

### 時論

- 2 DOEの原子力諮問委員会に参画して—原子力技術立国・日本への提言：  
“時は今だ！急げ！” 植松邦彦
- 4 生命圏の安全保障—科学・政治の  
双方を凝視する学問領域開拓を 吉田文彦

### シリーズ解説 我が国の最先端原子力研究開発 No. 8

- 16 量子ビームが切り拓く未来(Ⅳ)  
光量子・放射光利用技術のフロンティア  
光と量子ビームは相補的な関係にある。今回はその光のうち、レーザーと放射光の利用技術開発の最前線を紹介する。  
水木純一郎, 青木勝敏, 小池雅人, 横山啓一

### 解説

- 22 核拡散抵抗性と保障措置—次世代核燃料サイクル設計における核不拡散対策の基本的考え方  
核拡散抵抗性はなぜ必要なのか。それはどうして有効なのか。その手段の一つである保障措置の位置づけや効果, 設計において考慮すべき対策とは何か。 久野祐輔, J. S. Choi

### 報告

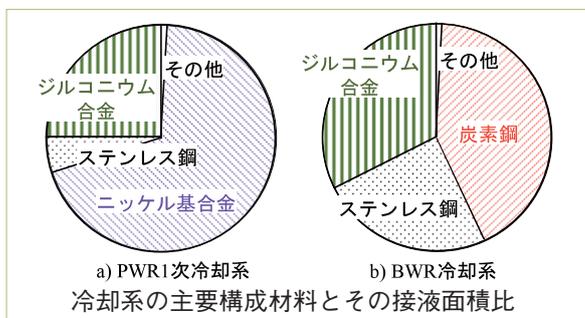
- 28 原子力廃棄物を考える国際市民フォーラム—処分地問題の解決に向けて—廃棄物処分場立地 フィンランド, 韓国, フランス, カナダからの報告と日本の今後の進め方を考える  
原子力をめぐる課題の中で, 放射性廃棄物処分サイト選定の問題は, 最大の課題の一つだ。世界の国々や日本では, その解決に向けてどのように取り組んでいるのだろうか。  
末廣利恵, 河田朱実

### 巻頭言

- 1 手腕と頭脳 中桐 滋

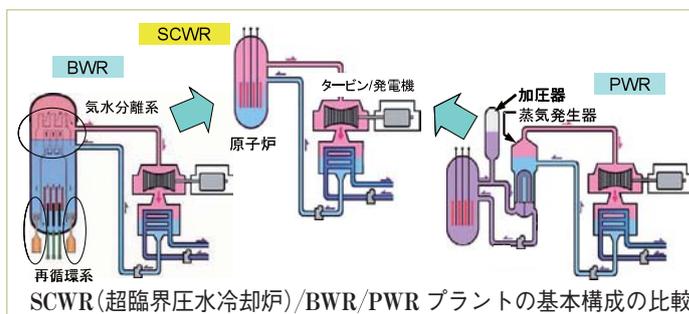
### 連載講座 軽水炉プラントの水化学(1)

- 34 軽水炉プラントにおける水の役割と水化学制御  
軽水炉1基で使用される水の総量は約千トン。その用途は減速材, 冷却材とさまざまだ。本連載では, その水の役割や機能, 材料との相互作用など, 水をめぐる化学を紹介する。  
内田俊介



### 連載講座 軽水炉プラント—その半世紀の進化のあゆみ(17)最終回

- 40 今後の軽水炉の開発(3)  
—超臨界圧水冷却炉と低減速炉  
連載最終回では, 斬新な概念をもつ二つの新型炉を紹介する。熱効率と経済性の大幅な向上を目指す超臨界圧水冷却炉と, プルトニウムの多重リサイクルの実現を目指す低減速炉がそれだ。  
山田勝己, 大久保努



### 表紙イラスト Rijeka リエカ / クロアチア

「イストラ半島」の東に位置し「クヴァルネル湾」に面した「リエカ」は, 町の霧囲気が海に面していながら内陸のヨーロッパの霧囲気がある。イタリアの「トリエステ」などと共に, オーストリアの貿易港として発展した為, ハプスブルク時代に建てられた建物も残っている。日本の川崎市と姉妹都市で, 町の人たちは日本人に対してとても友好的だった。ここは, 町の中心に近い路線バスの停留所で, ひっきりなしにバスがやってきてたくさんの人々が乗り降りしていた。

# 50

周年記念企画

原子力学会1959—2009

## シニアの自論

45 地球温暖化抑制には原子力利用分野の拡大を！  
齋藤伸三

46 原子力の社会受容性の向上のために—「社会システムとしての原子力」を考える  
林 勉

## 公募記事

47 グローバル時代—原子力事業統合  
植松眞理 マリアンヌ

## タイムカプセル記事

48 「原子力は地球を救う」の夢を  
持ち続けて  
原子カルネサンス  
駒野康男  
谷口大輔

## 巻頭言アーカイブ(最終回)

49 就任にさいして  
野澤豊吉

## 談話室

50 核分裂は誰が発見したのか？  
(その3/最終回)—公平さを欠いた  
ハーンのノーベル賞単独受賞とその背景  
河田東海夫

52 山越え谷越え…おお、海だあ！  
—マキシマラソンを走って  
世界原子力従事者協議会が開催したスポーツ  
イベントをレポート。  
守屋隆史



## 私の主張

54 わが国の原子力に活力を取り戻すために  
豊田正敏

## 6 NEWS

- 柏崎刈羽の復旧順調, 6号機も系統試験へ
- エネ調国際戦略小委, 燃料供給など議論開始
- 民主党政策, 安全規制委の創設も
- 日本製鋼がアレバに主要鍛造品を長期供給
- 温度上昇で縮小する物質の格子歪みを発見
- 超高温ガス炉用の被覆燃料粒子用被覆材を製造
- 原産協会などが「気候変動国際シンポジウム」
- 京都—高浜間で第13回マキシマラソン
- 原産, インド原子力学会参加訪印団を派遣
- 原産, 「会員人名録2009」を発行
- 海外ニュース

## 会議報告

- 56 50周年の節目を迎えた制御核融合研究  
—第22回 IAEA 核融合エネルギー国際会議報告  
菊池 満
- 57 第10回アクチノイドと核分裂生成物の  
分離変換技術 情報交換会議 山岸 功

## ジャーナリストの視点

- 60 「平和」への問いを  
山田大輔

- 27 新刊紹介
- 58 支部便り 関東・甲越支部 平杉亜希
- 61 英文論文誌(Vol.46, No.2) 目次
- 62 会告 本学会創立50周年記念事業計画のご案内と  
お願い
- 63 会報 原子力関係会議案内, 人事公募, 「2009年春の  
年会」見学会案内, 主要会務, 編集後記

連載講座 「今, 核融合炉の壁が熱い!(9)」はお休み  
します。

## WEB アンケート

10月号のアンケート結果をお知らせします。(p.59)  
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が変わりました  
<http://www.aesj.or.jp/atomos/>

# 手腕と頭脳



原子力安全委員会 委員

**中桐 滋** (なかぎり・しげる)

東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。  
東大生産技術研究所教授，横浜国立大学工学部教授，同大学院環境情報研究院教授を経て，平成18年から現職。

巻頭言には気宇壮大な構想や時勢に適う提言などが相応しい。構想や提言をまとめるのは頭脳労働である。世の中は頭脳労働のみで成り立たず，筋肉労働もまた人類生存のために必要である。最近の自分を顧みると，手や腕を使う仕事が多く，手先や口先の先端技術に頼りがちなことに気付いた。そこで，本稿は手腕と頭脳についての小論とする。

原子力安全委員会では毎週月曜に定例会議，木曜に臨時会議が行われる。会議では法令に基づく規制行政庁四半期報告，再処理施設における環境放射線管理報告について，電気事業法に基づく溶接安全管理審査について等々の定型的な期毎の報告議題にも時間が割かれている。これ等は，To be, or not to be. のように短くても深遠で頭を悩ませる議題ではない。しかし，数字の羅列を見て，大部の報告内容を判じるのは神経を使う所作である。

日付，きれつ寸法，漏れ量等々の数字は表意文字ではなく，無味乾燥である。しかし，数字の桁や単位，事故等の報告に添付された写真類を凝視すると，その計測や観察に要した技量，記録に要した時間，作業者の辛苦の様が眼に浮ぶ。検査や試験に共通するのは計測と観察である。実地で手，腕を使っての計測では時は寒暑を選べず，足場は所を選べず，作業は単調でも精密さと几帳面さを要求されるので，ご苦労は多い。

計測や観察の結果は記録・管理されて初めて活用される。始めの計測作業等から整理と公表までには多くの人手を経る。報告書類の作成者と発表者は，そこまでの階梯で関与した方々の努力の結果を双肩に担い，責任は重い。他方，報告書類を見る方にも，眼光紙背に徹するほどに全作業を見通し，作業に要した手腕を推定する想像力が求められる。

見たり，聞いたりしたことから将来を推測するには頭脳の働きが要る。緻密な作業により膨大な資料が作成されても，その資料を活用する意欲が乏しいと，竜頭蛇尾に終わる。結果を活用できるように作業が計画されていれば，コンピューター時代の現在，一連作業の成果は大きい。莫大な数のデータも，不適切なデータ処理により情報の抽出が失敗に終わるとき，遺物の収集に終わる。遺物収集に終わるか，情報展示に進むかは頭脳の違いによる。手腕と頭脳，いずれが先かの議論はそれなりに楽しめるが，両方が文明開化に必要なのは自明である。一方に偏することなく，動作は緻密，思考は綿密といきたいもの。

日本原子力学会の会誌や講演会では，在来の軽水炉や放射性廃棄物処理等に加えて新型炉，燃料サイクル，核種の分離・消滅を図る分離変換技術等と将来を目指した新機軸が発表されている。まさに，人智はいまだ枯れず，未来は明るいとの感がある。一方，技術は進めど技量は減り，知は増せども志は下がると言われるのが現世である。果敢な計画も思わぬ所でつまずき，凝った修辭の弁明も少しの行違いで信用が失墜する例もある。

新時代に向い，新技术に挑む時には一瀉千里(いっしゃせんり)に雄飛したいのが人情である。この時こそ，社会が地道に足元を固めて，そして時代を啓開する人々の活躍と手腕向上を助成する機会であると思う。

最近，大学で原子力関連の学科と課程開設の報が聞かれる。建築，機械，船舶等と物の名前の学科名は流行外れであろうが，抽象名詞よりも学科の具体像を明示する即物的な名前に，私は力強さを感じる。名称は求心力の一つである。原子力のついた学科名称復活は日本原子力学会が前進する一歩であることを慶び，本稿を終える。

(2008年 11月11日 記)



## DOE の原子力諮問委員会に参画して 原子力技術立国・日本への提言：“時は今だ！ 急げ！”



植松 邦彦(うえまつ・くにひこ)

(社)日本原子力産業協会 担当役  
マサチューセッツ工科大学大学院博士課程  
修了, 工学博士。動力炉・核燃料開発事業  
団理事, 同副理事長, 経済開発協力機構/  
原子力機関(OECD/NEA)事務局長などを  
経て, 昨年より現職。

米国の原子力諮問委員を拝命した。米国の原子力の将来に具申するのがその役目だが、むしろ日本の将来が透かし絵のように見えてきた。

### 1. NEAC(原子力諮問委員会)とはなにか

約2年前に、米国エネルギー省(Department Of Energy: DOE)から原子力諮問委員会(Nuclear Energy Advisory Committee: NEAC)の委員就任の招請状を受けた。この委員会の目的は、“Nuclear Energy: Policies and Technology for the 21<sup>st</sup> Century(原子力: 21世紀の政策と技術)”という文書の作成である。

この文書は、米国の次期大統領(オバマ大統領)に提示される。文書には、原子力政策を検討する際の重要な選択肢とそれらの意義を明確にする目的がある。

NEAC 委員は全部で12名。エネルギー省のボドマン長官の任命による。うち10名は米国人で、ノーベル賞受賞者、元 DOE 高官、元安全規制委員会委員長、元務省高官、NASA、国家安全保障会議、大学総長や著名な大学教授、産業界の指導者、重要な非政府組織(NRDC, NEI)など。それに英国人1名、日本人1名の参加である<sup>1)</sup>。外国人は、委員任命の時点で特別国家公務員(無給)に任命される。つまり、米国国家公務員としての守秘義務等いろいろの制約を受ける。任期は2年である。

### 2. NEAC の委員として

本論では、米国の原子力政策と技術計画に関するこの報告書の中身を解説するつもりはない。報告書の原文は、2008年11月12日付け(米国時間)で DOE のホームページで公開されている<sup>2)</sup>。また、報告書の日本語訳(米 DOE の了解済み)が日本原子力産業協会のホームページに公開されている<sup>3)</sup>ので参考にされたい。

以下では、委員会における委員の率直な発言・討議・会議の進め方等について、私個人の受けた印象等を差し支えない範囲で語り、皆さんの参考に供したい。

#### (1) 外国人招聘の意義

今回の委員会は、米国が今後取るべき原子力に関する新政策方針(Framework)を新大統領に対して提言するための資料作りを主眼としている。つまり、国の政策方針の立案に当たっての基礎資料になるのである。考えようによっては、その国の欠点、つまり恥をさらすことにもなりうる内容を含むものである。そのなかで2人の外国人委員を任命し、アドバイスを求めようとしたのである。実際、私ともう一人の英国人は、結構遠慮なく意見を申し立てることが少なからずあった。委員会の席上で、われわれ外国人委員は、時には米国人を差し置いて、多岐にわたるテーマについて積極的に発言し、その多くが報告書に取り入れられている。筆者は米国の率直な態度と、その度量の大きさに感嘆するばかりであった。

日本は、かつて明治の初め頃、外国人を多く招き、海外の知識・経験を積極的に取り入れることにやぶさかでない時代があった。翻って今の時代、日本国は外国人を国の委員会などに参考人ではなく正式委員として取り入れ、意見を聴くだけの度量を持っているのだろうか。少なくとも、言葉の問題は何とでもできると思うのだが。

#### (2) 大国としての米国の責任

新興国を含め、世界の多くの国々は地球温暖化対策もこれあり、将来にわたり電力供給の相当部分を原子力発電に頼ることを必要としている。米国は新規原子力発電所の建設はまだないものの、104基という世界一の数の原子力発電所を運転している。世界の原子力発電の一つの重要な“星”である。星であり大国であるという矜持があるように思う。米国がもしも原子力発電所で大きな事故を起こし、“星”が地に落ちるようなことがあれば、世界の原子力発電は多大な“負”の影響を受けることになる。米国は現在の104基の運転を安全に続け、原子力発電所は安全に運転できるという良いお手本を世界に示す

1) <http://www.ne.doe.gov/neac/neNeacMembers.html>

2) <http://www.ne.doe.gov/neac/neNeacReports.html>

3) <http://www.jaif.or.jp/>

必要がある。また、新しい原子力発電所を建設し、安全に運転できることを世界に示すことが重要である。

### (3) 燃料サイクル

米国は長年にわたり、再処理・プルトニウム利用に反対する政策を堅持してきた。そして、その政策を世界に押し付けてきた歴史がある。燃料サイクル面でも、従来の頑なな政策を転換し、早く核不拡散に適切な炉・燃料サイクルの確立に米国は貢献すべきである。

報告書を読めば、このような政策転換に対して、米国議会の広範な支援を得るにはまだ至っていないことがわかる。しかし、核燃料の閉サイクルを確立するための検討は必要である。そのためには、高速炉とその燃料サイクルの研究開発が不可欠である。

### (4) 米国の高速炉・燃料サイクル関連研究開発施設

高速炉によるアクチニド燃焼は長期的なテーマである。その基盤研究には、高速炉とその燃料サイクルの運用が不可欠である。DOE はパテル研究所およびアイダホ国立研究所に指示して、米国内に現存する研究施設の現状評価を行い、その結果がNEACに報告された。つまり、このような基盤研究に耐える施設が現存するかどうか。結論をいえば、施設の老朽化が激しく、直ちに役に立つ研究施設はないという。昨今の米国の厳しい財政事情も踏まえると、必要な研究開発を進めるには日本・フランス等の主要国と協力するのが合理的である。いや、むしろそうするほかない。高速炉の側では、「常陽」および「もんじゅ」と共同して照射試験を進めるべきである。燃料サイクルの研究でも、フランス・日本の持つ施設を共同利用する方策を考えるべきである。

それから、高温ガス炉の利用も射程にのびているが、燃料製造などには課題がある。必要な量を米国内で製造し供給できるまでにはかなりの時間がかかる。日本は大量の高温ガス炉燃料を供給できる唯一の国である。産業界も巻き込み日米で共同開発の方法を見つけてはどうか。

### (5) DOE の原子力プログラムを妨げる問題

報告書の中で一つの章を設け、NEAC は DOE の計画推進体制について厳しく批判している。DOE 内部の連携の不十分さを指摘しているのである。

DOE 内の各種部門がもっと強力で連携すれば効果を最大限にすることができる。例えば、RW(放射性廃棄物管理局)とNE(原子力局)との連携は放射性廃棄物処分の方向を大きく左右する可能性がある。NNSA(核不拡散安全保障局)とSC(科学局)との連携も重要である。

### 3. なりゆき

今回のNEACの活動は、米国の大統領選挙期間とかなりだぶり、政権の成り行きが結構気になりもした。政権の行方を横目で睨みながらという側面もあった。ともかくもNEACは報告書を採択し、11月にボドマンDOE

長官に提出した。今後は長官が新大統領に報告し、この報告書の内容がどこまで政策に取り入れるかが見所である。本稿を書き下ろした時点で、まだ次期政権のエネルギー長官は決まっていない。ここ当面、米国の原子力政策の進展を見守っていく必要がある。

### 4. おわりに

この論を締めるにあたって、NEAC会合を通じて筆者が感じたことを2,3述べておこう。

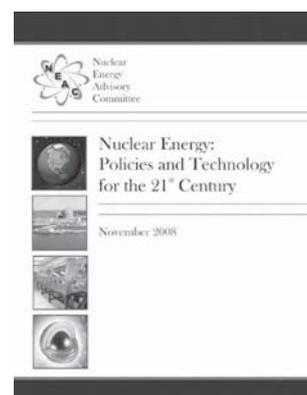
米、仏とも高速炉開発を当面の大きな課題と考え(高速増殖炉の開発は長期的課題)、その開発に日本の力を借りたいと切実に望んでいることである。つまり、「常陽」と「もんじゅ」の利用である。そのことは、報告書のいたるところに彼らの日本への期待感が綴られていることが裏付けている。ロシアなどの高速炉は使えないのかという疑問を誰しも持つだろう。それに対しては、報告書の中に困難である(politically and functionally challenging)と明確に書かれている。なかなか厳しい見方である。ついでに言えば、中国、インドの高速炉計画への言及は皆無である。すなわち、「もんじゅ」、「常陽」が頼みの綱なのである。日本は世界に対して非常に大きく、かつ貴重なアドバンテージを持っていることを自覚すべきである。地元にも、理解とご協力を願って、国は、早く、「もんじゅ」、「常陽」を運転再開に持ち込むことが重要である。ロシア、インド、中国などはこのポジションを虎視眈々と狙っている。

“時は今だ！急げ！”といたい。

燃料サイクル関連の研究開発についても同じである。NEACの議論の中で、米国には使えるホットの施設のなさがひしひしと感じられる。この点、米国はまことに率直であり、日本に助けを求めている。日本も国内に眠る施設を精査し、国際的利用を検討すべきである。

米国に比べて、日本の原子力界にはまだまだ勢いがある。今こそ長期的な問題について世界をリードするべきである。例えば、国際的に活躍できる人材の養成、新たに原子力利用に参入しようとする国への支援、核不拡散を担保できる燃料サイクル技術および放射性廃棄物の管理と処分の技術の開発推進を日本のためという狭い目で見るのではなく、世界のために役立つにはという目で見て、リーダーシップをとってほしいものである。

(2008年12月5日記)



報告書



# 生命圏の安全保障

## 科学・政治の双方を凝視する学問領域 開拓を



吉田 文彦(よしだ・ふみひこ)

朝日新聞論説委員

1980年に東京大学文学部卒。1984-85年に、米国ジョージタウン大学 MSFS フェロー。2007年に、大阪大学より博士(国際公共政策)取得。主な著書は、『核解体』(岩波新書, 1995年), 『証言核抑止の世紀』(朝日選書, 2000年), 『人間の安全保障』(岩波書店, 2005年)。

米国のバラク・オバマ氏は2008年12月20日、インターネットとラジオを通じた演説で、科学技術担当の大統領補佐官にハーバード大学の物理学者、ジョン・ホルドレン教授を起用すると発表した。オバマ氏は、ホルドレン教授を「気候・エネルギーに関する業績で著名であり、気候変動の脅威を熱心に説いている物理学者」と紹介した。新政権が地球温暖化対策を重要視する立場であることを裏づけるような人事発表であった。

父親のG・H・W・ブッシュ、長男のG・W・ブッシュの両氏の政権とも地球温暖化対策では、先進的な欧州の動きに水を差し、気候変動がリアルな政治経済問題であることから目をそむける傾向さえあった。たとえば、こんなエピソードがある。

G・W・ブッシュ氏は1988年の大統領選挙戦で、「グリーンハウス効果(地球を温暖化させる温室効果)を前になす術がないと考えている人たちは、ホワイトハウス効果を忘れて」と語り、政治主導で地球環境保護に乗り出すと公約した。だが実際には、ホワイトハウス効果は薄かった。マサチューセッツ工科大を出て、長年、大学教授をつとめていたスヌヌ大統領首席補佐官は、地球環境問題に関しては経済面から一層の分析が必要との観点に立ち、温暖化対策には極めて慎重な姿勢をとった。

それが、「科学」と真正面からぶつかった。1989年5月8日に開かれた米上院の科学・技術・宇宙小委員会で、温室効果に警鐘を鳴らし続けていた米航空宇宙局(NASA)のジェームズ・ハンセン博士が温暖化対策を促す証言を準備した。ところが、政府職員の議会証言がホワイトハウスの方針から大きくそれていないかどうかを事前に点検する行政管理予算局が、ハンセン博士の用意した証言用テキストに手を加え、温暖化の危機感をやわらげる工作をした。ハンセン博士は「科学をねじ曲げようとするには反対だ」とホワイトハウスに不満をぶつけた。この委員会の当時の委員長は、後に副大統領と

なったアル・ゴア上院議員で、「政府は真実を恐れている」「証言に手をいれたのは、地球環境問題ですぐに行動したくないからだ」と、自分の意向にあわせた証言を前面に押し出そうとしたホワイトハウスを手厳しく批判した。

もちろん、科学に関する政策について異論はどんどん表明されるべきである。しかしながら、議会などで賛否両論を堂々とぶつけあうのが本来の姿であり、政府の意に沿わないものを「検閲」するのは科学を曲げる危険がある。ホルドレン教授がホワイトハウスに入ることで、温暖化問題も含めて、科学と政治をめぐる、歪んだ言論規制などなくなるものと期待したい。

ホルドレン教授と言えば、もうひとつ重要な「顔」がある。「パグフォッシュ会議」の事務総長をつとめるなど、核兵器の廃絶運動でも活躍してきたことだ。1995年にパグフォッシュ会議が、ノーベル平和賞を受けたが、その授賞式でホルドレン教授は、当時のパグフォッシュ会議会長だったジョセフ・ロートブラット氏に続いて演台に立った。受賞講演のなかでホルドレン教授は、核兵器廃絶の重要性を熱く語った。だが、授賞会場で聞いていて、ホルドレン教授が、「紛争のルーツ」をなくすことの大切さを力説したのも実に印象的だった。

「世界の多くの貧困層が直面する経済、環境の不適切な状況にこそ、紛争のルーツがあり、富裕層からの持続的な支援なしには紛争のルーツは絶えない。われわれはひとつの大気のもと、ひとつの大きな海のほとりで生存しているのであり、すべての国が人やお金、商品、兵器、薬物、疾病、そして思想の動きなどお互いにつながっている。したがって、われわれの行く末は、ふたつにひとつしかない。核を含めた大量破壊兵器がなくなっているか、あるいは存在価値がなくなり、環境面でも持続可能な繁栄が実現した世界。そうでなければ、こうした世界を実現することに失敗して混迷、紛争、破壊に苦しむ

世界。そのどちらかである」。会場は、文字通り、割れんばかりの拍手に包まれた。オバマ氏による人事発表の直後、バグフォッシュ会議のジャヤンサ・ダナパラ会長らが祝福の手紙をホルドレン教授に送り、その内容がウェブでも公開された。ダナパラ会長らは「核兵器による脅威をなくしたり、地球規模の気候変動を抑えたり、その影響を小さくしたりする、根本的な挑戦において、オバマ政権を手伝っていきたい」と協力の意向を伝えた。

かつてハンセン博士を強く弁護したゴア元副大統領は2007年のノーベル平和賞を受けることになり、その年の12月10日に記念講演をした。ゴア氏はこう語った。「20年以上前に科学者たちは、核戦争が勃発すると大量の塵や煙が大気に混じり、太陽光を遮って『核の冬』が到来する恐れがあると指摘した。今、科学は、地球温暖化汚染を早急に減らさないと、永続的な『炭素の夏』をもたらす危険があると警鐘をならしている」。そして、いずれの破滅シナリオも回避するために、「地球との平和を結ぶ時がきた」と強調した。地球生命の進化で頂点に立つ人間が、文明を支える生命圏を自らの手で崩壊させてしまう事態を防ぐことを国際社会の最重要課題とすべきである、との認識だろう。「核の冬」にも、「炭素の夏」にも大きな懸念を抱き、高い知見でもって地球規模の難題に挑んできたホルドレン教授が大統領補佐官となって、どのようなホワイトハウス効果を発揮するのか。注目したいところだ。

ホルドレン教授のように、科学者としての専門領域の業績だけでなく、政治、経済、社会が直面する難題にも強い関心を抱き、その解決に向けて考え、行動する。一流の Scientist であり、同時にさまざまな局面で Science Adviser たりえる人材、そうした教養の厚みを持つ人材の豊かさが、アメリカ社会の大きな強みであるように思える。その背景には、科学者、技術者に社会

的問題へ目を向けさせる教育が幅広く行われていることがある。ホルドレン教授が教鞭をとってきたハーバード大学ケネディスクールの Science, Technology and Public Policy Program は、科学・技術と公共政策の関係を幅広い、多様な視点から教育している。これはハーバード大学に限ったことではなく、米国の、あるいは欧州の一流大学の多くが実践していることである。

米国は米国なりの苦勞はあるだろうし、米国型が完全なモデルでもないだろう。しかし、そうであるにしても、日本の高等教育でも今後、ホルドレン教授のような人材を次々に生み出せるよう、教養の厚みに重点を置く教育をもっと広めていってもらいたい。もちろん、それが日本にないわけではなく、加藤周一さん(故人)、養老孟司さんら医学部出身の知識人が諸事万般について優れた論評をされるなど、理科系出身の論客も少なくない。だが、日本ならもっともっと、理科系論客の本が書店を賑わし、論壇に新風を吹かせても不思議ではないだろう。

科学と政治の双方を凝視する、新たな学問領域の開拓。それが、今後の日本の大きな課題であり、避けて通れない道でもあるだろう。この開拓を進める際に忘れておきたいのは、「われわれの行く末は、ふたつにひとつしかない。核を含めた大量破壊兵器がなくなっているか、あるいは存在価値がなくなり、環境面でも持続可能な繁栄が実現した世界。そうでなければ、こうした世界を実現することに失敗して混迷、紛争、破壊に苦しむ世界。そのどちらかである」というホルドレン教授の警句である。「核の冬」や「炭素の夏」といった地球規模の環境激変を抑止しながら、持続可能な平和と繁栄を希求する時代—いわば、「生命圏の安全保障」とも言うべき基本認識を持ちながら、身の回りや世界、宇宙に思いをめぐらす人材が綺羅星のごとく、日本から輩出されるようにしたいものである。(2008年12月21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。

## 柏崎刈羽の復旧順調、6号機も系統試験へ

柏崎刈羽原子力発電所の復旧作業が着実に進んでいる。最も進捗率の高い7号機では、耐震強化工事を終え、燃料を装荷した系統機能試験を開始。これに続く6号機も機器レベルの点検を終え、系統機能試験に入る。また3号機では変圧器を搬入、据え付け作業を開始した。

7号機の耐震強化工事は、配管等サポート、原子炉建屋屋根トラス、排気筒、原子炉建屋天井クレーン、燃料取替機などを対象に実施。約3,000か所に及んだ配管等サポート工事も11月3日までに完了した。同工事と並行して実施した系統機能試験も合計23項目のうちの燃料装荷の前提となる14項目を終え、るとともに、同17日までに燃料を装荷し、制御棒駆

動系機能など装荷後に行う試験を開始した。これにより7号機は復旧工事中のタービン設備関連を除き、最終段階となるプラントレベルの健全性評価の準備がほぼ整う。

6号機の耐震強化工事は、約2,600か所の配管等サポートの工事が約50%の進捗率だが、その他は10月までに終了。11月5日に系統機能試験を追加した点検・評価計画書を国に提出しており、近く7号機に続いて同試験に入る。

一方、地震発生の際、1台で火災が発生した3号機の所内変圧器2台と励磁変圧器1台が点検・修理を終え、11月17日に搬入、18日から据え付け作業に入った。(資料提供：日本原子力産業協会)

## エネ調・国際戦略小委、国・機関・事業者一堂に会し燃料供給など議論開始

総合資源エネルギー調査会原子力部会の国際戦略検討小委員会(委員長＝田中知・東大院教授)は10月30日、初会合を開催、世界的な原子力発電の拡大に対応した国際協力や関連産業の国際展開支援などの検討を開始した。今後、月1回程度のペースで審議、09年春には中間取りまとめの予定。

同小委員会の設置は8月の原子力部会で決定していた。初会合でエネ庁が示した主要検討事項は、①新規導入国への支援、②先進利用国との連携、③核燃料の安定供給確保とサイクル関連産業の強化、④我が国原子力関連産業の競争力強化と国際展開支援――など。

具体的論点として、新規導入国支援では国内推進体制の整備、政府と民間企業の連携、二国間支援と国際機関連携の組合せ、原子力損害賠償制度の整備など。先進利用国との連携ではサイクル政策やFBR技術開発の連携、安全規制協力など。燃料関連では国際的燃料寡占への対応、濃縮事業や再処理事業の戦略的展開など。関連産業では燃料を含むサプライチェーン構築に向けた国や電気事業者の連携、次世代軽水炉、電気事業者の国際展開、プラントメーカーを支える産業群の維持、ファイナンス政策、人材育成策などを挙げた。(同)

## 民主党政策、安全規制委の創設も

民主党は10月、現在までの党内政策論議を取りまとめた「民主党政策 INDEX2008」を発表した。

原子力政策についてもエネルギー分野の中で

れ、「原子力政策に対する基本方針」として、「将来展望を持ち、安全を第一として、国民の理解と信頼を得ながら、国際社会と連携協力して着実に取り組

む」と明記。

使用済み燃料の再処理・放射性廃棄物処分については、事業が長期にわたることなどから、「国が技術の確立と事業の最終責任を負うこととする」とした上で、「安全と透明性を前提にして再処理技術の確立を図る」方針を確認している。

さらに、国による原子力政策への説明責任の徹底を訴え、関連施設の立地自治体の十分な理解を得るため、国と自治体との間で十分な協議が行われる法的枠組みを作ることを検討する、としている。

「安全を最優先した原子力行政」の項目では、中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の被害や過去の原子力発電所事故を重く受け止め、原子力に対する国民の信頼回復に努める、としている。また、「万一に備えた防災体制と実効性のある安全検査体制の確立に向け、現行制度の抜本的な見直しを図る」とする一方、安全チェック機能の強化のため、国家行政組織法3条による（現行の諮問委員会ではない行政委員会として）独立性の強い原子力安全規制委員会を創設する、としている。（同）

## 日本製鋼がアレバと契約、主要鍛造品を長期供給

日本製鋼所とフランスのアレバ社は11月4日、2016年まで日本製鋼の大型の原子力主要鍛造品をアレバ社に供給する契約に合意した、と発表した。永田昌久社長とローベルジョン・アレバ最高経営責任者がパリで同日までに契約書に署名した。

契約は、世界でも有数の大型原子力鍛造品を製造できる日本製鋼が、アレバ社に原子力関連の大型鍛造品の長期供給を約束するもので、日本製鋼は08年4月にも同種の契約を締結しており、同社からさらなる供給増の要請を受け、16年までの供給を改めて合意した。

アレバ社は同日、日本製鋼の株式の1.3%を友好的に取得したことも明らかにした。

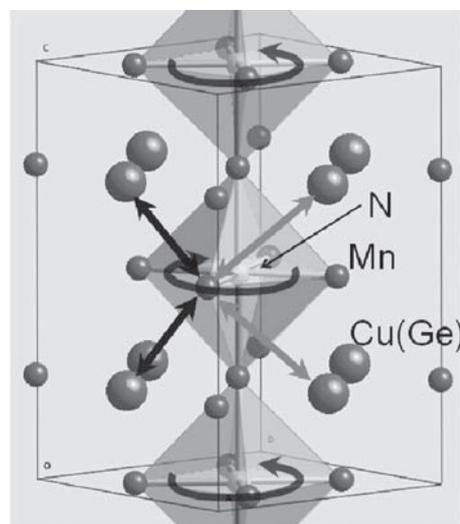
永田社長は今回の契約について、「わが社の主要設備拡張計画の次の段階に進むための確信を与えるものだ」と評価、また「両者の協力が、急拡大する原子力市場において重要な役割を果たすべく、ビジネス協力がさらに拡張されることを確信している」と述べ、ローベルジョン最高経営責任者も「原子力再生のため、我々は投資や世界での協働を進めなければならない。日本製鋼との協力もその一例だ」と語った。（同）

