

### シリーズ解説

我が国の最先端研究開発

No. 24 理化学研究所(第3回)

### 14 京速コンピュータ「京(けい)」とは何か？ 世界最速レベルの計算性能を目指して

科学技術計算を高速に行う計算機であるスーパーコンピュータ。それは科学技術の発展を支える計算科学のための基盤ツールの一つだ。今回は理研が開発を進めている世界最速レベルの汎用型スパコン「京」について紹介する。

横川三津夫、庄司文由



システム完成予想図(模型)

### 解説 「匠」たちの足跡 第2回

### 19 原子力技術者・ 研究者を育成 「武蔵工大炉」

武蔵工大炉は、昭和38年1月に初臨界に成功し、平成元年12月に運転を終了。その間に学内外の多くの研究者・技術者に利用された。

堀内則量



### 解説 みんなでわろうシリーズ

### 23 時空の創生：超弦理論から 原子核へ(2)超弦理論と宇宙論： 極小素粒子と極大の関係

素粒子がすべて小さな「ひも」から構成されているとする超弦理論。この理論は、「ブレーンワールド(膜宇宙論)」と呼ばれる驚くべき新宇宙描像を提供する。

橋本幸士

### 巻頭言

- 1 フロントランナー型イノベーション  
創出能力の強化に貢献する原子力  
—巨大複雑系社会経済システムの創成  
力の強化を  
柘植綾夫

### 時論

- 2 核軍縮の新たな流れ：好機を逃すな

核軍縮をめぐる動向は最近、順調に進展している。しかし、この核軍縮に友好的な雰囲気がいままでも継続するという保証はない。

黒澤 満

### 解説

- 33 原子力開発のための中性子核  
反応データベース—評価済み核  
データライブラリーJENDL-4.0の完成

原子力施設の設計等には、中性子と原子核がどのような反応をどの位の頻度で起こすかを記述する核データが必要となる。本稿では、核データの評価について紹介するとともに、本年5月に公開した最新の評価済み核データライブラリーJENDL-4.0の作成手法、精度検証および利用について解説する。

柴田恵一、岩本 修、千葉 豪

- 38 原子力機器材料への技術的挑戦  
と国際展開—日本製鋼所の製造技術  
の変遷と今後の取り組み



日本製鋼所の室蘭製作所では現在、世界最大の600トン鋼塊(=左)を材料にして、第三世代炉と呼ばれる各種原子炉圧力容器部材の製造が盛んに行われている。

佐藤育男

- 43 炭素14環境中移行に関する研究  
の現状—食物を介しての人と原子力  
の接点

原子力施設から放出される放射性核種の中では、炭素14が最も線量寄与が大きい。その影響を評価するためには、炭素の循環に紛れ込んだ炭素14の動態把握が必要である。

山澤弘実

表紙の絵 「白い朝」 相馬貞雄

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)

栃木県宇都宮市にある日本中央競馬会育成牧場の雪の朝の風景です。馬がじゃれ合う事でコミュニケーションをとることが面白く作品にしてみました。

## 解説

### 28 分離変換技術はどこまで成熟したか？

#### 技術成熟度評価に基づく現状整理と提案

NASA や JAXA でも活用されている技術成熟度基準を用いて、放射性廃棄物処理・処分の負担軽減などを目的とする分離変換技術の成熟度を評価した。

「分離変換・MA リサイクル」研究専門委員会

## 報告

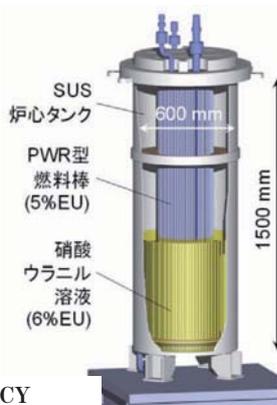
### 48 核不拡散のための「核実験禁止アジア地域ネットワーク」

国際保障学研究会では、アジア地域の核軍縮・核不拡散を念頭に置いた「核実験禁止アジア地域ネットワーク」の構築を議論し、提案をまとめた。 篠原伸夫, 一政 祐行, 小鍛治 理紗

## 連載講座 実験炉物理(5) 未来へのメッセージ 次世代の安全基盤の確立に向けて

### 51 JAEA の熱炉体系炉物理実験

臨界安全は、臨界を防止する研究である。今回は臨界実験のうち、JAEA で実施された熱炉体系のものに着目し、過去から現在までの変遷と将来の展望を述べる。 外池幸太郎



定常臨界実験装置 STACY

## 私の主張

### 56 「もんじゅ」はエネルギー・環境問題を解決できるか—高速増殖炉の研究開発について

中江延男

## 会議報告

### 61 第2回シンポジウム「RI 国内製造に向けての開発研究」

永井泰樹

### 62 日本学術会議が遅れている高レベル放射性廃棄物—サイト選定問題を幅広く議論

木村逸郎, 田中 知

## 4 NEWS

- ベトナム原発建設で日本企業が受注
- 東京電力福島第一3号機がプルサーマル開始
- 原子力委、高レベル対策で学術会議に提言依頼
- 六ヶ所再処理工場の竣工を2年延期
- 政府、ヨルダンと原子力協力協定
- 北大と日立製作所が陽子線がん治療施設を開発
- 絶縁体を利用した熱発電に成功
- 高性能単色中性子標準照射場が完成
- 原産、IAEA 総会併設展示会に出展
- 原産、日仏原子力専門家会合を開催
- 海外ニュース

## 原子力外交シリーズ(2)

### 58 原子力産業の国際展開について

原子力産業の国際展開における我が国の課題と政府の取り組みについて述べる。

三又裕生

## 談話室

### 60 常世の国の食と文化

—「2010年春の年会」特別講演

神原千恵

## Relay Essay ドナウ川の畔から(7)

### 63 オーストリア10年の体験

片岡典子



### 64 書評『The New Energy Crisis Climate, Economics and Geopolitics』

関 泰

### 66 会報 原子力関係会議案内、主催・共催行事、人事公募、訃報、英文論文誌(Vol.47, No.12)目次、部会便り、和文論文誌(Vol.9, No.4)目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

## WEB アンケート

8月号のアンケート結果をお知らせします。(p.65)

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

学会誌ホームページはこちら  
<http://www.aesj.or.jp/atomos/>

# フロントランナー型イノベーション創出能力の強化に貢献する原子力

## 巨大複雑系社会経済システムの創成力の強化を



芝浦工業大学学長，三菱重工業(株)特別顧問

**柘植 綾夫** (つげ・あやお)

東京大学大学院工学研究科博士課程修了，工学博士。三菱重工業(株)代表取締役，内閣府総合科学技術会議常勤議員などを経て2007年から現職。『イノベーター日本』(監修，2006年)などの著書あり。

キャッチアップ型と言われた20世紀のイノベーションと比較して，21世紀の日本が持続的発展を実現するためには，「フロントランナー型イノベーション創出能力」を強化せねばならない。社会・経済的価値化に必要な個別の科学技術群のスペクトル幅の広がりや相俟って，要求される技術レベルは高性能，高信頼性，さらには人の心の満足までも満たさなければ社会は受容しない。まさに「フロントランナー型イノベーション創出」は「巨大複雑系社会経済システムの創成」とも言えよう。

「巨大複雑系社会経済システム」の共通特性は，「空間的，物理的ないしは社会的広がりが巨大であり，その中に内包される多数の要素の相互作用が複雑であり，かつ，その性能と信頼性は社会と経済に多大な影響を与える人工物システム」と言えよう。政府の新成長戦略(平成22年6月閣議決定)の一環で実現を目指すグリーン・イノベーションによる環境・エネルギーシステムや関連の社会システム創成もこの範疇に入る。また，策定中の第4期科学技術基本計画の支柱である「我が国が直面する重要課題群の解決」もこの範疇に入る。

世界のフロントランナーとして我が国の原子力を支える産業・大学・行政関係者は，原子力システムを「巨大複雑系社会経済システム」としてとらまえて，その創成力とそれを支えるイノベーション人材育成を強化する使命を担う。しかしながら，学術・高等教育界はますます拡散する学術ディシプリンの潮流に流され，産業界も資本の論理に強く支配されるあまり，長期的な視点に立った人材育成への投資を怠っていないであろうか。その結果，我が国の強みであった「巨大複雑系社会経済システム」の創成力と，それを支える「人材と組織力」が弱体化しつつあることは由々しき事態である。

産業・大学・行政の連携のもとで，本問題の国民的認識を深化させる活動を行うと共に，創成力を構成する重要要素である「俯瞰力，シンセシス力，共創力」の評価基準の開発を行い，関連する研究と教育及び人材育成プログラムの適切な評価に向けて共有化と実践をすべきである。

教育と科学技術振興を司る行政は「創成力強化のための人材育成および制度設計」の観点から，巨大複雑系社会経済システムを対象とした「認識科学と設計科学の連携」を可能とする産学官連携の俯瞰型人材育成プログラムを設定し，組織と学術分野を超えた行動を促すべきである。高等教育を担う大学は，従来の学部・専攻・学科の枠を超えて，巨大複雑系社会経済システムの創成力の育成を主眼とする教育プログラムを立ち上げ，行政や社会・産業界とも積極的に連携して人材育成に努めるべきである。産業界は大学および研究型独立行政法人と積極的に協働して，関連する人材育成プログラムに参加・貢献するべきである。

政府が策定中の第4期科学技術基本計画の新機軸である「科学技術政策とイノベーション政策の一体的推進」を持続可能ものにするためには，以上の視座を盛り込んだ「教育(人材育成)」と「研究(科学技術革新)」と「イノベーション(社会経済的価値の創出)」の国を挙げた三位一体的推進機能の強化が喫緊の課題である。

原子力ルネッサンスを支える産学官の関係者は，以上の視点を持って世界をリードする原子力システム創成力の強化を図るとともに，日本のイノベーション創出能力の強化に向けた人材育成へ貢献する使命も持つことを忘れてはならない。

(2010年 10月29日 記)



## 核軍縮の新たな流れ：好機を逃すな



黒澤 満(くろさわ・みつる)

大阪女学院大学教授  
大阪大学大学院法学研究科博士課程修了、  
法学博士、大阪大学大学院国際公共政策研  
究科教授を2008年退職、大阪大学名誉教  
授、2009年4月より日本軍縮学会会長。

はじめに

米国にオバマ大統領が誕生して以来、「核兵器のない世界」の追求という掛け声とともに、国際社会には核軍縮に向けての新たな流れが生まれている。この5月に開催された核不拡散条約(NPT)再検討会議も最終文書の採択に成功した。また国連事務総長も核軍縮に熱心に取り組んでいる。本稿では、これらの流れを分析しつつ、今後の進むべき道を考えてみたい。

### オバマ大統領のプラハ演説

2009年4月5日のプラハにおけるオバマ大統領の演説は、それまでのブッシュ政権下における核軍縮の停滞を一気に打ち破り、世界中に新たな平和な世界の機運を生み出すものであった。

オバマ大統領は、米国は核兵器を使用した唯一の国として行動する責任があると述べ、核兵器のない世界における平和と安全保障を追求するという米国のコミットメントを明確に、かつ確信をもって述べた。このメッセージは世界中で好意的に受け取られた。

彼はさらに、冷戦思考を終わらせるため、国家安全保障戦略における核兵器の役割を低下させると述べ、ロシアとの新たな戦略核兵器削減条約の本年度中の締結、包括的核実験禁止条約(CTBT)の米国による批准の追求、兵器用核分裂性物質生産禁止条約(FMCT)の追求を約束した。また、国際的な核不拡散体制の強化および核テロリズムへの対応の重要性を強調し、核兵器や核分裂性物質の厳重な管理を行う意図を表明した。

### 米国の核態勢見直し(NPR)報告書

オバマ政権は、当初の予定より少し遅れたが、2010年4月6日に、「核態勢見直し」報告書を提出した。これは核兵器に関わるあらゆる計画、方針、政策を含むものであり、きわめて重要な文書である。2001年にブッシュ政権により提出されたものは、地中貫通型など新たな核兵器の開発を計画し、そのための核実験の可能性を残し、イラン、イラク、北朝鮮、シリア、リビアなど非核兵器国に対しても核兵器を使用すると述べていた。

オバマ政権の核政策はこれらの点でブッシュ政権とは

180度異なるもので、新たな核兵器は開発しないことを明言し、CTBTの批准を進めるとしており、NPTの締約国でありそれを遵守している非核兵器国には核兵器を使用しないというものであった。さらに核兵器の数と役割を低減させるという政策を強調している。これらの新たな政策は、NPT再検討会議に向けての良好な雰囲気を作り出すのに有益であった。

### 米口の新 START 条約の署名

米国とロシアの間で戦略核弾頭を削減する新 START 条約が、4月8日に署名された。これは1991年に署名された START 条約が2009年12月に失効したため、その後継としてその失効前に作成されるべきであったが、少し遅れて署名された。

この条約は、戦略核弾頭を7年間でそれぞれ1,500に、またその運搬手段(大陸間弾道ミサイル(ICBM)、潜水艦発射弾道ミサイル(SLBM)、重爆撃機)を700に削減するものである。削減数自体はそれほど大きなものではないが、この条約はブッシュ政権期に悪化していた米口関係を「リセット」するものと考えられており、今後の一層の削減の出発点となっている。この条約署名は、米口がNPT第6条の核軍縮義務を遵守していることをアピールするのに格好の手段であり、再検討会議に向けての米口の立場を強めるものであった。

### 2010年 NPT 再検討会議

このように会議に向けての国際社会の動きはきわめて良好なものであった。特に2005年の会議が米国と非同盟諸国の対立で、決裂し失敗に終わったことで核不拡散体制が弱体化しており、米国をはじめとして多くの国が会議に向けて積極的な態度を示していた。

会議は最終文書を採択したが、その前半部分は条約の運用のレビューに関する部分で、議長の問題でまとめられたものである。後半部分は、今後とるべき行動計画に関するものであり、この部分はコンセンサスで採択されている。

多くの国は会議の展開に協力的であったが、すべての国がそうであったわけではなく、特にイランはさまざま

な提案や発言で会議を妨害しようと試みた。しかし今回は、米国は一般的に協力的な姿勢を示し、エジプトにも中東問題などで一定の妥協を行った。その結果、イランは孤立することになり、行動計画に反対することはできなかった。

### 核軍縮に関する行動計画

最終文書の行動計画の中で核軍縮に関しては22の行動計画がコンセンサスで合意されている。そこでは、核兵器の削減、CTBTの発効、FMCTの早期締結、核兵器の役割低減、消極的安全保証など伝統的に主張されてきたもののほかに、核兵器禁止条約、核兵器の人道側面なども言及されており、今後の核軍縮の進展を期待しつつ、今後の進むべき道を考えてみたい。

### 核兵器禁止条約

会議において非同盟諸国は2025年までに3段階で核兵器を廃棄することを主張しており、核兵器国はそのようなものは現実的でないとして反対していた。核兵器禁止条約という考えには非同盟諸国のみならず、スイス、オーストリア、ノルウェーなども支持を表明した。

最終文書においては、すべての国は核兵器のない世界の達成と維持に必要な枠組みを設置する必要を認め、パン・ギムン国連事務総長が提案した核軍縮の5項目提案に注目するという形で取り入れられた。

NPT再検討会議の最終文書が核兵器禁止条約に言及したのは、今回が初めてであり、この規定を根拠としてそれをいかに達成するかという議論が今後広範に行われるであろう。

### 国際人道法の遵守

これまでの再検討プロセスでは、核兵器の使用の問題はあまり議論されることはなかったが、今回は主としてスイスが核兵器は非人道的で、違法であると主張した。

最終文書では、核兵器の使用による壊滅的な人道的影響を懸念し、すべての国が国際人道法を遵守する必要性を確認している。1996年の国際司法裁判所の勧告的意見では、核兵器の使用は国際人道法に一般的に違反するが、自衛の極端な場合には合法か違法か判断できないというものであった。

核兵器廃絶に向けての大きな一歩として、核兵器使用禁止条約の作成が考えられる。特に上述の勧告的意見を基礎に使用禁止のキャンペーンを進めることは可能であり、核軍縮に向けての有益な措置となりうる。

### 核兵器の削減

核兵器の数を削減することが核軍縮の中心的措置であり、最終文書において、核兵器国は、配備および非配備のすべてのタイプの核兵器を、一方的、二国間、地域的、

多国間で削減するよう求められている。会議の直前に署名された新START条約は広く歓迎され、米口はその早期発効と完全履行を約束し、一層の削減のため協議することが奨励されている。新START条約の次の削減条約が米口間で早期に交渉され、締結されることが期待される。またそれに引き続いて他の核兵器国を巻き込んだ多国間の核軍縮交渉が必要になる。

### 核兵器の役割の低減

オバマ大統領は、安全保障政策における核兵器の役割の低減を強調しており、核態勢見直し報告書でも、非核攻撃に対する核兵器の役割を低減させ、核兵器の使用を制限し、NPT締約国でそれを遵守している非核兵器国には核兵器を使用しないと規定された。

最終文書は、あらゆる軍事のおよび安全保障上の概念、ドクトリン、政策で核兵器の役割を低減させることを定めている。

### 消極的安全保証

消極的安全保証とは、核兵器を保持しない国に対して核兵器を使用しないと約束することで、米国は上述の政策変更を行っており、また非核兵器地帯条約の議定書で規定される消極的安全保証に対して、各核兵器国は積極的に支持する態度を示している。

非同盟諸国は法的拘束力のある消極的安全保証を求めているが、最終文書はそれに関する効果的な国際取決めの議論の開始を勧告しているだけである。

### CTBTとFMCT

CTBTについては早期の発効を要請し、核実験のモラトリアムを確認しているだけであり、FMCTについても、軍縮会議での交渉の即時開始と早期の締結を勧告しているだけで、2000年合意と同様である。

これら二つの重要な措置は、10年間進展がなかったことが証明されているわけであり、前者については米国と中国の批准が早期に行われるべきであり、後者についてはパキスタンなど一部の国の反対をどう乗り越えて交渉を開始するかが重要である。

### むすび

核軍縮をめぐる最近の動向は、新START条約の署名やNPT再検討会議における最終文書の採択など、順調に進展していると考えられる。その主要な要因は米国のオバマ大統領のリーダーシップである。

しかしこの核軍縮に友好的な雰囲気がいままで継続するという保証はないので、各国はこの機会を逃すことなく積極的協力し、核兵器のない世界に向けてできるだけ大きく前進していくことが必要である。

(2010年10月15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。

## 日本企業がベトナムでの原発建設を受注

ベトナムのズン首相は10月31日、ハノイを訪れている菅総理大臣と会談し、ベトナムが南部に建設を計画している第Ⅱ期の原子力発電所2基の建設事業について、日本をパートナーとして選定したことを表明した。これにより、日本企業が受注することが内定した。着工は2014年、運転開始は20年の見込み。

この決定についてベトナム側からは、「政治的戦略的判断に基づくものである」との説明があった。また両国は、日越原子力協定の実質的合意について、早期の署名に向け取り組むことで一致した。なお第Ⅰ期の2基については、ロシアがすでに受注している。

## 東京電力福島第一3号機がプルサーマル開始

東京電力の福島第一原子力発電所3号機が10月26日、プルサーマル発電による営業運転を開始した。運転開始は1999年に国の許可を得て以来、実に11年ぶり。昨年11月に九州電力玄海3号機で本格スタートした国内のプルサーマル発電は、次いで今年3月に四国電力伊方3号機でも開始され、今回の福島第一3号機は3基目、BWRでは初めてとなる。

福島第一3号機のプルサーマルは、99年7月に実施に係わる国の許可を取得したものの、立地自治体の了解が得られず、これまで、計画が中断されていた。今年に入って、福島県の佐藤雄平知事が、立地町および県議会の要請、県エネルギー政策検討会の議論などを踏まえ、プルサーマル実施受け入れに向け、2月に、耐震安全性の確保、高経年化対策の実

施、長期保管 MOX 燃料の健全性確認の「技術的3条件」を提示した。これに対し、東京電力では5月、いずれについてもプルサーマル実施に当たり、問題となる事項のないことを確認の上、報告書を取りまとめ、国および県に提出、さらに、原子力安全・保安院も7月、専門家による審議、現地立入検査を通じ、これら3条件に対する評価結果を妥当なものとして評価し、8月6日、佐藤知事はプルサーマル実施受け入れを表明した。

6月19日より定期検査を実施している福島第一3号機では、8月下旬に MOX 燃料を装荷、9月18日には原子炉を起動させていた。

(資料提供：日本原子力産業協会)

## 原子力委、高レベル廃棄物で学術会議に提言依頼

原子力委員会は9月7日、高レベル廃棄物の処分に関する取組みにおける国民に対する説明や情報提供のあり方について、日本学術会議に提言を求めた。同委員会が第三者的機関に意見を求めるのは初めて。

依頼文書では、原子力発電環境整備機構(NUMO)の文献調査開始に向けての取組みや原子力委員会の見解などに触れ、技術的事項のみならず、社会科学の観点を含む幅広い視点から検討することの重要性を認識し、第三者的で独立性の高い学術的な機関

の意見、見解を、これまで以上に積極的に求めていくことにしたとしている。

提言には、地層処分施設建設地の選定へ向け、その設置可能性を調査する地域を全国公募する際、および応募の検討を開始した地域ないし国が調査の申入れを行った地域に対する説明や情報提供のあり方、その活動を実施する上での2010年度中に取りまとめられる予定の NUMO による技術報告の役割についての意見を求めている。

(同)

## 六ヶ所再処理工場の竣工を2年延期

日本原燃は9月10日、六ヶ所再処理工場の竣工時期を今年10月から12年10月に2年間延期する工事計画変更を、経済産業省に届け出るとともに、同施設を立地する青森県および六ヶ所村に対し報告した。06年3月のアクティブ試験開始以降で、再処理工場のしゅん工期変更は、これで9度目だが、2年押し的大幅な延期は初めてのこと。同社では、今回の工程変更について、アクティブ試験を「安全を最優先に慎重に進める」ことを柱に見直したのとしている。

六ヶ所再処理工場のアクティブ試験は、試運転における最終段階として、実際に使用済み燃料を用いて、施設全体の機能、性能、安全性を確認するもの。現在、ガラス溶融炉の流下ノズル閉塞、天井レンガ脱落、高レベル廃液漏えいなどにより、最終ステッ

プの段階で滞っているものの、これまでに、およそ400トンの使用済み燃料が処理された。

これらを踏まえ、今回の工程見直しに当たって、日本原燃では、アクティブ試験を確実に成功させるため、(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などの必要な設備改善、(2)ガラス固化試験に当たり実規模モックアップ試験装置(KMOC)と実機の比較検証を実施し段階的にデータを確認、(3)現場経験を踏まえて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、(4)安定運転に万全を期すため固化セル内の機器の点検を継続して実施——の4方策に取り組むこととした。

(同)

## 政府、ヨルダンと原子力協力協定

日本とヨルダン両政府は9月10日、ヨルダンのアンマンで原子力協力協定を締結した。浅子清・在ヨルダン臨時代理大使とトゥカーン・ヨルダン原子力委員会委員長が署名した。今後、双方が必要な国内手続き完了を相互に通告する外交文書を交換した日の後、30日目に発効する。

協力の分野は、①ウラン資源の探鉱・採掘、②軽水炉の設計・建設・運転、③軽水炉の安全・防護、

④放射性廃棄物の処理・処分、⑤放射線防護・環境監視、⑥放射性同位元素および放射線の研究・応用——の範囲で、核物資、資材、設備、技術を供給できることになるが、ウラン濃縮、使用済み燃料再処理、プルトニウム転換のための資材や生産技術、プルトニウムそのものの移転は除外される。

(同)

## 北大と日立製作所が陽子線がん治療施設を共同開発

北海道大学と日立製作所は9月21日、国家プロジェクト「最先端研究開発支援プログラム」の採択を受け、新型の陽子線がん治療システムの共同開発契約を締結したと発表した。

本プロジェクトにおいて、北大がX線治療で培った「動体追跡技術」と、日立が世界で最初に一般病院に導入した「スポットスキニング照射技術」を世界で初めて組み合わせ、呼吸等で位置が変動する腫瘍に対して高精度で陽子線の照射可能な小型高性能陽子線がん治療システムを開発し、陽子線がん治療施設を北大病院敷地内に建設する。本施設は、2011年度中に着工し、2014年3月に完成、北大病院の新施

設として治療開始の予定。

北大と日立は、2003年4月に包括的な産学連携協定を締結。特に医療分野では、2006年度に10年間継続予定の文部科学省科学技術振興調整費による大型国家プロジェクト「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成／未来創薬・医療イノベーション拠点形成」が採択され、放射線治療において非常に重要な細胞の放射線抵抗性を評価し、診断するための新しい分子イメージング技術の開発を共同で推進している。

(同)

## 絶縁体を利用した熱電発電に成功—グリーン・省エネデバイス開発に道

東北大学の齊藤英治教授，同大学院生の内田健一氏と原子力機構先端基礎研究センターの前川禎通センター長らは，温度差をつけた絶縁体から電気エネルギーを取り出す新しい手法を発見した。

熱電材料は温度差を与えると，高温部と低温部の間に電圧が生じることを利用して，熱から電気にエネルギーを変換するもの。この性質は，「ゼーベック効果」と呼ばれる。逆に，熱電材料に電位差を与えると，温度差が生じる性質をもつ（ペルチェ効果）。

近年はこの熱電材料の最小単位である熱電変換素子に，排熱などを使って電気を生成させることで，環境負荷が小さいエネルギー源として利用することが期待されていた。しかしながら，このゼーベック効果は，金属や半導体のように電気を通す物質でしか起こらず，電流が素子を通る間に発生する熱などによってエネルギーロスが生じて発電効率を下げてしまうため，熱電変換素子の実用化には制限があった。

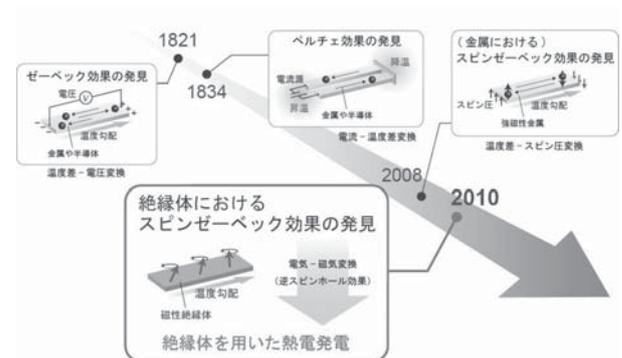
一方，齊藤教授らは，温度差によって電子が自転する性質である「スピン」が温度の勾配と平行な方向に流れる現象である「スピンゼーベック効果」が，絶縁体である磁性ガーネット結晶絶縁体中で生じるこ

とを発見。この絶縁体に金属薄膜を取り付けることによって，絶縁体中で生じたスピンの流れを電気エネルギーに変換することで，従来は不可能だった絶縁体ベースの熱電変換素子をつくることに成功した。

これにより，エネルギー損失が小さい絶縁体を熱電変換素子に利用できるようになり，熱電材料は大規模発電から携帯用小型熱電変換素子まで幅広く応用されることが期待される。

（参考：http://www.jaea.go.jp/02/press/2010/p10092701/index.html）

（資料提供：東北大学，日本原子力研究開発機構）



熱電効果の歴史

絶縁体を用いた熱電発電現象が初めて観測された。

## 世界に誇る高性能単色中性子標準照射場が完成—中性子利用のための技術的基盤が確立

原子力機構は茨城県東海村にある原子力科学研究所放射線標準施設に，8 keV から19MeV という広いエネルギー範囲の中性子を一つの施設で安定して供給できる，世界で唯一の単色中性子標準照射場を完成させた。単色中性子標準照射場とは，単一エネルギーの中性子(単色中性子)を利用して，中性子測定器の感度を精度よく試験できる照射場のことをいう。

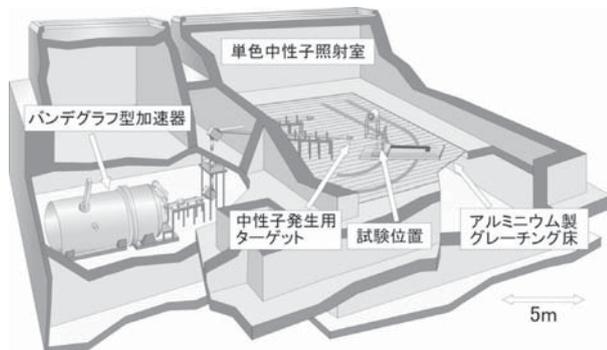
近年，中性子の利用は，原子力分野のみならず，一般産業・医療分野にも拡大しており，広いエネルギー範囲で中性子の量を精度よく測定することが求

められている。そのためには中性子測定器の感度を正確に決めることができる照射場が不可欠で，広いエネルギー範囲について一つの施設で系統的に中性子測定器の試験ができる照射場が求められていた。しかしながらこれまでは，数 keV から数10keV までの単色中性子を安定して発生させることはできなかった。

このため原子力機構では，ターゲット入射時の陽子のエネルギーを微調整する技術を新たに開発することで，これまでできなかった数 keV 領域の単色中性子を確実に発生させることに成功し，5桁にわ

たる広いエネルギー範囲の単色中性子を一つの施設で安定して供給できる世界で唯一の照射場を開発した。

この照射場の完成により、中性子測定器に関する



単色中性子標準照射場の配置図

国内外の規格で要求される、すべてのエネルギー範囲でのエネルギー特性試験を一つの施設で系統的に実施することが初めて可能となり、中性子利用のための重要な技術的基盤が確立した。なお、この照射場は、原子力機構の施設供用制度を通じて、国内外で広く利用することができる。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press/2010/p10100401/index.html>)

(資料提供：日本原子力研究開発機構)

## 原産，IAEA 総会併設展示会に出展

9月20～24日に開催されたIAEA総会の併設展示会において、日本原子力産業協会は日本原子力研究開発機構、放射線医学総合研究所と緊密に連携し、昨年に続き「日本ブース」を構成し、わが国の原子力

関連技術等に関する出展を行った。当協会からは、エネルギー総合工学研究所が取りまとめている次世代軽水炉プロジェクトを紹介した。

(資料提供：日本原子力産業協会)

## 原産，日仏原子力専門家会合を開催

原産協会は9月28、29日、フランスのヴェルサイユにて「第17回日仏原子力専門家会合(N-20)」を開催した。同会合は、日仏両国の原子力関係者が、原子力開発計画や当面する諸問題について最新の情報や率直な意見を交換することにより、双方の相互理解と協力を促進することを目的として、日仏交互に開催しているもの。

今回の会合では、フランスからはベルナル・ピ

ゴ原子力・代替エネルギー庁(CEA)長官、日本からは服部拓也原産協会理事長をはじめとする計28名が参加。両国のエネルギー・原子力政策や、高速炉開発協力、新規導入国支援計画、人材育成、既存炉の活用とリサイクル施設の現状等について情報を交換し、率直な議論を行った。

(同)

## 動画配信のご案内

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

2010年9～11月の番組は以下の通り。

・地層処分の技術基盤整備に向けて—東濃地科学セ

ンターの取組み(9/15公開)

・ともに考える原子力・放射線—原産協会の理解促進活動(10/18公開)

・日本原子力研究開発機構「もんじゅ」レポート(11/15公開)

(同)

## 海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[米国]

### ハイペリオン・パワー社、サバンナ・リバー研に小型原子炉

米国のサバンナ・リバー国立研究所は9月10日、米エネルギー省(DOE)がサウスカロライナ州で所有するサバンナ・リバー原子力サイトに、ハイペリオン・パワー・ジェネレーション(HPG)社が開発した小型原子炉を設置するため、両者が了解覚書(MOU)に調印したと発表した。

「ハイペリオン・パワー・モジュール(HPM)」と呼称されるこの小型炉は、直径1.5m、高さ2.5mの円筒形。冷却材として鉛ビスマスを、燃料にはウラン235濃縮度20%以下の3水素化ウランを使って2.5万kWの発電が可能。8~10年間、燃料交換なしで稼働した後は、モジュールごとにハイペリオン社の工場燃料交換を行えるため、核不拡散上のリスクも少ないという。

HPMのほかにも、東芝の次世代超小型原子炉システム(4S炉)といった小型炉は、かねてより離島や遠隔地での石油・ガス開発、村落、軍事施設などでの利用が検討されている。サバンナ・リバー研のHPM計画では、10年以内にHPMを設置。近隣のイーキン町を手始めに、世界中の小さな村落にも手軽に電力と浄化水の供給が可能になると強調している。

ハイペリオン社は米国ロスアラモス国立研究所の元研究者らを擁する企業。HPMの設計認証(DC)を得るため、すでに米原子力規制委員会(NRC)と予備協議を実施しており、2011年頃を目処にDCの申請書を提出する計画だ。

### MIT、「核燃料サイクルの将来」に関する報告書

マサチューセッツ工科大学(MIT)は、「ウラン資源の入手可能性および科学的に堅実な使用済み燃料管理方法の利用の観点から、少なくとも今世紀中米国において再処理は必要ない」とする報告書を取りまとめ、9月16日に公表した。

MITは2003年に、「世界の気候変動の緩和に大きく貢献するためには、2050年までに原子力発電所の総出力を少なくとも10億kW必要」とする報告書『原子力の将来』を取りまとめている。さらに2009年には同報告書の改訂版を発行し、「世界の新規原子力発電所の開発スピードは、気候変動の緩和に必要な割合に比べて大幅に後退している」と指摘している。

今回『核燃料サイクルの将来』と題する報告書を取りまとめた理由について、「原子力発電が低炭素オプションとして引き続き重要である」からとしている。原子力発電は、気候変動リスクを緩和するため重要な役割を果たすことができる規模、すなわち今世紀中頃までに世界でテラワット(10億kW)規模での開発が可能であるとしている。また「展望が大きく変わったので、米国における原子力計画拡大のための重要な技術選択肢とそれらの選択の短期的な政策的意味に焦点を絞って、調査した」と付け加えている。

MITはまた、「米国では、燃料サイクル政策は混乱状況に置かれてきた。原子力の拡大のためには現在のすばらしい安全性、信頼性の記録を維持しつつ、大きな課題であるコスト問題、廃棄物処分、核拡散問題を克服していかなければならない」と指摘した。さらに「比較的早い時期に燃料サイクルの展開について広範かつ長期的な視点からの重要な決定を行う必要がある。その内容は、どのタイプの燃料を使うか、炉型は、使用済み燃料はどうするか、長期にわたる放射性廃棄物の処分方法についてである。今回の調査の目的は、これらの決定のための情報である」としている。

また、「本報告書の主なメッセージは、オープンサイクルの継続、つまり①軽水炉の使用済み燃料貯蔵管理、②地層処分の開発、③様々な原子力エネルギーの将来のための技術研究——の実施によって、燃料サイクルオプションを維持できるし維持すべきである」と述べている。

報告書は、「今後数十年間、米国では軽水炉のワンス・スルー方式が経済的に望ましいオプションであり、ほぼ今世紀中、米国やその他の国でもワンス・スルーが支配的になる」との見解を示した。

さらに、「使用済み燃料の長期管理貯蔵(ほぼ1世紀にわたる)は、燃料サイクル計画の要である」として推奨するとともに、「安全貯蔵と輸送期間の確認・延長」のための研究開発に力を入れるべきだとしている。

### [英国]

## 政府、原子力新設計画で国内供給チェーン強化

英国の民間企業・規制改革省(BIS)は9月27日、傘下の技術戦略委員会(TSB)を通じて200万ポンドを投資し、民生用原子力発電分野における技術革新促進のための実行可能性調査(FS)約20件を実施すると発表した。他分野の革新的な技術を移転しつつ、中小企業を原子力部門の大手企業と連携させ、持続的に発展可能な最強の原子力供給チェーンを構築するのが狙いだ。

TSBは英国の経済発展に寄与する技術革新支援のために設立された機関。政府出資の公共団体だが、大学からの知識移転など産官学の連携促進にも貢献している。

TSBによると、世界では現在、新規原子力発電施設の建設で6,000億ポンド、廃止措置や廃棄物の処理処分などで2,500億ポンドもの潜在的な市場が存在。今後20年間に予想される原子力カルネッサンスで、英国企業にも原子力エンジニアリングや関係技術の分野で実質的なビジネス・チャンスを得る可能性がある。

こうした背景からTSBは、英国原子力供給チェーンの構築・強化を目的に、国内の大手企業のみならず、中小企業一特に、原子力以外の分野一をプロジェクト・リーダーとする技術開発を財政支援。非破壊検査や放射性廃棄物の取扱い、状態監視のほか、材料のモデル化、先進的な機器製造とメンテナンスおよび建設の技術——などのプロジェクトについて半年～1年間、FSを実施するとしている。

### [ドイツ]

## 原発延長の新エネルギー計画を閣議決定

A・メルケル首相が率いるドイツ政府は9月28日、国内で稼働する原子炉17基の運転年数を平均12年間延長することを盛り込んだエネルギー計画を正式に閣議決定した。

同計画を有効とするには法改正のための議会審議が必要で、同政権は連立与党が過半数を占める連邦議会(下院)のみで審議・決定する考え。しかし社会民主党(SPD)など野党は、16州政府の代表で構成される連邦参議院(上院)に関係法案が諮られなかった場合、憲法裁判所に提訴するとしており、原子炉の運転延長実現には時間がかかることも予想されている。

