公表した。増資が実施された場合の手取金については、再処理事業における工場しゅん工後の製品貯蔵庫や廃棄物対策関連設備をはじめ、MOX燃料製造事業、ウラン濃縮事業、廃棄物貯蔵管理事業等において今後発生する設備投資に順次充当する予定である。

(資料提供：日本原燃)

東大原子力グローバルCOE, 3分野で国際サマースクールを開催

東京大学グローバルCOE「世界を先導する原子力教育研究」プログラムでは、2010年度の国際サマースクールを3分野で開催した。いずれもUCパークレー校との共催で、シリーズとして3回目となり、活発な取組みが行われた。

6月16日から19日にかけては、UCパークレーとローレンスパークレー国立研究所にて、UCパークレーと東京大学の共催による中小型炉国際サマースクールと、パークレー原子力研究センター(BNRC)主催(東京大学協賛)の中小型炉に関するアジア・パシフィックフォーラムが一連のプログラムとして開催された。全体で約90名の参加があり、東大からは教員・研究員4名と学生3名が参加し、フォーラムの講演やサマースクールの講義を行ったほか、プログラムの中で行われたポスターコンペにて、学生1

名が2位を獲得した。

放射線計測の国際サマースクールは、7月26日から30日まで、やはりUCパークレーで開催された。今回の特徴は、プログラムに実験を組み込んだことで、固体検出器によるガンマ線計測をテーマに50名以上の参加があり、東大からは教員4名、PD1名、学生8名の13名が参加した。午前中に講義、午後の実験を行い、実験データを各自が解析してレポートを提出した。最終日に優秀者7人が表彰され、東大からも2名が表彰された。次回の開催はドイツの予定である。

廃棄物・社会論のサマースクールは、「原子力工学と社会科学リテラシー」をテーマとして7月25日から8月2日まで、ハワイ東海大学を会場として開かれた。このサマースクールは原子力技術を学ぶ大



廃棄物社会論サマースクールの様子
(ハワイ東海大学にて)

学院生が、社会科学をベースとした広義の「社会リテラシー」を身につけることを狙ったものであり、

世界的に見ても非常に斬新な試みである。内容は、工学に加え、社会学、国際関係論、社会心理学、歴史学、政治学など多方面にわたり、また、教育のスタイルも、グループディスカッションを交えた双方向の講義と、そこで得られた知識を現実の世界で活用するためのケース・メソッドを組み合わせた、比較的新しい方法をとった。参加者は、日米の教員、スタッフ、学生に加え、欧州やアジアからも講師や受講者を迎え、40名以上の参加者が、連日、活発な議論を繰り広げた。(資料提供：東京大学)

石油製品中の硫黄濃度を短時間で高精度に測定可能に —田中科学が原子力機構の最先端の放射線計測技術を活用して開発

石油製品の品質管理用の計測機器類を製作・販売している田中科学機器製作(株)は、保有する最先端の研究成果を活用しアウトカム創出を望む日本原子力研究開発機構と協力し、同社の従来製品に比べて製造コストをアップさせることなく、検出限界を3倍向上させたエネルギー分散型蛍光X線硫黄分析装置の開発に成功した。この開発研究では、原子力機構がもつ放射線輸送評価技術とエレクトロニクス技術が活用され、測定信号の輸送効率を向上させることと同時に、測定信号に含まれるノイズも抑制させることによって大幅な性能向上が実現した。

近年、大気汚染をはじめとする地球環境の悪化を抑制するために、日本や欧米を先頭として世界中で石油製品中の硫黄含有量の低減化が図られてきており、分析装置メーカーは、硫黄含有量の規制への適否を判断する品質管理現場から、分析装置の測定精度の向上を強く求められていた。

田中科学は1950年代から国内外の品質管理現場向け計測機器類を製造販売してきたが、このような10

ppmレベルへの法規制の強化を踏まえて、エネルギー分散型蛍光X線硫黄分析装置の改良開発による測定精度向上に着手した。原子力機構は田中科学からの要請に応じ、シミュレーションを用いた放射線輸送評価技術と微弱な蛍光X線信号を検出するエレクトロニクス技術で連携した研究開発を実施した。この結果、試料照射用X線発生部から蛍光X線検出部に至るまでの放射線輸送を最適化し、微弱な蛍光X線信号を増幅して正確かつ高速でカウントするエレクトロニクス部を新たに開発することに成功した。これらの高精度化改良開発によって、従来製品より短い測定時間でより低い硫黄含有量の測定を実現できた。

なお、田中科学では年内に、全世界向けに開発した製品の販売を開始する予定である。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press2010/p10083001/index.html>)

(資料提供：田中科学機器製作(株)、
日本原子力研究開発機構)

JMTR 第166運転サイクルの取扱いについて

日本原子力研究開発機構は、来年10月頃からの本格的照射利用の開始を計画しており、この前に改修後のJMTRに対して、炉出力上昇時、定格出力運転時、炉出力下降時等における各種特性を確認するとともに、新たに設置した照射設備の性能試験等を

行うため、来年6月頃に各種機能確認運転を行う(第166運転サイクル)。

その第166運転サイクルでは、照射試験中に出力変更、複数回の原子炉停止および起動等を実施することから、変則的な運転となる。この運転サイクル

における利用の要望がある場合の問合せ先は、下記の通り。

連絡先：日本原子力研究開発機構 大洗研究開発

センター 照射試験炉センター
計画調整課 長尾(029-266-7007)

(同)

民間有志の円卓会議、原子力行政の見直しを提言

「原子力政策大綱」について、民間の有志からなるグループ「原子力政策円卓会議2010」は9月16日、国の原子力利用の基本方針を定めた「原子力政策大綱」について、行政組織の抜本的見直しや人材養成策の拡充などを求める提言書を発表した。円卓会議は、政治家、官僚、研究者、NPOメンバー、弁護士、会社経営者など約30名からなり、メンバー構成は原

子力事業の拡大に対する大枠的な賛成、反対、保留のいずれの立場の者もが突出しないようにバランスをとるよう配慮されているという。

提言では商業原子力発電政策について、「原子力発電の段階的縮小」を含む複数の政策選択肢を対象とした政策総合評価を行うことや、行政組織の抜本的な見直しを行うことを求めている。

原産協会、インドと原子力平和利用協力で報告書

インドは旺盛な電力需要の伸びに対応するため、大規模な電源開発を進めており、中でも原子力発電については、自主開発路線に加え、最新型の軽水炉を海外から導入すべく、諸外国との原子力協力を積極的に進めている状況にある。我が国政府もインドとの協力協定締結に向け交渉中であるが、原産協会は9月17日、原子力分野における日印協力の重要性

に鑑み、我が国の原子力産業界の立場からの見解「我が国とインドとの原子力平和利用協力に向けて」を取りまとめた。

(http://www.jaif.or.jp/ja/seisaku/nuclear-cooperation-india_rev14.pdf)

(資料提供：日本原子力産業界協会)

第3回高レベル廃棄物処分シンポジウムを12月に開催

原産協会はこれまで、“他施設から学ぶ”をテーマに、原子力施設ではないが立地が難しい他施設の立地成功例から何が学べるかを探るシンポジウム等を開催してきているが、12月17日に第3回目となるシンポジウムを、同廃棄物処分問題の政治の役割をテーマとして、東京・江東区の日本科学未来館「みらいCANホール」で開催する。

高レベル廃棄物処分は国として非常に重要な問題

であるが、特定地域にある程度の負担をお願いするという性格を持つことから、基地問題と同様、立地に当たっては政治の役割が大きいと考えられる。シンポジウムでは、基調講演に前岩手県知事の増田寛也氏を迎え、鳥井弘之・元日経新聞論説委員を議長に、地方行政に知見のある方々をパネリストとして招き、高レベル廃棄物処分を地域に受け入れていただくための国の役割について議論する。(同)

動画配信のご案内

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

2010年7～9月の番組は以下の通り。

・人材育成と原子力の新たな可能性の追求—京成大

学原子炉実験所の取り組み(8/16公開)

・地層処分の技術基盤整備に向けて—東濃地科学センターの取り組み(9/15公開)

・原産協会が行う社会に対する理解促進活動について(10/15公開)

(同)

海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[米国]

USEC の遠心分離工場建設、 融資保証で改訂申請書提出

米国濃縮会社(USEC)は8月3日、建設中の米国遠心分離プラント(ACP)について、再び政府の融資保証プログラムに適用を申請したと発表した。昨年夏に、米エネルギー省(DOE)から最初の申請の取り下げを要請されて以来、指摘されていたいくつかの問題点解決に取り組み、全面的に改訂した申請書を提出した。ACP 計画への総投資額は今年6月末で18億ドルに達しており、USEC としては、何としても政府の融資保証を獲得したい考えた。

USEC は2007年にオハイオ州ピクトンで年間生産量3,800トン SWU の ACP 建設に着手した。08年には、融資保証プログラムの燃料サイクル・フロントエンド枠に割り当てられた20億ドルの保証を申請したが、DOE は「技術的、財政的な点で商業規模への移行準備ができていない」として同申請の取り下げを要請。採用技術のさらなる研究開発と実証のため、申請の審査を少なくとも6か月間延期することで双方は合意していた。

今回の申請書で USEC は以下の活動実績を列記。すなわち、(1)DOE の指摘した技術的、財政的課題に取り組んだ、(2)ACP カスケード用の遠心機(AC100)の数を倍増することとし、今年中に設置する、(3)リード・カスケードの試験プログラムで延べ48万遠心機・時間以上の稼働実績を達成、(4)融資保証を付されて以降、ACP 完成までに要する建設費を28億ドルと試算——などだ。

このように技術面では、徹底的な品質保証プログラムの審査を終え、多段階カスケードを構成する遠心機の組み立てと試験運転で実質的な経験を積んだことを強調。財政面の改善点としては、プロジェクト・リスクを軽減する一手段として、今年5月に東芝およびバブコック&ウィルコックス社から3段階・総額2億ドルの出資契約を取り付けたことを明記している。

08年のフロント・エンド用融資保証枠は今年5月、仏アレバ社がアイダホ州で進めている遠心分離

濃縮工場計画への提供がすでに決まった。しかしこの時 DOE は、07会計年度に規定した融資保証金の中から追加で20億ドルをウラン濃縮施設建設に提供できると明言。USEC が支援を受ける可能性は残っていると見られている。

NRC, 原発のセキュリティ査察で 報告

米原子力規制委員会(NRC)はこのほど、原子力関連施設のセキュリティ査察に関する2009年(暦年)年次報告書の公開版を公表し、米国内の商業用原子力発電所ではセキュリティ上、深刻な問題がなかったことを明らかにした。

同報告書はエネルギー政策法に基づいて議会提出用にまとめられているもので、09年版は5回目の作成。原子力施設における模擬戦闘訓練(FOF)を含めた査察プログラムと成果の概要を記載している。

それによると、NRC は昨年1~12月末までに国内の商業用原子力発電所で合計179回のセキュリティ査察を実施。これらの結果分析により180件の知見が得られたが、このうち168件(全体の94%)についてはセキュリティ上の深刻さは非常に低かった。また、12件については低~中程度の深刻さだったとしている。

全査察のうち23回は、国内22の原子力発電所で行われた FOF 査察。NRC の模擬敵対部隊が原子炉炉心や使用済み燃料プールなど、発電所の安全上重要な機器設備をターゲットに設定し、これらへの到達と破壊をシミュレートするプログラムで、応戦する事業者部隊との間で実践さながらの模擬戦闘が繰り上げられる。

事業者側には事前に査察の実施が通達されるが、これは発電所の実際のセキュリティ維持を担当する職員と模擬戦闘に参加する職員の配置調整に十分な時間を与えるため。攻撃シナリオは事業者側の防衛戦略に内在する欠陥が探り出せるよう組み立てられており、ターゲット機器の模擬破壊等により、事業者側が高いレベルのセキュリティを実証できなかった場合は、NRC チームが発電所を離れる前に適切な補償対策を施すことになっている。

09年実績では、23回中3回のFOF 査察でターゲット機器が模擬破壊されるに至った一方、合計29件の知見が得られたとしている。

[カナダ]

NRU 炉が RI 生産を再開

カナダ原子力公社(AECL)のチョークリバー研究所内にあるNRU 炉は8月17日、約15か月間の修理作業を終えて運転に復帰、同時にモリブデン99を含む医療用放射性同位体(RI)の生産も再開した。

再開後50年以上が経過した同炉は、昨年5月に容器底部から重水漏れが検出された。溶接に特殊な技術を要したため、修理作業は数回にわたり延長。専門の外部アドバイザーから助言を得つつ作業にあたり、今後も信頼性の高い運転が可能になったとしている。

同炉の運転サイクルは5日間の計画停止を含めて28日間。計画停止では通常の保守点検作業を実施する。ただし、運転再開直後は約2日間、停止し、運転再開用に装着した特殊機器の取り外しと復帰後試験を実施。この間もRI 生産は継続することになる。

また、来春には計画停止期間を延長、通常よりも広範囲な保守点検を行う予定である。

[英国]

ホライズン社、英国の候補地でサイト固有調査実施へ

英国で新規原子炉の建設を計画しているホライズン・ニュークリア社は8月2日、ウェールズ地方北部のウィルフア建設候補地で準備調査を行うため、仏アレバ社およびウェスチングハウス(WH)社が率いる企業連合(NPDUK 社)の両方と契約を結んだ。

同建設計画で候補となっている欧州加圧水型炉(EPR)、あるいはAP1000を採用した場合の、サイト固有の発電所設計について調査するのが目的で、年末までの期間に実施する計画だ。ホライズン社はドイツのRWE 社とE.ON 社による合併事業体だが、この作業と並行して原子炉設計に関する競争入札に関しても年末までに結果を出す考え。候補の原子炉設計それぞれについて準備調査を実施しておくことにより、2020年の完成を目指す同計画での認可

手続きが円滑に進むと期待している。

現在、英国では、政府の保健安全執行部(HSE)がEPR とAP1000の2設計について、事前設計認可の一種である包括的設計審査(GDA)を実施中。EPR に関しては計装制御(I&C)系の安全性について、AP1000では遮へい建屋による安全系の防護性能について問題提起するなど、アレバ社とWH 社双方に対して追加の実証文書提出を要求しているが、来年夏までには正式認証前の手続きを完了すると見られている。

今回の契約締結について、アレバ社およびNPDUK 社は一様に歓迎。アレバ社は、ホライズン社がグローセスターシャー地方に用地確保したオールドベリーでもEPR の納入が見込めるとし、ホライズン社の本拠地であるグローセスターにプロジェクト事務所を開所した。WH 社を筆頭にショー・グループ、東芝などで構成されるNPDUK 社は、AP1000がすでに中国でスケジュールどおり順調に建設中である点を強調。建設工期と予算の部分を武器にアピールしていきたいと述べた。

[イラン]

ブシェール原発で燃料を搬入、年内起動へ

ロシアの原子力総合企業であるロスアトム社は8月21日、国際原子力機関(IAEA)の査察官による監視の下で、イランのブシェール原子力発電所建屋内に初装荷燃料を搬入したと発表した。同炉では昨年2月末に、タミー燃料を使った通水試験など起動準備段階に入っていたが、ウラン濃縮施設建設を巡る核兵器開発疑惑などにより、ロシアが2007年に納入した新燃料はIAEA が封印していた。イランはすでに同炉からの使用済み燃料をロシアに返還することを約束。米務省も今月17日、同発電所は平和利用目的であり、濃縮活動とは無関係との考えを表明したことなどから、同炉の起動につながったと見られている。同炉は今後、年末までに発電段階に入る計画だが、イラン側では同炉への十分な燃料供給を将来的に確保していくためにも、国内の濃縮施設開発は継続する方針だ。

同発電所の建設は1974年に独シーメンス社が開始。しかし、80年のイラン革命に続く米国の機器禁

輸措置に合わせ、同社は契約をキャンセルしている。イランは92年にロシア政府と原子力平和利用協定に調印した後、95～98年にかけてロスアトム社傘下のアトムストロイエクスポート(ASE)社と、100万kWの同発電所をターンキーで完成させる契約を締結した。36年に及んだ同プロジェクトの経費は45億ドルに上ったとしている。

163体の燃料集合体の搬入記念式典にはイラン原子力庁(AEOI)のA・サレヒ長官やロスアトム社のS・キリエンコ総裁が出席。プシェール発電所ですべてのシステムの試験段階が完了し、実質的な起動に向けた作業が開始されたことから、原子力平和利用における両国の協力関係も新たな段階に入ったと宣言している。

また、現地の政府系通信によると両国は同日、3種類の了解覚書(MOU)に調印しており、同発電所の安全操業を期するための合併事業体設立などで合意。サレヒ長官は新たに10のウラン濃縮工場建設に適したサイト探しを実施中であると述べ、大統領命令が出され次第、来年3月にはそのうちの1か所で着工する可能性を明らかにした。

[カザフスタン]

ウラン生産量、上半期で前年比42%増

カザフスタンの国営資源企業であるカザトムプロム社は8月9日、今年6月末までの上半期のウラン生産量が前年同期比42%増の8,452トンとなったことを明らかにした。下半期の改訂計画ではさらに9,770トンを生産するとしており、今年の年間生産量は合計1万8,222トンに達する見通した。

同国は昨年実績(速報値で1万3,900トン)で初めて、カナダを抜いて世界第1位となった。ウラン市場調査会社のUXCによると、同国はウラン精鉱(U_3O_8)換算の生産量でも10年前に年間500万ポンド以下だったのが、現在は4,000万ポンドを超えるなど、前例のないペースで事業規模を拡大中。今年は年末までに世界の1/3以上生産することが目標と伝えているが、市場価格への影響も大きいと、拡大路線をどこまで継続していくかは未知数だ。

カザフでは上半期に、新たに次のような施設が稼働を開始した。すなわち、カメコ社との合併事業で

あるインカイJVの産業コンビナートや、ウラニウム・ワン社との合併事業であるカラタウJVの原位置抽出法パイロット生産施設など。このような背景による生産量拡大で、同社の収益は前年同期から58%アップし、1,056億8,700万テンゲ(約615億円)に到達した。純益も前年度から64%増の194億1,400万テンゲ(約113億円)に拡大したとしている。

上半期はまた、ウルバ冶金工場(UMP)で再転換した二酸化ウラン粉末を、日本の原子燃料工業が正式に認証。これは07年に両社が住友商事とともに調印した協力意向確認書に基づくもので、これによりUMPの技術能力が確認された。

今年3月には日本とカザフスタンの政府が原子力協力協定を締結し、発効待ちの段階にあることから、UMPは今後、日本の原発用燃料集合体の実質的な製造に向けてプロジェクトを開始する。

[アルメニア]

新規炉建設計画で露と協力協定に調印

ロシアの原子力総合企業であるロスアトム社は8月20日、アルメニアの新たな原子力発電所建設計画でロシアが協力するため、二国間協定に調印したと発表した。

これはロシアのD・メドベージェフ大統領がアルメニアを公式訪問した際、両国間のその他の協力文書とともに結ばれたもの。署名はロスアトム社のS・キリエンコ総裁とアルメニア・エネルギー・天然資源省のA・モブシッシャン大臣が行った。

この協定により、ロシアはアルメニアに運転寿命60年の100万kW級PWRであるVVER1000(1基以上)と新燃料を供給する。両国の合併事業体として設立される「ZAOメザモールエネルゴアトム社」は、総合請負業者となるロスアトム社傘下のアトムストロイエクスポート(ASE)社とともに発電所を建設。同発電所を所有・運転することになる。

キリエンコ総裁の説明によると、ロシア側は同発電所建設費の20%以上を出資。ZAO社としては少なくとも40%の建設費を保証し、残りの60%は外部から投資を募る。また、アルメニア側は新原発の発電電力をZAO社から20年にわたって購入し、ロシア側の投資額を返却するのが条件だ。ロシアは同様

の「建設・所有・運転」方式をトルコのアックユ原子力発電所建設計画でも適用しており、今後もこの方式で国外の建設計画で資金調達を支援しつつ、市場を拡大していく方針と見られている。

アルメニアではかつて、メザモール原子力発電所で出力40.8万kWのVVER440が2基稼働していたが、1988年の大地震の影響で、翌年、両機とも閉鎖された。その後、95年に2号機のみが運転を再開し、同国の総電力需要の45%を賅っている。同炉が2016年に閉鎖予定であることから、代替電源の確保が必要となっている。

[エジプト]

建設サイトをエル・ダバに正式決定、年内に国際入札準備へ

エジプトのH・ムバラク大統領は8月25日、地中海に面した西部のエル・ダバを同国初の原子力発電所建設サイトとして正式決定するとともに、今年末までに国際入札の準備を整えるなど、2019年の完成を目指した同建設計画の開始を指示した。同国は人口増加に伴う電力需要拡大への対処や生活水準の向上を目指して、原子力の導入を検討していたが、チェルノブイリ事故後に一時中断。同プログラムへの着手を07年10月に正式に公表して以来、計画はようやく本格的な動きを見せ始めた。

エジプトは20年以上前から第1陣の商業用原子力発電所としてエル・ダバに100万kW級PWRを2基建設する計画を掲げていたが、最終的なサイトの選択に当たっては様々な議論があった。07年11月に国際原子力機関(IAEA)が派遣した専門家は、エル・ダバが原子炉の設置に最も適すると評価。また、昨年夏には電力エネルギー省が、エル・ダバを含む複数の候補地の中で同地がベストな選択となり得るかどうかの詳細な調査を実施した。これら複数の調査結果に基づき、同地は観光事業への影響を考慮しても理想的なサイトとの結論に達したとしている。

今回の決定は、電力エネルギー大臣や財務大臣、貿易産業大臣を含む関係閣僚らとの2時間半に及んだ会合の中で大統領が下した。この会合の中で大統領は、年末までに踏むべき手順として、入札準備のほかに次のような点が重要だと指摘した。すなわち、3月に議会が承認した原子力および放射線関連

活動の規制法に基づき、電力省とは独立の立場で原子力発電所の建設や操業、および高いレベルの安全基準遵守を監視するための原子力安全当局を設置すること、原子力関係人材の養成プログラムをIAEAなどとの協力により、迅速かつ効率的に進めること——などだ。

同会合ではまた、財務大臣が原子力発電所建設費の資金調達に関していくつかのオプションを提示。国が全額負担するのか、その他との混合方式とするのかなどについて、大統領は今後、定期会合を開いて検討するとしている。建設費は100万kW級原子炉1基あたりで15億~40億ドルと試算したと見られている。

国際入札の手配については、政府が昨年6月、豪州のウォーリー・パーソンズ社に同建設計画のコンサルティングを依頼していることから、同社が行うことになると電力エネルギー相が明言。今後の業務は2段階に分かれるとしており、建設サイトの選定後は、原子炉設計の仕様や技術的および財政的な評価に3年半をかける。これに続く第2段階では、建設サイトでのその後の業務や試運転、および国内送電網への接続などで5年半を想定している。

[インド]

ラジャスタン7,8号機の掘削開始

インド原子力発電公社(NPCIL)は8月19日、インド中央部のラジャスタン原子力発電所サイトで、70万kWの加圧重水炉(PHWR)となる7,8号機(RAPP)の基礎掘削を開始した。

同国政府は昨年10月、4基の70万kW級PHWR、すなわちRAPP7,8号機およびカクラパー原子力発電所3,4号機(KAPP)の建設計画に対して行政許可と財政認可を発給。KAPP3,4号機についてはすでに掘削工事が完了しており、コンクリート打設の許可が下りるのを待っている段階だ。

RAPP7,8のコンクリート打設は、掘削工事完了後、今年の12月に実施する計画。両機の完成コストは1,232億ルピー(約2,217億円)と試算し、営業運転の開始時期はそれぞれ、2016年6月と12月を予定している。

インドでは現在、19基・456万kWが稼働中であるほか、カイガ4号機(PHWR, 22万kW)とクダン

クラム1, 2号機(各ロシア型 PWR, 100万 kW)の建設工事が最終段階に入っている。

議会在原賠法案可決, 供給業者にも賠償責任

インド議会で8月25日, 下院が賠償金額の上限を150億ルピーに引き上げるなどの条項を盛り込んだ原子力損害賠償に関する民事責任法案を可決, これに続き30日には上院も同法案を可決した。

原賠法は, 透明性と予見可能性の高い賠償責任体制下で諸外国の原子力企業がインドの原子力市場に参入するには不可欠の条件。しかし現在, 欧米諸国の関連法がすべて, 原子力事業者に対してのみ賠償措置を義務付けているのに対し, インドの法案は原子炉機器供給業者も賠償責任を問われる可能性がある。このため, 諸外国がインド市場への参入に二の足を踏むことも考えられ, 手放しに歓迎とは言い難い状況だ。

同法案の修正を勧告したのは議会の科学技術・環境・森林常任委員会。インド国民の利益を最大限に反映したものとなるよう, 関係閣僚だけでなく一般からの意見も聴取して審査した。その結果, 原案の第6条で50億ルピーと明記されていた事業者の賠償上限は150億ルピーに引き上げられた。

[中国] 三門原発建設で安全注入系を設置

中国国家核電技術公司(SNPTC)は8月6日, 浙江省で建設中の三門原子力発電所で1号機の安全注入タンクを設置したと発表した。世界で初のAP1000となる同炉の建設計画も, いよいよ主要機器の本格的な設置段階に入った。

AP1000の受動型安全システムでは, ポンプなどの外部動力を使わずに重力などの自然の法則を利用。設置された炭素鋼製の安全注入タンクはステンレス鋼で内張りされており, 重さは38トン, 球形で56立方メートルの容積がある。内部にはホウ酸溶液のほかに高圧の窒素ガスが駆動源として蓄えられ, 冷却系の圧力が安全注入系の圧力を下回った場合に空気圧によってバルブが開き, ホウ酸水を炉心に注入する仕組みだ。

SNPTCは新世代の原子炉技術開発のために設立された機関で, AP1000のような第3世代原子炉の技術習得に加えて, 圧力容器や格納容器, 機器モジュールなどの国内生産を目指している。三門発電所の2基のほかに, 山東省の海陽発電所でもAP1000を建設中で, いずれは同設計をベースに大型化したCAP1400を設計, 建設, 運転する計画となっている。

我が国の最先端研究開発

シリーズ解説 第23回

RI ビームが拓く新時代

理化学研究所・RI ビームファクトリーの始動

理化学研究所・仁科加速器研究センター 櫻井 博儀

安定な原子核と比べ、陽子数・中性子数が極端に異なる放射性原子核(RI)「エキゾチック核」を研究する分野は、理化学研究所「RI ビームファクトリー(RIBF)」の誕生とともに新たな時代を迎えている。この重イオン加速器施設はエキゾチック核領域を一挙にウラン領域まで拡大することを目指した新世代 RI ビーム施設であり、新発見をもたらす世界一の強力なインフラを構築し、新しい原子核描像の構築、鉄からウランに至る元素合成過程の解明などを目指している。RIBF で展開される原子核研究と戦略性に満ちた加速器施設を紹介する。

I. はじめに

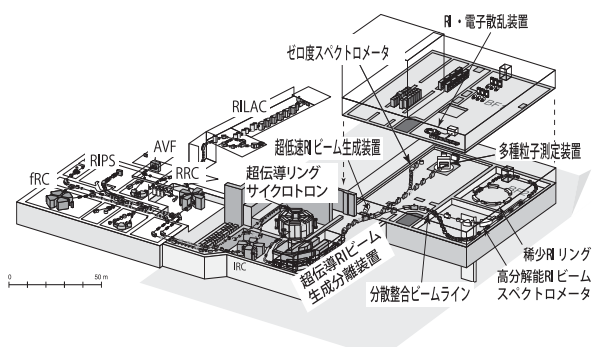
放射性同位元素(RI)をビームとして取り出し、RIを工場のように生産する能力を有する、重イオン加速器施設「RI ビームファクトリー(RIBF)」が理化学研究所の和光キャンパスに誕生した。超伝導リングサイクロトロンと超伝導 RI ビーム生成分離装置で構成された RI ビーム発生系(第1図)は、現在確認されている約3,000種の RI に、1,000種の新しい RI を加え、約4,000種もの RI を人工的に作り出すことを施設の目標としている¹⁾(第2図)。RIBF の RI 生成能力は現在世界一であり、世界の他の施設の100倍以上の RI ビーム強度を誇っている。2008年末には4日間で45種もの新同位元素の生成と発見

に成功した²⁾。過去60年にわたる世界での年平均の発見数は40であり、RIBF の RI 生成能力の高さを物語っている。RIBF の施設としての最大の特徴は、ウランの核分裂反応を利用した RI ビーム生成に力点が置かれていることにあり、これまで理研で培った重イオン加速器技術、RI ビーム生成分離技術を基盤としている。

RIBF では、安定核領域よりも陽子・中性子が過剰な短寿命原子核を人工的に製造し、RI ビーム発生系下流にある実験設備群を駆使して、その性質を調べ、原子核物理学の新時代を切り拓くとともに、ウランの元素合成過程の解明に挑戦することを目指している。RI ビームは光速の60%のスピードをもち、高速 RI ビームを利用した新たな応用研究の芽を育むことも RIBF の使命のひとつである。

原子核物理学・原子力工学の源流は約70年前、1938年に核分裂が発見された時代にさかのぼることができよう。現在も核分裂過程の理解は原子核物理学の主要なテーマの一つであり、また我々に恩恵をもたらすウランが宇宙でどのようにつくられたかは未解決の問題として残っている。原子核をよりよく理解し、その背後に潜む法則性・秩序を暴き出すことで、原子力工学への新たな貢献も期待できる。

この解説では、RIBF が目指す原子核研究を述べた後、設計思想を交えながら RI ビーム生成法と施設を紹介し、今後の展望についてまとめる。



第1図 RI ビームファクトリー施設の鳥瞰図

New Generation of Radioactive Isotope Beams—Launch of RIKEN RI Beam Factory : Hiroyoshi SAKURAI.