## インバー効果の100年にわたる謎に迫る—世界最大の負の熱膨張を示す物質で格子歪みを発見

日本原子力研究開発機構（原子力機構）、理化学研究所（理研）および東京大学（東大）は、パルス中性子回折実験と核磁気共鳴実験により、室温加熱で世界最大の負の熱膨張を示すマンガン化合物（ $Mn_3Cu_{1-x}Ge_xN$ ）において、窒化マンガン（ $Mn_3N$ ）8面体の局所的な回転に伴う格子歪みを発見した。

通常、物質は加熱により膨張するが、膨張しないものも存在する。その代表例として、シャルル・エドワール・ギヨームが1897年に発見し、1920年にノーベル物理学賞を受賞したことで知られる「インバー合金（ニッケル36%、鉄64%）」などが挙げられる。

この物質のインバー効果の発現機構は、発見以来現在まで100年以上にわたり謎とされてきた。本研



マンガン化合物の構造

究グループは、世界最大の負の熱膨張を示すマンガン化合物( $Mn_3Cu_{1-x}Ge_xN$ )を用いた実験を米国の装置で行い、得られた高精度のデータを国内で解析した結果、窒化マンガン( $Mn_3N$ ) 8面体の局所的な回転に伴う格子歪みを発見し、このことがインバー効果の謎に深くかかわる現象であることを今回世界で初めて明らかにした。

なお、本成果は物質・材料研究開発機構、理研および原子力機構が平成18年12月18日に締結した「量

子ビームテクノロジーの先導的研究開発に関する研究協力協定」の一環として、さらにその一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成を受けて実施したものである。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press2008/p08111802/index.html>)

(資料提供：日本原子力研究開発機構、理化学研究所、東京大学)

## 準商用規模で高性能被覆燃料粒子用被覆材の製造に成功し、照射試験を世界で初めて実施—原子力水素社会の実現に向けた燃料開発の技術が大きく前進

原子力機構は、水素エネルギー社会の実現に向け、950℃を超える原子炉出口温度での運転により高効率発電と熱化学水素製造など高温プロセスが利用可能な「超高温ガス炉(VHTR)」の研究開発を進めており、このたび、その実用化に有用な「高性能被覆燃料粒子用被覆材」を準商用規模で製造することに成功し、世界で初めて照射試験を実施することとなった。

現在の高温ガス炉は、TRISO型(TRi-ISOtropic；三重被覆)被覆燃料粒子の被覆材料に許容設計限界が1,600℃の炭化ケイ素(SiC)を用いているが、さらに高融点(約3,420℃)で耐熱性・化学的安定性等に優れた炭化ジルコニウム(ZrC)を被覆材料として導入することで、将来のVHTRの更なる高性能化(高温、高燃焼度)が可能になると考えられており、世界各国で、ZrCを被覆材料とした先進被覆燃料の開発・製造が進められつつある。

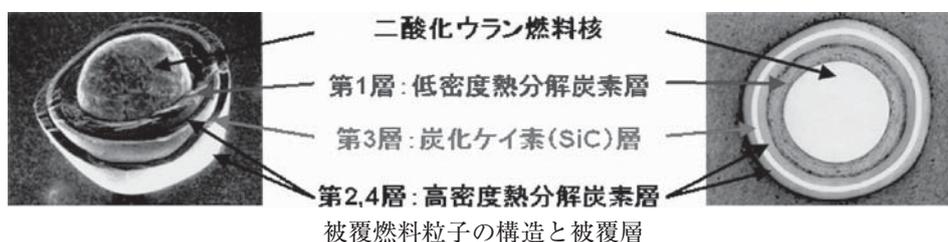
炭化ジルコニウム(ZrC)被覆燃料の性能を十分に発揮させるには、被覆材料に高い密度と高い熱伝導性が要求されることから、ジルコニウム(Zr)と炭素(C)の原子数比を限りなく1:1にするようなZrC

被覆層の蒸着が不可欠となる。しかし、これまでは過剰な炭素成分(遊離炭素)の発生による物性値の低下や不均一層の生成などが生じており、製造上の大きな技術的課題となっていた。

原子力機構は「臭化物法」と呼ばれる化学蒸着法を用いることで、均一なZrC被覆層の蒸着に成功し、併せて、燃料の品質管理に極めて重要なZrC被覆層の炭素とジルコニウムの原子数比を100分の1桁の高精度で測定する技術を開発したことで、高精度での原子数比の管理が可能となり、準商用規模で高品質(高密度でZrとCの原子数比が1:1)なZrC被覆層を製造することに成功した。また、この研究開発成果に関心を寄せる米国と共同で、世界で初めての照射試験を11月から開始した。

今後は、新型被覆材の製造法開発から性能試験までの研究開発において世界をリードし、超高温ガス炉による原子力水素製造社会の早期実現に向け取り組んで行く。

なお、本成果は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省の委託事業「革新的高温ガス炉燃料・黒鉛に関する技術開発」の一環として実施した



被覆燃料粒子の構造と被覆層

ものである。

(参考: <http://www.jaea.go.jp/02/press2008/>)

[p08111301/index.html](http://p08111301/index.html))

(資料提供: 日本原子力研究開発機構)

## 原産協会などが「気候変動国際シンポジウム」を開催

原産協会は11月17日、日米民間対話日本委員会との共催により経団連ホールで、「気候変動国際シンポジウム—エネルギー効率と革新的技術で目指す低炭素社会」を開催した。同シンポジウムは、「2050年のライフスタイル」および「低炭素社会へむけての技術の活用」の2つの観点からの議論を通して、地球温暖化防止問題について広く一般の方々に理解していただき、具体的活動へとつなげていくことを目的に開催したもので、国内外から約300人の参加を得た。

シンポジウムでは、日米民間対話日本委員会代表委員の南直哉氏、米国商工会議所21世紀エネルギー研究所副所長のフレデリック・スミス氏(代読)によ

る開会挨拶で開会。続いて、衆議院議員で元環境大臣の小池百合子氏と、米国国務省国連気候変動枠組み条約特別大使のハーランL. ワトソン氏が温暖化防止に向けた日本の役割や米国の取組みについて基調講演を行った。

この後、作家の神津カナナ氏をファシリテーターとして「2050年のライフスタイル」をテーマにパネルディスカッション、また、東京大学教授の松橋隆治氏をファシリテーターに「低炭素社会に向けた技術の活用—原子力・再生可能エネルギーの可能性」と題してパネルディスカッションが行われた。

(資料提供: 日本原子力産業協会)

## 第13回マキシマラソンが京都—高浜間を疾走

世界原子力従事者評議会(WONUC)およびNPO法人・持続的平和研究所(IISP)主催、日本原子力学会の共催による「第13回マキシマラソン in Japan」が11月4日、京都を起点に福井県高浜町までの110km区間で開催された。マキシマラソン組織委員でもある当協会の服部拓也理事長も、門川大作・京都市長や各国参加のランナー達とともに、第1区間前半の四条大宮から二条城までの京都市内を駆け抜けた。

マキシマラソンは「原子力産業で働く仲間が、国境を越えて力を合わせ、原子力に対するポジティブなメッセージを発信しよう!」との主旨。世界各国の原子力発電所や再処理施設の第一線で働くランナー達が年1回集まり、駅伝をしながら原子力平和

利用のPRを行うユニークなスポーツ・イベント。1996年にWONUCがフランスのパリ〜ブリュッセル間(約300km)で第1回が開催されて以来、今回が13回目となり、とりわけアジアでは日本が初めての開催地となった。

今回のコースは京都市内の四条大宮を起点として、関西電力・高浜発電所がある福井県高浜町までの約110kmを、各国のランナー達がメッセージの入ったバトンをつなぎ渡していくリレー形式。日本、フランス、ロシア、スイス、スペイン、ドイツ、リトアニア、ハンガリー、韓国の世界9か国から総勢約90名のランナーが参加し(うち海外からは60名強)、本イベントが世界の原子力従事者の交流の場として定着していることがうかがえた。(同)

## 原産協会、インド原子力学会参加訪印団を派遣

原産協会は、11月23日から29日まで、インド・ムンバイでの第19回インド原子力学会年会に参加する訪印団を派遣、また最近のインドの原子力事情を把握するため、インドの原子力関係者幹部との懇談および原子力関連施設の視察を行った。同訪印団は、

当協会服部理事長を団長とし、日立GE、東芝、三菱重工、伊藤忠商事などの会員会社が参加した。

原子力学会年会では、服部理事長が「世界的な原子力カルネッサンスと日本の役割」と題して講演。また、カコドカール原子力委員長、ジェイン・インド

原子力発電公社総裁など原子力界首脳と会合を行った。会合後の26日夜(現地時間)、ムンバイ同時多発テロが発生したが、団一行に被害はなく、カルパツカム近郊でFBRの研究開発を行っているインディ

ラ・ガンジー原子力研究所、マドラス原子力発電所、建設中の高速増殖原型炉(PFBR、電気出力50万kW)の見学を行った。(同)

## 「原産協会ハンドブック 会員人名録2009」を発行

原産協会は、「原産協会ハンドブック—会員人名録2009」を11月20日に刊行した。当協会会員450社の部長級以上を収めた「人名録」に加え、「資料編」として、低炭素社会の実現に向けて、2008年7月の洞爺湖サミットでも注目された原子力の位置づけに焦点をあて、関連資料を掲載した。B5判・360頁、頒価(消費税、送料込み)会員7,400円、非会員14,800円。お申込みは、当協会ホームページから。

また同協会では、今年1月から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。

10～11月の番組は以下の通り。

・第52回国際原子力機関(IAEA)総会レポート(10/17公開)

・第16回 PBNC 環太平洋原子力会議レポート(10/31公開)

・「マキシマラソン in Japan」(11/17公開)

・「気候変動国際シンポジウム」高レベル放射性廃棄物シンポジウム」レポート(12/22公開)

(資料提供：日本原子力産業協会)

### 海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

#### [中国]

### 中国とロシア、中国国内でFBR建設で協力へ

ロシアの国営原子力総合企業であるロスアトム社は10月17日、北京で開催した原子力に関する中国との定例会合で、中国の田湾原子力発電所への増設協力に加え、同国に80万kW級の高速増殖実証炉を協同建設するための了解覚書を作成することで合意したと発表した。

12回目となる今回の会合は、中ロ両国による首相レベルの定例会合開催準備の一環で開かれたもの。ロシア側からはロスアトム社のS・キリエンコ総裁率いる代表団が、中国側からは陳求発・国家原子能機構(CAEA)主任らが出席した。

中国では現在、ロシアの技術支援の下で遠心分離法ウラン濃縮施設を陝西省漢中で、高速実験炉(CEFR)を北京市郊外で建設中。また、江蘇省の田湾発電所ではすでにロシア型PWRであるVVER 1000が2基(各106万kW)稼働している。

今回の会合で両者は、このような原子力平和利用

分野における両国の交流の進展に満足の意を表する議定書に調印。今後の計画として、田湾発電所3、4号機の増設と、ロシアが国内で建設している80万kW級・高速増殖実証炉(BN-800)を中国で協同建設するための了解覚書案作成を双方の原子力当局に指示したとしている。

このほか両者は、次回第13回会合を来年にモスクワで開催することで合意に達した。

### ITER 計画で中国の窓口機関が発足

仏カダラッシュで国際熱核融合実験炉の開発を進めている国際熱核融合実験炉(ITER)機構は10月13日、中国でITER計画の具体的な業務を担当する窓口機関として「中国国際核融合計画執行センター(CN-DA)」が正式に設立されたと発表した。設立記念式典は10日に、中国科学技術省が北京で開催している。

ITER計画は、平和目的の核融合エネルギーが科学技術的に成立することを実証するため、2018年頃の運転開始を目指して人類初の核融合実験炉を実現しようとする超大型国際プロジェクト。中国は2003年に同計画における政府間協議に加わっている。

同日、ITER機構はまた、ITERを構成する超電

導コイルの一つであるポロイダル(PF)コイルの導体および巻線について、調達協定3件のうちの最初の1件をCN-DAと締結したことを明らかにしている。

PFコイルは全部で6個、ITERに取り付けられることになっており、調達配分についてはすでに、中国が全体の67%に相当する45.4km分の巻線を現物で調達することが決まっていた。残りのうち、19.7%(10.7km)はロシアに、13.3%(8.6km)はEUの割当となっている。

### 第3世代炉の自主開発機関設立

中国の国家核電技術公司(SNPTC)は10月30日、第3世代の原子力発電所の自主開発研究を促進するため、清華大学と共同で国家原子力技術研究センターを北京に設立したと発表した。

同センターは、ウェスティングハウス社(WH)が開発したAP1000など第3世代の原子炉技術を導入し、建設プロジェクトの実施などを通じて主要設備の国産化につなげる研究開発の中核機関に位置づけられるとしている。

SNPTCは07年7月、浙江省三門原子力発電所として4基のAP1000を建設することで、三門核電有限公司などとともにWH社と正式に契約した。フランスの技術を基礎に自主開発したCPR1000型炉(第2世代改良型)に続く新型原子炉を自主開発するためにAP1000の採用を決めたもの。現在、同機的设计に基づいて第3世代原子炉の基礎技術同化に努めている。

なお、三門発電所建設サイトでは、10月14日に1号機原子炉建屋の基礎マットへのコンクリート打設が完了した。今後は底部の鋼製格子や配管等の設置作業を実施する計画だ。

### カザフと中国、燃料供給と新規建設で協力

カザフスタンの国営原子力企業であるカザトムプロム(KAP)社は11月6日、中国向け原子燃料の共同開発を含む広範囲な原子力協力で中国核工業総公司(CNNC)および中国広東核電集团有限公司(CGNPC)と協力協定を結んだと発表した。

これは10月31日に、中国の温家宝首相がカザフの首都アスタナで同国のK・マシモフ首相と会談した際、両国の外務大臣が調印した両国間の複数の協力文書の一つ。叩き台となる覚書はすでに07年9月、中国の北京で締結済みとなっており、具体的な協力内容としてKAP社は、(1)中国への長期的な天然ウラン供給、(2)カザフ国内のウラン資源の共同開発、(3)中国の原子力発電所用の燃料加工、そして、同社にとっては新機軸の協力活動である、(4)中国の原子力発電所建設に対する協力——を挙げている。

KAP社は同協定の重要項目について、「発電所の建設にただ参加するのではなく、それらに対する燃料供給も行うことになる」と強調。一方、中国側はカザフの3つのウラン鉱床で参加権益を取得することになっている。

### カナダ原子力公社、CANDU炉用の新型燃料開発で中国に協力

カナダ原子力公社(AECL)は11月3日、中国で稼働するCANDU炉(加圧重水炉)への燃料供給が円滑に進むよう、新型燃料の共同開発で中国の第三秦山原子力発電公司(TQNPC)、中核北方核燃料元件公司(CNNFC)、および中国核動力研究設計院(NPIC)と正式に協力していくことになったと発表した。

この協力についてAECLは08年1月、NPICとの間ですでに了解覚書(MOU)の調印を済ませていた。今回、上海近郊で稼働する秦山第3期原子力発電所(CANDU6型炉2基、各72.8万kW)の運開5周年記念式典が北京で開催されたのに合わせ、両者間の戦略的な協定が正式に締結されたもの。中国で建設されるPWRの使用済み燃料からウランを回収し、秦山第3期発電所のように中国内で稼働するCANDU炉で利用可能な燃料の技術を中加両国の科学者とエンジニアが共同で開発することになる。具体的な協力活動は中国でのみ実施される予定だ。

AECLの発表によると、同公社のH・マクディアミド理事長はまず、「中国では2020年までに軽水炉の設備容量が5,800万kW分に達する見込み」と指摘。その上で、今回の実証プロジェクトは、これらの軽水炉の使用済み燃料からウランを回収し、中国で稼働するCANDU炉の燃料供給を保証するため

の道を拓くことが目的だと説明した。

同理事長はまた、「軽水炉を補完する CANDU 炉技術によって、中国は核燃料の輸入依存を大幅に軽減することが可能だ」と述べて、その利点を強調。同プロジェクトを補完するために、中国で豊富に産出されるトリウムを CANDU 炉で利用する可能性についても実証プログラムの実施を予定していることを明らかにした。

### [オーストラリア]

## 西オーストラリア州政府、3 鉱山政策を正式に撤廃

オーストラリアの C・バーネット西オーストラリア州政府首相は11月17日、ウランの採掘と輸出を既存の鉱山に制限した「3 鉱山政策」を同州の自由党・国民党連立政権が正式に撤廃したと発表した。

同州では9月の州議会選挙で8年間続いた労働党政権が倒れ、新しい保守連合内閣による同日付けの承認を受けて、ウランを含むすべての鉱物について採掘権が認められることになったもの。バーネット首相は「数千万ドルもの採掘権収入や雇用の機会に道が拓かれるとともに、気候変動対策にも我が州が大きく貢献することになるだろう」と述べ、キンタイアなど同州で確認済みのウラン鉱山で採掘操業が可能になったことを祝福した。

西オーストラリア州では、大型ウラン採掘プロジェクトの開発事業者は州政府と協定を締結することになっており、同州の開発大臣を兼ねるバーネット首相が実質的に取り扱う事項となる。ただし、実際の採掘作業では厳しい安全・保障条項を満たすことが義務付けられており、同首相は具体的に、(1)ウラン資源の平和利用と安全に関するすべての国際保障措置の適用、(2)ウラン鉱採掘と  $U_3O_8$  の輸送による環境影響面の承認取得、(3)採掘と輸送に従事するすべての労働者の安全確保——などを挙げた。

選挙戦中に労働党が主張していた「ウランの採掘を許せば西オーストラリア州がその廃棄物を引き受けさせられる」との懸念については、1999年に制定された放射性廃棄物貯蔵(禁止)法により、同州への廃棄物の持ち込みは実質的に禁じられていると首相は説明している。

同首相はさらに、オーストラリアには世界で確認

されているウラン埋蔵量の28%が存在するなど、資源量では世界第1位であるにもかかわらず、生産量は世界全体の22%とカナダに次ぐ第2位にとどまっている事に言及。西オーストラリア州で確認されている25のウラン鉱床からは4,100~52,000トンのウラン生産が可能との試算を明らかにした。

オーストラリアでは1996年に連邦政府レベルで3鉱山政策を廃止し、労働党も昨年4月に党大会で廃止を決めていたが、西オーストラリア州では歴代の労働党政権が州の権限でこれを維持していた。同州の政策廃止決定により、ウラン資源が確認されている州のうちで3鉱山政策を堅持しているのはクィーンズランド州のみとなった。

### [米国]

## CB&I 社、AP 1000格納容器納入で WH 社から EPC 契約を獲得

米国のエンジニアリング・建設企業であるシカゴ・ブリッジ&アイアン(CB&I)社は10月27日、米南東部にある電力コンソーシアムに AP1000、2基分の原子炉格納容器を納入する設計・調達・建設(EPC)契約をウェスチングハウス社(WH)から1億5,000万ドル相当で獲得したと発表した。

納入先の具体的な情報は明らかにしていないが、同社はすでに08年3月、このプロジェクトに関する事前のエンジニアリング契約を獲得していたとしている。110万kWの原子炉を格納するこの容器の大きさは直径120フィート×高さ215フィートほどで、同社は2009年からこれらの製造を開始し、最初の格納容器は14年に、2基目は翌15年に完成させる計画。同社はこれまでも、現在、米国で稼働する原子炉の格納容器の7割を供給した実績があるとしている。同社の P・エイシャーマン社長も、「米国原子力産業の拡大の中で継続的に役割を果たしていきたい」との抱負を述べた。

今年10月末までに米原子力規制委員会(NRC)に建設・運転一括認可(COL)が申請された AP1000は全部で12基。それらは、テネシー峡谷開発公社のベルフォンテ3,4号機、プログレス・エナジー・フロリダ社のレビー・カウンティ1,2号機、プログレス・エナジー社のシアロン・ハリス2,3号機、サウス・カロライナ・エレクトリック&ガス社の

バージル・C・サマー2, 3号機, サザン・ニュークリア・オペレーティング社のボーグル3, 4号機, およびデューク・エナジー社のウィリアム・ステーツ・リーⅢ1, 2号機となっている。

## 次期大統領にオバマ氏, ユッカマウンテンへの影響に懸念

11月4日に米国で行われた大統領選挙の結果, 民主党のB・オバマ候補が共和党のJ・マケイン候補を圧倒的大差で破り, 第44代米国大統領に就任することが決まった。明確な原子力支持を打ち出していた共和党のブッシュ政権に代わって, 原子力発電に対して慎重な立場を取る民主党が8年ぶりに政権の座につくことから, 新規原子炉建設への対応など, 今後の原子力政策の行方が注目される。

選挙運動中に明らかにされていたオバマ次期大統領の原子力政策は, 一言でいえば「条件付き容認」。「原子力は温室効果ガスを出さずに発電した電力の7割を占めており, 原子力を排除して積極的な温暖化防止目標を達成することは難しい」との現実的な評価を下している。その一方で, 原子力の拡大という点に関しては, 「核燃料と放射性廃棄物の安全保障, 核不拡散という課題への取組みが大前提」とし, 慎重な立場を崩していない。

また, 使用済み燃料の処分問題については, 07年10月にH・レイド上院院内総務に宛てた書簡の中で, 「健全な科学に裏打ちされた安全で長期的な代替案を模索すべきだ」と訴えるなど, ユッカマウンテン計画の放棄を強く進言。安全審査中の同計画遂行に何らかの影響が出る可能性は高い。

同書簡の中でオバマ氏は, 自らの選挙区で原子力が電力需要の50%を賄っている事実に言及した上で, 他の州の使用済み燃料をネバダ州まで輸送する際の住民の安全確保に懸念を表明。ネバダ州民の反対を押し切ってユッカマウンテンを処分地に決定したこと, 科学的見地から見た同地の処分場としての適性, および廃棄物を1か所に集中貯蔵することの適否にも疑問を呈している。

一層実行可能な代替案としてオバマ氏は, (1)国の永久処分場受入れを厭わない州を他に探す, (2)地方ごとに処分場を建設する, (3)あるいは安全で長期的な解決法が実行可能になるまで廃棄物を発電所敷地

内に安全に貯蔵できるよう資財を投入する——などを列記した。

なお, 米印原子力協力協定に関してオバマ氏は, 9月に原子力供給国グループがインドを特例扱いとすることを決定した際, これを歓迎する声明を発表。「議会への早急な協定案の提出を期待する」と述べるなど, インドとの原子力協力促進に意欲を示している。

## DOEの原子力諮問委, 次期政権に積極推進を勧告

米エネルギー省(DOE)・原子力局の独立の諮問機関である原子力諮問委員会(NEAC)は11月12日, 「原子力—21世紀の政策と技術」と題する報告書を公表し, 原子力がエネルギー供給保証や環境保全, 核不拡散に与える影響と役割について政治的および技術的側面から検証するとともに, 新政権のDOEに対して, 米国がユッカマウンテン計画も含めた原子力計画を継続し, 国際的なリーダーシップを発揮するためにグローバルなアプローチを取ることの重要性を訴えた。

1998年に設置されたNEACはW・マーチン元DOE副長官を委員長に, ノーベル賞受賞者を含む著名な科学者や原子力分野の学識経験者, 連邦政府の官僚, および産業界リーダーなどが参加。日本人としては植松邦彦・元OECD原子力機関事務局長が昨年末から加わっている。

今回の報告書は今春, D・スパージョン原子力担当次官補がNEACに作成を依頼していたもので, NEACは「政策」と「技術」の2小委員会を設置し作業に当たった。

「政策小委員会」は, 次期大統領が政策を検討する際に必要となる重要な選択肢と意義の追求が役割。エネルギー自給率の改善や温室効果ガスの排出抑制などの点で, 原子力を米国のエネルギー構成要素の一つとする利点を強調する一方, 原子力発電所建設に要する資金や所要時間の面でリスクと不確実性が存在すると指摘した。

こうした不確実性により, 将来の原子力開発に関して確実な判断を下すことは難しいと結論付けており, あり得る開発シナリオとして, (1)新規原子炉が建設されない低成長シナリオ, (2)新規に12基以上

(1,700万 kW 相当)の原子炉が建設される中成長シナリオ、(3)4,500万 kW 分の新規原子炉が建設される高成長シナリオ——の3種類を提示した。(1)の場合は経済成長率の低下、電力料金の上昇を招くとNEACは予想。(2)、(3)については、建設される原子炉の多少に関わらず、廃棄物管理や安全性など取り組むべき課題に変わりはないとした。ただし、(2)では温室効果ガスの排出量に実質的な削減は見込めないこと、(3)では排出量を抑えられる反面、原子力発電を支えるインフラ整備が追いつかないなどの点を指摘している。

燃料サイクル関連では、研究開発の結果、ユッカマウンテンを含め多くの地点で廃棄物貯蔵の難しい状況を大きく変えることができるとNEACは指摘。米国は放射性廃棄物を処分するその他の選択肢を模索しつつ、ユッカマウンテン計画への許認可手続きを完遂すべきだと強調している。

## NRG社、エクセロンの買収提案を拒否

米ニュージャージー州に本部を置く電力会社であるNRGエナジー社は11月9日、シカゴの大手電力のエクセロン社が10月に申し入れてきた約62億ドル相当の買収提案を拒否すると発表した。

拒否理由としてNRG社は次のような点を挙げている。すなわち、(1)エクセロン社による日和見的タイミングの申し入れは絶対的な価値判断でも、エクセロン社株との相対的な比較でもNRG社を甚だしく過小評価している、(2)NRG株1株につきエクセロン社株0.485株と交換するという条件では、統合新会社の2008年キャッシュフローの30%を提供するNRG社株主が、新会社の17%しか保有しないことになり、彼らにとって最善の利益にならない——など。

これらは買収提案について独立の財政および法律顧問らと注意深く審議した後、取締役会が全会一致で下した決定であるとNRG社は説明している。

## 【英国】

## ロールス・ロイス社、UAEの原子力計画支援

7月に民生用原子炉市場への参入を宣言した英国のロールス・ロイス社は11月4日、アラブ首長国連邦(UAE)の首都アブダビが同国の潜在的な民生用原子力開発利用計画の支援拠点となる産業機能を有しているか否かについて評価する作業をUAEの「首長国原子力会社(ENEC)」と共同で進めることになったと発表した。両者の了解覚書(MOU)はアブダビで調印済みとなっている。

将来のエネルギー不足に対する懸念からUAEは08年4月、原子力の平和利用を実施するための評価と可能性のある開発方針を公表。ENECはこの方針に沿って現在も組織形成の途中段階にあり、正式に発足すればUAEを構成する7首長国の一つであるアブダビ首長国政府の機関としてUAEの原子力発電計画を牽引、監督していくことになる。こうした構想の中でアブダビ首長国は、UAEの潜在的な民生用原子力開発利用計画における機器・設備に関して専門的知見や機能の面で中心拠点となることを目指しており、今回、その潜在的な能力について評価を行うことになったもの。

一方、ロールス・ロイス社は民生用および防衛用の航空宇宙産業やエネルギーなど、あらゆる事業分野で中東におけるプレゼンスを徐々に増大させており、アブダビではすでに、政府系ファンドであるムバダラ開発公社傘下の企業と複数の協定を締結。同国の国営航空会社であるエティハド航空やアブダビ航空技術社、アブダビ造船会社とも協力関係にある。

なお、今回のMOUは、英国のG・ブラウン首相が1日から4日間の日程でUAEを含む中東諸国を歴訪した直後に結ばれた。同首相はこの歴訪にE・ミリバンド・エネルギー相およびP・マンデルソン・ビジネス・企業・規制改革相のほか、27名の産業界代表団を伴ったことを明らかにしており、ロールス・ロイス社のJ・ローズ最高責任者もこの一行に加わっていたと伝えられている。

[フランス]

## アルストム社、PWRのタービン改修へ

フランスのタービン発電機器メーカーであるアルストム社は10月20日、フランス国内で稼働する90万kWと130万kW級PWRのタービン発電機改修契約についてフランス電力(EDF)と枠組み協定を結んだと発表した。

同社はフランスで稼働するPWR58基のほぼ全基にタービン発電機器を納入した実績があることから、今後10年間に総計1億4,000万ユーロでEDFから発電機の改修を請け負ったもの。パリ郊外のラ・クーヌーヴおよびフランス北東部のベルフォールにある同社のパワー・サービス・ユニットがプロジェクト管理を担当し、概念設計や部品供給、現地作業などを統括する。

発電機の性能を向上させる先端技術の一つとして同社は、中空ステンレス鋼の導線を使用した固定子パーの採用を検討中。これにより銅製の固定子パーによる制約を軽減できるほか、保守点検の簡素化が可能となり、稼働率の向上につなげることができると同社は強調している。

[イタリア]

## 原子力の復活目指し、ロシアと原子力協力へ

イタリアのC・スカヨラ経済開発相は11月6日、イタリアは第3世代の原子炉を建設することを目指して、ロシアの原子力総合企業であるロスアトム社と協力していくための意思表明書に署名したと自身のウェブサイト上で明らかにした。

同相によると、同日、ロシアのクレムリン宮殿で開催されたイタリア・ロシア両国のサミットで、イタリアのS・ベルルスコーニ首相はロシアのD・メドベージェフ大統領やV・フリステンコ産業エネルギー相らと会談。その中で両国は、広範囲の経済協力分野で14の合意文書に署名しており、原子力協力

もそのうちのひとつだと説明している。

具体的な協力内容は、第3世代原子炉の建設とその研究開発、および第4世代原子炉の設計と原型炉建設などで、協力に関する意思表明書には、ベルルスコーニ首相に同行していたスカヨラ経済開発相がロスアトム社のS・キリエンコ総裁と署名した。

なお、関連の報道によると、キリエンコ総裁は、「ロシアは3～5年以内にイタリアが原子力発電を復活できるよう同国を支援していくことになるだろう」と述べたと伝えられているほか、共同活動プログラムを策定するための両国の作業グループも半年以内に設置することになるという。

[国際]

## IAEA、ITER機構と協力協定

国際原子力機関(IAEA)は10月13日、国際熱核融合実験炉(ITER)機構と核融合研究に関する協力協定に調印したと発表した。

この協定は、IAEA憲章およびITER協定における目標を効率的に達成するという観点から、両機関の実務関係強化を目的に結ばれたもの。10月13日からジュネーブで開催された第22回IAEA核融合会議の初日に、IAEAのY・ソコロフ事務局次長とITER機構の池田要事務局長が署名した。

協力内容としては、核融合技術の応用可能性や研究に関する情報交換や両機関が開催する会議、すなわちITER理事会やIAEA年次総会、およびそれぞれの科学技術関係会議への相互参加が明記されている。また、両機関は核融合関係の研修や出版物、科学会議の開催、プラズマ物理とデータのモデル化、および核融合安全保障などの分野で協力していく予定。同協定ではさらに、核融合計画を実施していない国々にも同研究を普及させるとともに、将来的には研究活動への参加を求めていくとしている。

IAEAはITER計画が始まった当初から、関連する交渉の仲介などを通じてITERとかかわっており、同事務局長はITER協定の保管人も務めている。

同協定は両者の署名により直ちに発効した。

## 我が国の最先端原子力研究開発

## シリーズ解説 第8回

## 量子ビームが切り拓く未来(IV)

## 光量子・放射光利用技術のフロンティア

日本原子力研究開発機構 水木純一郎, 青木勝敏, 小池雅人, 横山啓一

光は、中性子ビームや放射線に比べると昔から身近な存在であり、今さら「量子ビーム」としてとりあげなくともよいのではと思われるかもしれない。しかし、電磁波である光は他の量子ビームと本質的に異なる存在であり、お互いに相補的な関係にある。そのため量子ビームの総合的利用を考えると、光を抜きにしてその戦略的重要性を論じることはできない(注：放射線の一種である $\gamma$ 線も電磁波)。本稿では、現代科学を牽引する2つの光(レーザーと放射光)の利用技術開発の現状について解説する。

## I. はじめに

量子ビームの最後のシリーズに来て、ここであらためて量子ビームを定義しておこう。量子ビームとは、ビームが一つ一つの粒として表現されたり、場合によっては波として表現されるだけでなく、相互作用する相手(我々が対象とするのは主に物質)の量子状態を制御することのできるビームである。これまでのシリーズで、すでに中性子ビーム、イオンビーム、電子ビームの解説があったが、これらのビームは質量があるので、粒として表現されるのはごく自然に受け入れられるであろう。しかし、これから解説するレーザーや放射光はともに電磁波であり、質量はなく、日常生活の中では波だけの性質をもつものとして受け入れられている。しかし、これらも「光子」という粒として表現がされることによって様々な現象が理解される場合が多々あり、さらに元素やそれらから構成される物質の量子状態を制御することのできる立派な量子ビームである。

光はエネルギー、偏向特性、運動量を持っているが、レーザーはこのほかに位相が100%そろった光として特徴づけられ、1950年代に発明された時には革命がもたらされたといわれた。今ではレーザーは情報通信を中心とした我々の生活の様々なところで利用されているが、こ

のような利用のしかただけでなく、レーザーの短パルス性、強力な強度、位相を利用して、物質など相互作用する相手を改質したり、破壊することによって陽子やイオン、電子、X線などの2次量子ビーム発生のための作用子としての利用もされてきている。

放射光という言葉になじみの薄い読者のために簡単に説明しておく、光速に加速された電子がその進行方向を変えたときに放射する光のことであり、赤外線から硬X線までの幅広いスペクトルを含んだ電磁波である。電磁波であるレーザーや放射光は、電磁相互作用によって直接電子と相互作用をするために、物質の電子状態を直接観察する量子ビームとして非常に有効である。特に電子ビームと比較すると相互作用の大きさが非常に弱いため、物質を乱すことなく「やさしく」観測するプローブである特長を持つ。しかし、「やさし」すぎるために物質と相互作用をした結果、散乱されてきた光の量(散乱断面積)は少なく(小さく)、ナノ領域やナノ物質、微小元素に注目した結晶構造や電子状態の定量的な詳細解析をするためには強度の強い光が必要となる。このために放射光が必要となり、様々な科学分野で利用されるようになってきている。

本解説では、量子ビームであるレーザーを主に作用子とした最先端の利用、この中でも特に原子力にかかわる材料に関する研究を、また量子ビームである放射光を観測するためのプローブとした最先端の利用を紹介し、それぞれの量子ビームとしての魅力を感じていただきたい。ちなみに、SPring-8ではX線自由電子レーザーの建設が始まっており、X線のエネルギー領域で位相が100

*Quantum Beams Open up the Future (IV)* : Jun'ichiro MIZUKI, Katsutoshi AOKI, Masato KOIKE, Keiichi YOKOYAMA.