「エネルギー・コンセプト2050」と題された新しいエネルギー環境計画に関する説明の中で、同政府は原子力をあくまでも「再生可能エネルギーの時代が来るまでの橋渡し電源」と強調。1980年までに運開した古い原子炉の運転寿命を8年間、それ以降に運開した原子炉の寿命を14年間延長すれば、それによって生み出される利益を核燃料税として徴収(2016年まで、年間23億ユーロ)し、再生可能エネルギーの研究開発に当てられるとしている。

すなわち、原子力は中期的なエネルギー供給を保証すると同時に、再生可能エネルギーの大規模活用に必要な基盤作りに貢献する存在。これら2つは相反する存在というより、一つのコインの両側のようなものだと強調した。

### [オランダ]

## ボルセラ原子力発電所サイトに2基目の計画

オランダのエナジー・リソースズ・ホールディング(ERH)社は9月7日、同国で唯一稼働するボルセラ原子力発電所サイトに2基目の原子炉を建設する意志表明書を住宅・国土計画・環境省(VROM)に提出した。同サイトでの2号機建設についてはすでに昨年6月、ERH社と折半で同発電所を所有するデルタ社が同様の計画書を提出しており、政府の

今後の対応が注目されている。

オランダではチェルノブイリ事故後、新規の原子力発電開発が中止されており、経済的理由でドーパルト発電所が97年に閉鎖された後は、ボルセラ発電所(PWR, 51.2万kW)のみが稼働中。2011年以降、次期政権が現在の脱原子力政策を廃止することを見越し、産業界は新たな動きを始めている。

ボルセラ発電所を所有・運転するEPZ社の株式は、かつてデルタ社とエセント社で50%ずつ保有していたが、エセント社は昨年9月、ドイツのRWE社によって買収された。RWE社の目的は、原子力発電資産の比率増強によりCO<sub>2</sub>の平均排出率を低下させることだと見られているが、地元アンヘルムの裁判所は「この買収にはボルセラ発電所の所有権を含めない」と裁定。RWE社が同所有権の取得をあきらめない一方で、エセント社が保有していたこの所有権は、エセント社の株主であったオランダ6州の州政府および百以上の地方自治体に引き継がれ、ERH社が設立されるに至っている。

ERH社によると、同社は当初、ボルセラ2号機の建設はデルタ社と共同で進める考えだったが、デルタ社ではこれを拒否。また、ERH社は将来、完成した2号機の権利をRWE社に売却することも検討中だと伝えられており、ERH社の動きの背後にRWE社の思惑が働いているとの見方もあながち否定できない。いずれにせよ、同一サイトで2つの計画申請に許可が下りるとは考えにくく、政府がこの問題解決のため何らかの判断を下すと見られている。

ERH社の新設計画では、最大250万kWの原子炉設備の最初の1基を2019年までに運開。①120万kWのAP1000を1基か2基、②出力160万kWのEPRを1基、③もしくは第3世代のBWRを1基建設するとしている。

一方、デルタ社の計画には「第3世代の軽水炉」としか炉型が示されていないが、出力160万~250万kWの設備を2018年までに40億~50億ユーロの建設費で完成させる予定。すでに環境影響声明書(EIS)の手続きが進行中だ。

## ペッテン炉がRI生産を再開

オランダで医療用放射性同位体(RI)を製造する

「原子力研究コンサルタント・グループ(NRG)」は9月9日、今年2月からペッテンで修理中だった高中性子束炉(HFR, 熱出力4.5万kW)が運転に復帰し、RIの生産も再開したと発表した。

8月にカナダ原子力公社(AECL)のNRU炉が運転を再開したのに続き、欧州のRI需要の6割、世界需要の3割を賄うHFRが復帰したことにより、医療診断やガン治療、疼痛管理に使われる医療用RIの供給も不足状態を脱する見通した。

運開後40年以上が経過したHFRは、2008年8月の点検時に1次冷却系・主配管の一部が電解腐食により大幅に減肉しているのが発見され、同炉の操業・管理を担当するNRGが保修作業を開始。昨年2月に暫定的に運転を再開したものの、今年2月にはアルミ製配管の取替えを含む本格的な修理のため停止していた。

なお、NRGはHFRの後継炉として、「パラス炉(熱出力4.5万kW)」の建設準備をペッテンで開始しており、昨年11月に環境影響声明(EIA)を開始する旨、住宅・国土計画・環境省(VROM)に通知書を提出した。この建設計画に対しては、地元・北オランダ州議会が「地方の雇用促進につながるほか、オランダ知識経済の手本になり得る」として約200万ユーロの財政支援を検討中。このような資金調達や認可手続きが順調に運べば、2016年に操業可能になるとしている。

## [スウェーデン]

### 総選挙で現政権が過半数割れ、原子力政策にも影響か

スウェーデンでは9月19日、議会議員の任期満了に伴う総選挙が行われ、2006年の前回選挙で政権を取った中道右派連合・4党が172議席を獲得。総議席数の過半数には3議席届かなかったが、現政権の継続が確定した。しかし、F・ラインフェルト首相は今後の政権運営の中で、野党政党のいずれかと協力体制を組まざるを得なくなり、6月に可決した脱原子力政策撤回法案の行く末にも影響が懸念される状況だ。

今回の選挙で、ラインフェルト首相率いる穏健党の議席数は10議席増えて107議席となった。一方、スウェーデンで長年政権を握ってきた社会民主労働

党は17議席減の113議席となり、議会第1党の地位は維持したものの敗北を認めた。しかし、穏健党以外の与党3党は軒並み議席数を減らしており、代わりに躍進したのが緑の党(6議席増の25議席)。また、極右の小政党であるスウェーデン民主党(SD)が今回初めて20議席を獲得し、国政に参加することになった。

SDは原子力推進派だが、イスラム系移民の排斥を主張していることから、右派・左派ともに同党との協力はきっぱりと否定。ラインフェルト首相は投票日の夜、緑の党に協力要請のための交渉を打診したというが、この考えには緑の党側も、支援有権者への立場から懐疑的だと伝えられている。現政権が仮に、緑の党と協力することになれば、脱原子力撤回法どおりに既存炉10基が建て替えられる可能性は確実に狭められることになる。

#### [ポーランド]

### 初号機の完成時期を2年先送り

ポーランド経済省は9月2日、同国初の原子力発電所建設計画で初号機の完成時期が当初計画から2年先送りされ、2022年になる見通しだと発表した。

同省は昨年8月、同建設計画案および開発ロードマップを公表した。発電所を実際に建設・操業するために設立される企業連合の51%を国営のエネルギー・グループ(PGE)が保有し、出力各300万kWの原子力発電所を2か所(基数の合計は最大4基)で建設。2020年に最初の1基を、その数年後に後続炉を運開することになっていた。その後、同計画の投資手続きについてPGEが最良の実施慣行などを集中的に調査した結果、日程を2年先送りするのが妥当と判断するに至ったもの。

しかし、投資問題のほかにも、原子力安全に関する許認可や放射線防護といった規制面での法整備など重要な準備作業が山積み。政府の原子力エネルギー開発全権委員であるH・トロヤノフスカ経済省次官は、「日程は非常にタイトだ」との見解を示している。

同計画案は100ページ以上に及び、11分野の行動計画を明示。改訂されたスケジュールとともに1日付けで同省が承認しており、外部機関のコンサルティングに付した後、今年末までに政府が決定する

ことになっている。

#### [リトアニア]

### ビサギナス発電所計画の入札手続きが第2段階に

リトアニア・エネルギー省は9月10日、ビサギナス原子力発電所建設計画の実施会社となるビサギナス原子力発電会社(VAE社)への戦略的な出資候補者に対し、11月までに拘束力のある提案を提出するよう要請した。

リトアニアは昨年末、同国唯一の原子力発電所だったイグナリナ2号機を閉鎖。その代替電源となるビサギナス原子力発電所を2018~20年に完成させるため、昨年12月8日に同計画の設計・建設・運転および閉鎖に関する諸条件を記した入札書を潜在的な海外出資者(フランス電力やドイツE.ON社、イタリア電力公社、バッテンフォール社などを想定)に開示していた。

入札参加者が提出した拘束力のない提案書は、入札条件を満たしていることを同計画の特権委員会が評価した上でエネルギー省のA・セクモカス大臣が承認。今回、その次の段階として契約上拘束力を有する提案書の提出を指示したもので、エネルギー省ではそれらに基づいて年末までに将来の戦略的な投資家候補を選定し、交渉を開始したいとしている。

同計画は国際連携線によってリトアニアを含めたバルト地域全体の電力供給力増強に資すると期待されており、バルト3国の電力会社も小口の出資者として参加する可能性がある。また、欧州連合(EU)の目指すグリーン・エネルギー政策にも合致しているため、同計画の推進に関しては、欧州委員会(EC)エネルギー委員のG・エッティンガー氏も「一地域のプロジェクトは欧州全体にとっても有意義」との見解を表明した。

この関連で、バルト3国の電力市場は2014~15年までに欧州電力市場と統合することが計画されている。バルト3国およびポーランドの関係閣僚らは今年5月末、エッティンガー委員の同席の元で、「バルト地域エネルギー市場相互接続計画の枠組みの中で原子力発電に関する高官タスクフォースを設立する」との共同コミュニケに調印。ビサギナス建設計画の成功に向けて、関係国が緊密に連携し、政府支

援を強化することで合意した。

## 〔中国〕 大型の自主設計炉・嶺澳2期1号が 運転開始

中国広東核電集団有限公司(CGNPC)は、同国南部の広東省で7月から試運転中だった嶺澳原子力発電所2期工事1号機(PWR, 108万kW)が9月20日に営業運転を開始した、と発表した。これにより、中国の原子力発電設備容量は12基、1,019万kWとなった。

同炉は仏フラマトム社(現在のアレバ社)から導入したPWR技術をベースに中国が独自に改良した100万kW級PWR(CPR1000)の初号機。中広核工程設計有限公司や中国核工業第二研究設計院、中国核動力研究設計院(NPIC)が共同設計し、東方電気、上海電気、中国一重、中国二重などの企業が機器を製造したもので、国産化率は64%に達した。同炉の操業とメンテナンスは大亞湾核電操業管理有限責任会社が担当しており、中国による100万kW級原子炉の自主設計、自主製造、自主建設、自主運営が実現したと強調している。

同国ではさらに、秦山原子力発電所2期工事3号機(60万kW級PWR, CNP600型)が試運転中で、来年にも営業運転入りする見通した。

## 方家山と寧徳の両サイトで建設計画 が進展

中国核工業集团公司(CNNC)は9月28日、浙江省秦山Ⅰ原子力発電所の拡張工事にあたる方家山原子力発電所サイトで、1号機原子炉建屋のドーム屋根を設置した。

同炉の建設工事は2008年12月に開始されており、総重量175トンのドーム屋根の吊り込み・設置は予定より79日間前倒しとなった。これに続く2号機の工事も昨年7月に始まっており、両炉ともCNNCが第2世代改良型として開発したCNP1000(100万kW級PWR)となる予定。それぞれ2013年と14年の完成を目指している。

また、福建省の寧徳原子力発電所サイトでは、9月29日に4号機の起工式が行われた。

同発電所では中国広東核電集団有限公司(CGNPC)が、フランスの技術を元に国産化を進めるCPR1000(100万kW級PWR)を合計4基建設するという、福建省東海岸経済地区でも最大規模の建設投資計画となる。起工式には地元自治体やCGNPC、寧徳原子力発電会社幹部のほか、大唐国際発電会社、中国核工業華興建設会社などの代表が出席した。

これにより、08年2月に着工した1号機を皮切りに、4基すべてが建設中となった。国産化率は1,2号機が75%、3,4号機は85%達成を目標としている。

## 中国とロシア、田湾3・4号設計で 契約

ロシアのロスアトム社は9月27日、中国の田湾原子力発電所で3,4号機を増設するため、傘下の原子力建設・輸出企業であるアトムストロイエクスポルト(ASE)社が中国の江蘇原子力発電会社(JNPC)と技術設計の実施契約を結んだと発表した。

今回の調印は、ロシアのD・メドベージェフ大統領による北京訪問に合わせて行われたもの。原子力のほかに石油パイプラインや天然ガス、再生可能エネルギー、石炭などといったエネルギー分野のみならず、様々な分野で戦略的なパートナーシップを強化するとの共同声明を公表している。

中国は今年7月に北京南部の高速実験炉(CEFR)で初臨界を達成しており、原子力分野のロシアとの協力では田湾プロジェクトのほかに、ロシアで建設中の80万kW級・高速実証炉(BN-800)を、中国国内でも2基建設するために事前準備を進めている。今後、同分野で両国は一層緊密な協力体制を築いていくと予想される。

江蘇省の田湾発電所サイトにはすでに、1,2号機としてVVER1000(100万kW級ロシア型PWR)が2007年から稼働しており、これら2基に対する運開後2年間のメンテナンス保証期間が昨年9月に終了した。3,4号機もこれらと同型設計が採用される予定で、ロシア側では原子炉建屋が二重構造であることや圧力容器底部に炉心溶融物キャッチャーが装備されるなど、事故時の安全性が確保される点を強調している。

2期工事建設のための協力覚書は08年にロスアトム社と JNPC の親会社である中国核工業集团公司 (CNNC) が調印済み。今年3月には ASE と JNPC が両機の建設に関する枠組み契約を結んでいた。

### [韓国]

## 斗山重工業、米国向けに取替用機器を出荷

韓国の斗山重工業は9月26日、米国で稼働する原子力発電所の取替用蒸気発生器(SG)4基と圧力容器(PV)上蓋2台を同国に向けて出荷した。

今回、同社が昌原工場から出荷したSGはテネシー峡谷開発公社(TVA)のセコヤー原子力発電所2号機用。PV上蓋2台はエンタジー社のウォーターフォード発電所3号機とアーカンソー・ニュークリア・ワン(ANO)発電所2号機の取替用だ。同社は過去にも、これらの電力会社に対して複数の取替用機器を納入した実績がある。

同社はこのほか、米国で建設・運転一括認可(COL)が申請されているボーグル発電所3、4号機、VCサマー発電所2、3号機およびレヴィ・カウンティ1、2号機の建設計画(すべてウェスチングハウス社製AP1000)でも、SGと圧力容器および炉内構造物の製造を受注済み。30年ぶりの拡大が見込まれる米国原子力市場で、着実に地歩を固めつつある。AP1000主要機器の受注は、中国で建設中の三門発電所と海陽発電所での受注に続くもの。

### [ベトナム]

## 原子力開発プロジェクトでロシアと協定締結へ

ロシアの原子力総合企業であるロスアトム社のS・キリエンコ総裁は9月3日、ベトナムのハノイで同国のグエン・ミン・チュット国家主席やグエン・タン・ズン首相、および関係閣僚らと会談した。同国初の原子力発電所建設計画について、ロシアによる建設費の融資保証を含めた両国間の協力協定を、今年10月のD・メドベージェフ露大統領によるベトナム訪問に合わせて調印することで合意に達した。プラントを提供するだけでなく、建設費の調達から操業に至るすべての段階で支援を約束すると

いう方式で、ロシアは確実に新規導入国での市場を確保しつつある。

ベトナムは2030年までに5県の8地点で14基・1,500万kWの原子力発電設備開発を計画。ニン・トゥアン省では2地点で100万kW級原子炉を各2基、建設することが決定しており、ロシアは第1期分の2基を建設することで昨年12月にベトナム電力公社(EVN)と覚書に調印した。初号機は2020年までに完成させる予定だ。

### [アルゼンチン]

## 4基目の発電所建設で韓国と覚書

アルゼンチンは9月16日、同国の新たな原子力発電所建設計画の策定を含め、原子力分野における韓国との協力を開始するための了解覚書(MOU)をソウルで締結した。

調印したのはアルゼンチン計画投資サービス省のJ・デビド大臣と韓国知識経済部の崔晙煥(チェ・ギョンファン)長官。この覚書に基づき、アルゼンチン原子力委員会(CNEA)は今後、同国で4基目となる原子炉の建設について、仏、露、中、米に続いて韓国を供給候補国のリストに加え、韓国電力の建設経験や技術力、安全性、技術移転、財政支援等に関する情報を比較検討する。また、すでに稼働中のエンバルセ原子力発電所(CANDU炉、64.8万kW)の運転寿命延長についても支援を得たい考えだ。

アルゼンチンでは現在、エンバルセ発電所のほかにアトーチャ原子力発電所で1号機(加圧重水炉、35.7万kW)が稼働中、同2号機(加圧重水炉、74.5万kW)が建設中となっている。

4基目となるアトーチャ3号機についてはすでに今年4月、ロシア型軽水炉(VVER)を建設する可能性調査のための情報交換でロシアと合意済み。米国のウェスチングハウス(WH)社とは同月、デビド大臣が建設可能性に関する協議をワシントンで実施したと発表した。来年以降、これらの企業を対象に公開入札を行うと見られている。

## 我が国の最先端研究開発

## シリーズ解説 第24回

## 京速コンピュータ「京(けい)」とは何か？

## 世界最速レベルの計算性能を目指して

理化学研究所 横川三津夫, 庄司 文由

スーパーコンピュータは、科学技術計算を高速に行う計算機であり、今後の科学技術の発展のためにはなくてはならない計算科学のための基盤ツールである。理化学研究所は、平成18年度から次世代スーパーコンピュータの開発プロジェクトにおいて、LINPACK 性能10ペタフロップスを超える世界最速レベルの汎用型スーパーコンピュータ(愛称：京速コンピュータ「京」)の開発を進めている。本稿では、すでに製作が開始された京速コンピュータ「京」の概要について紹介する。

## I. スーパーコンピュータを取り巻く状況

スーパーコンピュータとは、最新の技術を用いて作られる科学技術計算のための高性能コンピュータである。時代とともに向上してきたその性能は、現在最も速いもので1ペタフロップス(1 PFLOPS: 一秒間に千兆回の加減乗算をする性能値)を超えており、最初の商用スーパーコンピュータ CRAY-1(160メガフロップス, 1976年)と比較すると、500万倍以上の計算性能が得られるようになった。

極めて高速に計算ができるスーパーコンピュータを用いた模擬計算(計算機シミュレーション)により、橋梁、高層ビル、原子力発電施設などの大規模建造物や、自動車や航空機などの製造物において、設計の詳細化や開発期間短縮および開発コスト削減などがもたらされており、我々の日常生活の気付かないところで、スーパーコンピュータによるシミュレーションの恩恵を受けていると言える。

計算機シミュレーションによって様々な現象の解明を試みる「計算科学」は、「理論」、「実験」による手法と並び、第3の科学手法として今や欠くことのできないものとなっている。スーパーコンピュータの性能向上は、計算機シミュレーションの高精度化、高精細化をもたらし、より現実に近い現象の再現を可能にしつつある。近年で

*The K computer: Next-Generation Supercomputer System and its Facilities*: Mitsuo YOKOKAWA, Fumiyoshi SHOJI  
(2010年 10月 3日 受理)

は、原子レベルの現象からマクロレベルの現象まで総合的に、かつ様々な物理を統合的に扱うマルチスケール、マルチフィジックスの視点からの計算機シミュレーションが重視されると共に、タンパク質の挙動解析やドラッグ設計など生命科学の分野での応用が今後ますます進むものと期待されている。

日本は、これまで特定のアプリケーション性能を重視して、航空機等機体周りの流体シミュレーションのためのスーパーコンピュータ「数値風洞」、計算物理学用並列型スーパーコンピュータ「CP-PACS」、地球温暖化など地球規模の自然現象解明のためのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」などを開発してきており、世界最先端のスーパーコンピューティング技術を保有していた。しかし、地球シミュレータ完成以降、スーパーコンピュータの開発プロジェクトがなかなか立ち上がらず、我が国のスーパーコンピューティング技術の発展が停滞しつつあった。また、国内の全計算資源の増加率は世界的な傾向と比較して下回っており、長期的な凋落傾向にあった。半導体製造技術などに最新技術を用いるスーパーコンピュータ開発では多大な研究開発費が必要であるが、スーパーコンピューティング技術は様々な分野の基盤技術であり、将来にわたり我が国の高度な研究開発能力や産業競争力を維持、発展させることが重要であり、そのためには、民間ベースの開発だけでは不十分である。国としてスーパーコンピューティング技術を長期的視点で強化するための戦略が必要不可欠である。

一方、平成14年に日本の地球シミュレータが圧倒的な

計算性能(LINPACK 性能35.86 TFLOPS)を達成したのち、それに衝撃を受けた米国は、ハイパフォーマンスコンピューティング分野の研究開発への投資を大幅に強化した。その結果、米国は現在、複数の世界最速クラスのスーパーコンピュータを保有し、またより性能向上を目指して複数のスーパーコンピュータ開発プロジェクトが並行して進められている。さらに最近では、中国がスーパーコンピュータ開発に力を入れてきており、構築したシステムが今年6月に世界第2位の性能を達成するなど、急速に存在感を増してきている。このように、世界的に見るとスーパーコンピューティング技術は日進月歩であり、その重要性は今後ますます増大すると考えられる。

このような状況の下、我が国ではスーパーコンピューティング技術を第三期科学技術基本計画(平成17年度)の「国家基幹技術」に位置づけ、平成18年度に文部科学省の「最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用」プロジェクト(次世代スーパーコンピュータ・プロジェクト)が7年計画で開始された。理化学研究所は、本プロジェクトの中核機関として、世界最高レベルの演算性能を持つ次世代スーパーコンピュータの開発を進めてきた。昨年度(平成21年度)には、事業仕分けを契機としたプロジェクト見直しが行われ、「革新的ハイパフォーマンスコンピューティングインフラ(HPCI)の構築」プロジェクトの一環として、引き続き開発を進めている。

次世代スーパーコンピュータの愛称「京(けい)」(英語表記“K computer”)は、平成22年4月に一般公募を行い、約2,000件の応募の中から選ばれたものである<sup>1)</sup>。

## II. 京速コンピュータ「京」の概要

前述のとおり、スーパーコンピューティング技術は科学技術や産業分野において非常に重要な技術であるとの

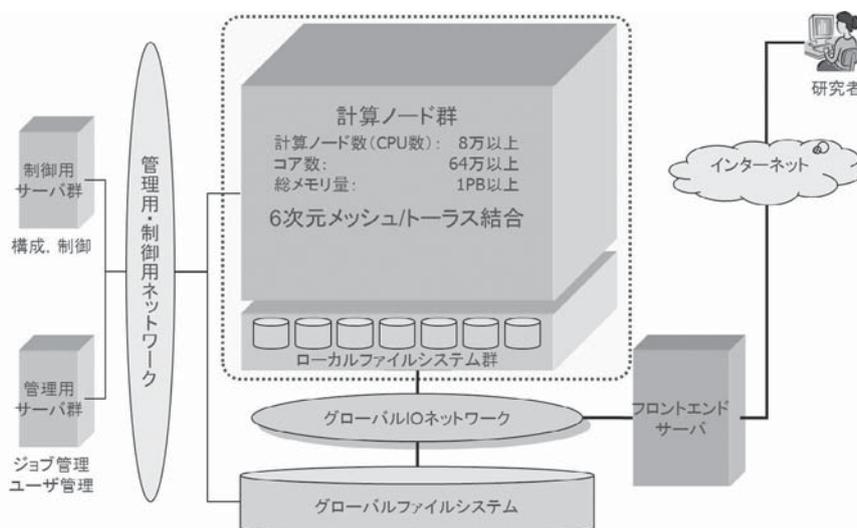
認識の立ち、京速コンピュータ「京」の開発方針として次の2点を考慮した。第1には、世界最高レベルの演算性能と多様なアプリケーションに対応可能な汎用性をもつシステムであること、第2には、多くの研究者に利用される共用施設としての利便性、信頼性、運用性を確保することである。

このため、性能目標として、スーパーコンピュータ性能を表す世界的な標準ベンチマークテストプログラムであるLINPACKの実効性能において、10 PFLOPS級の達成を目指すとともに、計算科学分野の幅広いアプリケーションを効率的に実行できるシステムを目指して設計した。また、「京」は、世界最先端の研究成果を継続的に創出していくための基盤ツールとして、その機能を安定的に提供することを念頭に、ユーザの立場から見た利便性、長時間にわたりトラブルなく稼働できる信頼性、様々なユーザの多様なニーズに柔軟に対応できる運用性を持つシステムであることも考慮している。

### 1. システム構成

「京」は、8万個以上の計算ノードからなる分散メモリ型並列計算機システムで、大きく4つの部分から構成されている。計算機そのものである①計算ノード群(ローカルファイルシステムを含む)、②グローバルファイルシステム、③フロントエンドサーバ、④管理・運用系のサーバなどの周辺機器群である(第1図)。このうち、一つの計算ノードは、一つのCPU(富士通製 SPARC 64 VIIIfx)、16ギガバイトのメモリ(DDR 3 DRAM)、計算ノード間を繋ぐインターコネクト用LSI(ICC: Inter-Connect Controller)で構成されている。ICCは、計算ノード間のデータ転送を行う通信用のLSIである。

CPUは、最先端の45ナノメートルプロセスルールに基づく半導体製造技術により作られ、8つのプロセッサコア、コア共有の2次キャッシュメモリ(6メガバイト、



第1図 京速コンピュータ「京」の構成概要

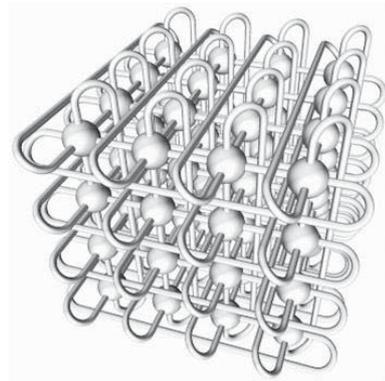
12 way), メモリ制御ユニットを持つ。CPUの動作周波数は2 GHz, 大きさは縦22.7 mm×横22.6 mmで, この中に約8億個のトランジスタが入っている。各コアは4つの積和演算器, 256本の倍精度レジスタを持つ。1つのSIMD命令(ベクトル処理の一種)で2つの積和演算器を同時に動作させることができ, 2つのSIMD命令を同時に実行することにより1つのコアはクロックごとに8個の浮動小数点演算ができるので, コアの理論性能は16 GFLOPS, CPU(8コア)の理論性能は128 GFLOPSとなる。また, コア間の並列処理の同期を取るためのハードウェアバリア機構, 計算に必要なデータを事前にキャッシュに取り込むプリフェッチ機構, プログラム可能なキャッシュ制御を可能とするセクタキャッシュ機構(後述)など科学技術計算を高速に実行するための様々な機能を備えている。

セクタキャッシュ機構とは, ユーザがキャッシュメモリをソフトウェアによって制御できるようにしたものである。通常, キャッシュメモリへのデータ配置はユーザが直接コントロールすることはできず, ハードウェアで制御される。このためプログラマは, キャッシュの存在を特に意識しなくても, その恩恵を受けられるというメリットがある反面, キャッシュしたいデータとしたくないデータを分けて扱うなどの細かな制御ができないという問題があった。SPARC 64 VIIIfxでは, キャッシュメモリを2つの領域(セクタ)に分け, プログラム中の指示行により, 指定したセクタにデータを配置することができるようにした。これにより演算に必要なデータを演算器の近くに置きやすくなり, 結果として演算をより高速に実行することが可能になる。

また, 「京」では, CPUの故障率の低下および安定動作のために水冷方式を採用しており, 半導体接合部温度(ジャンクション温度)30℃の動作環境での消費電力は58 Wである。電力あたりの理論性能は2.21 GFLOPS/Wで, 汎用CPUとしては現時点で世界最高性能である。

計算ノード同士を繋ぐ接続(インターコネクト)は, Tofuと呼ばれる6次元メッシュ/トラス型の直接網である。各方向のリンクは5ギガバイト/秒の理論帯域を持つ(第2図)。ユーザに対して常に3次元トラス接続を保証することにより, 計算モデルとして3次元空間をイメージしながらプログラムを書くことができる。また, ひとつの計算ノードが壊れた場合でも, 代替経路に自動的に切り替えることにより, システム全体が停止することはない。

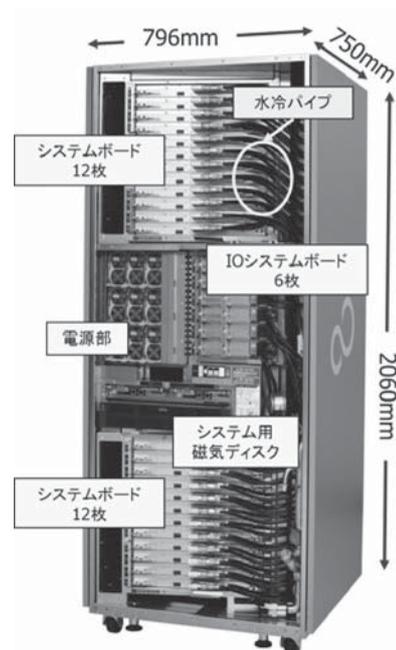
システム実装は, 4つの計算ノード(CPU, メモリ, ICCの組合せ)を1枚のプリント基板(システムボード)に搭載し(第3図), システムボード24枚を1つのラック(筐体)に搭載する高密度実装となっている(第4図)。システムボード基板の大きさ, および筐体の大きさは, それぞれ452 mm(幅)×466 mm(奥行), 796 mm(幅)×750



第2図 インターコネクト(論理的3次元トラスネットワーク)

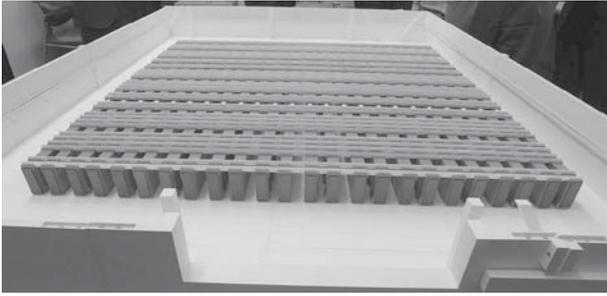


第3図 システムボード



第4図 計算ノード筐体

mm(奥行)×2,060 mm(高さ)である。システムボードには, CPUおよびICCを冷却するための水冷用パイプが取り付けられている。1つの筐体のピーク性能は12.3 TFLOPSであり, 全体システムは800台以上の筐体から



第5図 システム完成予想図(模型)

構成される(第5図)。

計算ノードのオペレーティングシステムは、ユーザの利便性を考慮し、リナックス(Linux)とした。また、「京」が持つ高い機能を有効に活用し、その性能を最大限に発揮させるために、CPU内の自動並列化をサポートした最適化コンパイラ、デバッガ、性能チューニングツール、数値計算ライブラリを提供するとともに、アプリケーション・ソフトウェアの流通や既存システムとの互換性などを考慮し、科学技術計算の分野で広く使われているプログラミング言語である Fortran, C/C++, さらに、並列プログラミングの標準ライブラリである MPI(メッセージパッシングインターフェース)とデータ並列言語の XPFortran をサポートする予定である。

ファイルシステムに関しては、ローカルファイルシステムとグローバルファイルシステムの2階層ファイルシステムを採用し、ユーザがジョブを実行する際に、グローバルファイルシステムとローカルファイルシステムとの間でファイルを転送する方式とした。この方式は「ステージング方式」と呼ばれ、ジョブ実行の前にユーザのファイルをグローバルファイルシステムからローカルファイルシステムへ(ステージイン)、ジョブ終了後の結果が書かれたファイルはローカルファイルシステムからグローバルファイルシステムに、それぞれ転送される(ステージアウト)。ステージングの指示は、ジョブ手順を記述するジョブスクリプトの中で指定し、ジョブマネージャがそれを解釈して、ステージング動作を行う。この方法により、ジョブ実行時にはローカルファイルシステムの高いI/O性能を生かすことができると考えている。

## 2. 高信頼性の実現

「京」は、様々なユーザの共用施設として、計算資源を安定的に提供できなければならない。しかし、「京」は主要部品のCPUだけでも8万個以上、システム全体では、100万個以上の部品から構成される超大規模システムである。個々の部品の信頼性を高めると同時に、システムとしての稼働性を高めるために、「壊れにくい」、「壊れてもシステム全体が止まらない」、「壊れた部分はすぐ交換できる」システムを指向して設計されている。

CPU(SPARC 64 V8ifx)の信頼性を高めるために、

ジャンクション温度を30℃としたが、この温度は他の競合する汎用CPUと比べて格段に低く、故障率低減に大きな効果があると期待される。またCPU内の回路には、「エラー訂正機能」やエラーを検出した命令を自動的に再実行する「命令再実行機能」があり、一時的なエラー(間欠故障)が起きても、動作に影響なく自動的に回復することができる。一方、恒久的な故障の場合は、ソフトウェアにより、故障したCPUをシステムから切り離すことで、システム全体の停止を回避し、システム全体の安定性・稼働性を高めている。

また、ログインサーバや管理・運用サーバなどの各種サーバの二重化、データパスの二重化などにより、システム全体の信頼性、可用性の向上を図っている。

## 3. プログラミングモデル

「京」は、計算ノードあたり1つのCPUから構成されるシン(Thin)ノード構成であり、かつ各CPUは8個のコアを持っている。このため、プログラミングモデルとしてハイブリッド型を推奨している。ハイブリッド型プログラミングモデルとは、自動並列化コンパイラまたはOpenMPによるCPU内(コア間)の並列と、MPI(Message Passing Interface)によるCPU間の並列の2種類の並列化プログラミング手法を組み合わせる方法である。また、コア内においてはSIMD命令による並列処理も可能であり、コンパイラによる自動並列化と同時に、指示行などを用いてユーザが並列処理を明示的に指定することもできる。

ハイブリッド型に加え、コア単位でプロセス実行を行う「フラット型」のプログラミングモデルも利用可能である。フラット型MPIプログラミングでは、コアごとにプロセスが実行されるため、通信バッファなどの作業領域や通信時のオーバーヘッドなどにより、ハイブリッド型よりも実行時間が増大する傾向にある。このため、「京」のプログラミングモデルとしては、ハイブリッド型プログラミングモデルを推奨している。

今後のスーパーコンピュータの構成は、CPUのマルチコア化、システム自体の大規模化に進むと想定されるため、アプリケーションレベルでのハイブリッド型プログラミングモデルへの移行は不可欠であろう。

## Ⅲ. 京速コンピュータ「京」の施設

「京」を設置する計算科学研究機構の施設は、兵庫県神戸市のポートアイランドに平成22年5月末に完成した(第6図)。「京」を収容するだけでなく、計算科学研究の拠点としての機能も併せて求められる。そこで、施設を設計するに当たり、(1)「京」の性能を最大限に引き出す設備・能力を確保すること、(2)世界最高水準のスーパーコンピューティング研究教育拠点(COE)に相応しい研



第6図 計算科学研究機構の施設

究・教育環境を整備すること、(3)完成時にはランニングコストと環境負荷の低減化を図ることが目標とされた。

施設は計算機棟、研究棟、熱源機械棟、特別高圧変電施設の4つの建物からなり、計算機棟(56 m×48 m)は地下1階地上3階、研究棟は地下1階地上6階の鉄骨作りである。

地盤改良された部分に建設された計算機棟及び研究棟は、積層ゴムや鉛ダンパーなどの免震装置を備えており、Sグレードの耐震性を持っている。「京」本体が置かれる計算機棟3階部分は、筐体設置レイアウトの自由度の確保や計算ノード間ケーブル長の短縮のために無柱化構造とした。また実装密度の高い「京」本体を支えるために、 $1\text{ t/m}^2$ の床耐荷重性を確保するとともに、計算ノード間のインターコネクト用ケーブル、水冷用パイプ、及び電源ケーブルを敷設するために1.5 m高のフリーアクセスフロアとした。

ストレージ等のシステムの重要部分は、コジェネレー

ションシステムによる自家発電により停電時でも電力が供給される。省エネルギー対策としては、トップランナー方式による高効率な設備を配置するとともに、コジェネレーションシステム発電で生じた廃熱を施設の冷暖房に再利用するほか、屋上に太陽光発電パネルを設置し環境への負荷軽減に取り組んでいる。

「京」は平成22年10月より設置が開始された。今後、約1年半の期間をかけて全体システムを完成させる計画であり、平成24年11月には、予定通りシステム共用が開始できるように整備を進めていきたい。

#### —参考資料—

- 1) 次世代スーパーコンピュータ愛称選考の経緯, <http://www.nsc.riken.jp/aisho/kekkaoukoku.html>
- 2) 横川三津夫, “次世代スーパーコンピュータ開発プロジェクトの現状”, 計算工学, 13[1], 1733~1735(2008).
- 3) 渡邊貞, 他, “次世代スーパーコンピュータの技術”, ACSII Technologies, 7月号, (2009).