(2010年 8月3日 受理)

II. RI ビームファクトリーが目指すもの

1. 「掟破り」のエキゾチック核の登場

原子核は寿命が無限の安定核と有限な不安定核に大別され、安定核は天然に約300種ある。書店に並ぶ「原子核物理学」の教科書は、1980年代初頭までに得られた、安定核およびその近傍での知見・成果に基づいて書かれている。1980年代半ばに新しい技術が開発され、中性子数と陽子数が極端に異なる不安定核「エキゾチック核」の研究が軽い原子核の領域で可能になると、教科書には書かれていない特異な現象、性質が次々と見出されてきた。

新しく見つかった特異な現象、性質は、現在までのところ中性子が過剰で、質量数60以下の軽いエキゾチック核で見つかっている。中性子数 $N = 8, 20, 28$ での「魔法数の喪失」や $N = 6, 16$ での「新魔法数の出現」が示唆する大きな殻構造の変化、中性子だけの皮が原子核の外側に存在する「中性子スキン核」や中性子が月の量のように原子核の周りに薄く広がった「中性子ハロー核」、中性子過剰な原子核が分子的に結合しているエキゾチックなクラスター構造、中性子物質中を陽子物質がゆっくり振動するソフトな励起モードなどである。

2. 原子核研究の新時代

原子核物理学は、新しい技術を手にしたことで、安定核およびその近傍の呪縛から解放され、エキゾチック核を調べることができるようになってきた。安定核で得られた秩序をベースに、不安定核で得られた新現象をも包含する新秩序の再構築が試みられている時代である。

新しく見つかった現象・性質は、さらに研究者の想像

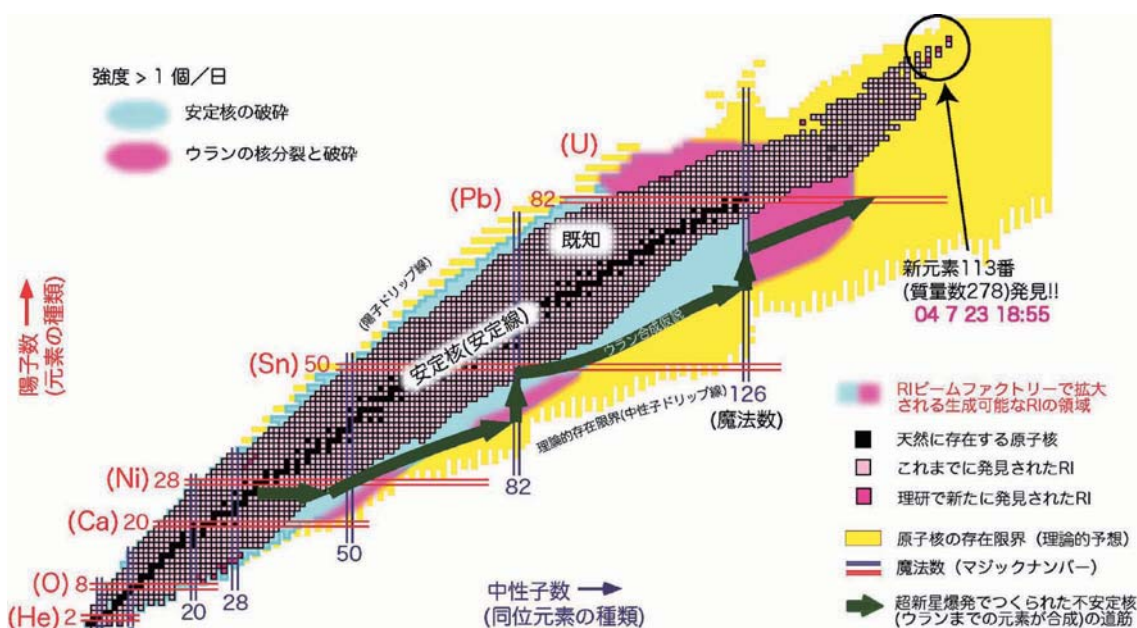
力を掻き立て、これらを統一的に記述する試みがある一方、次々と新しい問題があらわれてきた。安定核およびその近傍で得られている魔法数、50、82、126は、中性子過剰度とともにどのように変化していくのか？中性子スキンに起因した新しい励起モードはあるのか？弱束縛・低密度での中性子の対相関の役割は？中性子物質と陽子物質がそれぞれ勝手に運動する現象はあるのか？中性子過剰な核物質の状態方程式はどうなっているのか？エキゾチック核が関わる核反応は安定核と比べどう異なるのか？などなどである。

核分裂過程においてもより突っ込んだ系統的な研究が望まれる。例えば、興味深い課題として、分裂のしやすさの中性子過剰数依存性がある。陽子数を固定して中性子数を増やしていくとクーロン力に比べ結合力が強くなり分裂しにくくなると予想される。中性子数がさらに増え続けるとスキンが発達し、表面張力が弱くなり、分裂しやすくなるのではないかと考えられている。また、分裂過程途中で中性子の役割や2つの大きな塊が作られるメカニズムに関する系統的なデータを取得することも面白い。

3. 元素合成過程の解明に挑戦

不安定核の性質は、宇宙・天体現象とも密接に関わっている。

1957年にウィリアム・ファウラーらが提唱した宇宙での元素合成過程のうち、ウランの元素合成過程は r -過程 (r は rapid の意) と呼ばれている。この仮説では超新星爆発によって大量の中性子が放出され、安定領域の核が中性子吸収とベータ崩壊を繰り返しながら、安定同位体領域から遠く離れた RI が生成される (第2図)。爆発



第2図 RI ビームファクトリーによる原子核世界の飛躍的拡大と超新星爆発時のウラン元素合成過程

直後に生成した RI は短寿命で、半減期は100 ms 秒程度と考えられており、ベータ崩壊を経て我々の身の回りの安定元素を形作ったとされる。

r-過程は、第2図のように中性子数が魔法数に一致したところで核図表を上を駆け上がる。この理由は、魔法数をもつ原子核は相対的に安定なため半減期が長めで、魔法数を超えて魔法数より1つ多い中性子数になると原子核は不安定になって半減期が急に短くなる。すると中性子吸収過程に比べて崩壊するスピードが速くなるためである。

r-過程原子核はそのほとんどがいまだ人工的につくられておらず、質量、半減期などは現在理論の予想である。第2図のr-過程も理論予想にすぎない。中性子過剰な領域での魔法数が存在しているか、誰も知らない。魔法数が喪失していれば、理論予想とは全く異なる性質を原子核がもつことになる。また現在ではr-過程が超新星爆発ではなく中性子星の衝突で生じたとする説もある。r-過程核の諸性質を調べ、原子核物理学の立場から天文モデルへ束縛条件を与えることが近年ますます重要になってきた。

超新星爆発の初期段階および中性子星の外殻構造、冷却過程を記述するためには、中性子過剰核物質の状態方程式の情報も欠かせない。現在、陽子・中性子数がともに同数の対称核物質については安定核での研究からおおよそ理解されている。しかし、中性子過剰の非対称核物質については理論の不定性が大きく、特に通常核密度よりも密度の高い状態では何もわかっていないのが実情である。

軽い核での教訓は、安定核周辺で構築された知見をそのまま単純にエキゾチック核に適用できない点にあり、原子核物理の新秩序を形成するためには、軽い領域のみならず、中重核領域の不安定核を人工的に生成し、前述の問題に対する答えを出していくことが肝要となる。RIBFはこの時代背景を確実に捉え、一挙にエキゾチック核を対象とする原子核研究の拡大を目指した。

Ⅲ. RI ビームの生成と利用

1. 理研流 RI ビーム生成法

RI ビームファクトリー(RIBF)は水素からウランに至る放射性同位元素(RI)をビームとして取り出す。この方法について説明しよう。

RI ビームの歴史は1960年代にさかのぼり、この時点では高エネルギー陽子ビームを標的に入射し、標的核が壊れて出来た破断片をかき集め、イオン化し、加速する手法が取られていた。この場合の欠点は、イオン化する際に元素の化学的性質に支配されるため、例えば、初期の段階ではアルカリ金属元素のみをビームとして取り出すことが可能であった。また、破断片の収集・イオン化

に必要な時間が比較的長いことも安定核から遠い不安定核を取り出す際の欠点である。安定核領域から遠く離れれば離れるほど、不安定核の寿命はどんどんと短くなるので、寿命が収集・イオン化時間よりも短くなると、ビームの取り出し効率がどんどんと低くなってしまふ。

このような欠点を克服する新しい手法が1980年代に生まれた。この方法は、安定核を重イオン加速器で十分なエネルギーまで加速し、このビームを標的に入射させ、反応によって生じた入射核の破断片をビームとして取り出す手法である。この反応は、入射核を破断するので、入射核破断反応とよばれている。この手法の優れた点は、化学的性質によらず、物理的手法を利用してRIをビームとして取り出せる点と、ビームとして取り出すスピードが圧倒的に速く、寿命の短い不安定核でも収集効率が落ちない点にある。

理化学研究所ではこの新しいRI ビーム生成法の可能性に着目し、1990年代初頭に理研入射核破断片分離装置RIPSを建設し、RI ビームを用いた研究を開始した。このRIPSの特徴は、理研リングサイクロトロン(RRC)のビームエネルギー(核子あたり100 MeV程度)とビーム強度を最大限生かしたRI ビーム生成が可能で、完成当時のRI ビーム強度は、軽い核の領域では世界の他の施設と比べ100倍以上であった。この大強度RI ビームに触発され、様々な研究手法が理研で開発され、軽い中性子過剰核の領域で「常識」を覆す新しい現象・性質が次々と見出された。従来、RIの生成のみに着目し、寿命や崩壊様式を調べる実験が主流であったが、この大強度化によって2次反応を起こさせ、様々な新しい情報が得られるようになったことが大きい。実際、理研で開発された手法は、国外に輸出され、世界の様々な研究所で利用されている。現在の加速器ではRRCの加速エネルギーの限界から利用できるRI ビームは質量数60以下の軽い元素に限られており、15年以上も前から、この分野の次なる展開が理研内で議論され始めていた。

一方で、90年代半ばにドイツ・GSI 研究所ではウランビームによる核分裂反応からRI ビームを生成する試みが行われた。GSI ではシンクロトロンでウランを核子あたり1 GeV程度まで加速し、核分裂反応を起こさせ、分裂片の中から多くの新同位元素の発見に成功した。GSIの加速器施設は当時、ビーム強度や破断片の収集効率の点では十分な性能を有していなかった。にもかかわらず、新同位元素の発見に至ったことで、RIを生成する反応として、入射核破断反応に加え、核分裂反応の有効性が明らかとなった。

以上のようなRI ビーム発展の歴史の中で、理化学研究所のRI ビームファクトリーは、ウランビームを十分なエネルギーまで加速し、その大強度化を図るとともに核分裂片の収集効率を向上させ、大強度RI ビームを供給することを目指した。RI ビームファクトリー施設は

主に RI ビーム発生系と基幹実験設備に分かれており、そのおのおのについて紹介しよう。

2. RI ビーム発生系

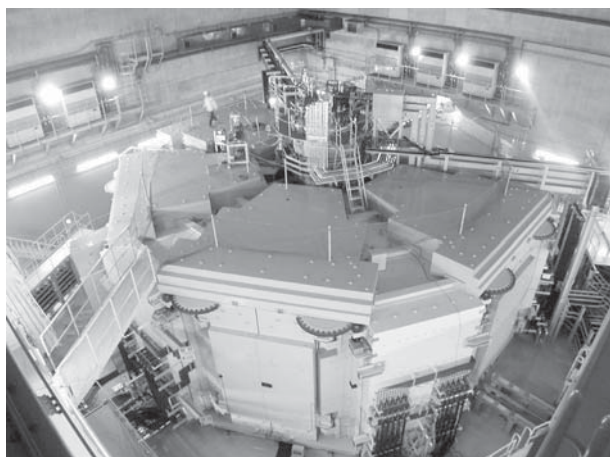
加速器群と RI ビーム収集分離装置からなる RI ビーム発生系の設計思想は、前述のように、ウランビームの高エネルギー化と大強度化、核分裂片の収集効率の飛躍的拡大であった。高エネルギー化と大強度化をもたらす加速器としてサイクロトロン型加速器を採用した。その理由の一つは、ドイツ・GSI 研究所で利用されているシンクロトロン型加速器と比べ、大強度ビームを得やすいからである。シンクロトロンでは、加速時にビームをパルス化しなければならず、また加速に秒程度の時間がかかる。このため、空間荷電効果によってビームが広がりビームを損失しやすく、また平均強度も稼げない。一方、シンクロトロンの利点としてビームエネルギーを核子あたり GeV 程度まで容易にあげることができる点にある。1 次ビームエネルギーと RI 生成量の関係はエネルギーの増大とともに RI 生成量が増えていく。これはエネルギーをあげることで、より厚い生成標的が利用できることと分裂片の角度広がり小さくなっていくからである。しかし、核子あたり 500 MeV 以上になると標的中での 2 次反応による損失が無視できなくなり、エネルギー増大による RI 生成量の増加分は小さくなっていく。そこで、理研では対費用効果を考え、核子あたり 400 MeV 程度まで加速できるサイクロトロンを建設することになった。

RIBF の加速器群は多段式を採用しており、旧施設の加速器群に加え、新たに固定周波数リングサイクロトロン (fRC)、中間段リングサイクロトロン (IRC)、超伝導リングサイクロトロン (SRC) の 3 基のリングサイクロトロンが建設された。最終段の SRC は、RIBF のご本尊ともいえる装置で、総重量 8,300 トンの「鉄の塊」タイプである (第 3 図)。SRC は 6 基のセクター電磁石で構成され、セクター間の空間はコの字形の鉄シールドが覆っ

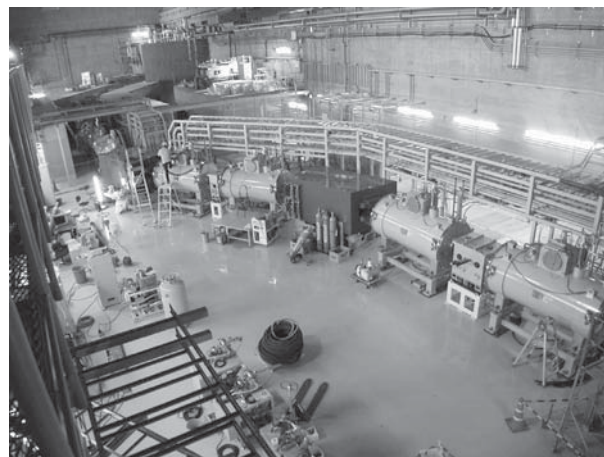
ている。この構造により、「史上最強のイオンビーム偏向能力」を実現するとともに、自己漏洩磁気遮蔽、自己漏洩放射線遮蔽の 2 つの機能も備えている。旧施設の加速器群および新しい 3 基のリングサイクロトロンを用いて、ウランを核子あたり 350 MeV まで加速することができる。

核分裂片を効率よく収集・分離するための、超伝導 RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS) も新たに建設された³⁾。BigRIPS にも超伝導電磁石が利用されている。大きな角度で射出した核分裂片をかき集めるために超伝導四重極電磁石が採用されている (第 4 図)。土管のような筒の中に 3 台の超伝導四重極電磁石が格納されている。この超伝導四重極電磁石により BigRIPS の分裂片収集効率は GSI に比べ 10 倍以上も向上した。また、BigRIPS は 2 つのステージを直列に連結したユニークな構造を持っている。第 1 ステージは、RI の生成分離に特化しており、第 2 ステージは、RI の粒子識別や純度を向上させるために利用される。RI ビームの純度は 100% ではないため、RI 一つ一つの陽子数 Z 、質量数 A 、荷電数 Q を決定する必要がある。RIBF のエネルギーでは RI の Z が 60 を超え始めると、 $Q=Z$ にはならず、電子が 1 つ、2 つついた状態になっている。従来の粒子識別の方法では Q を測定するために RI を止め、運動エネルギーを測定していたが、これに替わり、運動量と速度を精度よく測定し、 A/Q を 10^{-4} 程度の精度で決定する方法が採用されている。この新手法により RI ビームを止めずに粒子を識別し、ユーザーにビーム供給することが可能となった。

これら 3 基のリングサイクロトロン、および BigRIPS の建設は 2006 年度内に終了し、SRC での初加速は 2006 年 12 月に成功した。また、2007 年 5 月にはウランビームの加速によって 2 種の新同位元素の生成と発見に成功し、発生系は順調に始動した。その後も RI ビーム発生系の高度化が行われ、2008 年には前述したように、4 日間で 45 種もの新同位元素の生成と発見に成功している。



第 3 図 超伝導リングサイクロトロン (理研提供)



第 4 図 超伝導 RI ビーム生成分離装置 (理研提供)

また、ウランビームだけでなく、カルシウム-48など軽い核の重イオンビームも加速され、入射核破砕反応で生成された RI ビームもすでに様々な実験に利用されている。

3. 基幹実験設備

BigRIPS から供給される RI ビームの潜在能力を余すことなく引き出すための、様々な基幹実験設備が第1図のように提案されている⁴⁾。RI ビームを利用した実験の場合、研究対象の核がビームとして標的に照射されるため逆運動学となり、従来のプローブビームを静止した核に照射する方法とは異なってくる。

2007年に整備された「ゼロ度スペクトロメータ」は、BigRIPS の下流に配置されたビームライン状のスペクトロメータで、2次標的で前方に放出された核反応生成物をとらえ、質量数200までの生成物に対し粒子識別を行うことができる。BigRIPS での RI ビームの粒子識別とあわせ、反応チャンネルを決定することが容易になった。この設備と2次標的周辺に配置された γ 線検出器を利用して2008年末にネオン-32の第1励起準位の決定に成功し、ネオン-32が大きく変形していることがわかった。この実験のデータ取得時間はわずか8時間程度であった。他の施設で同じデータを取得しようとする半年以上も必要になる。またネオン-31が新種のハロー核であることも見出した。ネオン同位体の核の大きさに関する系統的測定も行われ、中性子スキンに関するデータを取得した。この設備の最下流には崩壊様式を測定するための検出器が配置されており、2009年末に核分裂片に対する最初の崩壊分光実験が行われ、未知の不安定核の半減期などが測定されている。

2009年には、東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センターが建設した「高分解能 RI ビームスペクトロメータ」が稼働しはじめた。この設備の特徴は、高分解能で反応生成物の運動量、散乱角度が決定できる点にある。この設備でのユニークなプログラムは、RI ビームを安定核研究のための新規プローブとして利用し、安定核の新奇共鳴状態の探索することである。2009年に三重陽子2次ビームを利用して、安定核のスピン・アイソスピン応答の研究が行われた。

2011年度には、「多種粒子測定装置」が完成する予定で、この装置は反応で生じる多種多様な粒子を同時に測定することができる大立体角超伝導スペクトロメータである。分子共鳴状態の探索や状態方程式の研究など、様々な研究プログラムが提案されており、2012年度の実験開始にむけ、建設が進んでいる。

電子蓄積リング内に不安定核を閉じ込めて標的とし、電子と RI との散乱から陽子分布を測定する「RI・電子散乱装置」も整備が進んでいる。陽子分布と陽子弾性散乱を利用して得られた核物質分布とを組み合わせ、中性

子スキン厚を直接実験で調べるのが世界で初めて可能となる。

このほか、短寿命不安定核の質量を精密測定するための「希少 RI リング」やトラップなどの精密実験に対応した超低速な RI ビームを生成する「超低速 RI ビーム生成装置」などの建設が計画されている。

V. おわりに

RI ビームファクトリーはまだ始まったばかりであるが、その RI 生成能力はすでに世界一となった。今後、予定されている基幹実験装置を次々と整備し、研究プログラムの多様化・深化をすすめるとともに、RI ビーム発生系を高度化して、より大強度の多様な1次ビームを開発していくこととなる。キセノンやウランなどの重いビームの強度を飛躍的に増強するために、2010年度には新しい高性能小型重イオン線形加速器が整備される予定である。

RI ビームを用いたエキゾチック核研究の重要性は、世界的にも認識されており、15年前に理化学研究所が RIBF 計画を初めて打ち出してから、欧米の原子核研究施設も理研の計画に追随し新計画の提案を行っている。ドイツでは FAIR 計画が走り、2017年に実験を開始する予定である。また米国ミシガン州立大学では2018年の実験開始にむけ FRIB 計画を推進している。各国の研究者とも世界で先鋒を務める RIBF の動向に注目しており、既に多くのグループが理研での実験に参加表明している。今後も RIBF の国際的優位性を確保し、理研の先導的・先進的役割を担い続けていきたい。

さて、RI ビームがもたらす応用研究は何か？ウランの核分裂片が BigRIPS からやってくる。この核分裂片の諸性質を測定することにより新しい原子力技術への貢献ができないか？原子力関係諸氏との連携をこれまで以上に密にしていける必要があろう。

—参考資料—

- 1) Y. Yano, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect., B* **261**, 1009(2007).
- 2) T. Ohnishi, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **79**, 073201(2010).
- 3) T. Kubo, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect., B* **204**, 97(2003).
- 4) H. Sakurai, *Eur. Phys. J.*, **ST 150**, 249(2007).

著者紹介

櫻井博儀(さくらい・ひろよし)



理化学研究所
(専門分野)原子核物理学の実験的研究。特に中性子過剰な不安定原子核の核構造と核反応に関する研究。

原子力の歴史を構築した

多度津振動台

(財)原子力工学試験センター(現在は(独)原子力安全基盤機構に改称)は、通産省(現;経済産業省)からの委託を受け、多度津工学試験所に世界最大の大型振動台を設け、1982年からこの振動台による試験を開始した。この試験では、軽水型原子力発電所の各施設の中で、安全上重要な原子炉容器などの大型機器類の実物ないし実物大に近い大きさの試験体を振動台に載せて加振し、大地震時においても十分な余裕をもって耐震安全性、信頼性が確保されていることを実証してきた。同試験所は22年近くにわたり試験を行い、2005年9月に閉鎖された。本稿では当時、多度津工学試験所所長として同試験所の運営に携わってきた毛利嘉明氏に、多度津振動台にまつわる話を紹介してもらった。(学会誌編集委員会)

元 多度津工学試験所 所長 毛利 嘉明

振動台が作られたきっかけ

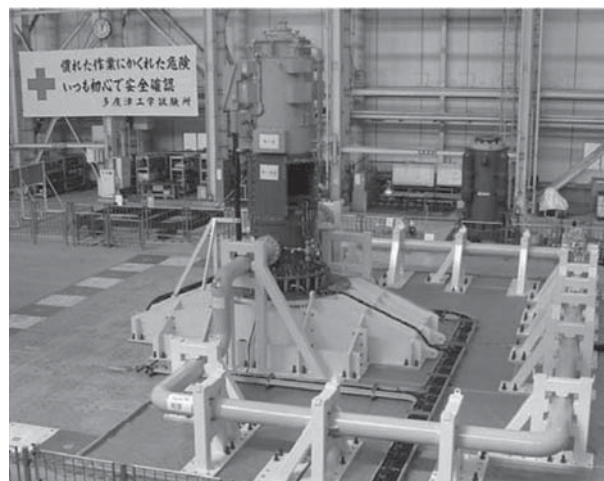
多度津試験所が作られたきっかけは、今から約40年前の昭和47~48年頃、東京大学の大崎順彦先生が当時の原子力委員である東京大学の内田秀雄先生や立教大学の田島英三先生とご一緒されたおり、「実物の原子力発電設備を現実の地震動で揺すってみる装置ができないだろうか」という話題が出たことがあり、これがそもそもの発端であった。

当時からの最大の問題は、「耐震は説明が非常に難しく、原子力発電所は十分な解析設計をしており安全なのだ」ということを一般の方々に理解していただけないことだった。また「設計用基準地震動という、考えられないような大地震がきても、びくともしないようになっていくが、安全余裕度がどのくらいあるのかという評価が難しい。一体どれだけ余裕があるのか、その余裕度の評価が難しくてわからない点が多いので、ぜひ実験をやって余裕度の評価の問題を解決し、その結果を一般の方々にも公開したい」ということであった¹⁾。

原子力発電施設の耐震安全性・信頼性を実証することを目的として、国際的にも非常に高く評価されている世界最大の大型高性能振動台施設が昭和57年7月に完成した。先生方の構想は、「デモンストレーションと、安全余裕度の評価というアカデミックな問題に焦点を絞って試験を続けてほしい」ということであった。

Large-scale High-performance Shaking Table at Tadotsu Engineering Laboratory : Yoshiaki MOURI.

(2010年 7月28日 受理)



第1図 振動台に据え付けられた大型縦型ポンプ

実機を模擬した残留熱除去ポンプ、配管、支持装置、6.6 kV 電動機等であり、ポンプを運転して冷却水を循環させながら加振試験を実施した。

世界最大の大型高性能振動台の完成

この振動台は、原子力発電所の耐震性に関する国民の不安を解消していくため、実物を模擬した大型試験体を実際に揺らして確かめることにより、地震に対する強度的・機能的な安全性を明らかにすることを目的として設置された。総額280億円を投入し、6年の歳月を要して昭和57年に振動台が、香川県多度津町に完成した。

その大きさは縦、横15mの正方形で、水平、垂直にそれぞれ単独または水平・垂直を同時に揺らすことができる。最大で1,000トンの試験体を載せて3,000トンの力

で揺らすことができる世界最大の振動台である。計算機制御により非常に高い油圧(210 kg)の大量の油をサーボ弁で調節し、水平・垂直の加振機を高速作動させて地震の揺れを正確に再現することができる。また、大きな加速度で加振できること、港湾に面しているので大型設備を工場から海上輸送して試験できるという特徴を有している。

振動台の下には、総重量15万トンの巨大な鉄筋コンクリート基礎を設けて3,000トンの最大加振力を支え、地盤の振動による影響が周辺に及ぼさないように十分に広い10万坪の敷地面積が確保された。その広さは、甲子園球場の約8倍である。試験時の地盤振動を振動レベル計で監視し、周辺への影響がないことを確認できる。

耐震信頼性実証試験の実施

1. 世界一厳しい原発地震対策

原子力発電所の各施設の中で放射線防護に関連する重要な施設は、他の産業・公共施設に比べ、非常に厳しい耐震設計が施されている。わが国の原子力発電所は、①活断層の上には作らない、②岩盤上に直接設置する、③最大の地震を考慮した設計を行う、という3つの基本的な考えに従って建設されているので、わが国の耐震設計は世界で一番厳しいものといえる。

原子力発電所の中のとくに重要な機器や建物については、およそ現実的でないと考えられるような大地震が起きても、安全機能が失われないように配慮されている。そのため、過去の地震、活断層による地震を詳細に調査し、さらにそれらを補完するために敷地の地震地帯構造や直下地震を考慮して、設計用最強地震(S1)、設計用限界地震(S2)という2段階の地震の大きさを想定して、これに耐えられるように設計を行っている。

2. 耐震信頼性実証試験の実績

軽水型原子力発電所の各施設の中で、安全上重要な原子炉容器などの大型機器類の実物ないし実物大に近い大きさの試験体を振動台に載せて加振(振動)試験を行い、大地震時においても十分な余裕をもって耐震安全性、信頼性が確保されていることを22年近くにわたり実証してきた。

また平成15年8月には、既設の大型振動台(親亀)の上には、5m四方の振動台(子亀)を設置し、世界で初めて親亀・子亀の振動台が完成した。同9月からは原子力発電所に設置されているのと同程度の電気盤(PWR:4面、BWR:4面)や横型ポンプなど6G(G:重力の加速度)まで揺らして、世界で初めて機器の機能限界耐力を確認する一連の試験(第1表)を実施した。

3. 技術の進歩に大いに貢献

耐震設計手法の妥当性や構造・強度上健全であり、機

第1表 機器の機能限界耐力を確認する実証試験

実証試験名称	最大加振 入力 (×S2)	縮尺	試験体重量 (支持構造物 を含む)(t)
PWR 原子炉格納容器	1.5	1/3.7	350
BWR 再循環系配管	1.1	1/1	665
PWR 炉内構造物	1.5	1/1	555
BWR 炉内構造物	1.7	1/1	750
BWR 原子炉格納容器	1.4	1/3.2	350
PWR 1次冷却設備	1.5	1/2.5	525
PWR 原子炉容器	1.6	1/1.5	700
PWR 原子炉圧力容器	1.7	1/2	600
非常用ディーゼル発電機システム	1.3	1/1	450
原子炉停止時冷却系等	1.5	1/1	294
主蒸気系等	約1.3	約1/2.5	190
コンクリート製 PCCV	注1)	1/10	755
原子炉格納容器 RCCV	注2)	1/8	595
制振サポート支持重機器	2.9	約1/2.5	約550
配管系終局強度	注3)	1/1	約200

注1) ; S2の5倍まで加振レベルを上げて破壊

注2) ; S2の9倍まで加振レベルを上げて破壊

注3) ; S2の8倍を超えるレベルで繰り返し加振して破壊

能が損なわれないこと等を確認することにより多くの成果が得られ、実物規模で試験を行うことの意味は非常に重要である。特に機能喪失限界の予測は難しく、試験により初めて明らかになるもので、限界の把握が技術の進歩に大いに貢献していることも実感した。地震に対する試験体の強さの限界までの耐震試験についても現場で立ち合った。この限界の予測は難しく、試験により初めて明らかになるもので、限界の把握が技術の進歩に大いに貢献していることも体感した。限界を知らないと良い設計はできない。つまり、「学問は限度の発見」(坂口安吾)³⁾である。シミュレーション解析技術の進歩には、弾塑性領域での試験体の挙動を試験により確認することや、経年変化に関する予測解析技術の進歩には今後とも試験による限界の確認が重要である。

見学者対応

1. デモンストラーションは大いに不安の解消に貢献

普段の見学訪問者を受け入れや、各実証試験ごとに、原子力発電所立地地地方自治体関係者、地元住民、マスコミおよび原子力関係者を対象に公開試験を行った。平成7年兵庫県南部地震が起こった直後は特に試験所に対する関心が高まり、年間7千人を超える見学者が訪れた。また、平成13年7月より新たに、大地震の際に原子炉施設が設置される岩盤と一般地表面での揺れの違いが体験できる地震体験見学会を開催し、多くの方々に体験して頂いた。見学者からは、「百聞は一見に如かず」ということで、原子炉施設の耐震安全性・信頼性について、異口

同音に大変よく理解できたと高く評価された。開所以来延べ5万3千人近く来所。

地震体験の案内については、案内状の送付だけでなく、相手先に出向いて直接説明することにより、試験所についても非常に大きな関心を持たれた。大型高性能振動台施設については、世界一であることが世の中にほとんど知られていないので、多くの人に視察してもらうことが必要であり、情報を積極的に発信し、知ってもらう努力が必要であることを痛感した。特に電気事業連合会の広報部の皆様は、広報部長をはじめほとんどの方が地震体験見学会に参加された。兵庫県三木市の大型振動台施設については、一般には多度津の振動台の性能も包含した施設が完成するものと思われていたが、性能の違いを継続的に説明し、多度津振動台の性能・機能は、「最大加速度が大、加振振動数が高い」ことへの理解を得る努力が必要であった。

地震体験については、神戸大学地下トンネル岩盤で観測された揺れ(274ガル)と一般の地表面での地震の揺れ(神戸海洋気象台の表層地盤で観測された818ガル)、設計用限界地震波S2(600ガル)の揺れの違いが体感でき、非常に貴重な体験となった。地表では岩盤の揺れの約3倍の揺れになる。横方向に自分の体重の力で押され転倒して危険なので、第2図の手すりが必要です。震度5の地震の揺れの体験は、一生の間に一度あるかないかであるが、震度7の揺れの体験は強烈な印象となり、可能な限り継続していく必要があると判断した。地震体験見学会(第2図)のアンケートによる集計結果については、日本における原子力発電技術の中でも、世界でトップレベルの耐震技術に関し、多度津工学試験所の役割、重要性、過去に実施してきた試験などについて、世の中に知ってもらう努力や工夫をすることが今後とも重要課題と認識している。



第2図 地震体験見学会

2. 荻野アンナと寺田寅彦

慶応大学の荻野アンナ教授と電事連の石崎広報部長が

来所されたおり、原子力発電所の耐震性や安全性について縷々説明を行った中で、寺田寅彦の言葉を言い換えた「正しく怖がりなさい」という言葉が、荻野アンナ教授の心にしっかりと根をおろした。後日『アンナのエネルギー観光』という文庫本の中で「絶品の言葉」と評価された。その後、荻野教授により「正しく怖がる」という言葉を講演その他で大いに活用していただき、試験所の紹介や原子力安全に関する広報の推進に大いに貢献していただいた。

3. 私の好きな言葉；中国の古典

多度津町長に案内されて第2回日中陝西(せんせい)協力会一行(12名)が来所されたおり、中国の古典の中の、「草創と守成といずれが難きか」(草創与守成孰難)『貞観政要』という言葉を紹介した。これは唐の太宗皇帝が、あるとき重臣を集めて、「帝王の業、草創と守成といずれが難きか」と、尋ねたときの言葉である(「草創」は「創業」、「守成」は「成るを守る」で、すでにでき上がったものを守っていくこと)。国を統一するよりも、統一された国を守っていくことの方がはるかに難しいという意味である。現在の職場に当てはめると、原子力発電所を建設し完成させるよりも、完成した原子力発電所の維持・運用がいかに難しいかということに肝に銘じて仕事に取り組むことが肝要である。この言葉を紹介した際に、陝西(せんせい)省副省長の張偉(ZHANG WEI)氏より平成12年12月に下記の座右の銘を伺った。

王之涣 「登鶴鵲楼」(鶴鵲楼に、登る)
白日依山尽(白日、山に依りて尽き)
黄河入山流(黄河、海に入りて流る)
欲窮千里目(千里の目を、窮めんと欲して)
更上一層楼(更に上る、一層の楼)

4. 地元との良好な協力関係の維持

多度津町との間で多度津工業試験所の立地に関する協定書、建設工事に関する覚書、公害防止に関する覚書、海上交通並びに漁業操業に関する覚書等を遵守することで良好な関係の維持に努めた。なお、地元関係の加入・賛助団体については、中讃海域漁場環境整備協議会、多度津海域漁場環境整備協議会の理事、多度津観光協会、多度津商工会議所の参与、(財)多度津町国際交流協会の理事、県立多度津工業高等学校の学校評議員、多度津瀬戸内企業会、経済懇談会、夕凧会、多度津海洋少年団であり、多度津町主催の新年祝賀会にも毎年出席し、地元との良好な関係の維持に努めた。

多度津振動台が果たした役割

日本の軽水炉が運転を開始した当初、設計上の評価に使用した年数は、30~40年程度運転する年数であった。

近年の技術評価によれば、適切な保全活動を行うことにより、長期間の運転を想定してもプラントの健全性が確保されるという結果が出ている。軽水炉が50～60年と長期間にわたり運転を継続してゆけば、耐震に関する新たなテーマも発生してくると思われる。耐震設計技術指針によると、今後の技術的課題の展望の中に、耐震余裕度についても言及されている²⁾。

振動台は約22年を経過して閉鎖された時点でも、世界最大の大型高性能振動台施設は初期の性能・機能を有していた。今後の技術的課題である耐震余裕度に関する新たな試験の実施が可能であった。

何事も始めることは簡単であるが、継続することは非常に難しい。原子力の安全問題を解決していく努力を継続することが、技術の維持・向上につながるともに、一般社会の協力を得ることになり原子力の平和利用を進めることができるものと確信している。

一般に技術論で対処できる問題でありながら、技術論の範囲を超えて議論が進んでいく場合もあり、本来、技術論で説明できるものとそうでないものを峻別し、技術論で説明できると判断されたものは、すべての手法を通じてわかりやすく疑問に答えることが必要である。そういう意味で、ある時にはその原理、技術の特徴と問題点を基本に戻って考え、わかりやすく工夫した説明が求められる。世界最大の大型高性能振動台施設で学んだことは、あるテーマについて基本を正しく認識すればするほど、正しく危険を認識することができるということである。技術者自身が、本当に怖がるべきことを怖がると同時に、適切な対策で怖がる必要がなくなるという見極めを行うことが重要である。

(参考)

「正しく怖がる」

本文中の「荻野アンナと寺田寅彦」で記したように、試験所を訪問される方々との質疑応答の中で、原子力安全の話題に及んだ場合には、「正しく怖がりなさい」と言う

ことにしている。「正しく怖がることの大切さ」を説いたのは、物理学者で随筆家の寺田寅彦である。寺田寅彦の随筆「小爆発二件」の中に「…ものを怖がらな過ぎたり、怖がり過ぎたりするのはやさしいが、正当に怖がることはなかなかむつかしい…」。

人間のつくりだした原子力発電所は、操作を間違えれば、事故という危険が伴うのはいうまでもない。しかし、その仕組みをよく知り、どんなことが起こり得るかも知ったうえで、危険への備えをして使いこなせば、怖がる必要はなく、むしろこれほど便利なものはない。

本文中の王之渙の詩の意味

鶴鶴楼(かんじゃくろう)は今の山西省、永済県の西南にあった三層の高楼。眼下に黄河を望む、鶴鶴はコウノトリの事。(訳)「鶴鶴楼に登って(故郷を眺めやる)真っ白な太陽が山の端にそって静々と落ちていく。黄河の水は悠然と流れて遙か遠くの海に入っていく。この景色を千里の果てまで見極めようと。さらにもう一階上へと、登っていった。とにかく、「欲窮千里目、更上一层楼」とは、『遠景を眺めなければ、もう一階あがってゆけ』という意味である。

—参考資料—

- 1) NUPEC ニュース No.5, 原子力発電施設の耐震をめぐる諸問題について, (1982.11).
- 2) 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1987).
- 3) 荻野アンナ, アンナのエネルギー観光, 株式会社榊出版社(2004.3).