(2008年 12月15日 受理)

%そろった光の利用が迫ってきている。レーザーで開発されてきた位相を活用した利用法が X 線領域で適用され、ブレイクスルー創出が期待されている。

## II. 光量子科学研究の最前線

### 1. レーザーの原理

物質中の電子の状態により区別される 2 つのエネルギー準位を考えたとき、エネルギーの高い方から低い方に電子の状態が変化すると、この 2 準位間のエネルギー差に相当するエネルギーの光子が発生する。この電子状態の変化は自発的にも起きるが、系の外部から同じエネルギーの光子が入ってきた場合にも起きる(誘導放出)。このような 2 準位系の集団を考えたとき、エネルギーが高い方の電子状態にある系の割合が低い方のそれよりも多いと(反転分布)、この誘導放出を繰り返すことにより最終的に蛍光が増幅される。これをレーザーと呼ぶ。誘導放出の原理のおかげで、発生する全光子を位相まで含めて単一の状態にそろえることができる(エントロピーゼロ)。そのためレーザー光は空間、時間、波長の分解能を極限まで高めることができ、エネルギーの集中や精密な制御に有効なツールとなる。

### 2. 世界の研究開発の現状

1950年代にレーザーが発明されて以来、レーザー開発の現場では、高出力化、短パルス化、小型化、波長域の拡大など様々な新しい技術が追求されてきた。それらの中でも短パルス化において、近年、飛躍的な進歩があった。1985年に Mourou らが考案したチャープパルス増幅法により、フェムト秒(1 フェムト =  $10^{-15}$ )という極短パルスの高出力レーザーが作られるようになった。このレーザー光を回折限界近くまで集光することにより、瞬間的ではあるが、今まで実現できなかった超高強度の場を作ることができる。そこでは、物質中の電子が原子核から引き剥がされ光電場につれて激しく運動する(レーザー駆動プラズマ)。これを利用すれば、高エネルギーのイオンや電子、中性子、X 線、テラヘルツ波などの極短パルス量子ビームを卓上サイズの装置で発生できることがわかってきた。そのため世界各国で極短パルス超高強度レーザーの開発が国家的なプロジェクトとして進められている。

レーザー駆動プラズマを用いた陽子線源の開発が行われている。その特徴は、①発生時間が数ピコ秒以下(1 ピコ =  $10^{-12}$ )、②ピーク電流が100万 A 程度、③ビームの直進性が非常によい、④発生領域が直径10  $\mu\text{m}$  程度と非常に小さい、⑤エネルギースペクトルの帯域が極めて広い、などである。現在、各国で陽子数増大などの研究が進められている。また、X 線源の開発も行われている。従来の放射光より格段に明るく、空間および時間分

解能に優れた高コヒーレントな X 線源(プラズマ軟 X 線レーザー)が実現されている。その発生原理は、プラズマ中に生成する多価イオンに見られるエネルギー差が大きな 2 準位間の反転分布を利用する。現在、主流となっている電子衝突励起方式は1984年、ローレンスリバモア国立研究所(LLNL)において、慣性核融合用の超大型レーザー施設を用いて実証された。現在も高輝度化などの研究開発が世界各国の研究所で進められている。

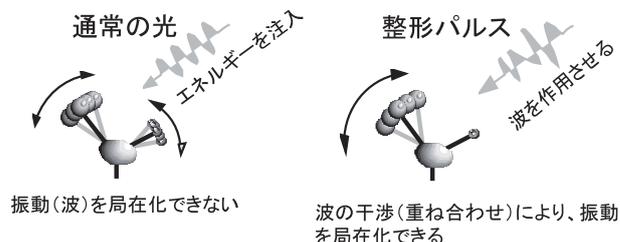
極短パルスレーザーの登場によって「アト秒科学」(1 アト =  $10^{-18}$ )と呼ばれる科学の新領域が拓かれようとしている<sup>1)</sup>。フェムト秒よりもさらに短いアト秒の時間幅を持つ光パルスにより物質中の電子の運動を直接観測し、あるいは操作することが可能になる。そのため、世界各地でアト秒パルスの発生・計測・利用技術の研究が進められている。現在のアト秒パルス発生方式のほとんどは極短パルスレーザーの高次高調波を利用している。

極短パルスレーザーを化学結合の切断や組み換えに利用しようとする研究も行われている。フェムト秒というタイムスケールが分子振動のそれと一致することから、精密な分子(量子)制御が実現できるのではないかと予想されている(第1図)。そのためには、レーザーパルス波形を自由に整形する技術が必要であり、極短パルス超高強度レーザーの開発で培われた波形制御技術が転用されている。現在、様々な実証研究が欧米や日本で進められている。例えば、量子情報の演算操作、ポーズアインシュタイン凝縮分子の生成、化学結合選択的解離性イオン化などが報告されている。

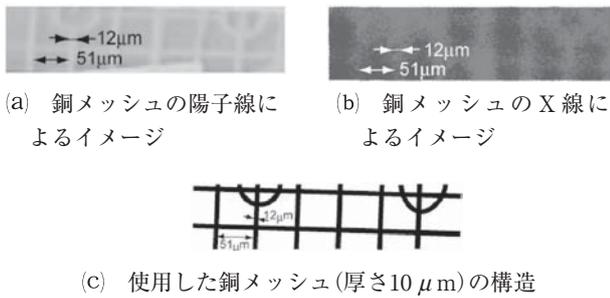
### 3. 日本の研究開発の現状

我が国では大阪大学や東京大学などにおいて、極短パルスレーザーの研究開発が進められているが、本節では日本原子力研究開発機構関西光科学研究所で進めている研究開発について紹介する。

レーザー駆動プラズマを用いた陽子線源の開発では陽子線数の向上を目指して研究開発が行われている。エネルギー1.7 J、パルス幅34 fs(フェムト秒)のレーザーにより約 $10^{12}$ 個/パルスの陽子線数を得ることに成功した<sup>2)</sup>。レーザーから陽子線へのエネルギー変換効率3%は同等クラスのレーザーを使用した場合としては世界最高を記録した。また、時間同期性が保証された多種類のビームが空間上の同一の点から発生するため、多種類の



第1図 波形整形パルスによる分子制御の概念図

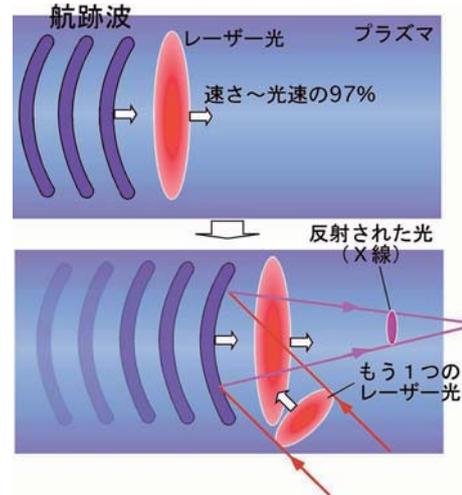


第2図 レーザー駆動陽子線およびX線による同時イメージング

情報を同時に可視化できる画像診断(イメージング)が新しい利用方法として考えられる。陽子線およびX線と同時に用いた銅のメッシュのイメージングに成功した(第2図)。X線によりサンプルの形状および密度分布を可視化するとともに、陽子線によりサンプル中の電場磁場の分布を可視化することができた。この結果は、レーザー駆動プラズマが新しいタイプのビーム源となる可能性を示す一つの例である。

プラズマ軟X線レーザーの開発では、チャープパルス増幅を取り入れたネオジウムガラスレーザーの開発を行い、波長12nm(ナノメートル: 1ナノ=10<sup>-9</sup>)までの小型高輝度軟X線レーザーの開発に成功した。また、独自に開発したダブルターゲット方式による完全な空間コヒーレンスを有する軟X線レーザービームの発生(第3図)などを世界に先駆けて実現した。応用研究として、軟X線スペックル分光法による強誘電体の相転移直上におけるドメイン構造の格子揺らぎの瞬間撮像や、希ガス原子のクラスターと高輝度軟X線パルスの相互作用メカニズムの解明といった研究が行われた。

アト秒パルス発生方式として、レーザー駆動プラズマを用いた極めてユニークな発生方式を研究している。これは、近赤外のフェムト秒レーザーパルスを、ほぼ光速に加速した「鏡」(光速飛翔鏡)で反射させるものである。鏡が止まっていれば、反射された光の波長は変わらないが、動いていればドップラー効果により波長とパルス幅が圧縮され、極端紫外光や軟X線のアト秒パルスが得られる。我々は、この飛翔鏡を超高強度レーザーがプラ



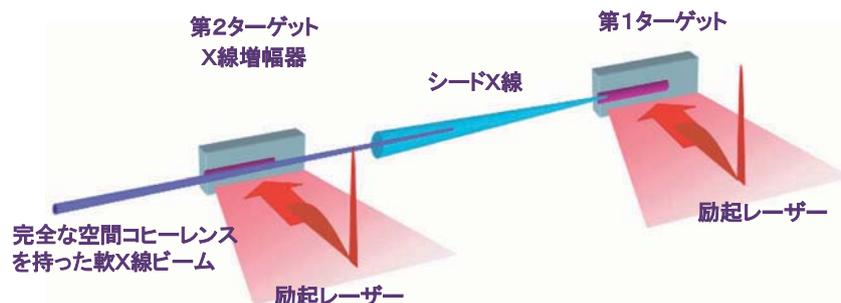
第4図 飛翔鏡によるX線発生概念図

ズマ中に作り出す航跡波と呼ばれる電子疎密波を用いて実現している(第4図)。検証実験では、2TW(テラワット(1テラ=10<sup>12</sup>)), 80fsのチタンサファイアレーザーを用いてヘリウムプラズマ中で鏡を作り出し、もう一つのチタンサファイアレーザー光を30μm程度に集光し衝突させ、波長が60-100分の1に圧縮された光を観測した。現在、反射光強度の増大とその諸特性の実証を目指した研究が進められている。

パルス波形整形による量子制御の研究では、放射性廃棄物の分別を目的として同位体分離基礎過程の研究が原子力機構において進められている。セシウム近接準位を対象に、量子制御による超高速選択励起が実証された。実験では、従来法に比べて100倍以上の選択性が得られており、同位体選択の新しい方法としての可能性が示された。

#### 4. 今後の課題

陽子線源の開発では、陽子線の更なる変換効率の向上、および最高エネルギーの増大、X線の増強などの課題が残されている。軟X線レーザーでは、現状のパルスエネルギーを1桁程度上げることにより、シングルショット撮像によるナノスケールの軟X線ホログラムや回折イメージングを実現すること、発振波長の短波長化による生体試料への応用が重要なテーマと考えられて



第3図 ダブルターゲットによるプラズマ軟X線レーザー発生方法

いる。アト秒コヒーレント X 線源では、安定な光源開発と同時に、今までにない光源の性能を生かすための計測手法や実験手法についても新しい方法を開発する必要がある。量子制御では、凝縮相などでの緩和を克服する技術、分子冷却や配向など熱分布を克服する技術などがあげられる。さらには、生体分子や重元素の制御に必要となる高出力テラヘルツ光源の開発とパルス波形整形技術の開発が望まれている。将来、これらの技術が開発され放射性廃棄物の同位体分離が実現すれば、廃棄の必要な元素のみを抽出できるため、放射性廃棄物の処理・処分プロセスに大きく貢献するものと考えられている。

### Ⅲ. 放射光科学研究の最前線

#### 1. 放射光の発生原理と光源特性

放射光は、光速近くまで加速された電子を磁場で曲げることによって進行方向に放射される電磁波である。放射光の発生は半世紀以上も前の1947年に、電子シンクロトロンで初めて観測された。発生する電磁波は硬 X 線 (~0.01 nm) から赤外線 (~100  $\mu$ m) までの広い波長範囲に及ぶが、主として使われるのは軟 X 線から硬 X 線までの X 線である。放射光の電子のエネルギーが高いほど指向性の強く、輝度が高くなり、進行方向の変化(加速度)が大きくなるほど波長は短波長側へ拡張される。偏向電磁石は電子の行路をリング状に保つための磁場発生とともに、連続した波長の光を取り出す光源として使用される。より輝度の高い光を発生させるためには、アンジュレータと呼ばれる磁石列やウイグラーと呼ばれる磁石列が利用され、これらは挿入光源と呼ばれている(第5図)。

放射光の特徴は、高輝度、高指向性、広波長領域、高偏向、パルス性である。第3世代の大型放射光施設 SPring-8 の X 線の輝度は従来、実験室で使用されていた X 線発生装置の1億倍である。また、放射光ビームの分散の指標となるエミッタンスは数 nmrad であり、レーザーのように指向性の強い光である。放射光は再びレーザーと同様に直線偏向である。この直線偏向は光学素子を使うことによって任意の方向へ偏向面を回転させることも、また、円偏向に変換することも可能である。放射光 X 線の偏向測定は、電子構造や磁性構造の微細構造測定に大きな威力を発揮している。蓄積リング内では、電子は束(バンチ)として運動している。発生する放射光はパルス光であることから過渡現象を観察する上で有効である。



第5図 放射光発生の原理図

#### 2. 世界の研究開発の現状

第1世代と呼ばれる電子シンクロトロンからの放射光発生(1950年代)、第2世代の放射光専用の電子蓄積リング建設(1970~80年代)を経て現在の第3世代放射光施設に至っている。第3世代の特徴は、電子エネルギーの上昇に加えてアンジュレータやウイグラーなどの挿入光源が数多く配置されていることである。第3世代大型放射光はヨーロッパ各国が共同で建設し、運営している ESRF (European Synchrotron Radiation Facility, フランス, グルノーブル, 1994年利用開始), APS (Advanced Photon Source, 米国, アルゴンヌ, 1996年利用開始) と旧原子力研究所と理化学研究所が共同で建設した SPring-8 (播磨, 1997年利用開始) の3施設がある。電子エネルギーはそれぞれ 6 GeV (リング周長844 m, ビームライン数56本), 7 GeV (1,104 m, 68本), 8 GeV (1,436 m, 62本) である。SPring-8 では放射光の強さを一定に保つため、数分ごとに電子を打ち込むトップアップ運転を開発、確立しており、光源の安定性は抜き出ている。

ここ数年、電子エネルギーとしては 3 GeV 程度と大型放射光施設の 6~8 GeV と比べて低いものの、挿入光源を活用した中型放射光の建設が相次いでいる。英国の Diamond, 上海の SINAP, カナダの CLS, ブラジルの LNSL などである。一方、SPring-8 を始めとする第3世代放射光施設の利用が開始されてから10年を超え、中期的・長期的な視野にたった高度化計画が各施設から打ち上げられている。ESRF では2007年秋、施設の高度化・拡張化とともに研究領域の戦略的選定に関するワークショップが開催されている。APS, SPring-8 においても同様な取組みが始まっている。

#### 3. 放射光利用研究

放射光利用研究は多岐にわたるが、利用されている実験手法はいずれの放射光施設でも同様であり、回折・散乱 X 線による原子配列、電子密度分布、構造揺らぎ測定、透過 X 線によるミクロンサイズのイメージ測定、X 線吸収による電子状態、局所原子配置測定、光電子分光による電子状態測定、蛍光 X 線による微量元素分析などである。研究分野も広範であり、物性と電子構造の關係の解明を目指す物質科学、触媒や表面での反応機構の解明を目指す化学、タンパク質の3次元構造解析を目指す生命科学、地球深部物質の構造と状態解明を目指す地球科学、その他、環境科学、医学、産業、核物理などの多くの分野での研究開発に利用されている。

本節では、日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門放射光科学研究ユニットが SPring-8 を拠点に取り組んでいる放射光利用研究の中から、原子力エネルギー技術開発に関連する研究例を紹介する。

(1) X 線回折法による構造材料の応力分布測定  
機械や構造物中に存在する残留応力は「隠れた力」とも

いわれ、部材の破壊や疲労強度に大きな影響を持つばかりでなく、部材寸法の安定性をも左右する。X線や中性子、放射光を光源とする回折測定による応力測定法は、非破壊であること、測定精度が高いこと、非晶質材料も含む多種多様な結晶質材料に適用できることから広く利用されている。SPring-8の放射光源を用いた応力測定法は、光源の高輝度、高指向性、エネルギー可変という特長を活かして、従来の測定では困難とされてきた微小領域( $\sim 1 \mu\text{m}$ )、内部応力分布(深さ分解能 $\sim 20 \mu\text{m}$ )などに利用されている<sup>3)</sup>。

内部応力分布測定法の光学系を第6図(a)に示す。入射側および受光側にスリットを配置して観測領域を切り出し、X線回折パターンを測定することにより、材料内部の格子面間隔 $d$ を決定する。格子面間隔 $d$ と応力フリーな材料から得られる格子面間隔 $d_0$ の差より、材料内のひずみ量 $\epsilon_z$ を求め、さらに、材料のひずみ-応力関係式を利用して応力 $\sigma$ を導出する。材料をxyzステージ上で3次元的に移動しながら測定することにより内部応力分布を得ることができる。

第6図(b)は厚さ10 mmのSM 570フェライト材(SM 570)の溶接部付近における、溶接線に垂直な方向のひずみ分布を示す。溶接部の表面と中央部の母材との境界付近に強い引張りひずみが、そのひずみと釣り合うように溶接中心から7 mmはずれた表裏面に強い圧縮応力がそれぞれ発生している。このようなひずみ分布を高分解能で測定できるのが放射光応力測定の特長であり、応力腐食割れやき裂による破壊の機構解明など、原子炉材料を含むさまざまな実機材への適用が期待される。

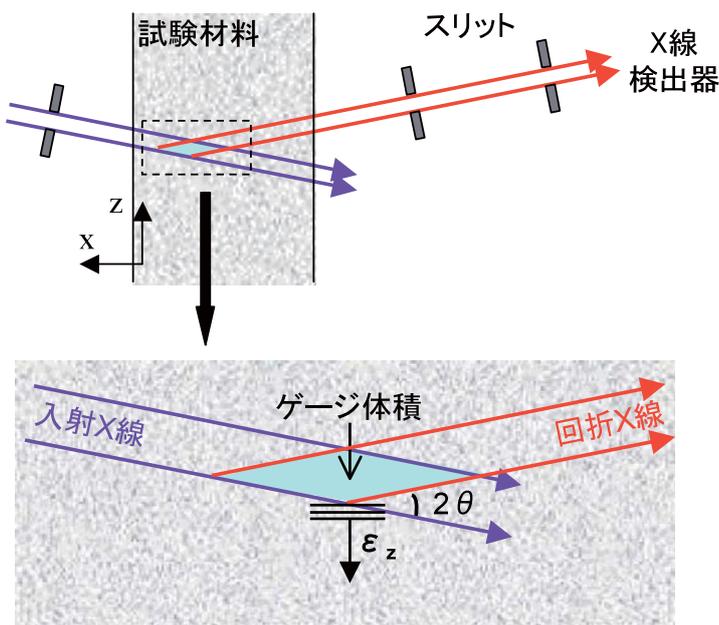
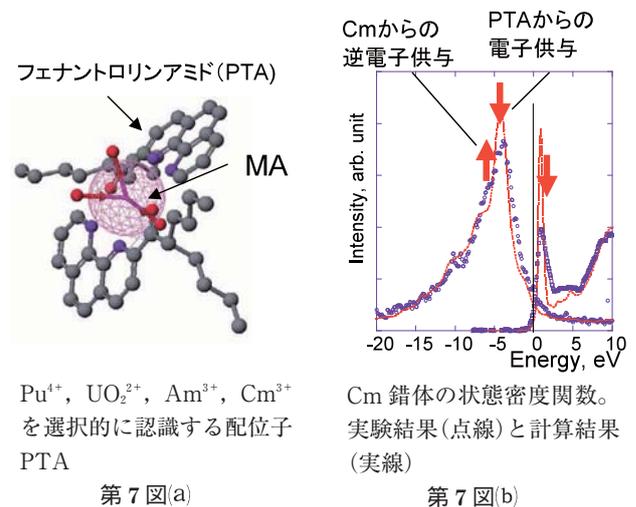
## (2) 放射光分光法によるイオン認識機構の解明

有機配位子がイオンに錯形成する場合には、イオンのサイズ認識など構造的要因、化学結合による認識など

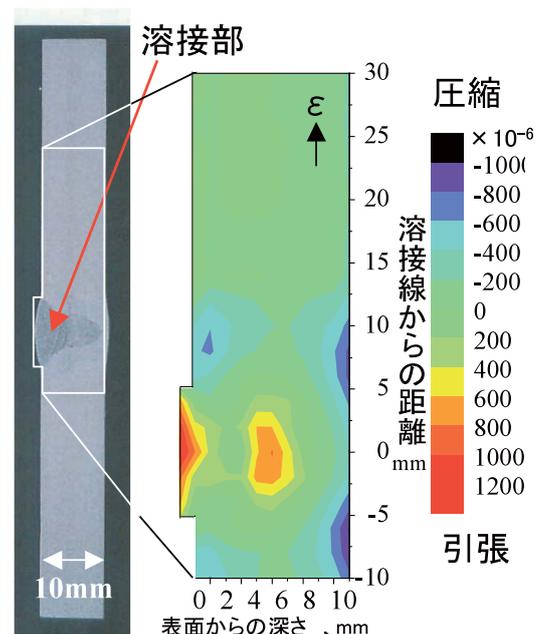
様々なファクタがある。また溶液化学的な観点から、錯体の溶媒和、界面移動、凝集なども重要なファクタである。放射光はこれらの現象を直接的に捉えることが可能であり、中でも電子状態の観測にはX線吸収(XAS)・発光法(XES)および共鳴X線非弾性散乱法(RIXS)等が有効に利用されている。

アクチノイドの $5f$ 電子と分子性物質(抽出剤)との相互作用について未だ未解明な部分が多く<sup>4)</sup>、この軌道の相互作用の本質を明らかにすることにより、配位子による特定イオン認識能の発現を引き出すことが可能となる。

第7図(a)に $\text{Cm}^{3+}$ に配位したフェナントロリンアミド(PTA)の立体構造を、第7図(b)にPTAのX線吸収および発光スペクトルを示す。 $\text{Cm}$ -窒素ドナー系錯体の窒素 $2p$ による部分状態密度関数の解析から $5f$ 軌道電子の化学結合への関与が初めて観測された。同様な放射光実験をU(VI)、Pu(IV)、Am(III)イオンに対しても行



第6図(a) X線回折による応力測定の光学系



第6図(b) フェライト材の溶接部近傍のひずみ分布

い、PTA がこれらのイオンと 3 価ランタノイドを分離する有用な有機配位子であることが実証された。

#### 4. 今後の放射光研究開発の課題

日本を含む世界各国で次世代放射光源の開発が進められている。その有力な候補は、X線自由電子レーザー(XFEL)とエネルギー回収型リニアック(ERL)であろう。これらの光源の特徴はコヒーレントでフェムト秒のパルス幅を持つ、超高輝度のX線源であることである。XFELはSPring-8においてすでに建設が開始されており、2010年に完成予定である。米国やドイツにおいても同様なXFELの建設が始まっている。コヒーレントX線およびフェムト秒のパルスX線を利用した放射光技術の開発は、新しい物質科学の開拓につながることで分子予測されることから重要な課題である。

研究対象は、理想的な静的状態(static state of ideal materials)の測定から現実的な動的状態(dynamical state of real materials)の測定への流れが加速されるものと思われる。例えば、高温高圧水中で負荷を受けた構造材料の応力分布の経時変化測定、自動車の排気ガス中の浄化触媒の反応過程のリアルタイム測定などである。また、物性の発現機構を解明する上で低温、高圧、強磁場などの極限環境下の状態測定、さらには電子状態や構造の揺らぎの観測なども今後の発展が期待される。これらは、外場発生容器中の試料の状態を透過性に優れたX線を利用して観測するものであり、高輝度、高指向性、高偏光性、パルス性に優れた放射光の特長を活かした測定である。

#### —参考資料—

- 1) 渡部俊太郎, 足立俊輔, “超短パルス発生技術の進展”, 応用物理, 76〔2〕, 115-124 (2007).
- 2) M. Nishiuchi, *et al.*, “Efficient Production of a Collimated MeV Proton Beam from a Polyimide Target Driven by an Intense Femtosecond Laser Pulse,” *Phys. Plasmas*, 15, 053104 (2008).

- 3) T. Shobu, J. Mizuki, K. Suzuki, Y. Akiniwa, K. Tanaka, “High space-resolutive evaluation of subsurface stress distribution by strain scanning method with analyzer using high-energy synchrotron X-rays”, *JSME Int. J., Ser. A*, 49〔3〕, 376-381 (2006).
- 4) T. Yaita, S. Tachimori, N. M. Edelstein, D.K. Shuh, P.G. Allen, L. Rao, “EXAFS studies of americium(III)-benzimidazole complex in ethanol”, *J. Synth. Rad.*, 8, 663 (2001).

#### 著者紹介

水木純一郎(みずき・じゅんいちろう)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)物性物理, 放射光科学

青木勝敏(あおき・かつとし)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)放射光科学/高圧物質科学

小池雅人(こいけ・まさと)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)軟X線光学/軟X線分光機器, 軟X線光学素子

横山啓一(よこやま・けいいち)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)化学反応動力学/長寿命核分裂生成物の同位体分離実現を目指したコヒーレント量子制御による分子制御

# 核拡散抵抗性と保障措置

## 次世代核燃料サイクル設計における核不拡散対策の基本的考え方

日本原子力研究開発機構・東京大学 久野祐輔, 東京大学 J. S. CHOI

近年、次世代核燃料サイクルなど原子力技術の開発に当たって、核拡散抵抗性や保障措置への考慮が不可欠とされており、関連技術の開発、設計・建設を担当する実施主体が、有効かつ効率的に業務を進めるためには、設計初期段階から保障措置や核拡散抵抗性について十分な配慮をすることが重要である。次世代の原子力システム、特に再処理等核燃料サイクルの設計が本格化するに際し、核不拡散対策としての保障措置や核拡散抵抗性技術を取り込んでいくためには、まずこれらの考え方の整理が重要である。本稿では、INPRO、GIFにおける議論などを紹介するとともに、核拡散抵抗性の基本的な考え方、すなわち、核拡散抵抗性の必要性について、それがどのように効をなすのか、そこにおける保障措置の位置づけや効果、設計において考慮すべき抵抗性対策の要点について解説する。

### I. はじめに

核拡散抵抗性、すなわち国家が核兵器・核爆発装置を獲得することを目的とした核物質の転用や未申告生産、技術の不正使用を防ぐため、当該原子力システムに核拡散上の抵抗力を持たせることについて、2000年以降、INPRO(革新的原子炉および燃料サイクル国際プロジェクト)およびGIF-GEN IV(第4世代原子炉システムの国際フォーラム)において活発に議論がなされてきた。一方、核拡散抵抗性(以下抵抗性という)の手段の中の1つとされる「保障措置」は、過去長年にわたりNPT体制下で築き上げられてきた制度であり、多々ある核不拡散の対策の中でも、国際的に最も支持されかつ持続性のあるものの1つと考えられている<sup>1)</sup>。

我が国はこれまで保障措置協定など核不拡散に関する規範を遵守するとともに、核武装放棄への明白な国家意思表示、必要性に基づく原子力計画と活動の透明性、そして核拡散防止や軍縮に関連する積極的な取組みを行ってきた。その結果として、非核兵器国のなかでは唯一フルに核燃料サイクルを推進することが国際社会から認められる状況に至ったわけである。しかしながら、GNEPの例に見られるように、原子力エネルギー需要性の高まりとともに増大する核拡散の懸念に対して、国際社会は原子力の平和利用に対してもこれまで以上に強固な「核不拡散対策」を要求する傾向にある。一方、グローバル

なエネルギーセキュリティについて核不拡散の観点から、原子力発電のみでなく核燃料サイクル全体において多国間協力・枠組みで推進するという構想も提案され、これまでの個々の国によるクローズドな原子力エネルギー政策を超えた考え方について議論が広がっている<sup>2)</sup>。

濃縮や再処理のような機微技術を含む核燃料サイクルのグローバルな普及については、その利用が限定された国によりなされるべきと考えるのが一般的であろうが、その場合においても現在の燃料サイクル保有国以外へ利用の拡大(例えば中東地域での多国間枠組み)を、原子力平和利用における平等の権利の原則から否定・阻止できるものではない。このように、原子力平和利用推進における環境の変化、すなわち核燃料サイクル利用の国際的広がりの可能性に対し、従来の「国家」を対象とした保障措置等による核不拡散対策に加え、原子力システム自体に、核拡散への「抵抗性」を持たせる動きが高まりつつある。

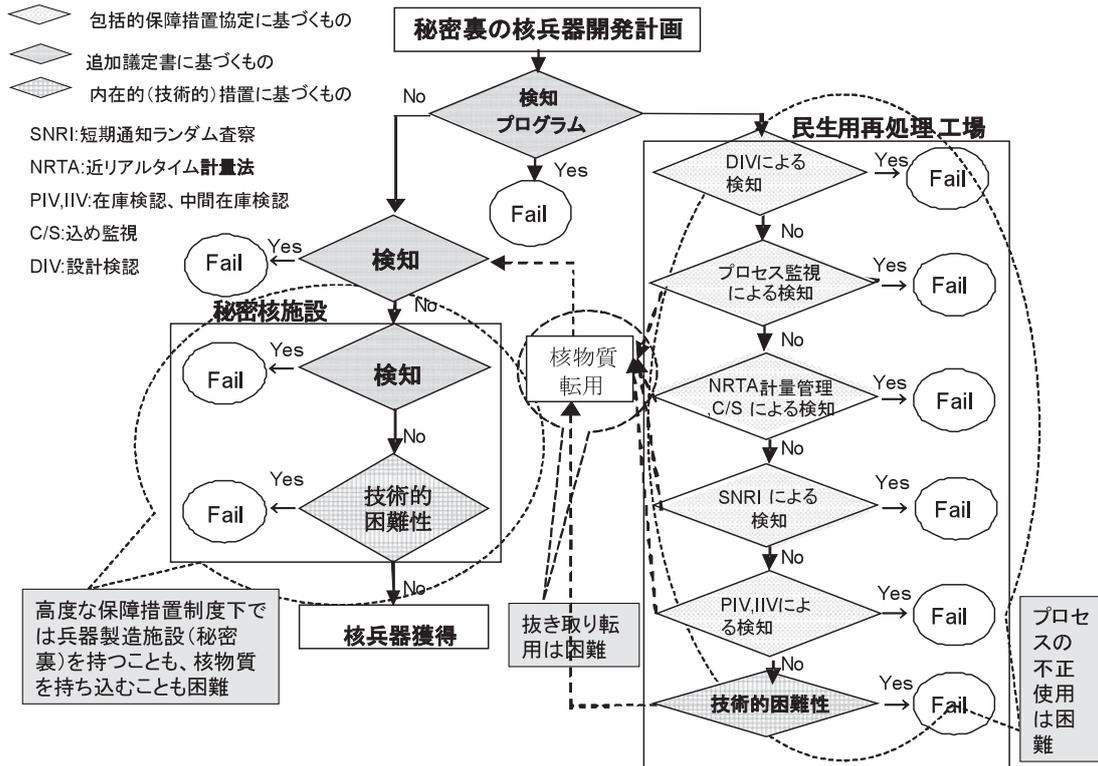
### II. 抵抗性についての整理

#### 1. 保障措置の効果

国際保障措置の目的は、有意量の核物質が平和目的の原子力活動から核兵器またはその他の核爆発装置の製造へ転用されることを適時に検知すること、および早期検知されるという危惧を与えることによって転用しようとする意思を抑止することにある。保障措置の手段は、計量管理、封込めおよび監視、査察/現場検証、そして情報の評価からなる。有意量の核物質転用を適時に検知できる状況下にある保障措置システムは、抵抗性措置の中でも強力かつ信頼性の高いものである。例えば、第1図

*Nuclear Proliferation Resistance and Safeguards—Fundamental Concept on Nuclear-Nonproliferation Measures towards Designing Next Generation Nuclear Fuel Cycle*: Yusuke KUNO, Jor-Shan CHOI.