#### 著者紹介

横川三津夫(よこかわ・みつお)



理化学研究所・次世代スーパーコンピュータ開発実施本部・開発グループ  
(専門分野/関心分野)大規模シミュレーション, 並列化アルゴリズム

庄司文由(しょうじ・ふみよし)



理化学研究所・次世代スーパーコンピュータ開発実施本部・開発グループ  
(専門分野/関心分野)計算物理, 並列コンピュータ

## 原子力技術者・研究者を育成

## 武蔵工大炉

前 東京都市大学原子力研究所 所長 堀内 則量

## 武蔵工大炉の誕生

昭和30年、五島慶太氏が学校法人五島育英会を設立して初代の理事長に就任し、傘下の武蔵工業大学(現 東京都市大学)の荒廃していた校舎の整備と充実を手始めに、日本の原子力利用の立ち後れを憂いて、付属の原子力研究所の設立を計画した。当時、同理事長は東京急行電鉄社長でもあり、やがて原子力発電によって得た電気によって電車を動かす時代が来ることを予見していたのかも知れない。昭和34年6月、当時の岸信介内閣総理大臣宛に原子炉設置許可申請書を提出し、同年10月には設置許可が下り、原子炉室やRI実験室建屋に続き、米国ジェネラルアトミック社から TRIGA-II型研究用原子炉を購入し建設を始めた。

昭和35年4月1日、武蔵工業大学付属の原子力研究所が正式に発足し、アンテナ発明でよく知られる八木秀次学長が研究所長を兼任した。科学技術庁(現 文部科学省)の最終施設検査を受けた翌日、昭和38年1月30日に原子炉は初臨界に成功し、武蔵工大炉(MITRR)が誕生した。2月4日には熱出力100 kW(定格出力)に到達した。我が国の原子力利用の黎明期にいち早く原子力研究所を設置し、原子炉を導入して原子力技術者・研究者の育成を開始したことは画期的なことで、設立当初は約50名の職員を擁し、一私学の研究機関としては華々しい門出であった。

原子力研究所の運営管理、原子炉の維持は、組織上、大学上部の五島育英会によって行われていた。国内には原子炉も数少なく、都心に近い大学の原子炉ということもあって、企業や他大学にも原子炉実験・実習にたびたび利用されていた。しかし、原子力利用の機が未熟であった当時の社会情勢にあって、原子炉施設の運営管理は、経理上、大きな負担であり、研究所は程なく組織の縮小経過をたどる破目になった。昭和48年4月、本学電気工学科の佐藤禎主任教授が山田良之助学長(当時所長)の後を継いで所長(兼任)に就任し、研究所の再生を図ることになった。当時の職員数は10数名程度まで整理され、研究所の機能はほとんど停止していた。佐藤教授を師とし

Musashi Institute of Technology Research Reactor :  
Norikazu HORIUCHI.

(2010年 9月22日 受理)

た小職も、このとき大学から原子力研究所に異動し、武蔵工大炉と共に歩むことになった。

## 研究所の再生

学外から原子力専門の若手研究者を補充し、研究用原子炉の希少性と最も都会地に近接した立地条件を生かして、3つの研究所再生プロジェクトを立ち上げた。(1)放射化分析システムを開発し、原子炉をこれと関連する研究に有効に活用すること、(2)医療および生物治療研究を中心に、全国の大学の共同利用施設として原子炉を活用すること、(3)更なる原子力技術者の育成のため研究所を基盤に大学院を設置すること、に全所をあげて取り組むこととなった。

## 1. 微量元素の放射化分析システムの開発と利用

昭和49年には、市販のGe放射線検出器とワンチップCPU内蔵の手づくりのデータ処理システムから構成される独自の放射化分析システムを開発した。このシステムは、微量元素の分析、環境の保全(公害)研究、農業の研究および工業製品の生産管理等々の分野で、公・民間人・共同利用者に広く活用された。

## 2. 生物・医療照射中心の共同利用の開始

原子力研究所に隣接する(株)東京原子力産業研究所(現(株)日立製作所原子力事業統括本部王禅寺センター)の原子炉で帝京大学畠中坦教授によって脳腫瘍中性子照射治療が行われていたが、原子炉が廃止されるから武蔵工大炉がその肩代わりすることになった。昭和50年には、原子炉工学・医学の専門家の協力によって原子炉のサーマルコラム設備を中性子照射治療用の照射室に改造し、文部省(現 文部科学省)の支援のもと東京工業大学原子炉工学研究所を窓口生物・医療照射を柱とする全国国公立大学の共同利用施設として門戸を開いた。昭和52年3月1日、初の脳腫瘍患者の治療照射が行われた。その後、神戸大学三島豊教授による悪性黒色腫(皮膚がん)の照射治療も加わり、平成元年に原子炉が停止するまで、99件の脳腫瘍と9件の悪性黒色腫(皮膚がん)の治療照射が行われた(第1図、第1表)。脳腫瘍の治療照射件数の約20%は国外から訪れた患者に施されたもので、武蔵工大炉の名前を世界に知らしめた。このほか共同利用として、患畜類の生物照射、炉物理・材料照射実験、放射化分析などに利用され、昭和51年からの14年間で、延べ5、

626人の共同利用者(採択件数526件)が武蔵工大炉の利用に訪れた(第2表)。



第1図 中性子照射治療

第1表 脳腫瘍・皮膚がん治療照射の実績

年度	照射件数		国籍	件数
	脳腫瘍	悪性黒色腫		
昭和51	2		日本	79
52	12		米国	8
53	12		ドイツ	7
54	7		ブラジル	2
55	5		ギリシャ	1
56	5		オーストリア	1
57	7		オランダ	1
58	13		計	99
59	9		(c)脳腫瘍患者年齢(歳)	
60	1		最年少	3
61	5		最年長	73
62	9	2	(d)悪性黒色腫患者年齢(歳)	
63	7	2	最年少	50
平成元	5	5	最年長	85
計	99	9		

### 3. 大学院原子力工学専攻の設置

昭和56年4月、当時としては珍しい形態であったが、研究所の上に大学院原子力工学専攻(修士課程)を設置した。昭和40年代から原子力工学科設置の願望はあったが、卒業後の就職状況、これはすぐに入学志願者数に反映するが、当時の原子力に対する社会状況から時期尚早との見解で、原子力に関連した授業は、主に学部の電気工学科で行われていた。これに代わる原子力系、エネルギー系の学科もなかったため、原子力専攻への進学は、原子力研究所を希望して卒業研究を行っていた、主に電気系学科(電気工学科・電子通信工学科)、機械工学科所属の学生であった。原子力専攻新設当初は1名から始まったが、他大学からの進学者も出てきて、徐々に増え、10数名にまで届くようになった。また、インドネシア、中国からの留学生の受入れもあって、原子力専攻として百数十名を超える修了生を原子力研究機関、電力会社、原子力関連企業に送り出した。その後、原子力専攻は、平成9年に本学学部にエネルギー・材料系のエネルギー基礎工学科(環境エネルギー工学科を経て、現エネルギー化学科・原子力安全工学科)が設立されたことから、教員を一緒にして、原子力専攻はエネルギー量子工学専攻(現エネルギー化学専攻・共同原子力専攻)に変更され、平成15年に博士課程も増設された。

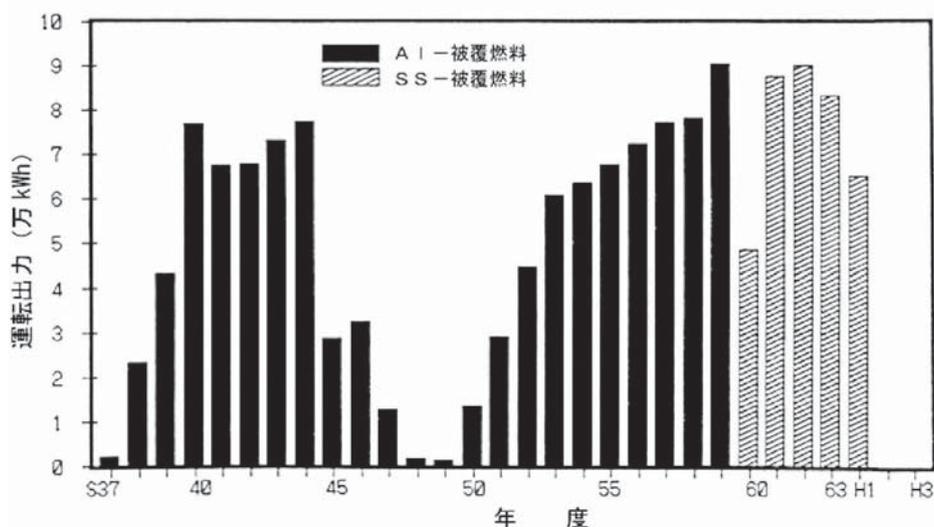
### 原子炉の停止から廃止へ

順調に見えた研究所の発展も思わぬ事態に進むことになった。平成元年12月21日、原子炉停止後に照射室内の熱中性子取出し口下部台上に水溜りが発見された。原因究明の調査から、原子炉タンク水の漏洩(20~40ℓ/日)が明確になり、平成2年1月4日、この事態について科学技術庁および地元自治体の川崎市に報告された。テレビおよび新聞報道によって、近隣住民など30数名が研究所に事態の説明を求めて集まった。このとき以来、地元

第2表 共同利用による区分別利用実績

年度	利用区分									
	医療照射		生物照射		炉物理等実験等		放射化分析等		合計	
	採択件数	利用者延人数	採択件数	利用者延人数	採択件数	利用者延人数	採択件数	利用者延人数	採択件数	利用者延人数
昭和51	1	42	4	16	2	32	13	27	20	117
52	1	181	3	13	7	63	23	86	34	299
53	1	197	3	27	6	96	20	38	30	306
54	1	91	2	36	8	11	24	275	35	413
55	1	70	3	22	10	22	22	176	36	290
56	1	50	2	6	6	50	24	181	33	287
57	1	118	11	174	5	24	22	127	39	443
58	1	143	3	304	5	11	29	170	38	628
59	1	99	3	52	5	4	33	309	42	406
60	1	5	3	143	5	37	34	349	43	534
61	1	31	2	132	7	9	34	175	44	347
62	2	60	3	253	5	7	32	215	42	535
63	2	254	2	9	7	30	30	164	41	457
平成元	2	85	3	198	8	17	36	107	49	407
合計	17	1,426	47	1,385	86	413	376	2,399	526	5,623

利用者人数 = 人数 × 日数



第2図 原子炉運転実績

自治会や市民グループに対する説明会が行われ、原子炉の再開か、廃止かが、常に議論の中心になった。原子炉の全燃料を一時保管容器に安全に移動した後の探傷試験から、使用済燃料貯蔵プールからの漏水によって原子炉タンクの低側部に小さな傷(細線状の孔食)を生じ、原子炉タンク水が漏洩したことが判明した。平成4年3月末日、故障箇所修復調査と核燃料の貯蔵容器を設計・製作を骨子とする基本方針について科学技術庁および川崎市に報告された。科学技術庁より核燃料貯蔵施設の設置変更が許可され、一時保管されていた全燃料が貯蔵容器に移され安全に保管されるようになった。再開か、廃止かの議論は平成15年まで続き、研究所教職員にとって最も苦難の時期であった。

学内では、財政的インパクトを中心に、技術的および社会的面から詳細に検討された。原子炉の停止以来、研究所所員、利用者等からは原子炉を修復して運転を再開してほしいとの要望もあったが、平成15年5月20日、五島育英会理事会において原子炉の廃止が決定された。翌年1月、原子炉の「解体届」を文部科学省に提出し、平成18年8月、使用済燃料が米国エネルギー省に搬出された(第2図)。

### 原子力人材育成の新たな展開

平成17年秋、中村英夫学長の強い原子力の教育理念によって、工学部に「原子力安全工学科」の設置案が教授会に提案された。これは長年、武蔵工大炉で培ってきた原子力の研究・教育の実績を基盤に、「原子力」と「安全」のキーワードを結びつけた学科の新設である。原子力発電によって国内の総発電電力量の約1/3が賅われる現実がありながら、原子力に対する一般社会の批判、入学志願者の数、就職先などの心配から、教授会では設置賛否の激論が交わされた。結局、2度の教授会審議で、1学年定員数を30名に設定する縮小案で承認された。その後、

地球温暖化、原油価格の高騰など、環境、経済性の問題から、世界中で原子力の利用が見直され、既存の原発の運転継続、新規原発の建設計画が発表されたことから、学内雰囲気も変わってきた。新学科設置の準備が進められ、平成20年4月、原子力安全工学科が開設され、34名の学生が入学した。この間、新潟県中越沖地震発生もあって心配の種は尽きなかったが、逆に社会の関心の的となり、思いのほか追い風となったようである。

平成20年11月には、約300名の原子力関係者にご出席いただき、近藤駿介原子力委員会委員長、大畠章宏衆議院議員(本学出身)、辻倉米蔵電気事業連合会顧問(現日本原子力学会会長)の諸先生方に講演をお願いして、新学科開設記念のシンポジウムが経団連ホールで盛大に開催された。初年度の入学志願者は140数名であったが、平成21年度は220数名、平成22年度は340数名と、幸い入学志願者は順調に伸びている。さらには早稲田大学からの呼びかけで、日本原子力研究開発機構との連携協力のもとに、平成22年度には本学と早稲田大学による共同大学院共同原子力専攻(1学年定員30名)が開設された。現在、両校合わせて25名の院生が、本学の「渋谷サテライトクラス」の学び舎で席を並べて学習している。

### 武蔵工大炉の設備・機器の再活用

平成19年から始まった文科省・経産省による原子力人材育成事業の支援を受けて、武蔵工大炉で使用されてきた設備・機器が活かされ、原子力安全工学科と共同大学院共同原子力専攻の実験、教育機器として、実体感型の原子炉シミュレータが構築された。原子炉の模擬炉心を製作し、実物の原子炉制御操作盤や制御棒駆動装置を使い、コンピュータと連結した、武蔵工大炉に代わる実験・実習装置である。武蔵工大炉の設備・機器は、新たな人材育成に再び活用され、武蔵工大炉による教育・研究の精神が、今後も受け継がれることになった(第3図)。



第3図 武蔵工大炉の再活用

このように、武蔵工大炉は日本の原子力利用の黎明期から多くの人々によって利用され、多数の原子力技術者・研究者を育成し社会に輩出するなど、原子力の教育・研究で貴重な経験と実績を残してきた。さらには原子炉の機能を失った今日においても、武蔵工大炉の設備・機器が再活用され、新たな原子力技術・研究者の育成に貢献しつつある。

東京都市大学(旧武蔵工業大学)原子力研究所は開設以来、今年で50年に到達する。日本原子力学会より、原子力の平和利用の技術開発・研究実績、原子力技術者・研究者の人材育成への社会貢献が認められ、原子力歴史構築賞をいただいたことに、50年という武蔵工大炉の歴史の重さを痛感すると共に、これを維持管理して下さった諸先輩および支援していただいた関係者に深く感謝したい。今後も、残された武蔵工大炉の設備・機器を活用し、若い原子力技術者・研究者の育成のために一層努力する所存である。末永く変わらぬ、皆様の温かなご支援をお願いしたい。

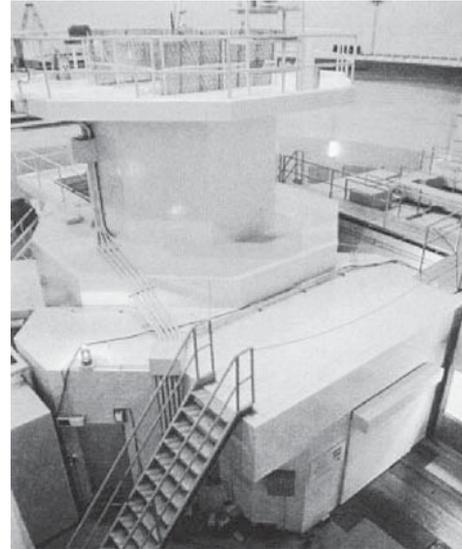
#### 〔付記〕

##### (1) 武蔵工大炉の構造と性能

武蔵工大炉はトリガ(TRIGA)Ⅱ型と称される定格出力100 kWの研究用原子炉である(第4図)。燃料は20%の濃縮ウランと減速材の水素化ジルコニウムの合金で、建設当時の燃料は棒状でアルミニウム(AI)で被覆されていたが、100 kWから250 kWへの定格出力の変更による医療照射時間の短縮および燃料追加による長期運転の計画から、昭和60年、ステンレス鋼の金属管の燃料に全交換された。原子炉本体は深さ約6.5 m、直径約2 mの水槽の底に燃料とグラファイトからなる炉心を沈めた構造で、水槽に満たされている純水は冷却材と遮へい材を兼ねている。水槽の周囲は厚さ1 mを越えるコンクリートで作られ、十分な放射線の遮へいと強度を保持している。

##### (2) 武蔵工大炉の運転・利用の実績

武蔵工大炉は、昭和38年1月30日に初臨界に成功し、以来、平成元年12月までの運転で終わった。武蔵工



第4図 武蔵工大炉

大炉を利用した医療生物照射、放射化分析、運転訓練、教育研究によって、本学の教職員・学生だけでなく、学外の多数の研究者・技術者にも利用された。1日平均5時間、週5日間のペースで定常運転され、昭和59年1月には積算出力100万 kWhに到達した。昭和60年7月には当初からのAI被覆燃料はステンレス鋼被覆燃料に全交換された。AI被覆の旧炉心で16,905時間、積算出力1,107,450 kWh、またステンレス鋼被覆の新炉心で4,272時間、積算出力375,773 kWhの原子炉運転が行われた(第2図)。原子炉停止前のほぼ定常運転状態での原子炉の実験設備(中央実験管、気送管、水平実験孔、照射室等)別の利用割合では、約75%が教職員および学生による所内利用、約15%が放射化分析等の受託による一般利用、残りの10%が文部省の共同利用であった。

#### —参考文献—

- 1) 学校法人五島育英会、武蔵工業大学75年史、p.284～286(2005)。
- 2) 武蔵工業大学原子力研究所、25年のあゆみ、p.1～42(1985)。
- 3) 堀内則量、“ありがとう武蔵工大炉—武蔵工大炉のあゆみと廃止措置計画”，Isotope News, 10月号, 日本アイソトープ協会, p.11～14(2004)。
- 4) 堀内則量、“武蔵工大の原子力人材育成プログラムへの取組み—原子力安全工学科の新設に向けて”，月間エネルギー, 9月号, 日本工業新聞社, p.27～30(2007)。
- 5) 堀内則量，“原子力利用の安全をめざして新学科を創設—武蔵工業大学の挑戦”，原子力eye, 6月号, 日刊工業新聞社, p.46～48(2008)。
- 6) 東京工業大学原子炉工学研究所、武蔵工業大学原子炉等利用共同研究成果報告書、武蔵工業大学原子炉共同利用委員会(幹事会)編集、Vol.1～14、(1976～89)。

# 時空の創生：超弦理論から原子核へ

## 2. 超弦理論と宇宙論：極小素粒子と極大の関係

理化学研究所 仁科加速器研究センター 橋本 幸士

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り、重力と量子力学を統一する究極理論の候補である。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。第2回の今回は、素粒子をひもの振動で記述している超弦理論が、驚くべき新宇宙描像「ブレーンワールド(膜宇宙論)」を提供することを述べる。宇宙論と素粒子論の親密な関係が明らかになる。

### I. 宇宙と素粒子の親密な関係

宇宙物理学と素粒子物理学、これらは、長さのスケールでいうと対極にあり、まさに「端っこ」の物理学である。宇宙物理学は、光速をもってしても何億年も必要とするような距離のスケールの話をし、一方、素粒子物理学では、物質と力の構成要素としての最小単位を探求する。したがって、これらの研究分野が「お隣同士である」と言ったとすると、非常に奇異に聞こえるであろう。

例えば、原子核物理学と素粒子物理学が「お隣同士」であるのはよく分かる。原子核を構成する核子(陽子と中性子)は、3つの素粒子クォークの複合状態である。素粒子をよく理解すれば原子核の側面が分かるし、原子核を深く研究すれば素粒子の性質が見えてくる。

では、なぜ宇宙と素粒子が「お隣同士」なのだろうか？実際に素粒子物理学の研究者に尋ねてみよう：「お隣の研究分野とは何ですか？」その答えは驚くほど均一で、「宇宙・重力」「原子核」の2つなのである。お隣、という言葉には、長さのスケールが近い、などの実際の対象とする物質の大きさだけでなく、研究の動機が近い、問うている問題が似ている、などの理由も大きく寄与するのである。では、なぜ宇宙と素粒子で、問うている問題が似ているのであろうか。

後に述べるような理由で、宇宙物理学と素粒子物理学はもともと近い関係にあるのだが、実は、超弦理論の登場により、さらにこの関係は近くまた有機的に絡み合うことになった。素粒子論との関連から姿を現した超弦理論が、宇宙論の眺めを大きく変えてしまった事実を、本

稿では見ていくことにしよう。

#### 1. 未知の素粒子に挑む素粒子物理学

素粒子物理学者は、知られている素粒子の性質を調べ、それだけではうまく理論が構成できなかったり、自然ではないという部分を見つけて、未知の素粒子の存在を予言する。それがもし実験で発見されれば、ノーベル賞となるわけである。湯川の業績はまさにそれであった。原子核を構成する、陽子と中性子の間に働く「強い力」は、何らかの粒子によって媒介されているだろう、そのような粒子が存在したとすれば、それはこのくらいの質量を持つはずだろう、と予言したわけである。しかして、その粒子は後に発見されたのである。

このように、素粒子物理学は、知られている素粒子を数学的に整理し、既知の実験結果を説明し、新しい素粒子とその性質を予言する、ということを目指している。これは困難な目標である。

未知の素粒子が仮に存在したとしよう。我々はなぜその素粒子を今まで見つけることができなかったのだろうか。その可能な理由は2つある。(1)未知の素粒子と、我々の知っている素粒子の間に働く相互作用が小さすぎて、未知の素粒子が今までなかなか生成されなかった。(2)未知の素粒子は重すぎて、知られている素粒子のエネルギーを上げてその素粒子を生成することができなかった。これら(1)(2)のいずれかの理由で、未知の素粒子が見つからなかったわけである。

未知の素粒子を予言する、という素粒子物理学者の根源的な欲求は、実のところ、宇宙を論じる宇宙物理学者の欲求と深い共通点があることを見てみよう。

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

(2010年 8月27日 受理)

## 2. 宇宙の問題は素粒子の問題

宇宙の大きな問題は何であろうか。万人が認めるところは、おそらく、宇宙は何で出来ているか、という問題と、宇宙の起源は何か、という問題である。我々は観測により宇宙は膨張していることを知っている。過去の宇宙は現在よりもずっと小さく、また温度も高かったことを知っている。しかし、もともと宇宙はどうやって生まれ育ったのか、そして、冷えていく過程で、なぜ現在のようエネルギー組成になったのだろうか。

先にあげた、未知の素粒子が見つからない要因(1)は、宇宙の組成の問題と関係がある。相互作用が弱い未知の粒子がたくさんあったとすると、それらは我々のそばにたくさんあるにもかかわらず、我々は感知できない。しかし一般に素粒子には質量があるから、大量の未知の粒子があれば、宇宙の重力に影響を及ぼす。「暗黒物質」と呼ばれる未知の物質があるとされる理由は古く、天の川銀河の回転速度が、光から観測されている物質と全く合わないという大きな理由があるが、近年の様々な精密観測で、宇宙全体の約2割が暗黒物質によるエネルギーであることが分かっている。暗黒物質が未知の素粒子なら、それを検出する方法は素粒子物理学の肩にかかっている。

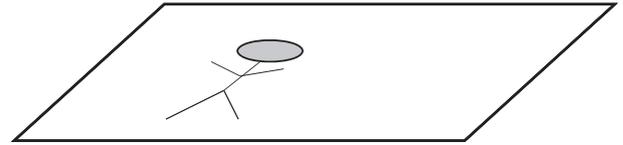
一方、(2)のように未知の素粒子が重すぎたとすると、アインシュタインの関係式により、それを生成するために必要なエネルギーは大きくなる。本格稼動し始めた欧州原子核研究機構(CERN)の大ハドロン衝突器(LHC)は、14テラ電子ボルトでの粒子の衝突実験を可能にする予定である。現在到達しているエネルギーでも、既に人類が史上初めて生成している高エネルギーである。しかし、そのエネルギーより大きいエネルギーに相当する重さの素粒子は、衝突器では生成することができない。宇宙は昔、大変熱く、高エネルギーの火の玉であった。非常に重い素粒子もろくろく生成していた時期があったはずである。つまり、宇宙の起源を探る旅は、未知の素粒子を探る旅と同じである。

このように、宇宙物理学とは隣同士の関係にある素粒子物理学であるが、超弦理論は、素粒子物理学の中から出発して、宇宙物理学に多大な影響を与えた一つの模型(仮説)である。以下ではまず、超弦理論と素粒子の種類がどのように関係しているかについて解説する。そこでは、宇宙全体が実は高次元空間の中に「膜」のようなものであるとするアイデアが自然に登場する。この「膜」のアイデアが新しい宇宙論をもたらしていることを最後に眺めてみよう。

## Ⅱ. 我々は膜の上に住んでいる？

### 1. ファンタジー小説『平面国』の世界

1884年にE. A. アボットが著した『平面国(“Flatland”)』をお読みになった方はいるだろうか(日本語翻訳版はブ



第1図 平面に住む人の模式図

2次元平面にとらわれており、高さ方向の次元を感知していない。

ルーバックス『二次元の世界(1977年)』などがあるが絶版のようである。『平面国』の舞台は、2次元平面である。知的生命はすべて2次元の膜の中に閉じ込められており、社会と文明が存在する。登場人物は多角形や線分など。2次元空間独特の社会と生活が構成される(第1図)。安寧な2次元社会に突如、3次元の生命が降り立つ。2次元の世界の人々は3次元が理解できず、混乱し、やがて自分が知らなかった高い次元の存在を知り、理解し始める……こういったストーリーである。

実は、100年以上前のファンタジー小説のアイデアは、驚くべきことに、超弦理論が導き出す最新の宇宙論と同一なのである。超弦理論は、「ひも」の振動が様々な種類の素粒子を与えるという素粒子理論であるが、ひもの概念から自然に、ひもがくっつく膜「D プレーン」が要請され、D プレーンが我々の知る素粒子を説明し宇宙を構成する。

『平面国』の舞台が可能であるための物理的条件とは何であろうか。基本的な条件として3つ必要であろう。

- (A) 2次元膜が存在していること。
- (B) 2次元膜の上だけに拘束された運動をする素粒子があり、それらが人間の体や物質をすべて構成していること。
- (C) 2次元の膜にとらわれない素粒子も存在するが、2次元膜の上の素粒子とは弱くしか相互作用していないため、2次元膜の住人にはその正体がよく分からないこと。

この3つが満たされたとき、平面国が「現実」になる：我々の知覚している3次元空間が「平面国」となる可能性が開けるのである。

### 2. ひもが作る素粒子の種類

#### (1) 素粒子は行列で分類できる

素粒子がひもで出来ているならば、様々な素粒子の種類がひもで説明されなければならない。まずは、知られている素粒子がどのように分類されているかを見てみよう。

素粒子には2種類あり、それらは、力を媒介するもの、そして物質を構成するものである。前者の代表例は光子(電磁気力を伝える)であり、後者の代表例は電子である。まずは前者から見ていこう。力には、電磁気力のほかに、強い力と弱い力と呼ばれるものがある(重力は後

で述べる)。電磁気力はそれだけで1種類であるが、実は強い力と弱い力は1種類ではない。これらの種類は、実は行列で記述されている。強い力は $3 \times 3$ の行列、弱い力は $2 \times 2$ の行列である。行列の成分それぞれに当たるところに、1種類ずつ、素粒子が入っている。強い力や弱い力は、電磁気力より若干複雑なのである。しかし、電磁気力も $1 \times 1$ の行列とみなせば、力はそれぞれ、行列の大きさが3, 2, 1となっていて美しい。

実際には素粒子の標準模型は、ゲージ対称性に基づいた量子場の理論と呼ばれる数学で書かれている。これは美しい数学であるが、そのエッセンスは、単に今述べた行列に過ぎない。素粒子の種類が行列で与えられているというところが最も重要である。

それでは、物質を与える素粒子はどうであろうか。たとえば、その代表例であるクォーク。あるクォークは、強い力と弱い力を感じ、そこには6種類の仲間が内在している。この6という数字は $3 \times 2$ の長方形行列で書ける。長方形行列で書くことは大変重要である：素粒子の標準模型でもそう書かれている理由は、このように書けばその素粒子がどのように相互作用するかが分かるからである。 $3 \times 2$ の行列は、左から $3 \times 3$ の行列を掛けることができる。行列の掛け算を実行すると、 $3 \times 3$ の行列の成分と、 $3 \times 2$ の行列の成分がどのように組み合わせられるかが分かる。この組合せが、まさに、それぞれ成分に入っている素粒子の相互作用なのである。 $3 \times 2$ の行列には、右から $2 \times 2$ の行列を掛けることができ、こちらも同様である。このように、クォークが強い力と弱い力のそれぞれの素粒子とどのようにくっついたり離れたりするのかが、行列で支配されているのである。行列で支配された素粒子相互作用が、実験で確認され、素粒子標準模型の正当性が確認される。

## (2) 膜に付くひもと行列、そして素粒子

ひもには2種類あり、それらは開いたひもと閉じたひもである。開いたひもはさらにその種類を分けられることを見ていこう。そこから、行列の性質が出現し、素粒子の分類へと話がつながる。

ひもが振動している状態を見ると、その端点の状況には二通りがある。ギターの弦のように、端が固定されている場合。この場合は、弦は端点では振動しない。このような端を「固定端」と呼ぶ。一方で、プールの水面の振動を見てみよう。プールの端では水面は上下に振動している。これを「自由端」と呼ぶ。縄跳びで遊ぶ際に、両端を持って回してもよいし、片方の端を自由にしてぶらぶら揺らしてもよい。どちらを選ぶかは自由である。したがって、開いたひもの振動においても、2つある端点のそれぞれで、固定端と自由端のどちらを選んでもよい。しかも、ひもには振動の方向があるので、そのそれぞれの方向について固定端と自由端を選んでよい。

例として、両方の端の振動が、全空間方向のうち一部

の方向は自由端、残りは固定端になっているとしよう。すると面白いことに、このひもは、ある方向には端が固定されているため、全空間のうち残りの空間方向にしか自由に直線運動できない。これはあたかも、全空間のうちの部分空間に(端点)閉じ込められているようである。この部分空間のことを「D ブレーン」と呼ぶ。

D ブレーンの「D」は固定端(ディリクレ型)境界条件の頭文字から来ており、また「ブレーン」は「膜」を意味する英単語「membrane」から来ている略語である。

このように自然なひもの振動条件を考えると、「平面国」の条件(A)「膜の存在」が満たされていることが分かる。素粒子がひもでできているならば、自然な「平面国」が実現される舞台が存在するのである！

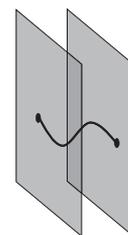
ではこのD ブレーンが2枚、並行にくっついて存在していたとしよう。開いたひもの端点には、2枚のD ブレーンのどちらに乗っているかの二通りの選択肢がある。端点は2つあるので、結局、このひもは $2 \times 2$ の行列の成分でラベルされるのである(第2図)。つまり、D ブレーンが複数枚あると、正方行列が自然にひもに与えられ、それだけの種類の素粒子がそれらの振動から出現するのである。

力を与える素粒子は正方行列で分類されているので、その行列の大きさの分だけ、D ブレーンが並んでいれば、必要な素粒子の種類が供給される。素粒子の幾何的な理解の第一歩が、ひもで簡素に与えられる。

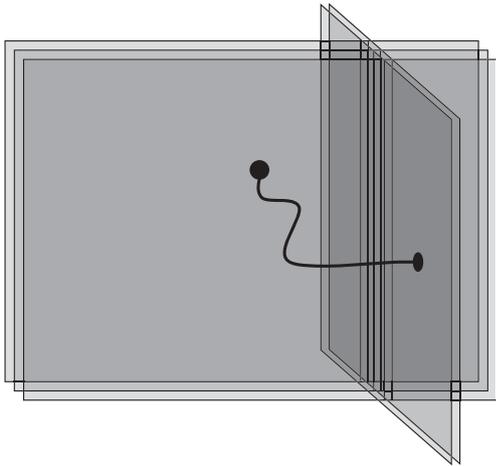
## (3) 高次元膜の交差と素粒子標準模型

一方、物質を与える素粒子はどうだろうか？ 3枚のD ブレーンが重なって存在しており、それに交差する形で2枚のD ブレーンが重なって存在していたとしよう。するとその交差点には、前者と後者のそれぞれに端点を置くようなひもがあってもよい。このひもは、 $3 \times 2$ の行列でラベルされるはずである。すなわち、物質を与える素粒子は、D ブレーンの交点から来ると解釈されるのである(第3図)。

様々な素粒子のお互いの関係、つまり相互作用の形は行列で分類されている。一方、D ブレーンを重ねたり交差させたりすると、そこには短いひもがくっつくことができ、それらの性質はまさに行列の掛け算を現す形となる。D ブレーンの高次元内の配置が、素粒子標準模型



第2図 並行に2枚のD ブレーンが並んでいる場合、開いたひもは、そのどちらに端を置くかで $2 \times 2$ の種類を持つことができる。



第3図 重なった3枚のDプレーンに、重なった2枚のDプレーンが高次元内で交差している様子。交差面の近くには、それぞれの束のDプレーンに端を置くひもが存在できる。

になる。

超弦理論を用いて素粒子の性質を探るこのような学問分野は「ストリング現象論」と呼ばれ、多くの素粒子物理学者が参画して研究が進んでいる。Dプレーンの配置から新たな素粒子の存在が予言されるなど、興味深い成果が報告されている。

この考え方で重要なのは、ひも理論を考えると自然にDプレーンという膜が存在せねばならないという点である。「平面国」の考え方の基礎が自然に供給されて、我々は実は高次元に浮かぶ膜の上に住んでいる。それが数学的に現れてくるということである。120年前のファンタジーが、最先端の科学となって再登場したのである。

我々の体を構成する物質、そして、我々の世界で極微の電子デバイスなどを作るすべての産業技術は、素粒子の標準模型に登場する素粒子で作られている。したがって、「平面国」の実現に必要な条件(B)「膜上の素粒子で物質が構成されていること」が満足されているのである。それでは、最後の条件(C)「膜の外の素粒子」は何であろうか？ファンタジー『平面国』の最も重要な登場人物「高次元の人」は、超弦理論では何なのだろうか。

### Ⅲ. 宇宙は運動する膜

Dプレーンにとらわれないひもも、それは閉じたひもである。端を持たないので、Dプレーンがいようがいまいが、全空間を自由に伝播する。閉じたひもの振動から出てくる素粒子は重力子である。すなわち、重力こそが膜の外の世界への窓口となるのである。

#### 1. 平面国成立の条件

「ちょっと待てよ、重力は我々も感じているじゃないか。しかも、高次元を伝播したら、ニュートンの逆2乗法則は成り立たないじゃないか。」この当然の疑問はどう解

決されるのだろうか。

我々の生活で、作為的に重力を使って物の性質を調べていることはほとんどない。光を当てて物を見るのが顕微鏡であるが、重力波を当てて物を調べる装置が開発されるにはあと数十年はかかるであろう。そもそも重力波はまだ検出すらされていない。誰もがその存在を疑っていないにもかかわらず。

光つまり電磁気力と重力の違い、それは、重力が極端に弱いということである。弱いために、それを感知するためには膨大な量の物質が必要となる。我々は重力を感じているが、それは素粒子1個の作り出す重力ではなく、地球全体が作る重力をようやく感じているだけなのである。高次元の情報が我々に伝わりにくいのは、そもそも相互作用が弱いからなのである。これは、平面国の条件(C)そのものと言ってもよい。

では、ニュートンの逆2乗法則はどうだろうか？もし世界が3次元空間ではなく4次元空間であれば、逆3乗法則になってしまうのだ。我々の知っている逆2乗法則と矛盾なくするためには、一工夫必要である。

この1つの解答は、1998年にランドールとサンドラムによって与えられた。重力があることの重要な点は、時空を曲げてしまうということである。ランドールとサンドラムは、曲がった高次元時空を仮定すると、高次元を伝播しているはずの重力子が2種類に分離し、一つは膜の上に局在してしまうモード、他は高次元を伝播する重いモードとなることを示したのである。前者はニュートンの逆2乗法則を出す重力であり、後者は我々のまだ知らぬ「重い」重力子なのである。

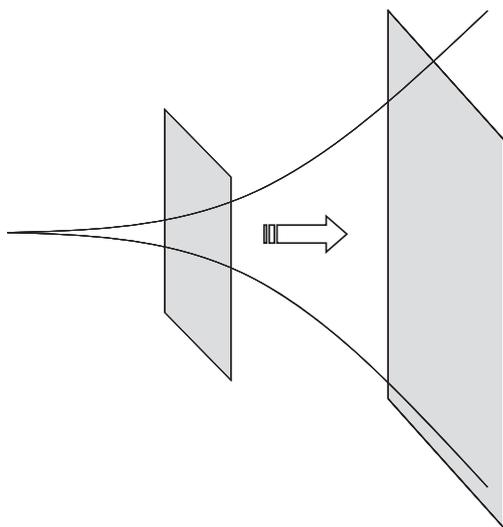
このランドール・サンドラム模型は、素粒子物理と宇宙物理の研究業界に驚きをもって迎えられ、高次元時空内の膜の上に我々が住んでいるというシナリオ「ブレーンワールド」が非常に真剣に研究対象として取り上げられる時代が幕開けした。まさに、「平面国」がサイエンスフィクションから現代科学に変わった瞬間であった。

重力を見る目が、実は膜の外の世界を見る窓になっているという考え方は、超弦理論では奇異なものではなくむしろ自然に現れるところが、大変面白い。

#### 2. 高次元を動く膜と膨張宇宙

宇宙は膨張していることが知られている。相当の過去には、時間の指数関数として非常に速く宇宙が膨張していた時期があったとする「インフレーション宇宙論」は今日、宇宙論分野の中で標準的な位置を占めるようになってきた。宇宙の様々な精密観測結果を説明し、宇宙論的な問題を解決する、このインフレーション宇宙論は、Dブレーンやブレーンワールドシナリオとどのような関係にあるのだろうか？

その1つの答えは、まったく簡素なものであった。先ほどの例のように、高次元空間が曲がっているとしよ



第4図 高次元空間内をブレーンが移動すると、ブレーンの見かけの大きさが変化する。水平方向は高次元方向であり、曲線はその方向への空間の曲がりを模式的に表す。左から右にブレーンが運動する際、宇宙が膨張する。

う。その中にDブレーンのような膜があれば、その膜は曲がった時空を感じて運動するはずである。運動すると、膜は場所を高次元内で変え、したがって曲がった時空の中の位置を変えるので、膜全体の大きさの単位が変わる。これは、宇宙の大きさを変えることになるのである。したがって、宇宙の膨張と収縮は、膜の高次元内での運動と考えられるのである(第4図)。

素粒子の種類や性質が、高次元空間内のブレーンの配置や交差の仕方によって表されたように、宇宙の膨張が、高次元空間内のブレーンの運動で表されている。これはまさに、素粒子論と宇宙論の新しい統合と言ってもよいであろう。

宇宙の始まりは大変熱かった。そこではすべての素粒子の対生成が起こり、素粒子のスープようになっていたに違いない。この「ビッグバン」理論は、ブレーンワールドではどのように解釈されるであろうか？

複数の異なるブレーンが高次元内で運動していると、必然的にそれらはいつかお互いに衝突するであろう。衝

突すれば、衝突のエネルギーが、超弦理論の基本構成要素のひもに転換される。ひもの大量生成が起こるのである。ビッグバンがブレーンの衝突であるというシナリオは、超弦理論では自然かつ魅力的である。2つの「平面国」の衝突という大災害が、宇宙の始まり、ビッグバンであるかもしれない。強調しておくが、これはファンタジーではなく、現代科学で確認を要する重要な提案なのである。

#### Ⅳ. 高次元空間のDブレーンによる素粒子と宇宙の統合

始めに述べたように、素粒子と宇宙は、共通の問題を持っていた。超弦理論は、重力と量子力学の不和を仲直りさせる統一理論であるが(前稿参照)、「ひも」を基本構成要素として考えることで、素粒子論と宇宙論の両方を幾何学にかつ統一的に解釈する道を拓いた。

これは大変重要なことである。なぜなら、単純な仮説が自然の真理であると受け入れられるためには、たくさん問題を一度に解決できる能力をその仮説が有していなければならないからである。超弦理論はまだ、問題を解決する能力は持っていない、実験観測で証明されていない。しかし、本稿で述べたように、多彩な素粒子と宇宙の物理の重要な側面を、美しく幾何学的に捉えなおしていることだけは間違いない。

次回、最終回では、原子核物理学と超弦理論の興味深い関係について、この5年ほどの重要な研究の進展について解説する。高次元空間のDブレーンとひもの数理論が、陽子と中性子の物理を明らかにするために活躍している様子を、報告したい。

#### —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)

本誌, 52(11), p.47(2010)参照.