著者紹介

毛利嘉明(もうり・よしあき)

元 多度津工学試験所 所長



加速器・ビーム科学部会が「春の年会」で企画セッション

量子ビーム発生と利用の最前線

友田 陽, 平本 和夫, 浦川 順治

原子力学会の加速器・ビーム科学部会は、2010年3月に茨城大学で開催された「春の年会」で、「量子ビーム発生と利用の最前線」と題する企画セッションを開催した。量子ビームとは、ガンマ線、エックス線、電子線、中性子線などの放射線とイオンビーム、高性能レーザーなどの総称であり、物質の構造解析や微細加工、計測・評価等の有力なツールとして、さまざまな分野で幅広く利用されている。ここではそれらのうち、「中性子利用鉄鋼評価技術の最近の進歩」と「シンクロトロンに基づくスポット走査方式陽子線治療システム」、「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」について紹介する。

最初に紹介する「中性子利用鉄鋼評価技術の最近の進歩」では、日本鉄鋼協会・産発プロジェクト展開鉄鋼研究「中性子利用鉄鋼評価技術の基礎検討に係る研究」の成果を報告する。このプロジェクトでは、鉄鋼企業6社と茨城大学、日本原子力研究開発機構、物質・材料研究機構が共同で研究を行った。研究チームでは、まず、各社の希望を集約して基盤研究課題を絞り込み実験計画を立案した。課題申請、実験、結果の解析および考察を共同で行った。本プロジェクトのうち物体内部の応力分布の測定では、鋼材スポット溶接部の残留応力分布を直交3方向ともに $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ のゲージ体積で測定することに初めて成功した。また小角散乱による微細組織解析と水素の検出では、鉄鋼材料に含まれる 0.01 mm 以下の析出物や介在物の形状や量、サイズ分布の解析を、JRR-3の小角散乱実験装置を用いて検討した。加工熱処理や弾塑性変形中のその場測定においては、これまで高温加工中の応力状態や転位密度を直接測定することができなかったが、英国ラザフォード研究所ISISの装置ENGIN-Xを使って加工熱処理のモデル実験を試み、その見通しを得た。

次の「シンクロトロンに基づくスポット走査方式陽子線治療システム」では、シンクロトロン加速器を用いたスポット走査方式陽子線治療システムを紹介する。スポット走査方式陽子線治療では、目標を深さ方向に複数のレイヤーに分割し、各レイヤーに設けた多数のスポットに所定量の陽子線を照射する。レイヤー深さは、シンクロトロンの加速エネルギーで制御し、照射スポット位置は、走査電磁石で制御するしくみである。この照射法

は、従来の散乱体照射法で患者ごとに交換が必要であった照射補助具が不要で、かつ、各照射スポットへの線量を適切に定めることにより、目標内外の線量分布を制御できる。2008年5月に米国M.D. アンダーソンがんセンターで4室ある治療室のうちの1治療室で商用初のシステムを用いたスポット走査方式陽子線治療が始まり、およそ2年間順調に治療に適用されてきた。現在では、4治療室合わせて100人/日を越える患者が治療されている。

最後の記事では、2008年9月から文部科学省委託事業として、その基盤技術開発をスタートさせた「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」について紹介する。この事業の目的は 10 m サイズ規模の小型線形加速器で十分に利用に供せる平均輝度およびピーク輝度のX線ビームを生成できる基盤技術を開発して、2012年度にその実証実験を行い、小型高輝度光子ビーム源の実用化設計案を提示することである。このうち小型高輝度光子ビーム源については、3次元装置の概念図を作成した。大強度レーザー蓄積装置については、ファイバーレーザー増幅と光共振器を使った新しいレーザー大強度化の実験を昨年開始した。同時にレーザーサイズを 0.01 mm 程度に絞り込むために、新4枚ミラー光共振器の開発を進めている。加速器基盤技術開発では、2010年秋に数千バンチ大強度ビーム運転を行い、軟X線生成による利用試験を開始。また超伝導加速器設備を2011年度に完成させて、最終の実証実験を2012年の秋まで行う計画になっている。

中性子利用鉄鋼評価技術の最近の進歩

茨城大学理工学研究科 友田 陽

I. はじめに

鉄鋼の微細組織の解析、欠陥検査、強度・破壊等の特性評価において「他の方法では著しく困難もしくは不可能であるが、中性子ビームを利用すると初めて可能になる重要技術課題」を探索し、世界に先駆けて中性子利用鉄鋼評価技術を発展させることを目標に、平成18～20年度に日本鉄鋼協会・産発プロジェクト展開鉄鋼研究「中性子利用鉄鋼評価技術の基礎検討に係る研究」を実施した。鉄鋼企業6社と茨城大学・原子力機構、物材機構からなる研究チームを作り、各社の希望を集めて討論し基盤研究課題の絞り込みを行った。順次、実験計画を作成してビームタイムを申請し、実験の実施(試料の準備・実験実施者・データ解析などの分担)、結果の解析と考察、まとめと今後の展望を共同で議論し、得られた知見・情報は参加企業・大学・研究機関で共有することにした。実験は大学および研究機関が中心になって興味のある企業メンバーと課題ごとにチームを組んで実施にあたった。加速器中性子源を用いる実験は、海外の実験施設(英国 ISIS と米国 LANSCE)に課題を申請してその場実験を行った。世界最高性能の大強度中性子ビームの利用が可能になる J-PARC 中性子実験施設はプロジェクト開始時には建設中であったが、平成20年12月より実験が可能となり、21年2月には予備的実験を行うことができた。今後、ビーム強度が増すに伴い、本プロジェクトで得られた実験・解析技術のアイデアが次々に実現できると期待される。

II. 企業ニーズと現時点の達成点

中性子ラジオグラフィや即発 γ 線分析はすでに実績があるので、広角(ブラッグ)回折、小角散乱、反射率の利用を検討した。既存の中性子実験装置は基礎科学の研究において威力を発揮してきたが、産業利用の実績は乏しく、鉄鋼研究に利用するには周辺機器の開発整備や実験方法、解析方法の開発が必要であった。

1. 物体内部の応力分布および材料組織因子の測定

国内唯一の中性子残留応力測定装置(原子力機構 JRR-3の RESA)の装置科学者達と協力して、1次元位置敏

感検出器(PSD)、コリメータ、試料回転装置等を導入し測定技術の高度化を図り、以下の3項目について検討した。今後は J-PARC の装置への展開が期待される。

(1) 応力測定の高速度・高精度化

プロジェクト開始時には改善の余地が多く、測定に長時間を要していた。種々な研究資金により上述のような周辺機器を整備し対策を講じた結果、測定の高速度に関して約50倍の改善が図れた。鋼材スポット溶接部の残留応力分布を直交3方向ともに $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ のゲージ体積で測定した例は初めてと思われる。放射光 X線でも測定できない深部の応力測定が中性子では可能になるが、試料位置の制御、測定と解析の自動化、3次元ビジュアル表示、CAD データや FEM 計算ソフトとの連動など、今後改善すべき課題も多い。

(2) 集合組織の定量測定

X線回折では、全角度範囲をカバーする極点図を得るには反射法と透過法を組み合わせるために測定精度に問題があるが、透過能の高い中性子回折では、光学系を変えることなく試料を回転するだけで完全な極点図を得ることができる。JRR-3装置 RESA を用いた角度分散法によってバルク平均の方位分布関数(ODF)を求めることができた。また、J-PARC 加速器中性子源の利用に向けて、米国ロスアラモス研究所 LANSCE の装置 HIPPO を用いて、低合金鋼の加熱冷却に伴うフェライト \leftrightarrow オーステナイト相変態に関して、同一試料において連続的にその場測定することができた。HIPPOには多くの検出器があり、多数の回折ピークを一括フィッティングするリートベルト解析により数回の試料回転によって ODF を得ることができる。時間をかけて精度の良い ODF を測定するには角度分散法が適しており、時分割測定で集合組織形成を追うには飛行時間法が優れている。

(3) 転位密度・粒径の定量測定

ブラッグ回折および小角散乱の強度プロファイルには塑性変形の影響が現れる。転位組織(構造)と転位密度のバルク平均値を変形中の試料に対してその場測定・評価できるとインパクトが大きい。プロファイル解析法を検討してソフトを開発し、極点図上に残留ひずみ、粒径や転位密度を重ねて出力できるようにした。フェライト鋼の伸線加工に伴うマイクロ組織変化と強度特性の関係や種々な方法による巨大ひずみ加工を施した材料の内部応力とマイクロ組織変化を検討した。機械的性質はバルク特性なので、マイクロ組織データについても各種顕微鏡観察

等による局所平均値ではなく、材料試験片と同程度の大きさに対してバルク平均値が得られる中性子実験はきわめて優位である。

2. 小角散乱による微細組織解析と水素の検出

鉄鋼材料における数 nm から数10 μm の大きさを有する析出物や介在物の形状、量、サイズ分布に関して、小角散乱による測定の見極めることを目標に JRR-3 装置 SANS-JII と PNO を用いて検討を進めた。機械的性質を支配する主たる組織因子のサイズを数 mm 厚さのバルク材に対して測定できるのが特長であり、以下の3項目について検討した。

(1) 析出物の定量測定

高分解能透過電子顕微鏡観察でやっと存在を同定できるか否かのナノサイズ析出物のサイズ分布の測定に見通しが得られた。高窒素マルテンサイト鋼の焼戻しに伴う初期組織変化等に関して、中性子と X 線の相補利用、特に散乱コントラストの相違を積極的に活用する方法等の発展がみられた。また、セメント球状化率の同定にも有望であることがわかった。

(2) ミクロンオーダー介在物の定量測定

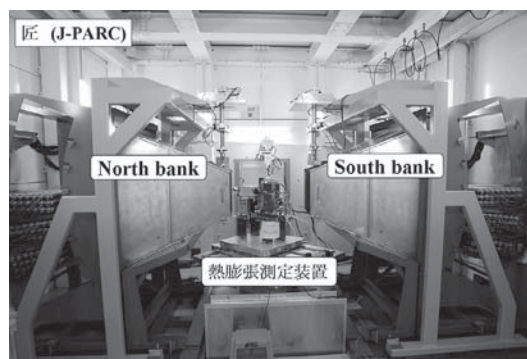
疲労破壊の発生源となるような介在物を非破壊でバルク試料に対して測定を試みた。介在物のサイズ分布を極値統計処理して確率的な最大寸法を推定できれば疲労強度の評価等に使える可能性がある。また、マトリクス組織の影響を把握して測定標準化を進める上で、高純度鉄や IF 鋼 (Ti 等の添加により侵入型固溶原子がほとんどない加工用鋼) 等の測定を進めた。多種多様な介在物が混在すると、データ解析が困難になるので、今後、実用的な標準測定法の確立に向けた努力が必要である。

(3) 析出物と水素の存在状態に関する定量的評価

炭化物界面に吸着した水素検出に関して、実験手法およびデータ解析方法など水素検出技術について検討を進めた。J-PARC 装置の登場によって、微量な水素含有量でも検出できる可能性が高く、水素の存在形態も解析できると期待される。

3. 加工熱処理や弾塑性変形中のその場測定

中性子ビーム強度が格段に大きくなる J-PARC の装置では各種時分割測定の活発な展開が予想される。先行実験として、加速器中性子では、高エネ機構の Sirius、英国ラザフォード研究所 ISIS の ENGIN-X、米国ロスアラモス研究所 LANSCE の HIPPO、原子炉中性子では原子力機構 JRR-3 の RESA を用いて実験を進めた。特に、熱処理、加工熱処理、引張変形中のその場中性子回折 (一部小角散乱) 実験を行って基礎的知見を蓄積した。このような測定技術を凝固、溶接、焼結等の製造プロセスや疲労破壊などへ展開することが期待される。



第1図 相変態その場中性子回折実験の様子

(1) 熱膨張と中性子散乱回折の同時測定

熱膨張測定を行いながら中性子回折測定ができる装置を作製して、JRR-3 の RESA で過冷オーステナイトからの相変態挙動を測定した。試料全体の長さ変化から変態速度を推定するのが従来であったが、回折プロフィールから体積率、炭素の濃縮、変態内部応力の発生などを追うことが可能になった。このような時分割実験には飛行時間法が適しているので、J-PARC の匠を用いて直交する2方向から測定した (第1図参照)。複雑な組織形成過程は熱膨張測定のみでは十分な理解が得がたく、この測定技術が、今後、有力な手法になると期待される。一方、生成物の量、サイズ分布、形状に関する情報は小角散乱で得られる。そこで、磁場印加下熱膨張測定装置を作製し JRR-3 の SANS-JII に導入した。析出・相変態における核生成・成長について、粒子の数密度とサイズを熱膨張測定と同時に測定できれば画期的であり、J-PARC の材料構造解析装置 iMATERIA において実験を予定している。

(2) 加工熱処理中のその場測定技術の基盤開発

鉄鋼製造プロセスにおいて、熱間圧延や鍛造といった塑性変形を組織制御に利用する加工熱処理法が重要な技術であり、プロセス中に起こる現象をその場測定したいという要望がきわめて強い。これまでの手法では高温加工中の応力状態や転位密度などを直接測定することは不可能であった。そこで、英国ラザフォード研究所 ISIS の装置 ENGIN-X を使って加工熱処理のモデル実験を試み、見通しを得た。ビーム強度の高い J-PARC では時分割測定の時間間隔を短くできるのが強みである。

(3) 変形中その場測定によるダイナミック解析

自動車用2相組織鋼や超微細粒複合組織を有する変態誘起塑性鋼等を用いて引張変形中のその場中性子回折実験により、構成相間および方位の異なる結晶粒間の不均一変形挙動、それに起因する応力分配や応力誘起マルテンサイト変態挙動を明らかにした。このような実験を J-PARC 装置で発展させれば、変形集合組織の形成過程も含めて大きな威力を発揮する。さらに動的現象を追うことができるので、疲労損傷や破壊機構解明への活用も期待される。

—参考資料—

- 1) 鈴木裕士, 友田 陽, “中性子残留応力測定の最近の進歩, 波紋”, 中性子科学会誌, 17, 228 (2007).
- 2) 友田 陽, 徐 平光, “中性子その場回折実験による鉄鋼の相変態解析”, ふえらむ, 12, 15 (2007);
友田 陽, “中性子を用いた材料組織の解析”, 金属, 78, 1049 (2008).
- 3) 友田 陽・鈴木徹也, “中性子その場回折実験による強度と変形機構の解析”, ふえらむ, 12, 71 (2007);
友田 陽, “J-PARC に期待する中性子材料強度学の研究”, 金属, 78, 1128 (2008).

- 4) 友田 陽, 鈴木徹也, “中性子その場回折実験による強度と変形機構の解析”, ふえらむ, 12, 71 (2007);
友田 陽, “J-PARC に期待する中性子材料強度学の研究”, 金属, 78, 1128 (2008).
- 5) 友田 陽, “その場中性子回折による鉄鋼材料の弾塑性変形挙動の解析”, ふえらむ, 15, 17 (2010).

著者紹介

友田 陽(ともた・よう)



茨城大学 理工学研究科
(専門分野/関心分野)材料工学/中性子散乱
実験, 鉄鋼材料, エコマテリアル

日本原子力学会誌 ATOMOS 広告のご案内

社団法人 日本原子力学会

「日本原子力学会誌」は、特集・解説・講演等、広く原子力に関わる記事を掲載し、我が国原子力研究、産業の発展に資するべく、努力しております。学会誌は毎月約8,000部が発行されており、電力、メーカー、大学、研究機関を中心とする会員および賛助会員の原子力関係者はもとより、広く原子力関係機関、市町村、マスコミ等にわたっております。

本誌への広告掲載は、発展の一助になるものと信じておりますので、ぜひ、広告の掲載をお願い申し上げます。

■賛助会員料金(消費税別)

表 2	150,000円	前 付	110,000円
表 3	140,000円	後 付	100,000円
表 4	190,000円	差し込み (本誌に同封)	230,000円

■一般料金(消費税別)

表 2	160,000円	前 付	120,000円
表 3	150,000円	後 付	110,000円
表 4	200,000円	差し込み (本誌に同封)	240,000円

■上記の金額は、1 ページあたりのモノクロの料金です。カラーの場合、1 ページあたり120,000円追加となります。また、版下・フィルム製作費は別途申し受けます。

■過去1年以上毎月出稿された機関につきましては10,000円引きとなります。

■連絡先 105-0004東京都港区新橋2-3-7新橋第二中ビル 3F
社団法人日本原子力学会 学会誌編集担当 富田, 野口
TEL 03-3508-1262, FAX 03-3581-6128, E-mail: hensyu@aesj.or.jp

シンクロトロンに基づくスポット走査方式陽子線治療システム 照射野形成のための補助具が不要で、目標内の線量分布を フレキシブルに制御可能

(株)日立製作所 平本 和夫

I. はじめに

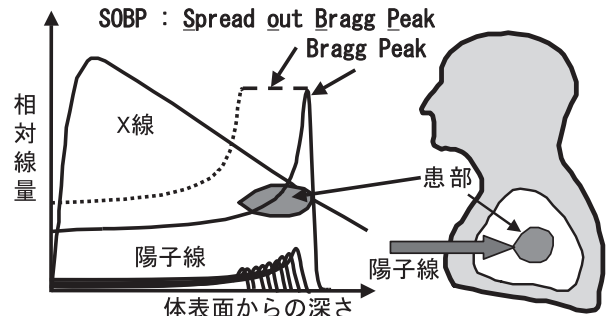
1946年に米国で提案された陽子線治療は当初、物理研究用高エネルギー加速器を用いて治療研究が行われていた。1980年代後半になり、米国で治療専用システムによる治療が開始され、その後、世界のおよそ15の病院で専用のシステムを用いた治療が行われてきた。

これらの従来の治療システムでは、陽子線を散乱体で拡大する散乱体照射法が用いられてきた。しかし、散乱体照射法は、照射野を整形するための照射補助具が必要で、また、患部周囲に照射線量が患部と同じになる部位が生じる。一方、スポット走査法は、照射補助具が不要で患部周囲への照射線量を低減でき、かつ、目標内の線量分布を制御できるため、スイスのポールシェラー研究所、米国M.D. アンダーソンがんセンタそれぞれでスポット走査法による陽子線治療が行われるようになった。特に、M.D. アンダーソンがんセンタでは、4治療室のうち1治療室で商用世界初のスポット走査治療システムが用いられ、残りの治療室で散乱体照射法が用いられている。以下では、このM.D. アンダーソンがんセンタで用いられているスポット走査治療システム¹⁾を紹介する。

II. 従来照射法²⁾

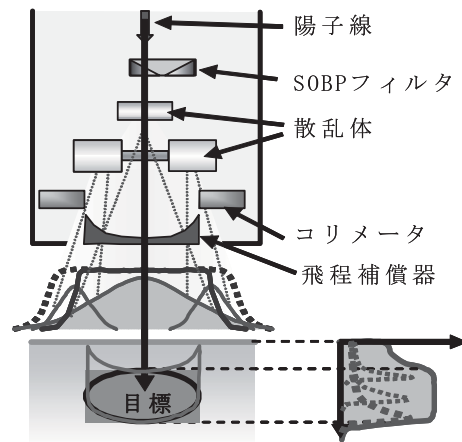
陽子線の深さ方向の線量分布は、第1図に示すように、陽子の運動エネルギーで決まる飛程近傍に極大値(Bragg Peak: ブラッグピーク)を持つ。照射線量は、照射する陽子の量で制御できる。この性質を利用して、目標の深さ、厚さに応じて、陽子線のエネルギーと照射する陽子の量を制御し、ブラッグピークを拡大(SOBP: Spread out Bragg Peak)する。

従来用いられてきた散乱体照射法では、SOBP フィルタと呼ばれる照射補助具を用いて、ブラッグピーク幅を拡大する。陽子線の進行方向に垂直な面内については、散乱体等で線量分布を拡大・平坦化する。このように拡大、平坦化した陽子線の照射野を、第2図に示すように、



第1図 陽子線の深さ方向線量分布

コリメータと飛程補償器で目標形状に合わせて整形する。この照射法は、目標周囲の一部の線量が目標と同じとなることや、照射補助具である飛程補償器を患者ごと



第2図 散乱体を用いる照射法

に交換する必要がある等の点で、改良の余地があった。

III. シンクロトロンによるスポット走査方式陽子線治療システム¹⁾

1. システム構成

治療システム構成を第3図に示す。陽子線を必要なエネルギーまで加速するシンクロトロン加速器とビーム輸送系、および患者へ陽子線を照射する照射ノズルで構成する。照射ノズルには、スポット走査に用いる走査電磁石や照射量を測定するビームモニタを設置する。

2. スポット走査法

(1) レイヤー分割とスポット設定

Synchrotron-based Spot Scanning Proton Therapy System : Kazuo HIRAMOTO.

(2010年 7月2日 受理)

スポット走査法では、第4図に示すように、照射目標を深さ方向にレイヤー分割し、ブラッグピーク位置が各レイヤーの深さに合うように陽子線のエネルギーを定める。レイヤーの厚さは、陽子線のブラッグピーク幅で決まり、およそ5 mm程度に設定される。各レイヤー内には、ガウス分布をした陽子線を重畳させて所望の線量分布を得るように、5～8 mm程度の間隔でスポットの位置を定め、各スポットに照射する陽子線量(スポット線量)を定めておく。

(2) 横方向走査

照射では、走査電磁石の電流を制御して、陽子線の位置をスポットに合わせ、あらかじめ定めたスポット線量まで照射する。スポット線量まで照射すると、シンクロトロンを制御して、陽子線の照射を停止し、照射位置を次のスポット位置に変更して、既定のスポット線量まで照射する。これらの照射をレイヤーの照射を終えるまで繰り返し行う。

(3) 照射レイヤー変更

当該レイヤーの照射を終えると、ブラッグピーク深さ

を次のレイヤーに合わせるように陽子線のエネルギーを変更する。陽子線エネルギーの変更は、シンクロトロンでの加速エネルギーの変更により行う。陽子線エネルギーの変更のために、エネルギー減衰器をビーム輸送系、あるいは照射ノズルに設置し、陽子線を通過させる減衰器の厚さを変えて陽子線エネルギーを制御する方法があるが、この方式に比べ、シンクロトロンでのエネルギー変更は、ビーム電流の大幅な減少や、不要な放射線の発生を防止できる。

3. スポット走査法の特長

スポット走査法は、各レイヤーの形状に従って照射スポットを配置し、スポットごとに線量を制御する。これにより次の特長を持つ治療が実現できるようになった。

- (1) 目標外への線量を最小限に抑え、かつ目標内の線量分布を制御できる。
- (2) 従来用いられていた照射補助具が不要になる。治療準備時間を短縮でき、治療過程で治療計画を変更できる。
- (3) 陽子線の損失を従来の1/10以下に低減でき、不要な放射線を低減できる。

IV. まとめ

シンクロトロンに基づくスポット走査方式陽子線治療システムを紹介した。従来、患者ごとに交換が必要であった照射補助具なしで目標内の線量分布を制御できる。

米国 M. D. アンダーソンがんセンターでは、2008年5月に商用世界初のスポット走査システムを用いた治療が始まり、多数の患者が順調に治療されている。

—参考資料—

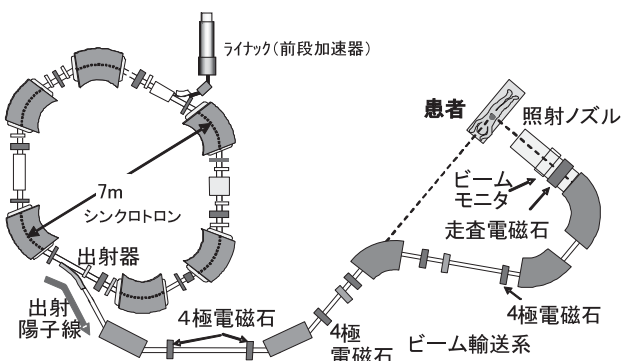
- 1) A. Smith, *et al.*, *Med. Phys.*, **36**[9], 4068(2009).
- 2) W. T. Chu, *Rev. Sci. Instrum.*, **64**[8], 2055(1993).

著者紹介

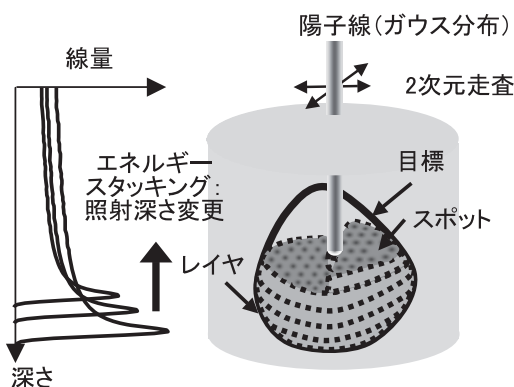
平本和夫(ひらもと・かずお)



(株)日立製作所 エネルギー・環境システム研究所
(専門分野/関心分野) 粒子線治療システムの開発、加速器のビーム制御技術



第3図 シンクロトロン加速器を用いた陽子線治療システム構成例



第4図 スポット走査の概念

超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発

高エネルギー加速器研究機構 浦川 順治

I. はじめに

2008年9月から文部科学省委託事業として、表記の量子ビーム技術プログラムの基盤技術開発が始まった。目的は10 m サイズ規模の小型線形加速器で十分に利用に供せる平均輝度およびピーク輝度のX線ビームを生成できる基盤技術を開発して、2012年度にその実証実験を行い、小型高輝度光子ビーム源の実用化設計案を提示することである。本計画のために、大強度線形加速器と大強度高繰り返しレーザー蓄積装置による逆コンプトン散乱過程を利用した準単色・短パルス・準連続X線生成を行う最先端基盤技術開発が、多くの利用者の要望に適した小型高輝度光子ビーム源装置製作に合っていると判断した。そこで光高周波電子源およびレーザー蓄積共振器開発の10年以上の技術蓄積と実績に基づいた詳細な提案書を文科省に提出した。その結果、本委託業務が5年計画として採択された。現在、責任を背負って、多くの参画機関の協力を得て本事業を推進している。

計画の概要、大強度レーザー蓄積装置開発と加速器基盤技術開発状況および今後の計画について報告する。

II. 計画の概要

提案書の300字概要は「超伝導高周波加速器技術とレーザーパルス蓄積技術の融合によって、ポストゲノム時代の生命科学研究、ナノ構造解析、創薬、医療診断、マイクロリソグラフィへの利用を画期的に飛躍させる軟X線から硬X線領域の小型高輝度X線発生装置(10 m×6 m程度)を実現する。本装置実現のために、高品質大強度電子ビーム生成装置、大強度・高電界超伝導高周波加速装置、高品質短パルス大強度レーザー蓄積装置、ミクロン精度での電子ビーム軌道制御技術および、レーザー光路精密調整といった技術の実用化を図る。また、レーザーパルス蓄積装置をアンジュレータに置き換えることによってテラヘルツ波から赤外線の高輝度光子ビーム生成も可能である」である。

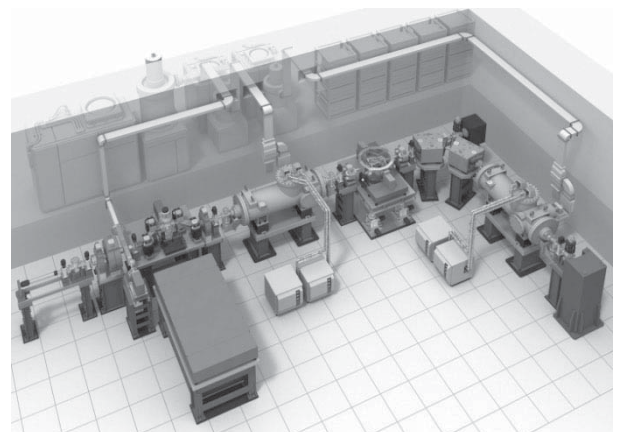
本委託事業採択後、装置の基盤技術開発を進めながらその3次元装置概念図を作成した。第1図に示すように、高周波電子源からビームダンプまで超伝導高周波電子線形加速器の先端技術開発が必要であり、さらにマル

チ短バンチ光電子ビームおよびX線を生成するための高繰り返し大強度パルスレーザーが必要である。図では5 Hz, 1 ms 大強度パルス電子ビーム運転を仮定しているので、He冷凍システムが小さなものになっている。また、減速超伝導空洞1台をX線発生後偏向電磁石で電子ビームを曲げた後に設置して、ビームのエネルギーを約1 MeV以下にしてからビームダンプに捨てる設計にした。

総合技術蓄積、総合システム構築および性能実証実験は高エネルギー加速器研究機構(KEK)の超伝導リニアック試験施設(STF)で行う。この装置の基盤技術開発を若手研究者が自主的に行い、その研究指導および開発過程で新しい技術を確立させることによって、若手研究開発者を育てることも本事業の目的である。本委託事業の活動状況は<http://kocbeam.kek.jp/index.html>で公開して、常に最新の成果等が納税者に理解して頂けるように努めている。また、年3回以上、高輝度光子ビーム源開発室ニュースを配布して、本プログラム関係者および一般の方々へ関連する最新技術の開発状況の周知を図っている。皆様のご理解とご支援を得て、社会に貢献できる最先端加速器基盤技術を確立する予定である。

III. 大強度レーザー蓄積装置開発

大強度高繰り返しレーザーパルスを10 μm(σ)程度に絞り込み、さらに電子ビームも同程度サイズに絞り込み衝突させて、レーザーを効率よくX線ビームに変換する。通常10度程度の衝突角を持つように超高真空衝突チェンバの中に高反射率ミラーで構成した光共振器とレーザーパルスを通す小さな穴を持った電子ビームダクトを取り付ける。レーザーの位置を1 μm以内の精度で



第1図 小型高輝度光子ビーム源の3次元装置概念図

Development for Next Generation Compact High Brightness Photon-beam Source by Superconducting Accelerating Linac : Junji URAKAWA.

(2010年 5月30日 受理)

2次元的に移動して電子ビームと衝突調整する。両ビームの衝突時間精度は1 ps以内にする必要があるため、電子加速高周波とレーザーパルス発振器は高精度で同期させる。現状、100 fs(σ)程度の同期が実現できる状況にある。電子線形高周波加速器では、電子バンチ長10 ps (FWHM)の高品質マルチバンチビームを必要なエネルギーまで加速する。本開発プログラムでは30 MeVから50 MeVの最大エネルギーを想定して、1 m長の超伝導高周波加速空洞を使う。光高周波電子銃を使って5 MeVマルチバンチ電子ビームを発生して、超伝導高周波加速空洞35 MV/m 1台で加速することによって、40 MeVの大強度電子ビームを衝突チェンバーへ輸送する。この線形加速器では最高性能で運転できた場合、40 MeVの最大エネルギーの実現可能性があるということになるので、実証実験では2台の1 m長超伝導高周波加速空洞を電子ビーム加速に使う予定である。

大強度レーザー系への要求は以下ようになる。

- (1) レーザーパルス生成は100 MHz以上
- (2) 共振器内レーザーパルスエネルギーは10 mJ以上
- (3) 衝突点でのレーザーサイズ10 μm (σ)程度

このレーザー平均パワーは1 MW以上になるので、現在、レーザー開発の研究所で実現されている100 kWの10倍以上になる。ファイバーレーザー増幅と光共振器を使った新しいレーザー大強度化の実験を昨年からはじめた。すでに、ミラーやファイバーを何度か破壊してしまい、問題点を克服しながら高い目標に向かっていく。国際特許の申請をしているので、詳しい説明を省く。

一方、レーザーサイズを10 μm (σ)程度に絞り込むために、新4枚ミラー光共振器の開発を進めている。光共振器の共鳴状態を維持するには、高反射率ミラーの位置を圧電素子でオングストローム程度の精度で安定に制御する必要がある。つまり光共振器への入射レーザーの位相と光共振器内の蓄積レーザーパルスの位相を合わせて、レーザー蓄積を可能にしている。2枚ミラー光共振器で入射レーザーエネルギーの1,000倍の蓄積と衝突点でのレーザーサイズ30 μm (σ)を実現している。新3次元4枚ミラー光共振器は複雑な装置であるが、蓄積増幅率を10,000倍以上で、レーザーサイズを10 μm (σ)以下にできるモデル計算があり、現在、この装置のプロトタイプで基本性能試験を行っている。

IV. 加速器基盤技術開発

高品質マルチバンチ電子ビーム生成では、すでに1.6 cell S-band RF Photo-cathode Gunを使って0.5 nC/bunch, 300 bunches/pulse 運転によりマルチバンチビーム負荷補正や電子ビーム収束実験を行った。電子バンチの規格化エミッタンスは0.5 mmmrad以下にするので、バンチ強度を0.5 nC/bunch以下とする。2010年秋には3,000 bunches/pulse 運転を行い、軟X線生成による利用試験を開始する。可能であれば8,000 bunches/

pulse 運転も行い、軟X線強度を上げることによって実用化の意義を明らかにしたい。

KEKは国際リニアコライダー計画(ILC)およびエネルギー回収型ライナック(ERL)の将来計画に必要な超伝導加速空洞開発を精力的に進めている。パルス運転30 MV/mとCW運転20 MV/mの1.3 GHz 9-cell superconducting cavity 製作技術開発を本空洞開発者にお願した。現状、製作した空洞の25%がパルス運転で30 MV/m以上を達成している。2011年までにはパルス運転用空洞製作技術が確立して、実用的な空洞2台が実証実験に供される計画である。

電子ビームとレーザーパルスを10 μm (σ)まで絞り込み、安定なマルチバンチ衝突により高輝度X線生成を実現するには最先端ビーム制御技術が必要である。そのためにS-band RF Gunと3 m S-band 加速管を使ったLUCX(Laser Undulation Compact X-ray)装置で、逆コンプトン散乱によるX線生成の総合基盤技術を開発している。放射線医学総合研究所の先進小型加速器事業の装置を拡張して、X線検出器開発や干渉性回折電磁波放射実験も可能なように現在組み替えている。2010年5月から電子ビーム・レーザー衝突実験を再開した。

V. 今後の予定

レーザー蓄積装置の平均パワーを100 kWから1,000 kWに上げる技術開発を2010年と2011年で行いながら、電子ビームとレーザーパルスの衝突実験により高輝度X線生成が可能であることを示す。そこで実用のためのサンプル照射実験をLUCX装置で行い、実用化のための技術蓄積を進める。さらに超伝導加速器設備を2011年度に完成させて、最終の実証実験を2012年の秋まで行うことになっている。ここでは162.5 MHzで1 ms pulse長のマルチバンチ電子ビーム生成(162,500 bunches/pulse)を行い、加速することになる。バンチ当たりの電子ビーム強度を0.1 nC/bunchと仮定しても、16 mAの電子ビーム強度になる。本実験終了後、レーザー装置等はCompact ERL装置に移設して、CW高輝度X線生成実験に使えるようにする。Compact ERLがビーム運転を行ってれば、そこでも応用実験の試験が可能になる。

—参考資料—

- 1) J. Urakawa, *Nucl. Instrum. Methods. A* (2010), doi:10.1016/NIMA.2010.02.019.