(2008年 11月19日 受理)



第1図 核拡散抵抗性における保障措置の効果(再処理の例)

では、高度な保障措置等を適用した国における再処理からの核物質転用可否について示す。図から明らかなように、未申告活動の検出能力という点で、包括的保障措置+追加議定書という制度に基づく保障措置の適用により、多くの検知ステップ(チェックポイント)がもたれるため、核物質の抜き取り、プロセスの不正使用はもとより、核兵器製造に係る秘密施設自体の保持の試みも、当該国としてはきわめて困難な状況にあるといえる。すなわち、高いレベルの保障措置下にある国家においては、平和利用からの核兵器への転用はほとんど不可能に近いということがいえる(以下、第1図のような高い検出能(確率)を有する状態を「高いレベルの保障措置」と呼ぶ)。

## 2. 抵抗性技術導入の必要性

それでは、なぜ抵抗性技術が必要なのかである。今後、多国における使用済み燃料の蓄積、およびウラン資源の高騰や欠乏(供給不足)などから、使用済み燃料の処理、プルトニウム利用のニーズが国際的に高まった場合、新興国(限定された平和国家)または地域において燃料サイクル導入の議論が起こることが予想される。その場合、自主技術を新たに開発するのではなく、先進国から技術を輸入すると考えるというのが一般的であろう(抵抗性の議論には、いわゆるならず者国家が秘密裏に独自で抵抗性の低い技術を開発するケースは含まない)。そのような国・地域は核燃料サイクルを開始するに当たって

は、従来の保障措置協定だけでなく、追加議定書の締結などを含む高いレベルの国際制度の受諾が技術入手の条件となることがまず考えられる。しかし、その場合においても政情の変化などによる制度からの脱退等、最悪のシナリオにも耐えうるだけの核不拡散性対策が必要であり、すなわち同サイクル技術自体に内在的な抵抗性をもつことが望ましいわけである。

将来のニーズに対し、抵抗性の高い(技術的バリアが充分にある)技術を確立しておけば、上記のようなケースに対しても核不拡散上効果的である。すなわち、国際社会は高抵抗性を有する技術を国際基準・規範(ノーム)として一般化する(それ以外のものは輸出しない)というような策を講じることが重要である。この考え方が近年の抵抗性議論の根幹にある。非国家主体・テロリストによる盗取に対しては、核物質防護(PP)技術および関連する制度が最も有効であるが、抵抗性技術(例えばプルトニウムの単離-単体として分離することが困難な化学形態にする)を利用し盗取を防ぐこと、すなわち盗取に対する魅力をなくすことも高い有効性を示す。

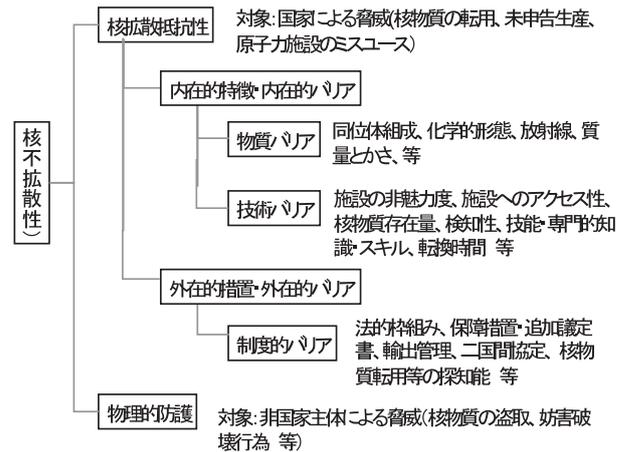
## 3. 「抵抗性」技術の基本的な概念

抵抗性の概念がどのようなものであり、また歴史的にどのように議論に発展してきたかについては既報に示したとおりである<sup>3)</sup>。上述のように、抵抗性においてはINPROおよびGIFにおける議論が現在主流となっているが、その議論では、抵抗性の程度を評価するための手

法開発に重きが置かれてきた。INPRO では、ユーザ要求事項という表現で、①国のコミットメントの程度、②核物質と技術の核拡散上の魅力度(容易性)、③転用困難さの程度と転用などについての検出可能性、④多重バリアの度合、⑤設計が最適化されているか、のおのおのについて核拡散抵抗性の評価尺度が提案されている。一方、GIF では、評価のための尺度(指標)として、①核拡散の技術的困難性、②拡散コストの程度、③拡散に要する時間の程度、④核分裂物質のタイプ、⑤検知確率、⑥検知のためのリソースの効率性、という6つの設計者が考慮すべき抵抗性対策として挙げられている。

両者においては、第1表に示すような特徴および違いがあるものの、抵抗性をもたせる手法についての基本的な考え方には共通した概念がある。すなわち、核兵器に適さないような同位体組成にする、純粋なプルトニウムを容易に取得できないような化学的な形態にする、核物質の取得や施設への接近を困難にするなどの技術的なバリア(技術そのものがもつバリアであるため「内在的」といわれる)とともに、保障措置のような転用検出・転用抑止効果のある制度によるバリア(システムに対する外的なバリアであるため「外在的」といわれる)が原子力システムに核拡散抵抗性をもたらすことになる。

第2図に原子力システムにおける核不拡散対策について共通する概念を示す。2006年6月に11カ国の参加により「原子力エネルギーシステムと燃料サイクルの核拡散抵抗性強化の技術基盤」についての会合が開催されたが、そこではUREX+, DUPIC, パイロプロセスなど含む世界の10種類の原子力システムを選択し、それぞれの核拡散抵抗性について技術的な特徴(長所/弱点)が議論されているが<sup>4)</sup>、そこでの結論として、どんな技術をもってもそれ単独で十分な核拡散抵抗性をもつというも



第2図 原子力システムにおける核不拡散対策についての基本的な考え方(INPRO, GIF 共通)

のではないが、制度的な対策(保障措置など)と併せて適用することにより、民生核燃料サイクルを、核兵器取得という観点から見た場合に十分魅力のないものにすることができる、としている。また抵抗性技術は、経済性、安全性、環境負荷等においてもインパクトを与える可能性があるため、不用意に抵抗性技術を適用させることは危険であるとしている。

#### 4. 抵抗性対策のキーとなるもの

それでは、今後どのような抵抗性技術をどの程度導入すればよいのかということになるが、現時点での国際的議論では、その疑問に対する明確な回答はまだない。INPRO では、達成基準についても言及されてはいるものの、「専門家による判定」などという抽象的な表現にとどまっている。そこで本稿では、まず抵抗性対策を選択する場合、どのような考え方を基本にすればよいのかについて以下に考察する。

キーとなる抵抗性対策(バリア)を単純化すれば、およそ次の3つに集約することができる。

- (1) 転用・不正使用等の検知によるバリア
- (2) プロセス(変更)の困難性によるバリア
- (3) 物質化学的特性によるバリア

(1)は外在的バリアに起因するもの、(2),(3)は内在的バリアによるものと考えることができる。これらの対策により、①適時に転用が検知される、②転用/兵器製造を遅らせる、という効果が期待できる。以下に一般に考えられる代表的な核拡散シナリオ、またそれが起こる可能性について述べ、それぞれに対し必要となる対策が上記の3つのバリアによりカバーできることを示す。

[シナリオ1] 国際規範遵守しつつも潜在的に転用の意志を持つ国家による転用ケース(前提:高いレベルの保障措置等国際制度を受け入れており、単離プルトニウム(Pu)が存在しないような内在的抵抗性のあるプロセスを所持)

第1表 INPRO, GIF(Gen IV)における抵抗性特徴比較

対象	目的	目標	評価の方法
革新的原子力システムに関する全ての国	革新的原子力システムにおいて十分な抵抗性措置が達成されていることの確認の手段、抵抗性を強化する方法に関するガイダンスの提供 原子力発電プログラムの導入を計画、保有または拡大している国へのガイダンスの提供	革新的原子力システムが核兵器生産のための核分裂性物質獲得に対して魅力のないものであることが保証できるように、原子力システムの全寿命を通して核拡散性・増殖性・内在的特徴と外在的措置が組み込まれること。	属性評価(抵抗性措置項目別)に評価 原子力システムが核兵器製造目的に悪用されないための措置(非魅力化)についての要件、指標、許容レベルを定め評価、サイクル全体あるいは、個々のプロセスについて評価する。 定性評価
GENIV PR&P WG GEN IV 参加国	内在的性質及び外在的措置間の相互作用を解明し、それらの相互作用を抑制し、そして最適化を導くこと(設計時)	GENIV原子力システムは、兵器用物質の転用や盗取に対して非常に非魅力的で、望ましくないルートであるという確信を高めるものとする。	システム応答評価 対象とする原子力システムについてサイクル全体を対象に、脅威毎にリスクウェイト解析を行い強さを評価 定量的評価

- (a) 制度(保障措置)を保持しつつ核物質を抜き取り、核兵器を製造するケース
- 1) 保障措置の間隙を利用し、核物質を抜き取る、その後、秘密裏施設でPuを単離、核兵器製造へ
  - 2) プロセス運転条件変更でPuを単離、秘密裏施設で核兵器へ
- (b) 制度から脱退し、核兵器を製造するケース
- 3) プロセス運転条件変更でPu単離、当該施設で核兵器製造
- [シナリオ2] テロリストにより襲撃されるケース(襲撃される国についての前提は同上)
- 4) 核物質抜き取り盗取後、テロリストにより用意されている秘密裏施設でPuを単離、核兵器を製造
  - 5) プロセス運転条件変更によりPuを単離、当該施設にて核兵器製造へ

#### [各シナリオ発生の可能性および核不拡散対策]

シナリオ1の(a)では、高いレベルの保障措置等制度下にあるため、II-1節で示したように、高い確率で事象(抜き取り、プロセス条件変更)は検知されるため実現可能性は非常に低い、また、秘密裏に施設を所持することは高いレベルの保障措置下では不可能に近い。対策：高いレベルの保障措置維持で対応可。

シナリオ1の(b)の可能性も非常に低い。追加議定書など締結しているため(前提)、常に保障措置上の透明性が維持されており、制度からの脱退に先んじて必要となる核兵器の潜在的な技術開発が、充分検知されるためである。対策としては、万一の場合の兵器製造に対し大幅な時間的遅延をもたらす内在的技術の措置が挙げられる。すなわち、脱退後もPuの単離が非常に困難なプロセス(プロセス条件を変更してもPu単離が困難なもの)または単離されても核兵器としての価値を有さない、または価値の非常に低いPuであることである(Puフィッサイルが低い、Pu-238含有率が高いなど)。

シナリオ2のテロリストによる襲撃発生の可能性については、施設に対する物理的防護(PP)の程度に依存するが、PP技術対策とともに、上述のPu単離の困難性、価値の低い同位体組成のPu、そして接近困難/取扱い困難などが対策として挙げられる。ただし、接近困難/取扱い困難などは、現実的には致死に至るような高放射能レベルのプロダクト系を有する燃料サイクルは考え難く、あまり現実的対策とは考えられない。

全体を通して、「抵抗性」の議論において共通して重要なことは、核拡散への試みに対し、内在的、外在的措置を施すことにより、原子力システムをいかに非魅力的にするかということであり、また、その具体的な対策としては、保障措置を支える技術である転用・不正使用等の検知バリア、プロセス変更の困難性によるバリア、そしてPu同位体を含む物質的特性によるバリアであること

がわかる。

### Ⅲ. 具体的な内在的対策と保障措置等 外在的対策の関係

前章の整理から、核燃料サイクル等原子力システムの設計に当たり考えるべきことをまとめると、

- (1) 原子力システムが高い転用・不正使用等の検出能を有すること
- (2) Puの単離が困難となるように、扱う物質の特性・プロセス設計において考慮すること
- (3) Puが仮に盗取されても兵器への転用が困難な物理化学形態であること、兵器としての価値の低いPuであること

となる。なかでも(2)、(3)における主たる抵抗性因子である物質自体の特性による抵抗性について、近年いくつかの提案がなされている。例えば、Pellaudは、Pu同位体組成の違いについて核爆発性能差から議論、兵器級のPuと原子炉級Puの扱いを保障措置上区別することを提案した<sup>5)</sup>。また斉藤らは、ウランにあらかじめネプツニウムやアメリシウムを添加しておくことで、燃焼に際し生成するPuが高いPu-238を含むことになることを利用し、核兵器への使用が実質的に極めて困難なPu(同位体組成)にすることを提案した<sup>6)</sup>。これらは「物質特性」の観点において抵抗性を議論する場合、重要な提案であると考えられる。一方で、これらは、核兵器への利用可能性を完全に阻止できるものでなく(例えば後者では、Pu-238による発熱が、核爆発装置の性能維持に及ぼす効果というようなエンジニアリング的要因によるものであることなど)、単一で抵抗性対策となるような絶対的なものにはなり得ないと考える。

Pu、ウラン(U)の混合抽出など化学的な抵抗性も提案されているが、プロセス条件変更等により、Pu単離が可能と考えるのが一般的であり、この場合も絶対的な対策にはなり得ない。物質特性は、臨界質量、生成熱、自発中性子発生率、放射線量、物理化学形態などで総合的に示すことができるが、Bathkeらは、物質特性を、臨界質量、発熱、放射線量による関数(性能指数FOM: フィギアオブメリットという)で表現し、DOEの魅力度レベルに照合してその物質の拡散上の魅力度レベルを議論している<sup>7)</sup>。劣化ウラン等による核分裂性物質の希釈や、Pu-238によるPuの希釈は魅力度レベルを下げるとしている。FOM導入の詳細は知られていないが、筆者らの検証では、PPとしての評価には適するが、抵抗性としては必ずしも的確に魅力度を表現できるような種類のものではないようである。

一方、(1)について、保障措置を中心とした核不拡散に関する制度など国際的な枠組みは、徐々に強化されつつあるのが現状である。技術的な抵抗性手段は、核燃料サイクルの不正使用や核物質の転用の観点で魅力のないも

のにするため、制度的手段とは異なった効果が期待されるものの、上記までの議論が示すように、絶対性をもつような対策とはならず、将来にわたって画一的な基準を作ることはできないかもしれない。また技術的な抵抗性手段の採用により、保障措置等が軽減されるとする議論もあるが、本稿で示すように、技術的な抵抗性手段の目的は、原子力利用の拡大に伴う更なる核拡散への脅威に対処するための付加的対策であり、これにより保障措置等制度に基づく手段が緩和されることはあまり期待できそうにない。

かつて1970年代に世界規模で実施した核燃料サイクル評価(INFCE)では、抵抗性について「燃料サイクルに関する転用への抵抗性について、現在および将来にわたって普遍的に正しい単一の評価はない」とされ、さらに「技術的手段よりも保障措置やその他の制度的手段が重要、ただし、技術的手段は、核燃料サイクルの不正使用を確実に魅力のないものにするもので、保障措置およびその他の制度的手段とのパッケージの一部となり得る」[それ故、一般に燃料サイクル中で拡散上脆弱な点を確認し拡散リスクの抑止法を追及することが重要かつ建設的]という結論が示されている。これは、まさに現代における抵抗性の検討においても適用されるものと思われる。

#### IV. 最近の議論から

2008年10月にIAEA本部において「IAEA保障措置の円滑に適用するための施設の設計と運転の特徴に関するワークショップ」が開催され、今後の設計者が考慮すべき保障措置のガイダンス作りがスタートした。本会議には抵抗性の専門家の参加も見られた。これは「Safeguards by Design」という基本的な考え方にに基づき、設計者等がどのように保障措置を設計に取り入れるかの技術的なガイダンスを作ろうとする動きであり、「高いレベルの保障措置」を満たすためには具体的にどのような手段を講

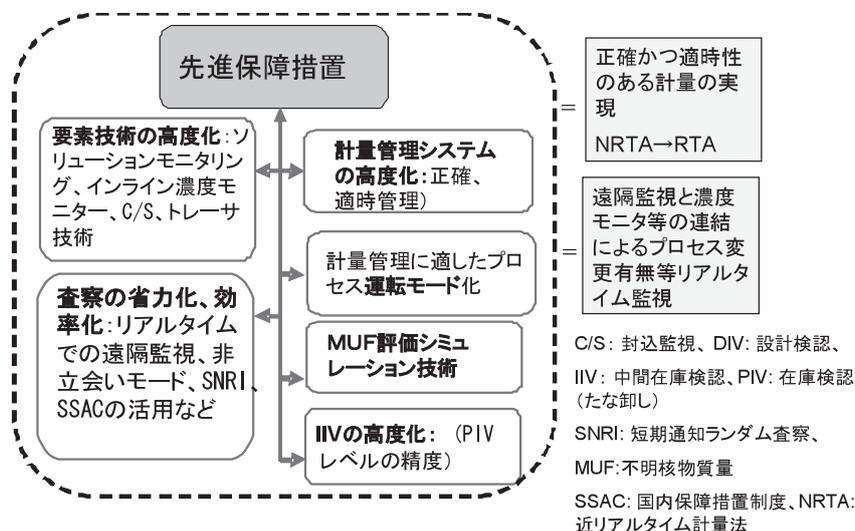
ずればよいのか明確になることが期待される。なお本会議では、フランスのAREVA社による積極的な参加が目をつけた。最近、同社は核燃料サイクルにおける保障措置・抵抗性の取り込みの必要性について強く言及しており、原子力メーカーが、この分野を「安全」と同様に、設計の必要条件と認識し始めたことは特筆すべきことであろう。

#### V. 抵抗性について今後対応すべきこと

INPRO および GIF における抵抗性評価手法の確立への努力は今後も続けられると思われる。GIF などでは、より定量的に抵抗性を評価できるよう取り組まれているが、最終的な評価の基準は、やはり専門家による格付けに頼らざるを得ないのが現実であろう。以上の議論から、今後の核燃料サイクルにおいて抵抗性についてどのように対処していくべきかについて、著者は以下のように提案する。

- (1) 高い検出能を有する先進保障措置：従来の保障措置基準存続を前提に、これまで開発されてきた保障措置技術をさらに進化させる。すなわち、Pu 取扱量の増加に対しても、適時性、正確性を満たすことのできる計量管理・保障措置技術の開発・適用(第3図にイメージを示す)
- (2) INPRO もしくは GIF に示す大項目(II-3節)それぞれの要求事項に対し総体的に満たし、現状(例えば再処理ではPUREX)に比べ抵抗性が高くなる技術を選出する。ただし、本技術は、経済性、安全性、環境負荷においても許容できるものでなければならない。
- (3) 上記(1)(2)について、国内外に提示、1つの国際的な例として、さらに代表的な技術規範として扱われるように国際社会のコンセンサスを得る。

なお、(2)については、前Ⅲ章に示した「Puの単離が困



第3図 大規模核燃料サイクルにおける先進保障措置システム

難となるように、扱う物質の特性・プロセス設計において考慮すること]「Puが仮に盗取されても兵器への転用が困難な物理化学形態であること、兵器としての価値の低いPuであること」を基本に具体的に採用すべき技術を検討することが望まれる。核不拡散性について、どのような技術をどの程度もたせるかについて、核燃料サイクルおよびその保障措置技術の先駆者であるわが国が率先して検討し、国際社会に提案していくことは意義のあることと考える。

#### —参考資料—

- 1) 久野祐輔, 原子力 eye, 56[12], (2008).
- 2) 例えば, Internationalization of nuclear fuel cycle: <http://www.nap.edu/catalog/12477.html>
- 3) 千崎雅生, 久野祐輔, 井上尚子, 勝村聡一郎, 日本原子力学会誌, 50[6], 368~373(2008).
- 4) Chayama, IAEA's Qualitative Survey of Proliferation Resistance Technical Features, 49<sup>th</sup> INMM Annual Meeting, 2008.

- 5) B.Pellaud, "Proliferation Aspects of Plutonium Recycling", *J. Nucl. Mater. Manage.*, XXXI[1], 30-38 (2002).
- 6) <http://www.nr.titech.ac.jp/coe-public/Doc 05/Pdf/5-2-1.pdf>
- 7) Bathke, *et al.*, LA-UR-08-1966, (2008).

#### 著者紹介

久野祐輔(くの・ゆうすけ)



日本原子力研究開発機構・東京大学原子力国際専攻  
(専門分野/関心分野)核不拡散・核拡散抵抗性, 保障措置・保障措置分析, 透明性

Jor-Shan CHOI (ジョーシャン・チョイ)



東京大学 G-COE プログラム  
(専門分野/関心分野)核不拡散・核拡散抵抗性, 保障措置, 原子力材料, 国際燃料サイクル

## 新刊紹介

### 物質会計：収支原理，検定理論，データ検認とその応用

Rudolf Avenhaus 著, 今野廣一訳, p.225(2008.10), 丸善プラネット社.  
(価格4,100円税別) ISBN 978-4-901689-99-1

原子力産業の特殊性の1つに物質計量(物質会計)が挙げられる。一般の産業においても原料から製品に至る工程における物質の収支バランスはチェックされるであろうが、原子力産業における核物質の計量は、銀行における金銭の管理に匹敵する厳格さが要求される。銀行との違いは、会計(計量)が測定により行われるため、それによる「誤差」が付きまとう点である。核物質計量の必要性は、当然、核兵器へ転用をしていないことを確認するための手段、すなわち「保障措置」という制度に基づくためである。IAEA 保障措置の基本となる文書 INFCIRC/153によれば、「保障措置の目的を達成するために、「計量管理」を重要な基本手段とする」とされており、すなわち、核物質計量は、恐らく将来にわたって決して変わる事のない、保障措置実施における原理原則である。本書は、1977年に出版された、いわば古い書物の翻訳である。その当時に比べ、核物質の計量管理に掛かる測定技術の進歩や保障

措置の検証技術の変化など、保障措置に関するさまざまな進展がみられる。しかしながら、上述のように、本書に示される「核物質計量」の概念・手法は、保障措置すべての基礎であり、統計学に基づく手法としてまだここに示されたとおりの考え方が適用されている。記者の前書きにもあるように、物質会計(計量)についてすべての分野を取り扱った専門

書であり、いわば、核物質を管理する専門家にとっては、必読のバイブル的教科書である。著者のアーベンハウス博士は、統計学のみならず、保障措置手法の分野における権威であり、査察へのゲーム理論の適用などについての研究でも知られる著名な学者である。本書の特徴としては、単に物質収支や計量(会計)の原理、統計評価手法を示すだけでなく、原子力に適用された場合、その背景にあるもの(核不拡散条約と保障措置システム)、統計的にみた査察検証設計、会計(計量)説明責任など詳細が示されており、最後には、軍縮に係る「軍備管理」という領域に言及されている。このような基礎的専門書物が日本語で勉強できるということは、喜ばしいことであり、記者のご努力に感謝するところである。

(日本原子力研究開発機構/東大・久野祐輔)





## 原子力廃棄物を考える国際市民フォーラム —処分地問題の解決に向けて

廃棄物処分場立地 フィンランド、韓国、フランス、カナダからの  
報告と日本の今後の進め方を考える

WIN-Japan 末廣 利恵, 河田 朱実

原子力発電を有する世界各国における放射性廃棄物処分場のサイト選定問題は、最も重要でかつ、慎重な対応が求められる課題の一つとなっている。日本では、原子力発電環境整備機構 (NUMO) が高レベル放射性廃棄物 (HLW) 処分場の立地を進めているが、候補地は未定である。

平成20年10月18日、東京大手町の JA ホールにて、原子力学会社会・環境部会および WIN-Japan 共催による「原子力廃棄物を考える国際市民フォーラム—処分地問題の解決に向けて」が開催された。参加人数は180名であった。本報告では、講演内容、パネルディスカッション等について報告するとともに、フォーラムのアンケート結果分析、その他のエピソード等を紹介する。

### I. フォーラム報告

#### 第1部：処分場問題先進国からの報告

社会・環境部会長 諸葛宗男氏の開会挨拶に始まり、各国からの現状が報告された。

##### (1) フィンランド：マージャッタ・パルム氏 (ポシヴァ社)

ポシヴァ社は、HLW 処分の安全な地層処分を目的に設立された。現在、ONKALO という地下特性調査施設 (深420 m) が建設中であり、地下水など安定した環境であることが確認されている。2020年には処分が開始される予定。

1983年に文献調査が、また1993年に地元住民の了解の上に4ヵ所が特定され、詳細サイト特定調査が開始された。この間、ステークホルダーとの継続的な対話が継続されている。2000年には規制当局により、ユーラヨキが選定され、同年に住民投票で圧倒的支持を得る。そして、2001年に政府による原則決定 (DiP<sup>a)</sup>) がなされ、同

年議会で批准された (賛成159票、反対3票)。

成功のポイントとして、以下の5つが挙げられた。

- (1) 国としてのニーズを明確化：廃棄物はすでに存在しており、未来の世代に負担を押し付けてはいけない。一般公衆を含めた意思決定が法で定められていることが重要。
- (2) 良質で透明な科学的技術的プログラム
- (3) 開かれた立地選定プロセス
- (4) 自治体と国家への信頼
- (5) 長期にわたる地域の社会的経済的メリット

##### (2) 韓国：ジーヨン・キム (韓国水力原子力発電会社：KHNP)

放射性廃棄物管理に関して、韓国政府は以下の5つの国家政策を制定した

- (1) 放射性廃棄物は政府責任で管理
- (2) 安全確保を最優先 (放射線から国民と環境を保護)
- (3) 放射性廃棄物発生量の最小限化
- (4) 発生者負担の原則 (廃棄物を次世代に負担させない)
- (5) サイト選定プロセスの透明性

韓国では、中・低レベル廃棄物 (LILW) の処分施設サイト選定の19年間における9回の失敗を経て、2005年に以下のように政策を変更した。

- ① 安全性：使用済燃料関連の施設との切離し
- ② 透明性：サイト選定委員会の設置 (2005年3月)
- ③ 経済支援：地方自治体の経済的便益を特別法で保証

予備調査の対象となった9箇所のうち、4箇所が立候補し、IAEA のピアレビューや住民投票 (2005年11月) の結果により、キョンジュに決定された。

サイト選定の成功要因は以下の4つが挙げられた。

- (1) 手続きの公平性と透明性
- (2) 一貫した政策施行
- (3) 住民への継続的な情報提供
- (4) 住民意識の成熟

政策として廃棄物管理から切り離された使用済燃料管理については、再処理か最終処分かは国民の合意を得て決定するとし、それまでは中間貯蔵するとされた。

*The Report of "International Forum on Nuclear Waste (Tokyo, Japan October 18, 2008)"* : Rie SUEHIRO, Akemi KAWATA.

(2008年12月11日 受理)

<sup>a)</sup> 事業者が事業を進めるため政府に申請し、次に地元自治体の賛成を受けて、政府が「原則決定」を行い、最終的にフィンランド議会で承認を受ける仕組み。

国民合意を得るため、国家エネルギー委員会の下でチームが設置され、開かれた形での議論が継続中である。さらに、2008年3月の放射性廃棄物管理法の施行に基づき、政府とKHNPは2009年1月に「韓国放射性廃棄物管理会社」を設立する予定とのことであった。

(3) カナダ：トム・アイザックス氏(米国スタンフォード大学教授)

「技術的には成熟しているが、PAについては不十分」との政府調査委員会の判定により、カナダのサイト選定プロセスは1990年代後半に一度頓挫した。その後、2002年に「核廃棄物法」が新たに策定され、新規に設立する「核廃棄物管理機構」の役割を3年かけて議論し、この議論を通じてPAが確立された。

カナダにおけるコンセンサスのプロセスでは、継続的な討論会の実施、意見を聴取する市民対話など、透明性や公衆を巻き込むボトムアップ形式が重視された。

核廃棄物処分プログラムは、常に社会のニーズに合わせて、意見に柔軟性を持たせるため、適応型の段階的アプローチとした。

地層処分では、自主的に立候補する地域を募りつつ、当面は集中的に浅地層処分(中間貯蔵)としている。

講演者は、まとめとして、実施主体が信頼を得るためには以下の要素が重要と指摘した。

- ・技術、実績を有すること
- ・地元の利益を勘案すること
- ・継続的に耳を傾け一般公衆を巻き込むこと

(4) 日本：二口政信氏(原子力発電環境整備機構：NUMO)

日本では2000年 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律が成立し、同年NUMOが設立された。2002年10月、サイトへの公募が開始された。

処分地選定のプロセスは、第1段階：文献調査、第2段階：概要調査、第3段階：精密調査となっており、各段階終了時に地域(市町村長、県知事)の意向を確認することが法律で明記されている。

NUMOでは理解獲得のため、地域各層の理解・信頼の輪の拡大および丁寧な対話活動を実施している。NUMOの現在までの活動における課題としては、(1)国民一人ひとりが自分の問題としてとらえていない、(2)安全性、必要性、選定手順について正確な情報が伝わっていない、(3)地域発展のイメージや可能性の説明不足等が挙げられる。

今後は、文献調査を進めるため、広報の拡充・充実を図るとともに、国による申入れを可能とするなど取組みを強化し、関係者が一体となって着実に実施するとのことであった。

(5) フランス：カトリーヌ・フィレ氏(仏原子力庁)

フランスにおける放射性廃棄物管理の方針は、天然資源の節約、廃棄物の量そして毒性の低減に寄与するというメリットがあるため、使用済燃料は再処理されることになっている。この国家計画は3年ごとに更新され、三原則は次のとおりとなっている。

- (1) 廃棄物の減容(使用済燃料を再処理する)
- (2) 冷却のため一時貯蔵
- (3) 最終的に深地層処分される

1991年法(長寿命核種廃棄物の管理に関するもの)では、①核種分離や核変換を行い、毒性の低減を図る、②地上で中間貯蔵する、③粘土地層における処分の実現可能性を実証する、の3点が定められ、ビュール地下研究所が建設され、1991年法の取組みの総括として、意思決定のため、政府主催の公開討論会を実施した。

2006年1月、シラク大統領声明により「2020年までに第IV世代の原型炉を建設」とされ、同年6月、廃棄物管理法と原子力安全・情報公開法が成立された。

フランスにおけるサイト選定および適切な処分場の設計のための調査および研究と許認可申請、操業は、放射性廃棄物管理機関(ANDRA)が担っている。

今後の計画は以下の通りとなっている。

2009年までに可逆性、安全性および貯蔵のオプションを政府に提示。2012年までに処分場の場所と設計を提示。2013年からは公開討論会を開催し、サイト選定を実施。2015年までに許認可申請および審査が実施される。

フランスでは、明確でかつきちんとした形で調査研究の進捗について情報を提供し、対話を進め、「情報提供および協議プログラム」を進めている。これは地元の期待を盛り込みつつ、対話活動を実施し、意思決定のプロセスに地元住民を参加させるものである。

## 第2部 パネルディスカッション

### 1. 前高知県東洋町長 田嶋裕起氏からのビデオレター

NUMOの文献調査に応募しながらも、様々な諸問題から取り下げた東洋町の前町長 田嶋裕起氏からのビデオレターを紹介。聞き手は、WIN-Japan 会長 小川順子氏。

Q. 高レベル放射性廃棄物最終処分施設選定の調査に応募された決断のポイントは何ですか？

A. 以下の4点のとおり。

- ①災害に対する安全・安心のまちづくりや行政サービスの進展が交付金によって可能になる。
- ②当然、交付金目当てだけで応募はできず、私自身この問題について勉強を重ね、地層処分は地上施設よりもはるかに安定・安全と思った。
- ③調査の各段階で自治体の意思や知事の意見が尊重されるので、応募自体には不都合はない。
- ④原子力平和利用の町として、国のエネルギー政策に

## 高知県東洋町前町長 田嶋裕起氏を訪ねて

河田朱実

高知県東洋町の事例は、原子力問題に関心の薄い国民にも原子力廃棄物の処分地問題を知らせる良い機会となったが、応募により町長が辞任に追い込まれたという結果を受け、日本が抱えている原子力特有の問題点が改めて確認された気がする。その後、自治体からの応募は数居が高くなったともいわれているが、公募について興味を持っている自治体関係者にとっては今なお関心が高いと考えられる。しかしながら私たちが知っている情報の多くはマスコミ等からのもので、現在も実際の状況を承知できていない状況にある。そこで、当時、渦中にご苦勞された高知県東洋町前町長の田嶋裕起氏に真実をお話いただき、浮かび上がった問題点に対処することでこの問題の解決につなげたい、ひいてはぜひ肉声でお聞きしたいという願いが私たちの中にあり、出演を交渉したところ、ビデオレターならばとご承諾いただけた。

9月初旬、田嶋氏出演によるビデオレターを撮影するため、小川会長はじめ5名のWIN-Japanメンバーが各地から高知に集結した。さすが南国高知、残暑とはいえ半端じゃない暑さに驚いた。翌朝早朝、予約したジャンボタクシーが時間になっても来ないというハプニングはあったものの、予定を大幅に遅れることなく高知市を出発し、田嶋氏と約束した東洋町近隣の宿泊施設に向かった。専門家が聞いたら腰を抜かすかもしれないが、予算の関係でWIN-Japanのメンバーがホームビデオで撮影にチャレンジする。また田嶋氏本人とも、電話やメールで数回打合せをただけで、参加メンバーのほとんどが田嶋氏とは初対面。しかも、同日の最終便で小川会長が東京に帰る必要があるた