# 分離変換技術はどこまで成熟したか？

## 技術成熟度評価に基づく現状整理と提案

### 「分離変換・MA リサイクル」研究専門委員会

米国航空宇宙局(NASA)や宇宙航空研究開発機構(JAXA)でも活用されている技術成熟度(TRL)基準を用いて、放射性廃棄物処理・処分の負担軽減などを目的とする分離変換技術の成熟度を評価した。技術成熟度の厳密評価ではなく、そこから浮かび上がってくる課題を客観的に把握することを目指した。そこで見えてきたものは、直面する技術開発上の高い壁であった。TRLについて概説するとともに、今後、分離変換技術の開発を効率的・効果的に進める方策を提案した。

#### I. はじめに

分離変換技術とは、放射性廃棄物処理・処分の負担軽減および資源の有効利用のために、高レベル放射性廃棄物(HLW)に含まれるマイナーアクチノイド( $Np$ ,  $Am$ ,  $Cm$ ; MA)および核分裂生成物(FP)をその半減期や利用目的に応じて分離するとともに、MAおよび長寿命FPを短寿命核種または安定な核種に変換する技術のことである。

原子力委員会は、2008年8月に、研究開発専門部会の下に分離変換技術検討会を設置し、わが国における分離変換技術に関する研究開発の現状について整理するとともに、本技術の効果および意義を分析し、それらを踏まえた今後の研究開発の進め方などについて検討した。2009年4月に、報告書「分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方」<sup>1)</sup>が取りまとめられた。

同報告書によると、分離変換技術は、この技術を含む将来の原子力発電技術体系に要求される性能目標を満たして実用化できれば、原子力発電に伴って発生する放射性廃棄物の処分体系を一層、合理的に設計できる自由度の増大が期待されることから、今後も着実に研究開発を実施すべきであると評価された。一方、研究開発の現状については、研究開発が行われている4つの概念(酸化燃料高速増殖炉(FBR)によるMA均質サイクル、金属燃料FBRによるMA均質サイクル、酸化燃料FBRによるMA非均質サイクル、加速器駆動システム(ADS)を中心とした階層型によるMA非均質サイクル)を対象

に整理・検討された。その結果、いずれの概念においてもMAを用いた本格的な実証実験が行われていないことなどから、おおむね、「基礎研究段階」から「準工学研究段階」への移行を図っている状況にあると評価された。また、それぞれの技術課題ごとにその研究開発の到達段階に応じて今後、注力すべき取組みと留意事項が取りまとめられた。さらに、共通開発課題として、MAの分離変換技術を実現するための取組みは、研究者数、施設整備、予算などの点で極めて不十分であり、早期の対応が必要であると指摘された。

このような背景のもと、原子力学会「分離変換・MA リサイクル」研究専門委員会では、米国航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration: NASA)や宇宙航空研究開発機構(Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA)などで研究開発管理に有効に活用されている実績があり、また国際原子力エネルギーパートナーシップ(Global Nuclear Energy Partnership: GNEP)においても用いられた、技術成熟度(Technology Readiness Levels: TRL)基準<sup>2,3)</sup>に着目し、これを用いて、わが国における分離変換技術の成熟度を評価した。技術成熟度の厳密評価が目的ではなく、そこから浮かび上がってくる課題を客観的に把握するとともに、課題解決の方策を提案することを目指した。

#### II. 技術成熟度(TRL)基準

##### 1. 技術成熟度(TRL)基準とは？

技術成熟度(TRL)基準とは、新技術・概念の着想段階から実用段階までをいくつかの段階に分け、技術開発の段階を体系的に示す指標である。新技術の成熟度を事前に評価し、また、異なる技術間の成熟度を比較する方法として用いられている。この手法の原型は、1980年代よりNASAで宇宙開発に活用されていたが、その後、

*Maturity of Partitioning and Transmutation Technology —Evaluation and Proposal based on Technology Readiness Levels*: Research Committee on Partitioning and Transmutation and MA Recycle, Atomic Energy Society of Japan. (2010年 9月9日 受理)

改良がなされ、1995年の J. C. Mankins の NASA White Paper “Technology Readiness Levels”<sup>2)</sup>の公表以降、より広く普及してきた。米国の政府関連機関や企業などを中心に TRL が用いられている。

NASA で用いられている TRL を第 1 図に示す。技術の着想から実用までを 9 段階に分け、着想段階を TRL 1、実用段階を TRL 9 とし、技術の成熟プロセスを基礎技術研究、フィージビリティ研究、技術開発、技術実証、システム/サブシステム開発、システム試験、打ち上げ、運用としたものである。それぞれの TRL の段階においては、その技術に適切な具体的な到達目標が定められている。

## 2. TRL 基準の活用で何ができるのか？

TRL 基準を用いることにより、異なる種類の技術の成熟度を同一の一貫した尺度で定量的に測ることができる。それにより、どの技術が基礎レベルであるのか、どの技術が実用化に近いのかなど、研究開発/技術開発プロジェクトの活動を一望できる<sup>4)</sup>。また、専門用語による説明ではなく TRL で表現することにより、その技術分野の専門家以外の異なる職種の人たち間でのコミュニケーションを容易にする。すなわち、機器などの技術成熟度を共通尺度でおおまかに表現できることから、「共通言語」として、技術の分野間、研究機関－メーカー間、研究部門－プロジェクト部門間、経営部門－技術開発部門間などでの意思疎通、コミュニケーションの円滑化が図れる。それらを通して次の段階に向けた目標を明確にでき、さらにそれが開発者全員の共通認識となる<sup>4)</sup>。

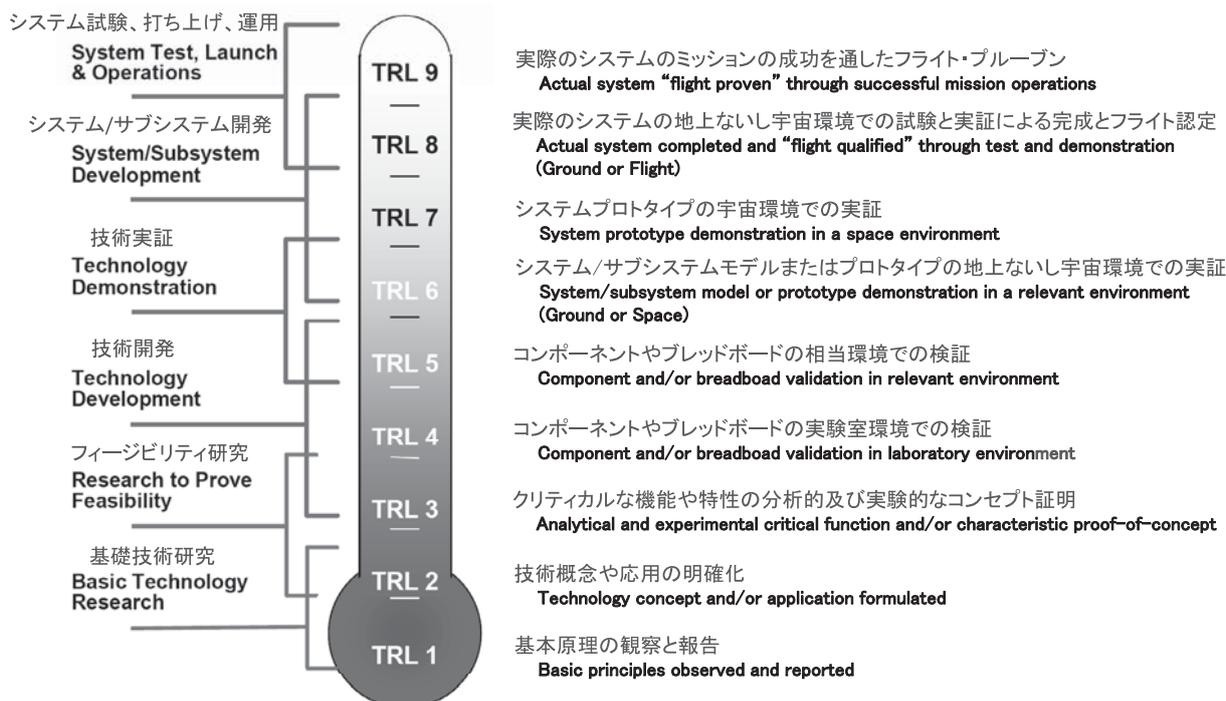
一方、TRL 基準を活用しても、技術成熟度の厳密な

定量表現ができるわけではない。この技術は TRL 4 だ、いや TRL 3 だ、といった議論に注力することは、必ずしも適切ではない<sup>4)</sup>。

また、TRL では技術の難易度、開発リスクは評価できず、TRL のみではその技術が採用できるかどうかは判断できない。プロジェクトでの技術の採用判断プロセスでは、技術成熟度以外に、全体システムにおけるその技術の重要性(ミッションクリティカル度)、技術の過去の実績からの相異(設計変更の度合い)、技術の残開発要素/開発リスクの度合い(開発の難易度)などの要素を総合的に判断する必要があるからである<sup>4)</sup>。

## 3. TRL 基準の活用とプロジェクト管理

TRL 基準を用いることで、技術開発プロジェクトのよりよい管理ができることを、米国会計検査院(United States General Accounting Office, 現 United States Government Accountability Office:GAO)が報告<sup>5)</sup>している。GAO は、新技術が製品/システム開発に組み込まれていった23のケースについて分析評価した。23の技術がそれぞれの製品/システム開発プログラムに組み込まれたときの技術成熟度は、低いもので TRL 2、高いもので TRL 9 であった。TRL 6 以上の技術を含む製品/システム開発プログラムでは、開発予算、スケジュールおよび性能のすべてにおいて、当初の目標/要求を達成できていた。一方、TRL 5 以下の技術を含む製品/システム開発プログラムでは、大幅な開発予算の増加およびスケジュールの遅延を経験していた。製品/システム開発の開始前に、技術の開発途上で起こり得る予期せぬ失敗に対応できる余地を残しておくことが重要であると指摘



第 1 図 NASA で用いられている技術成熟度(TRL)基準<sup>2)</sup>

している<sup>5)</sup>。

また、技術成熟度が低いにもかかわらず、要求性能を変えられない場合は、開発予算の増加およびスケジュールの遅延の原因のひとつになっていたことから、製品/システム開発を担う管理者は、技術成熟度と要求性能のギャップを埋めるために、その技術が成熟するまで待つか、あるいは要求性能を変えてすでに成熟した技術を採用するかを選択権を持っていることが重要であると指摘している<sup>5)</sup>。

### Ⅲ. TRL 基準の活用例

#### 1. 宇宙開発における TRL 基準の活用

宇宙開発においては、NASA が TRL の活用の先駆者であることもあり、TRL を用いることが一般的になっている。NASA、欧州宇宙機関 (European Space Agency: ESA)、JAXA、フランス国立宇宙センター (Le Centre national d'études spatiales: CNES) およびカナダ宇宙庁 (Canadian Space Agency: CSA) は、宇宙開発における TRL の世界標準化に向けて取り組むために、国際 TRL ワーキンググループを発足させた。2005年から会合を毎年開催し、ガイドラインやハンドブック作成などを行っている<sup>4)</sup>。

わが国の JAXA は、TRL の活用は宇宙の研究開発に参加するステークホルダー間の円滑なコミュニケーションを促進する「共通言語」としてメリットが大きいと評価し、プロジェクトでの技術採用判断プロセスの「透明化」および研究開発活動の「一望化」の2つの視点から、TRL の使用を推奨している<sup>4)</sup>。

#### 2. GNEP における主要技術の TRL の評価

GNEP においては、軽水炉使用済み燃料再処理、高速炉使用済み燃料再処理、燃料製造などの技術について、NASA と基本的に同一の TRL の手法を用いて、技術成熟度が評価された<sup>3)</sup>。そこでは、第1表に示すように、概念開発段階 (TRL 1～TRL 3)、原理実証段階 (TRL 4～TRL 6)、性能実証段階 (TRL 7～TRL 9) の3段階に大きく分け、それぞれの段階をさらに3段階に分け、全体で9段階の TRL が用いられた。

第1表 分離変換技術の成熟度の評価に用いた TRL 基準

TRL	開発段階	
9	性能実証段階	実機プラント運転
8		実機プラント試験
7		プロトタイプ試験運転
6	原理実証段階	技術基盤の確立
5		要素技術の完成
4		要素技術の開発
3	概念開発段階	技術開発の活性化
2		技術概念の具体化
1		システム概念の構築

米国における軽水炉使用済み燃料再処理の技術は、実際の軽水炉使用済み燃料を用いた工学規模試験を実施したことから、TRL 5 と評価された。また、米国における高速炉使用済み燃料再処理の技術は、模擬の高速炉使用済み燃料を用いた工学規模試験を実施したことから、TRL 4 と評価された。ただし、GAO は、これらの評価は高すぎると指摘している<sup>6)</sup>。

MA を含まない U-Zr 金属燃料および U-Pu-Zr 金属燃料は、米国の実験炉 EBR-II での実績から、それぞれ、TRL 8 および TRL 7 と評価された。その一方で、MA を含む核変換金属燃料は TRL 4 と評価された。

わが国やフランスで研究開発が進んでいる高速炉混合酸化物 (MOX) 燃料については TRL 8、MA を含む酸化物燃料については TRL 4 と評価された。

### Ⅳ. 分離変換技術の成熟度の評価

#### 1. 評価の目的と分野・方法

分離変換技術に関する成熟度の評価は、段階の評価そのものが目的ではなく、そこから浮かび上がってくる様々な課題を客観的に把握し、その課題解決に向けた方策を提案することを目指したものである。

評価対象とした技術の範囲は、わが国で利用可能な技術情報、すなわち、わが国で開発された技術、わが国が参加した国際協力による成果、広く公開されて共有された技術とし、他の国の技術成果であってわが国で十分に利用可能でないものは対象外とした。技術分野としては、MA 核変換システムでは、MA 均質サイクルおよび MA 非均質サイクルで用いる FBR と、階層型による MA 非均質サイクルで用いる ADS を選定した。燃料サイクルでは、MA 分離・再処理、および MA 含有燃料を選定した。

成熟度の評価には、技術分野ごとに、GNEP での評価に用いられた TRL<sup>3)</sup> をほぼ踏襲する形で用いた。概念開発段階 (TRL 1～TRL 3) は、基礎科学から応用科学、技術開発一歩手前までで、TRL 3 達成で基礎的データからその原理的成立性が得られるとした。原理実証段階 (TRL 4～TRL 6) では、原理的成立性が示されたシステム概念における要素技術の技術開発が進み、TRL 6 達成でフルスケール相当の試験などで良好な成果が得られ、技術基盤が確立されるとした。性能実証段階 (TRL 7～TRL 9) では、実機プラントシステムの性能などを検証し、最終的に実機プラントの運転がなされるとした。

#### 2. 評価結果

##### (1) FBR の MA 装荷炉心と MOX 炉心

ナトリウム冷却型高速炉に MA を含む燃料が装荷される炉心を評価対象とした。

MA を含む燃料が装荷された炉心の前例は少数であり、関連の技術開発も途上である。MA が装荷されるこ

とによる炉心への影響については、その成立性を覆すほどではなく、工学的に対応可能であると推定される。一方、その信頼性を確保するためには、微分実験(核データのエネルギー依存性の測定)に加え、高速炉体系の環境における MA を用いた各種の積分実験(炉物理実験やサンプル照射試験)を充実させることが必要である。したがって、MA 装荷炉心は、TRL 4 と評価した。今後、核的影響評価の基礎データ蓄積、予測手法の向上を行う必要がある。

なお、わが国における FBR の MOX 燃料炉心の核的技術は、TRL 6 と評価される。

## (2) ADS

ADS 炉物理、MA 装荷炉心、ADS プラント、核破砕ターゲットおよび加速器技術を評価対象とした。

ADS 炉物理については、未臨界体系での基礎的な炉物理実験は実施されているものの、鉛ビスマス冷却や窒化物燃料を模擬した臨界実験は一部実施または実験が計画中であるため、TRL 2 と評価した。MA 装荷炉心については、MA 核データの整備が進み、数は少ないがサンプル照射試験などにより断面積データの検証も行われており、TRL 3 と評価した。今後、解析精度向上のためには微分実験だけでなく積分実験が不可欠である。

ADS プラントについては、プラント概念が提示され、鉛ビスマスの基礎的な流動試験などを実施しており、TRL 3 と評価した。核破砕ターゲットについては、基礎的な材料試験などを実施するとともに、国際共同実験 MEGAPIE (MEGAwatt Pilot Experiment) において 1 MW の鉛ビスマスターゲットを約 120 日間運転したことから、TRL 3 を実施中と評価した。

加速器技術については、常伝導加速器ではあるが、J-PARC において陽子リニアックを建設・運転し、超伝導加速器に関する要素技術開発を実施していることから、TRL 3 と評価した。

## (3) MA 分離・再処理

湿式法について、MA 分離に係る、晶析-共抽出技術(Np 分離)、抽出クロマトグラフ法、SETFICS 法(CMPO 抽出剤による分離法)、DIDPA 法(ジイソデシルリン酸抽出剤による分離法)、DGA 系抽出法(ジグリコールアミド抽出剤による分離法)の 5 件、乾式法について、熔融塩電解法の前処理技術(Na 蒸留・せん断)、MA 回収主工程、廃棄物処理(ゼオライト処理)、窒化物燃料の乾式再処理技術の 4 件を評価対象とした。

湿式法では、晶析-共抽出技術、抽出クロマトグラフ法、SETFICS 法のいずれにおいても、ベンチスケール(数 mg~数 10 g-MA)での使用済み燃料を用いた試験を実施するなど概念開発段階を終了し、模擬物質を用いた工学スケール(数 100 g~数 10 kg-MA/d)のユニット試験段階(TRL 4)に入っており、TRL 3 と評価した。DIDPA 法については、ベンチスケールで使用済み燃料

を用いた試験を実施しているが、廃溶媒処理/製品転換が未実施であり、TRL 2 と評価した。DGA 系抽出法については、ベンチスケール模擬試験を実施している段階(TRL 2)にある。

乾式法では、前処理技術と MA 回収主工程について、模擬物質を用いた工学スケールのユニット試験(TRL 4)の段階に入っており、TRL 3 と評価した。廃棄物処理は TRL 2 と評価した。窒化物燃料再処理については、プロセス条件の最適化(TRL 3)の段階にあり、TRL 2 と評価した。

なお、わが国における MOX 燃料再処理は TRL 6、軽水炉燃料再処理は TRL 8 と評価される。

## (4) MA 含有燃料

4 つの MA 分離変換のシステム概念でそれぞれ用いられる、低濃度 MA 添加の酸化物燃料、低濃度 MA 添加の金属燃料、高濃度 MA 添加の酸化物燃料および高濃度 MA 添加の窒化物燃料を評価対象とした。

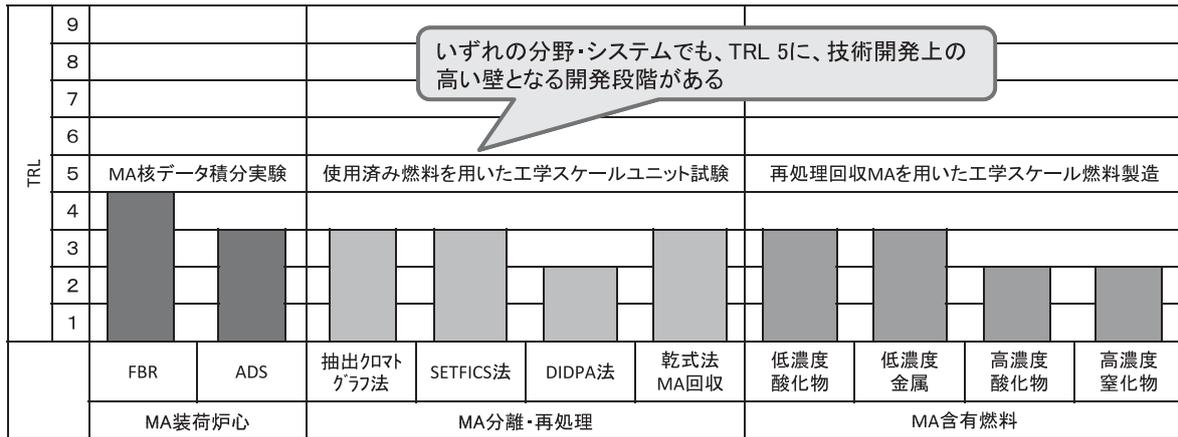
低濃度 MA 添加の酸化物燃料および金属燃料では、ラボスケール(数 g~数 100 g-MA/d)燃料製造試験とそれに伴う設計用基礎データ取得やコスト評価、基礎データベースの構築、MA の挙動評価が行われ、概念開発段階を終了しており、TRL 3 と評価した。現在、TRL 4 の模擬物質を用いた工学スケール燃料製造試験およびラボスケールの照射サンプルの「常陽」あるいは「Phenix」照射試験がそれぞれ進捗中または終えたところである。低濃度 MA 添加燃料では、酸化物燃料と金属燃料の技術成熟度に大きな差はなく、ほぼ同じであることがわかる。

高濃度 MA 添加酸化物燃料については、製造プロセスや照射挙動に及ぼす MA データの拡充や燃料挙動解析コードの整備(TRL 3)が進捗中であり、TRL 2 と評価した。高濃度 MA 添加窒化物燃料については、燃料製造工学装置開発要求の明確化や挙動解析コードの整備など(TRL 3)が進められており、TRL 2 と評価した。

## 3. 課題と提案

分離変換技術の TRL 評価を行い、技術の実用化に至る開発ステップと現状での技術成熟度を整理した。その結果、技術分野やシステム概念ごとに成熟度に違いがあることが確認された。一方、MA 取扱いの難しさなどに起因する開発コスト、開発インフラ、技術の成熟の観点から、今後、いずれの分野・システムでも、技術開発上の高い壁となる開発段階があることが明示された(第 2 図参照)。

MA 核変換システムでは、FBR と ADS の共通課題として、MA 核データ積分実験(TRL 5)があり、適切な炉物理実験施設と MA 試料調達の双方の観点からのインフラ整備が必要となる。ここに高い壁があるといえる。逆にいえば、この段階を克服できれば、MA 核変換



第2図 わが国の分離変換技術の成熟度(TRL)と技術開発上の高い壁

技術は飛躍的に進捗すると考えられる。

なお、関連する炉物理実験の必要性などに関する検討は別途、「アクチノイド・マネジメントに関する炉物理実験施設」研究専門委員会で検討がなされ、その結果については、本誌次号で報告される予定である。

MA サイクル技術では、MA 分離・再処理および MA 含有燃料において、様々な特徴を有する複数の候補技術が併存して開発が進められている。TRL 4 までは、使用済み燃料などを用いたベンチスケール試験や模擬物質を用いた工学スケールのユニット試験などによる着実な取り組みで要素技術の開発を達成できると考えられる。しかし、TRL 5 における使用済み燃料を用いた MA 分離の工学スケールユニット試験や再処理で回収された MA を用いた工学スケールの燃料製造の実施には、新たな施設建設も含む大幅なインフラ拡充、大量の MA 試料の調達、研究開発体制を含む技術力の十分な成熟が不可欠で、ここに高い壁があるといえる。

これを克服する一つのアイデアとして、技術開発の道筋について、既存施設の整備や運用の効率化で達成できると考えられるラボスケールでの使用済み燃料を用いたシステム試験を TRL 5 の前に TRL 4' 段階として提案する。TRL 4' のねらいは、数 g～数 100 g-MA/d 規模での試験による技術の成熟、取捨選択を行うことである。数 100 g 規模で MA 試料を回収できるため、MA 核データ積分実験を含む様々な研究開発への MA 試料の提供も可能となる。

既存施設・設備の整備や運用方法の改善、および関係機関の総合的な連携により、TRL 4' は比較的小さいコストで達成可能であると考えられる。また、この段階において、TRL 5 以降の大規模な開発(工学開発)に向けた技術基盤を整備することができるとともに、総合的な取り組み体制を構築することができると思う。

## V. おわりに

本報告では、技術成熟度を評価するのに有用である TRL 基準について概説するとともに、TRL を用いた

MA 分離変換技術の成熟度を評価した。その結果、それぞれの技術成熟度は TRL 2～4 程度であること、MA 取扱いの困難さなどに起因する開発コスト、開発インフラ、技術の成熟の観点から、TRL 4 と TRL 5 の間には技術開発上の高い壁があることを示した。今後、分離変換技術の開発を効率的・効果的に進めるには、広範囲の専門家が、既存施設・設備の整備や運用方法の改善も含めて、分野横断的に協力し、この高い壁に立ち向かうことが必要であると考えられる。

なお、「分離変換・MA リサイクル」研究専門委員会のタスクフォースは、分離変換技術の成熟度の評価について、技術的検討や評価対象のバックデータなどを含む、より詳しい技術報告を原子力学会和文誌に投稿予定である。

分離変換技術の成熟度の評価にあたり、タスクフォースにご参加、ご協力いただいた「分離変換・MA リサイクル」研究専門委員会の委員および日本原子力研究開発機構の関係者の皆様に感謝いたします。

(執筆担当：日本原子力研究開発機構・湊 和生)

### — 参考資料 —

- 1) 原子力委員会 研究開発専門部会 分離変換技術検討会、分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方、2009年4月28日。
- 2) J. C. Mankins, NASA White Paper "Technology Readiness Levels", (1995).
- 3) Global Nuclear Energy Partnership Technical Integration Office, GNEP-TECH-TR-PP-2007-00020, (2007).
- 4) 大井田俊彦, 宇宙開発における技術成熟度(TRL)基準の活用, 原子力学会「2010年春の年会」, OV 08, (2010).
- 5) United States General Accounting Office (GAO), GAO/NSIAD-99-162, (1999).
- 6) United State Government Accountability Office (GAO), GAO-08-483, (2008).

# 原子力開発のための中性子核反応データベース 評価済み核データライブラリー JENDL-4.0の完成

日本原子力研究開発機構 柴田 恵一, 岩本 修, 千葉 豪

原子炉の中では、中性子がウランやプルトニウムなどの原子核と相互作用をすることによりエネルギーを生み出している。したがって、原子力施設の設計等には中性子と原子核がどのような反応をどのくらいの頻度で起こすかを記述する核データが必要となる。本稿では、核データの評価について紹介するとともに、本年5月に公開した最新の評価済み核データライブラリー JENDL-4.0の作成手法、精度検証および利用について解説する。

## I. はじめに

原子炉は、中性子がU-235やPu-239などと衝突し核分裂を起こすことによって生じるエネルギーを取り出す装置であるが、その特性を決めるのは原子炉中にある原子核と中性子の核反応である。中性子核反応の起こる大きさを表すデータを核データまたは断面積(長さの2乗の次元を持つ物理量)と呼ぶ。核データは基本的には実験値を基に決定されるが、必要なすべての反応およびエネルギー領域で実験値がある訳ではない。実験値は当然ながら誤差を含む。原子力に必要な核データはある決まったエネルギー範囲(通常は $10^{-5}$ から2,000万電子ボルトまで)で連続的に一組の値が与えられていなければならない。したがって、実験値をそのまま利用することはできない。そこで、実験値に加えて、原子核物理理論による計算値あるいは統計学による推定値を用いて、その時点で最も真の値に近いと思われる核データを求める研究を核データの評価と言う。評価された核データを評価済み核データと呼び、これらを一定の書式に従ってまとめたデータベースが評価済み核データライブラリーである。

日本では日本原子力研究開発機構(旧日本原子力研究所)が中心となり、大学、原子力産業などの専門家が1970年代から独自の核データライブラリー Japanese Evaluated Nuclear Data Library(略称 JENDL)を整備してきた。第1版である JENDL-1は高速炉開発に必要な72核種のデータを収納し、1977年に公開された。その後、収納核種数の増加およびデータの質の向上を行い、第2版、第3版とデータを公開した。第1版、第2版は核分

裂反応に基づく原子炉開発での利用が主であったが、第3版からはよりエネルギーが高い核融合炉への適用も考慮してデータが整備された。最新版は、本年5月に公開した第4版 JENDL-4.0であるが、収納核種数は406で第1版の5倍強となっている。JENDL-4.0の整備では、重要核種データの見直しとともに、革新的原子炉開発、軽水炉の高燃焼度化・MOX燃料利用などを考慮してマイナーアクチノイド(MA)および核分裂生成物(FP)データの信頼度向上に重点を置いた。

以下の章では、JENDL-4.0における断面積データの評価手法、誤差推定、精度検証および利用について述べる。なお、本稿は非専門家を含む一般読者向けの解説記事であり、詳細は英文論文<sup>1,2)</sup>を参照されたい。

## II. 核データの評価

### 1. 断面積の評価手法

核データ評価に必要な実験値は、その多くが実験データベース EXFOR にまとめられており、経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)、国際原子力機関(IAEA)、ブルックヘブン研究所国立核データセンター(BNL/NNDC)のWebサイトから入手できる。実験値の豊富なデータ、例えば、重要なウラン同位体およびプルトニウム同位体の1万電子ボルト以上の核分裂断面積は、統計学的な推定、すなわち、最小二乗法により評価が行われた。このような実験値ベースの評価では実験データの選択が重要となる。文献などから実験条件、誤差を把握し、信頼できるデータのみを利用する。

一方、原子核物理理論に基づく評価では、第3版の作成においては主に外国産の計算コードを使っていた。外国産が悪い訳ではないが、最新の理論を反映させたり、効率的な評価作業を実施するためには、やはり独自のコード開発が必要であった。そこで、1,000電子ボルト領域以上のエネルギーに適用できる統計モデルに基づく

JENDL-4.0: A Database on Neutron-induced Reactions for Nuclear Science and Engineering: Keiichi SHIBATA, Osamu IWAMOTO, Go CHIBA.