著者紹介

浦川順治(うらかわ・じゅんじ)



高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
(専門分野/関心分野)加速器科学/加速器応用

シミュレーションの信頼性確保のあり方とは？ 当学会としての Verification & Validation への取り組み

(株)テプコシステムズ 堀田 亮年,
(株)東芝 中田耕太郎, 電力中央研究所 佐田 幸一

シミュレーション技術が幅広い産業分野に普及するとともに、その信頼性をいかに確保するかということへの関心が高まっている。ISO9001の導入以来、検証(Verification)と妥当性確認(Validation)が品質管理のキーワードとなったが、シミュレーションのVerification & Validation (V&V)が今脚光を浴びつつある。原子力においては古くから存在し、かつ新しい側面も持つこのテーマについて計算科学技術部会における取り組みを中心に紹介する。

I. はじめに

シミュレーションの信頼性を確保することは、これを実用的に用いるために必要不可欠な要件である。シミュレーション結果の信頼性を定量化することによって、これに基づいて作られた工学製品を安心して社会に送り出すことができる。これは、シミュレーションを専門とする技術者が自ら負うべき責務であるとともに、専門家ではないとしてもシミュレーションに基づいて何らかの意思決定を行う者は認識する責任がある。

原子力の分野では、安全解析においてシミュレーションに大きな役割が与えられてきた。すなわち、原子力プラントの安全解析のために、継続的なシミュレーションコードの開発や大規模な装置を用いた妥当性を確認するための実験が行われてきた。最近では安全解析だけでなく、設計、建設、保守、検査などの様々な場面において、核・熱流動・構造などの多様なシミュレーションが行われるようになってきている。また、構造や熱流動の汎用分野では、その性能が広く認知された商用コードが、原子力分野においても利用されるようになった。これらについては多くの場合ソースコードが非公開であり、頻繁にバージョンアップが繰り返される。特に、個別分野への適用性や不確かさに関するエビデンスが必ずしも十分提供されておらず、使用者側にも判断責任がある。さらに、計算ミスなどのトラブルを防ぐための品質マネジメントに対する関心も高まっている。

このように多様なシミュレーション技術が様々な場面に使われるようになるにつれて、信頼性の確保に対する

考え方が求められるようになってきた。V&VはVerificationとValidationの略称であり、シミュレーションの信頼性を確保するための方法論として世界的に注目されている。米国エネルギー省(DOE)が推進するサイエンススペースの原子力システムモデリング&シミュレーションプログラムでは、原子力分野では不確かさ定量評価(Uncertainty Quantification)手法の高度化が重要であることからV&V/UQとより広く扱われている¹⁾。

本稿では、日本原子力学会「2010年春の年会」(茨城大)における計算科学技術部会の企画セッション「シミュレーションの信頼性確保のあり方とは？—当学会としてのV&Vへの取り組みについて」の講演者が執筆者となり、V&Vに関する動向、その具体的アプローチについて技術基準レベルまで検討が進められている数値流体力学(CFD)分野を中心に紹介する。

II. シミュレーションにおける V&V

1. Verification および Validation の定義

製品が“正しい方法で得られていることを示すことがVerification”であり、また“要求・目的を満足することを示すことがValidation”である。設計・開発において、これらは車の両輪の関係にあり、併せてV&Vと呼ばれる。最終的な目標は、製品の信頼性を確立することであり、その達成のためには、分野ごとに異なるアプローチが存在する。

複雑なシステムのシミュレーションについては、オペレーションズリサーチの分野でSchlesingerが、“現実世界”、“概念モデル”、“計算モデル”という3要素に分解したリング構造を提案し、この中でVerificationとValidationを定義している。シミュレーションが現実世界を近似する手段である以上、その結果には精度と不確かさが付随し、これを定量化した上で、実用的観点から

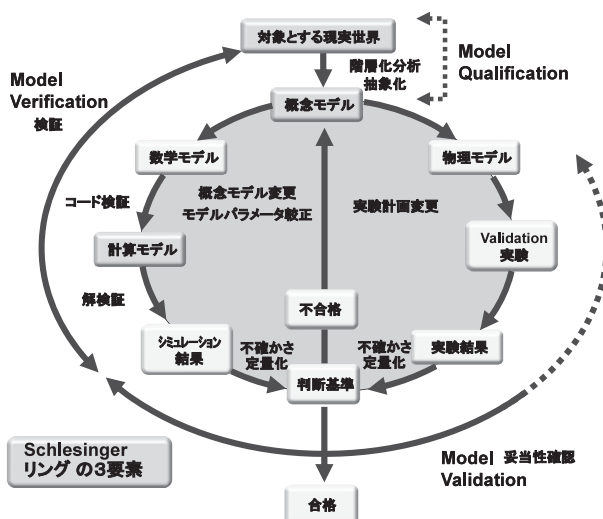
*How to Establish Reliability of Numerical Simulations ?—
Ongoing Discussion of Verification & Validation in AESJ :*
Akitoshi HOTTA, Koutaro NAKADA, Kouichi SADA.

(2010年 6月14日 受理)

設定した判断基準に照らして可否を判定する。ASME V&V10では、これらを Schlesinger リングを詳細化した V&V 構造(第 1 図)において実現する方法を提示している²⁾。Validation は現実世界を反映した実験(Validation 実験)との比較を通じて行われる。以下に掲げる Schlesinger の定義は、シミュレーションの V&V を的確に表現したものとして AIAA, ASME のガイドにおいて踏襲され、そして本節の冒頭で述べた一般的な表現に置き換えれば、IEEE, ISO など、シミュレーション以外のシステム開発を念頭においた V&V の定義の原典となっていることがわかる。

Model Verification: Substantiation that a computerized model represents a conceptual model within specified limits of accuracy.

Model Validation: Substantiation that a computerized model within its domain of applicability possesses a satisfactory range of accuracy consistent with the intended application of the model.



第 1 図 ASME ガイドにおける V&V の流れ¹⁾

2. V&V ガイドのニーズと検討状況

欧米での V&V ガイドは、商用コードを利用するという産業界のニーズにも応えるものであるが、歴史的背景としては、高度に発達したシミュレーション技術と実験技術が実現現象の解明において相補的關係にあり、シミュレーションを Validate するための実験という視点が形成されるようになったこと、そしてシミュレーションによって提起される課題を克服することが実験屋にとってチャレンジングなテーマと認識されるようになったことも駆動力となっているようである。

原子力プラントの安全評価に係るシミュレーションコードについては、これまで規制機関が分野ごとの有識者から構成される検討会を開催し、そこで信頼性を含む

多面的な評価を経たのち安全審査で使用することを認める、あるいは個別審査で審査するとしていた。これらの検討は、一般化された方法に則って行われるというよりも、安全評価が対象とする広範囲の問題や個別プラントの条件を考慮した方法で行われてきた。一方で、新知見に基づくシミュレーションコードの導入を円滑に進めるため、「トピカルレポート制度」が平成21年より開始されている。ここで、シミュレーションコードによる評価結果の信頼性評価のガイドとなるような考え方があれば技術評価の充実に資するであろう。

当学会におけるシミュレーション信頼性に関する取り組みは、計算科学技術部会を中心に行われてきた。平成20年にまとめられた「計算結果評価法」研究専門委員会(主査:東工大・二ノ方 壽)の検討結果によれば、原子力プラント設計に用いるシミュレーションでは、関与する物理プロセスの空間・時間スケールが幅広く(マルチフィジクス・マルチスケール)、支配方程式の性質、数値化手法も多様であり、不確かさの発生要因、その伝播の扱い方も単純ではない。計算結果の信頼性評価法の成熟度も、開発、設計、安全審査、リスク管理などの適用段階、そして得られている知見レベルによって異なる。すなわち、複数分野に共通なことがらとそうではないことがら、今できることと将来の課題を区別しながら、V&V を達成する発展的なアプローチを考えることが必要である。こうした検討を引き継いで、「標準委員会基盤・応用技術専門部会」のもとに「シミュレーションの信頼性検討タスク」(主査:東大・越塚誠一)を設置し、シミュレーションの信頼性の技術的なガイドに関する具体的な検討を行い、平成21年11月に専門部会への報告をまとめたところである。

3. 既存の V&V ガイドの基本構成

シミュレーションのための V&V の枠組みは、構造解析のための ASME V&V10、あるいは CFD 解析のための AIAA G-077-1998³⁾ のようなガイドにより示されており、両者は、Model Qualification, Verification, Validation という共通の要素で構成されている。

Model Qualification では、現実世界のシステム化とモデル化の方法として階層分析が推奨されているが、これは対象とする問題があるレベル以上の複雑性を有することを意味している。III-3節に述べるように、Verification には、コーディングテストや厳密解との比較のようなソフトウェア品質の視点(コード検証)と、収束性などのアルゴリズムの視点(解検証)が含まれる。ここで扱うシミュレーションコードは、ある程度以上の規模と複雑性を有すると考えてよく、その V&V に求められる専門性や費やすリソースを考えるならば、これらを品質管理の設計・開発プロセスに先立って終了していると考えることが合理的であろう。Validation では、解析屋と実験屋

が、実験の計画や結果の解釈において緊密に連携することによって、互いの知識レベルを高め合うことを期待している。

Ⅲ. 熱流動解析における V&V

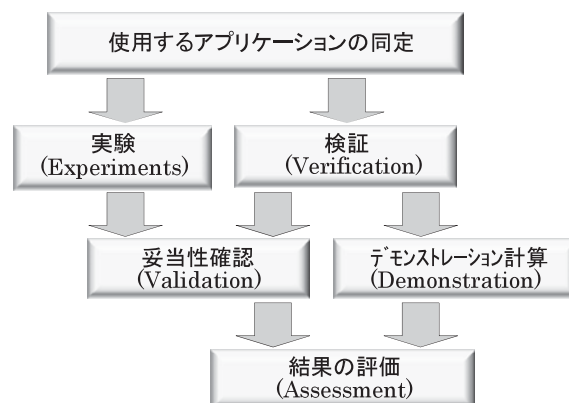
1. 海外での取り組み

すでに CFD は広い工学分野で設計や解析のための有力なツールとなっており、その結果の信頼性を評価することは重要である。特に、単相 CFD は、原子炉安全分野の設計検討や研究においてさらに広く普及することが予想される。OECD/NEA 原子力施設安全委員会 (CSNI) では、原子炉安全解析における単相 CFD の使用に関する様々な局面に対応する実用的な手引き書を目指してベストプラクティス (推奨事項) ガイドラインがまとめられた。また、ASME では、CFD と熱伝達解析の汎用的な精度評価法を示すことを意図し、ASME V&V 20 がスタンダードとして策定された。このスタンダードは、単純な集中質点系の 1 次元定常の層流から、3 次元非定常の乱流化学反応流れまでの広範囲の工学的かつ科学的な問題に対処できるとしている。

2. OECD/NEA ベストプラクティスガイドライン⁴⁾

このガイドラインは、専門用語の定義、問題の同定、シミュレーションコードの選択、物理モデルの選択、数値モデルの制御、評価の考え方、結果の評価、そして文書化の 8 項目から構成される。まず、扱う問題の特性を把握 (同定) して、対象とする体系の大きさや目的とする詳細度を見極めてシステム解析コードや 3 次元体系での CFD コードを選択することが必要である。乱流モデルの選択に関しては、CFD コードでの直接モデル (DNS, LES)、時間平均モデル (RANS) および両者のハイブリッドモデル (DES など) について、その内容や適用に際しての指針や留意事項が示されている。他の物理モデルに関しては、浮力、熱伝達、自由表面、流体-構造連成などのモデルについてまとめられている。数値手法に関しては、定常・過渡の選択、計算格子 (幾何形状、格子形状、格子品質)、離散化手法、収束制御性に対する考え方が示されている。

本ガイドラインの評価のプロセス (第 2 図) においては、Verification は計算格子に関する収束性と誤差評価およびシミュレーションコードのドキュメントのレビューなどを通じてシミュレーションコードが適切に検証されていることの確認、Validation は目標変数と不確かさの評価としている。また、実験データが少ない、あるいは存在しない場合には、V&V を代替するものではないものの、限定された情報に基づいて行う「デモンストレーション計算」によってシミュレーションコードの性能を評価するとしている。シミュレーション結果の不確かさに関しては、着目パラメータに対する感度解析が



第 2 図 OECD/NEA CFD 評価プロセス⁴⁾

実施されているのが現状と指摘している。

3. ASME の CFD V&V スタンダード⁵⁾

V&V の定義に関しては、先述のベストプラクティスガイドラインや ASME V&V 20⁵⁾ では、ASME V&V 10 や AIAA のような先行するガイドに準拠するとしている。その一方で、ASME V&V 20 では、V&V の具体的なプロセスが、数式や流れ図を用いて体系的に解説されている点がスタンダードたる所以である。

ASME V&V 20 の最終目的とは、シミュレーションコードや実験に関する情報と一連の手順を経て、実験結果とシミュレーション結果から“比較誤差”と“妥当性の不確かさ”を導くことである。この“比較誤差”と“妥当性の不確かさ”が、Validation の判定指標である。V&V 10 との相違として、V&V を実現するために必要な用語の定義、手順、留意点などが、概念だけでなく、具体的かつ定量的に解説されている点を挙げることができる。

Validation に先立って、Verification としてコード検証と解検証を行う必要がある。コード検証とは、シミュレーションコードの中に組み込まれた数学モデルが正確に解かれていることを示し、既知の解に対する誤差の評価を行うことであり、解検証とは、ある計算に対する数値的な精度を見積もることである。コード検証も解検証も数学的な作業であるが、画一的な方法論はなく、解くべき問題の特性に応じて、ベンチマーク問題や解析解に対する解の収束性を含めて判定することになる。Navier-Stokes 方程式のような非線形系に対しても有効な解析解の取得方法として、参照解、物性値分布、境界条件などを偏微分方程式に与え、数式処理ソフトなどでこれらに対応するソース項を逆算する MMS (Method of Manufactured Solutions) がクローズアップされる。また、離散化の収束傾向が格子サイズのべき乗によって表現できると仮定して解を外挿する Richardson 補外法に基づき、ここから導かれる誤差推測値に経験的に求められた安全係数を掛けることによって得られる格子収束指数から数値的な不確かさを求める Roache の方法が詳

しく解説されている。Validationにおいては、不確かさ伝播を、感度係数法(摂動の場合)とモンテカルロ法(変動が大きい場合)により求める手順を例示しており、このスタンダード策定委員会に参加したColemanとSteeleが提唱する方法に基づいて、目標変数が試験で直接測定される場合と他の実測データから関数を用いて導かれる場合に分けて具体的な評価手順が示されている。

また、スタンダードとしての役割から、水平のフィンチューブ型熱交換器の熱伝達問題を取り上げ、V&Vの実施例を示している。Verificationに関しては、4段階の計算格子を使用して格子依存性の評価を行っている。Validationでは、実験データの不確かさ評価が必要であり、誤差伝播法あるいはモンテカルロ法により評価される。さらにVerificationで確認された格子依存性から入力データの不確かさを含めたシミュレーションの不確かさを評価し、不確かさを評価した実験データとシミュレーション結果を比較することにより、シミュレーションの妥当性の評価が行われている。共通の不確かさ要因について想定される変数間の関係に応じて、実験データの不確かさ評価、シミュレーションのモデル化および入力データの不確かさ評価、不確かさ伝播による評価のプロセスを提示している。ASME V&V 20は、熱流体問題を対象に、シミュレーションと実験に起源を発する種々の不確かさを包括的に扱う不確かさ評価の考え方を提示することを意図している。

IV. 大気拡散数値モデルに関する V&V

1. シミュレーションによる大気拡散評価

発電用原子炉施設の安全解析における大気拡散・被ばく線量評価の手順は、「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針⁶⁾」に示され、「敷地の地形が複雑な場合又は放出源に対する建屋等の影響が著しいと予想される場合⁷⁾」には、放射性物質の大気拡散状態を推定するために風洞実験を実施することが求められている。これは、被ばく線量評価のために使用される大気拡散式に、「放出源の有効高さ」と呼ばれるパラメータを用いて複雑な地形や建屋の影響を取り込むためである。このパラメータを求めるために、従来から風洞実験が行われてきた。一方、現在では技術的な進歩が著しいシミュレーション技術を大気拡散評価に適用することが現実的となっている。数値シミュレーション技術を導入することにより、原子炉施設の設計段階で地形・建屋の形状などが変更となった場合には、その設計変更に対応でき、設計の合理化、さらなる安全性の向上が期待できる。また、風洞実験において測定点の選択の判断に迷った場合、シミュレーション結果をもとに決定するなど、両手法を組み合わせることで評価の精度向上にも資することも考えられる。そこで、現在、シミュレーションおよび大気拡散を専門とする学識経験者、学術研究機関関係者、

関係官庁、事業者などの参加のもと、「有効高さ評価モデル分科会」(標準委員会、基盤・応用技術専門部会)においてシミュレーションモデルの技術基準策定に向けた検討を行っている。

2. シミュレーションモデルの信頼性確保

シミュレーションモデルによる大気拡散評価のための技術基準は、現行手法である風洞実験と同じ適用範囲などを予定している。すなわち、風洞実験の実施基準⁷⁾で規定されるものと同じく“放出源の有効高さの妥当性を検討すること”を目的とし、“大気安定度が中立”を条件とする。また、この技術基準では、“数値モデルの性能基準”の章を設け、本問題に対するシミュレーションコードの信頼性確保を図ることを計画している。V&Vの定義としては、前掲の日本原子力学会の他の活動(「シミュレーションの信頼性検討タスク」(2009年9月報告)、II章に述べたASMEなどによるV&Vの考え方などを参照して以下のとおり用語を定義する予定である。

検証： 根底にある数学モデルとその解を数値モデルが正確に表現できていることを示すプロセス
 妥当性確認： モデルの意図した利用法を考慮したうえで、現実をどの程度正確に表現できているかを示すプロセス

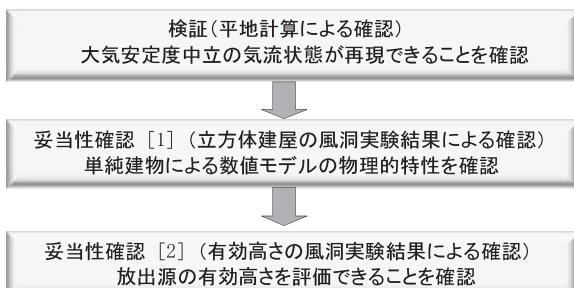
現在検討中の技術基準では、今後使用が想定される多様な数値シミュレーションモデルも視野に入れているため、個々の計算スキームまでに至る細部にわたる規定は困難である。そこで、計算結果が満たすべき条件を以上の検証および妥当性確認で示し、その信頼性を確保する予定である。

検証においては、数値モデルを実装したシミュレーションコードが正しく開発されていることを確認する具体的な手順は、ガイドなどで共通に示すべきことがらと考えられる。一方で、本問題のような気流状態(乱流状態)では数学モデルの解析解は存在しないことから、解検証として、幾何学的な形状が最も簡単であり、数値的な適正範囲を規定できる平地条件に基づく方法を示すこととする。平地条件に対するシミュレーションモデルでは、気流に対して①平均風速、②風速境界層厚さ、③主流方向の乱流強度、拡散に対して①鉛直方向の拡がりのパラメータ σ_z (気象指針⁶⁾に示される線図の大気安定度が中立)をシミュレーションモデルで必要な精度で再現できていることを確認する。以上の平地条件の解検証における確認項目は、風洞実験の実施基準⁷⁾で求められる妥当性確認変数と整合している。

一方、妥当性確認においては、適用範囲において目的に適った精度を有することを確認するために、大気拡散に関する国内外の事例も参照して、以下の2段階にて実施することを予定している。第1段階では単純建屋周辺

の排ガス拡散状況の確認を求める。具体的には、広く公開されているデータも限られるものの、EU 基準 (COST 732)⁸⁾ で例示される小規模な範囲の風洞実験結果を選定した。この風洞実験データはインターネット上で公開されており⁹⁾、複数の研究機関が実施したシミュレーションモデルの良好事例に基づいて設定された。次いで、妥当性確認の第 2 段階では、シミュレーションモデルにより実際の建屋・地形を忠実に模擬した条件下での放出源の有効高さを求める風洞実験結果と比較し、シミュレーションモデルの性能評価を行う。この性能評価では、① 気象指針⁶⁾による想定事故時の相対濃度の年変動の調査結果、② 自然変動の範囲を設定し、放出源の有効高さの評価方法の切替え時に線量評価結果が有意に変動しないようにシミュレーションに求められる性能を規定する予定である。

以上の V&V 要件に適合するシミュレーションモデルとして、気流モデルと拡散モデルを組み合わせた方法が挙げられる。気流モデルは乱流モデルを基本としており、拡散モデルでは、気流モデルの計算結果を入力とし、放出された多数の粒子で排ガスを模擬する粒子型モデルが採用されている。また、実際の発電所に対する適用結果からは、有効高さが風洞実験とほぼ一致することを確認している。今後は、商用コードや新たに開発されるシミュレーションコードの適用も想定されるが、これらについても、汎用的な V&V ガイドと本技術基準に規定される手順(第 3 図)に従ってシミュレーションモデルの信頼性が確保されるであろう。



第 3 図 大気拡散シミュレーションの V&V の流れ

V. おわりに

最近のシミュレーション技術の進歩とコンピュータ性能の急速な向上が相まって、原子力分野の様々な局面でシミュレーションが利用されるようになってきた。今後、シミュレーションの果たす役割は増大していくものと考えられ、米国や欧州ではその信頼性の確保に係る技術的なガイドを策定する動きが活発になっている。本稿は、標準委員会基盤・応用技術専門部会・シミュレーションの信頼性検討タスク(前掲)の議論をベースに、原子力学会「2010年春の年会」において、計算科学技術部

会の企画セッションとして発表した内容を再構成したもので、シミュレーションコードの Verification および Validation の具体的な定義・内容について掘り下げた記載がなされており、シミュレーションコードの信頼性を示すプロセスの技術的なベースとなるものと考えられる。現在、同部会の下に「シミュレーションの信頼性ワーキンググループ」(主査：JNES・笠原文雄)を設置し、国内外の V&V ガイドに関する最新動向、シミュレーションを適用した設計の具体的事例からみえる課題、品質管理システムへの実装に関する課題、その他関連情報などについて調査し、当学会としての V&V への取り組みについて今後の標準化を念頭に取りまとめる予定である。

—参考資料—

- 1) <http://www.sc.doe.gov/ascr/ProgramDocuments/Docs/SC-NEWorkshopReport.pdf>
- 2) ASME V&V 10-2006, (2006).
- 3) AIAA, G-077-1998, (2002).
- 4) NEA/CSNI/R(2007) 5, (2007).
- 5) ASME V&V 20-2009, (2009).
- 6) 発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針, (1982).
- 7) 発電用原子炉施設の安全解析における放出源の有効高さを求めるための風洞実験実施基準2009, (2010).
- 8) COST (European Cooperation in Science and Technology) 732.
- 9) <http://www.mi.uni-hamburg.de/Category-A.628.0.html>

著者紹介

堀田亮年(ほった・あきとし)



(株)テブコシステムズ
(専門分野/関心分野)核熱結合解析, 安全評価

中田耕太郎(なかだ・こうたろう)



(株)東芝 電力システム社
(専門分野/関心分野)熱流動解析, 安全評価

佐田幸一(さだ・こういち)



(財)電力中央研究所
(専門分野/関心分野)大気環境, 安全評価

原子力発電所の設計と評価における地震安全の論理

東京大学 大橋 弘忠

我が国では近年、いくつかの原子力発電所で設計想定を超える大きな地震動がもたらされたが、地震による被害は軽微なものであり、原子力発電所の安全は確保された。それにもかかわらず、国民の間では設計想定を少しでも超える地震動が発生すると原子力発電所の多くの設備が損傷するのではないかという懸念が拡がり、地震に対する原子力発電所の安全性を改めて見える形にしていくことが求められている。これを受けて、日本原子力学会原子力発電所地震安全特別専門委員会では、安全分科会において、地震に対する安全確保の基準、考え方、評価の方法など多方面からの再検討を行い、地震安全の論理を取りまとめたのでその概要を紹介する。

I. はじめに

2007年7月16日、新潟県中越沖地震が発生し、東京電力柏崎刈羽原子力発電所が被災した。変圧器火災の映像の印象や原発震災という見出しなどにより、地震に対する原子力発電所の安全性について国民の間に不安感が広がった。柏崎刈羽原子力発電所は、その後の調査により、全号機とも安全に停止し、原子力安全に関する特段の問題は生じなかったことが明らかとなっている。

日本原子力学会では、このような背景を受け、地震時の安全確保に関する諸課題を整理し議論するため、原子力発電所地震安全特別専門委員会を設置した。この中に安全分科会を設け、地震時の安全確保の基本的考え方を明確にして課題を整理すべく検討を行った。

このたび、検討の成果を「地震安全の論理」として取りまとめた。本報告では、この地震安全の論理の基本的な考え方と要点を紹介する。本体は日本原子力学会から公表されており、同ホームページからも閲覧できるので、ご興味に応じて参照されたい。

II. 検討の目的

地震は揺れという形で現れ、この揺れが極めて大きいと、強度が不足している構造物は破損したり倒壊して期待される安全機能を達成することができなくなる。耐震設計とは、この揺れに備えるものであり、どのような揺れを想定するのか、また、それに対してどのように備えるかが課題となる。原子力発電所の耐震設計においては、この揺れに対して基準地震動というものが設定されるが、これは、耐震設計において想定する地震の強さで、

一般的には地震加速度として表現される。

近年、柏崎刈羽原子力発電所を含めて、いくつかの原子力発電所で基準地震動を上回る地震動が観測された。いずれも安全機能に何ら支障は生じず、柏崎刈羽原子力発電所以外ではほとんど基準地震動と同等の地震動であり、設備や機器の損傷もなく、そのまま再起動が可能な状態であった。しかし、一般には基準地震動は、すなわち超えることのない限界の地震動であり、これを超えることになると、大事故に至るのではないかという懸念がある。

そのため、安全分科会は、より合理性が高く包括的な地震安全の論理を構築することを目指した。これにより、地震時の原子力安全についての説明性を上げ国民理解の促進に供すること、安全確保の考え方の全体の中に基準地震動と耐震設計を位置づけこれらの意味を明確にすること、そして、地震安全に関する今後の課題の基盤と方向性を展望することを目的とした。

III. 現状の耐震設計

原子力発電所では、まず基準地震動を決めるが、この基準地震動は、発電所の立地場所近辺での地震発生履歴と地質・地質構造や地震活動性などの調査結果を踏まえて保守的に設定される。このため、滅多に発生しないような大きな地震動を設定することになる。次に、この基準地震動に対して、地盤、建造物、機器の応答と発生応力を求め、それぞれの安全機能が損なわれないよう設計をする。

しかしながら、「安全機能が損なわれないよう設計する」は抽象的であり、具体的にどのような設計をすればよいのかが明確でないため、基準地震動を基に、それよりも小さな地震動を弾性設計用地震動として別途設定し、この地震動によりもたらされる地震荷重に対し、構

造物や機器が局所的に変形することはあっても全体として健全性が保たれるよう設計することになる。構造物や機器の健全性は、構造解析という手法を用いて評価を行うことにより確認される。

IV. 安全確保の考え方

原子力発電所の安全確保の目標は、放射能による周辺環境や住民に対する影響を顕在化させないことである。原子力発電所の放射能のほとんどは、原子炉の中の燃料中に閉じ込められており、通常運転中はこの放射能を閉じ込めたままにしておくこと、また、考えられる事故時においては周辺地域に放射能による著しい影響を与えないことが最大の目標となる。地震時の安全確保もこれと同じである。

安全確保の最も基本的な考え方には深層防護という概念がある(第1図)。これは特別に原子力に限ったものではなく、一般的な安全確保の考え方を整理したもので、3つの段階で考えるのがわかりやすいだろう。

まずは、トラブルや異常を発生させないこと。優れた設計で良い品質の設備をつくり、その機能を高く維持することが第1段階となる。次に、仮に何かトラブルが生じたとしても、それが拡大し事故に至ることがないように設備を用意しておくこと。異常を検知して原子炉を緊急停止する設備や、原子炉の冷却材が流出した場合に備えて炉心に冷却水を供給する設備などがこれに該当する。最後の段階は、それでも万一燃料から放射能が放出される事態を想定し、これによる環境への影響を弱め被害の発生を防止するよう施設しておくことである。

深層防護とは、このように、仮に・万一という想定を繰り返し懐の深い安全を確保するという考え方であり、上記の3つの段階をそれぞれ発生防止、拡大防止、影響緩和と呼んでいる。

このように、原子力発電所では極めて慎重かつ厳重な対応がとられるが、巨大システムであるがゆえ、個々の機器等の設計条件を満たした設計だけでは、発電所全体の安全性が確保されているのかがわからないため、安全評価を実施し各種設備の有する安全機能が十分なものであることを確認することとしている。すなわち、安全評価では、深層防護の考え方に則して設計され

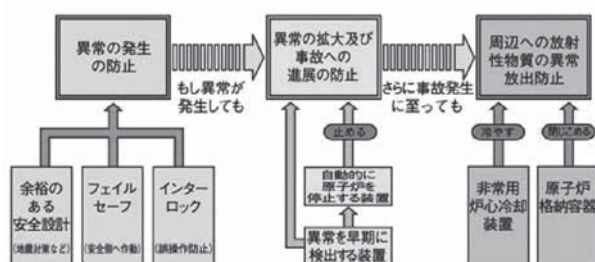
た発電所に対し、様々な異常や事故が起きたときのことを仮定し、そのときに炉心や原子炉が健全で、そして、発電所が安全な状態にあることを確認することになる。

原子力発電所の安全評価においては通常、発電所に内在する事象(内的事象)を起因とした2つのカテゴリーを考える。1つは運転時の異常な過渡変化、略して異常過渡と呼ぶもので、発電所の寿命中(数十年程度)に発生が予想される機器の故障や運転員の誤操作により引き起こされる外乱で発電所が異常な状態に至る事象である。簡単に言えば軽微な異常で、タービンの自動停止や、外部電源の喪失などである。考えられるこのような様々な異常に対して、異常過渡が安定に終息し、燃料と原子炉の1次系がすべて健全であり、通常の運転状態に復帰できることが確認される。

もう1つのカテゴリーが事故である。事故は、異常過渡を超える異常な状態で、発生する頻度は稀であるが、放射能放出の可能性がある、公衆や社会に対する発電所の安全性を評価する観点から考えておくべき事象である。その代表的なものとして、冷却材喪失事故(LOCA)や反応度事故がある。これら考えられる様々な事故事象に対してそれぞれ評価を行い、燃料の冷却が維持されることで周辺環境への著しい放射能の放出や周辺の住民が過度の放射線を被ばくするような事態にならないことが確認される。

逆に言えば、これらの異常過渡や事故に対する安全評価を行うことにより、原子力発電所の安全設計の妥当性を確認することになるため、このような異常過渡や事故は設計基準事象と呼ばれている。また、安全評価においては、結果が最も厳しくなるような機器の1つが機能しないこと、すなわち単一故障を仮定する。他にも、評価に用いる様々なパラメータや特性に保守的な仮定を置き、参照する測定データなども保守側に参照するようにして、発電所全体の安全性が包括的に確保されるような枠組みとしている。さらに、安全評価には、設計の妥当性を判断するための基準が設けられているが、これら事象の発生に係る現象の解析モデルに不確かさがあることや、代表的な事象についてのみ安全評価を行うことに伴う事象の包絡性を確保する必要があることなどから、これらの基準においても保守性(安全余裕)が見込まれている。

以上をまとめると、原子力発電所の安全性は、深層防護の考え方に沿って安全設計を行い、設計基準事象を想定した安全評価によりその妥当性を確認することで確保されることになっている。このほか、原子力発電所の安全確保には、立地箇所における地域特性を考慮し、地震や水理、気象条件等を踏まえた評価や、火災や溢水に対する防護策を講じることが求められている。