め、撮影に許される時間は約2時間しかない。今までどんなに大変なことも、持ち前の熱い気持ちでやり遂げてきたWIN-Japanだが、さすがに今回ばかりは少々緊張感が漂っていた。東洋町は、高知市から足摺岬を經由し、四国の南海岸を徳島県との県境まで約3時間半走ったところにある穏やかな町で、ポンカン(柑橘類)とサーフィンが有名な町。車窓から見た町は、国道を挟んで美しい海岸と民家や畑に分かれていた。反対派や取材の報道陣がこの静かな町に入ってきたと思うと、胸が詰まる思いがした。

愛車の軽トラに乗って会場に現れた田嶋氏は、写真で見たとおりにまじめで誠実な人柄がにじみ出ている方であった。1970年から2007年4月に辞任するまで東洋町の発展のために地域のリーダーとして尽くしてこられただけあって、話の端々から生まれ育った東洋町への思いが伝わってきた。

撮影はすべてWIN-Japanメンバーの素人撮影隊が行ったため、アットホームな雰囲気となった。女性に囲まれ、また撮影は大の苦手と最初は緊張していた様子の田嶋氏であったが、撮影が進むうちに私たちとも打ち解けられ、心のうちを十分に話していただけたと感じ取れた。田嶋氏の処分地問題によせる思いや解決への期待を間近で聞いた私たちは、その熱い思いに感動を覚えた。撮影が終わり人懐っこい笑顔で軽トラの運転席から手を振りながらお帰りになる田嶋氏を、私たちは感慨深い思いで見送った。

フォーラムで放送したものは、時間の関係で内容を縮めているため、すべてをお見せできなかったのは残念であるが、田嶋氏の思いが詰まったこのビデオレターが、今後の処分地問題解決の糸口になることを願ってやまない。

寄与できる。

Q. 応募からの3ヶ月間、実際の東洋町の様子は？

A. 非常に混乱しており、主に以下のようなことが起きていた。

- ①町外からのいわゆるプロと思わしき方の、私個人に対する誹謗中傷などによる介入
- ②中立性に欠いたマスコミ報道
- ③地層処分を国家プロジェクトと認識していないかのような知事の発言

Q. そうした体験を踏まえると、今後どういった対策が必要？

A. 思いつくのは以下の3点。

- ①国やNUMOが平素から、国民に正確な情報をわかりやすく積極的に知らしめること
- ②国民は安全性についての知識がほとんどないので、電話窓口など、聞きたいときに聞けるシステムづく

り

③風評被害を補償する基金・制度

Q. こういう問題における女性の役割は？

A. 昔から「女性が変われば社会が変わる、正義が変わる」などいわれるように、女性が原子力について正確な理解を深めていくことは非常に大事。

Q. 最後に、今、最終処分地選定調査の応募を検討している自治体の方にメッセージをお願いします。

A. 今回は非常に残念な結果だったが、私なりに一筋の明るさを感じられた。一つは若者が町の雇用創出や暮らしのこと、安全・安心の町づくりを真剣に考えて動いてくれたこと、もう一つは国民にインパクトを与え、最終処分施設の問題を認識していただけるようになったことです。この文献調査への応募は、国のエネルギー政策に貢献をするという非常に意義のあることなので、東洋町問題で懲りずに、ほかの自治体の皆さ

んも勉強を重ねられて、ぜひ応募に向けてご検討していただきたいなと思います。

## Ⅱ. パネルディスカッション

コーディネータ：宮崎 緑氏(千葉商科大学教授)

宮崎氏 前東洋町長田嶋氏の話の中で我が国独特の特徴があったと思う。一つは、合意形成に至るプロセスにおいて、専門家でもない、権限をもっていないという、小さな自治体の首長の方が説明責任を求められ、意見を統合していく立場についているという点。被ばく国としての感情的な問題をどう克服するのかという点。あるいは、住民ではないプロフェッショナルな活動家はその政治的な信念から関わる場合にどう対応するかという点。この辺についてのご意見は？

アイザックス氏 まず、役割と権限を明確にすること。一番信頼を構築するための大切な方法は、小さな約束の確実な実現を積み上げながら少しずつ進めていくこと。さらに、地域の意向と政府の意向が合致し、政治的仕組みにも適合するというタイミングという問題もある。

宮崎氏 今の権限と役割について、日本はどうか？

二口氏 最初のステップとして技術的な良し悪しを決め、かつプロジェクトに対する地域の理解が必要。最初のステップへの応募については、首長に役割を担っていただく仕組み。

宮崎氏 住民の間のコンセンサス決定の仕組みとして、どういう形が望ましいか？

パルム氏 フィンランドの国民は積極的に明確な意見を打ち出すことはあまりないが、国の法律の仕組みの中で、プロセス、責任および地方自治体と政府の役割が明確になっている。決定は国が行うが、それを受け入れるのかどうかは、地域で民主的に選ばれた組織がこの立地について検討・決定し、このプロセスが不適切だと考えられる場合には、法において苦情の申し立てができるようになっていく。苦情がもっともであれば、新しいプロセスや新しいサイクルに変更できるなど、地域に意思決定権がある。

それから法律で税率が決められており、それも地域での意思決定の判断材料となる。

宮崎氏 フランスでは90年代に信頼が壊れた時期があったとのことだが、どう乗り越えたのか？コンセンサスをどのように形成したのか。

フィレ氏 一般公衆との対話である。2006年の新法において、処分場に関する対話とPA向上責任をANDRAが負うことになった。一般公衆は意思決定プロセスの中で非常に重要な役割を担っており、政府による最終決定の前の、一般公衆との対話は法で義務付けられている。

とにかく一般公衆に対して情報をたくさん提供するこ

と。さらに一般公衆が何を重要と考えているのかを常に考慮すること。

宮崎氏 韓国ではどのようにコンセンサスを形成していくのか？

キム氏 政府が使用済み燃料の管理に関するコンセンサス形成を目的とした特別委員会を作り、選挙によって委員が選出され、昨年よりこの組織が活動している。また、私どもの会社と政府とで放射性廃棄物のコンセンサス形成と管理を担う組織をつくり、来年より活動予定。

アイザックス氏 2つほど参考に申し上げる。受入れを拒否しているならば、その意思を尊重すること。これにより信頼感が得られる。ユーロオキでも、最初、町の評議会は否決し、ポシヴァ社はこの否決を尊重した。これが信頼感を得て、後にもう一度提起されたときは、町の評議会を受け入れた。この押し付けないということが重要な点の一つ。もう一つはコミュニティとの対話に基づく地元からのボトムアップ。対話ができれば、外からの反対派に惑わされることなく、自分たちが得た情報や知識をもとに判断できる。

宮崎氏 フィンランドでも感情的な反対があるか？これにはどのように対応しているのか？ 施設による経済的優遇は？

パルム氏 人が集まって質問をしたりする機会の提供が必要で、反対派と賛成派が加わっての議論を広く聞いてもらっている。意見をいう権利は皆にあり、私たちは透明性のある情報を提供する。それによって自らが決定できるようにしたい。でも、とにかく対話が重要。本当の信頼をその対話の中で築き上げていく。

宮崎氏 安全と安心は必ずしも一致しないが、どう解決するのか？

フィレ氏 とにかく情報をたくさん提供すること。科学的、技術的な情報はもちろん、最終処分目的、制約、放射能や放射性廃棄物とは何なのかという基本的な説明をも発信している。また研究成果や報告書や一般公衆に対するリサーチ内容も公表している。こういった一環した情報提供により、放射性廃棄物に対する安心感を構



パネルディスカッション(左より、宮崎氏、パルム氏、キム氏、アイザックス氏、二口氏、フィレ氏)

築しようとしている。

アイザックス氏 施設の安全・安心を訴えても、それをいっている本人あるいは組織の信用がなければダメ。また、当局や事業者が情報を出すことも大切だが、住人やそのコミュニティの将来を考えている人たちが情報提供に関与していることは、長い目で見たと信頼性を生む。

宮崎氏 NUMOは地域の方々の理解向上のために具体的に何をしているのか？

二口氏 相互理解活動のための機会をしっかりと作り、それを丁寧に繰り返して信頼を獲得することを重視。各都道府県での相互理解活動シンポジウム、地方座談会などを通じ、皆さんの不安を知り、それに対して相手に伝わる言葉で答えることに真摯に取り組んでいる。

宮崎氏 最後に、一言ずつまとめをお願いします。

フィレ氏 どんな期待があるのかを知り、それに対するどういう制約があるのかを説明するため、地元住民との対話をなるべく早く始めることが重要。

二口氏 多少時間かかっても、自治体の意見を尊重することをしっかり伝え、透明性を確保しながら進めていく。

アイザックス氏 自分がいっていることに意味をもたせる、つまり正直に発言し、そして相手に敬意を表して尊重することも大事。

キム氏 放射性廃棄物管理に関する問題は全員の責任であるという認識を持つことが大事。

パルム氏 日本にはいいプログラムがあるので、あとはタイミングが重要。すでに高レベルの放射性廃棄物は存在するので、現実としてこの取扱いを考えるべき。

宮崎氏 こうした問題には柔軟な視野で、その地域だけを見るのではなく、世界の中のその地域という見方も必要。今日の各国からの話が少しでも役に立つことを祈りたい。

◇フォーラムを終えて

フォーラム開催後、内幸町にて後援者および開催関係者との懇親会が開かれた。懇親会では、アイザックス氏は長年交流のある方々と、様々な話題について語り合っていた。

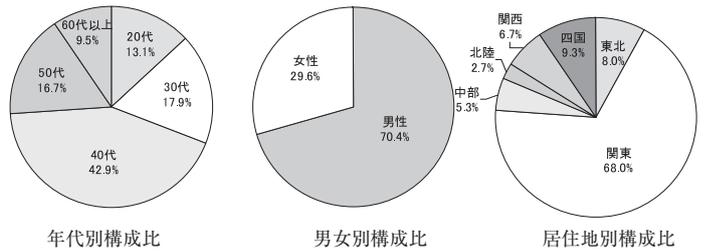
パルム氏は、フォーラム開催中から非常に気さくにスタッフに話しかける等の気配りをして頂いただけでなく、最後には労いの言葉をかけて下さった。

キム氏は若い技術者であり、国際フォーラムは初めての参加であったが、韓国が若手技術者に対して経験を積ませ、成長させようとしている姿勢を感じた。

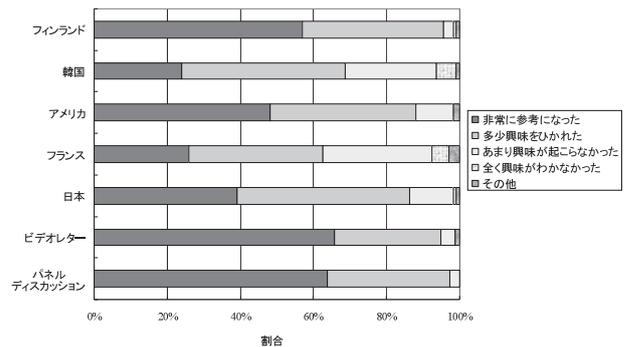
フィレ氏は古い伝統を調べ、その町を訪ねることが楽しみとのことで、目的地までの行き方を尋ねてこられた。彼女が選んだ場所は伝統的な浅草ではなく、「YANAKA(谷中)」。東京の古い寺町であるが、奇しく

◇アンケート報告

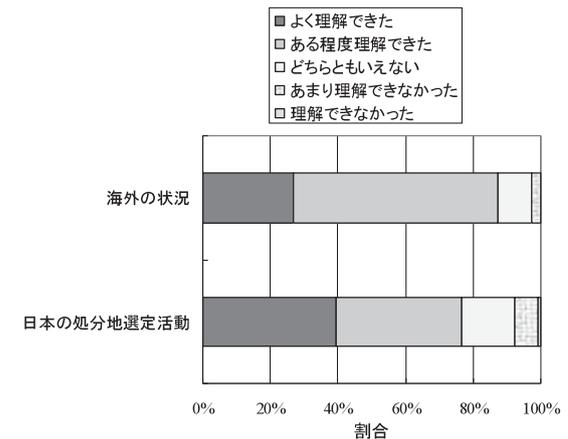
1. 参加者のプロフィール



2. 講演内容について

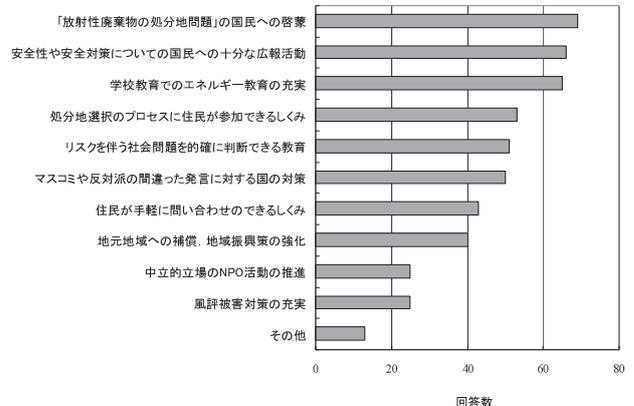


講演の内容について



選定地活動に対する理解度

3. 今後の対策について



日本の「放射性廃棄物の処分地選定問題」を考えていく上で、今後どのような政策が必要だと思いますか(複数選択可)  
注) 図の割合は、有効回答数に対する割合  
参加者データ 参加者数：180名、アンケート回答者数：125名  
WIN-Japan 小林氏(テプシス)によるアンケート集計結果の図を添付。



懇親会にて(左より、諸葛氏、フィレ氏、パルム氏、アイザックス氏、キム氏、小川氏)

も私の実家の菩提寺があり、お墓参りで頻繁に通っていた場所であった。行き方を何とか英語でお伝えすると、「ありがとう。明日行ってみるわ」と嬉しそうに答えられた。江戸の風情の残る下町を堪能してもらえたら、このフォーラムも別の意味でお役に立てたのではないかと思う。

今回のフォーラムでは、HLW 処分という重要で難し

い問題が取り上げられたが、土曜日の午後に東京都心での開催というハンディにもかかわらず、関心のある大勢の方々が参加して下さった。情報と意見を常に交換し続けるという地道な努力の継続が処分場の選定プロセスにおいて大切なことではないかと思った。

### 著者紹介

末廣利恵(すえひろ・りえ)

(財)エネルギー総合工学研究所



河田朱実(かわた・あけみ)

四国電力(株)松山支店



## □ 目安箱への投書 □

2005年10月

日本原子力学会編集委員会

編集委員会は、読者・会員・投稿者・査読委員等からのご意見、ご提案を頂き、よりよい学会誌・論文誌編集活動を目指すべく、意見窓口「目安箱」を設けております。

- ・学会誌・論文誌の企画、編集、掲載記事・論文に関すること
- ・論文査読方針・審査方針およびシステムに関すること\*
- ・新刊図書の書評の推薦

などについてのご意見・ご要望がございましたら、学会ホームページ <http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/publication/meyasu.html> または E-mail (宛先 [aesj2005meyasu@aesj.or.jp](mailto:aesj2005meyasu@aesj.or.jp)) にてお寄せ下さい。編集委員会にて検討後、担当編集委員より回答させていただきます。

学会誌、論文誌の編集活動への皆様の積極的なご参加をお願いいたします。

\*個々の査読コメント等に関するお問合せ、ご意見等については受け付けかねますのでご了承下さい。

連載  
講座

## 軽水炉プラントの水化学

第1回 軽水炉プラントにおける水の役割と  
水化学制御

日本原子力研究開発機構 内田 俊介

軽水炉プラントでは、水は中性子減速材であると同時に、燃料からのエネルギーをタービンに輸送し、発電する基幹構成材である。プラントあたりの使用量も、1,000トンに達するほど膨大である。高温高压の水で燃料を効果的に冷却し、一方で、ボイド反応度などで、原子炉の安全性にもかかわるが、燃料被覆材、構造材との相互作用の結果、腐食に伴う様々な派生效果を生じ、しばしばプラントの信頼性にかかわる問題の要因となることは周知の通りである。本連載講座では、軽水炉プラントにおける水の位置づけおよび役割をレビューするとともに、水の基礎物性、材料との相互作用の基礎事項、そしてプラントにおける諸課題を10回のシリーズで紹介する。第1回では、まず、原子力発電プラントにおける水の役割と水化学制御の概要について紹介する。

## I. はじめに

わが国では、2009年現在、23基の加圧水型原子炉(PWR:pressurized water reactor)と32基の沸騰水型原子炉(BWR:boiling water reactor)が稼働し、わが国総発電量の約35%に当たる4,700万 kWe の電力を供給している。

1970年初頭以降、原子力発電プラントの運転が本格化するとともに、燃料、機器、配管の損傷など、種々の材料にかかわるトラブルが顕在化し、その対応のためにプラントの稼働率が低下し、同時に、プラントの点検、補修に伴い従事者の放射線被ばく線量が問題になった。

燃料との相互作用では、主に米国プラントで顕在化したCILC(crud induced localized corrosion)による被覆管の損傷が周知であるが、国内炉ではBWR, PWRともに、冷却水が原因となる燃料損傷はほとんど報告されていない。しかし、いったん燃料損傷が生じると、燃料棒内に蓄積された放射性核分裂生成物が冷却水を通してプラントから環境へ放出されるとともに、プラント線量率の増大の一因ともなった。

構造材との相互作用では、PWRでは蒸気発生器伝熱管に各種腐食損傷が顕在化し、伝熱管の施栓作業による稼働率の低下や熱効率の低下が問題となった。BWRでは、主としてステンレス鋼配管の応力腐食割れが顕在

化し、点検と補修のために稼働率低下や従事者の被ばく線量の増大が問題となった。

いずれも腐食にかかわる課題で、材料因子のほか、水化学因子が深くかかわっている事象であった。一方で、構造材の腐食に伴い発生する腐食生成物は、主として燃料表面で放射化され、 $^{60}\text{Co}$ や $^{58}\text{Co}$ といった放射性核種となり、燃料棒表面からいったん冷却水中に脱離、放出された後、冷却系の機器、配管あるいは蒸気発生器に付着、蓄積する。これがプラントの線量率増大の要因となり、従事者の被ばく線量上昇を引き起こした。

このように、冷却水は、燃料、構造材の損傷の要因となるとともに、燃料、構造材の損傷の影響を強く受けて、プラント全体の問題と密接に係わってきた。

## II. 原子力発電プラントにおける冷却水の役割

軽水炉において冷却水に求められる主な役割は、原子炉からタービンへのエネルギー輸送と核分裂維持のための中性子の減速である。すなわち、水は燃料を冷却し、PWRでは蒸気発生器(SG:steam generator)を介して間接的に、BWRでは直接、自らが蒸気となってタービンを回して、熱エネルギーを電気エネルギーに変える。一方、原子炉で核分裂によって発生した高エネルギーの中性子(中性子の運動エネルギーが高い状態にあるもので、通常は約2 MeV、中性子の速度に換算すると $2 \times 10^7$  m/s)を $^{235}\text{U}$ に吸収されやすく、核分裂を可能にする低エネルギー(通常は、0.025 eV、速度では、2,200 m/s)

Water Chemistry of Light Water Cooled Reactor Plants(1); Major Roles of Cooling Water and Its Control:Shunsuke UCHIDA.

(2008年 5月7日 受理)

に低下させ、核分裂連鎖反応を持続させる。

ところが、高温の冷却水は材料と接することにより、主として腐食反応によって、燃料被覆管や構造材の健全性に影響を与えるとともに、構造材の腐食によって発生した腐食生成物が原子炉で中性子照射を受け、放射性核種となって、作業者の被ばく線量増大の原因となる。また、冷却水からこうした放射性腐食生成物の除去を積極的に除去すると、放射性廃棄物の発生量が增大するなど2次的な影響が派生する。

冷却水、減速材としての本来の役割を果たしつつ、燃料、構造材の健全性を確保し、線量率の増大を抑制して、かつ放射性廃棄物発生量の増大を抑制するためには、広くプラント全体を俯瞰した、最適な水化学制御が望まれる。

1. 冷却系の概要と主要構成材料

第1図には、PWRとBWRの冷却系の主要機器、系統とともに、主な構成材料を示す。

PWRは間接サイクルを採用し、原子炉で発生した高温の冷却水をSGに導き、水・水熱交換によって生成した蒸気をタービンに送る点が特徴である。原子炉からの1次冷却系の高温水は、SGの伝熱管(ニッケル基合金)内を流れ、伝熱管外で発生した蒸気は、タービンに導かれる。タービンはBWRと同じく、高压タービンと低压タービンとから構成され、まず高压タービンを回した後、湿分離器(最近のプラントでは、湿分加熱器)で、蒸気を乾燥状態に戻してから、低压タービンに送られ

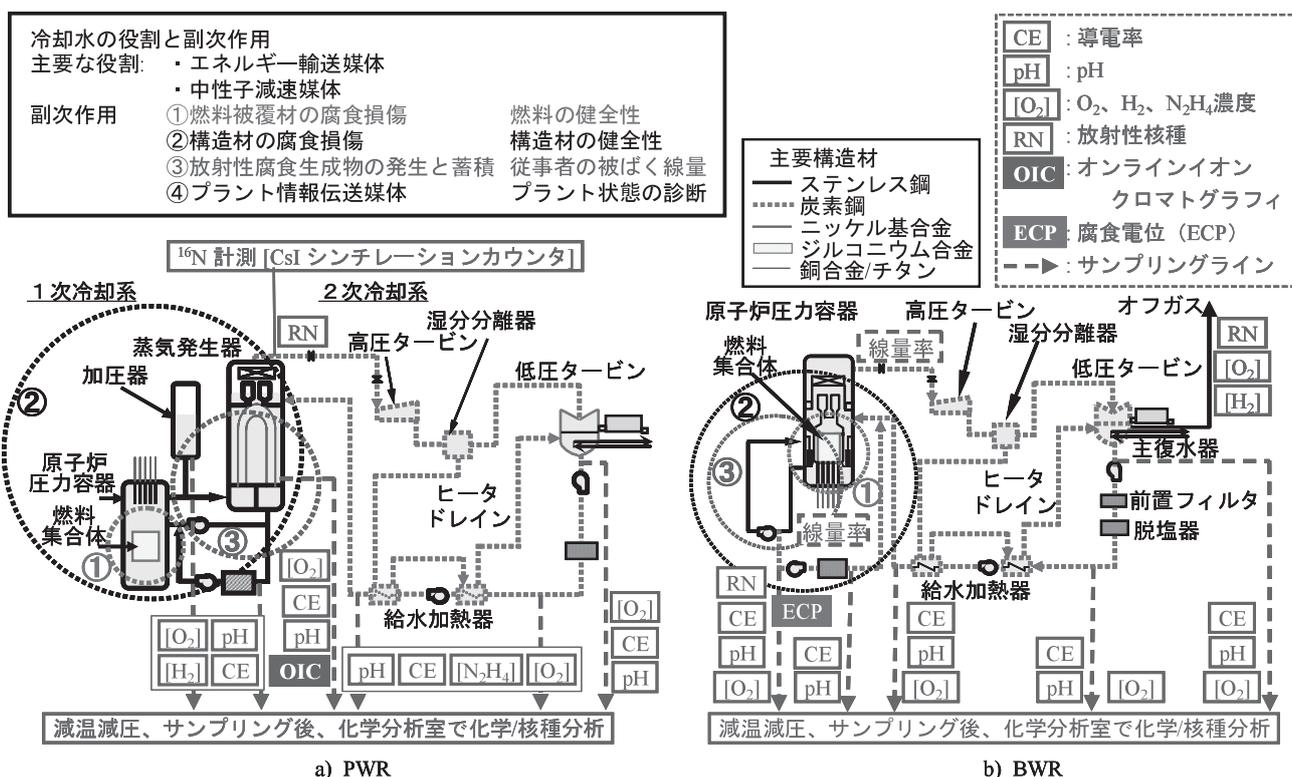
る。低压タービンの排蒸気は、復水器で海水冷却により、水に戻される。復水は、浄化系で不純物を除去したあと、低压・高压加熱器(ヒータ)で昇温後、SGに戻る。1次冷却水は循環ポンプで強制循環され、その一部は浄化のため原子炉浄化系を通る。原子炉压力容器は高張力鋼であるが、接液部にはステンレス鋼のオーバーレイが施されている。循環系配管はステンレス鋼製である。燃料被覆管には、BWRと同じく、中性子吸収断面積の小さなジルコニウム合金製が用いられており、スプリングほかの部材にはニッケル基合金が使われている。2次冷却系では、タービン系の配管類は、主として炭素鋼製で、給水ヒータの伝熱管に古いものでは銅合金、新しいものではステンレス鋼が採用されている。復水器伝熱管には銅合金(最近ではチタン合金)が採用されている。

BWRは直接サイクルを採用し、原子炉で発生した高温の蒸気を直接タービンに導く点が特徴である。SGがなく、冷却系システムは単純で、構成材料もSGを除くと基本的にはPWRと同様である。給水系で発生した腐食生成物が直接原子炉に持ち込まれることを抑制するため、給水加熱器伝熱管などにはステンレス鋼が採用されている。

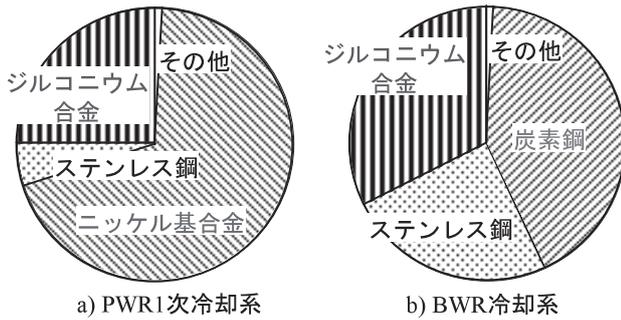
第2図に、PWR1次冷却系とBWR冷却系の主要構成材料とその接液面積を比較して示す。

2. 水化学制御

PWRとBWRの冷却系の水化学制御の特徴を第1表に示す。PWRでは、SGを介して、1次系と2次系が



第1図 原子力発電プラント冷却系の主要構成材と水化学関連データ採取法



第2図 冷却系の主要構成材料とその接液面積比

第1表 主要制御および水化学パラメータの比較

諸元	PWR 冷却系		BWR 冷却系
	1次系	2次系	
温度(°C)	310	285	285
圧力(MPa)	13.4	6.7	6.7
反応度制御	制御棒 + 化学シム(B)		制御棒 + ボイド(流量)
pH	6.8~7.4 <sup>a)</sup>	8.8~10 <sup>b)</sup>	5.6~8.6
導電率(μS/cm)	~1 <sup>c)</sup>	3~5 <sup>d)</sup>	<1
ボロン(ppm)	100~2,000 <sup>e)</sup>	—	—
リチウム(ppm)	<3.5 <sup>e)</sup>	—	—
ヒドラジン(ppb)	—	0.1~0.6 <sup>d)</sup>	—
酸素(ppb)	<5	<5	200[<10] <sup>e)</sup>
水素(ppm)	2~3	—	10[50] <sup>e)</sup>
タービン線量率		線量率 フリー	運転中： <sup>16</sup> N 停止中： <sup>60</sup> Co 他

<sup>a)</sup>高温での pH, <sup>b)</sup>室温での pH  
<sup>c)</sup>燃焼に伴い B, Li を連動させて制御  
<sup>d)</sup>プラントによって差異, <sup>e)</sup>水素注入の場合

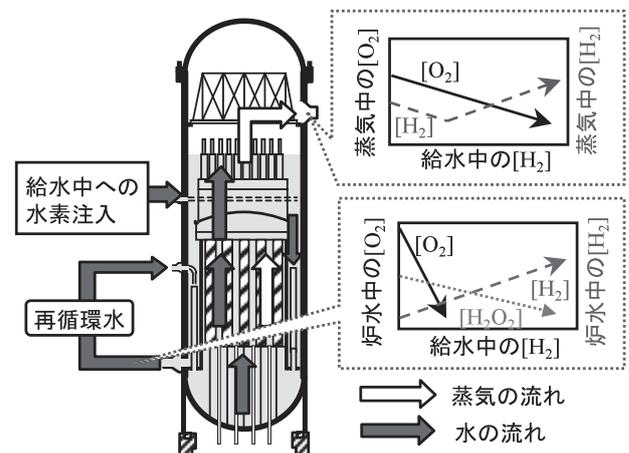
完全に分離できるため、それぞれ水化学を独立に制御できる点が特徴である。両系統とも、さまざまな注入物により、脱酸素、高 pH 化を図っている。特に、1次冷却系では、燃料の燃焼に伴う反応度を制御するため、ホウ素をホウ酸(H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>: オルトホウ酸が主)の形で注入している。ホウ酸濃度は運転サイクル初期には高く、運転が進み、燃料の反応度が低下するにつれて、徐々にホウ酸濃度を低下させ、炉内の全反応を一定に保っている。ホウ酸は炉水を酸性側にシフトさせるため、炉水には水酸化リチウム LiOH を注入し、高温 pH を 7 付近に保っている。LiOH の濃度はホウ酸濃度に連動し、運転サイクル初期には高く、末期には低く保って、pH 一定を保持している。天然の Li に含まれる<sup>6</sup>Li(存在比: 7.6%)は(n, α)反応の結果、トリチウムを生成するため、プラントでは、高価な濃縮度99.7%の<sup>6</sup>Liを使用している。BWRと同様に、原子炉の高放射線下では、水分子の放射線分解の結果、酸素(O<sub>2</sub>)などの酸化種の濃度が増加するが、この放射線分解反応(ラジオリシス)を抑制するた

め、水素(H<sub>2</sub>: 2~3 ppm)を注入して、酸素濃度([O<sub>2</sub>])の増大を抑制して、[O<sub>2</sub>]を常に検出限界以下(< 5 ppb)になるように制御している。

PWRの2次冷却系では、1次冷却系と同じく、脱酸素と高 pH 化を図っているが、水の放射線分解の影響を考慮する必要がないため、基本的には火力発電プラントのボイラ水の制御に類似している。[O<sub>2</sub>]はヒドラジン N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>の注入により、低減させている。pH 制御は、かつては、リン酸処理により行われていたが、SG 伝熱管の支持管盤との隙間などに濃縮され、腐食を引き起こすことが知られ、最近ではアンモニアなどの揮発性薬液での pH 制御(AVT: all volatile treatment)が主流となっている。また、エタノールアミンほかの薬液による pH 制御も一部プラントで採用されている。

BWR冷却系では、燃料表面での沸騰によるボロンなど注入物の燃料表面への析出をさけるため、基本的には中性純水が使用される。このため、原子炉での反応度制御は、制御棒のほか、ボイド反応度が活用され、運転サイクル初期には炉心流量を低め、ボイド率を高くし、燃料の反応度の低下に伴い、徐々に流量を高めて、ボイド率を低下させて、反応度を高めている。炉水の[O<sub>2</sub>]を低下させるために、PWRのようにH<sub>2</sub>を添加しても、H<sub>2</sub>の過半が炉心部で蒸気中に移行して、ラジオリシスの抑制には寄与しなくなるため、元来、水素添加は行われていなかった。このため、原子炉での水の放射線分解の結果、炉水中にO<sub>2</sub>、過酸化水素(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)などの酸化性分解生成種が存在する。しかし、1980年代後半から、給水系からわずかな量のH<sub>2</sub>(原子炉入口で約0.5 ppm)を添加して、再循環する冷却水中の[O<sub>2</sub>]、[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]を抑制する手法が採用されている。第3図に示すように、炉心部での完全なラジオリシス抑制は難しいが、炉心周辺のダウンカム部でのラジオリシスにより再循環系と炉心下部のO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>の抑制は可能である。

BWR冷却系では、復水および炉水浄化系で不純物を取り除き、冷却水を中性純水で制御してきたが、最近で



第3図 BWRでの水素注入効果の概要

は放射性腐食生成物の発生抑制のための酸素注入，ステンレス鋼の応力腐食割れ発生緩和のための水素注入のほか，放射性腐食生成物の構造物への付着・蓄積を緩和するために微量の亜鉛の注入，水素注入効果を助長するための貴金属イオン添加など，さまざまなガス，金属イオンなどの注入が実施されるようになっている。

このように，PWR および BWR では，冷却系のさまざまな場所に，さまざまな材料が使われており，冷却水はこれらさまざまな構造，材料の間を流れる。このため，冷却水はさまざまな材料の影響を受ける。一方，材料にとっては，すべての材料にとって好ましい冷却水水化学制御が望まれる。

### 3. 水化学パラメータの測定

適切な水化学制御のためには，各系統の水化学諸元を把握することが不可欠で，このためには，冷却系の主要部位で，水化学諸元を定量化することが必要となる。

第1表には，各系統での導電率，pH などの水化学マクロ指標， $[O_2]$ ， $[H_2]$  などの溶存気体濃度，Fe ほか金属イオン成分あるいは粒子の濃度，などの管理目標値を示す。管理目標値は水化学をプラントにとって好ましい状態に維持するために設定された値であり，常時監視されている。