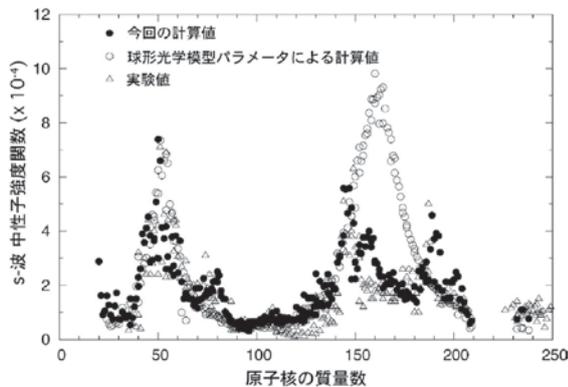
(2010年 7月26日 受理)

計算コード CCONE<sup>3)</sup>および POD<sup>4)</sup>を開発した。前者は主に MA, 後者は FP の核データ評価に使われた。

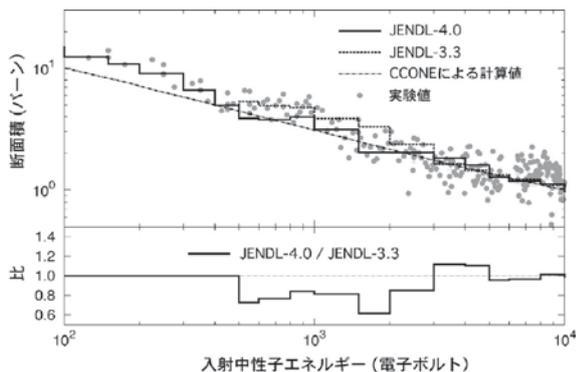
理論計算コードは実験値のない反応およびエネルギー領域では威力を発揮するが, 計算の際には非常に多くの入力パラメータが必要となる。最も重要なパラメータが中性子と原子核の強い相互作用を記述する光学模型パラメータである。チャンネル結合法と呼ばれる変形した原子核(アクチノイドおよび重い FP 核種)をよく記述できる手法により, 入射エネルギー1,000から2億電子ボルト, 質量数が50から240までの原子核に適用できるパラメータセットを求めることに成功した<sup>5)</sup>。第1図に低エネルギーでの中性子核反応断面積の特性を表す s-波中性子強度関数を原子核の質量数の関数としてプロットした。今回得られたパラメータを使った計算は, 実験的に求められた強度関数を大変よく再現しているのがわかる。特に, 質量数150から180の領域は通常使われる球形光学模型パラメータでは全く実験値を再現できないが, われわれのパラメータを用いた計算値は実験値とよく一致している。このように, 非常に信頼度の高い光学模型パラメータを使って数多くの核データを評価した。

## 2. 評価された断面積の具体例

原子力で重要な U-235 の中性子捕獲断面積を第2図に示す。横軸は入射中性子エネルギー, 縦軸は上図がバーン単位( $10^{-24}\text{cm}^2$ )の断面積, 下図が前版 JENDL-3.3に



第1図 s-波 中性子強度関数

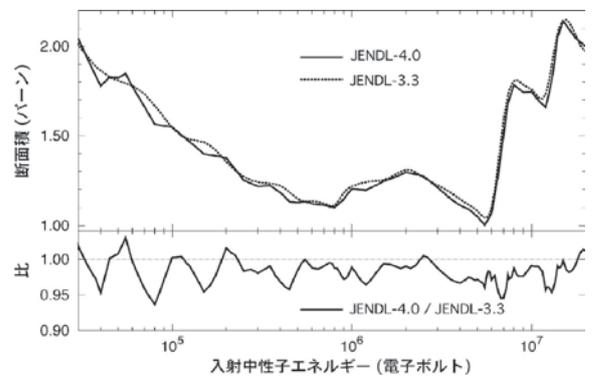


第2図 U-235 の中性子捕獲断面積

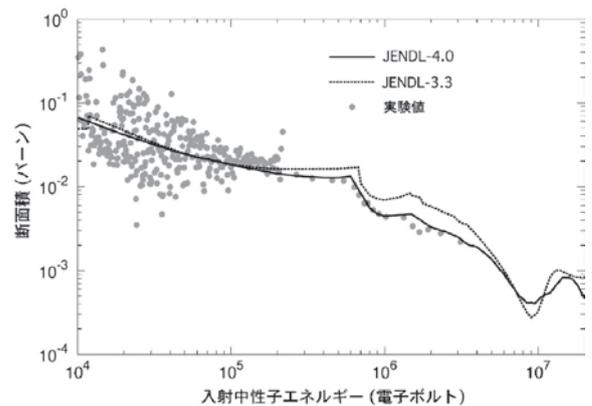
対する JENDL-4.0 の比を示している。JENDL-4.0 の値は数百から数千電子ボルトの範囲で JENDL-3.3 より 20% 程度小さくなった。CCONE コードによる理論計算値も小さめの値を支持している。なお, この断面積の改訂は, 後述されるウラン燃料を用いた高速炉臨界性の予測精度改善に大きな役割を演じた。

ウラン同位体(U-233, 235, 238)およびプルトニウム同位体(Pu-239, 240, 241)の核分裂断面積は応用上非常に重要で, それぞれの同位体の単独の測定値に加え, いろいろな組合せの比(例えば, U-235 に対する Pu-239 の断面積比)の測定がある。これらをすべて考慮することにより, 最小二乗法を用いて上記6核種の核分裂断面積を同時に求めることができる。このいわゆる同時評価の結果求められた U-235 の核分裂断面積を第3図に示す。今回得られた JENDL-4.0 の値は数万電子ボルト以上のエネルギー範囲で前版 JENDL-3.3 より数%小さくなる。

次に, 理論計算を用いた評価の一例として第4図に Se-80 の中性子捕獲断面積を示す。JENDL-4.0 は POD コードの計算値を採用したが, その結果は実験値をよく再現しているのがわかる。最新の原子核物理理論の知見を取り入れた計算は, 評価済み核データの信頼度向上に大きく貢献している。



第3図 U-235 の核分裂断面積

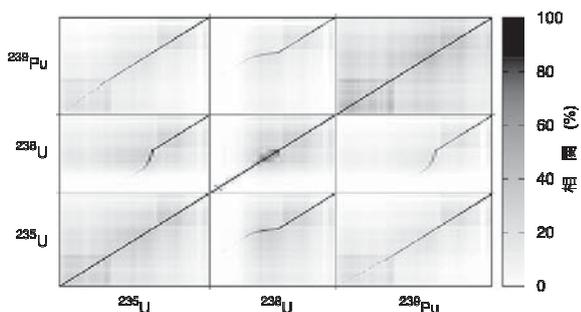


第4図 Se-80 の中性子捕獲断面積

### Ⅲ. 核データの誤差

断面積などの核データにはある真値が存在するが、われわれの現在の知識からはその正確な値はわからず、測定などを通してその値を推定している。核データライブラリーには多数の核種が存在し、様々な反応、広いエネルギー範囲で評価値が一意的に与えられているが、その評価値の確からしさには大きな差がある。この確からしさを表す指標として核データの誤差(共分散)がある。近年、核データの誤差を原子力施設の設計などに積極的に使っていこうとする動きが活発になり、核データの誤差への要望が増加している<sup>6)</sup>。この声に応えるため、JENDL-4.0ではアクチノイド核種に対する共分散データを充実させた。前版 JENDL-3.3公開時点でのアクチノイドに対する共分散はウランおよびプルトニウム同位体の6核種だけであったが、JENDL-4.0では全アクチノイド79核種に対し共分散データを整備した。

核データにはいろいろな種類があり、またエネルギー範囲も広いことから幾つかの手法を組み合わせることで評価がなされる。基本的に共分散の評価は核データの評価手法に沿った方法で行う。例えば、主要核種である U-233, 235, 238, Pu-239, 240, 241 の高速中性子に対する核分裂断面積は、Ⅱ章で述べたように、同時評価により決定した。この方法では断面積の最確値と共分散が同時に得られる。第5図に得られた共分散の相関行列の一部を示す。核分裂断面積は中性子エネルギーの関数として与えられており、図の縦軸、横軸はエネルギー値を表している。共分散は全体的に正の相関を持つことがわかる。また、異なる核種間でも同一エネルギーで強い正の相関を持つ。核種ごとの相関の違いは評価に使った測定データセットの違いによる。データセットごとに強い相関を持つ系統誤差が存在するため、そのエネルギー範囲に応じた相関が評価値にも反映される。これらの相関は平均化された断面積の誤差を求めるときに大きく影響する。弱い相関の断面積では平均化した断面積の誤差は相対的に減少するが、強い正の相関がある場合、減少が抑えられる。



第5図 ウランとプルトニウム同位体の核分裂断面積共分散の相関行列  
横軸、縦軸は中性子エネルギー。

核分裂断面積と比較し測定データが少ない捕獲断面積などは、核反応モデル計算によって断面積を内外挿することにより評価している。この場合、モデルに含まれるパラメータに対する断面積の感度を使って、測定データの誤差からパラメータの共分散を推定する。得られたパラメータの共分散とそれに対する感度を用いることにより、広いエネルギー範囲の断面積共分散を計算することができる。JENDL-4.0では、パラメータの誤差を推定することによって断面積、弾性散乱角度分布、核分裂スペクトル等の多くの核データの共分散を評価している。

共分散は妥当性の検証が難しく、核データライブラリーごとに値が大きく異なることが頻繁に起こる。核データ共分散の利用はこれから本格化すると考えられるが、多方面からの検証が不可欠である。共分散を良いものにするために、多くのフィードバックを期待する。

### Ⅳ. 核データの信頼性検証

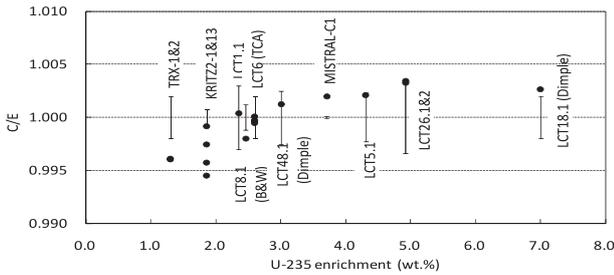
Ⅱ, Ⅲ章で述べられた方法で評価、作成された核データライブラリーは、原子力・放射線施設の臨界・遮蔽等の予測計算に供される。核データライブラリーはこれまでに述べたように微視的な視点から評価されたものであるが、実用にあたってその性能を巨視的な視点から評価することが重要となる。この巨視的な視点からの性能評価は、臨界・遮蔽特性等、積分的な実験データに対する、評価済み核データを用いた計算による実験値の再現性に着目して行われる。このような評価作業は核データライブラリーの積分テストと呼ばれている。

臨界・遮蔽等の実験データはこれまでに世界各国の様々な施設により取得されている。そのうち主に研究機関で取得されたデータは「ベンチマーク実験データ」として公開されている。臨界データを例にとると、OECD/NEA, IAEA が整備している臨界安全ベンチマーク実験ハンドブック<sup>7)</sup>(通称 ICSBEP ハンドブック)には、核燃料の種類(ウラン, プルトニウム燃料), 燃料形態(金属, 酸化物, 水溶液), 中性子エネルギーの観点で異なる3,000を超える臨界データが収録されている。

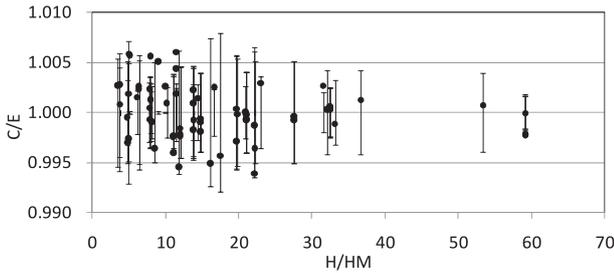
核データライブラリーを用いた臨界・遮蔽等の計算では、系における放射線の振り舞い(放射線輸送)を数値計算で取り扱う。積分実験データを用いて核データの精度を議論するためには、放射線輸送計算に含まれる数値計算誤差を極小化しなければならない。このような計算では、放射線のエネルギーを連続的に扱い、かつ系の幾何形状をほぼ厳密に扱うことができるモンテカルロ法を主に利用する。ただし、モンテカルロ法の統計誤差上の問題が排除できないような特性に対しては決定論的な手法を用いる。

以下に代表的な積分実験データに対する JENDL-4.0 を用いた解析結果を示す。

第6図にウラン酸化物燃料と水減速材で構成される体



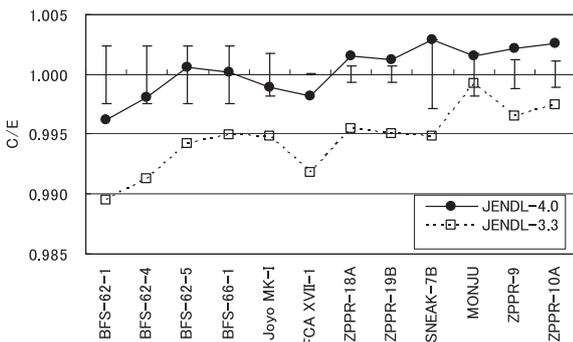
第6図 ウラン酸化燃料と水減速材で構成される体系の臨界性に対する解析結果



第7図 MOX燃料と水減速材で構成される体系の臨界性に対する解析結果

系, 第7図にウラン・プルトニウム混合酸化燃料(MOX燃料)と水減速材で構成される体系の臨界特性に対する解析結果を示す。これらの実験データは軽水炉の臨界特性を模擬したものと考えてよい。図の横軸は, 第6図ではウラン燃料中のU-235濃縮度(%)に, 第7図では水素とウラン, プルトニウムといった重核種の原子数比(H/HM)に, それぞれ対応する。また, 縦軸はC/E値, すなわち計算値と実験値の比に対応し, 誤差棒は実験値の誤差を示す(以下の図も同様)。これらの図より, ウラン燃料系, MOX燃料系ともに, 幅広いU-235濃縮度やH/HMの範囲で実験値を0.5%以内で再現できており, JENDL-4.0の軽水炉臨界データに対する予測精度が高いことがわかる。

次に, 第8図に高速中性子系の臨界データに対する解析結果を示す。これらのデータはナトリウム冷却高速炉の実験炉, もしくはそれを模擬した臨界実験装置で取得されたものである。これらデータは核分裂に対するPu-239の寄与が少ない順に並んでおり, 左端のBFS-62-1

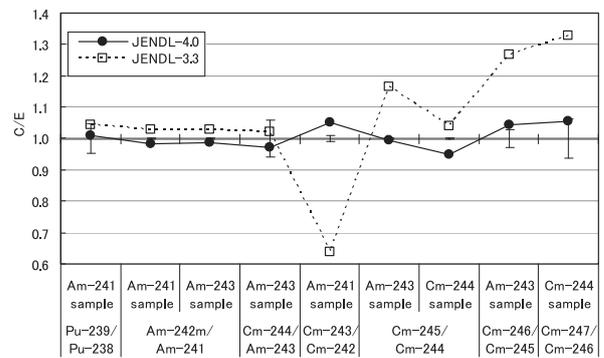


第8図 高速中性子系の臨界性に対する解析結果

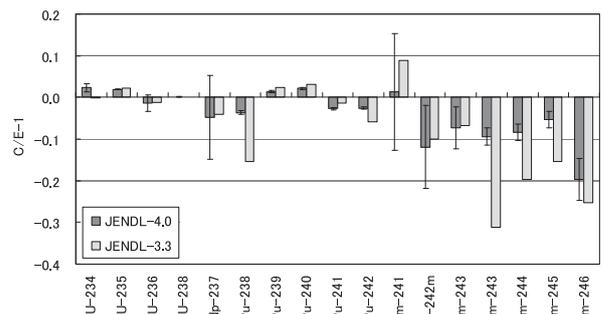
はウラン燃料のみが用いられた体系である。JENDLの前の版であるJENDL-3.3では, Pu-239の寄与が小さくなるにつれて計算値は過小評価となるが, JENDL-4.0ではそういった問題は改善され, すべての実験データについて0.5%以内で実験値を再現していることがわかる。

JENDL-4.0では, 以上で述べた典型的な軽水炉, 高速炉体系のみならず, MAやガドリニウムが混入した体系, ベリリウム, 銅, 鉄等が中性子反射材もしくは燃料の希釈材として用いられた体系の臨界データについても, 良好に実験値を再現することを確認している。また, 高速炉の冷却材ボイド反応度やドップラー反応度といった反応度特性, 中性子反応率の体系内空間分布, 原子炉の運転に伴う燃料組成の変化についての実験値の再現性も良好である。例として, 第9, 10図に, 加圧水型軽水炉の高浜3号炉および高速炉の「常陽」で取得された原子炉運転後の燃料組成データについての計算結果を示す。両者ともJENDL-4.0の実験値再現性が向上し, 特にMA核種で顕著である。

以上に示したように, JENDL-4.0は軽水炉・高速炉の臨界特性をはじめとした種々の特性を良好に再現する。これは, JENDLとともに世界3大核データライブラリとして並んで称されている米国のENDFや欧州のJEFFの最新版と比較しても全く遜色なく, むしろそれらを凌駕しているといっても過言ではない。また, ここでは核分裂炉の特性に焦点を絞って記述したが, 核融合炉の遮蔽特性等においても同様の傾向であることがわ



第9図 運転後の燃料組成データに対する解析結果(高浜3号炉)



第10図 運転後の燃料組成データに対する解析結果(常陽)

かっている。

JENDL-4.0を原子力施設の臨界・遮蔽といった種々の計算に利用することにより、より信頼性の高い施設的设计、運用が可能となる。我が国の核データ研究の総力を尽くして開発されたJENDL-4.0の幅広い利用を期待してやまない。

## V. JENDL-4.0の入手

JENDL-4.0のパッケージは以下の構成となっている。すなわち、中性子サブライブラリー406核種、核分裂収率サブライブラリー(中性子誘起核分裂31核種、自発核分裂9核種)、熱中性子散乱則サブライブラリー15核種、光子-原子サブライブラリー100元素、電子-原子サブライブラリー100元素。いずれのデータも日本原子力研究開発機構核データ評価研究グループの公開Webサーバーから(URLは[http://www.ndc.jaea.go.jp/index\\_j.html](http://www.ndc.jaea.go.jp/index_j.html))ダウンロード可能である。上記のサーバーからは数値以外にも、断面積の図および熱中性子断面積値などの表も閲覧できる。現在、数値データおよび図・表を納めたDVDを希望者に配布している。また、JENDL-4.0ベースの炉定数ライブラリー(SRAC, MCNP, MVP用など)も順次作成し、配布している。

## VI. おわりに

原子力開発のための基盤データベースとしてJENDL-4.0を開発した。JENDL-4.0の中性子サブライブラリーは水素からフェルミウムまでの406核種のデータを収納しており、前版JENDL-3.3の337核種を大きく上回った。また、核発熱の計算に必要なガンマ線データ、高エネルギー中性子輸送計算のためのスペクトルデータ、そして不確かさを示す誤差データが充実した。質の面でも、IV章の信頼性検証からわかるようにJENDL-4.0は前版JENDL-3.3に勝っている。したがって、いろいろな分野でデータが使われることを期待している。使用経験をフィードバックして頂き、更なるデータの改良に活かしたい。

冒頭述べたように、JENDLの開発は1970年代に始まった。米国はENDF、欧州はJEFFと呼ばれる同様のデータベースを持ち、定期的に改良を続けている。JENDL, ENDF, JEFFはお互いに技術的な情報交換は行いが、競争して質の向上を目指してきた。これからも、この構図は変わらない。国際競争によりデータの質の向上が図られ、それは最終的にはユーザーの利益につながる。評価済み核データライブラリーの整備は地道な仕事ではあるが、原子力を支えるこの重要なデータベースの改良を今後も続けていかなければならない。

最後に、JENDL-4.0の開発に携わった多くの研究者に対して感謝を申し上げたい。

## —参考資料—

- 1) K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, *et al.*, "JENDL-4.0: A new library for nuclear science and engineering," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 印刷中.
- 2) G. Chiba, K. Okumura, K. Sugino, *et al.*, "JENDL-4.0 benchmarking for fission reactor applications," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 印刷中.
- 3) O. Iwamoto, "Development of a comprehensive code for nuclear data evaluation, CCONE, and validation using neutron-induced cross sections for uranium isotopes," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**[5], 687(2007).
- 4) A. Ichihara, *et al.*, *Program POD; A Computer Code to Calculate Cross Sections for Neutron-Induced Nuclear Reactions*, JAEA-Data/Code 2007-012, (2007).
- 5) S. Kunieda, *et al.*, "Coupled-channels optical model analyses of nucleon-induced reactions for medium and heavy nuclei in the energy region from 1 keV to 200 MeV," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**[6], 838(2007).
- 6) M. Salvatores(coordinator), *Uncertainty and Target Accuracy Assessment for Innovative Systems Using Recent Covariance Data Evaluations*, International Evaluation Co-operation, Vol. 26, OECD/NEA No. 6410, (2008).
- 7) NEA Nuclear Science Committee, *International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiment*, NEA/NSC/DOC(95)03, (2009).

## 著者紹介

柴田 恵一(しばた・けいいち)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)核データ評価, 原子核物理

岩本 修(いわもと・おさむ)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)核データ評価, 原子核物理

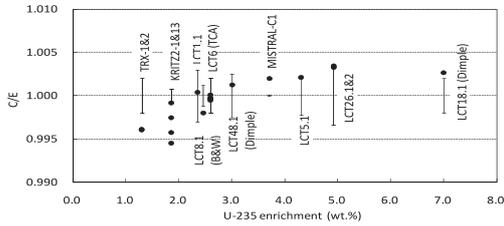
千葉 豪(ちば・ごう)



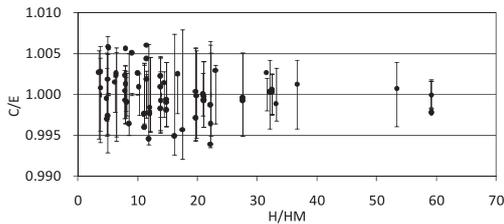
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)原子炉物理

804

解説(柴田, 他)



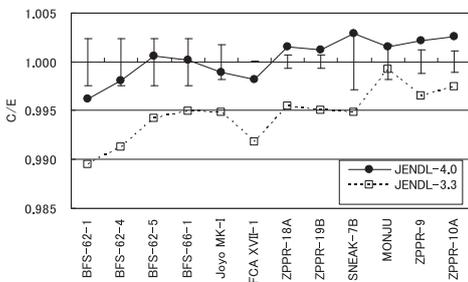
第6図 ウラン酸化物燃料と水減速材で構成される体系の臨界性に対する解析結果



第7図 MOX燃料と水減速材で構成される体系の臨界性に対する解析結果

系, 第7図にウラン・プルトニウム混合酸化物燃料(MOX燃料)と水減速材で構成される体系の臨界特性に対する解析結果を示す。これらの実験データは軽水炉の臨界特性を模擬したものと考えてよい。図の横軸は, 第6図ではウラン燃料中のU-235濃度(%)に, 第7図では水素とウラン, プルトニウムといった重核種の原子数比(H/HM)に, それぞれ対応する。また, 縦軸はC/E値, すなわち計算値と実験値の比に対応し, 誤差棒は実験値の誤差を示す(以下の図も同様)。これらの図より, ウラン燃料系, MOX燃料系ともに, 幅広いU-235濃度やH/HMの範囲で実験値を0.5%以内で再現できており, JENDL-4.0の軽水炉臨界データに対する予測精度が高いことがわかる。

次に, 第8図に高速中性子系の臨界データに対する解析結果を示す。これらのデータはナトリウム冷却高速炉の実験炉, もしくはそれを模擬した臨界実験装置で取得されたものである。これらデータは核分裂に対するPu-239の寄与が少ない順に並んでおり, 左端のBFS-62-1

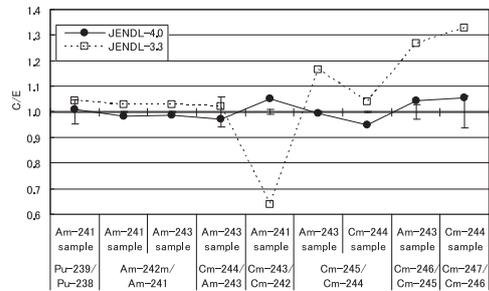


第8図 高速中性子系の臨界性に対する解析結果

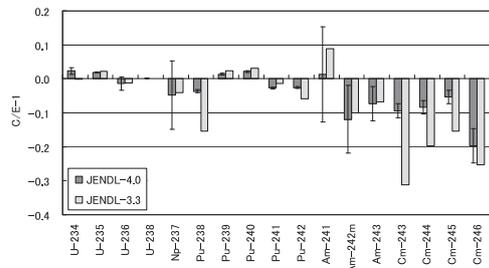
はウラン燃料のみが用いられた体系である。JENDLの前の版であるJENDL-3.3では, Pu-239の寄与が小さくなるにつれて計算値は過小評価となるが, JENDL-4.0ではそういった問題は改善され, すべての実験データについて0.5%以内で実験値を再現していることがわかる。

JENDL-4.0では, 以上で述べた典型的な軽水炉, 高速炉体系のみならず, MAやガドリニウムが混入した体系, ベリリウム, 銅, 鉄等が中性子反射材もしくは燃料の希釈材として用いられた体系の臨界データについても, 良好に実験値を再現することを確認している。また, 高速炉の冷却材ボイド反応度やドップラー反応度といった反応度特性, 中性子反応率の体系内空間分布, 原子炉の運転に伴う燃料組成の変化についての実験値の再現性も良好である。例として, 第9, 10図に, 加圧水型軽水炉の高浜3号炉および高速炉の「常陽」で取得された原子炉運転後の燃料組成データについての計算結果を示す。両者ともJENDL-4.0の実験値再現性が向上し, 特にMA核種で顕著である。

以上に示したように, JENDL-4.0は軽水炉・高速炉の臨界特性をはじめとした種々の特性を良好に再現する。これは, JENDLとともに世界3大核データライブラリーとして並んで称されている米国のENDFや欧州のJEFFの最新版と比較しても全く遜色なく, むしろそれらを凌駕しているといっても過言ではない。また, ここでは核分裂炉の特性に焦点を絞って記述したが, 核融合炉の遮蔽特性等においても同様の傾向であることがわ



第9図 運転後の燃料組成データに対する解析結果(高浜3号炉)



第10図 運転後の燃料組成データに対する解析結果(常陽)

# 原子力機器材料への技術的挑戦と国際展開

## 日本製鋼所の製造技術の変遷と今後の取組み

(株)日本製鋼所 佐藤 育男

日本製鋼所は1907年、天然の良港を持つ北海道室蘭市で、主に砲身と防弾鋼板を国産化する民間最大の兵器会社として創業を開始した。終戦後、これら製造技術が原子力機器用材料等の製造へ受け継がれた。1970年以降、一貫して原子力発電機器の構造健全性向上を目的に大型・一体化鍛鋼品の製造技術開発を継続してきた。現在、室蘭製作所では原子力カルネッサンスを迎え、世界最大の600トン鋼塊から第三世代炉と呼ばれる各種原子炉圧力容器部材の製造が盛んに行われている。

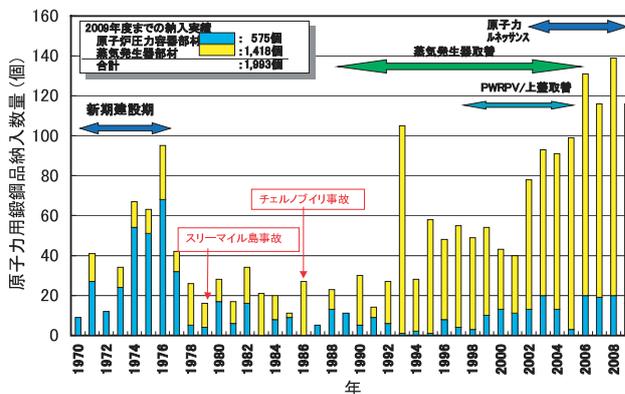
### I. まえがき

日本初の商用炉となった日本原子力発電(株)の東海1号コールドターホール型原子炉の建設にあたって、最重要部材である圧力容器用鋼板が英国から輸入された。しかし、日本での受入れ検査で「割れ状欠陥」が検出され全数廃却となった。これに代わって品質的に全く問題ない鋼板を1961年に納入したのが、日本製鋼所(以下、JSW)であり、JSWにとって初の商業炉用原子力材料の取組みであった。この製造実績は、2010年日本原子力学会原子力歴史構築賞を受賞している。その後、原子力発電所の大型化に伴い鋼板ばかりでなく、多くの鍛鋼品を世界各国に納入してきた。第1図に、原子炉圧力容器(RPV)および蒸気発生器(SG)用鍛鋼品の製造実績をその年度の出荷部材数で示すが、2009年度末で約2,000個にも及ぶ。

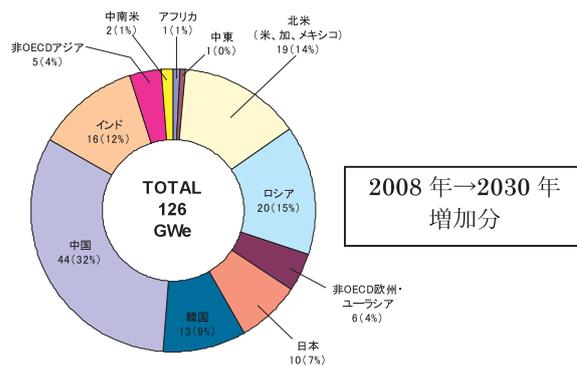
原子力発電は、世界の主要国で地球温暖化対策やエネルギー安全保障の確保の観点から多くの建設計画が発表され、2030年までに2008年対比で126 GWeの増加が予想されている。(第2図参照)

昨今、「なぜ、JSWは原子力用大型鍛鋼品の製造を継続できたのか?」という問いが多くある。

その問いに答えるべく、本稿ではJSWが取り組んできた製造技術開発の変遷、品質保証体制の構築、開発製品の一部を紹介し、今後増えると予想される新規原発への製造能力の向上と今後の国際展開について述べる。



第1図 RPV および SG 用鍛鋼品の製造実績



出典：国際戦略検討小委員会(第1~5回)資料をベースにて編集

第2図 国・地域別の原子力発電設備容量 (DOE/EIA(2008)の見通し)

### II. 世界の原子力発電所の建設推移

第3図に世界の原子力発電所の建設推移を運転開始時期と発電所数で示す。1970~80年代新規原発建設が米国、欧州、日本で積極的に展開された。原子力発電所の需要が伸び、大型化する中、従来の溶接を多用した構造

*The Technical Challenge for Materials used for Nuclear Steam Supply System Component and the International Evolution; The History of Manufacturing Technology in JSW and the Future Approach* : Ikuo SATO.

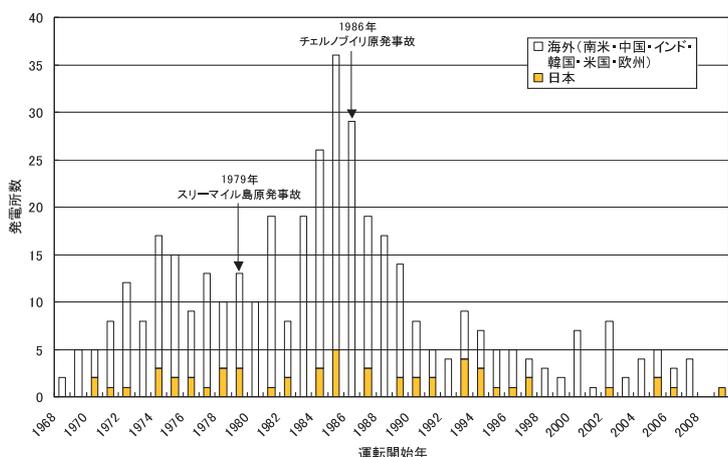
(2010年 8月6日 受理)

から信頼性向上のために大型・一体型鍛鋼品を使用したという要求が欧州ユーザーからあり、鍛鋼品の開発を進めてきた。しかし、1979年の米国スリーマイル島、86年の旧ソ連チェルノブイルでの大事故を受け、世界は「脱原発」へと進み新規建設は激減した。1990年代から開始されたSG取替え工事では、JSW 開発の一体型鍛鋼品が採用されることになった。その後、PWRPV用上蓋の取替えあるいは発電機、タービン等の取替え工事などの需要に答える製品開発を行い供給してきた。一方、第4図に示すように、原子力発電所の単基出力は約40年の間に急速に巨大化し、現在、BWRではESBWRが150万kWまたPWRではEPR(欧州型PWR)が160万kWまでに達している。単基出力の増大、建設工期短縮および供用期間中検査(ISI)の削減という点から、大型化、長大化、一体化および鍛鋼化への材料開発を進めてきた。

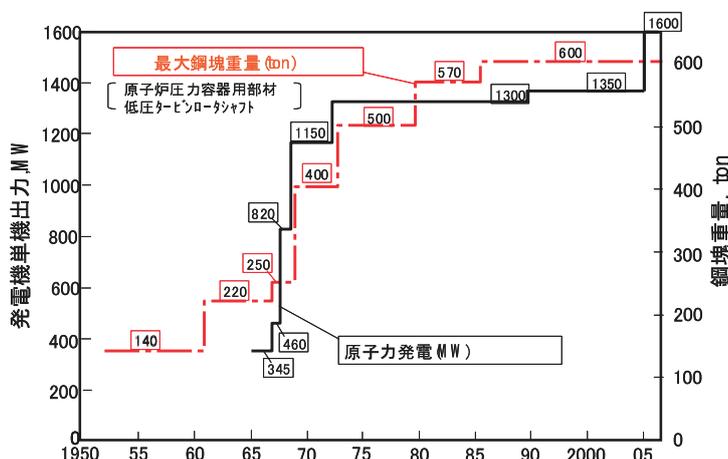
### Ⅲ. 製造技術開発の変遷

#### 1. 材料

初期設計容器の多くは、いわゆる炭素鋼あるいは軟鋼を通常焼きならし、焼戻し条件にて製造していた。材料は、年月を経てMn-Mo-Ni系低合金鋼を焼入れ、焼戻



第3図 世界の原子力発電所実績



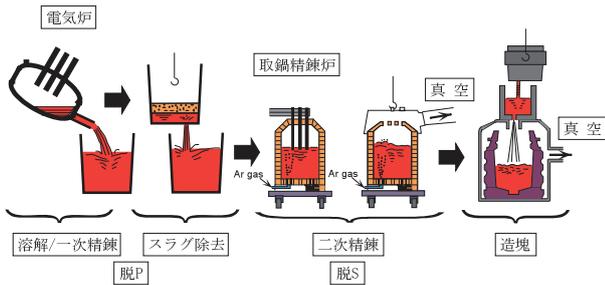
第4図 原子力発電所の単基出力と鋼塊サイズの推移

した中強度鋼へと変わってきた。特に、より古い容器はSA212, Gr.B(C-Si鋼)またはSA302, Gr.B(Mn-Mo鋼)の板材で製造されている。それ以降の容器は、SA533, Gr.B, Cl.1(Mn-Mo-Ni鋼)の板材またはSA508, Cl.2(Ni-Cr-Mo鋼)の鍛造材で製造されている。

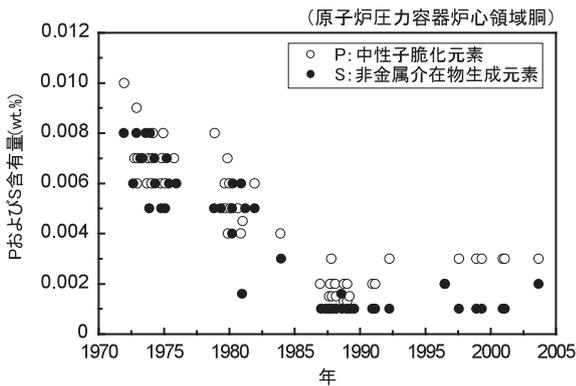
1970年に欧州で圧力容器のステンレス鋼クラディングの補修中にアンダークラッドクラッキングが発見され、直ちにその工業的解決法の一つとして材料面からはNi-Cr-Mo系鍛鋼をMn-Mo-Ni系鍛鋼に変更(耐アンダークラッドクラッキング性の向上), また炉心領域に使用されていたMn-Mo-Ni系鋼板をMn-Mo-Ni系鍛鋼に変更(縦溶接継手の削除による構造健全性の向上)することがスウェーデンとドイツで実施され、JSW製の材料が使用された。その後、これらの変更は世界中に展開され、日本でもNi-Cr-Mo系鍛鋼からMn-Mo-Ni系鍛鋼への変更が九州電力(株)の玄海2号より、また炉心領域におけるMn-Mo-Ni系鋼板からMn-Mo-Ni系鍛鋼への変更が敦賀2号より実現した。

#### 2. 製鋼

鋼塊内の偏析や空隙の生成は、大型化によって凝固速度が遅くなるほど顕著になる。したがって高品質の大型鍛鋼品の製造には、不純物元素、非金属介在物などを低減するとともに、偏析、空隙などの生成を抑制した健全な鋼塊の製造技術の確立が重要である。また、製造時、供用中の欠陥生成、材質劣化の原因となる水素(H)および酸素(O)などのガス成分、硫黄(S), リン(P), 銅(Cu)などの不純物元素の低減もまた重要となる。製鋼の技術開発と鋼塊サイズの変遷の中で特筆すべきことは、1980年の取鍋精錬技術の開発である。第5図に、取鍋精錬を適用した鋼塊の製造プロセスを示す。電気炉で酸化精錬された鋼は、リレードル(鍋の移し替え)による完全なスラグ除去を経て、取鍋精錬炉に移され、還元精錬される。従来、電気炉のみで実施されていた酸化、還元精錬では、酸化精錬時に低P化した溶鋼は、次の還元精錬にて復Pするため極低P溶鋼(0.005質量%以下)の製造は困難であった。取鍋精錬技術の開発により、酸化・還元精錬を電気炉と取鍋精錬炉に分業可能となり極低P, S化が実現できた。第6図にP, S含有量の推移を示す。さらに取鍋内でアルゴンによる攪拌と真空処理によって脱ガスが行われ、真空中で流滴脱ガス処理を経て造塊される二重脱ガス法が適用可能となり、H, O成分のさらなる低減につながった。また中性子照射脆化感受性に著しい影響を及ぼすCuは精錬除去ができないため、不純物Cu量の少ない原材料を使用することで対応した。現在、最大600トンの鋼塊を全



第5図 取鍋精錬を適用した鋼塊の製造プロセス



第6図 リン(P), 硫黄(S)含有量の推移



第7図 600トン鋼塊の外観

湯取鍋精錬により製造することが可能となり、これが原子炉压力容器用大型・一体化部材の開発を成功させている。第7図に600トン鋼塊の外観を示す。

### 3. 鍛 錬

鍛造リングは通常、鍛造プレスの機内で製造する。この方法ではプレス柱間寸法以上のリングは製造できない。RPV 部材の一部はプレス機内での鍛造が困難な形状にまで大型化したため、プレス機外で鍛造を行う装置が1970年に開発された。第8図に、プレス機内・機外の鍛造状況を示す。プレス機外での鍛造では、鍛鋼品はプレス機外に設置した回転ローラー上にセットされる。開発された鍛造装置はプレス内に設置され、プレスの鉛直方向の押圧力を装置内の油圧により水平方向押圧力に変換し金敷を水平方向に作動させる。金敷と固定芯金間の鍛鋼品は、この作動により肉厚が減少し、その体積は周方向に伸ばされることにより鍛鋼品の径は拡がることに



第8図 プレス機内・機外鍛錬状況

なる。この機外リング鍛造法の開発が最大約10 m 外径までの鍛造リングの製造を可能にした。

また、一体型鍛鋼品を製作するニアネットシェープの鍛造技術も数多く開発された。SG用コニカル胴の鍛造は、コニカル状の芯金と金敷による改良芯金鍛造法を開発し、上下に短い円筒胴付きのコニカル胴の製造を可能にした。第9図に、その鍛造状況を示す。また、第10図に示すSG用ノズル付きヘッドの鍛造は、上型が雌型にセットされた材料のヘッド内面部に位置する部位に「押し込み-回転-押し込み」を何度も繰り返す回転押し型鍛造法により実現できた。V章に述べられているフランジ一体型クロージャークローヘッドの製造をも可能にした。さらに、沸騰水型軽水炉用压力容器用部材である広角一体型ボトムヘッドは、大型鍛造円板を鍛造プレスにて熱間曲げ成形して製造される。しかし、プレス柱間よりも大きな円板の鍛造および成形となるため、プレス機外鍛造技術および機外熱間成形技術が開発された。これは、プレスに機外張り出しビームを取り付け、プレスの鉛直方向の押圧力を分圧させてプレス機外で鍛造あるいは成形する方法である。第11図に、熱間成形状況を示す。

## IV. 品質保証体制

このような製品開発と同時に、原子力製品の製造には不可欠な品質保証プログラムの構築も行った。1972年に



第9図 コニカル胴の鍛錬状況



第10図 ノズル付きヘッドの鍛錬状況



第11図 BWR広角一体型ボトムヘッドの熱間成形状況

はドイツ規格(TUEV)の認定を取得, 1974年にはアメリカ規格(ASME)の認定を国内で初めて取得し現在まで更新している。また, 1985年からはフランス規格(RCCM)の品証プログラムも確立した。品質保証活動の要点は「識別管理」と「追跡性」である。これらは, 製品のみならず, その製品を製造するための計画段階から出荷までの全工程にわたって必要とされる各種の書類(仕様書, 作業記録, 品質記録など), 機器類, そしてこれらの業務に携わる人にも及ぶ。品質保証体制・要員維持のためには, 一定の事業規模が必要となるが, JSW は輸出可能な国を探し事業を続けてきた。

## V. 開発製品

### 1. 加圧水型軽水炉用原子炉圧力容器(PWRPV)

第12図に, 鍛鋼材を使用した新型 RPV/SG の部材レイアウトを鋼板成形品が使用されていた旧型との比較で示す。原子力用鍛鋼品として敦賀 1号機向け鍛鋼フランジを1969年に初めて製造した。1972年にはⅢ-3節で述べた機外鍛錬法の開発により, 当時の西ドイツ Biblis-B 向けベッセルフランジ(外径5,780 mm, 高さ2,500 mm)を, 400トン鋼塊から製造したのが大型・一体化の始まりである。1982年には, 敦賀 2号機向けとして燃料炉心領域に溶接線を完全になくすべく, 長尺鍛造シェル(長さ4,300 mm)を開発製造した。照射脆化感受性の高い溶接部を高照射領域から外すことにより照射劣化を低減することが可能となった。第13図に長尺鍛鋼シェルの完成外観を示す。1994年には, 従来, 鋼板成形品の鏡板と鍛鋼フランジの継手溶接品であったクロージャーヘッドを, 溶接継手を削減したフランジ一体型クロージャーヘッド(第14図)として開発した。米国での取替えでは, その約9割でJSW製部材が使用されている。