第1図 深層防護の概念

V. 地震安全に関する検討

1. 基準地震動以下の場合

それでは、地震時の安全確保を、異常過渡や事故といった設計基準事象に対する包括的な安全確保と同様の論理に則して考えてみる。

まず、基準地震動は、前述のとおり滅多に発生しない程度の地震動であり、発生頻度の観点からいえば、設計基準事象の事故相当であると考えられる。この事故については、燃料の冷却が維持されていること、おおげさな言葉でいえば、発電所の他の状態はどうあれ、燃料を冷やすことさえ確保されていれば環境への著しい放射能放出を防ぐことができるというのが基本的な考え方である。

一方、耐震設計においては、このような考え方を適用することはできない。燃料の冷却に関わる設備のみが辛うじて健全で、他はどうなってもよいというような構造設計は技術的に考えられない。代わりに、安全に関わる設備は、原子力安全委員会の「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の耐震重要度分類に従って弾性範囲内であるよう、かなり保守的に設計され、それが確認される。このように、耐震設計では、設備の健全性を維持するものであるが、仮に一部の設備の健全性が失われたとしても、原子炉への冷却材注入のような安全機能が維持されれば、原子炉の安全性は確保される。したがって、現状の耐震設計は、この意味でも保守的なアプローチとなっている。

そうであるので、仮に基準地震動を受けた場合でも、燃料の健全性はもちろん確保され、原子炉圧力容器等の1次系や他の安全機能を有する設備も健全なままであると考えることができる。また、我が国の原子力発電所は、基準地震動よりもかなり小さな地震動で原子炉を緊急停止させる設計となっており、基準地震動が発生しても早期に原子炉が停止されることから、原子炉安全への影響は限定的となる。さらに、現実的には、耐震設計が設計条件となるよりは、内圧や自重に対する条件で設計が決まる場合が多く、耐震設計は、設計条件ではなく、確認事項となっている場合が多い。

このように考えると、基準地震動は、発生頻度としては事故相当の低頻度であるが、炉心の健全性維持という観点から、その際に起こる現象およびそれによる影響の程度としては異常過渡相当であると考えられる。原子力発電所の安全性は、いかに放射能放出に伴うリスクが抑制されているかという観点で検討されるべきであり、 $\text{リスク} = \text{事故の発生頻度(確率)} \times \text{影響}$ 、と表されることから、現行の基準地震動の設定と耐震設計の組合せは、リスクを十分に抑制する仕組みとなっている。

設計基準事象に対する包括的な安全確保の論理に則して地震時の安全性を考えると、論理上の弱点として、安全系の単一機器の故障ではなく複数機器の同時故障を

考える必要性と、複数基の同時被災による共用の安全系の故障が指摘される。しかし、上述のように、基準地震動までの大きさの地震動において、原子炉の安全を確保するために必要な構造物や機器(原子力安全委員会の「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する指針」における「重要度の特に高い安全機能を有する系統」に相当するもの)は、地震時の揺れに対してその健全性が維持されるよう設計、製作されるため、こうした地震時に仮に故障が起こったとしても、それは揺れによる損傷ではなくランダムな故障として捉えることができる。したがって、基準地震動までの大きさの地震動に対しては、内的事象を対象とした場合と同じように包括性をもった安全確保の論理が成り立っていると解することができる。

実際に、基準地震動に相当する地震を経験したプラントは、もちろん入念なチェックの後で再起動しているが、結果的には原子炉の安全に係る設備については何の損傷も受けておらず、技術的にはそのまま再起動することも可能であったのは、ある意味で当然であるといえる。

ただし、地震を原因として複数の異常過渡に相当する事象が同時に発生する可能性は残る。現実的には、いずれにしても原子炉は緊急停止系の動作により停止し、燃料の健全性を脅かす事態は考えられないが、論理上、これらを包括するシナリオを考え、このようなことが問題とならないことを示すことが望まれる。

深層防護の観点から見ると、基準地震動に相当する地震動を受けた場合、現実的には考えにくいですが、耐震重要度の低い幾つもの機器が機能を失い発生防止の防護レベルが破られる可能性がある。しかし、この場合においても、拡大防止と影響緩和に関わる耐震重要度の高い機器の健全性は維持され所定の機能を果たすことができるものと期待されるため、深層防護の概念が成立することになる。

2. 基準地震動を超える場合

包括的な安全評価の枠組みにおいて、設計基準事象、地震でいえば基準地震動を超えた場合には、原子炉の安全を確保するために必要な構造物や機器が同時に故障したり、あるいは、同時故障の可能性が高くなり、その影響が大きくなることが想定される。その極端な例が、いわゆるシビアアクシデントであり、炉心から放出される放射エネルギーの観点から言えば、立地評価(原子炉立地の条件としての周辺公衆との離隔に関する評価)の対象である重大事故・仮想事故に相当するような事態に至る可能性がある。シビアアクシデントに対する評価としては、確率論的安全評価(PSA)があり、シビアアクシデントの発生可能性を評価するとともに、シビアアクシデントが発生した場合の発電所内での挙動や環境に放出される放

射能の量、環境中の移行挙動、公衆への健康影響等を評価することにより、発電所の有する潜在的なリスクが推定される。PSAにより、一般に、このリスクは十分低く抑制されていることが確認されるが、リスク上重要なシビアアクシデントを特定、選定し、それへの対処策として設備の追加設置や手順書の整備などが行われている。最近では、シビアアクシデントの一部を想定し設計で対処することが求められつつある。

もちろん、基準地震動を超えたからといって直ちに構造物や機器の故障、機能喪失に至るわけではない。耐震設計における保守性、内圧や自重に対する構造設計の余裕があること、また、塑性変形に至ってもすぐに壊れるわけではないことなどを考えると、現実にはかなりの耐震上の余裕があるものと考えられる。また、仮に原子炉の安全確保に必要な構造物や機器の一部がその機能を喪失しても、原子炉を止め、冷やし、放射能を閉じ込める機能を有する設備が多数あり、また、それらが異なる区画に配置されることなどから、すべてが同時に壊れるわけではなく、これらを適切に活用することにより原子炉の安全を確保することができるものと考えられる。

しかし、国民的視点からは、仮に基準地震動を超えてもよほど大きく超えない限り大丈夫だ、というだけでは説明性に乏しいと考えられる。やはり、基準地震動を超えた場合に、原子炉の安全を確保するために必要な構造物や機器がどこまで耐えられるか(健全性を維持できるか)といった余裕の度合いを示すこと、また発電所において、どこまでの地震なら何も起こらないか、どこからどのようなことが起こるかという現象に着目したシナリオをある程度、定量的に示す努力をする必要があるだろう。

これを敷えんしていけば、いずれ著しい放射能放出を伴う厳しいシナリオになるが、合わせてそのようなことが発生する確率を同時に示していくことが重要である。これが地震時確率論的安全評価(地震PSA)であり、現在の包括的な安全評価を補完するものとして活用していくことが望まれる。また、このPSAは、耐震安全確保の方策に関する相対的な弱点やより安全性を高めるために検討すべき事項の重要性を評価するのにも有効な方法である。

3. 地震安全の論理

原子力発電所の安全確保においては、深層防護の概念と多重性、多様性および独立性の原則を適用し、まず設計基準事象を設定し、その拡大を防止し、さらに影響を緩和するための安全機能を確実に果たすことができるよう構造物や機器の設計がなされる。さらに、この設計に対し、安全評価が行われ、通常運転時、異常過渡時、および事故時に生じるそれぞれの荷重の組合せに対し原子力発電所における構造物や機器について機能上および構造上の健全性を確保、維持することで、これらの安全機

能により原子力発電所の安全が確保されることを示すことになる。この確立された安全確保の考え方を参考にすると、地震時安全確保のためには、まず設計上考慮すべき地震動、すなわち基準地震動を定めること、その地震動以下の地震動において安全機能が確実に遂行されることを担保するように適切な余裕を持たせた耐震設計を行うこと、諸所に存在する不確かさを考慮し安全評価により確認すること、というプロセスが必要である。

まず、基準地震動の策定についてであるが、原子炉の運転期間を考慮し、原子炉のリスクを十分に低く抑えるような発生頻度と大きさの地震動を設定する。その方法としては、現在行われている地震発生メカニズム等にかかる科学的調査に基づくものとするが、最近では、こうした調査に係る方法が高度化したことで、より多くの情報が得られる反面、活断層の連続性等に関する専門家の意見が多様となり、仮に、これらの意見をすべて考慮すると、時としてかなり過大な地震動を与えることにもなりかねない。そのため、地震時の安全確保の観点から適切な基準地震動を設定するには、知識および認識の不足に係わる不確かさを低減させる努力を継続するとともに、確率論的概念を導入することが必要である。

次に、耐震設計では、現在の考え方と同様、基準地震動以下の地震動に対して事故の発生防止に重点を置くことが重要であるが、拡大防止および影響緩和についても異常過渡の事故への拡大を防止するという観点から、事故の発生防止と同様に高い耐震重要度分類に位置付け、基準地震動以下の地震動に対して原子炉の安全を確保するように設計することが適切である。ただし、今後は、特に新設計炉において安全機能を担う機器構成あるいは地震への対応方策として、耐震、免震、制震といった技術を適切に組み合わせ、深層防護の概念をどのような考え方に基づいて具現化し設計に取り込むべきかを検討することも重要であろう。

基準地震動以下の地震動に対して、安全機能を担う機器の機能が設計により担保されていれば、内的事象に対する安全評価により確認された機能と同等の働きを各防護レベルの機器が果たすことから、機器の構造設計評価を行って地震時に所定の機能が確保されることを確認することで、基本的には内的事象と同様の安全評価は不要と考えられる。ただし、地震時には、耐震重要度の低い機器のいくつかと同時に損傷したり、機能を果たすことができないという事態も想定すべきであり、こうした状況を踏まえて、地震時における原子炉の挙動が内的事象に対する安全評価で対象としている事象により包絡されるか否かについて十分な検討を行うことが必要である。

基準地震動を超える地震動は、発生頻度は極めて小さいものの、その発生を完全には否定できないため、こうした地震発生時の原子炉の安全性を確認することが必要である。基準地震動を超える場合には、耐震重要度が高

い機器であっても同時に、複数の機器の機能に期待できなくなる場合も想定されることから、地震 PSA を導入することが合理的である。

地震の大きさと発生頻度は地域依存性が高いので、立地箇所の条件によっては基準地震動を超えるような地震の発生頻度がある基準よりも小さければ、そうした地震動を考慮する必要はないと考えることもできる。しかし、基準地震動を超えるような地震動に対して評価を行う場合には、安全機能を担う機器の耐力に関する余裕を定量的に把握し、実際にどの程度の大きさの地震動まで耐えられるのかをあらかじめ示しておくことが安全確保の透明性・説明性を高めるためには有効である。この2つのアプローチを含め地震 PSA を行うことにより、発生頻度と影響の両方を定量的に把握して、基準地震動を超えるような地震動に対して発電所の有する潜在的なリスクが十分に小さいことを確認することが重要である。

上に述べた地震安全の論理に沿って原子力発電所の安全を確保するためのプロセスを描いてみると第2図のようになる。この図において、太枠・太線で示したものが、地震時の安全確保に関する説明性をより一層高めるために本検討で付加した事項である。

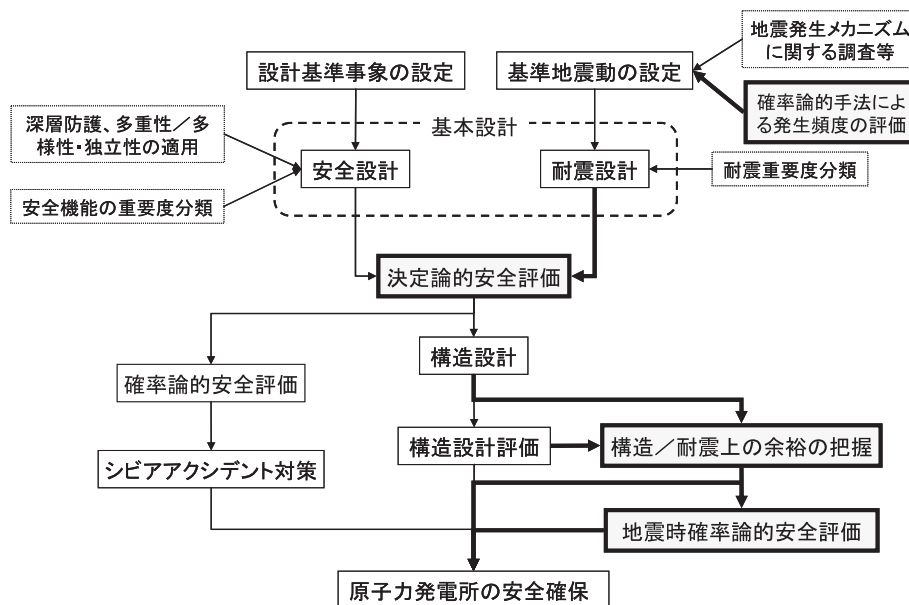
VI. まとめ

原子力発電所の地震に対する安全確保の論理を検討した。現行の地震安全に関する考え方と手法が内的事象についてと同等の一貫性と十分な包括性をもっていること、そして、深層防護の考え方が成立していることを明らかにした。また、この中で、基準地震動や耐震設計が果たしている役割と位置づけを確認した。

今後の課題として、基準地震動を超えた地震動が生じた場合に、原子力発電所において起こる現象(火災や溢水、津波などの地震随伴事象を含む)を明らかにするとともに、地震 PSA を実用化しリスクの観点から安全性を評価できるようにすることが期待される。

新設計炉においては、一部のシビアアクシデントについては設計対応を取ったり、また、免震、制震などの新しい技術が安全機能を担う機器に導入されることも考えられるため、今後も、基準地震動の策定や耐震設計方針(耐震重要度分類を含む)について見直しや検討を継続的に行うことが必要となる。

なお、本稿は、東京大学・大橋弘忠、関西電力・成宮祥介、東京電力・宮田浩一、日本原子力研究開発機構・渡辺憲夫で執筆した。



第2図 地震安全の論理に基づく原子力発電所の安全確保のプロセス

時空の創生：超弦理論から原子核へ

1. 超弦理論と素粒子

理化学研究所 仁科加速器研究センター 橋本 幸士

人類の知る数学体系の中で、すべての力と物質を統一にかつ矛盾なく記述する可能性のある唯一の理論は、超弦理論である。超弦理論は、物質と力を記述している素粒子がすべて小さな「ひも」から構成されているとする仮説である。この仮説は一つの数学体系を超え、現在では、素粒子論、宇宙論、重力理論、物性理論、そして原子核物理学へと多彩な応用がなされ、新たな基礎数学の成立へ、次元を超えた展開を見せている。本稿では3回にわたり、素粒子論、宇宙論、そして原子核物理学への超弦理論の応用を、平易な言葉で紹介する。

I. 時空とは何か？ 物質とは何か？

科学の様々な分野の中で、「人類の根源知」を探るものは何であろうか。この質問には科学者の数だけ答えがあるであろう。科学の分野は、科学的な質問の数だけ存在する。すなわち、科学的な質問に答えようとするアクティビティこそが科学なのである。ほぼ無限種類の科学的な問いの中で、古代ギリシャの昔から絶えず尋ね続けられてきた問いがある。それは、空間・時間とは何か、物質は何からできているか、そして、力とは何か、という問いである。古い問いほど重要であるというわけではないが、長く問われ続けてきていまだに解かれていない問題こそが、人類の根源知に値する科学であると考えるのは自然であろう。

3回にわたる解説では、超弦理論、ちまたには「超ひも理論」と呼ばれる数学体系が、これらの問いにどのように答えようとしているか、そして答えるプロセスにおける様々な発見を通じて、どのように周囲の物理学に革新を波及させているか、その研究の現状と興奮をみなさんにお伝えしたい。第1回は、時空や素粒子の概念からゆっくり入り、時空概念の変革を見ていくことにしよう。

1. 時空とは？

時間と空間の考え方が、1905年と1915年にアインシュタインによって完全に変革されたことはよく知られている。これらはそれぞれ、特殊相対論、一般相対論の名が

Emergence of Spacetime : From Superstrings to Nuclear Physics : Koji HASHIMOTO.

(2010年 8月2日 受理)

付けられている。実のところ、時空、すなわち時間と空間の概念は、アインシュタインの変革以降はさほど進化しているわけではない。問題が山積みなのである。大きな問題点は「重力を量子力学的に扱えない」ということであるが、それは後ほど述べることとして、まずは我々の空間と時間の考え方を見直してみよう。

「時空(spacetime)」という言葉は、時間と空間をつなげた言葉である。アインシュタインの特殊相対性理論により、時間と空間は混ざってしまうということが明らかになったため、現在では時空という用語が使われている。非常に高速で運動する系から見ると、時間の進み具合が異なって見えるという特殊相対性理論は、時間と空間を統合したと言える。

一方、1915年に発表された一般相対性理論は、重力と加速度系で感じる力は区別がつかないという「等価原理」を元としている理論であり、ここに至って「重力とは時空のゆがみである」との新しい認識がなされた。すなわち、力と時空の統一が一部完成し、時空の考え方が革新されたのである。

2. アインシュタインを超えて

このような統一の考え方は以下に徐々に解説してゆくが、その前に、アインシュタインのこれらの全く新しい空間・時間の考え方においても、既に古くから根本的に仮定され固定されているものがあることが2つあることを指摘しておこう。

一つ目は、空間の次元である。我々の空間は、3次元空間である。つまり、縦・横・高さの3つの座標を用いて、空間のあらゆる場所を指定できる。これに時間を加えて、我々は4次元時空に住んでいるという言い方もで

きる。アインシュタインの相対性理論は、我々の現実の宇宙に当てはめる場合、時空は4次元であるということを出発点(つまり仮定)としている。この次元は、古代ギリシャ時代の認識から何も変わってはいない。我々の住んでいる時空はなぜ4次元なのであろうか、という問いには、アインシュタインの相対性理論は答えてくれないのである。

もう一つは、空間とは物質をその中に入れる「入れ物」であるということである。物理を考えると、我々はまず空間を仮定し(通常は4次元時空)、その中にどのような物質を入れるかを考える。例えば太陽系の物理だと、もちろん空間は3次元であるし、物性系などでは空間が2次元もしくは1次元のこともありうる(層内の物理や導線上の物理など)。このように空間の次元を決めたあとに、そこに物質を入れる。そしてそれらの物質の物理を調べるのである。アインシュタインの一般相対性理論の基礎方程式では、左辺が重力による時空のゆがみを表す量、右辺が物質の「重さ」を測る量となっていて、それらが等しいというのが一般相対性理論の運動方程式である。どのような物質を考えるかで右辺の「重さ」が変わり、それが時空のゆがみに影響を及ぼすわけである。しかし、どのような物質を入れるかによって、入れ物自身、つまり空間自身の次元が変わるわけではない。アインシュタインの相対性理論は、どのような物質を入れるべきであるか、そして入れることによって時空次元にどのような制限がつくのかについて、全く答えてくれないのである。時空と物質が、ばらばらに扱われているのである。

唐突であるが、超弦理論はこれらの問いに部分的に答えることのできる理論なのである。どのように答えるのかの解説は、本稿の結びにもってくることにしよう。まずは、実験観測から判明している「物質」側の理解について、人類の科学の金字塔とも言うべき「素粒子の標準模型」を説明しよう。その理論の完璧さの裏には、重大な科学的問題が潜んでいるのである。

II. 人類の科学の金字塔：素粒子標準模型

1. 人類の到達した最も精密な科学

精密という言葉には魅惑的な雰囲気がある。精密機械は我々が決して目で見ることのできないスケールの仕事を成し遂げてくれる。目視の限界が0.1ミリメートルであるとすると、「原子で字を書く」といった超精密機械は想像を超える精密さを持っている。字を作る原子の大きさを1,000万分の1ミリと大雑把に近似すると、この精密機械は、精度として100万分の1、すなわち6桁の精密化を達成していると言うことができる。

それでは、人類の到達した最も精密な科学とは何であろうか。それは、素粒子標準模型の一部である「量子電磁力学」である。なんと、10桁の精度で理論値が実験値

と一致するのである。

この10桁という数字がいかに途方もないかは、さきほどの精密機械の例からも明らかであろう。この達成は理論と実験の双方の勝利であり、人類の科学の到達した一つの金字塔である。

量子電磁力学は、電子と光の理論である。電子は電荷を持っており周囲に電場を作り、その電場内に他の電子が入ると力を感じてお互いに反発する。電場とは何を隠そう光のことである。すなわち、電子が反発するという現象は、光を交換していると言い換えることができる。ここで、どのように光を交換するかを決めているのが量子電磁力学である。

「量子」と名がついているのは、電磁気学と量子力学との組み合わせであるからである。量子力学では粒子は波となり、波は粒子となる。電場のような波も量子化され、たとえば、光は粒子的に数えられる「光子」として扱われる。量子電磁気学によると、2つの電子の間の力を精密に計算するには、光子を1つ交換する力だけではなく、2つ、3つ、…と交換する力も足し上げていく必要がある。たくさんの光子を交換する力は相対的に小さくなってゆくが、それらをすべて足し上げると、精密な結果を得ることができるのである。

朝永振一郎のノーベル賞は、量子電磁力学の計算過程に発生する無限大の処理の方法の発見についてであった。光子をいくつも媒介させると、その光子がどのようなエネルギーを持っているかという可能性が無限大種類出てきてしまい、事実上計算が意味をなさなくなる。朝永は、この無限大を、電子の荷電の大きさの置き換え(「繰り込み」)で処理するという試みに成功した。この理論を「繰り込み理論」と呼ぶ。量子電磁力学はこの成功により、人類の到達した最も精密な科学として名を輝かせているのである。

2. 人類の知る物質のリスト

量子電磁力学の成功は、我々の知る精密度の限界を示しているとともに、どこまで小さな長さのスケールまで我々は科学的に知っているかという限度も示している。電子と光子は「素粒子」と呼ばれ、それ以上分割する必要性が実証科学的にまだ示唆されていない根本的な粒子である。素粒子として知られているものは他にも多数あり、それら全体は、量子電磁力学を含む理論「素粒子の標準模型」として完成されている。素粒子の標準模型は、現時点で人類が知る最も根源的な世界の姿であり、人類の科学の金字塔である。

素粒子のリストはWikipediaを見れば詳しく説明されており、その解説は本稿の目的ではない。むしろ強調したいのは、それがどのように機能しているか、そしてその問題点である。

まず、素粒子は2種類に分けられる。物質(matter)

と呼ばれる素粒子と、力を媒介する素粒子(専門的にはゲージ粒子と呼ばれる)である。前者は電子、後者は光子である。クォークやレプトンと呼ばれているものは前者であり、一方、後者としては、弱い力、強い力のそれぞれを媒介する素粒子がある。したがって、全体の構造は量子電磁力学と同じである。

次にその機能であるが、素粒子がどのようにお互いに力を及ぼしあうかを、量子電磁力学を含むある一つの物理理論「素粒子の標準模型」が規定している。発生する無限大は、朝永振一郎らが発見した繰り込み理論で処理し、結果として任意の素粒子の散乱の様子が計算される。計算された結果は、素粒子の衝突実験と比較され実証されてきた。現在まで何千何万、数えられないほどの実験が行われ、そのほとんどすべてと矛盾ない計算結果を、素粒子標準模型はたたき出している。この意味で、素粒子標準模型は完璧な科学理論である。

スイスとフランスの国境に位置する CERN(欧州原子核研究機構)では、いま、世界最大の粒子加速器「LHC (large hadron collider)」が起動し始めている。LHC は全周27キロメートルの超伝導加速リングで、陽子を人類未到達のエネルギーまで加速し衝突させる。LHC 実験は、素粒子標準模型の中で唯一発見されていない「神の粒子」ヒッグス粒子を発見することを主目的としている。はたして我々は、ほぼ完璧な素粒子標準模型の最後のピースをはめることができるのだろうか。

人類がここまで精密に科学を操れる時代が来るとは、19世紀の科学者には全く予想できなかったであろう。それでは、素粒子論は文字通り完璧なものでしょうか？我々がさらにその先を目指す理由はないのでしょうか？

3. 重力と素粒子の断絶

素粒子の標準模型は、力と物質のそれぞれに相当する素粒子を記述し、素粒子の間に働く力を計算できる。しかし実のところ、ある一つの力だけは記述できない。それは重力である。なぜ重力が含まれていないのか？その理由は、繰り込み理論の破綻にある。

重力を媒介すると考えられる素粒子は重力子と呼ばれる。光子を交換して電磁気力を電子が感じるのと同様、重力子を交換して電子が重力を感じるという状況を考えてみよう。これは、素粒子論的には良い類似的描像であろう。電磁気学と同じように重力を扱うという最も自然な考え方である。しかし残念ながら、重力子を2つ、3つと交換する過程で発生する無限大は、朝永らの繰り込み理論では処理できない無限大なのである。したがって、大げさな言い方をすると、我々はいまだ素粒子の間に働く重力相互作用を知らないのである。

重力のように基本的な相互作用の計算方法が知られていない、という文言を聞くと、信じられないかもしれない。我々は重力を操り、車の運転からスペースシャトル

の打ち上げまで、すべての操作や活動を重力の計算の仮定の下に構築している。それは事実であるが、ここで問題なのは、重力子を2つ、3つと交換する場合の数え上げから来る無限大の処理の問題なのである。量子力学によれば、粒子の場所は確率的にしかわからず、重力子がいくつも交換されるような過程では中間の重力子の状態について確率的に足し上げねばならない。このような過程が結果に効いてくるのは、量子電磁力学の場合と同じく、精密な計算のみであるはずである。実のところ、我々の生活やスペースシャトルの運行に必要なのは、重力子を一つしか交換しない場合、つまり最も大きい寄与のみの計算で十分なのである。我々はその事実にかこつけて、重力と量子力学を統合することをせずとも、数々の素粒子実験を成功させてきたわけなのだ。

しかし、この問題は概念的には科学の大問題であり、現代物理学の最も大きな問題、100年の宿題であると言っても過言ではない。重力を量子力学的に計算する方法を我々は知らない。計算結果の無限大を処理する方法を知らないのである。

朝永振一郎は、繰り込み理論は無限大を取り除く便法の一つであると言っている。朝永の謙遜かもしれないが、事実、便法が効果的な量子電磁力学もあれば、効果がない重力理論もある、ということとも採ることができる。

さて、超弦理論は、重力の無限大を生まない理論として、現在その立場を固めている。我々はいまだ超弦理論と素粒子標準模型の正確な関係を知らない。しかし、概念的に大きな問題、すなわち、重力と量子力学の不和の問題を解決することができる、大変重要な物理体系なのである。

超弦理論を出発点とすると、不思議なことに、時空と物質の間のアンバランスも解消される。時空の次元が決定され、そして物質が時空を作ったりするのである。つまり、重力と量子力学の間をとりもつ体系であることから、必然的に、時空と物質の関係を、アインシュタインを超えて、与えてくれるのである。

それでは、以下では、超弦理論と素粒子の関係をまず概観し、そして超弦理論が与える新たな時空描像について述べることにしよう。

Ⅲ. 素粒子がひも？ 時空次元の決定

1. ひもの振動と素粒子

素粒子を小さなひもと考えるのが超弦理論である。ひもは見えないほど小さいので、点粒子に見えるとする仮想理論である。これまでの話からおわかりのように、超弦理論仮説を採用する最も大きな理由は、重力と量子力学の不和を解決し、そもそも無限大の全く出ない理論体系となっている可能性が高いからである。なぜ無限大が出ないのか、そして素粒子との関係はどうなっているの

かについて説明しよう。

空間内をふわふわ動いているひもを考えたとする。自由に運動しているが、張力があるので、ふらふらと振動している。振動の種類は、空間内で振動している方向、そして振動の節の数で分類される。節の数が多くなると振動エネルギーは増大し、また空間内の振動方向が変わってもエネルギーは変わらない。さて、このひもが、我々の観測にかからないくらい小さかったとしよう。すると、それは点粒子として見え、振動エネルギーは素粒子の内部エネルギー、すなわち質量として見えるはずである。空間内の振動方向は見えないので、同じ質量を持った素粒子として扱われる。したがって、様々な質量を持ち、しかもそれぞれの質量でいくつかの種類の素粒子の系列が、一つのひもから出現する。

これが素粒子の超弦理論による表現である。素粒子のうち光子、つまり電磁場は2種類の偏向を持っているが、これらは空間内の異なる振動方向のひもとなる。そして、超弦理論の予言として、重くしかも光子と似た性質を持つ素粒子が存在しているということになる。粒子加速器の生成エネルギーが十分大きければ、この予言は検証できる。実際のところ、そのような素粒子が発見されていないということは、ひもの張力は十分大きく振動エネルギーが高いことを示している。LHCにおける実験で観測される可能性が指摘されている。

2. 重力と量子力学の仲直り

同様に、重力子もひもの振動から出現するので、先ほど問題となった重力子が2つ、3つ交換される状況を、ひもに置き換えて考えてみることにしよう。

無限大が出てくるのは、交換されている重力子のエネルギーのとり方に無限種類がありそれを足し上げないといけないからであった。エネルギー運動量が大きいということは、空間的に小さなものを見ているということである。光子のエネルギーはプランク定数に振動数を掛けたものであるが、振動数が大きければ大きいほど波長は短くなり、その光を当てて見ることのできる解像度は高くなる。ひもの理論の場合は、ひもに大きさがあるため、ある解像度までしか必要がない。すなわち、考えるエネルギーに上限があるようなものである。すると、先ほどの足し上げ可能性が限られてしまい、無限大が出なくなるのである。

言葉で説明すると、どうもひものようにふわふわと頼りないものであるが、実際は数学的に定式化されたものであり、専門的には重力子交換の1ループ振幅が有限になると呼ばれる。このように、ひもが大きさを持っているという事実が、無限大の困難を根本から除去してくれるのである。任意個のひもの交換のすべての可能性を足しても無限大が出ないという証明は(ある特殊な場合を除いて)ないのだが、個数の少ない場合の証明と、直感

的理解が相補的に助けてくれている。

このように素粒子を超弦理論のひもであると解釈すると、実は大きなボーナスがついてくる。それは、時空の次元が超弦理論によって決まってしまうということである。どのような物理理論でもこのようなことは起こらなかったが、基本的な物体が点ではなくひもであるという仮定に基づくと、数学的帰結として時空次元の制限が要請されるのである。超弦理論は仮説ではあるけれども、このことは、初めに掲げた物質と時空の不和をも超弦理論は解決する可能性があるということなのである。

3. 空間が9次元もある

我々の空間の次元は3である。3ではない場合の想像として、次元が2の場合は容易に想像がつく：例えば、紙の表面は2次元である。しかし、我々の考えている長さのスケールを適切に変えれば、我々の日常生活の空間も地球表面にとらわれているのであるから、我々の行動の空間はほぼ2次元であるとも言えよう。これは詭弁に聞こえるが、実は、物理としては本質を突いている。つまり、エネルギーを上げて宇宙ロケットを飛ばさないと、我々はそちら方向に広大に広がる空間について知る由もないのである。我々がそこに宇宙空間があることを「知っている」のは、太陽と地球が運動したりする法則が、たまたま地球上での重力の法則と同じであったからで、もしこの法則が長さのスケールによって異なっていたら、ニュートンは法則を永久に発見していなかっただろう。

このたとえ話からわかることは、我々の空間は3より大きい次元を持っている可能性もあるということである。紙をぎゅっと巻くと1本の線になる。2次元を1次元にすることができる。同様に、高次元空間をぎゅっと丸めて3次元空間にしたとしよう。エネルギーを上げてとても高い分解能の望遠鏡を作らないと、丸まった方向は見ることができない。

なぜこのたとえ話をするかということ、超弦理論はその対称性として、空間9次元を要請するからである。ここで重要なのは、9が3とはかけ離れているということではなく、物理的な要請から空間の次元が決まってしまうということである。9>3という式は、上に述べたように、われわれの物理法則を確認できるエネルギーや長さのスケールが限られているということに過ぎない可能性がある。一方、理論的に次元が決まるということは、革新的なアイデアである。

アインシュタインの特殊相対性理論は、時間と空間を同一に扱う対称性「ローレンツ対称性」を持っている。この高度に実験検証された対称性を、超弦理論にも要請したとしよう。ひもが広がりを持つことからこの対称性に制限がつき、その結果、ある時空次元でないことこの対称性が存在しないことが示される。その論理はここでは詳

細には述べることができないが、ひろがったひもという物体を理論の根本においていることから、時空次元への制限が出現するのである。

物質としての実体をまず規定すれば、それによって時空の性質、つまり入れ物としての時空とその次元が規定されるという、粒子の物理理論とは全く逆の論理が展開されている。ひもの振動で重力子が出てくると合わさって、超弦理論は、素粒子と時空次元の根源的問題を有機的に解決できる能力を持っていることがわかる。

Ⅳ. 人類が生成するブラックホール

哲学的な考察はさておき、物理学は実証の学問である。超弦理論は、重力と量子力学の不和を取り除き、無限大のない物理理論を提供するという意味で、実用的ではあるが、それでは超弦理論の検証は可能なのであろうか。

超弦理論が実証されるためには、ひもの振動モードを多数観測することが必要であろう。高い振動モードは大きな内部エネルギーを持つので、一つ上の振動モードさえ見えていない現在の実験観測の状況では、将来的な観測は難しいと考えられる。

超弦理論のほかの特徴の一つは、高次元時空である。高次元時空が観測されれば、超弦理論の観測に間接的につながると考えてよいであろう。むしろ、空間次元が3ではないということが実験観測で証明されれば、なんとスリリングなことだろう！

高次元時空はどのように観測されるであろうか。もし我々の空間が3次元ではなく、4次元であったとしよう。すると即座に、電磁気学におけるクーロンの法則が、逆2乗則ではなく逆3乗則になってしまうことがわかる。しかし一方で、量子電磁力学の精密検証からわかるように、逆2乗則は大変小さな長さのスケールまで検証されている。では高次元時空は否定されたのであろうか。

超弦理論は、ここにも全く奇想天外な答えを用意していた。次回に詳細に述べる超弦理論の「D ブレーン」と呼ばれる仮想的な膜を考えると、電磁気力は3次元空間を伝播するが、重力は高次元空間を伝播するような状況が自然に実現されるのである。実のところ、重力の逆2乗則は、0.1ミリメートル以上までしか検証されておらず、それより小さい長さスケールでは破れているかもしれないのである。力によって感じている次元が異なるという考え方は、超弦理論が与えた数理の中で最も面白いものの一つであろう。

重力だけが高次元時空を伝播できると、奇想天外なことが起こる。時空次元が異なると、重力定数(重力の逆2乗則に登場する定数)も全く値が異なってしまう。プランク定数とも言われるこの定数は、通常は粒子加速器では全く到達できない非常に大きなエネルギースケールを持つが、高次元空間だとそれが、我々の手に届くエネルギースケールまで落ちてくるのである。すると、重力に特徴的な現象が、粒子加速器で発生する可能性が出てくる。それはブラックホールの生成である。

銀河中心や超新星爆発の残骸にはブラックホールがあると考えられているが、その生成にはとんでもない量のエネルギーを要するのは明らかである。しかし、重力定数がまったく違った値であると、ブラックホールは簡単に生成されることになる。高次元が存在すれば、その一つの観測可能性として、粒子加速器LHCで小さなブラックホールが生成されるということが研究者の間で活発に議論されている。これは、SFではなく、先端の素粒子物理学の行き着いた物理的予言なのである。

小さなブラックホールが生成されたからといって、地球が飲み込まれる心配はしなくてよい。小さなブラックホールはすぐに蒸発してしまい、たくさんの素粒子が放出されて最後を迎えるからである(ホーキング放射)。CERNのホームページにはこのような懸念に対する科学的な解説が掲載されているので、興味のある方は覗いていただきたい。懸念がここまで大きく話題になっているのは、高次元時空がSFではなく素粒子物理学の未来と科学的に直結する可能性があり、研究者が真剣に討論しているからである。

LHCが最高エネルギーに到達するのは、うまく行っても後2年は必要らしい。最高エネルギーで陽子が衝突したとき、いったい何が起こるのか、全世界の素粒子物理学者が固唾を呑んで見守っている。

—参考資料—

- 1) 橋本幸士, D ブレーン: 超弦理論の多次元物体が描く新しい世界像, 東京大学出版会, (2006).