水化学パラメータの測定方法は，インライン測定とオフライン測定に大別される。pH，導電率，酸素濃度などは，冷却系に設置されたインライン測定器で常時監視される。金属イオン濃度などはサンプリング系より試料水を採取し，化学分析によって測定される。第1図には，PWR，BWR それぞれのプラントでの代表的なインライン測定的位置を示した。インライン測定とはいっても，試料を外部に取り出すことなく測定はするが，現状では試料水を減温減圧して測定するものである。高温高压のまま直接測定するものは，一部の BWR で採用されている腐食電位 (ECP: electrochemical corrosion potential) くらいである。腐食生成物である金属イオン，酸化粒子(クラッド)は，サンプリングラインから採取され，必要に応じて濃縮した後，化学分析，核種分析により，その同定と定量が行われる。アニオンを中心とした化学種については，オンラインのイオンクロマトグラフィの採用が普及し，半自動分析で，データの採取が行われている。

水化学諸パラメータのデータを読む場合，留意すべきは，過半のデータが減温減圧プロセスを経て測定されたものであり，一部不安定分子などは，このプロセスでの分解，反応によって，本来のプラント値とは異なる値を示す可能性がある点である。PWR 2次冷却系での $[O_2]$ ，BWR での $[O_2]$ ， $[H_2O_2]$  などについては，特に，この配慮が重要である。

### 4. 水の情報伝送媒体としての特性の活用

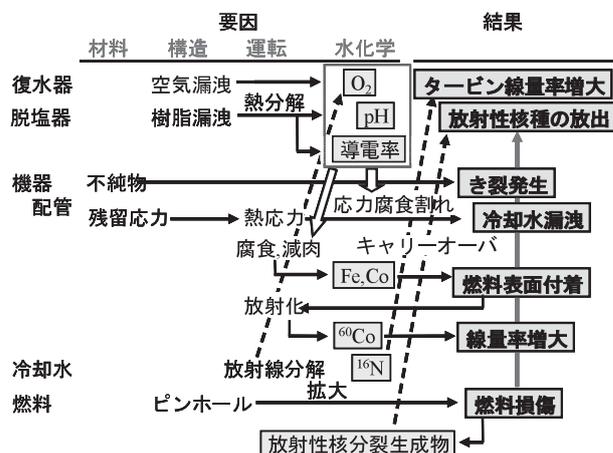
プラントでは，化学者が中心となって，水化学分析を行うとともに，そのデータ評価を行い，プラントの異常の有無を確認し，ひとたび異常の兆候を検知すると，測定頻度を高め，監視を厳重にして，異常の拡大を抑制するとともに，燃料，構造材への影響を抑制するため適切な対応を施す。非常に地味な仕事ではあるが，こういった監視によってプラントの信頼性が確保されている。

水化学の副次作用の4番目にプラントの情報伝送媒体を取り上げ，異常診断と記載したが，プラントにおける僅かな異常兆候を水化学のデータ分析から見出すことができるし，水化学データに基づいた異常の予知についても研究が進んでいる。

## III. 冷却水と燃料，構造材の相互作用

冷却水と燃料，構造材の相互作用の詳細は，本連載講座の後半の実機での水化学の中で紹介するが，代表的なものを，BWR 冷却系を例として，第4図に示す。冷却水の放射線分解によって生成する酸素などの酸化種，復水脱塩器から漏洩した樹脂が炉内で熱分解した結果，低下した pH などによって，炉内の酸化性が強まり，炉内機器や再循環系配管などの構造材の応力腐食割れや腐食，減肉が加速される。腐食環境を把握することで，このような問題の未然防止に努めるとともに，腐食結果である腐食生成物あるいはその放射化物を把握することで，実際の問題を確認できる。

燃料，構造材との相互作用で，特に重要なのは，腐食生成物の発生と放射化そしてその蓄積による線量率の増大である。この課題は水化学に固有の重要課題であり，プラント定期点検時の従事者の被ばくを抑制するためにも，放射性腐食生成物の発生と蓄積抑制には絶えず細心の注意が必要である。第2表には，腐食生成物の発生，蓄積にかかわる諸挙動についての知見をまとめる<sup>2)</sup>。発生，放射化そして蓄積のそれぞれのステップにおいて，



第4図 燃料，構造材と冷却水の相互作用 (BWR の事例)

第2表 腐食生成物挙動にかかわる主要現象, パラメータおよび支配メカニズム

ステップ	現象	PWR(1次冷却系)	BWR	主要パラメータ	メカニズム/モデル	
発生	腐食(コロージョン)	SG 伝熱管	復水器	温度, pH, [O <sub>2</sub> ], [H <sub>2</sub> ]	電気化学	
	腐食(エロージョン)	SG 伝熱管	タービン	温度, [O <sub>2</sub> ], 流速	流動加速腐食モデル	
除去	イオン交換樹脂	浄化系	浄化系	流速	クーロンポテンシャルモデル	
	吸着	—	浄化系	pH, 流速, 粒径	物理/化学吸着	
移行	ろ過	—	浄化系	pH, 流速, 粒径	体積/表面ろ過	
	化学形態変化	1次冷却系配管	—	温度, pH	濃度勾配による移行	
放射化	吸着	—	1次冷却系配管	温度, [O <sub>2</sub> ]	熱平衡モデル	
	付着(クラッド)	燃料	—	温度, pH, 流速, 粒径	衝突確率モデル	
	付着(クラッド)	—	燃料	熱流束, 粒径	薄膜蒸発乾固モデル	
	付着(イオン)	燃料	燃料	温度, pH	熱平衡モデル	
	脱離(クラッド)	燃料	燃料	温度, pH, 流速	機械的剥離	
	脱離(イオン)	燃料	燃料	温度, pH	濃度勾配による移行	
	中性子照射	燃料	燃料	中性子束, 断面積	核反応	
	炉内構造材からの溶出	炉内構造材	炉内構造材	温度, pH	熱平衡モデル	
	蓄積	付着(クラッド)	SG 伝熱管	—	pH, 流速, 粒径	濃度勾配による移行
		付着(イオン)	—	1次冷却系配管	温度, pH, 流速	衝突確率モデル
脱離(クラッド)		SG 伝熱管	—	温度, pH, [O <sub>2</sub> ], [H <sub>2</sub> ], 流速	機械的剥離	
脱離(イオン)		SG 伝熱管	—	温度, pH	熱平衡モデル	

適切な対応策が重要である。

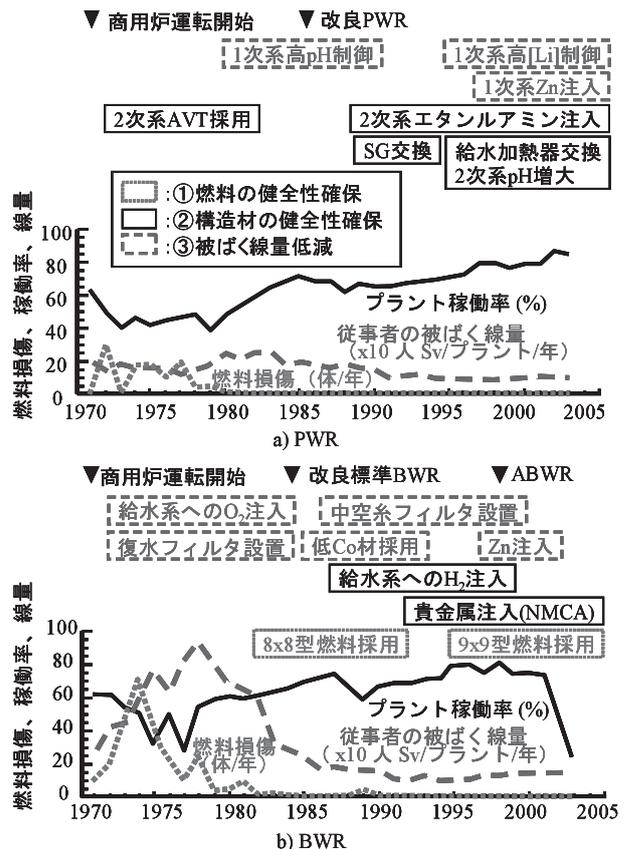
#### Ⅳ. 水化学制御の変遷

過去35年余の原子力プラントの水化学制御および水化学にかかわる燃料, 構造材の主な改善の変遷とその成果を第5図に示す。水化学制御は, プラントの安全性, 信頼性の確保, 向上に密接にかかわるが, 多くの場合, 唯一の方策ではなく, プラントのシステム, 構成材料, 運転履歴に応じて, 適切に選択され, 採用されるべきものである。上記した安全性, 信頼性に, 経済性の視点も加えた大きな視点での選択が重要であり, 対象とする課題にのみ偏ることなく, プラント全体の視点での, 水化学制御の功罪を十分に評価し, 最適な制御法を選定することが重要である。このためには, プラントシステム, ハードウェア, そしてプラントの運用に関する幅広い知識が必要とされる。

#### Ⅳ. 今後の講座概要

本講座では, 水化学の位置づけを, プラントからの視点に力点を置いて記載したが, 引き続き, 水化学の基礎を, 次いで実機での諸課題とその対応を, 以下の順序で連載する予定である。

- 水化学の基礎(1)—腐食と電気化学
- 水化学の基礎(2)—酸化皮膜特性と計測
- 水化学の基礎(3)—放射線化学
- 水化学の基礎(4)—水質計測
- 水化学の基礎(5)—水の浄化と浄化装置



第5図 水化学制御, 燃料・構造材の改善とその成果

- 実機での水化学(1)—燃料/水相互作用
- 実機での水化学(2)—構造材料/水相互作用
- 実機での水化学(3)—被ばく線量の低減
- 実機での水化学(4)—プラント管理, 標準化・規格化

## V. おわりに

冒頭に記載したように、水化学を狭く冷却水の化学と考えるか、冷却系全般にわたる化学と考えるかで、その後の対応が随分異なる。筆者は、広くプラントシステムにかかわるプラント化学として、理解いただけるように念願するとともに、水化学に携わる技術者、化学者に対しても、システム志向を忘れず、他の分野を常に念頭に置いた水化学制御を心がけていただけるよう念願し、第1回を締めくくりたい。

### —参考文献—

- 1) 日本原子力学会編，原子炉水化学ハンドブック，コロナ社，(2000)．
- 2) 山脇道夫編，動力炉燃料・材料ガイドブック，日本原子力産業会議，(1998)．

### 著者紹介

内田俊介(うちだ・しゅんすけ)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)原子炉水化学，原子炉材料・燃料，計測

## 学会誌アンケートシステムのご案内

編集委員会では、多くの読者からのご意見をうかがうため、学会のホームページを利用した Web アンケートを導入しております。学会誌に関する感想や意見をお寄せください。

学会誌では Web 上で回答いただいたデータをもとに、記事の方向づけを進めていく方針です。

### ＜アンケートの回答方法＞

- ① 学会誌評価専用の Web サイト (<http://genshiryoku.com/enq/>) を開いてください。  
ここでは、過去 2 か月の学会誌を選択することができます。評価していただく号をクリックしてください。
- ② 当該号の記事が表示されましたら、それぞれの記事について 5 段階で評価をお願いいたします。この際、一部の記事に対する評価だけでも構いません。  
さらに『次へ』をクリックしてください。
- ③ 学会誌全体に対する評価や意見、今後掲載を希望する記事、編集委員会への要望などを記入できる画面が表示されます。回答は意見のある項目のみで結構です。  
記入されましたら『次へ』をクリックしてください。
- ④ あなたご自身についておうかがいする画面が表示されます。ここでいただいた情報は、アンケート結果を全体で集計する際にのみ、限定して使わせていただくものです。
- ⑤ 『送信』をクリックすると、終了です。

・②、③のページでは、途中まで入力した回答の内容を保存することができます。詳しくは②、③ページ目の下部にある説明をご覧ください。

・個別の記事について、意見や要望を記入できるページもご用意しております。②のページの理由・コメント欄の『回答する』をクリックしていただくと、記入画面が表示されます。こちらにもご回答していただければ、学会誌の方向づけにいっそう役立てることができると編集委員会では考えています。

連載  
講座軽水炉プラント  
—その半世紀の進化のあゆみ第17回(最終回) 今後の軽水炉の開発(3)  
—超臨界圧水冷却炉と低減速炉

(株)東芝 山田勝己, 日本原子力研究開発機構 大久保 努

本連載もこれで最終回を迎えるが、今回は現在、研究開発中の超臨界圧水冷却炉と低減速炉について紹介する。これらはともに我が国から発信されている研究で、すでに長い基盤的な研究の蓄積を有し、基本的な概念も構築されている。超臨界圧水冷却炉は、超臨界圧条件を利用した熱効率の格段の向上とシステムの簡素化による大幅な経済性の向上を目指すものであり、低減速炉は、MOX燃料を用いた稠密炉心の導入によりプルトニウムの持続的な多重サイクルの実現を目指すものである。どちらも、軽水炉の可能性をさらに追求しようとする斬新な概念である。なお、超臨界圧水冷却炉については、米国エネルギー省(USDOE)の提唱する第4世代原子力システム(以下、第4世代炉)の一つにも選定されてお

り、その関連での研究開発も国内外で進められている。

## I. 超臨界圧水冷却炉の研究開発

超臨界圧水を炉心冷却材に用いる原子炉の概念は古くからあったが、第4世代炉として注目を集めるようになったのは、東京大学での研究に負うところが大きい。東京大学では、1989年から概念検討を始め、国内外での研究開発をリードしてきた。燃料・炉心の概念から、プラント制御系、安全系、過渡時・事故時プラント挙動、起動手順等、一連の概念検討を行ってきた<sup>1)</sup>。これらの成果を受けて、米国、カナダ、韓国等でも研究開発が始まり、2002年に水冷却炉で唯一、第4世代炉として選定された<sup>2)</sup>。現在、第4世代炉国際フォーラム(GIF: Generation IV International Forum)の枠組みの下に、国際協力で研究開発を推進する体制が構築されている。

本章では、超臨界圧水冷却炉(SCWR)の技術的特徴と開発の現状を中心に紹介する。

## 1. SCWR の概念

GIFでは、SCWRを「水の臨界点より高い領域で運転する高温・高圧の水冷却原子炉」と定義している<sup>2)</sup>。水は、臨界圧力を超えると、沸騰現象がなくなり、厳密には水(液相)と蒸気(気相)の区別ができなくなる。この性質を利用すると、第1図に示すような貫流型原子炉と直接サイクルを組み合わせた簡素な発電システムが可能となる<sup>3)</sup>。さらに、冷却材温度が飽和温度で制限されないため、現行軽水炉と比べて炉心出口温度を大幅に高くできる。このため、タービン入口の圧力および温度を高くでき、熱効率を飛躍的に高くできる。したがって、SCWRでは、より簡素なシステムでより多くの電力が得られることになり、建設単価を大幅に低減できるポテンシャルがある。SCWRは、後に述べるように、様々なタイプの炉が考えられているが、本稿では、現行軽水炉の発展型である压力容器型の熱中性子炉を中心に紹介する。

## 2. SCWR の技術的特徴

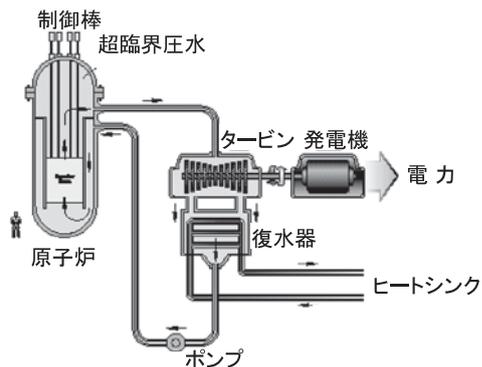
BWR, PWR, SCWRの定格運転中の炉心内における

*LWR-Plants - Their Evolutionary Progress in the Last Half-Century—(17): Development of Next LWRs③; Supercritical-Pressure Water-Cooled Reactors and Reduced-Moderation Water Reactors: Katsumi YAMADA, Tsutomu OKUBO.*

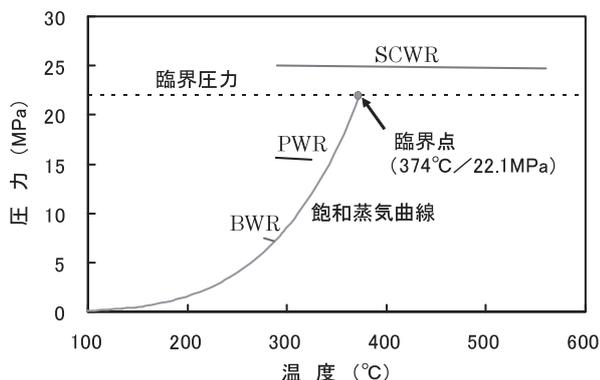
(2008年 10月 4日 受理)

各回タイトル

- 第1回 原子力発電前史
- 第2回 軽水型発電炉の誕生
- 第3回 日本の研究用原子炉の始まり
- 第4回 日本の原子力発電の始まり
- 第5回 米国および日本の軽水炉の改良研究(PWR)  
— SHIPPINGポートから美浜1号機まで
- 第6回 軽水炉の改良研究(BWR)  
— ドレスデンから敦賀1号炉まで
- 第7回 日本の軽水炉開発(1)—軽水炉の導入(PWR)
- 第8回 日本の軽水炉開発(2)—軽水炉の導入(BWR)
- 第9回 日本の軽水炉開発(3)—PWRの改良標準化①
- 第10回 日本の軽水炉開発(4)  
— 第1次改良標準化計画(BWR)
- 第11回 日本の軽水炉開発(5)—PWRの改良標準化②
- 第12回 日本の軽水炉開発(6)  
— 第2次改良標準化計画(BWR)
- 第13回 日本の軽水炉開発(7)—PWRの改良標準化③
- 第14回 日本の軽水炉開発(8)  
— 第3次改良標準化計画(BWR)
- 第15回 今後の軽水炉の開発(1)  
— 導入計画中の軽水炉①
- 第16回 今後の軽水炉の開発(2)  
— 導入計画中の軽水炉②



第1図 超臨界圧水冷却炉(SCWR)の基本構成<sup>2)</sup>



第2図 炉心内の圧力・温度の変化

冷却材圧力・温度の変化範囲の一例を第2図に示す。現行の軽水炉はいずれも水の臨界圧力(22.1 MPa)より低い圧力で運転をしている。このため、沸騰現象により燃料棒表面が蒸気で覆われると熱伝達率が不連続に減少し(BWRで沸騰遷移、PWRで核沸騰限界と呼ばれる)、燃料被覆管温度が急上昇してしまう。これを避けるため、燃料集合体熱出力に熱的制限を設けている。したがって、冷却材温度は飽和温度を超えることはない。これに対して、SCWRの運転圧力は臨界圧力より高いため、沸騰現象が起こらない。したがって、燃料棒表面が蒸気膜に覆われることによる制限はなくなり、冷却材温度は臨界温度を超えて高くすることができる。

SCWRでは、タービン入口の圧力を25 MPa、温度を500

～600℃まで高める検討がされており、熱効率は44～45%となり、現行軽水炉の熱効率33～35%の約1.3倍となる。すなわち、同一の熱出力であれば、電気出力は約30%多く得られる。さらに、炉心出口では冷却材が全量、密度が小さく圧縮性を持つ流体(慣例的に、蒸気と呼ぶ)となるため、第3図に示すように、現行軽水炉と比べて以下のようにシステムの簡素化が可能になる。

BWRでは、炉心で沸騰して二相流となった冷却材は気水分離系(セパレータ/ドライヤ)で水と蒸気に分離して、蒸気のみタービンに直接送られる。水は給水と混合して、冷却材再循環系により再び炉心に送られる。PWRでは、運転圧力を高くし冷却材温度を飽和温度より低く抑えている。炉心を出た冷却材は蒸気発生器で熱交換をした後、1次冷却材ポンプで加圧されて原子炉に戻る。2次側では給水の一部が沸騰して蒸気を発生し、気水分離されてタービンに送られる。また、PWRでは、1次系の圧力調整のため加圧器が設置される。

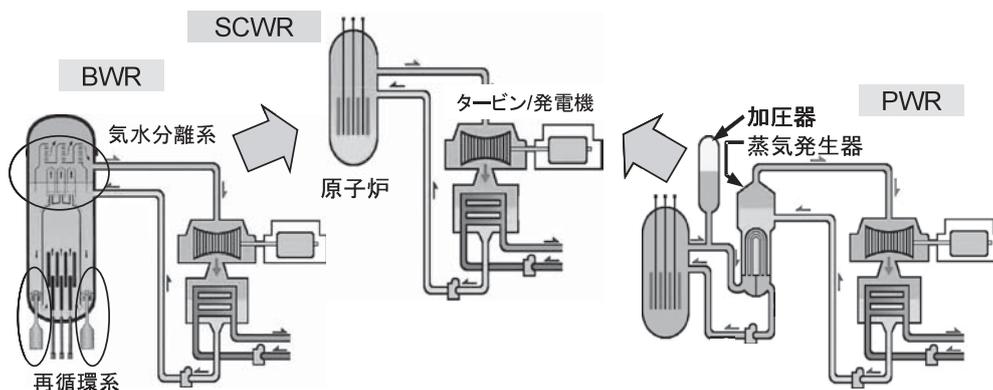
SCWRでは、炉心出口で全冷却材が蒸気となるため、BWRの気水分離系や再循環系、PWRの蒸気発生器や加圧器が必要なくなる。SCWRは貫流型原子炉であるPWRと直接サイクルであるBWRの両方の長所を持つ発電システムとなる。その他、SCWRには、現行軽水炉と比べて炉心内のエンタルピー上昇が大きいいため、冷却材流量が1/10程度に小さくなる等の特徴がある。

### 3. SCWRの研究開発課題

SCWRでは、現行軽水炉や高速炉開発で培った技術が活用できる。また、タービン系は超臨界圧火力発電の技術が基本的にそのまま使用できる。このため、研究開発課題がほぼ原子炉系に限られる。したがって、相対的に開発期間・コストが少なくすみ、開発に伴うリスクも小さいと考えられる。

中期的な研究開発課題としては、炉心を高温・高圧の超臨界圧水が流れることに起因して、主に以下のような項目がある。

- (1) 燃料集合体内を超臨界圧水が流れる際の伝熱流動特性の定量的な把握・高精度の予測手法の開発



第3図 SCWR/BWR/PWRプラントの基本構成の比較

- (2) 高温・高圧・放射線環境下での使用に耐える材料の改良開発および超臨界圧水の放射線水化学の解明  
 (3) SCWR の特徴を活かしたシステム設計および技術的・経済的成立性の評価

上記(1), (2)の成果は(3)に統合されて、最終的にはプラント概念として評価される。GIF では、経済性に加え、核拡散抵抗性・物的防護およびリスク・安全性を評価して、実現性(viability)を評価する計画になっている<sup>2)</sup>。長期的には、燃料の健全性の検証(燃料照射試験)や安全性の実証(過渡・事象を模擬する総合試験)等が必要になると考えられている。

#### 4. SCWR の開発状況

SCWR は、設計により高速中性子炉でも熱中性子炉でも成立する。第 1 表に、現在、各国で開発中の SCWR をまとめる。日本は、経済産業省(METI)の補助事業として2000年度から熱中性子炉を、文部科学省(MEXT)の委託事業として2005年度から高速中性子炉を、それぞれ研究開発してきている。海外では、ユーラトムおよび韓国が压力容器型 SCWR を開発している。カナダは、CANDU 炉を発展させた重水減速の圧力管型 SCWR を開発中である。

国際的には、GIF で SCWR が選定された2002年秋から情報交換を中心に協力を進めてきた。概念により異なる研究開発課題もあるが、基礎的な分野での共通課題も多く、相互の研究開発の促進に役立ってきた。現在、GIF 全体としての枠組み協定が 8ヶ国・機関で締結されており、その枠組みの下に、日本、カナダ、ユーラトムが SCWR 開発を協力して進めることを約束した取決めを締結した<sup>4)</sup>。さらに、個別の研究開発分野では、韓国、フランスが加わった体制が構築されつつある。近い将来には、伝熱流動・安全分野および材料・水化学分野で国際協力のための取決めを締結する予定である。

#### 5. まとめ

SCWR は、現行軽水炉の一つの発展形であり、革新性を備えつつ、実現可能性の高い原子炉概念である。今後、国内機関が協力して、GIF の国際協力の枠組みを活用しながら、SCWR の早期実現を目指して研究開発を効率的・効果的に進めていく予定である。

第 1 表 研究開発中の SCWR 概念

	熱中性子炉	高速中性子炉
压力容器型	日本(METI) ユーラトム 韓国	日本(MEXT)
圧力管型	カナダ	—

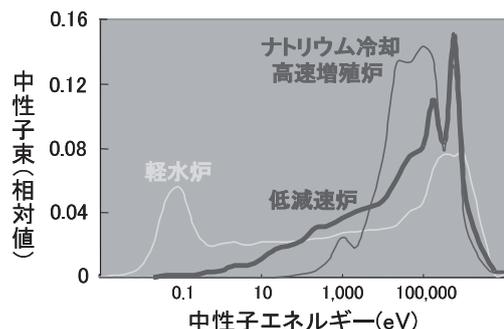
## II. 低減速炉の研究開発

### 1. 低減速炉概念の特徴

低減速炉は、一言で簡単にいえば、水冷却の高速炉である。しかし、その技術は、これまで培われてきた軽水炉技術をベースに活用しているところが最大のポイントである。一般的に、低減速炉の設計においては、プラントシステムについてはできる限り既存の軽水炉のものを活用し、新しくなる部分は、その特徴である炉心を中心としてせいぜい炉内構造物や圧力容器までに留めることを基本的な考え方としている。この炉心では、燃料棒配列を稠密にして冷却水の割合を必要最小限まで減らして高速炉心化することにより、<sup>238</sup>U から<sup>239</sup>Pu への転換比の増大を図り、プルトニウムの多重リサイクルや増殖によってウラン/プルトニウム資源の持続的かつ格段の有効利用を目指しているものである。このため、プルスーマルの次の段階のプルトニウム利用に柔軟性と効率性を与える選択肢の一つであり、軽水炉技術に立脚しているために、比較的早期に、低開発コストで実用化できる可能性も高い。

低減速炉という名称は、核分裂で発生する高速中性子の減速をできる限り低く抑えた水冷却炉であるという炉物理的な特徴に由来する。その結果、第 4 図に示す中性子スペクトルの比較に見られるように、低減速炉においては、現行軽水炉のスペクトルに現れる特徴的な熱中性子のピークは現れず、ナトリウム冷却高速増殖炉に近似的な高速化スペクトルになっていることがわかる。

ところで、1980年代には、当時の高速増殖炉開発の遅れを受けて、軽水炉から高速炉への効果的な繋ぎを行う炉概念として、高転換軽水炉(HCLWR)の研究が欧州や日本で進められ、0.8程度の転換比を持つ炉心の概念研究や熱流動分野での多くの基礎的な研究がなされた。その後、1990年代半ば以降、我が国において積極的に進められてきた低減速炉の研究では、HCLWR の研究資産や経験も有効に継承した迅速な研究の立ち上げが行われ、持続的なプルトニウム多重リサイクルの達成を第 1 の目的として、最初から1.0を超える高転換比(すなわち、増



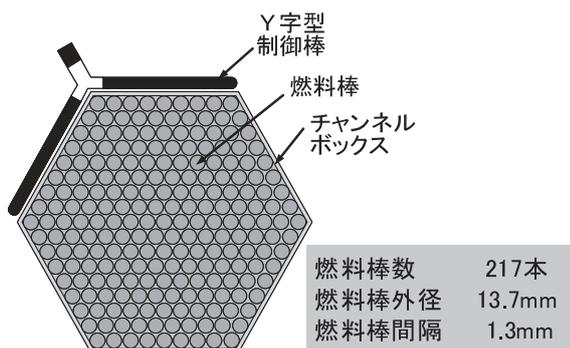
第 4 図 炉心内の中性子スペクトルの比較

殖)の達成という高い設計目標を設定した研究が行われた。

## 2. 炉心概念の概要

低減速炉の設計においては、これまでも種々の概念が提案されているが、炉心に対して以下に述べる2つの主要な設計目標を一般的に設定している。すなわち、持続的なプルトニウム多重リサイクルを可能とするには、1.0以上の高い転換比を達成する必要がある、これが第1の設計目標とされている。また、現行軽水炉は、なんらかの原因で出力が異常に増加したり、燃料棒の除熱が異常に低下したりして発熱が除熱を上回るような状況になっても、自然に炉出力が低下するという安全上の観点から優れた特長がある。この特長を生み出す源となっている負のボイド反応度係数の達成を低減速炉でも目指すこととし、それを第2の設計目標としている。さらに、経済性向上のため、高燃焼度や長期サイクルの達成も重要であるが、これらを目指してプルトニウム富化度を増加させると、それによりボイド反応度係数や転換比を悪化させるという低減速炉心が有する、いわゆるトレード・オフの関係があるため、それらのバランスを考慮した適切な設計を図ることがこの炉心特有の苦勞する点となっている。

高転換比の達成には、中性子の減速効果を持つ冷却材である水の割合をできる限り少なくして高速中性子の割合を高くすることが必要である。このために、燃料集合体において燃料棒を稠密な三角格子配列に配置するとともに、燃料棒の間隔は現行軽水炉では3mm程度以上であるのに対して、1mm程度と大幅に狭めたものとしている。第5図に三角格子配列の六角集合体の一例を示す。六角形の集合体はロシアの軽水炉でも実際に用いられているが、我が国の軽水炉と同じ四角集合体に納めた設計例もある。このほかに、太径の燃料棒を用いたり、BWR型炉心においては冷却水を高ボイド率状態とすることなどの方策も併せて用いることにより、水と燃料の体積割合を0.5以下に大幅に減少させている。また、PWR型炉心では、冷却材として重水を使用して転換比の向上を図る概念も検討されている。一方、燃料棒の間隔は、



第5図 三角格子配列稠密燃料集合体の例

冷却材である水による除熱上の限界等も考慮して決定しなければならない。この点において、冷却材中にボイドを含むBWR型炉心の方が、PWR型炉心よりも広い燃料棒間隔でも同等の水対燃料体積比を達成でき、低減速炉心の設計上においては有利な点となっている。

また、負のボイド反応度係数を達成するためには、冷却材中にボイドが発生・増加する状況において、中性子が増加しないように設計上の工夫が必要となる。このため、炉心を短尺で扁平な円筒形状にして中性子の炉心外への漏れを増加させ易い設計を基本としており、さらに、適切に配置した中間ブランケット等による中性子吸収を利用する方法、あるいは中性子がストリーミングによって漏れ易い炉心構造とする方法などが用いられている。

以上の基本的な設計方法を組み合わせて、上記の2つの主要な設計目標を満足させる複数の炉心概念がこれまでの研究で報告されている<sup>5-7)</sup>。BWR型およびPWR型炉心のどちらでも上記設計目標を基本的には達成可能である。第2表に、BWR型炉心概念の設計例に対する主要な炉心特性(プルトニウムリサイクル平衡時)を示す。

この例では、MOX燃料部を上下の2つの領域に分割し、それらの間に劣化ウランの中間ブランケットを設置した扁平二重炉心構造の設計となっている。また、Puf残存比とは、核分裂性プルトニウム(Puf)の取出し時の量と装荷時の量の比で、転換比の定義の一つである。この例では、Puf残存比が1.04であり、プルトニウムの持続的な多重リサイクルが実現可能である。さらに、マイナーアクチニド(MA)も含めたTRUリサイクルも可能である。また、多くのPufの供給が必要となる導入期用の炉心設計として、再処理からの回収ウランを再濃縮して中間ブランケットに使用することにより、Puf残存比を1.1程度に高めた設計も提案されている。

第2表 BWR型低減速炉設計例での主要な炉心特性

項目	設計値
電気出力	1,356 MWe
原子炉圧力	7.2 MPa
燃料集合体数	900
炉心部 <sup>a)</sup> 平均取出燃焼度	65 GWd/t
炉心部平均ボイド率	70%
炉心部長さ(MOX+中間ブランケット)	0.855(0.455+0.4)m
炉心圧損	0.04 MPa
炉心部平均核分裂性Pu富化度	9.6%
転換比(Puf残存比)	1.04
ボイド反応度係数	$-0.5 \times 10^{-4} \Delta k/k/\% \text{void}$
連続運転期間	15ヶ月

<sup>a)</sup>炉心部：上下MOX部+中間ブランケット部(上下ブランケット部を除く)

一方、現行軽水炉からの技術的なギャップをできる限り少なくする観点で早期導入用炉心の設計も行われているが、その一つとして、稠密度をゆるめて燃料棒間隔を4 mm程度と現行軽水炉並みにした高転換型炉心の設計も提案されている。この炉心の転換比は0.85程度であるが、上記の増殖型炉心と同じサイズの集合体を使用する設計になっており、将来の燃料サイクル環境の状況に柔軟に対応しながら、燃料集合体の交換のみで増殖型炉心への移行が可能となっている。また、最近の研究成果によれば、この高転換型炉心でも2 wt%程度のMAもリサイクル可能とされている。

### 3. 関連する研究開発の状況

低減速炉の開発に関連した要素技術開発等における主要な研究課題とその現状の概要は、以下の通りである。

燃料棒間隔1 mm程度の稠密格子炉心における除熱の確保は、最も重要な課題である。これに関しては、実機と同じ高温・高圧下での除熱限界実験が数多く実施され、原子力機構で実施された扁平二重炉心の出力分布を模擬した37本バンドルの大規模テスト部を用いた実験によっても、稠密炉心の除熱の可能性が確認されている。また、安全性に関しては、主要な過渡事象や事故事象等の安全性の評価が実施され、BWR型炉心ではABWRと同程度の安全性を有するとの結果も得られている。

燃料の照射挙動に関しては、高速中性子による照射量が格段に増加する状況下で高燃焼度に耐える被覆管として、強度に優れるステンレス鋼系被覆管の開発も行われている。また、高富化度MOX燃料の照射時のふるまいに関して、解析コードによる検討が進められているが、評価結果を検証するための照射データの取得が必要である。

さらに、低減速炉の導入効果が、発電炉および燃料サイクルシステムの長期的なシミュレーション計算によって検討された。低減速炉は、中期的には小数基の炉で効率的にプルトニウムを利用でき、長期的には増殖サイクルを実現して天然ウラン消費量を大幅に低減することが可能であり、将来のプルトニウム利用環境に柔軟に対応できるシステムであること等が示唆されている。

## Ⅲ. 連載のおわりにあたって

これまでの約1年半の間、延べ17回にわたり、軽水炉のこの半世紀に及ぶ進化のあゆみについて、それぞれの専門家により連載してきた。溢れる躍動感が文面からも

伝わる黎明期や我が国への導入期から、その後の自主技術としての確立の過程において、種々の問題や苦難を解決して乗り越えてきた経験の蓄積を経て、現在、我が国の原子力技術が世界市場に名を馳せるまでに至っている状況が、一つのストーリーとして理解いただけたと考える。

ハードウェアや物づくりの面では確かに世界のトップランナーといえるものの、稼働率などの点ではまだまだ努力すべき点が残されている。今後、これらの面でも着実な進化を遂げ、真に我が国が軽水炉のトップランナーとなり、その技術によって、今後のエネルギーや環境問題の解決への貢献を通し、将来の我が国のみならず、世界の繁栄に大きく寄与することを期待して、本連載の終わりとしたい。

### —参考資料—

- 1) 東京大学ホームページ：<http://www.nuclear.jp/~rohonbu/lab/paper/paper.htm>
- 2) U.S.DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System*, GIF-002-00, (2002).
- 3) 原子力ハンドブック, “V編3-2 超臨界圧軽水炉”, オーム社, p.525-530(2007).
- 4) OECD/NEA, *Generation IV International Forum 2007 Annual Report*, (2008). <http://www.gen-4.org/Press-Room/index.htm>
- 5) 原子力ハンドブック, “V編3-1 低減速軽水炉”, オーム社, p.522-525(2007).
- 6) 大久保 努, 他, “低減速炉の技術開発の進捗および課題”, 日本原子力学会誌, 48[7], 484(2006).
- 7) 岩村公道, 他, “革新的水冷却炉「低減速軽水炉」の研究開発”, 日本原子力学会誌, 45[3], 184(2003).