第三世代炉であるEPR, AP-1000, APWRにも超大



第13図 長尺シェルの完成状況



第14図 フランジ一体型クロージャーヘッドの完成状況



第15図 EPR/ノズルシェルの完成状況

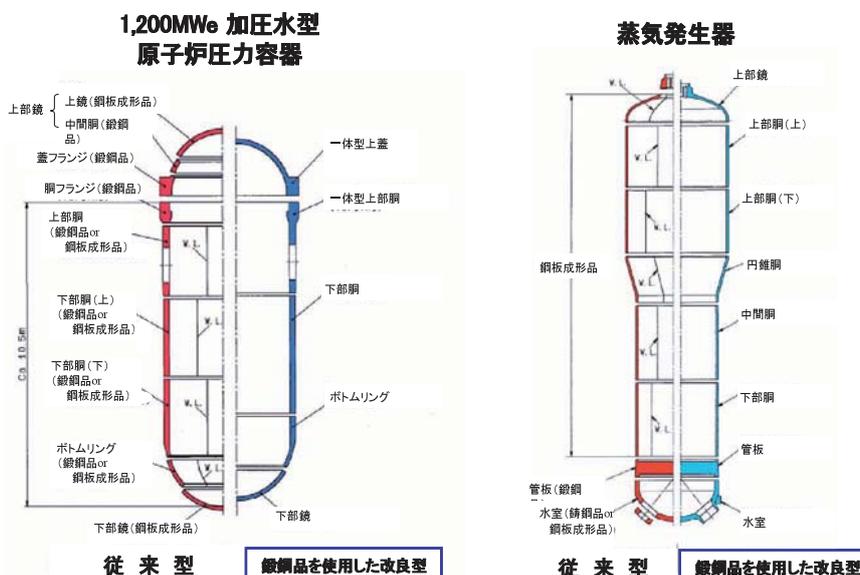


第16図 AP-1000/アッパーシェルの完成状況

型鋼塊(600トン, 350トン)から製造される一体型鍛鋼品が採用されている。第15図に, 600トン鋼塊から製造されたEPR/ノズルシェルを示す。また, 第16図には, AP-1000/アッパーシェルを示す。

### 2. 沸騰水型軽水炉用原子炉圧力容器(BWRPV)

1979年に新成形法の開発により制御棒駆動域に溶接線のない広角一体型ボトムヘッドを製造し, 国内110万kW級BWR用RPVに初めて採用された。第三世代炉であるESBWRにも広角一体型ボトムヘッド(第17図)が採用されている。1991年には世界初の改良型BWR(ABWR)である柏崎・刈羽6号機, 7号機向けに600トン鋼塊から製造した10個のノズルを内外に一体化した下



第12図 新型 RPV/SG の部材レイアウト



第17図 ESBWR/ボトム  
ヘッドの完成状況



第18図 ABWR/下部鏡板  
リングの完成状況

部鏡板リング(第18図)を納入した。

## Ⅵ. 製造能力の向上

### 1. 設備増強, プロセス開発

初の原子力材料の取組みから40数年が経った今、これまで築き上げてきた製造技術と品質保証プログラムを基盤としてJSWでは既に「原子力カルネッサンス」が始まっている。第三世代炉と呼ばれるEPR, AP1000, APWR, APR1400, ABWR, ESBWRおよび中国標準炉であるCPR1000の各部材が数多く製造中であり、今後も継続生産する予定である。これら改良型炉および第三世代炉のRPVおよびSGなどの耐圧容器は大型化しており、使用される部材も鍛鋼品が主流でかつ大型化、一体型化が採用されている。同時に、発電プラントの増加に伴い大型低圧タービンローターシャフトおよび発電機ローターシャフトの需要増加も予想される。世界最大クラスの600トン鋼塊に代表される超大型鋼塊および200~250トンクラス的大型鋼塊から製造される鍛鋼品の製造能力向上が急務となっている。この課題に答えるべく、2008年から2011年完成を目指して大型鍛鋼品の能力を増強する大型設備投資を進めている。2010年3月には、2基目となる14,000トン鍛造プレスの稼動も開始した。大型熱処理炉、大型機械加工装置等の増設、工場建屋工事もスケジュール通りに進んでいる。

また、2009年度経済産業省の戦略的原子力技術利用高度化推進事業に採択され、650トン鋼塊の製造にも着手している。今年度は650トン鋼塊を切断調査し、来年度にはローターシャフトの試作品を造り内部調査をも行う。この調査結果は、日本の鉄鋼材料学の貴重なデータになると考えている。

### 2. 技術・技能伝承と人材の育成

「ものづくり」を支える人材についても、この3年前から中途採用中心に増強を進めており、技術技能伝承の特別プログラムも実施している。室蘭製作所では、「はがね塾」を今年4月から発足した。技術伝承と同時に横のつながりを強くして、ものづくりの厳しさや喜びを感じる場としたい。

## Ⅶ. 今後の展望

原子力発電も第三世代へと進むなかで更なる安全性の追求と供用期間増加を目指した炉が計画されている。また、第四世代として高温ガス炉、高速増殖炉、核融合炉の開発も進められつつある。このような状況の中、高品質な大型化、一体化鍛鋼品の需要はますます増加すると思われる。材料メーカーの役割として以下の項目を精力的に推進し、ものづくりの基盤を構築したい。

- (1) 技術・技能の伝承
  - ・ものづくりへの「こだわり」と「よろこび」
  - ・技術 No.1の追求
  - ・人材の育成対応
  - ・製造実績のさらなる蓄積
- (2) 品質保証システムの維持, 向上
  - ・製品品質の確保
  - ・海外規格への取組み
- (3) 開発・改善の促進
  - ・材料開発(高靱性化, 高強度化)
  - ・新型炉, 次世代炉への対応

平成21年版原子力白書(平成22年3月)、第1章に「諸外国においても原子力発電への関心が高まっていますので、我が国の産業がこれまでに培った高い技術、豊富な経験に裏打ちされた原子力発電プラント等を海外に輸出することに力を尽くすことにより、地球規模の温室効果ガスの排出量削減に貢献しつつ、我が国の経済成長に対しても貢献することができます。」と記載されている。

JSWも材料メーカーとして国内外の原発に健全な材料を供給したいが、規制のためにそれができないこともある。例えば、原子力協定がなく大型原子炉の建設に必要な材料を供給できない国もある。平和利用、核不拡散の担保、安全の確保および核セキュリティの担保を大前提に、2国間および多国間、国際機関を通じた国際協力の強力な推進を切に望み結びとしたい。

### —参考資料—

- 1) 佐藤育男, “原子力機器材料の開発の歩みと今後の展望—室蘭から世界へ”, 日本原子力学会誌, 49[3], 184(2007).
- 2) 佐藤育男, “原子力機器材料の歩みとルネッサンスへの対応強化”, 日本原子力学会誌, 51[5], 362(2009).

### 著者紹介

佐藤育男(さとう・いくお)



(株)日本製鋼所 代表取締役社長  
北海道大学工学部原子工学科卒業後、(株)日本製鋼所へ入社。一貫して原子炉压力容器材料の性能向上および压力容器部材の一体鍛鋼化に関わる技術開発に取組み、数多くの業績を残す。

# 炭素14環境中移行に関する研究の現状

## 食物を介しての人と原子力の接点

名古屋大学大学院工学研究科 山澤 弘実

僅かではあるが再処理施設や原子炉から放出される放射性核種の中で、炭素14が最も線量寄与が大きいことは、意外と知られていない事実である。環境中に放出された炭素14が我々に与える影響を合理的に評価するためには、環境中物質の中で最もダイナミックな炭素の循環に紛れ込んだ炭素14の動態把握が必要である。これまでのFP核種の環境移行研究とは異なる炭素14固有の特徴を踏まえて、研究の現状を述べる。

### I. なぜ炭素14なのか

#### 1. 原子力と炭素14

本稿では、原子力関連施設を起源とする炭素14の環境中移行と被ばく影響評価についての主に我が国の研究の現状を概観する。

炭素14は、半減期が5,730年で最大エネルギー0.156 MeVの $\beta^-$ 壊変核種である。UNSCEAR 2000レポート<sup>1)</sup>では、原子力発電所および使用済み燃料再処理施設周辺での集団実効線量への寄与が、放射性希ガス、<sup>131</sup>Iやその他の核種によるものが1970年台以降、大幅に減少してきたのに対して、炭素14によるものはほとんど変化しておらず、放出核種の中では最大であるとされている。「なぜ炭素14が研究対象なのか」の問いに対しては、上記の理由に加えて、以下に示す炭素14特有の事情が存在する。特に、炭素14は天然にも存在する核種であり、生体を構成する元素として食物摂取を経て内部被ばく源となり、加えて環境中では極めて動的であることが特徴である。これらの特徴が、これまでの原子力分野での環境中核種移行研究で主対象であった<sup>90</sup>Sr、<sup>137</sup>Cs等の核分裂生成核種(以下、FP核種と呼ぶ)と大きく異なる点であり、その差異自体の大きさを含めて我々の知見は発展途上である。

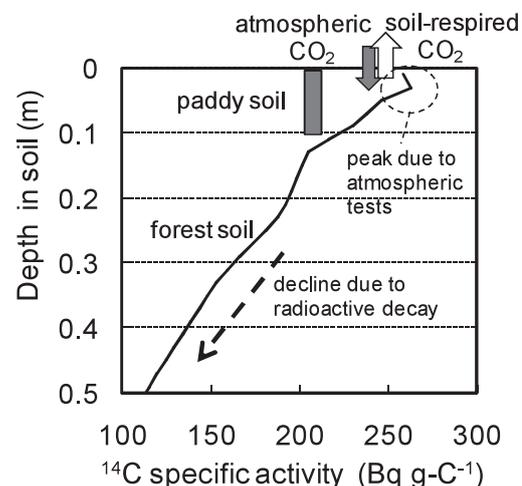
これらの背景により、当学会の保健物理・環境科学部会は、「炭素14環境中移行研究連絡会」を設置し、放射線医学総合研究所(以下、放医研)や京都大学原子炉実験所(以下、京大炉)等と共同で研究集会を開いてきた。環境科学技術研究所(以下、環境研)はこれらに先立ち、2007年に炭素14の環境中移行に関する国際会議を開催した<sup>2)</sup>。本稿は、京大炉が2009年11月に開催した「炭素14の

環境中移行挙動評価」専門研究会<sup>3)</sup>での議論に基づくものであることをここに明記し、研究会での議論からの引用については記述の簡略化のために、報告書内の個々の論文を参照しない形とする。次章の本論を理解していただくための序論として、本章では上記の環境中炭素14の特殊事情を、同報告書の内容も多少含めてもう少し述べることにする。

#### 2. 環境中の炭素14レベル

現在の大気中CO<sub>2</sub>の比放射能、すなわち試料中の単位炭素質量当たりの炭素14のベクレル数を測定すると、約0.24 Bq(g-C)<sup>-1</sup>の値が得られる<sup>4)</sup>。このほとんどは、2次宇宙線の中性子と大気中の窒素元素の(*n, p*)反応により生成したもので、炭素14の半減期が大気中の混合の時間スケールに比べて十分長いことから、対流圏では地球全体でほぼ均一に存在する。

一方、環境中の動的な炭素の大きなリザーバである森林土壌中の有機態炭素では少し事情が異なる。未攪乱森林土壌中有機物の炭素14比放射能は、第1図に示すよう



第1図 環境中の炭素14比放射能

*Present Status of Studies on Carbon-14 Migration in Environment* : Hiromi YAMAZAWA.

(2010年 6月20日 受理)

に、表層数十 cm から 1 m 程度までの範囲では大まかに地表近くで大気中とほぼ同じ値を持ち、深さとともに減少する分布を持つ<sup>4)</sup>。深さ方向に減少する勾配からは、炭素14の半減期を考え合わせると、表層土壤中に存在する有機炭素の移行は大気中とは対照的にかなり長い時間スケールの現象であることを示しているように見える。しかし、後述するように、この特徴は複雑な土壤中での炭素移行の一面のみを映し出したもので、実はもっとダイナミックである。

地表から 10 cm 程度までの範囲で深さ分布を測定すると、数 cm の深さに大気中の比放射能より 10~20% 程度高いピークがみられることが多い(第 1 図)。これは、1960 年代の初めまでに行われた大気圏核実験により大気中に放出された炭素14(bomb-carbon)の痕跡であり、1960 年台中ごろには大気中比放射能は宇宙線起源のバックグラウンドを 2 倍近くまで高めたと評価されている<sup>5)</sup>。この核実験の痕跡は、核実験起源炭素14がこの50年の間に他の炭素リザーバへ移行し、希釈されたことによって不明瞭になりつつある。森林土壌からは、落葉等により土壌に付加される有機炭素量とほぼ釣り合う量の二酸化炭素が土壌呼吸として放出されており、その比放射能は大気中二酸化炭素に比べて幾分高い。

このように、炭素14は原子力施設起源の人工放射性核種としての側面を持ちながら、実は既に環境中に広く存在する天然放射性核種なのである。したがって、施設起源炭素14の影響を論じる際には、この天然成分や核実験起源炭素14の存在量との相対的な大きさ関係も判断の一つの目安となる。

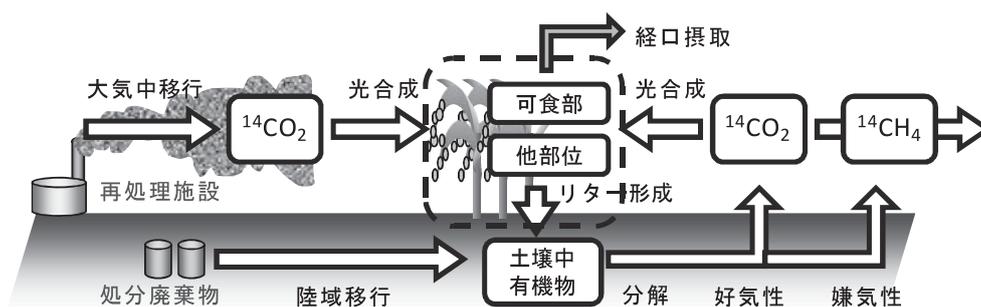
### 3. 環境中移行

施設起源炭素14の影響評価の観点から、環境中炭素移行を単純化すると第 2 図に示す形でまとめられる。被ばく評価の観点では農作物の可食部中の炭素14濃度が主要な評価対象であり、環境影響の観点では大気中濃度、植物中濃度および土壌中濃度が主要な評価対象である。農作物からの経口摂取経路では、家畜の飼料を経て畜産物として摂取される経路も考慮に入れる必要がある。炭素14は低エネルギーの  $\beta$  核種のため、外部被ばくは考慮する必要はない。

これに対して、寄与源は再処理施設を主とする原子力施設と処分廃棄物である。再処理施設からの大気放出は、主に二酸化炭素の化学形である。放出後の大気中の移行は、大気拡散によってのみ決定されるため、この部分についての我々が現在持っている知見と評価手段は高いレベルにある。農作物や地表面への移行では、光合成による植物への取り込みが主要な過程となる。そのため、僅かには降水等に溶解して溶存無機炭素として移行するものの、これまでの FP 核種に適用してきた比較的単純な沈着の考え方は適用できない。したがって、農作物への取り込み以降の過程については、施設寄与により大気中濃度が上昇した時の植物の「都合」で決まってしまうことになる。この「都合」には、時間オーダーの短期的なものとして植物生理の変動(光合成速度の日変化等)や、週や月オーダーの中期的なものとして成長段階により可食部への炭素固定量が異なることなどが含まれる。

土壌中への炭素14の移行は、主に植物枯死体(リター)として起こる。したがって、ここでも水田での稲ワラの鋤き込みや灌水・落水のような農耕地の土壌管理面での人間の「都合」が移行に関与する。土壌中の有機物は、数週間から数十年あるいはそれ以上の多様な時間スケールで分解し、土壌呼吸二酸化炭素として大気に戻る。この際、水を張った水田のような土壌に酸素が十分に供給されない嫌気性条件下ではメタンの生成が卓越し、土壌が直接空気に曝される好気性条件下とはその後の移行を含めて異なる様態となる。

以上のように、炭素14の環境中移行の把握は、「都合」と表記した移行に関与する過程の多様性と個々の過程の複雑さに難しさがある。原子力施設の影響評価は、影響の大きい経路について典型的なシナリオを設定して行うことになり、「 $^{14}\text{CO}_2$ 大気中放出-水田(米)」や「 $^{14}\text{CO}_2$ 大気中放出-飼料作物-家畜」はその代表例である。一方、処分廃棄物には、主に燃料や構造材に含まれる安定窒素の放射化によって生じた様々な化学形の炭素14が含まれており、それがどのように(どのような化学形、移行経路で)地表面環境に達し、上述の炭素循環に取り込まれるかについての知見は不十分で、評価のためのシナリオ設定も難しい。



第 2 図 環境中炭素14移行の模式図

## II. 研究の範囲とアプローチ

### 1. 研究対象

前述の、専門研究会での研究発表と議論の対象を大枠でとらえると、①再処理施設ホット試験に伴う放出および環境中濃度の実態把握、②環境試料中炭素14測定法の開発・高度化、③水田を中心とする地表面環境中移行動態解明、④動物への取り込み機構解明、⑤地中(天然バリア中)の移行動態解明、⑥環境中移行評価モデル開発であった。さらに、⑦炭素14を環境トレーサとして利用する研究についても議論された。専門研究会の範囲で、これら研究の実施機関を第1表にまとめる。

この表には現在行われている研究がすべて含まれてはいないが、環境の多様性・複雑さを考えると、十分な体制からは程遠い。例えば、ここでは「環境中移行動態」と1項目としてまとめてあるが、実際は重要な移行経路である水田-イネ系と、人の行為が加わらない自然界の代表として森林(地球温暖化の観点からの炭素循環の視点を含む)が対象となっているだけで、その他の農耕地についてはいたって手薄である。また、水田-イネ系対象の研究は比較的進んでいるが、土壌を介する過程はまだ十分でない。

誌面の関係ですべてを網羅することはできないが、以下では、主に水田-イネ系の研究を例にとり、その焦点を見ることにする。

### 2. 放出・環境の実態調査

炭素14の放出実態は、施設設置者によって常時モニタされ、定期的に公表されている。環境中の炭素14濃度についても、空気、海産物、農作物、その他の植生、土壌等について、施設設置者、地方公共団体(およびその委託を受けた研究機関)等により計画的に測定されている。これらの測定は、施設の影響が安全審査等で想定された範囲内であることを確認することが目的で、その目的に応じて測定対象試料の種類、地点数および頻度が決められている。しかし、炭素14の環境中移行は、後述するように時間的・空間的に極めて非均一な現象であるた

第1表 研究対象と実施機関

対象	実施機関
①放出・環境実態	日本原燃, 環境研
②測定法	日本原子力研究開発機構
③環境中移行動態	環境研, 放医研, 原子力機構, 名古屋大学
④動物への取り込み	環境研
⑤地中移行動態	日本原燃
⑥評価モデル	京都大学, 名古屋大学, 環境研
⑦環境トレーサ利用	原子力機構, 名古屋大学

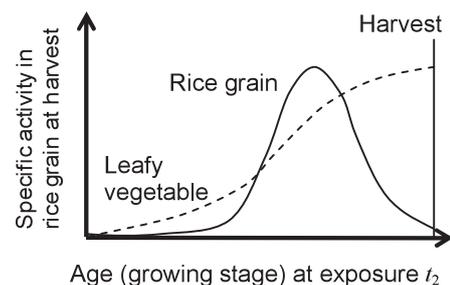
め、移行動態解明の研究目的からは測定内容や頻度は明らかに不十分である。したがって、幾つかの代表地点については、このようなルーチン測定と相補的に、より詳細な野外測定が研究機関あるいは大学等により実施されることが望まれる。

### 3. コメへの移行

最終的な評価対象はコメの経口摂取による内部被ばく線量であるため、収穫時のコメ中炭素14濃度が必要となる。これまでの農学分野の研究により、イネを根、茎葉、穂等の部位に分けてそれぞれの炭素量の成長に伴う経時変化は把握されている。しかし、これらの知見はコメ中炭素14濃度の評価には残念ながら不十分である。なぜなら、第3図に模式的に示すように、 $^{14}\text{CO}_2$ を含む空気への曝露時期により、コメ中濃度が大きく異なるからである。この図は、環境研の測定結果<sup>9)</sup>等を基にした模式図で、コメの場合は、葉菜類とは異なり、出穂後の一定期間での曝露が収穫時にコメ中の高濃度を引き起こすことを示している。このことは、単に収穫時の炭素の帳尻だけが問題ではなく、部位間での炭素の移動量(正味ではなくグロスの移動量)を成長段階ごとに把握することが必要であることを意味する。

しかし、このような情報を実際の測定から得るのは困難であるため、実験上は、光合成をとおしてパルス的に炭素同位体を付加し、イネの各部位(特に穂あるいは種子)のある時期( $t_1$ )の炭素量の内訳を、取り込んだ時期( $t_2$ )の関数 $f(t_1, t_2)$ として求めることが現実的な方法となる。すなわち、パルスの炭素付加に対する対象植物中炭素量(特に収穫時)の応答関数を求める形の実験である。

この観点から、環境研で行われている戦略的な研究は特筆される。室内の大型栽培装置内で二酸化炭素濃度を含む環境条件のコントロール下でイネを栽培し、成長段階ごとに $^{14}\text{CO}_2$ の代わりにトレーサとして既知濃度の $^{13}\text{CO}_2$ を含む雰囲気中に曝露し、さらに成長段階ごとにイネを収穫して部位ごとの乾燥重量を測定するとともに、稲刈りに相当する時期に各部位の炭素同位体比を求める実験を行っている。この実験では、上記関数をすべて評価することはできないが、各 $t_1$ ごとに $f(t_1, t_2)$ を $t_2$



第3図 収穫時の農作物可食部中濃度の曝露時期依存性の模式図

について生育開始から $t_1$ まで積分した値(成長曲線), および収穫時期での関数の値 $f$ (収穫時,  $t_2$ )が求められる。このような実験は, 専用の装置と長期の実験期間を必要とすることから, 短期に多くの成果を得ることはできないが, イネやその他の作物について有益で興味深いデータが得られつつあり, 今後の研究の進展が期待される。

#### 4. 土壌への蓄積

土壌中の炭素14は, 地表面から付加されるリターに由来する土壌有機物中の炭素14が多くを占める。付加されるリターは, 分解性(短期間で分解されるかあるいは長期間分解されずに残留するかの特徴)が異なる無数の種類の有機物で構成される。したがって, 付加されるリターの分解性ごとの内訳を知ることが理想的ではあるが, 実際そのような情報を得るのは, 有機物分解に影響を与える環境因子が1, 2個ではないことを考え合せると, かなり大変であることは容易に想像できる。さらに, 土壌中の有機物は, 付加された時点での特徴を保持したまま残留するのではなく, 例えば, 土壌粒子との結合により分解作用(ほとんどは微生物による栄養としての消費)が効きにくくなる物理的防御等といった化学的・物理的な変質を経る。

これらの過程に対して, 現時点では大きく分けて2つのアプローチが採られている。一つは, 特定の化学形の炭素14有機物について地表面環境での移行動態およびそのメカニズムを, 実験室系において詳細に解明しようとする方向である。放医研では, 放射化金属に含まれる炭素14は主に低分子有機態であることに着目し, 土壌-土壌溶液系に炭素13あるいは炭素14で標識した酢酸を加えて, その後の移行挙動を追跡する実験を行っている。これらの結果からは, 液相中に加えられた炭素14は1日のオーダーで極めて速く気相と固相に移行し, その後, 緩慢に固相から気相への移行が起こることや, その移行に微生物が関与していることの直接的な証拠等のメカニズムに踏み込んだ知見が得られつつある。

もう一つのアプローチは, 野外の実環境中での移行を直接測定しようとする方向である。環境研では, 炭素14の代替トレーサとして炭素13で標識した稲ワラを栽培し, 農業廃棄物の有効利用法として推奨されている方法を模倣して水田にその稲ワラを鋤き込むことで, 水田土壌中での分解・残留を追跡している(第4図)。さらに, 通常の稲ワラを鋤き込んだ区画, 鋤き込みなしの対照区画を設け, 同時に土壌からのCO<sub>2</sub>放出量を測定する等, 炭素14の土壌蓄積評価に必要な情報を直接得ることができる総合的な観測実験となっている。今後, メタン放出の測定や炭素13標識土壌有機物の追跡により, 施設起源炭素14の農耕土壌への土壌蓄積評価が可能となることが期待される。

これらのほかに, 農耕地土壌を実験室で培養し, 生成



第4図 炭素13標識稲ワラの鋤き込み実験の様子  
数個見られる透明容器は, 蓄積法による土壌呼吸測定のための装置。(写真提供: 環境研の永井勝氏)

される二酸化炭素やメタンの量および同位体比を測定することにより, 土壌有機物の分解特性とその環境因子依存性を調べる研究(名大等)も行われている。いずれについても, 単一の研究において得られる知見は, 土壌有機物変質・分解の広い時間スペクトルの中の限られた一部分についてのものであり, 今後も複数の機関で異なるアプローチによる研究が進められることが望まれる。

#### 5. モデル化

炭素14の環境影響評価においては, 地表面を大気, 土壌, 農作物等に分割して, 部位での炭素14濃度を予測するコンパートメントモデルが開発されてきた(環境研, 放医研, 京大, 名大等)。農作物を茎葉部, 可食部等に細分化したり, 植物中の炭素の可動性に着目して, 無機炭素, 易動性有機炭素, 難動性有機炭素に分類してモデル化する等の様々な工夫がなされており, 第3図に示したような収穫時の炭素14濃度の曝露時期依存性などのイネ特有の特徴は, 「かなり良く」とまではいえないまでも, おおむね再現できる。特に京大のモデルは, 大気や土壌中の炭素をその移動性に応じて分割し, さらに灌漑水を介する移行を考慮する等により, 種々の汚染シナリオに適用できる包括的なモデルである。名大のモデルでは, 大気拡散を考慮して大気中濃度を動的に計算する等の工夫が加えられており, 炭素移行の時間・空間的な非均一性が反映できる。非均一性を考慮しない現在の影響評価は, 多くの場合かなり保守的(安全側)であることが, このモデルから示される。

しかし, より良い再現性を求めて現状以上のモデルの詳細化を行うことは, 実験的に得べき情報への要求が過度に大きくなるため, 必ずしも良い方向とはいえない。この点で, 環境研のアプローチは, 研究資源の制約の範囲内で得べきモデルの詳細さをあらかじめ定めた上で, それに必要な実験を前節までに述べたように戦略

的に行っている点が筆者には印象的である。

### Ⅲ. おわりに

専門研究会では、ここで述べた研究以外に、加速器質量分析計を用いた分析手法の高度化(原子力機構)、炭素13標識による家畜や人への炭素取り込み動態の研究(環境研)、炭素14をトレーサとした温暖化や海洋循環に係る炭素循環の研究(原子力機構、名大)等の多岐にわたるトピックスも議論されたが、誌面の関係で割愛した。

炭素14環境中移行研究の現状は、あえて誤解を恐れずに一言で表せば、「大気放出—水田—イネ系についてある程度合理的な評価が可能となった段階」である。しかし、他の農耕地—作物系、長期にわたる土壌中の蓄積、処分廃棄物から地表面環境への移行等、重要ではあるが手薄な対象も多く残されている。

原子力分野での環境中炭素14の課題は、喫緊・最優先ではないとしても、施設からの集団線量への最大寄与源となる炭素14の環境動態を十分把握し予測できることは、原子力の社会受容性を高める上で不可欠なことであると筆者は考える。また、その他の一般環境の研究への波及効果も小さくない。研究者個人の使命感でようやく維持されている我が国の研究の現状では、同様の食習慣と農業形態を持つ韓国、中国での研究の進展を考えれば、これから10年程度の短期間でも、我が国の研究レベルのアジアにおける優位性を保つことは困難であることは明らかで、危機感を禁じえない。ここ数年、この研究分野の研究者が一堂に会する機会が継続的に持たれたことにより、共通の認識に立ったより戦略的な研究ができる土台ができつつあることがせめてもの光明である。

### —参考資料—

- 1) UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, Vol.1, p.186-189(2000).
- 2) Y. Tako, T. Tani, R. Arai, S. Nozoe, Y. Nakamura, ed., *Proc. Int. Symp. on Application of a Closed Experimental System to Modeling of  $^{14}\text{C}$  Transfer in the Environment*, Rokkasho, Aomori, Nov.15-16, 2007, (2007).
- 3) 高橋千太郎, 山澤弘実, 高橋知之(編), 炭素14の環境中移行挙動評価, KURRI-KR-153, (2010).
- 4) W. Liu, J. Moriizumi, H. Yamazawa, T. Iida, "Depth profiles of radiocarbon and carbon isotopic compositions of organic matter and  $\text{CO}_2$  in a forest soil", *J. Environ. Radioact.*, **90**, 210-223(2006).
- 5) UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, p.119-120(1977).
- 6) T. Tani, Y. Tako, M. Endo, "Estimation of  $^{13}\text{C}$  in Grains of Rice Plant Exposed to Temporal Changes in  $^{13}\text{C}$  abundance in Atmospheric  $\text{CO}_2$  during its Growing Period", *Proc. Int. Symp. Application of a Closed Experimental System to Modeling of  $^{14}\text{C}$  Transfer in the Environment*, Rokkasho, Aomori, Nov.15-16, 2007, p.21-27(2007).

### 著者紹介

山澤弘実(やまざわ・ひろみ)



名古屋大学

(専門分野/関心分野)放射性物質の環境動態, 原子力環境安全



## 核不拡散のための「核実験禁止アジア地域ネットワーク」

東京大学大学院 GCOE プログラム 篠原 伸夫, 一政 祐行, 小鍛治 理紗  
国際保障学研究会

東京大学大学院 GCOE プログラムの国際保障学研究会では、「核兵器のない世界」の実現をめざすためには、すべての核実験を禁止するという包括的核実験禁止条約(CTBT)の理念をアジア地域に定着させることこそ、地域安全保障環境の安定化につながる一方策であると考え、アジア地域の核軍縮・核不拡散を念頭に置いた「核実験禁止アジア地域ネットワーク」の構築を議論し、提案をまとめた。

### I. はじめに

包括的核実験禁止条約(CTBT)とは、宇宙空間、大気圏内、水中および地下といったあらゆる環境における核兵器の実験的爆発をすべて禁じ、核兵器の拡散／高度化を防止する条約である。日本は外交を通して、CTBTの早期発効のための努力を継続している<sup>1)</sup>。米国オバマ大統領の2009年4月5日プラハでの演説では、平和で安全な「核兵器のない世界」に向けた方途を追求すること、特に米国のCTBT批准を目指すことを明確に宣言したことから、CTBT早期発効に向けた動きが加速されることが期待されている。2010年5月の核兵器不拡散条約(NPT)運用検討会議でも、最終文書には「CTBTの早期批准を約束」と「条約発効までの間、核実験および核兵器開発のモラトリアムを維持」の文言が含まれており、その進捗も期待される。

東京大学大学院 GCOE プログラム(GoNERI)では、核不拡散に係る議論・研究を原子力界でより広く推進することを目的に、原子力産業、電力、原子力関係研究所、大学などのメンバーからなる「国際保障学研究会」を2008年10月に設置した。その活動の一環として、「CTBTに関する核不拡散対策」を一つの研究課題としている。すべての核実験を禁止するというCTBTの理念を定着させることこそ、世界各国の関心が高く、しかも様々な問題を抱えるアジア地域の安定に繋がる一方策である。同研究会では、大きく変化している国際状況を踏まえて、CTBTを取り巻く問題点を抽出するとともに、アジア地域の核兵器に係る安全保障問題も念頭に置いた、核実験監視データを取り扱う「核実験禁止アジア地域ネットワーク」の構築を議論した。本報告ではその内容を紹介する。

### II. 条約(CTBT)の概要

核兵器の開発を行うためには、核実験の実施が必要であり、核実験を禁止することは核軍縮・不拡散を推進する上で極めて重要である。CTBTは、条約遵守を検証するため、①国際監視制度(IMS)、②協議および説明、③現地査察(OSI)および④信頼の醸成についての措置からなる検証制度を定めている。IMSの地震波、放射性核種、水中音波、微気圧振動に関する測定結果はウィーンの国際データセンター(IDC)に送られ、そこから各国のCTBT国内データセンター(NDC)へ配信され、核実験が実施されたか否かを監視する仕組みであり、現在、その整備が進められている<sup>2)</sup>。

### III. CTBTの課題

#### 1. CTBTは条約未発効

CTBT付属書2にある特定44カ国の発効要件国の一部が批准していないため、CTBTは現在もまだ発効していない。CTBTの署名国が182カ国に達し、批准国が153カ国という現状(2010年6月現在)においては、各国の核実験禁止のモラトリアムの状況は存在するが、正式にCTBTが発効するまでは、条約の法的義務は発生しない。IMSで疑わしい状況が発見されたとしても、OSIを要請することはできず、その状況を受けて国際連合の注意を喚起すること、あわせて国際連合憲章の規定による紛争解決、国際司法裁判所への付託などを行うことができない。

#### 2. 核実験検知能力

北朝鮮は2009年5月25日、「地下核実験を成功裏に実施した」と発表した。しかし、核実験の証拠となる有意な放射性希ガスは検知されず、地震波観測データから人工爆発があり、その規模は前回の数倍程度、震源は前回と誤差範囲内で一致した事実のみが確認されている。

1996年のCTBT署名開放から10数年経過しているために、当時は最新の技術を駆使して作り上げられたIMSに関して、日々進歩している技術を新たに監視制度の枠

Asia Nuclear-Test-Ban Network for Nuclear Non-Proliferation: Nobuo SHINOHARA, Sukeyuki ICHIMASA, Lisa KOKAJI.