著者紹介

橋本幸士(はしもと・こうじ)



理化学研究所・仁科加速研究センター
(専門分野/関心分野)超弦理論とその応用, 素粒子論, 量子場の理論。

連載
講座実験炉物理：未来へのメッセージ
次世代の安全基盤の確立に向けて

第4回 NCA における臨界実験

(株)東芝 三橋 偉司

I. 概要

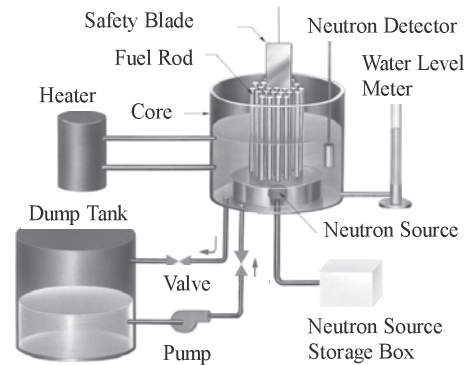
東芝臨界実験装置 NCA は1963年の初臨界以来現在まで、軽水炉燃料の開発、解析コードの検証および制御棒等の中性子吸収材の開発を中心に運転を継続している。以下、それら技術開発のために NCA で行った近年の代表的な臨界試験および試験対象の模擬のため、新たに導入した試験用具等を紹介し、最後に将来の利用計画を述べる。

II. NCA の概要

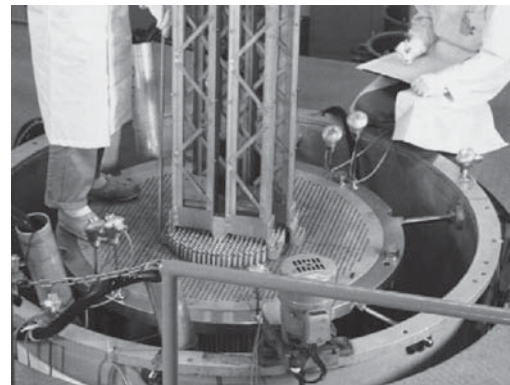
1. 運転手順

NCA 装置の概要, NCA 炉心の例を第1, 2図に示す。また, NCA の主要な仕様を第1表に示す¹⁾。NCA は低濃縮二酸化ウランペレットをアルミニウム被覆管に充填した燃料要素(燃料棒)を使用する。炉心は、炉心タンク中に設置した炉心支持枠に取り付けた上下1対のグリッド板(燃料格子板)に燃料棒を一定間隔に配置して構成し、炉心タンクに給水して、水位を調節することにより運転する。

通常の起動と運転は、中性子源を炉心に挿入した後、安全板を電動機駆動によって引抜き、炉心タンクへ給水して行う。停止は安全板を炉心に挿入するか、炉心タンク水をダンプタンクへ排出することにより行う。運転は、短時間でかつ低出力(最大熱出力200 W)で行われ、実質上発熱はなく、冷却設備は不要であり、核分裂生成物の蓄積は無視できる。緊急停止は安全板を炉心内に自由落下するとともに、炉心タンク内の水を急速排水することにより行う。



第1図 NCA 装置の概要



第2図 NCA 炉心の例

第1表 NCA の主要な仕様

タイプ	軽水減速非均質タンク型
UO ₂ ペレット濃縮度	1～5 wt%
ガドリニア入り UO ₂ ペレット	0.1～15 wt%
臨界実効水位	～150 cm
炉心 水対燃料体積比	0.2～3.0
格子	正方, BWR, 稠密

2. 特徴

炉心の格子配列は、水対燃料体積比等が広範囲に変えられるように多種類の燃料格子板を有し、任意の炉心形状で臨界実験ができるよう設計している。NCA は濃度 0.1～15 wt% の中性子毒物ガドリニア入り燃料棒も多数所有し、軽水炉で使用されるガドリニア入り燃料集合体およびそのガドリニア自体の特性に関する模擬実験が可能である。また、炉心外部のヒーターを用いることによ

Experimental Reactor Physics "Past, Present and Future"
—Towards Establishment of Safety Basis in Next Generation (4); Critical experiments in NCA: Ishi MITSUHASHI.

(2010年 6月29日 受理)

各回タイトル

第1回 KUCA における炉物理実験

第2回 臨界安全と未臨界度測定

第3回 実機炉心における実験炉物理手法開発

り、減速材温度は80℃まで昇温できる。

Ⅲ. 近年の試験研究

1. 軽水炉燃料開発と設計コード検証

(1) BWR STEP 3 燃料の臨界試験

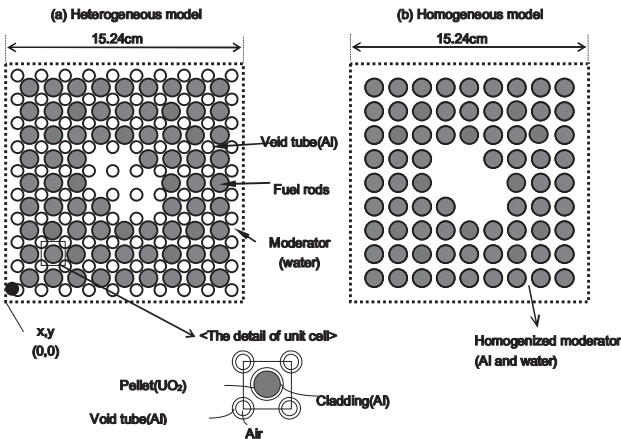
BWR STEP 3 A 型燃料²⁾の径方向における水ロッド配置の反応度効果および出力運転時の沸騰ボイド模擬の NCA 臨界試験および解析によるコード検証を行った³⁾。

ボイド模擬試験では、第 3 図に示すように、ボイド管を使用し、ボイド管を模擬した非均質モデルとボイド管と減速材を均質化した均質モデルで、モンテカルロコード MCNP-4A⁴⁾を用いて解析を行った。実効増倍率を第 2 表に、径方向出力分布の試験結果との比較を第 4 図に示す。

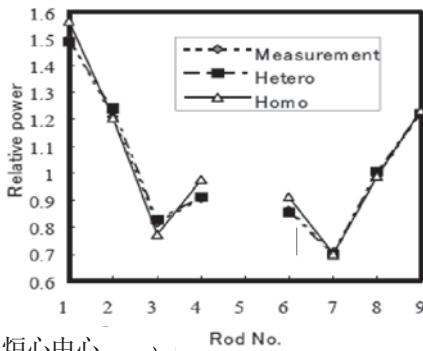
また、BWR STEP3-A 燃料の特徴である部分長燃料 (PLR) に関し、PLR と PLR に隣接する全長燃料棒の軸方向出力分布を測定し、第 5 図に示す結果を得た。

(2) 低減速 BWR 燃料の臨界試験

第 6 図に示す炉心体系で低減速 BWR 燃料の臨界試験を行った⁵⁾。図中のボイド模擬領域には、模擬するボイド率と同一の水素個数密度となるように発泡度を調節したポリスチレンを軸方向に挿入している。



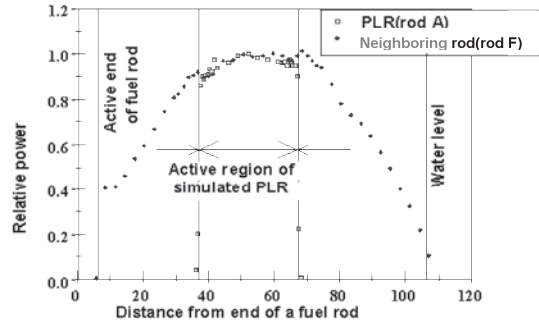
第 3 図 MCNP 解析でのボイド管形状等の取扱い



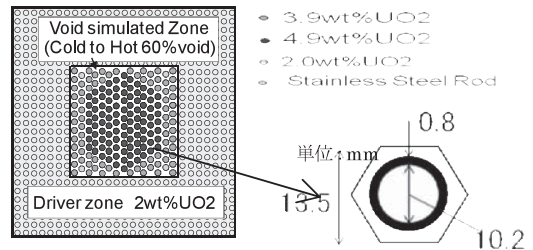
第 4 図 バンドル対角線方向の相対出力分布

第 2 表 MCNP による実効増倍率の計算結果

計算モデル	総ヒストリー (発生数×サイクル)	実効増倍率
非均質	16,384×150	0.9918±0.0005
均質	16,384×120	0.9901±0.0005



第 5 図 部分長燃料とその近接燃料棒の軸方向出力分布



第 6 図 低減速 BWR 燃料の試験炉心

この試験の特徴は以下に定式化している修正転換比法に基づき、有限体系での局所的な中性子増倍率 k^* を測定により求めている点であり、最終的に得られるボイド係数を設計コードと比較した。

k^* は次のように定義される。

$$k^* = \int S(r) dr / \int A(r) dr \quad (1)$$

ここで、 $S(r)$: 位置 r での中性子生成率

$A(r)$: 位置 r での中性子吸収率

k^* は中性子が漏えいしない条件では k_∞ と同一である。 k^* は試験炉心の各燃料棒に対して定義でき、 UO_2 燃料棒の単一セルに対して、次の通りとなる。

$$S(r) = (\nu \Sigma_f(r) \phi(r))_{25} + (\nu \Sigma_f(r) \phi(r))_{28} = \nu_{25} (\Sigma_f(r) \phi(r))_{25} \{1 + (\nu_{28}/\nu_{25}) \delta_{28}\} \quad (2)$$

$$A(r) = (\Sigma_f(r) \phi(r))_{25} (1 + \alpha_{25}) + (\Sigma_f(r) \phi(r))_{28} + (\Sigma_c(r) \phi(r))_{28} + (\Sigma_a(r) \phi(r))_{NF} \quad (3)$$

ここで、 $(\nu \Sigma_f(r) \phi(r))_{25}$ は ^{235}U の中性子生成率
 $(\nu \Sigma_f(r) \phi(r))_{28}$: ^{238}U の中性子生成率
 $(\Sigma_f(r) \phi(r))_{25}$: ^{235}U の核分裂率
 $(\Sigma_f(r) \phi(r))_{28}$: ^{238}U の核分裂率
 $(\Sigma_c(r) \phi(r))_{28}$: ^{238}U の中性子吸収率
 $(\Sigma_a(r) \phi(r))_{NF}$: 燃料以外の物質の中性子吸収率

$$\delta_{28} = (\Sigma_f(r) \phi(r))_{28} / (\Sigma_f(r) \phi(r))_{25}$$

$$\alpha_{25} = (\Sigma_c(r) \phi(r))_{25} / (\Sigma_f(r) \phi(r))_{25}$$

である。

修正転換比 C は次のように定義され、

$$C = \frac{(^{238}\text{U capture reaction rate})}{(\text{total fission rate})}$$

$$= \frac{(\Sigma_c(r) \phi(r))_{28}}{\{\Sigma_f(r) \phi(r)\}_{25} + \{\Sigma_f(r) \phi(r)\}_{28}} \quad (4)$$

最後に、 $k^*(r)$ は C を用い、次の通り求められる。

$$k^*(r) = S(r)/A(r)$$

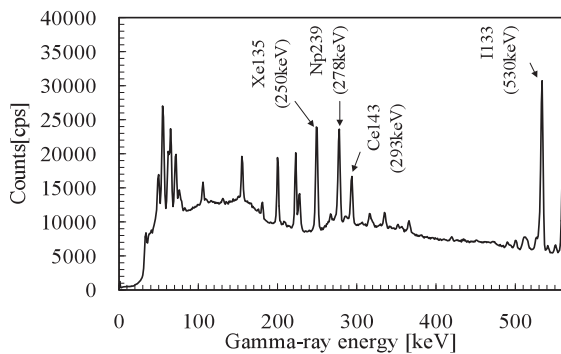
$$= v_{25} D_{28} / \{1 + C + R / (1 + \delta_{28})\} \quad (5)$$

$$R = \alpha_{25} + \{(\Sigma_a(r) \phi(r))_{NF} / (\Sigma_f(r) \phi(r))_{25}\}$$

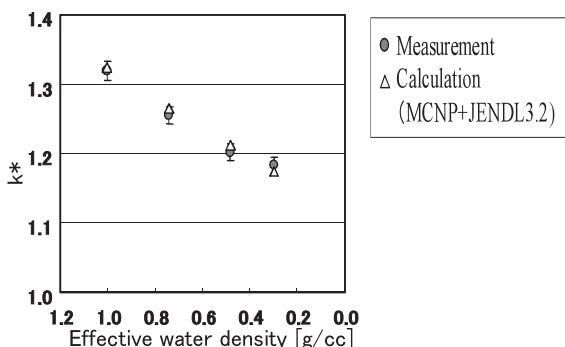
$$D_{28} = 1 + \{(v_{28} - v_{25}) / v_{25}\} \{\delta_{28} / (1 + \delta_{28})\}$$

第7図は第6図の炉心において、数10 W × 数10分の照射運転をNCAで行い、取り出した中央の燃料棒に対するガンマ線スペクトルをHigh-Purity Ge検出器で測定した例である。(5)式の²³⁸Uの中性子吸収率は²³⁹Npの、²³⁵Uと²³⁸Uの全核分裂率は幾つかの核分裂生成物のガンマ線強度から測定できることがわかる。

第6図の試験炉心において、ボイド率0, 35, 60%に対応する水素個数密度のポリスチレンを使用し、第6図に示す炉心中央の燃料棒の修正転換比を各試験で測定し、得られた k^* をモンテカルロコードによる計算結果と合わせ第8図に示す。冷温と沸騰ボイド60%間のボイド係数は $0.20 \pm 0.02\% dk/k/\% \text{ボイド}$ であり、計算値 $-0.22\% dk/\% \text{ボイド}$ とよく一致し、現行コードの低減速BWR燃料設計への適用性を確認することができた。



第7図 照射燃料棒のガンマ線スペクトル測定



第8図 k^* 測定値および計算値との比較

(3) 運転時のPWR条件を模擬した臨界試験

第9図は運転時のPWR条件であるホウ素入り減速材を模擬するNCA臨界試験炉心である⁶⁾。炉心中央の濃縮度4 wt%と5 wt%燃料棒からなる正方部分がテスト領域であり、この部分に第10図に示すボロン入りポリスチレンを軸方向に挿入している。ポリスチレンはPWRの高圧高温下の減速材密度および運転サイクル内で変化するホウ素濃度範囲を模擬し、製作できる。

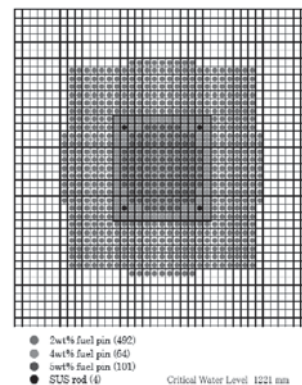
事前のボロン入りポリスチレンの設計のための解析、製作後の試験および解析の結果から、PWR運転時のホウ素入り減速材の模擬は適切であり、ボロン入りポリスチレンを用いたPWR炉心燃料の臨界試験は有用であることが明らかとなった。

2. 次世代軽水炉のための濃縮度5 wt%超燃料

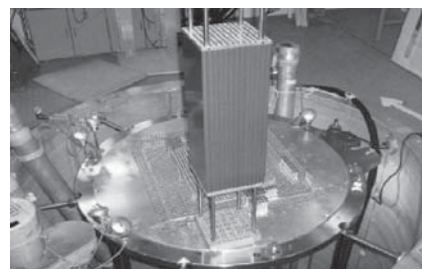
(1) 5 wt%超燃料の臨界安全性のための微量ガドリニア

微量ガドリニア入り燃料は、集合体平均取出燃焼度70 GWd/t以上を目指す濃縮度5 wt%超燃料(以下、5 wt%超燃料)において、燃焼サイクル末の反応度損失なしに、特に燃料サイクルフロントエンドでの臨界安全管理を濃縮度5 wt%以下燃料と同等とすることを目的とし、微量のガドリニアを燃料粉体に混合する⁷⁾。

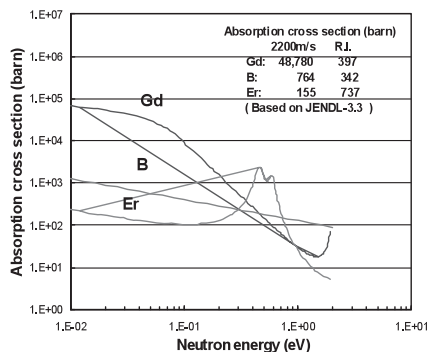
微量毒物の候補となる元素は熱中性子吸収体ガドリニウムのほか、熱外中性子吸収体エルビウムや $1/v$ 吸収体ホウ素が考えられるが、それらの吸収断面積を第11図に示す通り、臨界安全管理ではガドリニウムが最も効果的であり、上記の目的に合致すると考えられる。



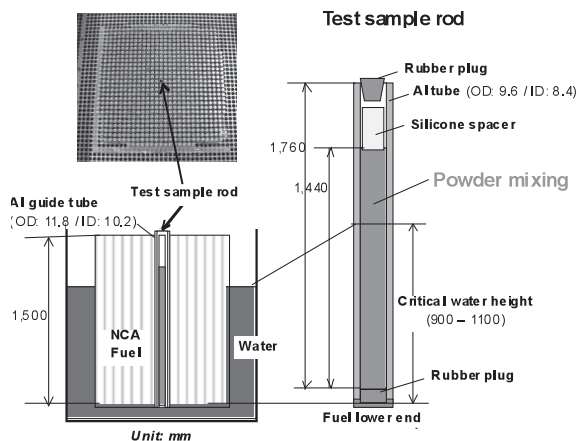
第9図 PWR 模擬臨界試験炉心 (ホウ素500 ppm 模擬の例)



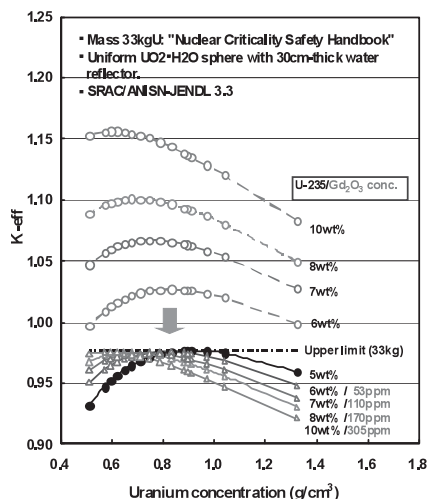
第10図 ホウ素入りポリスチレン



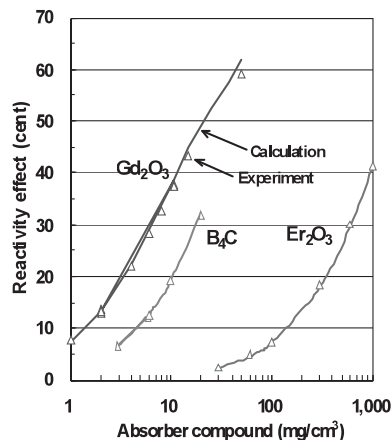
第11図 Gd, Er および B の中性子吸収断面積



第13図 微量ガドリニア効果の臨界試験炉心



第12図 5 wt%UO₂と同じ臨界質量となるガドリニア濃度



第14図 吸収効果の測定と解析の比較

第12図は5 wt%超燃料の UO₂粉体の臨界質量33 kg を固定し、30 cm 厚水反射体付き UO₂-水均質球体系の実効増倍率を、U 濃度を横軸に示したものである。また、濃縮度 6, 7, 8, 10 wt% では同一球体系で実効増倍率を同様に求めた後、各濃縮度での最大の実効増倍率が 5 wt% での最大値と同一となるようガドリニアを混合し、その濃度を求めて示したものである。

第12図から、濃縮度 6~10 wt% の UO₂粉体において、5 wt% と同一重量で質量管理を行うためには、濃度 50~300 ppm の微量ガドリニアを混合すればよいことがわかる。

この考え方は質量管理のほか、形状寸法管理など他の臨界安全管理方法にも適用可能であり、また、粉体のほか、ペレット、燃料棒および燃料集合体のすべての燃料形態にも適用できる。なお、全 BWR 燃料集合体には燃焼サイクル中の過剰反応度を抑制する数 wt%濃度のガドリニア入り燃料棒が含まれ、また、微量ガドリニアは燃焼サイクルの初期に消滅することから、微量ガドリニアは燃料の燃焼全期間の最大反応度に影響しないため、BWR 燃料集合体の臨界安全管理に新たな影響はない。

(2) 微量ガドリニア効果の臨界試験

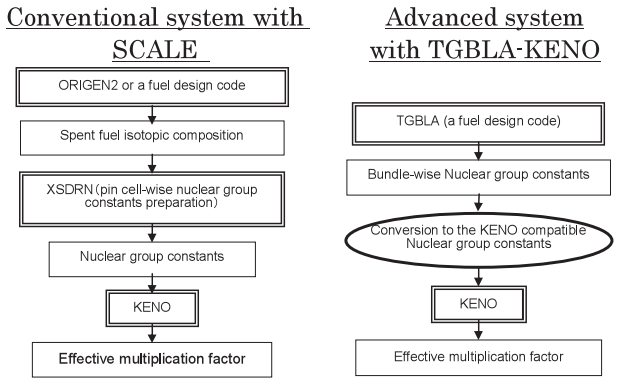
第13図は水対燃料体積比1.5の格子で、29×29燃料棒配列の中央に、炭素粉にガドリニア、エルビアおよびボ

ロンカーバイド粉のそれぞれを、濃度を変えて混合させた試験粉体を充填したテストサンプル棒を配置した NCA 臨界試験炉心を示したものである⁸⁾。試験炉心では各吸収体の各濃度に対する臨界水位を測定し、修正 1 群理論より、測定した水位反応度係数を基に中性子吸収体がない炭素粉の場合に対する反応度効果を求めた。第14図には得られた反応度を、横軸を中性子吸収体濃度の対数とし、核データライブラリー JENDL-3.3 を用いた SRAC コードシステム⁹⁾による解析結果と合わせて示した。解析結果は実験をよく再現し、また、ガドリニアは他の中性子吸収体に比べ、極めて高い反応度があり、臨界安全管理での利用に効果的であることがわかった。

3. 臨界安全設計

(1) 燃料設計コードと SCALE を組合せた新設計法
使用済燃料輸送や貯蔵体系の臨界安全設計に合理的に燃焼度クレジットを取り入れる手法を考案した¹⁰⁾。

第15図左に使用済燃料体系の臨界安全設計に燃焼度クレジットを取り入れる場合の SCALE システムを用いた従来型の臨界安全設計方法を示す。この方法では評価した使用済燃料組成および臨界計算の両者に対して保守性を考慮することとなるが、特に、使用済燃料組成評価に



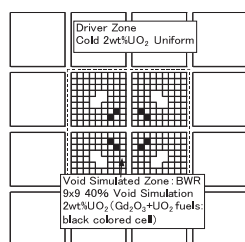
第15図 燃焼度クレジットを取り入れる従来および新設計方法

誤差を保守的に考慮するためには多くの使用済燃料の照射後試験を実施し、使用済燃料中のアクチニドおよび核分裂生成物ごとに核種組成を測定する破壊試験が必要となる。したがって、それらの設定のための破壊試験の時間や費用が莫大なため、試験データは乏しく、核種組成の設定は極めて保守的であるか、設定自体が困難な状況にある。

一方、第15図右には燃料設計コード TGBLA¹¹⁾と SCALE コードシステム¹²⁾を組み合わせた臨界安全設計方法を示す。新設計方法は設計コードが評価する群定数を直接、SCALE 中のモンテカルロ臨界計算コード KENO に引き渡すことが特徴である。燃料設計コードが評価する炉心計算用群定数は商用軽水炉の炉心燃料設計および管理で十分な実績があるほか、商用軽水炉では多くの冷温臨界試験が行われている。したがって、群定数の誤差評価が冷温臨界試験解析により可能であり、使用済燃料組成および臨界計算の両者に対する誤差が一度に、一括して評価できる。

第16図はこの原理を確認するための NCA 臨界試験炉心である。TGBLA により燃料集合体ごとの群定数を算出し、KENO により実効増倍率を評価し、得られた実効増倍率は 0.9965 ± 0.0005 となった。

定数を集合体平均としているものの、この実効増倍率の誤差は $0.3 \sim 0.4\% \Delta k$ 程度であり、新設計方法の基本的な妥当性が評価できたが、今後、実用化を図るためには、商用軽水炉の冷温臨界試験の解析を行い、精度を確認し、誤差評価を行うことが望まれる。



第16図 新臨界安全設計法の検証試験炉心

IV. 将来の利用計画

以上、NCA は1963年の初臨界以来現在まで、軽水炉燃料の開発、解析コードの検証および制御棒等の中性子吸収材の開発を中心に試験研究を行ってきたが、現有および次世代軽水炉の特徴を模擬するボイド管、発泡ポリスチレンおよびボロン入りポリスチレン等の冶具や格子板、微小反応度測定用パイルオシレータ、反応度計等を試験目的に応じて新たに製作、導入し、試験範囲の拡大や模擬方法の改良を行ってきた。また、微量ガドリニアや低減速 BWR の臨界実験を速やかに行う等、解析と実験を連携し、新技術の開発やその実用化を図ってきた。

未臨界体系や燃料単体に対する未臨界度や燃焼度の測定に関する NCA での試験研究は割愛したが、これら分野も含め、NCA は今後も運転を継続し、臨界実験技術を向上させ、原子力利用の根幹をなす炉心燃料の核特性および臨界安全性に関する技術開発に貢献していく。

—参考資料—

- 1) I. Mitsuhashi, *et al.*, "Renewal of nuclear instrumentation and control panel of Toshiba Nuclear Critical Assembly NCA," Yayoi Conference on Operation, Management and Refinement of Research Reactors, UTNL-R 0459, p.4.1-4.6, Nuclear Professional School, School of Engineering, The University of Tokyo, May 12, 2007, (in Japanese).
- 2) Toshiba Corporation, "Boiling Water Type Nuclear Power Plant 9 × 9 Type fuel," TLR-057 Revision 1, (1998), (in Japanese).
- 3) T. Kikuchi, *et al.*, "Critical Experiments on Simulated BWR High - Burnup 9 × 9 A - Type Fuels," Int. Conf. on the Physics of Reactors (PHSOR 96), Vol.2, pp.C-192 - C-199, Mito, Ibaraki, Sept. 16-20, 1996.
- 4) J. F. Briesmeister, Ed., MCNP-4A General Monte Carlo N-Particle Transport code, Version 4 A, LA-12625, (1993).
- 5) K. Yoshioka, *et al.*, "Critical Experiments on Reduced-Moderation BWR : BARS—Reactivity Coefficients Measurements," 2003 Int. Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 03), Córdoba, Spain, May 4-7, 2003.
- 6) T. Umamo, *et al.*, "Critical Experiments Simulating the Operating Conditions of PWRs in the Toshiba NCA Facility," Proc. ICAPP'09, Tokyo, May 10-14, 2009, (2009).
- 7) K. Yoshioka, *et al.*, "A Minimal-Content Gadolinia in Above-5wt% Enrichment Fuel for Criticality Safety in Next-Generation LWR," Advances in Nuclear Fuel Management IV (ANFM 2009), Hilton Head Island,

- South Carolina, USA, April 12-15, 2009.
- 8) T. Kikuchi, *et al.*, "Critical Experiments on Minimal-Content Gadolinia for Above-5wt% Enrichment Fuels in Toshiba NCA," *Proc. ICAPP'09*, Tokyo, May 10-14, 2009, (2009).
- 9) K. Okumura, K. Kaneko, K. Tsuchihashi, "SRAC 95: General Purpose Neutronics Code System," JAERI Data /Code 96-015, (1996).
- 10) K. Yoshioka, *et al.*, "Advanced Method for Criticality Safety Analysis Coupled with KENO and a Fuel Design Code," 8th Int. Conf. on Nuclear Criticality Safety (ICNC 2007), Vol. II, pp. 1-5, St. Petersburg, Russia, May 28-June 1, 2007.
- 11) M. Yamamoto, *et al.*, "Development and Validation of

- TGBLA Lattice Physics Methods," *Proc. ANS Topical Mtg. on Reactor Physics and Shielding*, Chicago, Illinois, USA, Sep. 17-19, 1984. Vol.1, p 364 (1994).
- 12) ORNL-RSIC, "SCALE 4: A Modular Code Systems for Performing Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation", CCC-545, (1990).