### 著者紹介

山田勝己(やまだ・かつみ)



(株)東芝

(専門分野/関心分野)次世代プラント概念設計, 伝熱流動, 統計的設計手法

大久保 努(おおくぼ・つとむ)

本誌, 50[12], p.46(2008)参照。



シニアの自論—原子力新時代を迎えシニアはかく提言する

これまでの原子力、これからの原子力

## 地球温暖化抑制には原子力利用分野の拡大を！

前原子力委員会委員 齋藤 伸三

このコーナーは、シニアの方々10人に連載で、現役時代とは別の視点から、原子力に対するそれぞれの思いを自由に語っていただくものです。

不可逆的な気候変動を起こさないためには、2050年における気温上昇を2℃以下に止める必要があり、このためには、CO<sub>2</sub>の排出量を対2000年比50～80%削減することが必須(IPCC第4次報告)で、先のG8サミットでも原子力発電は不可欠の手段と位置付けられた。しかし、真剣にCO<sub>2</sub>排出量を50%以上削減することを考えるならば、原子力を発電分野のみならず、非電力分野にも積極的に活用することがこの目標達成に大きく貢献することになる。

IEAのEnergy Technology Perspectives 2008では、2050年にCO<sub>2</sub>排出量を2005年の50%まで削減するためには、世界全体で原子力発電を毎年32GW増設しても6%の寄与であり、CO<sub>2</sub>回収・貯留、再生可能エネルギーの大幅導入、各種エネルギー利用効率の向上等が必要であり、そのために莫大な投資が必須であるとまとめている。

我が国の2005年度のCO<sub>2</sub>総排出量は約13億トンであり、部門別に見ると、エネルギー転換(発電等)31%、産業26%、運輸19%の3部門で76%を占めている(環境省)。発電の約30%は既に原子力で賄われており、その比率を一層高めることは重要であり、運輸部門で電気自動車を導入するなどして電力利用のシェアを拡大することも必要であろう。しかし、より広く産業部門も含め原子力利用の拡大を図ることは、原子力に従事する、あるいはこれから従事しようとする研究者、技術者の夢であり、CO<sub>2</sub>排出量削減に多大に貢献することになる。

幸いに、この目的に適した高温ガス炉である高温工学試験研究炉(HTR, 30MW)が旧日本原子力研究所(原研、現日本原子力研究開発機構)によって開発され、2004年には世界に先駆けて原子炉出口温度950℃を達成している。さらに、この程度の高温を用いると、硫黄とヨウ素を利用した熱化学分解(IS法)により、CO<sub>2</sub>を全く排出せずに水から水素と酸素を得ることができ、原研では同年実験室規模で30l/hの水素連続製造に成功し、現在、耐食性に優れたセラミックスや金属の実用材料を用いた技術確証試験を実施中である。高温ガス炉にこのIS法による水素製造プラントを接続することによってCO<sub>2</sub>を排出せずに大量かつ安価に(約20円/m<sup>3</sup>)水素を製造することができる。また、このプロセスの排熱は蒸気タービン発電や化学プラントのプロセス熱としてカスケード的に利用することができ、総合熱利用率約80%達成も可能

であり、軽水炉の熱効率約34%を大きく上回り、発生した熱を可能な限り用いるべき、これからの時代の要請にも適うものである。

我が国で高温ガス炉により製造された水素および高温ガス炉を熱電併給に用いた場合のCO<sub>2</sub>排出削減量を大まかに試算してみよう。運輸部門では、2.5億トン排出しているが、その88%は約7,500万台の自動車である。この2/3に当たる5,000万台を燃料電池車として高温ガス炉で年間500億m<sup>3</sup>の水素を供給すれば、CO<sub>2</sub>排出量は1.7億トン、13%削減されることになる。熱出力600MWの高温ガス炉の水素供給能力は年間当たり約6.3億m<sup>3</sup>(水素製造効率:50%、稼働率:85%)であり、これに要する高温ガス炉は約80基である。また、産業部門で最大のCO<sub>2</sub>排出源となっている製鉄のコークス還元を水素還元で転換させる、すなわち、製鉄の還元剤として水素を用いると、粗鋼生産量を年8,400万トンとして水素約500億m<sup>3</sup>を要することになり、高温ガス炉約80基の導入によってCO<sub>2</sub>の排出削減量は約1億トンで、2005年度排出量の8%に相当する。さらに、化学コンビナートにおけるプロセス熱(高温蒸気)と自家発電に相当するエネルギーを高温ガス炉約30基で供給すれば、CO<sub>2</sub>排出削減量は0.3億トンで2%に相当する。上記の3分野だけでも熱出力600MW高温ガス炉約200基で23%のCO<sub>2</sub>排出量削減となり、その効果は極めて大きいものであるとともに、原子力を準国産エネルギーとすれば、エネルギー自給率も格段に上がることになる。なお、使用済燃料の再処理も可能である。

高温ガス炉、IS法による水素製造開発で世界をリードしている我が国の実力を総合科学技術会議、政府も認識し、各種戦略、ビジョン等にも挙げられ、2008年度の革新的技術戦略にも含まれている。しかし、実態は予算がつかず、遅々として進まない。実用化までには、HTR-ISによる水素製造実証試験を速やかに実施し、その経験を基に、民間と日本原子力開発機構が一体となって高温ガス炉熱電併給実用デモプラントを実現することであり、これに要する費用はFBR開発費用の数十分の一で済むであろう。この高温ガス炉を用いた原子力利用分野の拡大こそが我が国の原子力カルネッサンスであり、地球温暖化抑制で世界にも貢献する顕著な技術となろう。国、産業界が本格的に取り組むことを強く願うものである。(2008年9月23日記)



シニアの自論—原子力新時代を迎えシニアはかく提言する

これまでの原子力、これからの原子力

## 原子力の社会受容性の向上のために 「社会システムとしての原子力」を考える

原子力学会シニアネットワーク連絡会 林 勉

このコーナーは、シニアの方々10人に連載で、現役時代とは別の視点から、原子力に対するそれぞれの思いを自由に語っていただくものです。

世界的な原子力リネッサンスの動きの中で、わが国でも原子力立国計画が確立され、意欲的な推進計画が実行されつつあるが、国民の受容性の観点で大きな問題があり、原子力の重要施設、特に高レベル廃棄物処分場の立地が困難となっている。国民の受容性を高めるために「社会システムとしての原子力」という新しい視点を提案する。

### 社会システムとしての原子力とは

原子力発電は開発の当初の頃は主として、電力会社の意欲的計画のもとで、立地地元の了解を得ながら、大変な努力の成果として建設されてきた。しかし、現在では電力会社を中心とする体制だけでは推進することが困難になってきている。新規立地も難しく、すべての原子力関連施設も地元了解が困難である。このような状況を考えると、原子力はもはや電力会社を中心とした体制から新たな体制として考え直さなければいけない時代に来ているのではないだろうか。原子力を社会システムとして位置づける新しい考えを提案する。

社会システムとしての原子力の構成要素は、電力会社はもとより、国、地方自治体、メーカー、関係産業、研究機関、学会、メディア等を含む壮大なものになるだろう。これらの要素のすべてが健全に働かないと、「社会システムとしての原子力」は健全な推進ができない。いままでの体制では、社会システムの構成要素のそれぞれが、自己の組織の観点、利害得失からの議論、判断で動き過ぎており、「社会システムとしての原子力」の総合的観点が少なかったのではないだろうか。

システムにはすべてその果たすべき目的がある。では「社会システムとしての原子力」の目的はなんだろうか。私は「国民の最大利益の追求」ではないかと考えている。今までは電力会社の利益追求や国の組織的利害やメンツ、地方自治体の政治的観点、メーカーや産業界の利益追求、メディアの売れる記事の追求などの観点が複雑にからんで、対応を困難にできてきているように思われる。ここで、本来のあるべき姿である「国民の最大利益の追求」という観点を考えてみる必要があると思う。

### 国民の最大利益の追求とは

原子力の健全な推進こそが、CO<sub>2</sub>発生を抑制し、エネルギーコストを削減できるので、このこと自体が国民の

最大利益につながるという認識を持ち、このための対応策をしっかりと考えることが重要である。

現在、わが国は原子力発電設備の実力を示す計画外停止率は世界一の実力を持っている。それなのに設備利用率は世界の最低レベルに低迷している実態を国民は知らされていない。わが国では国民の安全要求に過剰に反応しすぎて、必要以上の規制強化が行われており、これが設備利用率の低迷に大きく影響していると思われる。この状態は国家的損失であり、合理的規制のあり方を国民合意で追求すべきである。

立地地元の受け入れをより容易にすることは国民の最大利益につながる。現状は住民の不安心理や反対派の煽動、地元の政治的思惑等が複雑にからみ、わが国原子力の健全な推進の最大の障害になっている。この状況を改善するにはどうしたらよいか。私は、もっと地元が直接原子力ビジネスに参加できるような体制にすべきであると考えている。

例えば、現在の電力会社のみが原子力発電に参入できる体制を見直し、地元の産業界やできるだけ多数の地元住民の資本参加を求めて、地域原子力発電株式会社を作ってはどうか。原子力の発電原価は他の電源に比し一番安く、かつ今後、資源価格の高騰により、ますます有利になってくるので、かなり高い配当が期待できる。少額株式で有利な投資条件であれば皆が資本参加したくなるので、立地地域に限定して応募できる会社とする。そうすれば高い配当を求めて積極推進かつ良好運転を求めようになり、設備利用率の向上にも寄与できるのではないだろうか。原子力発電所の運転管理は高度な技術と経験が必要なので、電力会社に委託するか、電力会社も資本参加し、共同の会社にすることも考えられる。

高レベル廃棄物処分場や中間貯蔵施設、再処理施設の増設等についても、地方自治体、住民が経営参加できるようなシステムで、利益を共有できることを工夫すべきであろう。

このように考えてくると、メディアや国の情報発信のあり方等についても、国民の目線に立って考えれば様々な改良のアイデアが浮かんできそうである。知恵を絞って、新しい「社会システムとしての原子力」を築き上げる努力をシステムに参加しているすべての構成員がしなければならぬ時代にきていると考えている。

(2008年 11月28日 記)

50

周年企画  
公募記事

これまでの原子力、これからの原子力

## グローバル時代—原子力事業統合

YGN 初代表 植松眞理マリアンヌ

日本の原子力平和利用が始まって半世紀、電力事業者の保有する原子力施設では着実にプラント運用の経験を積み、電力の安定供給に努めている。一方、市場の自由化、地球温暖化、石油価格の急激な変化やアジア諸国の消費拡大など、近年では、世界情勢に応じてエネルギー事業の経営に求められる条件は刻々と変化している。このエネルギー事業の世界規模化のなかでは、大手メーカM&A、国内メーカによる海外プラント建設事業やO&Mの受注、ターンキー型プラント輸出といった、自社から他へ働きかける積極的アクションが目立つ。一方、見逃せないのは、他から自社へのアクションに対し、受身の対応を迫られる事象だ。注目したいのは、電力事業にもグローバル化が進んでいるということ。つまり、原子力事業を含む電力事業も、国境や事業分野を越えての合併・買収のリスクにさらされているということだ。

ここで重要なのは、電力事業のなかで基幹的位置づけとなっている原子力発電並びに核燃料サイクル事業が、単なる電力サービス事業ではなく、エネルギー安全保障(国家政策、公益)並びに立地地域に深く関連していることだ。例えば、外資等による買収が原子力発電所を保有する電力事業者に対して行われた場合、その影響は無視できない。極端な見方だが、外資等の参入がライフライン(エネルギー供給)安定確保に対するリスクにもなりうるということだ。

多くの国内上場電力事業者では、株式の一部を外国法人が保有している。この資本の国際化・多様化の時代、電力事業者でもすでに種々の企業防衛策をとっているだろう。では、原子力事業についてはどうだろうか？

原子力事業そのものが金融商品として魅力的か否かには疑問が残るが、安定した発送配電設備を所有する電力事業に一定の魅力があるのは確かだ。その電力事業に含まれる原子力事業に対して、エネルギー安全保障の観点から、なんらかの企業防衛策を考慮する必要があるのではないだろうか？例えば、J-POWER(電源開発)の最大株主である英国系ファンドの、同株買増しの動きに待ったがかかったことは記憶に新しい(外為法では外資による10%以上の株式保有を禁止している訳ではない)。

そこで、『一般電力事業者は原子力施設を直接保有せず、各電力の原子力事業部門を統合し、持ち株会社化する』という企業防衛策をとることは、非現実だろうか？単純な理屈だが、持ち株会社化による株主権利分散の結果、ある電力会社買収による、同電力の保有する原子力

発電所の全権喪失あるいは核燃料サイクル事業の権利の一部喪失の可能性を排除または低減するという考えだ。

また、原子力事業統合の利点として、核燃料サイクル事業並びにプラント運用(定期検査・安全規制変更等への対応)の統轄、電力需要の地域変化・経時変化への柔軟対応、計画外停止時の事業者全体収益への影響低減、新規プラント建設時の運転開始までのリードタイム長期化に伴う経営負担の分散、プラントO&Mの標準化と高効率化、人材育成・教育の効率化などが期待できる。またプラント間の技術情報共有も迅速かつ容易になるだろう。

欠点としては、国内電力供給の約30%を担う原子力発電施設に共通の問題が発生した際、全プラントの停止・点検を要求される可能性が挙げられる。だが、国内プラント型式の多様性や、今までの問題発生時における電力会社間の水平展開実績などに鑑みれば、全プラント同時停止のリスクは分散されると考えられる。

原子力立国を掲げる日本、外乱(買収)が発生してから慌てて対処(防衛)するのではなく、将来リスクに対する原子力事業の防衛策を事前に講じ、国内の「原子力」力(げんしりょくちから)を高めておくべきだ。

日本電力事業のひとつとして『原子力事業を統合し、持ち株会社化する』ことは、グローバル資本主義に逆行するトラストととれるかもしれない。しかし、日本のエネルギー安全保障、原子力事業の安定性・持続可能性の確保、原子力施設に係る国産技術の維持・継承、立地地域との関係樹立を考慮し、また、必要な措置として国民世論の同意が得られるならば、原子力事業統合を実施してもよいと私は思う。



最後に……

YGN(Young Generation Network)は2001年3月に原子力学会連絡会として設立。当時、英字・カタカナは前例がない、学会組織名として適切かとお指摘いただき和訳を捻出、正式名「原子力青年ネットワーク連絡会」略称「YGN」とした。設立3年後、原子力に逆風吹き荒れる社会情勢のなか「原子力が死に至るシナリオ(日本原子力学会誌、2004年1月号YGNのページ)」、「死に至るシナリオから再生のシナリオ(同2005年2月号)」を発表し、多くの初期YGNメンバーが卒業した。「死に至る…」は今また一読すると興味深い。

最後に謝辞として。YGN設立と活動をご支援くださった原子力学会並びに有識者各位、発起人各位そして有志の皆様へ深く感謝します。(2008年10月30日記)

## タイムカプセル記事

この企画では、さまざまなジャンルのさまざまな年代の方に、原子力に対する思いを語っていただきます。

これまでの原子力、これからの原子力

## 「原子力は地球を救う」の夢を持ち続けて

三菱重工業 駒野 康男

原子力に携わって、学生時代も含めて早36年。原子力への道の選択は、幼少時、鉄腕アトムとかわいいウランちゃんの世界に夢を見、中3の時、大阪万博で原子力の火がともったというニュースに感激し、高校の物理最後の講義で  $E=mc^2$  に無限のエネルギーへ魅力を感じたことによる。

大学時代は、FBRの炉心計算手法向上やNaボイド係数の研究を実施。今と違って、亀の甲の図を苦勞して手書きしていたことと、計算カードを何箱も持って計算機センターを往復したことが懐かしい。将来は夢の高速増殖炉を担当したく、三菱を選択。面接時にFBRの担当希望を述べるも、今軽水炉が忙しいから、当面、軽水炉といわれ、早30年。

就職が決まり、意気揚々と東京へ赴任する直前の1979年3月28日、原子力の安全神話を覆すTMI事故が発生。とはいえ、人がなくなったわけではなく、またB&W(Babcock & Wilcox)タイプであったこともあり、呑気な気持ちで入社。ところが、そのうち国内PWRは運転停止となり、安全宣言が行われるまでは、会社にはベツドが運びこまれ、先輩たちはほぼ徹夜作業で何ヶ月も対

応。その時、タイプが違って、海外での出来事でも、人的ミスの要素が強くても、原子力は一度事故が起こるとどういう影響があるかを痛感しつつ、一方、自分が何もできないことにふがいなさを感じた新人時代であった。

しかし、このTMI事故こそがその後の米国の原子力プラント新設にブレーキをかけ、盟主たる米国の原子力メーカーの力が弱まり、原子力ルネサンスといわれる今、世界展開を実施する上で、地道に作り続けた日本の原子力メーカーへの期待が大きいことを、肌で感じる今日この頃である。

将来の夢は、信頼ある設計および物作り力を活かして、原爆の唯一の被災国だからこそ安全・安心にも最大限の注意を払って、①世界一流の軽水炉を日本が世界に提供、②FBRの世界標準炉を日本が中心になって作り上げること、を夢にもち、また、「原子力は地球を救う」との強い信念を持って、原子力への発展に努めることとしたい。長男が原子力の日10月26日生、次男がTMIの3月28日生と、原子力に因縁を感じながらも……。

(2009年 1月5日記)

## 原子力ルネサンス

日立GEニュークリア・エナジー 谷口 大輔

「原子力ルネサンス」という言葉を最近、頻繁に耳にするようになった。昨今の地球温暖化に対する対策の一つとして、原子力発電が見直されている。米国では数十年ぶりに新規原子炉の建設が予定されるなど、実際の動きも加速化している。私は3年前に大学院を卒業して原子力メーカーへの就職を希望し、今こうして働いている。それは、地球温暖化に対して技術の面から何かしらの貢献をして身を立てていくことができると思ったからである。

しかし、この「ルネサンス」に沸いているのは、実は原子力業界人に限られているのではないだろうか。世間から見れば、そのような「ルネサンス」は見えないのではないだろうか。

2007年の新潟県中越沖地震では変圧器の火災が大々的に報じられた。その後友人から聴かされた話は、「やっぱり原子力は危ないじゃないか」という趣旨の内容が主であった。当該のような大きな地震に際して、原子力発電所の安全に関する機能はきっちりと役割を果たした、という事実はなかなか伝わらない。世間の持つ原子

力に対する不信の念は、地球温暖化対策に貢献するという側面をほとんど覆い隠しており、「原子力ルネサンス」という言葉とは、かなり乖離しているように感じられる。

こういった状況に対して、原子力メーカーの技術者として私にできることはなんだろうか。これは今後もおそらくずっと自らに問い続けるであろうし、その解を見つけるのは困難であろう。ただひとつわかっている答えは、仕事に対して基本に忠実に、愚直に実行していくことである。原子力技術者として、この「基本に立ち返る」ということを大事に積み重ねていき、「ルネサンス」を本物にしていかなくてはならない。

将来、私たちの次の世代が地球温暖化の影響に脅かされることのないようにしたい。あるいは、もし温暖化の影響が大きくなったとしても、「私たちはその解決に向けて必死に対策したのだ」ときちんと説明できるような努力をしていきたい。私は、今できる対策のひとつとして、原子力とその発展に貢献し、将来の世代への責任を果たしていきたい。(2008年 12月1日記)

本誌では学会誌50周年記念企画の一つとして、創刊まもないころの学会誌の巻頭言を掲載しています。今月号では、今から44年前の当時に、編集委員長に就任した野澤豊吉氏の巻頭言(1964年発行)を掲載します。学会誌や論文誌を充実させるために、当時の人たちがさまざまな試行や工夫に取り組んでいる姿を彷彿とさせる巻頭言となっています。

## 日本原子力学会誌

Journal of the Atomic  
Energy Society of Japan

1964年 6月号

## 就任にさいして

編集委員長 野澤豊吉  
(東京工業大学)

6月8日 新旧合同の編集委員会にて 互選が行なわれた結果 今期の委員長の任務をおひきうけすることとなりました。

前委員会(渡辺茂委員長)の実績として 注目されるものが2つあります。1つは欧文論文誌 *J. Nucl. Sci. Tech.* の創刊であり 1つは和文会誌を魅力あるものにしようとの努力です。これらは杉本朝雄前委員長の代に考えが芽生えたもので この「動力炉特集号」も 当時おこなわれたアンケート整理(本誌 Vol. 4, No. 8)いらいの懸案でした。今日 会員諸兄姉が手にされる「特集号」は 担当の方々2年越しの お骨折りの結実と申せましょう。

欧文論文誌の刊行によって 学会の国際的地位は 一段と高められます。和欧混載時代の日本原子力学会誌は わずかに70部しか 海外へ流布されておりませんでした。*J. Nucl. Sci. Tech.* は Research Services Associates of Baltimore の援助によりアメリカへ100部 原研の援助により欧米諸国へ300部 毎月送られます。とくに創刊号は臨時増刷され5,000部が 8月末ジュネーブに開かれる「第3回原子力平和利用国際会議」の参加者に寄贈されます。財政のくるしい学会が今回の積極策にふみきるについては 瀬藤象二会長をはじめ理事会の方々から なみならぬ温い理解と強い支持とが あたえられています。海外購読会員数は今年から 飛躍的に増加することでしょう。海外からの投稿も期待されましょう。投稿会員の original works は やがて あらゆる国の雑誌に 引用されることになりましょう。

このたび成立した39年度編集委員会は 前委員会の意図を引継ぎ *J. Nucl. Sci. Tech.* については 内容の充実と分布の普及をはかり 和文会誌については これを会員に身近な生氣あるものにしよう と 新鮮な意欲に燃えております。第1回の会合は まことに活発でした。3時間余にわたり 密度の高い意見が激しく交換され 和文会誌の明日の新しい姿をめぐり いくつもの傾聴すべき提案が寄せられました。

7~9月号には あたらしい試みとして「私のノートから」の欄がもうけられ 各分野の最近の研究のなかから 注目すべきものが紹介される予定です。その企画を責任をもってまとめ 原案として編集委員会に提出する作業が 三井田純一・高橋 博・仲本秀四郎の3委員よりなる小委員会の努力により すすめられております。10~12月号については 浜口 博・三島良績・大山 彰・関口 晃の4委員よりなる小委員会の活動が期待されております。この分担制小委員会の活動にあてられる頁数は 現在のところ わずか10頁たらずですが 反響をみながら 経理事情を打開して 拡充してゆきたいとかがえます。会員各位からも何なりと ご希望・ご提案をおよせ下さるよう お願い申し上げます。

10年 15年のちの国のエネルギー事情 ひいては原子力問題に 思いをいたすとき わが学会現在会員の1人1人が 重要な任務を負われるであろうこと 疑いの余地がありません。その日のために 今日の和文会誌が 確実な役割をはたさねばならない——これが われわれ編集にたずさわるものの 信念であります。

# 談話室

## 核分裂は誰が発見したのか？(その3/最終回) —公平さを欠いたハーンのノーベル賞単独受賞と その背景

原子力発電環境整備機構 河田東海夫

### ファーム・ホール

ドイツの敗戦が迫った1945年4月下旬、アルプズと呼ばれる米国の特殊部隊がドイツ北部に進出し、一帯の捜査を開始した。この部隊の目的は、ナチ政権下で原子力研究にかかわった科学者の身柄拘束で、彼らがソ連軍の手に落ちることを防ぐことにあった。間もなくアルプズ隊は、マックス・フォン・ラウエやオットー・ハーンらを探し出し、さらに捜索を続けた結果、ヴェルナー・ハイゼンベルクを含む総勢10人の第一級のドイツ科学者を拘束した。この10人は一たんハイデルベルクに集められた後、7月上旬に英国ケンブリッジ郊外の田舎にあるファーム・ホールと呼ばれる館に移された。ここで10人は、英国軍監視下で、捕虜というよりは賓客に近い、半年にわたる幽閉生活を始めた。彼らの会話はすべて盗聴マイクで記録され、英国軍上層部や米国マンハッタン計画の責任者グローブズ将軍らに報告されていた。

8月6日の夕方、監視官は、日本に原子爆弾が投下されたというニュースを抑留者達に知らせた。一同は一樣に大きな衝撃を受けたが、特にハーンは、自らの発見が大量殺戮兵器につながったことに大きなショックを受けた。それから3ヶ月後の11月中旬、ハーンのもとに核分裂の発見の功績によるノーベル化学賞授与決定の報がもたらされが、12月の授与式への出席は許されなかった。

### ハーンのノーベル化学賞単独受賞

ハーンは翌年、解放されてドイツに戻り、戦争で荒廃したドイツの学会の再興に向けて活動を開始した。1946年12月、ハーンはあらためてノーベル賞授与式に招かれ、保留されていた栄えある賞を手にした。ハーンの化学賞は、1944年分の賞であり、2年遅れの授与となった。

すでに述べたように、ハーンの核分裂発見は、マイトナーの提案で1934年に開始した研究協力で端を発しており、決定的な結果を得た1939年12月の再実験も、マイトナーの強い進言で行われたものであった。彼女の亡命後も2人は頻りに手紙を交換し、マイトナーは様々な助言を与えた。後年、シュトラースマンは、「スウェーデン亡命後も彼女は手紙の連絡で私たちとしっかりつながっており、彼女がチームの実質的指導者だった」と述べている。しかし、ハーンにとっては、事情は少々異なっていた。彼らの論文が発表されるとまもなく、核分裂に関

しては理論や物理実験に関する論文が次々と発表され始め、関係者の興味は、連鎖反応など物理学的側面に急速に傾いて行った。そうした中、ハーンは、自分の論文が埋没し、核分裂の最初の発見者という地位が揺らぎかねないことに危惧を抱き始めた。そこで彼は、機会あるごとに、「核分裂は、物理学者が否定する中、化学者が発見したのだ」と主張するようになり、やがて「核分裂発見には物理学者やマイトナーは関与していない」と自らも信じ込むようになった。ノーベル賞受賞時のインタビューでも、ハーンはマイトナーとの協力についてはまったく言及せず、そのことはマイトナーの心を深く傷つけた。

### 明らかにされたハーン単独受賞の経緯

ノーベル賞選考経緯は一般には公開されないが、スウェーデン王立科学アカデミーは50年を経過した関連資料については、研究者には順次開示している。ハーンの実績に関する資料は、90年代中頃から開示されており、フランス国立科学研究所の上級研究員エリザベス・クロフォードや米国サクラメント市立大学名誉教授ルース・サイムらが詳しく分析している。

物理・化学分野のノーベル賞は、(1)ノーベル物理委員会またはノーベル化学委員会(委員はスウェーデンの学者5名)による予備審査、(2)科学アカデミーの物理または化学部会による審査、(3)科学アカデミー総会による最終審査、の3段階の審査で決まる。候補者の推薦は、海外会員も含む科学アカデミー会員、委員会メンバー、過去のノーベル賞受賞者などが、その年の2月1日までに行う。委員会メンバーの一人が、被推薦者全員の評価を行い、特別報告としてまとめる。その特別報告をもとに



マイトナーらが投宿したクングェルプの宿(今は民家)と玄関脇にある記念プレート。核分裂原理がここで解明されたことが記されている。

委員会で検討を行い、結果を一般報告としてまとめ、受賞候補者の勧告を行う。特別報告と一般報告は科学アカデミーの部会で審査され、そこで了承された候補者を科学アカデミー総会で最終審査し、遅くとも11月15日までに受賞者を決定する。

1939年1月にハーンらの論文が発表されると、化学委員会の主査テオドル・スウェードベリ(1926年ノーベル化学賞)が直ちにハーンの推薦書を2月1日までにまとめた。マイトナーらの論文出版前であったため、ハーン単独の推薦であった。しかし、その秋に欧州で第2次世界大戦が始まったため、選考作業は2年以上停滞した。その間、物理学者から、この件は物理委員会で扱い、ハーン・マイトナー共同受賞とすべきとの意見が出されたが、物理委員会は、この件はすでに化学委員会で検討されているとしてその意見を却下した。1941年になって化学委員会は、1939年の推薦書を、その後、発表された多数の論文を考慮し見直すことをスウェードベリに求めた。化学者である彼の再評価報告は、核分裂発見の物理的側面の重要性を軽視し、核化学の面でのハーンの見聞の重要性のみを強調する内容となった。特にマイトナーに関しては、1939年以降、評価すべき業績がないとし、ネイチャー論文の価値を黙殺した。化学委員会はこの報告を受理したが、委員の一人がマイトナーを共同受賞とすべきと主張したため、結論は次年度に持ち越された。しかし、その委員が1942年6月に死去し、その意見は立ち消えとなった。その年、化学委員会事務局のアーネ・ヴェスツグレンが、ハーンの見聞へのマイトナーの貢献度についての調査を任されたが、ハーン自身がマイトナーの貢献を否定したため、マイトナーの業績はハーンの見聞の追認に過ぎないとの評価を下した。翌年、ヴェスツグレンが化学委員会主査とアカデミー事務局長の役についたため、彼の見聞は審査に強い影響を持つようになった。1944年に化学委員会は科学アカデミーにハーン単独受賞を正式勧告したが、化学部会で否決され、結論は翌年持ち越しとなった。1945年になると、新たにアカデミー会員に加わった物理学者オスカル・クラインが、マイトナーとフリッシュを物理学賞で同時受賞させるべきとの強い意見を出したが、物理委員会は1945年分の受賞候補者としてすでにヴォルフガング・パウリを決めていた。同年夏原爆投下後、米国から新たな情報が



左から、シュトラースマン、マイトナー、ハーン  
1956年マインツにて(LBNL Image Library 提供)

開示されたことから、化学委員会は再び決定延期に向け揺れ動いた。しかし、ハーン単独受賞案は、そのまま科学アカデミーの化学部会を通り、総会に諮られた。その場で、ヴェスツグレンとスウェードベリは、米仏の情報評価が不十分なことを理由に、決定を次年度送りする動議を出した。これに対し、科学アカデミー重鎮の生理学者がその動議は認めがたいと強く反論した。その後採決が行われ、ハーン単独受賞は僅差で可決された。ヴェスツグレンらの突然の動議は、米国に迎合する変心との印象を多くの委員に与えたともいわれている。

#### マイトナーの再評価

ハーン単独受賞でマイトナーが除外されたことを、多くの物理学者は公平性を欠く決定であったと受け止めた。そうなった原因としてクローフォードらは、ノーベル委員会の構造が境界領域の成果を適切に評価できるようになっていなかったこと、化学委員会のメンバーがマイトナーの物理学的業績を正當に評価する能力に欠けていたこと、戦時中のスウェーデンの学者は自分たちの限られた情報と見識に頼りすぎたことなどを挙げている。