(2010年6月24日 受理)

組みに取り入れる必要がある。しかし、条約未発効のゆえに、条文を修正できないというジレンマがある。

#### Ⅳ. 「核実験禁止アジア地域ネットワーク」構想

国際保障学研究会における検討結果として、(1)CTBTは、具体的かつ独自の技術的・政策的アプローチのもとに条約の発効促進と普遍化を追求すべきであること、(2)CTBTは、最終的に締約国が検証・査察に責任を有するとの原理原則に基づき、より多くの締約国による核実験の早期探知・検証能力の技術的水準の向上が求められるため、いまだ十分な技術的知見のない国に対する外部からの支援が必要であること、(3)CTBTは、原子力カルネッサンスと呼ばれる今日の国際政治環境において、核燃料サイクル普及と核不拡散を両立させるために必要な地政学的戦略の一環として、特に原子力導入意欲の高いアジア地域における将来的な核軍縮・核不拡散効果が期待できることが確認された。

さらに国際保障学研究会では、CTBTが抱える課題を解決する方策として、アジア地域の安全保障を確立するための取組みとして、CTBT発効促進・検証制度の国際的な強化を主たる目的とし、アジア地域固有の特性を配慮した、日本主導の「核実験禁止アジア地域ネットワーク」(以下では「アジア・ネットワーク」という)を提案することとした。本構想の基本は、アジア地域諸国が核実験行為を行わないよう、地域としての相互の検証基盤を整えることと、さらに緩やかなネットワークの構築によって、様々なレベルで各国NDC間での交流を密にし、探知された異常事象に対する各国の解析・判断能力を底上げすることにある。本ネットワーク構想の具体的な内容を以下に述べる。

##### 1. CTBT発効に向けた取組み

「アジア・ネットワーク」構想とは、条約の附属書1に規定される6地域のうち、日本が位置する東南アジア・太平洋および極東地域における各国<sup>a)</sup>との間で緩やかなネットワークを構築することを意図したものである。同構想の推進は、日本などの幹事国が中心となった同地域への批准促進アウトリーチ活動を第1段階とし、将来のCTBT発効後に想定される諸問題に対して域内諸国の

能力を高め、CTBTの地域運用の基幹として有効かつ効率的に機能するための布石でもあり、さらには学術分野との連携も視野に入れた前例のない画期的な取組みである。これが一つの成功例となれば、今後、インドやパキスタンも含む中東および南アジア地域に波及していく可能性もある。

こうした新しい取組みを進めるにあたっては、まず協議のフォーラムとして「アジア・ネットワーク」の設立準備委員会を立ち上げ、各国政府間や有力NDC、各国の研究者など、様々なレベルでネットワーク構築のニーズを協議していくことが重要である。

##### 2. アジア地域の安全保障環境の向上

本ネットワークはNPT上の核兵器国による核兵器の垂直拡散(備蓄核兵器の近代化・拡大)を防止し、新たな核兵器国の出現(水平拡散)を防止するという極めて平等かつ普遍的なツールとなる可能性がある。決して一方的な核実験監視包囲網ではなく、国際公共財としてのCTBT検証制度を援用した公平性の高い、緩やかな非核化促進のツールとしてこそ、「アジア・ネットワーク」が地域の信頼醸成を通じた安全保障環境の向上に寄与する余地は大きい。

##### 3. OSIスタンバイ体制の構築

条約発効後に新たに「アジア・ネットワーク」の機能として期待されるものは、各国NDC間でのOSIスタンバイ(待機)体制の構築である。OSIの成否を分ける基本的事項として、疑わしき事象が探知された後、速やかに査察団を現地展開させ、核実験実施の明確な証拠を得ることが挙げられる。そのため、将来的には査察員や査察機器などを可能な限りスタンバイ状態におくことが望ましい。「アジア・ネットワーク」としてCTBT機関の活動のためにOSI要請に即応し協力できるスタンバイ体制を構築することは、CTBTの検証制度をより有効かつ効率的なものにする上で非常に大きなメリットがある。

##### 4. 国際的枠組みの活用

既存の国際的安全保障の枠組みであるアジア太平洋安全保障協力会議(CSCAP)やアジア欧州会合(ASEM)を活用することも検討すべきである。「アジア・ネットワーク」を通じ、これら国際的枠組みの検討課題として「核兵器のない世界」や「原子力カルネッサンスと核不拡散」を取り上げて協議することは、将来的に同地域の政策担当者にCTBTへの認識を新たにするとともに貴重な機会を与えるものとなる。EUでは、すでにすべての加盟国がCTBTの批准を完了しており、地域機構として見ても、核軍縮・核不拡散への優れたコミットメントで知られている。

さらに、「アジア・ネットワーク」を周知・推進させる方策として、バンコク条約(東南アジア非核兵器地帯条約)、ラロトンガ条約(南太平洋非核兵器地帯条約)、中央アジア非核兵器地帯条約などの非核地帯条約とも積極的に協調・連携すべきである。核軍縮体制を支える柱と

<sup>a)</sup>オーストラリア連邦、ブルネイ・ダルサラーム国、カンボジア王国、中華人民共和国、クック諸島、朝鮮民主主義人民共和国、フィジー諸島共和国、インドネシア共和国、日本国、キリバス共和国、ラオス人民民主共和国、マレーシア、マーシャル諸島共和国、ミクロネシア連邦、モンゴル国、ミャンマー連邦、ナウル共和国、ニュージーランド、ニウエ、パラオ共和国、パプアニューギニア独立国、フィリピン共和国、大韓民国、サモア独立国、シンガポール共和国、ソロモン諸島、タイ王国、トンガ王国、ツバル、バヌアツ共和国およびベトナム社会主義共和国(CTBT附属書1より)。

して、発効促進の側面でNPTと連携していく必要があるのはいうまでもない。国際保障学研究会では、CTBTを巡るアジア地域各国との協力・連携に関して、拡散に対する安全保障構想(PSI)を通じて、あるいは北東アジア非核兵器地帯を早期に設置して地域の安全保障環境の向上を図るべきとの提案もあったことを付記しておく。

### 5. 日本のCTBT国内運用体制強化

CTBTに対する国内の取組みを一層強化するために、既存のCTBT国内運用体制<sup>2)</sup>は将来的に政府指定機関として人的規模を拡大し、研究者集団としての核実験の探知と検証に関する研究・実務の拠点を形成するよう提案する。これには、「アジア・ネットワーク」を推進するうえで、長期的視野に立った専門家・研究者の確保と育成、さらに多国間の専門家会合や、ネットワーク構想の枠組み自体を構築・維持していく必要があり、「アジア・ネットワーク」設立準備委員会や後述するCTBT科学技術研究連絡会運営などの観点からも様々なメリットがある。

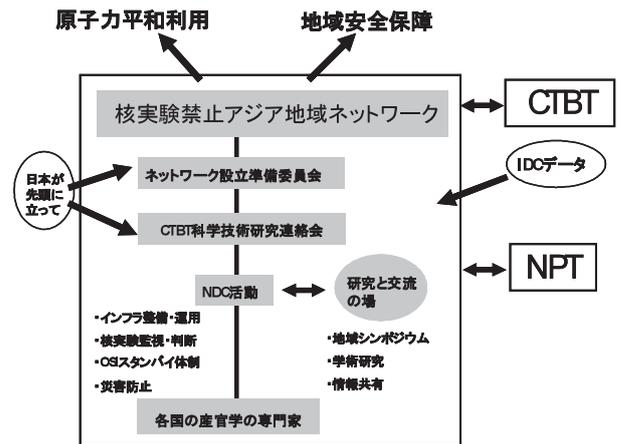
### 6. アジア地域の学術的コミュニティとの連携

本ネットワークは、学術コミュニティとの連携も重要である。そのためには、(1)域内諸国に対するNDCの構築支援などを通じた技術協力を実施する。(2)NDCや研究機関間での検証技術開発や人材育成も視野に入れ、地域協力を促進する。CTBTで蓄積されたIMSデータなどの知見が学術分野で応用されるように努める。さらに、各国NDCがそれぞれ協力関係を結んでいる国内の大学・研究機関で実施している利用可能な環境測定データをアジア地域内で共有して核実験の早期探知および検証の参考情報とすることについて、政府間での協議を開始するよう提案する。

このような国際的な取組みを調整・支援するために「CTBT科学技術研究連絡会」を設置する。さらに、学際的な研究者間交流を促進する目的で、研究・調査活動の成果を発表するための魅力的な研究と交流の場として、定期的な「CTBT地域シンポジウム」を開催するなど、常設の同連絡会事務局を恒常的に運営していくことも、本ネットワークの重層的な目的を達成する上で有効である。以上に述べた「アジア・ネットワーク」構想を総括した体制案の一例を第1図に示す。

## V. おわりに

「アジア・ネットワーク」は、域内すべてのCTBT締約国(署名国)にとって公平かつ緩やかな枠組みであり、核実験の早期探知・検証に関する各国の技術水準の向上と、地域の安全保障環境の向上、そして科学の発展と学術研究・教育の振興に大きく貢献する、極めて互恵主義的なアプローチである。昨今の核兵器廃絶への動きを好機ととらえて、遠くない将来に「アジア・ネットワーク」が芽生え、CTBTを巡る国際社会の取組みが全く新た



第1図 「核実験禁止アジア地域ネットワーク」体制

な段階に入ることを見守り、国際保障学研究会一同、大いに期待したい。

### 国際保障学研究会

主査：田中 知(東京大学大学院)，副主査：久野祐輔(東京大学大学院)，他27名(電力，原子力関連産業，原子力関連研究所，大学などから)の委員で構成。ただし，ここに示した構想は，研究会で示された代表的な意見を集約したものであり，各委員が所属する企業・団体を代表するものではないことを特記しておく。

### —参考文献—

- 1) 外務省，軍縮不拡散・科学部編集，日本の軍縮・不拡散外交(第四版)，2008年3月。
- 2) 外務省ホームページ，<http://www.mofa.go.jp/>

### 著者紹介

篠原伸夫(しのはら・のぶお)



日本原子力研究開発機構・東京大学大学院  
原子力国際専攻  
(専門分野/関心分野)放射化学，核不拡散  
技術，核燃料サイクル

一政祐行(いちまさ・すけゆき)



防衛省防衛研究所  
(専門分野/関心分野)軍備管理・軍縮・不  
拡散，安全保障論

小鍛治理紗(こかじ・りさ)



東京大学大学院原子力国際専攻  
(専門分野/関心分野)核軍縮，核不拡散，  
国際法

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5回 JAEA の熱炉体系炉物理実験

日本原子力研究開発機構 外池 幸太郎

## I. はじめに

旧日本原子力研究所で最初の臨界実験装置の運用が始まってから50年が経とうとしている。第1図に示すように、旧動力炉・核燃料開発事業団も含めて現在の日本原子力研究開発機構(以下、前身の研究機関も含めて単に「JAEA」と略記する)に至るまで、種々の臨界実験装置が炉物理の実験的研究に供されてきた。その歴史は日本の原子力開発の歩みを反映しているといつてよい。

炉開発の観点では、現在でこそ軽水炉が日本の原子力発電を支えているが、開発の草創期から軽水炉が自明な炉型だったわけではない。臨界実験装置を用いて黒鉛炉や重水炉の概念が研究され、熱炉体系による増殖さえ検討されたのである。軽水炉の範疇でも、発電炉の炉心・燃料設計手法の高度化や、船用炉、高転換軽水炉の開発など様々な目的の研究が行われてきた。

臨界安全もまた重要な分野である。炉開発が臨界を達成・維持し、燃料を良く燃やす研究であるのに対して、臨界安全は臨界を防止する研究である。燃料の臨界量を測定した上で、そこからどれだけ減らせば十分に安全に燃料を未臨界で取り扱えるか、という考察が基本である。このため臨界量測定が重要視され、臨界安全と臨界実験は不可分の関係にある。

本稿では、このような臨界実験のうち、JAEA で実施された熱炉体系のものに着目し、過去から現在までの変遷と将来の展望を述べる。まず、最も草創期の装置群とその後の研究の展開について、その後、筆者が従事している臨界安全分野の取り組みを紹介する。この2つの話題の間に時代と内容のギャップが存在するが、読者諸氏には、本連載講座の第2回(臨界安全と未臨界度測定)、

*Experimental Reactor Physics "Past, Present and Future" —Towards Establishment of Safety Basis in Next Generation(5): Status and Outlook of Thermal Reactor Physics Experiments in JAEA : Kotaro TONOIKE.*

(2010年 6月18日 受理)

各回タイトル

第1回 KUCA における炉物理実験

第2回 臨界安全と未臨界度測定

第3回 実機炉心における実験炉物理手法開発

第4回 NCA における臨界実験

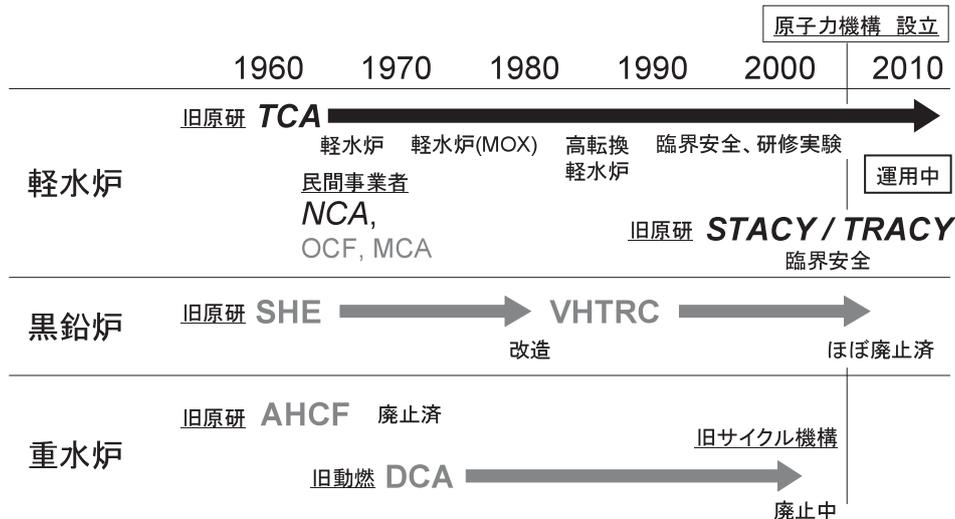
第4回(NCAにおける臨界実験)、第7回(実験と解析の接点)をお読み頂くことで、このギャップをある程度埋めて頂くことが可能である。

## II. 研究・開発の概要

最初の臨界実験装置は半均質臨界実験装置 Semi-Heterogeneous Experiment (SHE) と呼ばれるもので、現在の JAEA 原子力科学研究所に設置された。黒鉛と二酸化ウラン( $^{235}\text{U}$ 濃縮度約20%)を均質に混合した燃料要素を黒鉛シースに収納の上、第2図に示すように、黒鉛ブロック内に配置することにより、均質性と非均質性が共存していた。黒鉛ブロックは固定架台と移動架台の2つに分かれており、移動架台を固定架台に密着させることにより炉心を構成する、いわゆるスプリット・テーブル型である。炉開発のアイデアとしては、黒鉛減速により良好な中性子経済を実現し、増殖の可能性を追求するものであった。冷却材の決定に至らずプロジェクトは中止されたものの、SHE ではほぼすべての炉物理実験手法が実施され、我が国において後続する臨界実験の方法論が確立された点で非常に大きな役割を果たしたといえる。臨界量測定、放射化法による中性子束分布測定、パルス中性子法、炉雑音法などであり、後述する TCA に引き継がれた<sup>1)</sup>。また、装置そのものも後年になって改造され、高温ガス臨界実験装置 Very High Temperature Reactor Critical Assembly (VHTRC) となっている。

ほぼ同時に、同じ建家内に水均質臨界実験装置 Aqueous Homogeneous Experiment (AHE) も整備された。この実験装置は円筒形状の炉心タンクを円環形状のブランケットタンクが取り囲む構造となっており、 $\text{Th-}^{233}\text{U}$  増殖炉の概念研究に用いられた。スラリー状の燃料を用いたことが大きな特徴であるが、逆にスラリーの状態制御が困難なことにより開発は断念された<sup>1)</sup>。

その後、長きにわたって熱炉体系の炉物理研究で中心的な役割を果たしてきた臨界実験装置が、現在も JAEA 原子力科学研究所で運用中の軽水臨界実験装置 Tank-type Critical Assembly (TCA) である。JPDR の運転と並行して、BWR の炉心設計手法の研究に供された。そ



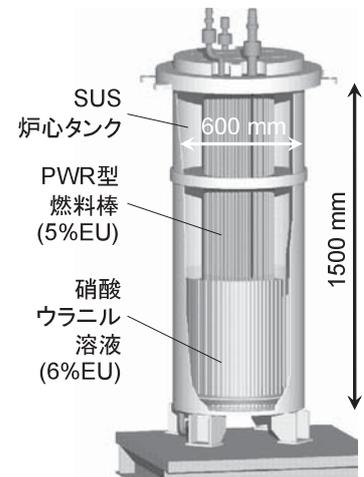
第1図 原子力機構の熱炉体系臨界実験装置の変遷



第2図 半均質臨界実験装置 SHE



第3図 軽水臨界実験装置 TCA



第4図 定常臨界実験装置 STACY

の名のとおり，第3図に示すような開放タンクに燃料棒を配列し，減速・反射材である軽水を給水して炉心を構成する。燃料棒は低濃縮ウラン酸化物のペレットまたは粉末をアルミさや管に収納したものである。過去にはMOXも用いた。その後，船用炉，高転換軽水炉，臨界安全など，研究目的は多岐に展開されてきた。さらには，所外利用にも開放し，教育・訓練のための研修実験や共同研究にも用いられてきた<sup>2)</sup>。

旧動力炉・核燃料開発事業団の大洗研究センターには重水臨界実験装置 D<sub>2</sub>O Critical Assembly (DCA)があった。重水炉の炉心設計手法の研究開発に用いられ，その成果は重水原型炉「ふげん」に結実している。

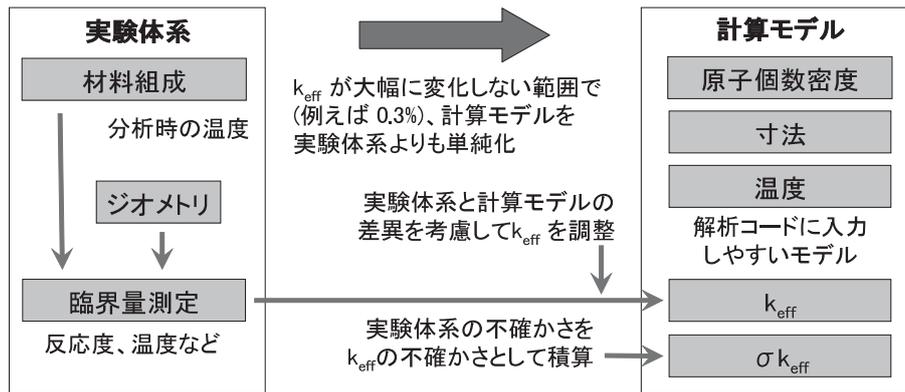
最も後年になって，定常臨界実験装置 Static Critical Experiment Facility (STACY)と過渡臨界実験装置 Transient Critical Experiment Facility (TRACY)が整備された。どちらも JAEA 原子力科学研究所の燃料サイクル安全工学研究施設 Nuclear Fuel Cycle Safety Engineering Research Facility (NUCEF)に設置され，

硝酸ウラニル水溶液 (<sup>235</sup>U 濃縮度<10%)を用いて臨界量測定や臨界事故を模擬した過渡実験を行う装置で，燃料サイクル施設の臨界安全の研究にもっぱら供されてきた<sup>3)</sup>。これらの装置で得られた知見が JCO 臨界事故に際して終息作業や事故調査に役立ったことはまだ記憶に新しい。STACY は硝酸ウラニル水溶液均質体系の実験の後，第4図に示すようにウラン酸化燃料棒と硝酸ウラニル水溶液が共存する非均質体系の実験を実施してきた。これらの実験は再処理施設の溶解工程をはじめとする種々の機器や槽類を模擬したものである。

このように，臨界実験装置の変遷を眺めれば，我が国の炉開発と炉型選択の経緯，さらに燃料サイクルの発展の流れを概観できるといっても過言ではない。

### Ⅲ. 臨界量測定とベンチマーク作成

任意の中性子実効増倍率  $k_{\text{eff}}$  を実験的に測定することは困難だが， $k_{\text{eff}}$  が1である状態，つまり臨界を実現す



第5図 ベンチマークの作成の考え方

ることは容易である。このときの燃料の量を測ることが臨界量測定である。

この体系の計算モデルを作り固有値計算を行い、算出される  $k_{\text{eff}}$  が1と一致するか、どれだけ相違するかの検討を通じて、解析手法の包括的な検証が行える。単一の核データライブラリーと解析コードを組み合わせる様々な臨界体系を解析すると  $k_{\text{eff}}$  の計算結果が1の周りで分布するが、その幅は、20年前には $\pm 5\%$ 以内といわれていたものが現在では $\pm 2\%$ 以内になっている。このような解析技術の進歩に応じて、臨界量測定の信頼性もより高いものが求められるようになってきている。

臨界実験は、小型とはいえ原子炉を用いるものであり、日本のみならず世界各国でも高価なものと考えられるようになってきている。相対的により貴重になった個々の実験結果を各国で共有する国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project (ICSBEP) が経済協力開発機構・原子力機関 (OECD/NEA) で進められている。ICSBEP では、不正確な情報が解析手法検証の妨げになることも認識され、十分な吟味を経た実験結果のみが共有されるように配慮されている<sup>4)</sup>。

筆者は STACY 実験の結果を ICSBEP に登録する作業に従事してきた。実験条件と結果の記述、実験精度の見積り、計算モデルの組み立てと現実の体系との差の見積り、および解析コードによる固有値の試算が主な作業項目で、これらの結果を取めた文書は Evaluation と呼ばれている。

実験条件と結果の記述は要するに臨界実験の詳細な報告である。STACY は溶液燃料を用いているが、換気されている貯槽で溶液燃料を保管している間に水分蒸発によりウラン濃度が濃くなることに注意しなければならない。このため、臨界実験を挟んで複数回のサンプリング・分析を行い、結果を内挿することにより臨界実験時の溶液燃料組成を決定している。

実験条件としての溶液燃料組成や炉心タンクの形状・寸法、結果としての臨界液位など、すべての測定量は不確かさを持つ。この不確かさが結果にどの程度波及する

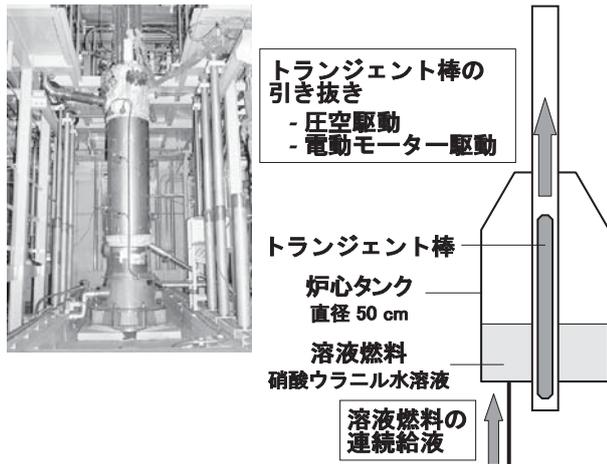
かを明らかにしなければならない。いわゆる感度解析と呼ばれる検討であり、個々の測定量の不確かさの影響を反応度 ( $k_{\text{eff}}$  の変化) に換算して集計する。STACY で達成している測定精度はおおむね  $0.1\% \Delta k$  程度であり、そのうちかなりの部分を溶液燃料組成の不確かさが占めている。このことから上述のサンプリング・分析の適切な実施が重要である。

実験体系を忠実に計算モデル化することも可能ではあるが、不必要に複雑になることを避けるため、また、決定論的手法の解析コードを用いた計算も容易にするため、ある程度単純化した計算モデルを組み立てる。このため、現実と計算モデルの反応度差を明らかにしておくなければならない。STACY の場合、形状や組成の単純化、および溶液燃料の分析作業環境と臨界実験実施環境の温度差が考慮されており、おおむね  $0.3\% \Delta k$  以内に収まることを目安にして計算モデルを作成する。

ICSBEP に採択された Evaluation は、各国の臨界安全関係者によって臨界安全解析システムの検証用に広く利用されている。最近では、より基礎的に核データの改良に用いられることが多くなっている。JAEA でも臨界安全ハンドブック・データ集を改定するにあたって、連続エネルギーモンテカルロコード MVP と核データライブラリー JENDL 3.2 を組み合わせる ICSBEP の Evaluation を用いて検証を行った。臨界体系の  $k_{\text{eff}}$  の計算結果は1の周りに分布したが、0.98を下回ることはないことが確認された。言い換えれば、MVP と JENDL 3.2 で計算して  $k_{\text{eff}}$  が0.98より小さければ、その体系は現実には未臨界であると確信できる。この結果に基づき、様々な組成の核燃料物質について、 $k_{\text{eff}}=0.98$ となる最小質量、最小寸法、最小濃度などを臨界制限値として算出し、整理している<sup>5)</sup>。

#### IV. 過渡臨界事象の観察

TRACY は溶液燃料体系の臨界事故を模擬する装置であり、即発臨界を超えて反応度(最大3\$)を投入できる。第6図に示すように、トランジェント棒と呼ばれる



第6図 過渡臨界実験装置 TRACY の外観と運転方法

制御棒の引き抜きと溶液燃料の連続給液による方法があり、トランジェント棒の引き抜きには、圧縮空気による急速なものや電動モーターによる低速なものがある<sup>3)</sup>。

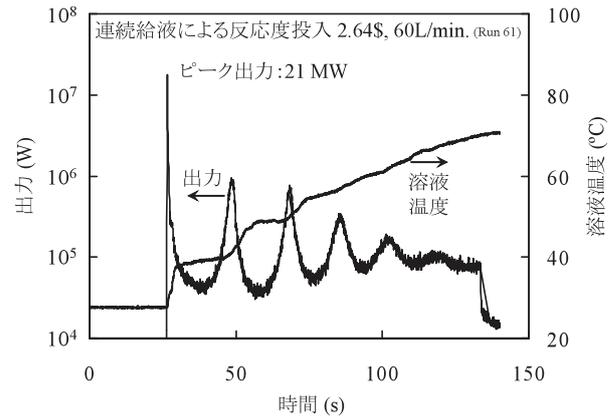
固体燃料を用いた即発臨界を超える小型炉は、金属ウランを用いたものが米国やフランスにある。温度上昇によるドップラー効果や密度低下が起これ、これらの装置は、投入した反応度を打ち消す負のフィードバックの自己制御性を持つ。このためパルス状の急速な出力上昇と下降が観測される。

溶液燃料体系の TRACY の場合、溶液中に放射線分解ガスの気泡が発生し燃料の密度が大幅に変化することにより、さらに大きな負のフィードバックがもたらされる。ここで注意すべきことは溶液中の気泡は動くことで、実際、上昇して溶液から抜けてしまう。気泡だけに着目すれば体系の状態は元に戻ることになり、気泡による負のフィードバックも消失する。投入反応度、気泡のフィードバック、および温度上昇のフィードバックの大きさがあるバランスになると、第7図に示すように、気泡の生成と消滅によるパルス状の出力を繰り返しながら、徐々に温度が上昇し、最終的には温度上昇が投入反応度を打ち消してほぼ定常臨界に落ち着くという経緯をたどる。

遅発臨界を超えて投入する反応度の総量が、これを打ち消すために必要な温度上昇を決めることから、核分裂数の目安となる。ただ温度上昇が沸点を超えると状況は複雑になる。遅発臨界から即発臨界にかけての反応度投入と負フィードバックの速さのバランスも重要で、最初のパルス状出力の大きさを左右する<sup>6)</sup>。

あたかも、TRACY の炉心タンクの中を見てきたかのように説明したが、実際、過渡臨界実験中の溶液燃料の挙動を動画で撮影することに成功している<sup>7)</sup>。

このような議論は動特性解析によって定量化できるが、JAEA では AGNES と呼ばれる臨界事故の動特性解析コードを整備してきており、TRACY 実験の知見によって多くの改良・検証が行われた。



第7図 過渡臨界実験の結果(例)

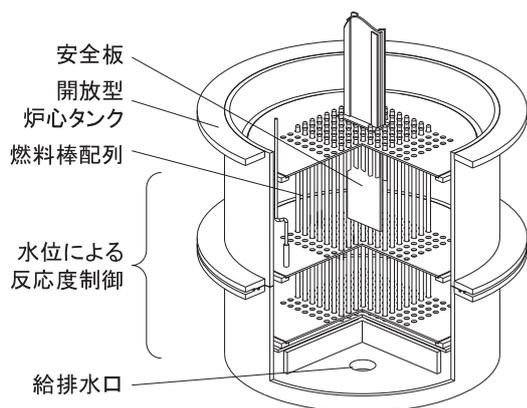
## V. 今後の方向性と新臨界実験装置

今後とも軽水炉時代が長きにわたって続くことが予想され、軽水炉の炉心・燃料設計は今後とも高度化することが求められる。いかに臨界を達成するかの問題は、実験的にも解析的にも解決済みである。経済性や廃棄物量低減の観点から、いかに効率的に燃やすかが焦点となろう。燃焼を管理するためには、単に中性子の生成・消滅のバランスだけではなく、特定の核種の特定の反応を個別に計算しなければならない。燃焼度が高くなれば考慮すべき核種の種類も量も増えていく。

臨界安全分野にも同じ背景から派生する課題がある。軽水炉の燃料設計の高度化は新燃料の核分裂性物質を増加させる方向であり、1体の燃料集合体でさえも水中で臨界になるような<sup>235</sup>U濃縮度がすでに議論されている。このような場合、可燃性毒物を用いることが必須となり、この毒物の核データの検証は安全上の重要な要求となる。さらに、このような燃料が燃焼を終えたとき、新燃料と同じ<sup>235</sup>U濃縮度を仮定した臨界安全管理を行うことは不経済である。燃焼による反応度低下、つまり燃焼度クレジットを考慮した管理が合理的である。核分裂を起こすアクチノイド核種の増減だけではなく、中性子を吸収する核分裂生成物の生成量も正しく計算できなければならない。炉心に装荷されて燃焼している間ではなく取り出し後の冷却期間中に蓄積する核種もあるので、炉心・燃料設計とは違った視点も必要となる。

同じ論点は MOX 燃料にも存在し、より複雑になる。このような技術的な課題を解決するためには、既に計算手法が大いに発達していることを併せて考えると、主要な役割を果たす核種の核データを正しく評価することが重要である。

したがって、今後の臨界実験の役割は主に核データの検証になると予想され、軽水炉の中性子スペクトルを模擬できる臨界実験装置が必要となる。ウランや MOX の



第8図 新しい熱炉体系臨界実験装置の概念図

燃料棒が使用できること、中性子スペクトルの変更ができるように燃料棒配列の疎密の調整ができること、さらに、適当な照射領域を設け既知中性子フラックスで着目する核種の反応率測定が行えることなどが要求される。

JAEA の臨界実験装置のうち、TCA がこの仕様に最も近い。しかし初臨界から50年近く経過し、新たな機能・性能を付加するためには特に建家が老朽化しすぎている。一方、STACY が設置されている NUCEF は、建家が新しく、プルトニウムを用いるための閉じ込め性能、照射試料の調製、事後分析などの能力を十分に備えることができる。このため、JAEA では、TCA と STACY の機能を統廃合し、TCA に類似した第8図に示すような新たな水減速非均質体系の臨界実験装置を NUCEF に整備する計画を進めている。この新装置は、炉心構成の大きな柔軟性を備えるとともに低コストの運用を行い、より高度な臨界安全管理の実現、軽水炉の炉心・燃料設計の革新、および次世代の原子力を担う技術者の養成を目的として実験的研究に供される<sup>8)</sup>。

## Ⅵ. 終わりに

筆者は、この世界に入ってまだ20年に満たず、知識・経験ともにまったく未熟である。50年にわたる歴史やそこから生まれた成果を正しく理解しているか甚だ心もとない。本稿に誤りがあれば筆者の責任であり、諸先輩方のお叱りとお指摘をお願いする。

ベンチマーク作成について書きながら強く再認識したことは、諸先輩方の大変な努力によって完成度を高めて

きた解析手法の恩恵に与っていることである。そのお陰で筆者のような微力な者でもなんとかこの世界に踏みとどまれている。

一方で、ICSBEP で臨界量測定の評価作成に携わる各国メンバーに臨界実験の未経験者が多くなってきたことに困惑を覚えている。原子力カルネッサンスが声高に叫ばれる中、ぜひとも臨界実験装置を持続的に運用し、世界中の多くの研究者、技術者に核分裂連鎖反応を生に近い形で知る機会を提供したいと感じる次第である。

本稿をまとめるにあたって松浦祥次郎氏から貴重な情報、ご助言・ご示唆を頂いた。本連載講座の他の執筆者の方々にも素稿に有益なコメントを多く寄せて頂いた。この場を借りて深く御礼申し上げる。

### —参考資料—

- 1) 松浦祥次郎, 私信, (2010).
- 2) 中島 健, 臨界実験装置による軽水減速燃料格子の核特性研究, 北海道大学学位論文, (1997).
- 3) K. Tonoike, *et al.*, *Proc. 5th Int. Conf. on Nuclear Criticality Safety (ICNC)*, Albuquerque, USA, Vol.2, p.10-25 (1995).
- 4) <http://icsbep.inel.gov/>
- 5) 奥野 浩, 他, 臨界安全ハンドブック・データ集第2版, JAEA-Data/Code 2009-010, (2009).
- 6) 中島 健, 他, *TRACY Transient Experiment Databook 1~3*, JAERI-Data/Code 2002-005~007, (2002).
- 7) K. Ogawa, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **37**, 1088-1097 (2000).
- 8) 三好慶典, 他, “原子力機構の臨界実験装置”, 日本原子力学会「2010年春の年会」, 炉物理部会企画セッション, (2010).

### 著者紹介

外池幸太郎(とのいけ・こうたろう)

(独)日本原子力研究開発機構  
安全研究センター  
(専門分野/関心分野)臨界安全, 原子炉物  
理, 燃料サイクル安全



# 私の 主張

## もんじゅ は エネルギー・環境問題を解決できるか

### 高速増殖炉の研究開発について

東京工業大学 中江 延男

#### 14年5ヶ月ぶりに運転を始めた「もんじゅ」

「もんじゅ」は、運転のために使う燃料よりも多くの燃料を作り出すことができる。このため、夢の原子炉と呼ばれ、1965年頃から国家プロジェクトとして純国産技術を中心に開発が進められた。そして、1994年はじめて核分裂の連鎖反応(臨界)を成し遂げ、原子炉出力を40%まで上げ発電するところまで進んだ。しかし、1995年12月8日に炉心を冷やすための冷却材である1次系ナトリウムの熱を水-蒸気系に伝えるための2次系ナトリウムが漏れる事故が起き、原子炉は止められた。

それ以降、14年と5ヶ月が経過した2010年5月6日に「もんじゅ」は再び運転を始めた。5月8日には臨界を達成した。この状況は瞬く間に世界各国に伝わった。気になるのはその反響である。そこで、海外の友人に「もんじゅ運転再開をどう評価するか」と聞いてみた。寄せられた回答は、「大変喜ばしいことであり、世界のエネルギー・環境問題の解決に向けた大きな一歩である」とのことであった。社交辞令もあり値引きして考えなければならないが、「もんじゅの運転再開」は全世界の原子力関係者に大きなインパクトを与えたことはほぼ間違いないものと思われる。

#### 「もんじゅ」とエネルギー・環境問題との関係

化石燃料である石炭、石油、天然ガスの地球上での存在量は有限であり、存在量以上には使うことはできない。つまり、エネルギーが枯渇するという問題がある。また、使えば二酸化炭素を出すので環境問題を引き起こす。

原子力は核燃料であるウランを使う。使用できるウランの量には限度がある。また、核分裂によって生じる核分裂生成物のほかに核反応(中性子を吸収して別の元素になる反応)によって半減期(自然に減少しその量が半分になるまでの時間)が非常に長い元素(マイナー・アクチニド:MA)ができる。このMA元素は原子力から出る廃棄物として厄介なものである。つまり、原子力であっても、ウラン資源の枯渇やMA元素による環境への負荷といった原子力特有のエネルギー・環境問題がある。

これを解決するには、ウランをプルトニウムに変換し燃料として使うおよびMA元素を核反応により消滅する方法が考えられる。1回の核分裂で生まれる中性子の数が3個あれば、連鎖反応、核燃料の増殖、厄介な元素の処理にそれぞれ1個を使うことができる。核分裂で約

3個の中性子を出せるのは大きなエネルギーを持つ、つまり、高速度の中性子を利用する原子炉のみである。「もんじゅ」は高速中性子で運転する原子炉(高速増殖炉)であるため、エネルギー・環境問題の解決に貢献できる可能性を秘めている。

エネルギー・環境問題に関連する特性を原子力の世界では「持続可能性」、「環境負荷低減性」と呼んでいる。そして、「安全性」、「経済性」、「核不拡散性」を加えた5つの特性を満たす原子力システムの開発が目標である。

#### 膨大な研究開発成果に裏付けられた「もんじゅ」

「もんじゅ」の研究開発に着手した頃、国内には高速炉に関する知見はほとんどなくゼロからの出発であった。原子炉の型式をタンク型ではなくループ型とした。炉心熱出力を先行実験炉「常陽」より1桁高く1,000 MW(最終的には714 MW)とした。冷却材はナトリウムと決め、燃料はプルトニウム・ウラン混合酸化物とした。しかし、材料には何を使うのか、設計はどう進めるのか手探りの状況だったと思われる。このような状況下で設計仕様や運転条件を決めるための設計が進められ、膨大な研究開発が並行して実施された。動力炉・核燃料開発事業団(動燃)の大洗工学センターの研究施設がフル活用された。英国、米国、フランスの高速炉および関連する研究施設も使われた。国内メーカーの研究施設も然りである。動燃を中心に All Japan 体制で研究開発が進められた。

筆者はかつて科学技術庁で「もんじゅ」の安全審査を担当した。その当時の記憶から、いくつかの研究開発について紹介する。核設計の精度を上げるには「もんじゅ」体系での臨界実験が必要である。このため英国のZEBRA (Zero Energy Breeding Reactor Assembly)を用いたMOZART (Monju Zebra Assembly Reactor Test)計画が進められた。「もんじゅ」の制御棒本数19本もMORZART計画の成果によって決まった。

高速炉の特徴に高温での運転が挙げられる。このため、原子炉構造物の高温構造設計は重要なテーマとなる。これに関連して、動燃では「もんじゅ」の高温構造設計基準を独自に作った。これにより「もんじゅ」冷却系配管の配置設計として高所水平引回しが可能となった。また、安全評価での配管破断事故の想定として、完全両端破断(ギロチン破断)ではなく配管径( $D$ )の1/2と配管厚さ( $t$ )の1/2を掛け合わせた $(1/4) \times Dt$ のスリット状で問題ないとの結論を得た。

高速炉ではナトリウムの熱を水に伝える蒸気発生器でのナトリウムと水との反応が重要なテーマとなる。1本の伝熱管が破損し水がナトリウムの中に飛び出て化学反応を起こす。この影響で破損した周囲の伝熱管の破損伝播の規模が安全評価上重要となる。「もんじゅ」では、ナトリウム施設での実験結果に基づき1本の破損伝熱管の影響によって壊れる伝熱管の本数を3本とすることで問題ないとの結論を得た。

そのほか、原子炉容器や炉内構造物、1次主冷却系循環ポンプなどの機器の設計、性能試験も自主開発で行われた。「もんじゅ」燃料の燃焼度は炉心から取り出される燃料集合体の平均燃焼度で8万 MWd/t、燃料ペレットの最高燃焼度は13万 MWd/tにも達する。これに伴う被覆管の中性子照射損傷量も約120 dpa(displacement per atom：原子あたりのはじき出し数)に達する。このような高照射に耐える材料の開発も重要な研究開発テーマである。海外の高速炉や「常陽」を用いた燃料材料開発の結果、高性能材料が開発された。このように「もんじゅ」の燃料を含むすべての設備・機器の設計仕様や運転条件は膨大な研究開発成果に裏付けられている。

### 「もんじゅ」運転再開の意義

天然資源の乏しい日本でエネルギーセキュリティーを維持していくには、天然ウランの利用効率の高い原子力(高速増殖炉)への依存度を高める必要がある。高速増殖原型炉「もんじゅ」の運転が再び始まったことは、国、政府、地方自治体、規制当局、開発主体のすべての機関が高速増殖炉の開発を確実に進めるという方向にベクトルを一致させたことを意味する。