著者紹介

三橋偉司(みつはし・いし)



(株)東芝 電力システム社
(専門分野/関心分野)原子炉物理, 臨界実験, 臨界安全, 放射線防護, 原子燃料サイクル

新刊紹介

Nuclear Reactor Physics Experiments

Tsuyoshi Misawa, Hironobu Unesaki, Cheolho Pyeon 著,
130 p. (2010), 京都大学学術出版会. (定価3,465円)
ISBN 978-4-87698-959-1

著者の三澤毅, 宇根崎博信, 卞哲浩は, 京都大学原子炉実験所の教員で, 原子炉物理の第一線の研究者である。本書は京大炉臨界集合体実験装置(KUCA)を用いて, 毎年実施される大学院実験の英語版テキストである。この大学院実験は1975年に開始され, 今年で3,000名を越える修了者を数える。特に2003年から韓国, 2005年からはスウェーデンの大学院生を受け入れ, これまでに前者は117名, 後者は42名の実績がある。こうした成果により, 2007年3月に日本原子力学会貢献賞, さらに2009年4月には歴史構築賞を受賞したので, 記憶に新たな方も多いと思う。

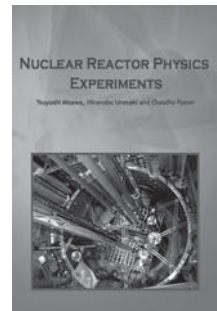
チェレンコフ光を想起させる綺麗なブルーの表紙を開くと, KUCAを詳細に紹介した序章に続き, 原子炉物理の基礎中の基礎の臨界近接および制御棒校正, これら炉物理実験を支える反応率測定(中性子計測)に, 最初の3章があてられ

ている。この章には, (1)実験の目的, (2)実験の原理, (3)具体的な実験手順, (4)討論のポイント, (5)事前学習項目が, 整然と記載されている。実験手順に即した記述で「測定される物理量とは何か? それは炉物理の教科書で説明されている物理量と, どのような関係にあるのか?」への理解が深まることを狙っている。こ

の測定値と理論値の重要な関係は, 一般の炉物理の教科書では触れられることが少ない。残りの2章は, 動特性測定法の定番であるファイマン α 法とパルス中性子法にあてられ, 測定原理からデータ処理まで大変わかりやすく記述されている。

20年以上も昔になるが, 商社勤務の卒業生から「臨界集合体を東南アジアに輸出する商談があり『どんな実験が出来るのか?』と先方から質問が来ているのですが…」と突然電話, 「君は京大炉の大学院実験に参加した? その内容が役立つのでは。」と私。この商談はまともじゃなかったようだが, 海外展開がますます重要視されるこれからの原子力を考えると, 京大炉大学院実験の粋を凝らした本書を手元に置くことは, ささやかではあるが将来への確かな投資である。

(名古屋大学名誉教授・山根義宏)



連載
講座ICRP 新勧告
—新しい放射線防護の考え方と基準

第8回(最終回)環境の放射線防護

放射線医学総合研究所 酒井 一夫

I. はじめに

国際放射線防護委員会(ICRP)が2007年に改訂した勧告¹⁾の中で、主勧告としては初めて「環境の防護」が取り上げられた。また、これを受ける形で「標準動植物の概念と適用」²⁾が発表され、放射線の環境防護の枠組みが提示された。しかしながら一方で、すでに確立されているヒトを対象とした防護体系との関係の中で、環境の防護をどのように位置づけるかについての議論が続いている。

本稿では、主としてICRPの動きを中心に、環境の放射線防護の現状と今後の課題を紹介したい。

II. 環境の放射線防護をめぐる動向

人間の活動が環境に与える影響への関心が高まる中で、1990年代に国際原子力機関(IAEA)³⁾や国連の原子放射線の影響に関する科学委員会(UNSCEAR)⁴⁾が環境中のヒト以外の生物に対する放射線の影響をまとめた報告書を発表した。

これらの報告書が刊行された時点で最新であったICRPの主勧告(1990年勧告⁵⁾)には次の記述がある。

「委員会(ICRP)は、現在望ましいと考えられている程度に人を防護するのに必要な環境管理の基準は、他の生物種をリスクにさらさないことを保証するものと信じている。たまたま、ヒト以外の種の個体に障害を生ずるかもしれないが、その種の全部を危険にさらしたり、あるいは種の間には不均衡を生ずるほどのものではないである

う。現在のところ、委員会は、人類の環境については環境を通じての放射性核種の移行に関してのみ関心をもっているが、それは、これが直接に人の放射線防護に影響するからである。」(パラグラフ16)(訳は日本アイソトープ協会編『国際放射線防護委員会の1990年勧告』(平成3年)⁶⁾による。傍点筆者)

すなわち、「人間が防護されていれば環境生物も守られている」という考え方であり、「環境生物は、環境中の放射性物質がヒトへ至る経路である(経路でしかない)」という受け止め方であった。しかしながら、環境問題への関心の高まりと、これを受けて、前記国際機関からの報告書が刊行される状況の中で、放射線防護に関しても環境への配慮が求められ、単に信じたり、憶測するのではなく、環境中のヒト以外の動物種がきちんと防護されていることを明確に示す仕組みの構築が必要となった。ICRPでは2000年にタスクグループを立ち上げ「ヒト以外の生物種に対する電離放射線のインパクト評価の枠組み」(Publication 91, 2003年)⁷⁾と題する報告書を発表した。この取組みの重要性が改めて認識されて、環境の防護を担当する委員会として第5委員会が設置された。

2007年勧告は環境の防護に関心が集まるようになってから初めての主勧告である。この勧告の中では、ICRPの主勧告としては初めて、しかも独立した1章として環境の防護が取り上げられている。分量としては2ページ余りではあるが、放射線防護の対象を環境(ヒト以外の生物種)へも広げたという点では画期的なことと言えよう。

環境の防護の目的としては、(1)生物の多様性を維持し、(2)生物種を保存し、(3)生態系の健全性を保護することが掲げられており、各国の規制当局は、環境が防護されていることを明確に示すことが求められている。このためには、環境中の放射性物質への曝露と被ばく線量(あるいは線量率)との関係、被ばく線量と生物作用の関係、そして生物作用と個体や個体集団への影響との関係を評価する枠組みが必要となる。環境防護の枠組みを考える上でのツールとして提案されているのが「標準動植物」の概念である。

New ICRP Recommendation—New Radiation Protection Principle and Standards(8); Protection of the Environment:
Kazuo SAKAI

(2010年 9月3日 受理)

各回タイトル

- 第1回 放射線防護の歴史的展開
- 第2回 放射線防護の生物学的側面
- 第3回 放射線防護に用いられる諸量
- 第4回 放射線防護の基礎—防護体系と原則
- 第5回 計画被ばく(線量拘束値, 履行)
- 第6回 緊急時被ばく
- 第7回 現存被ばく状況

III. 標準動植物の概念を用いた環境防護の枠組み

1. 「標準動植物」とは

ヒトの放射線防護の場合には、外部被ばくおよび体内に摂取された放射性核種による内部被ばくの評価にあたって、解剖学的生理学的モデルである「標準人(Reference Person)の概念が導入され、用いられている。これと同様の考えに基づいて「標準動植物(Reference Animals and Plants)」の概念が導入された。

標準動植物は、分類学上、同一の「科」に分類される生物種に共通する生物学的な特性を有する仮想的な存在として定義されている。これらは、線量評価、影響評価のための基礎的情報を提供するために導入された概念であり、生物種の名称は与えられているが、これらの動植物を現実の防護の対象にしようとするものではない。

2007年勧告の中では、「標準動植物」の概念は導入されたものの、具体的にどのような動植物を想定しているのかに関する記載はなかった。標準動植物が姿を現すのは、その後、2009年に Publication 108として発表された報告書「環境の放射線防護：標準動植物の概念と適用」⁸⁾の中でのことであった。この報告書の中で選定されている標準動植物は第1表に掲げた12種である。

標準動植物の選定にあたっては、生物の様々な生息環境(陸上、淡水、海水)をカバーすることや、放射線影響に関する情報がすでに存在するか、これまでの化学物質などによる環境汚染防止の枠組みの中で対象として取り上げられているか、などが考慮されているが、これに加えて「生物学の専門家以外の人にとってなじみがあるか」に重きが置かれている。

標準動植物12種が発表されると、「爬虫類が入っていない」、「水棲哺乳類が入っていない」、「どうしてバナナが入っていないのか」といった個々の生物種に対する思

いが込められた反響があったが、標準動植物はあくまでも「ひながた」である。これを用いて展開されている線量評価、影響評価の枠組みを、個別の環境にふさわしい動植物に適用してほしいというのが、標準動植物導入の意図である。

また「環境中の炭素循環、窒素循環の中で重要な役割を果たしている微生物が含まれていない」といったコメントも寄せられた。「12種の標準動植物は、必ずしも生態学的に重要な位置づけの生物種を選んだわけではない。環境の防護という新しい概念を導入し、普及させるには、これまでヒト以外の生物の防護など考えもしなかった一般の人々や規制担当者にも、まずはなじみのある生物で例を見せ、理解してもらうことが重要だ」(Pentreath 第5 専門委員会委員長)という考えに基づいている。

2. 線量評価

線量評価にあたっては、それぞれの標準動植物について形態を幾何学的に単純化したモデルを当てはめる。例えば「シカ」(第1図)の場合には、径は130 cm×60 cm×60 cmの回転楕円体で、重量は245 kgとして定義する。放射性核種が体内に均一に分布すると仮定した内部被ばくと、周囲の環境中の核種による外部被ばくを考慮した上で、放射性核種濃度と被ばく線量率の関係を示す「線量換算係数」が計算されている。また、「カレイ」の場合には、長径40 cm、短径25 cm、厚さ2.5 cmの楕円形の円盤が海底の堆積物上に位置し、海水中の放射性核種から50%、堆積物中の核種から50%の割合で被ばくすると仮定して評価する。

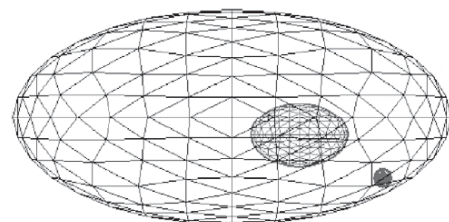
Publication 108には、このようにして75核種について算定した「線量換算係数」がすべての標準動植物について表にまとめられている。種によってはその発育段階も考慮されている。例えばカエルの場合には、卵、オタマジャクシ、成体のそれぞれについて計算されている。

3. 影響評価と誘導考慮参考レベル

ヒト以外の生物種の場合に評価すべき影響指標としては、寿命の短縮(早期死亡)と繁殖能力の低下およびこれらにつながる健全性の喪失や遺伝的影響が想定されている。すべての標準動植物について、詳細なデータがそ

第1表 標準動植物

標準動植物	生息環境		
	陸上	淡水	海水
シカ	○		
ラット	○		
カモ	○	○	
カエル	○	○	
マス		○	○
カレイ			○
ミツバチ	○		
カニ		○	○
ミミズ	○		
マツ	○		
草木(イネ科)	○	○	
褐藻			○



第1図 標準「シカ」モデル

内部の回転楕円体は肝臓の、球は生殖腺のモデル。

第2表 標準「シカ」における影響評価のまとめ
(網かけ部分が「誘導考慮参考レベル」)

線量率 (mGy/d)	影響
>1,000	造血系障害による早期死亡 (1~9 Gy LD 50/30)
100~1,000	種々の原因による寿命短縮
10~100	晩発障害の増加 寿命短縮の可能性 繁殖能力の低下
1~10	雄の不妊による繁殖能力の低下の可能性
0.1~1	影響は非常に小さい
0.01~0.1	観察される影響なし
<0.01	自然放射線レベル

ろっているわけではないが、これまでに文献で知られている影響と線量率との関係が表の形でまとめられている(第2表)。ここでは標準「シカ」の例を挙げたが、このような表がすべての標準動植物についてまとめられている。

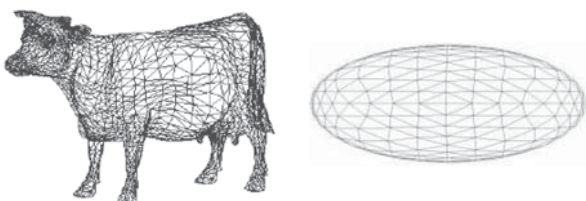
このような表から、「これを超えると何らかの影響を考慮する必要がある」という線量率のレベルが設定され、誘導考慮参考レベル(Derived Consideration Reference Level)と呼ばれている。

Ⅳ. 標準動植物に関する今後の展開

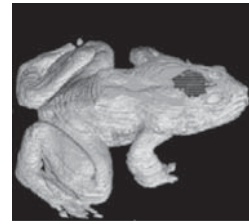
1. より現実的なモデルを用いた線量評価

体内の放射性核種から与えられる線量は、幾何学的なモデルを用い、各種の均一な分布を仮定して評価されていることは、前述のとおりである。これに対して、より「リアルな」形態を採用した場合につき検討されている。第2図はウシの例であるが、リアルなモデルでも回転楕円体モデルでも、体内の核種の均一な分布を仮定する限り、大きな違いがないことが示されている。

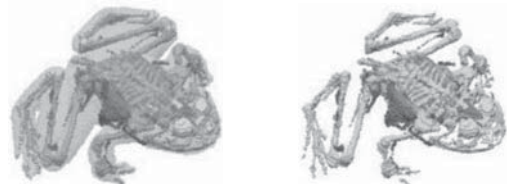
次に、核種の分布の不均一性を想定して、線源が体の中心に集中した場合と、表面近くに分布した場合とでどれほどの違いがあるかについて光子と電子の場合についての結果は、エネルギーが高くなるほど、両者の差が大きい傾向が認められ、その差は10倍に達することもある。さらに、ラットやカエル(第3,4図)のようにボクセルファントムがすでに構築されている生物種については、核種が特定の臓器に集積した場合に、各臓器や全身



第2図 「ウシ」のリアルなモデルと回転楕円体モデル



第3図 カエルのボクセルファントム⁸⁾



第4図 カエルファントムの透視図(左)と骨格および内部臓器の図(右)

がうける線量が計算されている。以上の検討結果は近々「環境生物における線量評価の高度化」と題した報告書として取りまとめられる予定である。

2. 標準動植物に係る放射性核種の環境中挙動と移行係数

Publication 108に記載されている線量評価では、対象となる生物種の周囲あるいは内部に存在する放射能濃度が出発点となっている。しかしながら、現実問題としては、環境中に放出された放射性核種がどのような経路をたどって、当該生物の周囲に分布するのかを解析する必要がある。

環境中に放出された放射性核種が物理的・化学的なプロセスを経て、食物連鎖を含めた生物学的な相互作用の結果として、最終的にどのような分布となるのかを解析する目的の報告書が準備されつつある。

3. 線質の異なる放射線の影響の評価

放射線の生物作用は、放射線の種類とエネルギーによって異なる。線質の異なる放射線の生物作用の程度の違いは、生物学的効果比(RBE: Relative Biological Effectiveness)で表される。RBEは、ある放射線が一定の生物作用を引き起こすのに必要な線量と、基準となる放射線(⁶⁰Coガンマ線や250 kV エックス線など)の場合に必要な線量との比として算定される。同じ作用を引き起こすのに必要な線量が少ないほどRBEの値は大きくなる。RBEは生物作用の指標によっても異なる。ヒトの防護体系の中でRBEは、「放射線加重係数(Radiation Weighting Factor)」に反映されている。低線量、低線量率における確率的影響が対象とされ、例えば、アルファ線については20、中性子線についてはそのエネルギーに応じて5から20の値が与えられている。

標準動植物については現在、種々の放射線のRBEを

取りまとめたデータベースの構築が進められている。指標としては、確定的影響として寿命の短縮，生育抑制，生殖関連組織への作用などが，確率的影響としては突然変異の誘発や発がん等が対象となっている。将来的にはこのデータベースに基づいて「放射線加重係数」が提案されることになるが，ヒトの場合と区別するために Biota Radiation Weighting Factor と呼ぶことになる予定である。

V. 環境防護の概念と規制

ヒト以外の生物種の防護に関する枠組みは提示されたものの，いまだ原則論にとどまっており，具体的な規制に反映されるには至っていない。例えば，ICRP 2007年勧告を受けて改訂が進められている IAEA の「国際基本安全基準」(BSS)においても，当初は環境防護について独立した1章が設けられる方向で検討が進められたが，結局は各章の目的の部分で，ヒトに加えて環境を防護する，と記載されるにとどまる見込みである。

いまだに，「ヒトが防護されていればヒト以外の生物も防護される」との意見も根強い。「現実に環境への影響が問題となっているわけではない」(ICRP 2007年勧告パラグラフ267)のであれば，ヒトの防護さえしっかりしていれば，環境に特段の配慮をする必要はない，との意見もある。

重要なことは，先にも述べたが，ヒトとそれ以外の生物種が共存する場合はもとより，ヒトがいない場所あるいは状況においても，放射線が環境に与える影響をきちんと評価する仕組みを持っているということである。

現在，ICRP では，第5専門委員会と，ICRP 勧告の適用を検討する第4専門委員会が合同でワーキンググループを立ち上げて，環境防護の概念を従来の防護の枠組みの中でどう位置付けるかについて議論が進められている。

論点として，(1)環境の防護について正当化や最適化をどう考えるか，(2)環境の防護と被ばくの状況(計画被ばく，緊急時被ばく，現存被ばく)の関係，(3)環境の防護と被ばくのカテゴリー(職業被ばく，公衆被ばく，医療被ばく)との関係，(4)ヒトの防護体系との整合性などが含まれている。

VI. 標準動植物を越えて一生態系防護へ

以上の議論からもわかるように，現時点で環境の防護に関する議論は，生物種のレベルにとどまっている。本来，「環境」といえば，生物種同士のかかわりあいを含め，それを取り囲む生物以外の要素も包含する生態系のことであろう。第5委員会においてもこのことは認識されており，現在，放射線のヒトを含む生態系へのインパクト

第3表 「生態系の防護に関する報告書」の目次案

1. 緒言
2. 環境防護の目標
3. 環境防護における標準動植物という概念
4. ヒトの放射線防護との整合性
5. 化学物質の生態系リスク評価との整合性
6. 標準動植物という概念の限界と問題点
7. 標準動植物を越えたアプローチの模索
8. 結論

を評価しようとする報告書が取りまとめられつつある。

いまだ予備的な段階ではあるが，現時点での章立ては第3表に示すとおりである。標準動植物の限界と問題点を議論し，個々の生物種を越えた生態系の防護を考えようという意欲的な内容である。この報告書においては，「標準動植物」を用いた「種」レベルの影響の評価は，生態系の防護を考える上での基本単位として位置付けられており，複数の種レベルの評価を包含する生態系への影響の評価と防護を目指している。

VII. おわりに

現実問題として，生態系へのインパクトを考えると，影響を与える要因は放射線に限らない。二酸化炭素を含めた様々な化学物質も大きな影響を与える。また，森林の開発なども生態系に大きな影響を及ぼす。このような中で，放射線の役割がどれほどのものであるかの評価もまた重要である。環境の放射線防護という概念の導入は，それまでヒトのみであった防護の対象をヒト以外の生物種へと広げた。いまさらに，電離性放射線の枠を超えようとしている。環境防護の問題は，人類活動に係るリスクとベネフィットの中で放射線をどのように考えるかという重要な問題を提起しているといえよう。

—参考資料—

- 1) ICRP, ICRP Publication 103, Recommendations of the ICRP, Elsevier, (2007).
- 2) ICRP, ICRP Publication 108, Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants, Elsevier, (2009).
- 3) IAEA, Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standard, IAEA Technical Report Series 332, (1992).
- 4) UNSCEAR Report to General Assembly, Annex to Sources and Effects of Ionising Radiation, (1996).
- 5) ICRP, ICRP Publication 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Elsevier, (1991).
- 6) 日本アイソトープ協会，国際放射線防護委員会の1990年

勧告, 丸善, (1991).

- 7) ICRP, ICRP Publication 91, A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-Human Species, Elsevier, (2003).
- 8) S. Kinase, "Monte Carlo Simulations of Photon Absorbed Fractions in a Frog Voxel Phantom". *Proc. IEEE* 97, 2086 (2009).

著者紹介

酒井一夫(さかい・かずお)



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

新刊紹介

知らないと怖い環境問題

大塚徳勝著, 172 p. (2010.4), 共立出版。
(定価1,700円) ISBN 978-4-320-07180-3

エネルギー多消費による環境問題と原子力の役割を解説した書

著者は日本図書館協会の選定図書にも選ばれた『知っておきたい環境問題』を2005年に刊行し, これまで3度版を重ねている。本書はその後の環境問題の深刻化を反映して, データも図表も表題も一新した前著の改訂改題版である。著者(元日本原子力研究所副主任研究員, 元東海大学教授, 本学会員)は前著と同様に, 複雑多岐にわたる地球環境問題を地圏, 水圏, 大気圏に関する問題に分類・整理して取り上げている。

地圏の環境問題では, 廃棄物処理と森林破壊, 土壌汚染に重点を置き, ゴミ問題が収集の有料化やりサイクルでは解決しないのは, 品物があふれても消費をあおる社会構造にあり, これがエネルギーの多消費と直接関連していると指摘している。

水圏の環境問題では, 農業・工業・生活からの排水による河川・海洋汚染の実情, ダムや干拓工事など巨大公共事業による水圏の環境破壊を詳細に分析している。

大気圏の環境問題では, 大気汚染と酸性雨をはじめ, オゾン層の破壊などについて述べているが, 最も重点を置いているのは, 化石燃料の消費に伴う大量のCO₂放出による地球温暖化の問題である。

温暖化の現況と今後の予測, 影響について述べた後, 温暖化防止をエネルギー源の選択の問題として捉えて, 原子力発電と自然エネルギーの必要性和課題について, 詳しい資料を用いて説明している。また, 世界一低い日本のエネルギー自給率の問題にも触れている。

さらに, エネルギー源の指標として注目が集まっている「エネルギー収支比」を紹介し, 各種エネルギー源の性能を直接比較している。著者は, 絶対安全なエネルギー源はないという立場に立って, 原子力発電を含む各種エネルギーの特性を正しく理解して, 賢く使っていくことが重要であると最終節で結んでいる。

エネルギー消費と環境問題およびその中の原子力との関連について, 本学会員が一読して基礎知識として理解し, また大学生の副教材としても利用できる書である。

(九州大学・工藤和彦)



原子力外交 第1回

日本原子力外交の課題

原子力政策研究所
(元原子力委員会 委員長代理) 遠藤 哲也

原子力外交の特殊性

経済外交、環境外交、人権外交、スポーツ外交あるいは皇室外交、首脳外交といった言葉がしばしば使われる。その意味するところは、広義の外交の特定の局面をさしていたり、外交活動の主体をさすようだ。原子力外交はいうまでもなく原子力分野に関する外交だが、他の分野とは非常に趣を異にする。なぜならば、対象とする原子力は、エネルギー、放射線利用のみならず、国の安全保障そのものに直接に関係しているからである。

近代科学技術は、多かれ少なかれそうだが、特に原子力はジキル博士とハイド氏の二重性が強く、後者の面では地球を破壊させ、人類を滅亡させるような可能性を持っており、それが前者の人類に幸福と利益を与える面と裏腹になっている。原子力外交は、この2つの要素の微妙なバランスの上に立っていて、原子力はそもそもが国際的、外交的な性格をもっている。

日本と原子力

日本は原子力に対して極めて特殊な立場にある。その一つは、日本は核兵器の惨禍を受けた世界で唯一の被爆国であり、国民の核に対する感情は特殊である。反核感情は強く、非核三原則は国是となっている。核軍縮、核の究極の廃絶を強く主張している。ところが、他方、日本を取り巻く厳しい国際情勢を反映して、日本は米国の核の傘の下にある(extended deterrence)。この2つの関係はしばしば議論の種になっている。

第2は、原子力の平和利用である。日本はこの面で世界の原子力大国である。エネルギー資源に極端に乏しい(エネルギー自給率は4%くらい)経済大国として、原子力は最も信頼できるエネルギー源である。近年、地球温暖化防止が世界的な課題となり、温暖化ガスを排出しない原子力の役割は日本にとってますます大きくなってきている。

第3に、日本は1950年代の原子力の黎明期から、フロントエンドからバックエンドへの核燃料サイクルを一貫して追求している。核燃料サイクルのうち、濃縮と再処理は原子力の平和利用と軍事利用の接点であり、不拡散条約(NPT)加盟の非核兵器国でこれを公然と認められているのは、日本とユーラトムに所属するドイツだけである。

このように、日本は広島・長崎を原点として原子力の平和利用に専念し、オールラウンドの原子力大国となっ

た世界で珍しい国と言えよう。

日本の原子力外交の課題

それでは、日本はどのようにして平和的な原子力大国になったのか。一つは、原子力先端技術、資機材、ウラン燃料を諸外国から導入し、これを持前の勤勉と努力によって自前のものとしていったのであった。特に米国との協力は大きく、米、仏、英、カナダ、オーストラリア等と結んだ原子力協力協定はそのための手段であった。今一つは、IAEAとの協力であり、それによって日本の原子力活動は平和利用であるとの国際的なお墨付きをもたらしている。

しかし、事情は大きく変わりつつある。これまでは諸外国との関係はどちらかというと受身であることが多かったが、今や積極的に出てゆく時が来ている。積極的な原子力外交は、昨今の国際情勢からも、また日本の原子力界からも求められている。

以下に、日本の原子力外交の若干の課題を、重複するところもあるが、平和利用、核不拡散、核セキュリティ及び核軍縮の四つの側面からみてみたい。

(1) 原子力平和利用の推進(核燃料サイクルと国際展開等)

・核燃料サイクルは前述のとおりNPT非核兵器国としては、日本だけが認められており、世界中の関心の的である(ドイツは脱原発政策の関連で中断している)。核燃料サイクルの速やかな確立、少なくとも確たる見とおしをたてることが望ましく、これは日米原子力協定と第二再処理工場の帰すうにも影響しよう。

また、核燃料サイクルは核拡散とも密接に関連しており、国際化が議論されている。日本としてもアジアを中心とする国際化の可能性を模索すべきではないかと思う。

・国際展開は、原子力カルネッサンス到来の現在、日本原子力界にとってもチャンスである。これまでの原子力資機材の単体輸出ではなく、システム輸出がすすめられるべきで、いずれにせよ、本格的な国際展開にはオール・ジャパンの体制が必要である。また、国際展開がスムーズに進むためには、「3S」(安全、核セキュリティ、保障措置——核不拡散)がスタンダードとして国際的に確立されることが必要で、2008年北海道・洞爺湖のG8サミットでの本構想の提唱者である日本が「3S」構想の具体化、実現化にイニシアティブをとる

べきである。

- ・国際展開をバックアップするために、政府間の原子力協力協定の締結が必要であろう。原子力協定のうちで日本にとって最も重要なのは日米協定であるが、2018年7月には現行協定の満期が到来するところ、その後の取扱いには細心の配慮を払うべきである。

(2) 核不拡散

NPT/IAEAを中心とする核不拡散体制は目下、各方面から深刻な挑戦をうけている。これに対して原子力供給国グループ(NSG)として輸出規制の強化(NSG)、IAEA追加議定書による査察体制の強化、PSI(臨検)など諸々の補強措置がとられているが、万能薬はない。イラン、北朝鮮の事例に対しても国連安保理の制裁が課されているが、所期の目的を果たしてはいない。

結局、弥縫(びほう)策(さく)だが、制度的な諸措置を組み合せつつ、あわせて核拡散抵抗性の強い技術を求めてゆくしか現実的には方法がないように思える。

日本として核不拡散体制を厳しく遵守するのは当然だが、世界の不拡散体制強化に更なる努力と資金面も含めた協力を惜しむべきではない。また核拡散抵抗性技術の開発にはIAEA、関係諸国と協力して取り組んでゆくべきである。日本の原子力平和利用は、世界の核不拡散体制の確立があってこそ可能である。

(3) 核セキュリティ(核テロ対策)

「核セキュリティ」が国際的にとりあげられるようになったのは、9/11同時多発テロ以降で、現在起る可能性の最も高い脅威とされている。オバマ大統領主催の2010年4月のセキュリティサミット(次回は2012年韓国で開かれる)がそれを示している。

日本は、島国たる地勢、ムラ社会的な人的関係等から核セキュリティに対する脅威認識が乏しく、何よりも国内の認識を高める必要がある。それと同時に、アジアの

センターの一つとして、国際協力に貢献する必要がある。

(4) 核軍縮

- ・核軍縮は原子力外交とは一見関係のないようにみられがちだが、NPTを支える三本柱、すなわち核軍縮、核不拡散および原子力の平和利用の一つとして原子力外交と固く結びついている。オバマ大統領の2009年4月のプラハ演説に述べられたように、原子力平和利用の礎は核不拡散であり、核不拡散、核セキュリティを確保するには核兵器そのものを減らすこと、つまり核軍縮が必要である(核軍縮と核不拡散の一体化)、そして究極的には核の廃絶、核のない世界が必要というわけである。
- ・核軍縮、核廃絶は、かねてから唯一の被爆国たる日本が強く主張してきたところであり、非同盟諸国、北欧諸国なども積極的に主張してきたが、最近、最大の核兵器国の一つである米国が前向きになったことは注目すべきことである。
- ・このような動きは、日本としても歓迎すべきことだが、微妙な点もある。日本の置かれている東アジアの安全保障環境、特に中国、北朝鮮の情勢を考えると、米国の核の傘の存在を考慮せざるを得ない。どのようにして日本の安全保障を守りながら、核軍縮をすすめてゆかがポイントである。
- ・核軍縮は長い道程を要する作業である。一歩ずつ着実に進めてゆくべきで、今ようやく見とおしが明るくなったという段階である。核軍縮をすすめるガイドラインの一つとして、2009年末に、日本とオーストラリアの民間グループ(政府も積極的に関与した)がまとめた報告書はNPTの3つの柱をバランスよく包括した合理的な提案で、今後しっかりとフォローアップしてゆくに値する。

(2010年 9月14日 記)

談話室

豊かさと科学技術, そして原発

佐田 務

私がまだ小学生だったころ。そう、時代でいえば、昭和30年代の話である。

そのころのふつうの小さな町や村では、その中に、おおよそ完結したひとつの社会を形づくっていたように思う。

自給自足とまではいかないまでも、そこで食べるものはその土地か、近くでとれたものがほとんどだった。遠くのマチで作られるようなものは、そうそう買ってはもらえなかった。

だから、そうやって、やっとの思いで外から買ってもらったものは、とても大切なものに思えたことを、私はよく覚えている。傘にしろ服にしろ、あるいは自転車にしたってテレビにしたって、壊れたりいたんだりしたら、修理して使うのが当たり前だった。

また、もともとの用をなさなくなったものでも、それはとことん使われた。古新聞はいろんな包装に使われ、そのあとは炊きつけの燃料となり、最後は灰になって土にもどった。そこではモノを粗末にすると、本当にバチがあたった。

質素と節約は、そのころのみんなの共通した価値だったのである。

そんな社会が変わりはじめたのが、高度成長時代のころだ。技術がどんどん進歩して、工場はいろんなモノを、安くたくさん産み出すようになった。舗装道路がぐんぐん伸びて、そこをトラックがひんぱんに行きかうようになり、モノは全国至る所に運ばれるようになった。

世の中は「大衆消費時代」を迎えたのである。

その時代になると、私たちはモノを粗末にしても、バチがあたらなくなったことに気づいた。

はじめはそれでも、モノを粗末にすることには、おっかなびっくりだった。

けれども私たちは、茶碗に残したご飯粒を捨てることに、だんだんと何のためらいも感じなくなった。質素と節約は、時代遅れになったのである。

また、そのころ出回りはじめたテレビや洗濯機などの大型消費財は、とても魅力的に映った。そういったモノをもたらししてくれた科学技術を、私はとてもまばゆく、頼もしいものだと考えていた。

科学図鑑で見たことのある原子力発電は、その科学の一番先っぽにそびえ立っているものだった。

とはいえ、その社会は、たくさんのモノをうみだしてたくさんのモノを消費しても、そこからでてくるたくさんのゴミをリサイクルする機能だけは不十分だった。

だから、その時から増えはじめたゴミは、時がたつにつれて、やがて地球大に、そして未来へと広がりはじめた。そのことにみんなが気づくのは、それからずいぶん後のことだった。

それからおよそ50年。地球環境問題は、多くの人が知るところとなった。

言うまでもないことだが、私たちの生活の維持と向上は、自然を消費することで成り立っている。私たちが生きていくということは、資源を収奪し、環境を破壊するという、環境への負荷の連続で成り立っている。

もちろん、人々による環境への負荷のすべての集積が、自然の復元力の範囲の中におさまっている限りにおいては、それはさして問題とはならなかった。

しかし、急激な人口増と、世界中の人々による豊かさの追求は、環境への負荷の総量を増加させつつある。それが自然の復元力の限界を超えつつあることは、おそらく間違いのないことだろう。

私たちは豊かになろうとして、みんなが望むことがらを行った。そのことで、みんなが望まない結果がもたらされ始めたのである。

今の世の中では、テレビや雑誌やインターネットの画面上で、膨大な広告が繰り返り広げられている。その魅力的な言辞の中に身を置くと、私たちが今、持っている服やクルマや携帯はとも流行遅れで、新製品と比べるとひどくみすぼらしく思える。

その結果、私たちはまだ、十分着用でき、十分走るし、十分機能するのに、それらをモノの寿命よりはるかに短いサイクルで買い替え、あとにはゴミを残している。耐久消費財が非耐久消費化されることも、しばしばだ。

これらの開発のために追加された研究開発費や設備投資費、広告費は、莫大なものだろう。けれども私たちは、そんな莫大な投資額に見合うほど、幸せになったと言えるだろうか。

私たちが食べる季節外れのタケノコは、実は地中にニクロム線を埋めて暖めて栽培されている。そんなぜいた

くを、今の社会は当たり前と考えている。

そして今のエネルギー需要は、そんな人々や市場の欲求の産物の総体として立ち上がっている。

エネルギー問題に焦点をあわせれば、私たちはエネルギー需要を前提とし、その供給を満たすために腐心している。増加する電力需要には、なるべく環境への負荷が少ない、例えばLNG火力や原子力発電でそれを賄おうとする論理をもっている。

けれども、そこでは、エネルギー需要そのものを抑制しようとか、需要そのものに切り込もうという発想は、あまり見られない。

とはいえ、需要そのものを抑制するということは、私たちが今より、少しく貧しくなることを意味する。そんなことを唱えたとしても、「不況脱出」や「世界との競争」という勇ましいかけ声が闊歩するこの世の中では、ほとんど無視される。そんなことに耳を傾ける人は、ごくわずかの人がいない。

科学技術は私たちにこれまで、多くの幸せと福音をもたらしてくれた。多くの伝染病を駆逐し、多くの人から餓死の恐怖を取り除いてくれた。それほど極端な話ではないけれども、私が小さいころに、わが家にテレビや冷蔵庫がやってきた日のうれしさは、鮮明に覚えている。

それから50年たって私たちは、昔に比べれば考えられないほどの多くのモノと、多様なサービスとを享受する生活ができるようになった。

けれどもそれは、私たちが昔、描いていたユートピアとは少し、違うものだった。環境問題はそのことを、私たちに思い知らせる代表的な例のひとつとなった。

科学技術の進歩は、さまざまな伝達手段や交通手段を発達させた。また、今の私たちは、昔に比べればはるかに遠くにある世界のできごとを、リアルタイムで知ることができるようになった。昔には考えられもしなかったような速さで移動し、実際にその世界を体験することさえできる。遠くに住む何人もの人たちと、同時に話すことさえできる。

私たちは、昔の人々が持っていなかった超越的な力を手にし、超人的な目や耳や口や足を備えはじめた。けれどもそのことは、私たちの欲求の充足がたやすい次元で実現できるような社会をうみだすとともに、これまでにはなかったさまざまに分化した欲求を新たに、そして不断につくりだしはじめた。

科学技術そのものが働きかけて、例えば臓器移植をしてでも長生きをめざすという、これまでには考えられもしなかった欲求を新たに触発しはじめたのである。

そのことは、私たちが際限のない欲求へとかりたてているようにも思える。またそれは、今の世に生きる人に、

<虚しさ>をもたらしているようにも思える。

社会学では、規範や秩序の崩壊をアノミーと呼ぶ。ひょっとしたら現代社会は欲求をめぐる、そんなアノミックな状態にあるのかもしれない。

今の世の中では、人々の生活の向上や快適性の追及などといった欲求の自由な膨張と、その充足を是とするイデオロギーが優勢だ。それは、近代の歴史に通底するイデオロギーそのものかもしれない。そしてそこでは、科学技術という応援団が、常に強いうしろだてになっていた。

そんな中で、先端的な科学技術の一つである原子力発電は、その是非をめぐる激しい対立が生じがちな論争のひとつとして登場し、存在し続けてきた。

さらに原発と同様に、その是非について賛否が分かればがちなテーマのひとつに、臓器移植の問題がある。臓器移植賛成の論理は、脳死者の臓器を移植してでも一分一秒でも長生きしたいという人々の欲求を前提とし、肯定的にとらえている。

一方で原発推進の論理の中には、人々がエネルギーに対してもつ欲求をできるだけかなえることを前提とする発想がみえる。そのエネルギー需要を、少しでも長生きしたいという言葉に置きかえれば、それは臓器移植の推進の論理となる。

これらを推進しようとする人々は、ともに人間のもつ欲求の拡大とその充足の過程を善とみなし、自然や環境や人体を資源とみなす合理主義的な態度が優勢だ。先端的な科学技術の中で、その是非について賛否が分かればがちなテーマの中で、その選択は自然をより高度に、そして有効に利用しようとする態度、言いかえるならば自然に対する不遜に近い態度と、人間讃歌の発想とが共通してみえる。

言うまでもないことだが、この論理こそが、実は今の地球環境問題の解決を難しくさせているさまざまな原因に通底したものなのだ。

原発論争は、皮相的には工学的あるいは経済的なテーマで議論されることが多い。けれども、この問題で根本的に問われようとしているのは、私たちがこれからめざそうとしている社会はどうあるべきかということではなからうか。

その中核には、とめどなく膨張する欲求が自動的に充足される今の世の中の価値観の間直しが含まれていよう。さらには、私たちの生活の自律性のありようや、社会に静かに広がりつつあるフリーライド(社会的ただ乗り)の問題も含まれよう。

そして、これらが意味するテーマは、とても現代的で哲学的であると同時に、緊急性と重大性をひめたものだと感じるのは、私の思い過ぎだろうか。

(2010年 5月31日 記)

談話室

ニュージーランドの暮らしと語学ブラッシュアップ(その2)

語学学校と仲間たち

前原子力委員 松田美夜子

入学、そして初めての授業

入学した Seafield School of English は自宅からバスで20分かかるが、ニューブライトンという素晴らしい海辺の近くである。長く美しい海岸線はハワイのワイキキを思わせ、紺碧の海の広がりは何とも言えない解放感。南太平洋に向かって300mも延びるピア(海上散歩橋)は市民の憩いの場になっている。サーフィンのメッカでもある。その一角に立派な市立図書館があり、学校はそこから700mほど離れたところに位置している。瀟洒な外観と上品な雰囲気にも魅かれて選んだ。

学生数は約100名。先生12名(非常勤の先生も加えると20名)、事務局員10名という規模。学校の図書館の資料も豊富である。学生の国別構成は、サウジアラビアが20%で最も多く、スイス、台湾、韓国、タイおよび日本がそれぞれ15%、ドイツとポーランドが5%となっている。

授業は朝の9時からスタートし、10時15分から10時45分の30分が楽しいお茶の時間。学生の憩いの場である明るい広いロビーには、紅茶やコーヒー、ココアが無料で用意されており、学生たちの貴重な情報交換の時間である。この学校がニュージーランドの語学学校として最も古い伝統のある名門校であることを知ったのは入学してからである。

工夫されているカリキュラム

入学初日の月曜日はクラス分けのテストを受ける。午前は文法に関する100題の穴埋め問題に回答する。午後

は学生の目的にあったクラスを決めるためにヘレン副校長の30分の面談がある。レベルは6クラスあり、私は上から2番目のオクスフォード進学を目指すクラスに入れられた。クラス分けはテストの結果だけではなく、生徒のそれまでの職業体験なども加味されるようだ。学習意欲の高い素晴らしい学生たち9人が同級生になった。

しかし、私の実力は弱い。私は土・日も睡眠時間5時間で勉強しなければ授業に追いつかないという受験勉強並みの日々が続くことになった。午前の担任は Mr. リチャード(43歳)。先生はものすごいスピードで板書していく。50年ぶりに英語を書く私は、全く付いていけない。先生はコピーをくれない。私は同じクラスの日本の学生アカネさんにノートを見せてもらい、家庭教師になってもらった。

クラスは2名一組のチーム学習が基本だ。教師は生徒の組み合わせを毎日変え、同じ国同士ではチームを組まない。生徒の個性を尊重しながら語学レベルを上げていく考えぬかれた授業システムである。

午後のクラスは、ガラッと雰囲気が変わる。午前中のクラスメートとは、全く別の新しい10名が1クラスとして構成されている。つまり、毎日の授業で、生徒はいやおうなしに19名の学生と交流していくのである。

担任は Mrs. ファウラー(53歳)。ファッションモデルのようにすらりとして美しい。とても気さくで、学校のマドンナ的存在。活気のある授業を全力投球で行う。単語クイズや、関連用語を書きだすゲーム、テーマを変えてドラマ形式の会話、歌、ディベートなど、様々なプログラムを用意している。

3月の中旬に新学期のクラス新編成があり、クラスメートの半分は上のクラスに上がり、私たちは新入生を加えてふたたび10名となり、先生も新しくなった。こんどの Mrs. マーガレット(63歳)は板書に加えて慣用語句と前置詞の特訓に毎日40分を割く。毎日の単語テストは早口のマーガレットが語彙の説明をし、これに相当する単語を書く。はじめは全く聞き取れなかった。英英辞書の良さが分かったのはこの時からである。

Mrs. マーガレットは「ミヤコ大丈夫?」が口癖。気に掛けてくれるのはありがたいが、そう何回も言われると出来ないことを宣伝されているみたいなどと思えてくるが、とても心配りをして支えてくれた。アジアの学生は



3カ月通学した Seafield School of English

前置詞が苦手と知っていてその特訓に力を入れる。学生たちは、予習と復讐のほかに毎日20ページを目標に読書の宿題もある。作文も毎日6文を仕上げねばならない。

各国の文化に触れる

会話は常に授業の中心にあるので、学生間の話し合いは授業の重要なテーマである。「結婚式」をテーマに各国の文化を報告しあう時間があった。サウジアラビアの21歳の学生が「私の国では妻を4人まで持つことができます。ぼくは父の2番目の妻の長男で、父が19歳のとき15歳の母と結婚したのです。僕の結婚相手は両親が決めてくれます。」とにっこりと語った。韓国、タイ、台湾、スイス、日本の女学生たちから一斉に驚きの声。もう一人のサウジアラビアの学生は、オクスフォード大学を目指してこの学校に来ている好青年である。その彼が「これはサウジアラビアのカルチャーです」と補足した。その理由をランチタイムに聞いてみると、「それは子孫を残すため」とのこと。江戸時代の日本と同じ考えが大金持ちのサウジアラビアの社会に今もあることを知り、妙に納得した。

金曜日のランチタイムは、特別な日である。先生と学生が必ずどこかのレストランで共にランチを取るのもカリキュラムの一つ。ランチのときも、豚肉を食べる国、食べない国、ビーフを食べない国があることを知らされる。宗教もまちまち。サウジの人々は金曜日は熱心なお祈り、キリスト教圏の学生は、日曜日に教会へ行く。国を離れても民族のしきたりはきちんと守られていることを肌で感じる日々である。

学生はお金持ちばかりではない。苦学生もいる。6か月分の学費を自ら稼ぎ、両親に負担を掛けない学生たちだ。経済的な苦勞を抱えて、英語の上達に頑張っている。ホームステイも儉約のため一部屋を2人で借りて、食事自炊し、生活費をうかせている。台湾の苦学生のミナは、その中でもとびきりの努力家で優しくて私によく教えてくれた。経済的に恵まれている学生も苦学生も外国の暮らしはホームシックにかかりがち。わたしは学生のお母さん役に自然となっていく、大勢の友達ができいった。

個人レッスンの話題は原子力エネルギー

自分の発音が正しいかどうかを確かめたいと最後の1ヶ月間は放課後の1時間を毎日個人レッスンにあてた。4名の女性の先生が交代で担当してくれた。中でもポーリン先生とエバンス先生は、環境問題に強い関心を持っている。地球温暖化にも関心が強い。

原子力発電については、今の時代のエネルギー源として必要と理解を示した。オーストラリアが原子力発電に反対しているが、将来のエネルギーとしてニュージーランドも学んでおいたほうが良いと話す。人口420万人で水

力発電で電力の75%を賄っているニュージーランドの電力事情は、世界でも稀な恵まれた環境。原子力廃棄物をきちんと地層処分するのが私の大切な役割と語ると、地層処分についての英文の資料を読みたいと積極的である。私は、エネルギー庁の放射性廃棄物対策課から頂いた英文の資料を基に説明し、個人レッスンが日本のエネルギー政策のセミナーのようになり面白かった。

さよならパーティ

こうして毎日が飛ぶように過ぎていった。帰国する人は金曜日の修了式で全学生の前でスピーチをするのが伝統。4月30日の修了式は、私もスピーチをするが最年長なので一番後だろうと思っていたら、一番初めに登壇することになり本当に緊張した。無事スピーチが終わり、大きな拍手とみんなの笑顔がまぶしかった。お昼はクラス(10人)のお別れ会があり、焼きそばとお好み焼きと日本のみそ汁をクラスメートや先生と作り、名残を惜しんだ。夜はサヨナラパーティを学生たちが私のために開いてくれた。台湾の苦学生のミナが段取りをしてくれて、台湾料理で北京ダックも出る円卓の正餐だった。いつの間に企画したのか20ドルの会費制なのに35名の各国の学生さんが来てくれた。涙をためている学生もいた。彼らの瞳の温かさを今も忘れられない。

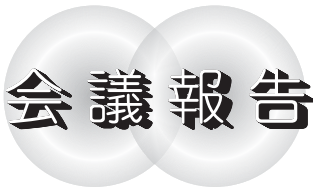


笑顔と元気がはじけるスクールメイト(中央に筆者)

おわりに

副校長のヘレン先生が入学のとき語った言葉が思い出される。「純粋の英語を知ることは大切ですが、タイ英語、韓国英語、台湾英語、インド英語、日本英語、みんな大切な英語です。各国で使われている英語はその国特有の発音がありますが、それが国際語というものです。日本英語は発音にくせが少なく英語になっても伝わりやすい。大切なことは心が通じ合うこと。英語はその手段なのです」私はやっと基礎ができたところだ。

(2010年 6月28日 記)



高経年化対策における国際協力

The Workshop on “Commendable Practices for the Safe, Long-term Operation of Nuclear Reactors—OECD/NEA Stress Corrosion Cracking and Cable Ageing Project (SCAP)”

2010年5月25, 26日(東京大学武田ホール, 東京)

応力腐食割れとケーブルの経年劣化管理に係る推奨事例策定プロジェクト(OECD/NEA Stress Corrosion Cracking and Cable Ageing Project:SCAP)ワークショップ(WS)が東京大学の武田ホールで開催された。

SCAPは、2006年度から4年間、原子力安全・保安院の拠出金により17か国が参加し、国際協力のもと実施されたプロジェクトであり、IAEA、ECがオブザーバーとして参加した。規制当局および原子力事業者による確かな経年劣化管理を可能にするため、(1)OECD/NEA加盟国における経年劣化管理に関する技術情報、規制情報を体系的に整理し、各国の規制当局が安全規制を科学的・合理的に実施する上で裏付けとなる技術的情報を検索可能な知識ベースとして構築し、(2)知識ベースの中から推奨し得る具体的事例(Commendable Practices:推奨事例)を抽出し、体系的に整理することを目的として実施された。

対象となった経年劣化事象は、応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking:SCC)とケーブル絶縁低下である。実施体制として、SCAPの全体を管理するためのプロジェクト運営委員会(Management Board:MB)がOECD/NEAに設置され、東大の関村教授が議長を務めた。MBの下にSCCワーキンググループ(議長:Ms. K. Gott, SSM, Sweden)とケーブルワーキンググループ(議長:Mr. T.Koshy, USNRC, USA)の2つのワーキンググループ(WG)が設置され活動が行われた。

今回のWSはSCAPの成果報告を兼ねたものであり、プロジェクトの概要、各国の高経年化対策やその課題をテーマとした基調講演が行われた①オープニングセッション、各WGでの活動成果が報告された②SCCセッション、③ケーブルセッション、④パネルセッションの4つのセッションから構成された。本稿では、WSでの発表内容のうち、SCC、ケーブルおよびパネルディスカッションに関するセッションに絞り、概要を紹介する。

SCC セッション・ケーブルセッション

各WGにおける活動の成果概要について、WG議長から報告がなされた後、各国の高経年化対策の現状や知識ベースの構築について、代表から報告がなされた。

SCCセッションでは、SCCは様々な炉型で発生する現象で、特定の系の部位だけで発生する現象ではないことから、各国における様々な推奨事例の共有の重要性が

確認された。

ケーブルセッションにおける日本からの講演では、推奨事例としてケーブル経年劣化評価試験ガイドの策定について紹介がなされた。このガイドでは実機の使用条件に基づき、時間依存データの重ね合わせ手法、等価損傷線量データの重ね合わせ手法等により同時劣化条件を設定しており、日本の産学官の連携によって得られた最新の研究知見を反映したものとなっている。

パネルセッション

SCAPのプロセスや技術領域から得られた教訓、SCAPの成果の利用可能性、長期運転のあり方等について活発な議論が行われた。

SCAPのプロセスについては、プロジェクトを通じて専門家、NEAの全加盟国間で技術情報、緊密な高経年化対策の考え方等の共有化を図れたことの意義は大きく、それによって構築された専門家のネットワークが成果の一つであることが示された。

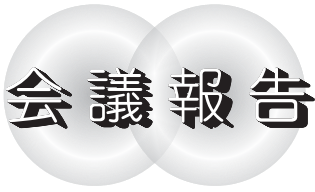
知識ベースから抽出された推奨事例については、経年管理のための世界的な共通言語として有用であり、長期運転管理や研究活動の最適化、教育訓練への利用可能性が示唆された。今回構築された知識ベースおよび推奨事例は、今後も最新知見を取り込むといった継続的な更新が重要であることが示された。

また、SCAPにおける日本のリーダーシップと積極的な貢献に対し、プロジェクトの成功に大きな役割を果たしたとの意見が多く得られた。

今後は規制当局のみならず、業界団体においても、既存の規格基準類の改訂や新たな規格基準類の整備等に対し、SCAPの成果が活用されることが望まれる。また、SCAPでは、SCCとケーブル絶縁劣化が対象であったが、他の経年劣化事象においても、専門家間のネットワークを築き、SCAPで確立された推奨事例抽出のプロセスを活用することで、高経年化対策に有用な知見の蓄積が促進されると考えられる。SCAPが、今後の国際的な高経年化対策活動展開の起点となることが期待される。

なお、SCAPの概要は、以下のポータルサイトに公開されている。ご関心のある方は参照いただきたい。
(<http://www.nea.fr/jointproj/scap.html>)

(三菱総合研究所・滝沢真之, 村上佳菜,
2010年8月23日記)



原子力水素技術開発専門家会議 ST-NH 2 日本の HTTR の進展・貢献に大きな期待が寄せられる

2010年6月13~18日(サンディエゴ市, 米国)

米国原子力学会年会(2010 ANS Annual Meeting)トピカル会議(Embedded Topical Meeting)として Second International Meeting of the Safety and Technology of Nuclear Hydrogen Production, Control and Management(2nd ST-NH 2)が開かれた。ST-NH 2は、ANS 年会のトピカル会議として2007年に第1回会議が開催されて以来のもので、原子力水素、実際には高温ガス炉を用いた水素製造に関するテーマを取り扱うものである。

以下に2nd ST-NH 2の会議報告を行う。

プレナリーセッション

最初に、米国電力会社 Entergy の元副社長から原子力水素利用に関する期待と可能性について基調講演があった。講演は、世界のエネルギー事情に基づき原子力水素の必要性と有効性を、経済性および(化石資源に頼らない)エネルギー保障の観点から訴える力強い発表であった。米国における原子力水素の位置付けは、化石資源の高騰を予想しての経済性、自国のエネルギー保障性から捉えられており、我が国の環境論や技術開発による産業育成の位置付けは低くなっている。聴衆からは、産業界の興味に関する質問があり、企業名は示さなかったものの需要の観点から産業界の期待は大きいとの回答であった。

引き続き、各国の研究開発の活動状況と計画についての発表があった。本セッションが企画された1年前には、米国、仏国、EU、南アフリカも発表の予定であったが、彼らの原子力水素計画は縮小、もしくは延期されたため、発表登録したのは、日本、韓国、中国のみであった。しかし、中国は直前になり、発表者が現れず、発表はキャンセルされた。理由は不明である。その他、IAEA から原子力水素の経済性評価用計算コード HEPP に関する国際共同プログラムの紹介の発表があった。我が国に関しては、報告者が原子力機構が進めている HTTR 計画の現状について講演した。韓国の発表は従来からの自国の原子力水素計画をレビューしたのみで新しい情報はなかった。

各国の状況の発表がアジア2カ国のみというのは寂しい限りであり、聴衆の数も ANS 年会および他のトピカル会議に比べて少なかった。その中で、我が国の HTTR 計画が確実に成果を上げていることに参加者から賞賛があった。特に、セッション議長、コーディネーターから、米国の NGNP(next generation nuclear plant: 次世代原子力プラント)計画がまずは750℃程度で発電とプロセス蒸気供給用になったことを受けて、米国の原子力水素研

究開発計画は予算的にはゼロに等しいものの、計画そのものは存続しておりいずれ復活する、問題はそれまで技術の維持、発展がいかになされるかであり、アジア、特に日本の活動を強く期待する旨の発言があった。高温ガス炉水素の研究開発に関しては、これまで日本(HTTR 計画)が技術的に世界をリードしてきたが、今後は技術のみならず、世界の活動の存続そのものの支えになることが期待されており、我が国はその期待に応えるべく着実な計画の遂行を実施するべきであると考えられる。

テクニカルセッション

米国の原子力水素計画の縮小(大幅予算削減)を反映して発表は大きく2つに分けられた。一つはこれまでの成果を総括したもの、もう一つは個別的、基礎的な成果の発表であった。

これまでの成果の総括に関する発表では、米国から NGNP 計画、NHI(nuclear hydrogen initiative)、INERI(international nuclear energy research initiative)等の成果の発表があった。その中で、INERI で実施した IS プロセス工学的試験結果が目をつけた。個別試験で多くのデータを取得し、将来に繋げることが可能と総括していた。本来の目的であった全体閉サイクル運転に関しては成功しておらず、唯一、成功している我が国との共同研究が画策されたが、米国計画の縮小とともに共同研究計画も検討から外された。

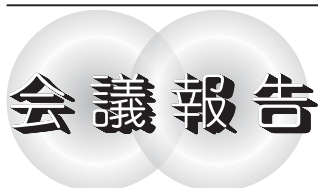
個別的、基礎的な成果の発表では、若手研究者の意欲的、挑戦的な発表がいくつかあった。内容は初歩的なものであるが、いくつかの技術的課題に独自のアイデアで新たな展開を開こうとするものである。中には原子力機構ですでに検討され廃案になったものもあるが、若い研究者が育ちつつあることは楽しみなことである。韓国の研究者から HTTR 計画との情報交換の希望があった。

原子力水素ワーキンググループ委員会幹事会への出席

標記委員会は、ANS 内での原子力水素に関するテーマを扱う委員会であり、国内外会議の計画、情報交換会等の開催を企画、運営するものである。報告者に対して幹事会にオブザーバー参加するよう特別に依頼があり、情報交換のため参加した。幹事会では、今後、いかに高温ガス炉水素研究開発を進めるか、資金源をどうするか等の議題が中心であった。引き続き、我が国の協力が要請された。HTTR 計画は米国と歩調を合わせて開発進めべきとの個人的見解を述べた。

(日本原子力研究開発機構研究・塩沢周策、

2010年7月30日記)



新たな原子力拡大への動きへの期待

International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP' 10)

2010年6月13～18日(サンディエゴ市, 米国)

米国原子力学会(American Nuclear Society: ANS)の2010年年会は2年に一度米国で開催されているICAPPと、原子力水素、材料・構造の国際会議を併設して行われた。参加者数も1,450名と大盛況であった。以下、ANSオープンプレナリーとICAPPの6つのプレナリーで話された4ジャンルの話題から紹介する。

(1) 軽水炉の新規建設“On schedule, on budget”

米国で再開された新規軽水炉は、計画通りに建設できるかに関心が移っている。日本の3メーカー、WH, AREVAは、大型軽水炉建設・設計対応状況について、それぞれ“On schedule, on budget”に向けた実績反映・改良努力をアピールした。標準化・モジュール化が共通のキーワードであった。米国内で2基のAP 1000(約100億ドル)を建設中のSCANA社のTimmerman氏は、建設では3年先行している中国事例について、発電・設計・エンジニアリング会社とは情報共有を行っている述べた。NEIのFertel会長からは、米国は建設が競争状況なので、実体として活動中の5炉型それぞれの標準化が進むこと、建設決定から6年で運転開始可能な進め方が重要とのコメントがあった。また、米国内のCO₂発生抑制強化、原子力産業育成(主要機器生産、サプライチェーン等)のために中小型モジュール炉適用(石炭火力代替)への期待を述べた。

(2) 原子力の世界展開

元NRC委員長のDiaz氏は、現在の規制は基本の策定から50年実績をもつが、規制は便益となるべきで、損失となつてはいけなくと強調した。レーガン大統領の基本方針「政府は機会を提供できるしそうせねばならなく、それをつぶしてはいけなく、また生産性を促進すべきで抑圧してはならない。」を引用した。証明つきの設計としてのMDEP(多国間共通設計認証化)についても言及し、NRCの実績・努力を示した。原子力の国際展開には、エネルギー、気候・環境、経済状況、人々の生活の質と養育レベル・国の安全、社会の安定度の達成が原子力利用の要件であると、原子力新規参入国自らの責任も強調した。ヨルダンのToukan氏は、持続可能な産業構造改革への原子力計画を紹介した。国内の有望な資源(若い人口構成とウラン鉱山)を利用して、原子力発電を導入し、エネルギーの国外依存を解消、水の確保、電力輸出を目指している。2013年からの建設に向けて、国内体制・人材育成(大学教育・研究炉建設)、プラント選定と国内会社立ち上げなどを進めている。

IAEAのRao氏は、米国・西側が進めてきた発展方式とは異なる世界各国の状況に応じた対応が求められる

ことを指摘した。小型炉(500 MWe以下)、中型炉(700 MWe以下)の原子炉は、今後5年以内に世界の各国で検討建設される可能性がある。許認可は3～5年、全体として10～20年の長期プログラム期間となると予想され、トルコ・UAEの原子力発電導入事例のように“Full Turn Key”で建設から運転までの広い対応が必要となっていることを指摘した。その他、燃料サイクルに関する最近の米国の動きについても言及し、政策決定には広い視点からR&D努力・成果の反映の重要性を指摘した。

(3) 中小型・モジュール炉からのチャレンジ

NuScale社のLorenzini氏は、大型プラント有利という建設コストの学習曲線は1960年代後半から1970年代前半の実績から評価されたので、現行経済状況と異なるため、標準・モジュール化設計の中小型炉の採用を検討すべき時が到来していると主張した。B&W社のHalfinger氏は「大小それぞれの棲み分け可能」という見解で、mPowerは米国内の鍛造・機器製造施設活用、内陸立地可能なことおよび製造業復活への貢献を強調した。「Repackage Nuclear to the Market」と表現した。韓国のHark Rho Kim氏は、SMART炉についてKAERIと産業界KEPCO-Consortiumの連携により設計・韓国の許認可手続きを加速し、2012年に韓国型式認証することを表明した。大型炉プロジェクトに続いて「もう一つの成功物語」を創造したいと締めくくった。

(4) 将来の米国燃料サイクルへの提言

MITのForsberg教授は、米国では燃料サイクルと廃棄物処分を対象ごと別々にR&D、施設整備・建設などと進めてきたことが、現在の先行き不透明な状況をつくりだしたとの観点からの提言を行った。必要スペースの有効利用、次世代への価値、地域経済・産業への貢献度など、機能を複合化・統合施設をつくることの重要性を指摘した。

米国電力会社からは近年の経済状況停滞・オイル価格低下等で、新規軽水炉建設は当面6～8基数程度の“低”予測レベルの範囲で動いているとの報告があったが、プレナリー全体では日本・韓国・中国からの報告が多くの活力を添えた。第3.5世代軽水炉安全強化技術・評価、第4世代高速炉(中小型等)、次期ガス炉・超臨界圧炉、米国燃料サイクル議論などの会場は盛況であった。

2011年のICAPPはフランスのニースで5月2日から開催予定である。

(エネルギー総合工学研究所・松井一秋、
TNES・川島正俊、2010年7月30日記)

そんな楽園—愛犬と暮らす人々—

ヴァイオリニスト 田中 雅子

「あら！かわいらしい…キツネちゃんかしら??」
街の中で、そして森の中で出会う“犬好き”さんからの質問。“日本犬でしてね、柴犬っていうんですよ”と答える。いつものやりとり、そしてそこから広がる会話、ゆったりと流れる幸せな時間。

ウィーンは緑があふれ、郊外に少しでも車を走らせるとあっという間に森の中にはいります。音楽留学という形で住み始めたこの街、最初は一年の予定だったはずがあまりの居心地の良さに、あれよあれよという間に時は過ぎて行き、本業以外の部分でも多くの事を学ぶことができました。

そんな約10年間のウィーン生活の中ですっかりなじんでしまった日常のひとつに、私の大好きな犬たちとの距離の近さというものがありました。

食料品を扱うスーパーマーケットや病院以外はほぼ、どこにでも一緒に入ることができ、レストランでも当たり前のように足元に寝そべっています。びっくりするくらいお行儀がよく、飼い主の言うことをちゃんと聞いて行動する彼らですが、決して自然と身につけたことではなく、小さなころから(もう生まれて何週間という頃から)厳しい躾をされているのです。

余談ですが、冒頭に書きました“柴犬”の彼女も、生まれて6週間くらいで我が家に来て、そしてすぐに躾を開始しました。3ヵ月を過ぎたころからは専門のトレーナーさんのプライベートレッスンを受けに行ったりも。お利口に散歩しているほかの子たちのようになしてほしいと、HUNDEZONEと呼ばれるドッグランスペースで仲良く遊んでお友達をたくさん作ってほしいと、毎日少しずつ、根気よくいろいろなことを教えたのですが、どうしたわけか我儘なおてんば娘に育ってしまいました。まあ、飼い主としてはそんなところもとても可愛かったりするのですが…。

ウィーンの街中は大多数がアパートメント形式の建物なので、セントバーナードやシェパードのような大きな犬からチワワやヨークシャテリアのような小さな犬まで同じように、多くの家が室内飼いをしています。そんな環境のため、生活習慣も時間帯も飼い主と同じように過ごす毎日を送り……結果、よく“夫婦が似てくる”といいますが、飼い主と飼い犬もとてもよく似てくるという現象が起きます。(性格だけではなく外見までも!)…とい

うことは、うちの子は私に似たということかな…!?と自分自身を少し見つめなおしてみたり、と、犬との生活はとてたたくさんの事を私に教えてくれました。

公園や川辺など緑の多いウィーンは犬のお散歩にも適しています。各区に3～4個は必ず柵で囲われた、自由に走り回れるドッグランスペースがありますし、糞を始末するための小さな袋もいたるところに取り付けられており、自由に利用することができます。タクシーも“犬が一緒なのですが”と言ってもたいてい問題なく乗車させてくれ、レストランの評価基準に“犬にとって快適か?”なんていう項目もあるのです。

そんな犬にとって天国のようなウィーンでも、悲しいことではありますが捨てられてしまったり、虐待で保護されたりする犬もいます。

日本では年間何十万頭という捨てられた犬が殺処分されています。

ウィーンの動物保健所では、新しい飼い主が見つかるか自然死するまで、ちゃんと面倒を見てくれます!なんという違いでしょう。

お散歩の途中で出会う飼い主さんの多くが、保健所から引き取ったのよと、そういった事情を話してくれました。

住んでみなくてはわからない現地の生活、私の大好きな犬たちが幸せそうにしている姿をたくさん見るのできるウィーンという素敵な楽園。学んできた音楽だけでなく、そんな素晴らしい文化をこれからたくさん伝えていくことができたなら、と懐かしい街を思い出しました。

(2010年 7月1日記)



田中雅子(たなか・まさこ)

名古屋市立菊里高等学校音楽科、愛知県立芸術大学を経て1999年ウィーン国立音楽大学に留学。第50回全日本学生音楽コンクール名古屋大会高校の部第1位、日本音楽審議会全国審査会最優秀賞。

在欧中には音楽活動のほかにラジオCM出演や現地企業のマスコットとしてホームページに登場するなど様々な活動を経験。10年間のウィーン生活の後、2009年末に帰国。現在はオーケストラの客演や室内楽、ソロ演奏家として活動中。



⑬ ^{けんか}喧嘩綱のある風景

薩摩川内市 山田島 稔



エネルギー基地のわが町

わが街「薩摩川内市」は鹿児島県の中西部に位置する人口10万ちょいの、いわゆる地方都市です。

市内には、九州電力㈱の川内原子力発電所1号・2号機で178万キロワット、火力発電所1号・2号機で100万キロワットを抱えています。合計278万キロワットの発電所があることからエネルギーの街を標榜しています。

現在、川内原子力発電所3号機の2019年運転開始を目指す増設計画が進行中で、県や市に賛成・反対陳情が入り乱れる状況が続いていました。しかし、第1次公開ヒアリングが無事終了し、本年6月には市長も3号機増設に同意する旨の表明がありました。

この3号機は、実現すれば159万キロワットという日本で最大、世界でも最大級の原子力発電所になります。増設の是非を問う「住民投票条例」制定へ向けての署名活動が行われていたり、県主催の「原子力発電について専門家の知見に学ぶ会」が開催されたりと、まだまだいろいろな動きが活発に行われています。

と、ここまでが原子力発電関係の現状紹介であります。このような世界に誇れるエネルギー基地のわが町に、もうひとつぜひ紹介させて頂きたいものがあります。それは、別名「けんか綱」と呼ばれる我が街自慢の川内大綱引の話です。

喧嘩綱

川内大綱引は「関ヶ原の戦」が行われた慶長年間に始まったと伝承されております。つまり、400年を超える歴史を誇ります。使用する大綱は長さはなんと365m、直径50cm、重さ6tという巨大な綱です。この大綱を上方(赤軍)と下方(白軍)に分かれた数千人が引き合います。

川内大綱引はそんじょそこの綱引きと違い、ただ引き合うだけではありません。通称『はだか』と呼ばれる上半身裸にサラシを巻いた「押し隊」の若者達が、中心部で激しくぶつかりあうのです。その数は何と3,000人を越します。それが最大の特徴です。そのことから別名「けんか綱」といわれており、とても勇壮で豪快な祭りなのです。

大綱引の開催場所である国道沿いの商店街で育った私は、小さい頃から自宅の前で開催される大綱引を間近に見て育ちました。裸の上半身にサラシを巻き、地下足袋

を履いて「押し隊」に参加する若者は子供たちが皆憧れます。早くあの「押し隊」の仲間入りをしたい！そう願ったものでした。「押し隊」の屈強な若者たちが相手陣に押し込もうと目を吊り上げ必死の形相で押し合いぶつかり合う迫力たるや中途半端なものではありません。地元の子供は中学生になると「押し隊」に参加しますが、その迫力に恐れをなし、最後尾でウロウロするのが精一杯だったものです。

荒っぽい行事ですから、「押し隊」に参加すると擦り傷やタンコブ、突き指等は当たり前で骨折も名誉の負傷ですまされます。私も若い頃に向う脛と鎖骨を1回ずつ骨折した経験があります。

しかしながら、1回でも参加するとあの異状とも思える迫力と興奮が病みつきになってしまうのです。綱引の時期が近づくと気もそぞろになりほとんど仕事が手に付かなくなります。この症状が出始めると、大綱引が終わるまで家族からも会社からも全く当てにされなくなるのです。本人はこれ幸いとばかりに約1ヶ月間安心して(?)大綱引の準備等に専念できます。こういう症状の人のことを地元では「綱バカ」と呼びます。川内地域にはこの「綱バカ」が相当数生息してしまっていて、私もその一員であります。家族や周囲の白い眼にもめげず毎年参加してきましたが、さすがに50歳過ぎから体力・気力とも荒仕事に耐えられなくなりました。10年ほど前から川内大綱引保存会の役員としてもっぱら運営に携わっています。「川内大綱引」は毎年、秋分の日の前日9月22日に開催されます。

原発と喧嘩綱。どちらもわが街を代表する“勇壮な”もので、街の誇りであります。

手前味噌ではありますが、資源小国日本を下支えするエネルギー基地、そしてあのすさまじいほどの迫力と熱気溢れる喧嘩綱。どちらも一見の価値あります。お勧めです。イッドキテミヤンセ！

(2010年 9月10日 記)

山田島 稔(やまだしま・みのる)

薩摩川内市在住。

事務用機器等販売会社経営

川内大綱引保存会副会長