原子力のような巨大複合技術の場合、ステップ・バイ・ステップで開発を進める必要がある。原型炉「もんじゅ」の設計・建設・運転等の経験から改良点や革新的な技術を見出し実証炉に繋げることが安全で経済的な高速増殖炉開発にとって重要である。「もんじゅ」という舞台で演じられた技術に基づく次世代技術を実証炉に反映することが高速増殖炉開発にとって不可欠な要件である。「もんじゅ」の運転再開は高速増殖炉開発が原型炉から実証炉への軌道に確実に乗ったことを意味する。

### 「もんじゅ」の使命

現在、「もんじゅ」は性能試験を進めている。その後、総合機能試験を経て実際の運転に入る計画である。

性能試験は MOZART 計画を「もんじゅ」実機体系で行うことに等しい。これは MOZART 計画を進めた研究者・技術者が切望したことである。この成果は実証炉の核設計手法高度化にも繋がる貴重なものである。総合機能試験では、原子炉プラント全体の設備・機器を対象とした試験が行われる。この試験では、ほとんどの設備・機器の設計の妥当性や性能が確認できる。設備・機器の

設計者、関連する研究開発を進めた研究者・技術者にはその結果を確認し、次の段階に反映させる責務がある。運転が始まれば、運転時のデータが設計通りであるか確かめることは最低限必要である。燃料の燃焼度をさらに高めるための試験研究や MA 元素消滅の試験研究を進めることも重要である。

このような高速増殖炉に関する研究開発を着実に進めること、得られた成果を蓄積・評価して知識の体系化を図ることが「もんじゅ」の使命ではないだろうか。

### 高速増殖炉研究開発の進め方

高速増殖炉が能力を発揮するには使用済み燃料再処理および燃料加工が整合の取れた形で機能する必要がある。すなわち、高速炉システムとしての開発が必要である。「もんじゅ」使用済み燃料を再処理・リサイクルすることによって、高速炉システムの固有の特性である「持続可能性」、「環境負荷低減性」に加え、「安全性」、「経済性」、「核不拡散性」について確認し、目標とする原子炉システムの実現に繋がるように研究開発を進めることが重要である。

### 「もんじゅ」関係者への期待

「もんじゅ」に関する情報発信も重要なことである。発信者と受信者との間で「Win-Win」の関係が構築されていけば効果的な情報発信が可能となる。受信者の一部ではあるが「もんじゅ」サイトの住民にとって Win とは「もんじゅ」が高速増殖炉研究開発のメッカとなり、国内外を問わず、多くの研究者、技術者、関係者が「もんじゅ」に集まり地域が全体として活性化し、潤うことである。このような状態は発信者にとっても Win である。

また、「なぜ「もんじゅ」の開発を進めなければならないのか。今のタイミングで進める必然性は何か」について、「もんじゅ」関係者には今まで以上に熟考が求められる。高速増殖炉研究開発に携わる側の考え方、思い、論理、そして高速増殖炉の安全性、経済性について国民の納得が得られるまで説明する労力を惜しまないことである。

### 最後に

「もんじゅ」はエネルギー・環境問題を単独では解決することはできない。しかし、解決への道筋を示すことはできる。解決のための先駆者として第一歩を確実に踏み出し、歩み続けて貰いたい。

(2010年 7月2日記)

## 原子力外交 第2回

# 原子力産業の国際展開について

経済産業省 資源エネルギー庁 三又 裕生

今後、世界のエネルギー需要の急速な拡大が見込まれる中、「エネルギー安定供給確保」(energy security)、「環境への適合」(environment)、「経済効率性」(economic efficiency)のいわゆる「3E」を同時達成する上での「要」の電源として、我が国のみならず、世界的にも昨今、原子力発電への注目が集まっている。米欧等の原子力先進国において原子力発電を再評価し改めて推進する動きが顕著となってきているのに加え、新興国や従来原子力発電を有しなかった国々でも原子力発電を新たに導入したり、抜本的に拡大する動きが具体化しつつある。2030年までに世界の原子力発電所の設備容量が現在の2倍程度に拡大するとの予測もあり、まさに世界は「原子力新時代」を迎えていると言えよう。我が国は過去半世紀にわたり着実に原子力発電を推進してきた実績があり、我が国の原子力産業は技術力や安全性・信頼性の面で国際的に見ても高い競争力を有する。こうした競争力を活かし、今後、顕著な拡大が見込まれる外需を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と期待される所であり、我が国の原子力産業が積極的な国際展開を図るべき時期を迎えている。

我が国が原子力産業の国際展開を進めることは、我が国の経済成長への貢献に加え、国際的にも国内的にも様々な意義を有する。国際的な意義としては、世界的なエネルギー安定供給の確保と地球温暖化対策に貢献するという側面がある。また、これまで一貫して核不拡散や原子力安全に関する世界最高水準の徹底した取組みを続けてきた我が国の原子力産業が世界に展開することにより、こうした我が国の取組み姿勢や文化が世界各国に伝播し、健全な原子力利用拡大の進展に寄与する意義も大きいと考えられる。

さらに、原子力産業や原子力発電に携わる人材やそこで継承されてきた技術を我が国が今後とも維持・強化していく上で、内需だけでは必ずしも十分とは言えず、外需の存在は重要な意味を有する。また、国内の原子力発電所と同じ炉型を世界に普及させ、諸外国と技術基盤を共有することは、国内での安全安定運転に対するリスクを低減することにもつながると期待される。

世界市場は大きく分けて、(1)当面最大規模かつ相対的に低リスクの市場である米欧、(2)すでに原子力を導入しており、今後、急拡大する見込みである中国・インド、

さらに、(3)将来的には発展の可能性が大きい東南アジアや中東等の新規導入国などがあり、市場ごとの特性に応じた対応が必要である。

米欧市場では、新規建設に加え、既設炉の高経年化に伴う資機材の取り替えや建て替え(リプレース)需要が大きく、我が国の原子力産業にとって引き続き重要である。まず、米国では、約30年ぶりの新規建設に向けた動きが進められている。現在18プロジェクトが当局に申請中であり、その多くを日系企業が受注することが見込まれている。

また、欧州においても、一時期、原子力発電の拡大に否定的であった英国、イタリアなどでふたたび建設が決定されており、ベルギーやスウェーデンでは原子力発電の段階的な撤退を中止するなど、エネルギー安全保障および地球温暖化対策の観点から原子力を再評価する動きが活発化してきている。

米欧を含む海外市場に対し、日本政府としても、新規建設、資機材輸出、発電事業への参画等について公的金融や貿易保険等を活用しながら積極的に支援することとしている。米国では、足下の天然ガス価格の落込みや地球温暖化対策の見通しの不透明さなどから、短期的には原子力分野への投資意欲にかげりも見られるが、我が国をはじめ各国政府が原子力分野への長期的コミットメントを明確に示すことがきわめて重要である。

中国は、市場規模としては最大の成長ポテンシャルを有している一方、中国政府は原子力プラントの国産化を志向している。他方、資機材の輸出だけでも相当規模の市場が見込まれ、公的金融支援等の活用を通じて政策的にも後押ししていくこととしている。同時に、急増が予想される中国での原子力発電が安全に行われるよう、国際的な協力枠組み等を通じてその安全確保が図られることがきわめて重要である。

インドとの間では、本年4月、閣僚級のエネルギー対話のもとに「原子力WG」を設置し、さらに、本年6月には、日印原子力協定締結交渉を開始したところである。同協定が締結されれば、今後、中国に次ぐ大きな成長が見込まれるインドの原子力市場は、プラント輸出を含む日本の原子力産業の大きなビジネス機会となり得る。

東南アジアや中東などの原子力新規導入国は、将来的

に発展の可能性が大きく、すでに、ベトナム、UAE、ヨルダンといった国々では原子力発電所の導入計画が具体的に進展している。こうした国々に対しては、原子力発電プラントの建設のみならず、運転・管理、燃料供給等を含む「システム型の輸出」が求められ、さらには人材育成や法制度整備など「国対国」の関係を含むトータルな関与・協力が必要となるとともに、日本の電力会社が有する経験・実績やノウハウ・人材が有用である。こうした新規導入国市場の特性を踏まえ、電力会社や原子力プラントメーカーと検討を重ねた結果、相手国に対する提案や受注獲得に向けた活動を我が国として一元的に行うための電力会社を中心に体制を整備することが必要との結論に至り、9電力会社、3メーカーおよび産業革新機構が出資する「国際原子力開発(株)」が10月22日に設立された。

ベトナムは、南部ニントゥアン省の原子力発電所第2サイトに2基新設するプロジェクトについて、日本をパートナーとすることを決め、10月31日に行われた日越首脳会談において明らかにした。これは我が国が安全を第一に取り組んできた長年の実績と経験、高い技術力が評価されたものであると同時に、首脳レベルをはじめ官民各層での強力な働きかけが功を奏したものである。今後、国際原子力開発(株)は、このベトナムでのプロジェクトの日本側取りまとめ役となるのを皮切りに、新規導入国に対する官民一体の取組みの中核組織として、ベトナム以外の国に対しても役割を発揮することが期待される。

海外での原子力発電所の建設は、大規模かつ長期的なプロジェクトであり、民間企業ではカバーしきれないリスクが存在することから、上記のような受注体制の整備に加え、政府が支援を行うことが必要不可欠である。このため、政府としては、民間企業とも連携しつつ、公的金融支援、相手国の人材育成、制度整備支援、インフラ整備支援を行うとともに、首脳や閣僚等のハイレベルを含め相手国政府との対話を積極的に行うこととしている。貿易保険制度については、海外投資保険のてん補範囲の拡大等の新たな施策を本年7月に公表したところで

ある。また、原子力の国際展開に不可欠な二国間原子力協力協定についても、新規導入国等との締結を戦略的かつ迅速に進めることとしている。例えば、ヨルダンとの原子力協力協定については7月に、また、ベトナムとの協定については10月に実質合意に至ったところである。

上記のように、原子力発電の推進に関心を示す国が世界的に増加していることに伴い、核不拡散に向けた国際的な担保をより一層強化するとともに、原子力発電施設等の安全な運用を確保すること、さらには使用済燃料の取扱いなどの諸課題に対処するための国際的な連携を強めることが重要になってきている。

こうした中で、我が国としては、原子力を利用する国が確保すべき安全上の要請を国際的な共通基準としてIAEA(国際原子力機関)の場で示すことなど、安全面での国際社会における取組みの重要性を強く認識し、これに積極的に貢献することとしている。また、原子力平和利用と核不拡散とを両立させるため、IAEAやIFNEC(国際原子力エネルギー協力フレームワーク、旧GNEP)等の場で検討されている核燃料供給保証のための国際的な取組みや使用済燃料の取扱いに関する枠組みづくりの議論に主体的に取り組むこととしている。こうした取組みを通じ、新規導入国などにおいても、核不拡散、原子力安全、核セキュリティ等を確保し、健全で責任ある原子力導入を確保することがきわめて重要である。これにより、ビジネス獲得のため安全や不拡散を軽視した過剰な価格競争などが行われるのを防ぎ、平等な競争条件が確保されることは、我が国の産業の国際展開を推進するうえでも望ましい方向性であると考えられる。

本年6月に閣議決定された新しい「エネルギー基本計画」には、以上のような基本的な方針に基づき、政府としても原子力産業の国際展開を積極的に推進していくことが、重要な柱の一つとして盛り込まれたところである。(2010年11月1日記)

# 談話室

## 常世の国の食と文化

「2010年春の年会」特別講演

中川学園調理技術専門学校 校長 中川純一先生との対談より

フリーアナウンサー 神原 千恵

### ■ようこそ茨城へ

ここ茨城は1000年以上も前から「常世(とこよ)の国」と呼ばれ、豊かな山の幸、海の幸に恵まれてきました。奈良時代初期、713年に編纂された『常陸国風土記』には「廣大で肥沃な土地が広がり、山海の幸がとれてにぎわっていたこと、少々、仕事をなまけても十分な暮らしができたこと」などが記されています。「常世」とは楽園・ユートピアとも訳されますが、まさにその通りだったようです。

### ■古代茨城は 経済力日本一

古代、地域社会や集落が形成されたところは「郷(ごう)」と呼ばれました。平安時代の「郷」の分布図を見ると、茨城は県内全域にまんべんなく郷が分布し、多いところで千戸から数千戸の民家があったと言われているのです。その数は全国有数の規模で、古代茨城は、抜群の経済力を持っていたのです！

### ■豊かさのわけは…

文化の交わる地域であることが理由の一つと考えられます。ナラ林文化の領域と、照葉樹林文化の領域の境界線上に茨城があります。つまり、ナラ林文化の南限、照葉樹林文化の北限なのです。これは現在、茨城でとれる農産物を見ても同じことが言えます。茨城は、みかん栽培の北限、りんご栽培の南限(長野県を除く)と言われています。みかんは筑波山の中腹で栽培され「福来(ふくれ)みかん」と呼ばれています。大きさは直径3 cm から4 cm ほど。酸味があり、香りが強いのが特徴です。皮は七味の原料になっています。一方、茨城県北部にある大子町では、りんごの栽培が盛ん。早生から晩生までおよそ30種類を栽培しています。晩秋、茨城ではみかんとりんごが同時に収穫できます。日本中見ても、茨城だけではないでしょうか？

茨城沖の海も、暖流と寒流が交わる境界線上にあります。そのため、多くの魚が集まり良い漁場となっています。漁業者だけでなく、釣り愛好家にとっても、今、注目の場所です。というのも、200キロを超えるカジキが釣れるのです。毎年、夏に開かれている「ビルフィッシュトーナメント」。トローリングで釣り上げたカジキの重量などを競うイベントで全国から参加者が集まります。

早朝に大洗を出航、30 cm 以上もあるルアーを流しながらカジキが掛かるのを待ちます。大物がかかると、糸を手繰り寄せ、釣り上げるのに2時間以上かかることもあるそうです。

### ■出会いの場 茨城

異なった気候や潮流が会おうという話がありました。筑波山はまさに万葉集の時代から出会いの山とされてきました。歌垣(うたがき・かがい)と呼ばれる行事が特定の日時に行われていました。これは、未婚既婚に関係なく、男女が筑波山に集まって歌を交わし、舞い、踊り、出会った異性と一晩を明かすというものなんです。万葉集・高橋虫麻呂の歌には、歌垣への期待や興奮が素直に表現されています。これもまたユートピアと言えるかもしれませんね。

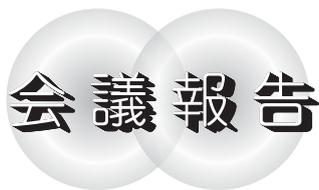
### ■包丁式

「食文化」に話を戻しまして、「包丁式」という儀式についてご紹介しましょう。これは、賓客の前に俎(まないた)を持ち出して主人みずから庖丁を取り、その庖丁ぶりを見せて客をもてなす儀式です。鯛、鯉などに直接手を触れずに、左手に持った俎箸(まなはし)と右手の包丁刀でさばきます。生命に対する感謝、また賓客に対して毒などは一切ありませんよという安全性を伝える意味もあったと言われています。

### ■食はすべての基本

私たちは食べることで、命をつないでいます。食べることは、生き物の命をいただくことです。中川先生の学校では将来、料理人を目指す学生たちが学んでいるわけですが、授業の中に食肉加工施設の見学があります。生きている牛や豚が食用肉に加工されていくわけですね。施設の職員からは「牛や豚はここで一度、命をなくしています。だから料理する皆さんは、その命を大事に調理してください」と言われるそうです。私たちの食は、古代からの文化、そして繋がられてきた命をいただいています。食べることをおろそかにせず、感謝の心とともに豊かな食生活を送りたいものですね。

(2010年 7月14日 記)



## 第2回シンポジウム「RI 国内製造に向けての開発研究」

Symposium on R&D for Domestic Production of Radioisotopes

2010年6月17日(東京)

放射性同位元素(RI)は、医療・産業界・学術研究等幅広い分野で利用されている。医療分野では、RIを標識とする医薬品化合物を生体に注射し、臓器等に集積されたRIから放出されるガンマ線をガンマカメラで撮影し、臓器の働き具合(機能)を診断する核診断や、RIの放出するベータ線による癌治療等に利用されている。核診断は、超音波、CTやMRIによる診断が、不具合個所の場所・形・大きさを診るのと相補的な重要な診断とされている。

RIの中で、特に $^{99m}\text{Tc}$ (半減期6時間)は現在、わが国で年間100万件以上の核診断用に利用されている。 $^{99m}\text{Tc}$ は短半減期であること、放出されるガンマ線が141 keVとガンマ線カメラの検出感度が高い所にあること、容易に様々な化合物と標識化が可能なることのため、世界中で最も多用されている(井上登美夫:敬称略)。

$^{99m}\text{Tc}$ は $^{99}\text{Mo}$ (半減期66時間)の娘核として、原子炉で高濃縮ウランの核分裂反応で生成される。この $^{99}\text{Mo}$ をわが国はすべて輸入している(年間250回輸入)。現在、 $^{99}\text{Mo}$ の供給不足が世界的に深刻な問題となっている(中村吉秀)。主因は、世界の $^{99}\text{Mo}$ 使用量の70%を供給してきているカナダとオランダの原子炉の老朽化に伴う予期せぬ事故である。一方、アイスランドの火山によるヨーロッパの空港閉鎖は、「短半減期RIの空輸」に潜在する「輸送のリスク」を浮き彫りにした。このような状況下で「日本が $^{99}\text{Mo}$ を中長期にわたりいかに安定確保するか」は、解決すべき緊急の課題であり、国・関連学会・企業・各種研究機関等が検討を開始している(井上登美夫、中村吉秀)。そこで今回は $^{99}\text{Mo}$ に焦点を絞り標記シンポジウムは企画された。

講演は、放射線医学の井上登美夫(横浜市立大学)の「 $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ の核医学利用」の演題で始まった。核医学検査は、副作用が極少で安全度の高い検査であること、 $^{99m}\text{Tc}$ は今後も中長期利用が期待されること、そのため $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ の安価かつ安定確保は、極めて重要であることが強調された。中村吉秀(日本アイソトープ協会)は「 $^{99}\text{Mo}$ 供給の現状と将来」の演題で、現に $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ の確保に尽力中の観点から、 $^{99}\text{Mo}$ 供給の世界の現状と今後の見通しを述べた。カナダでは加速器による $^{99m}\text{Tc}$ 国内製造を、 $^{99}\text{Mo}$ を全輸入している米国も $^{99}\text{Mo}$ の国内製造を検討中であること、日本も原子力委員会が $^{99}\text{Mo}$ の安定確保に向け国の対応の重要性を指摘していることが紹介された。

上記講演を踏まえ、 $^{99}\text{Mo}$ の国内製造計画に関連する

講演が続いた。まず、堀直彦(原子力機構)は「原子炉(JMTR)による $^{99}\text{Mo}$ 製造」の演題で、原子力機構のJMTRにおける $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ 反応による $^{99}\text{Mo}$ 製造計画(国内需要の20%を供給)と、インドネシアにおける $^{99}\text{Mo}$ 吸着剤の耐放射線性試験等を紹介した。

一方、加速器を利用した $^{99}\text{Mo}$ 製造に関連して以下4つの講演があった。まず、永井泰樹(原子力機構)が「中性子及び陽子・電子利用生成法」の演題で、 $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ 製造方法に関して現在、世界で検討・試験研究が行われている具体例を紹介した。次いで、湊太志(原子力機構)が「 $^{99}\text{Mo}$ 生成量」の演題で、 $^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$ 反応による $^{99}\text{Mo}$ 生成量を、フランスで建設中の加速器で得られる中性子束等の最新のデータに基づき紹介した。上記( $n, 2n$ )反应用の中性子生成用加速器に関して、今野力(原子力機構)は、「加速器(コッククロフト型)」の演題で、 $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$ 反応で高強度の14 MeV中性子を得る方法の提案を行った。密本俊典(住友重機械)は、「加速器(サイクロトロン)」の演題で、リングサイクロトロンにより40 MeV 5 mAの重陽子ビームが得られ、これにより $^{12}\text{C}(d, xn)$ 反応で高強度高速中性子生成が可能である旨の紹介を行った。

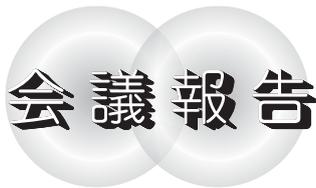
次いで、 $^{99m}\text{Tc}$ の標識化合物合成時の問題点、および $^{99}\text{Mo}$ と $^{99m}\text{Tc}$ の化学分離の講演が続いた。五十嵐隆(富士フィルムRIファーマ)は、「放射性医薬品としての $^{99m}\text{Tc}$ 標識化合物の特性」の演題で、 $^{99}\text{Tc}$ (基底状態)と $^{99m}\text{Tc}$ の存在比が標識に大きな影響を与えることを指摘した。 $^{99}\text{Mo}$ の比放射能は、ウランの核分裂で生成される場合に比べそれ以外の製造法では低い。山林尚道(千代田テクノル)は、「 $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ 化学・分離精製」の演題で、低比放射能の場合に、旧原研等で開発された昇華法が、 $^{99m}\text{Tc}$ を高純度・高効率で抽出する有効な分離法であることを紹介した。

安定同位体である $^{98}\text{Mo}$ や $^{100}\text{Mo}$ を高濃縮化する開発研究について、稲垣隆雄(KEK)が「濃縮Mo試料生成技術開発」の演題で紹介した。

最後に、「RI国内製造に向けての開発研究の今後の進め方」について自由討議を行った。 $^{99}\text{Mo}$ 等の国内製造に期待する旨の発言が、多くの参加者から述べられた。限定された課題によるシンポジウムであったが、大学・法人研究所・企業そして文部科学省などから80人の参加者を得て、実り多いシンポジウムであった。

(日本原子力研究開発機構・永井泰樹、

2010年7月28日記)



## 日本学術会議が遅れている高レベル放射性廃棄物 サイト選定問題を幅広く議論

Public Lectures by Science Council of Japan, "Search for the Route to Solve the Problems on Disposal of High Level Radioactive Wastes"

2010年6月4日(日本学術会議, 東京)

56年前に日本学術会議は原子力平和利用の3原則を出し、それ以降も大学の原子力研究と教育、放射線影響研究などに対して勧告や提言を出してきたが、高レベル放射性廃棄物(HLW)の処分に関する審議はほとんど行われてこなかった。わが国としては、原子力委員会によりHLWの処分の方針が決まり、それに沿って特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律が制定され、主務官庁(経済産業省)と実施機関(原子力発電環境整備機構: NUMO)が定められた。そして、NUMOにより処分候補地の調査の公募が開始されているが、調査候補地選定は遅れており、その目途は立っていない。それは社会的、政治的な問題が大きいためのようと思われる。日本学術会議は国の機関であるが、第三者的な立場に立ち、人文・社会科学、生命科学・医学から理学・工学まで幅広い分野から、HLWの処分問題に取り組むことが可能である。そこで、本公開講演会を企画し、提案したところ採択され、開催の運びとなった。当日は約300名の参会者で講堂は満席になり、この問題への高い関心が感じられた。

開会の辞に続き、金澤一郎日本学術会議会長がこの問題の重要性を強調した挨拶をした。ここで第一部に入り、NUMOの河田東海夫氏がHLW処分事業の概要とその安全性について報告した。次に基調講演Ⅰとして、スウェーデン原子力廃棄物評議会(KASAM)事務局長のE.Simic博士よりその活動の概要が紹介された。これは非常にうまくいった例として参考となる。基調講演Ⅱは、東京大学の田中知によるHLW処分に向けての学際交流の提言—日本における第三者機関の有効性—であり、わが国になじむ第三者機関の在り方について言及した。

第Ⅱ部は、公開講演会と同じ題のパネル討論であり、上記田中知の司会で、木村逸郎(大阪科学技術センター、原子力工学)、加藤尚武(鳥取環境大学、環境倫理学)、木下富雄(国際高等研究所、社会心理学)、小野耕二(名古屋大学、政治学)、柴田徳思(日本原子力研究開発機構、放射線防護学)、中西友子(東京大学、農業環境工学)、河田東海夫(NUMO、核燃料サイクル学)の7氏が参加した。まず、各パネリストの見解表明があった。木村は日本学術会議の原子力への取組みと第三者機関としての意義と適性を示した。加藤氏はHLWの処分の倫理的

徴と留意すべき点をいくつか指摘した。特に、未来にリスクを外挿する危険性および第三者機関と専門家集団の関係における公正さの確保の問題である。木下氏はHLWの処分問題は複雑でユニーク解はなく、多元的あるいは固定しない解がありうる。信頼される第三者機関は有効だが、政府が責任を取ることが必要とした。小野氏は、これは典型的なノットインマイバックヤード(NIMBY)かつフリーライダー問題だから、地方の首長は立候補しないのは当然だ。まずは政府が強い指導性を発揮すべきであり、その上で決定作成のためには、第三者機関よりも協議機関が必要で、将来世代に責任は持てないと判断すべきだとした。柴田氏は施設および環境に対する放射線防護、特に地下水および土壌の放射能濃度の規制の必要性を訴えた。中西氏はHLWの中にも有用な元素が含まれているので、一律にガラス固化して処分せず、再利用できるものは活用すべきで、そうした研究の推進を主張した。

その後、コメンテータとしてお願いしていた直江清隆氏(東北大学)から、(1)未来世代への倫理の範囲と同意原則、(2)第三者機関は事故調査には有効だが、将来のことには疑問、(3)単にNIMBYですまらず、議論の枠組みを据えることが必要、(4)市民が議論に参加するためのリテラシー向上について、発言があり、パネリストから意見が述べられた。(1)に関連し、加藤氏からHLWの地層処分はこれまでのものに対しては自分も最善の方法と思うが、今後いくらでも増やしていいのか疑問に思うとの発言があり、一方、河田氏から未来の安全性については、自然の摂理に預ける受動的な方法を考えているとの説明があった。(3)に関連して、木下氏、小野氏および木村から、いろいろな視点から発言があり、盛り上がった。また、Simic博士からも、NIMBYについてスウェーデンの状況が示された。その後フロアから、ガラス固化体は安定で安全性も高いので、そのリスクを言うのなら、原子力を止めた時のリスクもきちんと評価すべきだという意見などがあった。最後に、閉会の辞があった。

この公開講演会を受けて、日本学術会議では新しく「放射性廃棄物と人間社会」小委員会が設置された。

(大阪科学技術センター・木村逸郎、  
東京大学・田中知、2010年7月27日 記)

## オーストリア10年の体験

グラーツ・フィルハーモニー管弦楽団 チェロ奏者 片岡 典子

オーストリアに来てから今年で10年になる。「音楽の都・ウィーン」に憧れてアメリカの大学を卒業後、すぐにオーストリアへ留学した。当初、1,2年ウィーンの雰囲気味わったらアメリカへ帰るつもりだったが、気がつくといつの間にか10年も過ぎてしまった。

現在はウィーンから200キロほど南のオーストリアの第2の都市・グラーツに住んでいるが、それまではウィーン国立音楽芸術大学に6年余り在籍していた。ウィーン・フィルハーモニー管弦楽団元首席チェロ奏者のヘルツァー氏に師事していたが、ある時、ウィーン・フィルのリハサルを見学したい旨、先生にお願いすると快く入場許可証を手配下さり、楽友協会でのリハサルをそれ以来よく聴きにいった。世界のウィーン・フィルと指揮者達がどのように練習をするか、そして指揮棒にオーケストラがどのように反応していくのかとても興味深かった。各指揮者によって生まれてくる音楽が異なるのは当然だが、同じオーケストラで音の響きや音色まで変わるのには驚きだった。

ウィーン・フィルのメンバーは実に多忙である。私はウィーンに留学するまで、ウィーン・フィルのメンバーが全員ウィーン国立歌劇場管弦楽団に所属していることを知らなかった。ウィーン・フィルは国立歌劇場の仕事の空いた時間を縫って活動している。そして、メンバーになるにはウィーン国立歌劇場管弦楽団の入団試験に受かり、3年間個々の力を実証した後、ウィーン・フィル入団の申請ができる。だから、ウィーン・フィルのメンバーは2つの仕事を同時にこなしている。私の師事していたヘルツァー先生はウィーン・フィルと国立歌劇場管弦楽団両方の元首席で、なおかつウィーン国立音楽芸術大学の教授を務めていらっしゃるもので、日によっては、午前中は国立歌劇場でオペラのリハサル、午後は楽友協会でのウィーン・フィルのリハサル、夜はオペラの公演、そしてリハサルと公演の合間を縫って学生の指導、と超人的なスケジュールをこなしていらっしゃる。

レッスンは週一度のペースであったが、ご多忙な先生のご都合で、公演前にオペラ座の先生の部屋でレッスンを受けることもあった。楽屋口から入るので「今夜歌う〇〇氏に会えるかもしれない」と、ドキドキしながらレッスンに向かったものだ。あまり広くもない控室には、机、安楽椅子、クロゼットと譜面台等が所狭しと置いてあり、レッスンでは弓が壁に当たらないように気を使った。公演45分前にはレッスンは打ち切られる。場内

に流れる「ソプラノの〇〇さん、舞台袖に来て下さい」等のアナウンスに聞き耳を立てながら楽屋を離れたのは今では懐かしい思い出である。

おそらく外国生活で誰もが経験するように、留学当初、ドイツ語が片言しか話せず、苦勞した。それでもウィーンに6年住んで少しは言葉に慣れたかな、と喜んでいたらグラーツに来てまたまた苦勞が始まった。ウィーンにはウィーンの訛りがあるが、ここシュタイヤーマルク地方のグラーツにはシュタイヤーマルク訛りがあり、これがなかなかの曲者。例えば「彼ら」は普通「イーネン(ihnen)」だが、グラーツでは「エアナ」と発音する。また、否定文の「ニヒト(nicht)」はシュタイヤーマルク訛りでは「ネーット」。あげくの果てに同じ国なのにコーヒーの呼び方まで違う。ウィーンで大好きだった「カフェ・メランジェ(泡立てたミルクが入っているコーヒー)」をグラーツのカフェで注文しても、ほとんどのウエーターは理解してくれない。イタリアに近いせいかな逆に「カプチーノ」と言えばすぐに出してくれる。

カフェといえば、オーストリアでは愛犬を同伴できる飲食店が多い。アメリカや日本ではそれ専用の店か盲導犬でもない限り、犬をレストランに連れて入ることは考えられない。ところがオーストリアではそれがごく一般的で、食事中に犬が突然吠えてびっくりすることもある。また、注文すれば愛犬に水を出してくれるし、店によっては愛犬用のメニューまで用意している。もっともこの国の犬はしつけが良いので問題はない。ただ、犬嫌いな人にとっては悪夢であろう。

華麗な歴史を持つオーストリアの文化、習慣にも、10年経って大分慣れてきた。しかし、まだまだこの先アメリカや日本とは異なる環境の中で、戸惑いながらも新しい発見をしていくこと、それも外国に住む楽しみの一つかも知れない。

(2010年 7月10日 記)



片岡典子(かたおか・のりこ)

米国・セントルイス出身。鈴木チルドレン海外派遣旅行及びビニスフリー・アンサンブルのメンバーとして米国、カナダ、日本の各地で演奏。シカゴ・ノースウエスタン大学音楽学部及び同大学院卒。デモイン交響楽団等のコンクールで入賞。鈴木鎮一、C・ウェント、H・ヤンソン、W・ヘルツァー諸氏に師事。野村文化財団より助成金を

貰い、ウィーン国立音楽芸術大学に留学。ウィーン楽友協会でも独奏。ヴェルトハイムシュタイン・トリオ・ウィーンを結成、日本ツアーも行う。グラーツ・フィルハーモニー管弦楽団チェロ奏者。

## 書評

## The New Energy Crisis Climate, Economics and Geopolitics

Edited by Jean-Marie Chevalier, 312 p. (2009.5),  
Palgrave Macmillan.

(定価£65.00) ISBN 978-0-230-57739-8

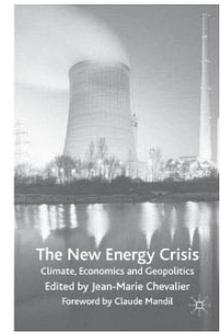
本書は、地球温暖化の現状について述べ、世界全体としてどのように取り組むべきかを提案したものである。近年の地球温暖化は、現在の地球上の人類のエネルギー消費量が、地球環境を維持できる水準を超えていることを明確に示している。温暖化が既に現実となった現在でも、この状況がもたらす物理的、経済的、そして社会的な影響についてはかなりの不確かさがある。本書は、気候変動が各国のエネルギー経済および政治にどのように影響しているかを、綿密な調査と分析によって明らかにしている。快適な気候は、世界全体で協力して対応しなくては維持できない公共的な資源である。世界経済は、地球全体に影響を及ぼすようになったにもかかわらず、世界の各国が、自国の富と利益を追求している。

本書の一つの特徴は、世界全体を(1)経済発展が顕著なアジ

ア地域、(2)石油とガスに恵まれたロシアとカスピ海周辺国、(3)エネルギー不足で経済的に恵まれないサハラ以南のアフリカと南アジア諸国、(4)石油と天然ガス資源が豊富な中近東と北アフリカ地域、(5)米国、(6)ヨーロッパの6地域に分けて、それぞれの地域のエネルギー資源とその利用方法について詳細な状況と温暖化ガス放出対策について記述している。この6地域ごとのエネルギー資源と利用方法の違いとそれに基づく温暖化対策の違いは、実に興味深いものである。

もうひとつの特筆すべき本書の特徴は、原子力の利用について、安全性の確保、高レベル放射性廃棄物処分の実施等、解決すべき課題はあるものの、2030年あるいは2050年までに地球温暖化ガス放出量を現状よりも減らすには、原子力発電の発電割合を高めることにより可能であると主張していることである。

(元日本原子力研究開発機構・関 泰)



## From Editors 編集委員会からのお知らせ

### ○学会誌記事執筆者のための

テンプレートを用意しました  
執筆要領と合わせてご利用下さい



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

### ○「投稿の手引」「和文論文テンプレート」を改定しました。

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

—最近の編集委員会の話題より—  
(10月8日, 15日 第4回編集幹事会)

#### 【論文誌関係】

- ・編集委員会運営内規の改正案について検討し、論文誌関連のグループ分け見直し案を内規に組み入れ、些細な標記の統一をはかることを前提に承認した。
- ・論文誌インパクトファクターの誤報告および関連する国際会議論文シリーズの創設に関して、理事会運営ボードにて報告した旨、説明があった。また、本件については学会誌10月号に記事を掲載した。
- ・論文誌査読システムの開発進行状況について報告があった。
- ・編集委員の帰国に伴う対応について検討した。

#### 【学会誌関係】

- ・新法人移行に向け、財務の健全性を確保するため、支出の合理化を図るよう一般法人化WGから依頼があった。編集委員会の収支状況を調査し、報告することとした。
- ・委員会運営内規の見直しを行った。
- ・Webアンケートシステムの現状について報告があった。現在、9、10月号の評価結果の回答を募っている。
- ・会報に掲載している学術的会合予定の一覧へ、掲載希望の申し出があった場合、編集委員会での必要性を確認することとした。

(11月5日 第5回編集幹事会)

#### 【論文誌関係】

- ・編集委員会メール審議に関する内規に関して改定案が示され、検討の結果これを承認した。
- ・論文誌の海外出版社との共同出版に関して、意見を交換した。また、新法人移行に関連して継続事業の観点からも検討を進めることとした。

#### 【学会誌関係】

- ・委員会運営内規の見直し案が審議され、承認された。
- ・来年1月から9回に亘って「東欧諸国の原子力事情」を掲載することにした。

編集委員会連絡先 <<hensyu@aesj.or.jp>>

# 高速炉サイクルの技術開発に高い関心

世界の動向をめぐる情報記事も好評

(8月号の Web アンケート結果)

Web アンケートシステムのトラブルにより、Web アンケート結果の報告も、しばらく休止しておりましたが、今月から再開いたします。「原子力学会誌」8月号の Web アンケートには65名の方から回答がありました。

## 1. 高く評価された記事

Web アンケートでは、各記事の内容および書き方について、それぞれ5段階で評価していただいています。8月号で高く評価された記事について、「内容」、「書き方」に分けてそれぞれ上位4件をご紹介します。

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	解説(1)	世界の高速炉サイクル技術開発の動向(1)	4.15
2	ATOMOS Special	世界の原子力事情(8) 欧州総括編 スウェーデン・スペインの原子力事情	3.94
3	会議報告(1)	炉物理研究及び業界の動向、人材育成の課題	3.83
3	NEWS	8月号	3.83

第2表 「書き方」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (書き方)
1	解説(1)	世界の高速炉サイクル技術開発の動向(1)	3.69
2	会議報告(2)	韓国原産会議 一枚岩のように言われるけれど	3.67
3	解説(2)	海の国のアトム(3)	3.64
4	NEWS	8月号	3.58

高速炉サイクルの技術開発の記事が内容、書き方とも第1位でした。

## 2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 「掲示板」は良い試みだと感じています。この欄と、From Editors、編集後記と上手く使い分けて、読者へ編集委員会および学会誌の動きをご連絡いただけたらと思います。
- (2) 編集後記に学会誌編集の人材育成の話が述べられていました。編集幹事に編集委員を毎回2、3名ずつ招待して編集の様子を知ってもらう、ということから始められてはいかがでしょうか。
- (3) Scopeで、原子力を担う関連機関の紹介は良い試みであると感じています。会員の人だけではなく一般人向けに、原子力関係の展示館の紹介、という記事があっても良いのではないかと思います。

## 3. 編集委員会からの回答

- (1) 上記(2)は大変建設的なご意見であると思います。編集委員会でも、スタッフとして協力していただける編集委員を募るために、すでにそのような試みを開始しているところですが、今後一層進めていくよう配慮します。

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