戦後しばらくして、正當な評価を受けなかったマイトナーの功績をあらためて顕彰するいくつかの動きが起こった。その代表例は、1959年にベルリン郊外に新設された原子核研究所の名称で、フォン・ラウエの提言により、ハーン・マイトナー研究所と命名された。1966年には、米国原子力委員会が、核分裂発見の功績をたたえ、ハーン、シュトラースマン、マイトナーの3人にエンリコ・フェルミ賞を授与した。ハーンとマイトナーはともに1968年に89歳で没した。1997年、マイトナーらが追い求めた超ウラン元素の一つ109番元素がマイトネリウムと命名され、彼女の名前は永遠に記憶されることになった。(2008年11月14日記)

#### —参考文献—

- 1) R. L. Sime, *Lise Meitner: A Life in Physics*, University of California Press, (1996).
- 2) P. Rife, *Lise Meitner and the Dawn of the Nuclear Age*, Birkhauser, (1999).
- 3) O. R. Frisch, *What Little I Remember*, Cambridge University Press, (1979).
- 4) 山崎和夫訳, オットー・ハーン自伝, みすず書房, (1977).
- 5) O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwissenschaften*, **27**, 11 (1939).
- 6) L. Meitner, O. R. Frisch, *Nature*, **143**, 239 (1939).
- 7) O. R. Frisch, *Nature*, **143**, 276 (1939).
- 8) E. Crawford, R. L. Sime, M. Walker, *Nature*, **382**, 393 (1996).
- 9) E. Crawford, R. L. Sime, M. Walker, *Physics Today*, 26 (Sept. 1997)

# 談話室

## 山越え谷越え……おお、海だあ！ マキシマラソンを走って

原燃輸送(株) 守屋 隆史

マキシマラソンって？

2008年11月4日、日本で初めて開催されたマキシマラソンに参加しました。マキシマラソンの歴史上これまでにない険しいコースを走った一人として、このユニークな催しを内側からレポートします。

マキシマラソンは、国際原子力機関(IAEA)公認のNGO(非政府組織)である世界原子力従事者協議会(WONUC)が、第1回大会を1996年にパリからブリュッセルまでの約300 kmで開催し、その後、毎年、各国持ち回りで開催されているスポーツイベントです。このマラソンの目的は、原子力関連の従事者、科学者、技術者の国際交流と情報交換、ならびに原子力立地地域との交流を通じた国際的な文化の醸成とその発信です。普段は交流する機会の少ない原子力従事者が、マラソンイベントを通じて、言葉の壁や日頃の立場を超えて場所と時間を共有し、親交を深めることができる唯一の機会といえるでしょう。

今年は、その第13回目となる大会が初めて日本で開催され、日本を含む8ヶ国から約120名以上の方が参加しました。コースは最近売り出し中の「西の鯖街道」です。京都市の四条大宮をスタートし、幾多の険しい山々と谷を越えて、ゴールの福井県高浜町の城山公園を目指す全長約100 kmです。このマラソンは、順位を競うレースではなく、コースをいくつのかの区間に区切り、国内外のランナーで混成されたチームが駆伝のようにリレーするマラソンです。マキシとは「より長い」という意味です。

平和利用のメッセージバトンを携えて

今回、私のチームは、京都市四条大宮をスタートして京見峠などを越えていく約30 kmの最初の区間と、名田庄峠を越えて高浜町の城山公園にゴールする約20 kmの最終区間を担当しました。コース全体の半分にあたる合計約50 kmを走り継ぐのです。また、ランナーには、走り以外に継がねばならないもう一つ重要なミッションがありました。それは、3つのバトンでした。

これらのバトンには、ゴールである高浜町の小・中学校の生徒と関西電力(株)高浜発電所の作業員宛の原子力の平和利用に対する願いが込められたメッセージが、それぞれ入れられていました。今回コースに選ばれた「西の

鯖街道」は、奈良時代からの歴史があり、その昔、福井県の若狭地域からの海産物が都に運ばれたルートです。同じ道を通って、現在では電気が若狭地域の原子力発電所から京阪神に送られています。そして、メッセージは、第2回原子力平和賞を受賞された中曽根康弘元総理が、3日に行われた前夜祭でランナーの代表に手渡されたものです。そこには、学童・生徒や発電所従業員への思いとともに『萬物生光輝』という揮毫が記されていました。

メッセージをランナーの手で携え届けるのです。『輸送なら任せてくれ』と、自然と身体の中から使命感が湧き立ってきました。過去と現在を結びつつ、さらには、現在から光り輝く未来へも継ごうというなんとも奥ゆかしく、ロマンチックなマラソンではないかと。

松浦号のエールについっオーバーペース！

いよいよ、マラソン当日の朝を迎えました。心配された天気にも恵まれ、6時に京都市の四条大宮をスタートしました。この区間における最大の難所は、スタートしてから約10 kmまでの間で標高約400 mを登り切る京見峠です。かつて若狭から来た荷役が始めて京の都を目にした峠です。

走り始めてからしばらくして、ペースが当初の予定よりも大分速いことに気が付きました。さすが、身体の大きな外国人の方は徐々にペースが上がっていきます。私はチームの先導役を任されたので、ペースをコントロールしなければならぬのですが、頭ではわかっている、ついついオーバーペースになってしまいました。事前に配布された大会のハンドブックでは、「ペースは



北山杉を背景に激走する山岳スペシャルチーム

登り 8 分/km, 下り 6 分/km。先導の自転車に続いて 1 隊列。」との注意書きがありました。実際には「登りは 5 分 30 秒～6 分/km, 下りは 4 分～4 分 30 秒/km」になっていました。

しかも、先導の自転車が、各国の言葉で「頑張れ！」とエールを送って、早々と追いついてしまいました。自転車を駆るのは、前原子力安全委員会委員長の松浦祥次郎氏です。『あー、そんなに飛ばされてはついていきませぬ～んっ！』と心の中で叫びました。この後、松浦前委員長は約 100 km の全区間を完璧に走破され、私たちと一緒にゴールされました。驚嘆すべき体力と精神力です。原子力の黎明期を切り拓いてこられただけある。侮れない……畏るべし。見習うべし。

今回のコースにはいくつもの山越えがあることから、大会事務局に加わった第 1 回マキシマソン参加者が入念な試走と下見をして、十分な検討のすえ、区間設定や中継所の選定が行われました。その熱意が、配布された大会ハンドブックには詰まっていた。特に、走行距離と標高が記載されたコース全体の断面図には助けられました。「もうすぐきつい登り坂がある」だとか、「このトンネルを抜けると下り」だとか、チームの先導役を担う上で把握しておくべきいくつかのポイントのイメージをあらかじめ頭にインプットできたのでした。

後で聞いて驚きましたが、この断面図の作成には「カシミール」という山岳ソフトが使用され、地図上で中継点を指定すれば、その断面図が瞬時に描けるという優れたものだそうです。

また、今回、走っていて特に印象的だったことは、私がチームの先導のために先頭を走っていても、メンバーの外国人の方が、立ち代り入れ代わりに私の横に来ては、ちょっとした会話をしてコミュニケーションを取ってくれたことです。私のチームには、スペイン人、スイス人、ハンガリー人、リトアニア人、ロシア人、韓国人と一緒に走っていました。彼らとの絶妙なインターバルでなされた冗談交じりの二言三言の助けもあって、約 30 km もの区間を楽しく走り切ってしまいました。

途中、コース上や中継所で他のチームをメンバーと一緒に応援するうちに、連帯感のようなものが出来上がってくるのを感じました。事実、最終区間となるゴールの高浜町城山公園までの約 20 km では、この連帯感を示すちょっと嬉しくなるようなエピソードがありました。

なにか新しいことが始まる予感……未来へ

最終区間では、2 km ごとにマイクロバスを待機させて、各自の体調に合わせて休むことができるよう配慮し



城山公園ゴールにて

ました。最初の 2 km を迎えましたが、誰も休みません。それどころか、「皆で力を合わせて頑張ろうぜ！」というように明るい雰囲気です。次の 2 km も、またその次も…と、そのような状態が続きました。ゴールに向かって足を進めるたびに、チームとしての結束力が増していく、正にマキシマソンらしさを肌で感じたひと時でした。

こうして迎えた、高浜町の城山公園でのゴールは感動的なものでした。両側に海が開けた風光明媚をまさに絵にしたようなロケーションです。『おお、海だ！』と内心叫びました。高浜中学校ブラスバンド部の演奏に出迎えられるながら、「スマイル！」を合言葉にゴールテープを切りました。3 通のメッセージも無事届けることができ、使命完了です。水平線に没する夕陽を背に、誰かれなしに抱き合いながら互いの完走を祝福し、言葉では表現できないくらいの充実した達成感に浸りました。このような高揚感をもって、夕方からの地元での交流会では、若狭の芸能の後、各国チームが自国の歌や寸劇を披露して果てしなく盛り上がっていきました。

私は、原子力関係者としてもランナーとしても、これまでマキシマソンの存在すら知りませんでした。まして、原子力とマラソンは一般的には無関係です。それらが、マキシマソンによってイコールで結ばれた瞬間に、多少大袈裟かもしれませんが、私にも、原子力というフィールドで何か役に立てることがあるはずだと、とても新鮮な予感に満たされました。それを今でも昨日のここのように思い出します。“なにか創り出していけそうな気配”を感じているのです。とても幸運なことだと思います。これは、参加者、その他マラソンをサポートして下さった地元の方々や電力関係者などすべての方々のお陰であり、感謝の気持ちでいっぱいです。次回以降も参加したいと思い、また似たようなことを国内でもできないものかと考えています。この感動を分かちつつ全国にそして未来へつないでいくようななにかです。

(2008年 11月27日 記)

# 私の 主張

## わが国の原子力に活力を取り戻すために

元東京電力副社長 豊田正敏

最近の学会誌には、原子力が円滑に進まないとか、原子力発電所の設備利用率が低すぎるといった愚痴とも取れるコメントが多いが、これを改善するための具体的対策について十分掘り下げた検討がなされないのは残念である。

その中であって、10月号の班目氏のコメントは示唆に富んだものである。しかし、提案されているボトルネックは必ずしも適切とはいえず、次の8項目を提案したい。

- (1) 原子力の信頼確保と設備利用率の向上
- (2) 放射線の理解活動
- (3) 再処理とプルサーマル
- (4) ウラン資源確保と濃縮能力の拡大
- (5) 耐震設計とリスク管理活動
- (6) 高レベル廃棄物処分
- (7) 高速増殖炉
- (8) 原子力発電所の立地

これらは拙著『原子力発電の歴史と展望』<sup>1)</sup>に述べているので参照されたいが、ここでは最も重要と考えられる次の3項目について私見を述べたい。

### 原子力の信頼確保と設備利用率の向上

軽水炉については、第1次～第3次の改良標準化およびA-BWR、A-PWRの開発により技術的信頼性は確保され、設備利用率は90%程度が期待されている。しかるに、原子力関係者の一般国民、特に地域住民に対する説明が十分とはいえない。その上、トラブル隠し、データの改ざんなどが相次ぐことにより、信頼は全く失われているため、60～70%に止まっているといわざるを得ない。関係者一人ひとりが企業の社会的責任を自覚し、企業倫理の徹底を期し、意識改革をすること以外に信頼回復の道はない。また、事業者が情報公開に努め、地域住民の考えを十分聞き、それに対して安心して貰えるような説得力のある説明に努めるべきである。それほどトラブルでもないのに、事業者の地元住民およびマスコミに対するトラブル状況、原因、再発防止対策の説明が適時、適切に行われないため、地元住民が運転再開に応じようとせず、また、近年、規制当局が安全上問題のないトラブルでも、長く止めさせすぎることにより、逆に地元の信頼を失っている。規制当局および事業者は地元で安全上問題ないことを明確に説明して早期に運転させるよう努めるべきである。

### 高速増殖炉

わが国では、ウラン資源の有効活用を図り、将来のエネルギー源の確保に資することを基本の方針として、高速増殖炉の技術開発を進めてきた。しかし、その実用化のための技術開発のスピードがあまりにも遅く、動燃が技術開発を始めてから40年経った現在、なお、原型炉「もんじゅ」がナトリウム漏れで停止後、13年経っても運転再開していない状況である。これから、「もんじゅ」の数年間の運転による安全性と信頼性の確認およびその間に発生したトラブルの再発防止対策の実証炉の設計への反映、主要機器の実証テストによる信頼性の確認、プラント設計の確立、実施主体の設立、立地選定、許認可手続きを経て、建設まで考えると、実証炉が2025～2030年に運転開始することは極めて難しく、実用化時期2050年はさらに困難である。

これに対する対策として、日本原子力研究開発機構および実施主体で、卓越した指導者を選任し、責任体制を明確にし、スケジュールどおり、着実に推進するよう努めるべきである。また、フランス、米国、ロシア、中国など、世界の英知を結集してプラント設計の最適化を図り、国際プロジェクトとして積極的に推進することを検討すべきである。

もう一つの問題点は、動燃/JNC(現JAEA)の技術開発が自己完結型過ぎることである。小柴先生が浜松ホトニクスに全面的に任せたように、民間会社または研究機関の頼りになる専門家を選び、問題によってはこれにすべて任せるような方法も考えるべきである。この方が開発資金も時間も少なくともすむ場合が多い。

### 高レベル廃棄物処分

高レベル廃棄物処分問題は、今後、原子力を円滑に進めていくため、できるだけ早く実現の見通しを得る必要がある。しかるに、実施主体であるNUMOが、設立されて数年経った現在、なんら成果を上げていない。この際、その進め方について抜本的に見直す必要がある。

#### (1) 草の根広報活動

わが国では、一般国民の70～80%が最終処分に不安を感じており、このような状況では、処分場の公募に市町村長レベルでの応募は期待できても、知事や近隣市町村住民の理解は得られないであろう。

この現状を少なくとも一般国民および地域住民の70～80%が肯定的になるように、わかりやすく理解が得られる多重バリアに重点を置いた視聴覚に訴える双方向対話

による草の根広報活動を行うべきである。

### (2) 適地の選定

処分場の選定に当たって、地元住民の安全と安心の理解を得て、立地を円滑に進めるためには、適地の選定が極めて重要である。適地選定に当たっては、岩盤が均質であり、ある程度の広がりのある安定な地層であり、地下水の流れがほとんどなく、地下水の下流域に人家の少ない所を選定する必要がある。

### (3) 立地の進め方

立地に当たっては、公募のみに頼る受身の態度ではなく、処分場の適地がどこにあるかをあらかじめ検討しておき、その適地の中から地域住民、特に知事に対する理解活動を展開し、誘致して貰えるように積極的に働きかける方法をとらなければ立地問題は解決しないと考える。

また、地元雇用および税制面での優遇措置についても十分配慮すべきである。

次に、班目氏が例としてコメントしておられる核拡散防止と社会受容性について私見を述べる。

### 核拡散防止対策

原子力の平和利用を進めるにあたっては、核拡散防止対策をとることが絶対条件であり、わが国は非核三原則を堅持するとともに、NPTへの加盟、IAEAの保障措置の全面受入れなど核物質防護のためのあらゆる国際約束を遵守し、すべての原子力施設の厳重な管理を行っている。

非核兵器国最初の商業規模工場である六ヶ所再処理工場では、具体的保障措置について、設計段階から、日本原燃株はIAEAおよび米国と保障措置手法を検討し、それを実現するための保障措置技術の開発を行ってきた。

再処理工場ではタンクなどの溶液のPu濃度が一定にならず、かつ、計測誤差もあるため、MUFと呼ばれる行方不明量があり、これが、容量800トンの六ヶ所再処理工場では、数十kg程度となる。IAEAの保障措置では原子炉級プルトニウムの規定有意量を8kgに規定しているので、測定精度を高めるとともに、測定点を増やし、測定頻度を1週ないし1ヶ月とするNRTA(near real term analysis)を採用して上述の規定有意量にすることとしている。

これとともにIAEAの立ち会いまたはチェックの下に、封じ込め、監視を厳重に行うことにより対処している。その具体的方法はプルトニウム・ウラン混合粉末をキャニスタに封印し、これを貯蔵所の貯蔵ピットに収め、もし、キャニスタが貯蔵ピットから取り出されるようなことがあれば、これを赤外線または超音波により、

検知する方法がとられている。また、貯蔵所の出入り口には監視カメラが設置されている。

非核兵器国を中心に原子力発電を本格的に進める気運が高まってきており、これに対応して、プルトニウムが増え続けるのを防止するため、考え出されたのが、米国のGNEP構想である。この構想は、本誌(2007年6月号p.438)<sup>2)</sup>に述べたように、技術的にも解決すべき問題がある上に、経済的に極めて割高となり、その負担をどうするかが問題である。

そこで、これに代わる構想として、軽水炉にプルトニウム(Pu)をトリウム(Th)に混ぜたMOX燃料を装荷するトリウム発電炉を提案する。

この炉の特徴を要約すれば、

- (1) 完全な核不拡散
- (2) アクチニド元素の生成量放射性物質が飛躍的減少
- (3) 燃料利用効率の向上、燃焼度の高度化によるウラン資源の大幅な節約と燃料コストの低減

### 社会受容性

社会受容性は研究テーマではなく、プロジェクトを進める当事者が一般国民、特に地域住民の理解と協力を得るために配慮すべき重要テーマである。

高速増殖炉は正の反応度係数の高速炉であるので、炉停止系2系統が同時に不動作の場合、即発臨界超過事故となるが、ドップラー効果および燃料の破損、分散によって、臨界以下となり、放出される機械的エネルギーによって原子炉容器が破損されることはない結論されている。しかし、破損、分散した燃料が炉心内で集まって再臨界する可能性を避けるため炉心外に排出され、原子炉容器下部に設置された受け皿に溜まることにより安全が確保されるという説明では、一般公衆に不安感を与え、理解が得られるかどうか懸念される。

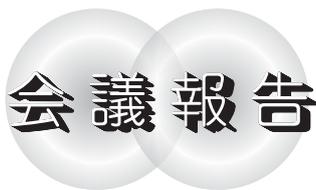
これらの問題に対する説明責任は、開発の当事者である動燃/JNC(現JAEA)にあるが、社会受容性に対する配慮が十分とはいえない。設計変更や説明方法の工夫が必要と考える。

以上、私見を述べてきたが、原子力の活力を取り戻すための具体的対策について原子力関係者間のより活発な議論の展開を希望して稿を閉じる。

(2008年11月18日記)

### —参考文献—

- 1) 豊田正敏, 原子力発電の歴史と展望, 東京図書出版会, (2008).
- 2) 豊田正敏, “GNEP構想の問題点とこれに代わる選択肢としてのトリウム発電炉”, 日本原子力学会誌, 49〔6〕, 438(2007).



## 50周年の節目を迎えた制御核融合研究 第22回 IAEA 核融合エネルギー国際会議報告

22 nd IAEA Fusion Energy Conference

2008年10月13～18日(ジュネーブ市, スイス)

2008年は制御核融合エネルギーの研究が公開されてちょうど50周年にあたり、ジュネーブで第22回 IAEA 主催核融合エネルギー国際会議(FEC)が開催された。核分裂エネルギーの平和利用は1955年にジュネーブで開催された第1回原子力平和利用国際会議から開始されたが、制御核融合エネルギーの研究は1958年のジュネーブ第2回原子力平和利用国際会議で核融合の分科会が開かれ、それまで秘密裏に行われていた研究が実験装置の模型等を展示して一斉に公開されたのが始まりである。第1回原子力平和利用国際会議の議長を務めたバーバー博士が20年で核融合発電が実現するであろうと予想したのは有名な話である。一方で、専門家はそれほど楽観的ではなく、水爆の生みの親であるテラー博士は20世紀中には成功しないだろうと述べている。現実がテラー博士の予想した通りに推移していることは事実が示す通りである。1958年のジュネーブ会議には、世界11カ国から109論文が投稿され、ノーベル賞学者のアルベン教授(スウェーデン)やテラー博士(米国)、アルチモビッチ博士(ソ連)等が講演している。日本からは2編の論文(宮本悟郎他(東大)、早川幸男他(京大))が出された。

核融合単独での第1回核融合 FEC は1961年にザルツブルグで開催されたのが最初で、当初、オリンピックと同様、4年ごとに開催されていた会議は第6回から2年毎の開催で定着し、世界中の最新の核融合研究開発の成果を持ち寄る“核融合オリンピック”となっている。1958年のジュネーブ会議から50年が経過し、再びジュネーブで50周年記念会議が開催された。

本会議では、世界45カ国(国際機関含む)から投稿された総計578編の論文を国際プログラム委員会で審査し最終的に42カ国543編の論文を採用(日本からは124編が採用)した。この50年間に参加国は約4倍、論文数は約5倍に増えた。

本会議の大きなトピックは、世界人口の過半数を占める、欧州、日本、米国、ロシア、中国、インド、韓国の調印によって2007年10月に国際機関 ITER 機構が設立されて初めての IAEA 主催核融合エネルギー国際会議である。このため、初日の記念セッションでは、我が国から選出された池田機構長が ITER 機構の組織の立ち上げ状況を講演され、建設が開始されたことを印象づけた。これに先立って、ITER 誘致に成功したフランスのジャキーノ氏が名調子で核融合研究の50年を振り返った。別途企画した50周年夕べのセッションでも、米露研究者か

ら歴史の紹介があり、中国の研究者からは地球温暖化防止に貢献する決意表明があった。

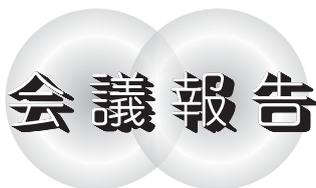
総括講演では、世界の主要装置のこの2年の成果が報告され、原子力機構の JT-60 の発表に対しては、これまでの優れた成果と運転を2008年で完了したことに対して、講演終了時には会場全員が立ち上がって拍手した。米国の慣性核融合装置 NIF の発表はビデオと音響をまぜた目立つ発表で、発表者のモーゼス氏は NIF の一つの方向性として核分裂とのハイブリッドを提案した。NIF 装置が完成に近いことから次回には興味深い結果が得られると期待される。また、前回 IAEA の EAST (中国)に続いて KSTAR (韓国)が超伝導トカマクとしてファーストプラズマを報告し、アジアが今後の核融合研究のメッカになることを強く印象付けた。ITER 設計では、周辺局在モード(ELM)によるダイバータ板の損傷予測が一層鮮明になり、ELM 抑制用に共鳴磁場コイルの設置を決めたことが報告された。本コイルの効果を実験的に明らかにしたエバンズ博士は、2008年度の Nuclear Fusion 賞に選出された(<http://www-pub.iaea.org/MTCD/NF/NFAward.asp>)。

会議の最終日の5件のサマリー講演では、核融合研本島所長が磁場閉じ込め(安定性、波と粒子相互作用、ダイバータ)を、阪大の田中教授が慣性核融合をまとめられ、我が国の学術基盤のレベルの高さを世界に示した。今後の制御核融合研究は、ITER を中心に開発を進めることになるが、今世紀中庸には原型炉によって実用化の見通しを得、今世紀末には地球温暖化抑制に一定の貢献をすることが求められる。

(原子力機構 菊池 満, 2008年11月25日記)



国連欧州本部会議場での第22回 IAEA 核融合エネルギー国際会議の開会式(中央に座るはずのスイス大統領は欠席、左からトラン教授(現地組織委員長)、菊池(国際プログラム委員長)、ソコロフ IAEA 次長、2人おいてりー教授(韓国, IFRC 議長))



## OECD/NEA「第10回アクチノイドと核分裂生成物の分離変換技術情報交換会議」

10 th OECD/NEA Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation

2008年10月6～10日(茨城県, 水戸市)

経済協力開発機構 原子力機関(OECD/NEA)と日本原子力研究開発機構は、標記会議を10月6日から5日間、茨城県水戸市のホテルレイクビュー水戸で開いた。アクチノイドおよび長寿命核分裂生成物の分離変換は、放射性廃棄物の発生量および放射線影響の低減化に有効な技術として、日仏米をはじめ世界各国が戦略的かつ精力的に研究開発を進めている。

わが国は1988年に「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」(通称オメガ計画)を策定して技術開発を着実に進めており、2008年秋から分離変換技術のC&Rを原子力委員会で実施している。OECD/NEAに対してもこの分野における国際的な情報交換の必要性を訴え、第1回情報交換会議が1990年に水戸で開かれている。その後、分離変換の科学的基盤から開発戦略に至る幅広い分野の討議と国際協力を推進する場として定着し、2年ごとに日本、欧州、米国等で開催され、わが国での開催は最多の3回目となる。本会議には14か国、3国際機関から、152名(うち海外77名)が参加し、特別セッションと6つの技術セッションで117件の講演およびポスター発表があった。

会議冒頭には、通例の各国基調報告に代えて「核燃料サイクル戦略および移行シナリオ」に関する特別セッションが設けられた。次世代燃料サイクル導入に必要な核物質や原子力施設、発生する廃棄物量等の将来予測を、日仏米の国内、欧州地域内、世界規模の移行シナリオに沿ってシミュレーションした結果が発表された。中国等のOECD非加盟国のデータの取り込み、研究開発フェーズと移行シナリオとの整合性が今後の課題である。

地層処分への分離変換のインパクトのセッションでは、原子力機構の4群・群分離評価や欧州の廃棄物評価RED-IMPACTについて発表があった。Cs, Sr, Am等の発熱元素の除去による廃棄物処分場の効率的利用、マイナーアクチノイド(MA)の核変換による毒性減衰期間の短縮などの点で分離変換の導入効果が示された。分離変換の進展には地層処分との連携が不可欠であり、相互交流のあり方が議論された。

核変換燃料およびターゲットのセッションでは、MA酸化物、窒化物および金属燃料の製造と再加工、高速炉での照射後試験等について15件の発表があった。MA含有燃料の実験は主にNpとAmについて行われており、

Cmについては今後の研究が望まれる。この分野では工学レベルの燃料製造と検証がカギであるが、フランスPHENIXの閉鎖が2009年に迫るなど、照射施設の不足が深刻化しており、「もんじゅ」を有する日本の国際協力への期待が高まっている。

分離技術は高速炉あるいは加速器駆動システムによる核変換に共通する技術であり、本会議で最多の43件の発表があった。MAとランタノイド分離のためのフランスCEAのSANEX抽出法や原子力機構の新抽出剤・吸着剤、電中研の金属燃料再処理、米国先進核燃料サイクルAFCIにおける分離後廃棄物の固定化などの研究開発状況が報告された。従来の溶媒抽出法以外の新しい分離手法も開発されており、プロセス実用化検討の重要性が増している。

材料のセッションでは、加速器駆動核変換国際実験MEGAPIEの照射後試験、鉛ピスマス冷却材の腐食試験などについて5件の報告があり、今後の課題として材料のデータベース化が挙げられた。核変換物理実験および核データについてはJ-PARC施設の進展を含む10件の発表があり、MA核データ精度向上の重要性と測定の高難さが再認識され、国際協力におけるOECD/NEAの役割に期待が寄せられた。核変換システムのセッションでは、核設計と変換効率、安全性確保について24件の発表があった。今後は燃料輸送や経済性についての検討も望まれる。

最終日の高速実験炉「常陽」、J-PARC見学(39名参加)をもって本会議は無事終了した。会期中に日本人3名のノーベル物理学賞受賞が報道され、翌週にはOECD/NEA設立50周年記念式典が行われるなど、記念すべき会議となった。次回情報交換会議は2010年に米国で開催される予定である。

(日本原子力研究開発機構・山岸 功,  
2008年12月15日記)



会議初日の集合写真

## 支部便り

## 若手研究者16人が、さまざまなテーマで発表

## 関東・甲越支部 第7回若手研究者発表討論会

2008年10月24日(電力中央研究所 狛江地区31会議室)

基調テーマ「原子力・放射線 未来・夢・創造  
—低炭素社会での挑戦—

関東・甲越支部はこのほど、大学生や大学院生、若手研究者を対象に、「第7回若手研究者発表討論会」を開催した。この発表討論会は、若手研究者同士の討論やベテラン学会員からのアドバイスなど、若手研究者の交流の場を提供することを目的として、2002年から毎年開催している。今年は、上記の基調テーマで、夢や創造性のある研究を募集し、大学、研究機関、メーカーの若手研究者から16件の発表があった。

当日は、支部会員、学生、研究者を含めて約40名が参加し、午前9時20分から午後6時30分まで、各発表に対して各界の経験豊富な方々や、志を同じくする若手研究者からの質問、コメント、アドバイスが出され、発表者との活発な意見交換が行われた。

会合は5つのセッションで構成。【解析、線量評価】、【線量評価方法、材料開発】、【要素技術開発、ビーム開発】、【ビーム応用、測定】、【FBR、軽水炉技術開発】をテーマに、発表15分、質疑10分で行われた。また、発表者ごとに、着想のユニークさや研究成果といった内容、発表の態度、発表資料の点から、複数の採点者により、採点が行われた。

最後の特別講演では、日本原子力研究開発機構の石岡典子氏が、「医療ライフサイエンスへの応用を目指した放射性同位元素の開発—私が追い求めていたもの」と題して講演。放射性核種によるガンの診断・治療、ポジトロン放出核種トレーサによる植物研究についての最新の

状況が説明され、放射性核種が医学や農学の分野においても実に有用で、活用が期待されることが紹介された。

## 発表者のうち6人が支部奨励賞を受賞

発表討論会終了後、懇親会と支部奨励賞の表彰式が執り行われた。受賞者は昨年と同じく6名で、受賞順に、大久保 猛(原子力機構)、名倉 勝(東大)、小林亮介(日立)、関根敏彦(東大)、澤田真一(原子力機構)、梶河智史(東工大)に決まり、表彰状と表彰盾、および副賞が授与された。発表者の得点はいずれも僅差であり、7位以降も同点が続く結果となった。

## 交流と意見交換の場として、今後も期待

発表討論会では、原子力・放射線利用に関する創造的で夢のある研究が、若手の研究者から発表された。会場からの質疑応答も活発で、通常の学会よりも質疑応答の時間が多くとられていたことから、十分な議論ができた、また、今回は例年と比べて若手研究者からの質問やコメントも多かった、という感想を聞くことができた。若手とベテランの意見交換だけでなく、若手同士の意見交換も行うことができ、本発表討論会の目的であった、若手研究者に発表と討論、交流の場を提供することが十分に達成された。今後も本発表討論会が、様々な研究分野で活躍する若手研究者同士の交流・情報交換の場としてますます活用されることを期待する。

(支部企画委員/日本エヌ・ユー・エス(株) 平杉亜希,  
2008年 10月27日 記)



懇親会での集合写真

(1列目左から、富永企画委員長、関根、澤田、名倉、数土支部長、大久保、小林、梶河(敬称略))

# NEWS や書評もがんばっています

## 良い記事には種別によらず高い反応が(10月号の Web アンケート結果)

「原子力学会誌」10月号に対して寄せられた Web アンケートの結果をご紹介します。今回は85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。10月号で高く評価された記事について、「内容」、「書き方」に分けてそれぞれ上位4件をご紹介します。

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	時論	我が国の原子力俯瞰マップを作りませんか	4.08
2	書評	誰も知らなかった小さな町の原子力戦争	4.00
3	談話室	最終処分地選定問題を考える —地層処分関連研究施設、「幌延計画」に果たした自治体の活動を振り返る	3.91
4	時論	低炭素社会を目指すエネルギー・原子力政策—洞爺湖サミットを超えて	3.86
4	連載講座	軽水炉プラント—その半世紀の進化のあゆみ(13)	3.86

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	時論	我が国の原子力俯瞰マップを作りませんか	3.89
2	書評	誰も知らなかった小さな町の原子力戦争	3.76
3	巻頭言	日本の原子力界の真の実力を発揮しよう	3.74
3	時論	低炭素社会を目指すエネルギー・原子力政策—洞爺湖サミットを超えて	3.74

今月は、「内容」、「書き方」とも同じ記事が1, 2位を占めています。

### 2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

(1) 今月は原子力関係者とそれ以外の一般の方々の考

え方の違いを埋めることのできる可能性について考えさせられる記事が多く、興味深く読めた。

- (2) Web アンケートの回答の項目として、NEWS や書評などは対象とならないと私自身は思っている。回答からはずしてもよいのではないか。
- (3) 「巻頭言」に関して、日本の原子力界の実力を発揮しようという呼びかけに大いに賛同する。自分たちの積み上げてきた仕事に自信をもって対応しよう。
- (4) 「書評」に関して、町長の勇気ある態度に我々ももっと応援すべきではなかったか？学会誌としてもやるべきことがなかったかを話し合い、国民にその考えを浸透させるような記事を取りあげよう。
- (5) 「核融合の連載講座」に関して、書き出しが非常に良かった。誰もが容易に話題に入り込める導入であった。難しい問題も身近な話題と重ね合わせた導入で、人は理解しようとする扉を開くのである。
- (6) 「日米欧学生交流」に関して、学会の国際交流事業で将来の原子力の担い手を育てるのは大いなる投資である。学生はそれに応えるべく頑張ってください。

### 3. 編集委員会からの回答

- (1) 上記(2)のコメントに関して、NEWS や書評のアンケート回答数が他の記事と比較して特に少ないということはありません。また、今月号では、書評が上位にノミネートされており、NEWS も比較的よく、上位にノミネートされます。アンケートを取りまとめている編集委員会としては、記事種別により回答項目を取捨選択すべきではないと考えています。もちろん、回答者側で回答する項目を選択するのは自由です。
- (2) 上記(4)のコメントに関して、原子力学会の社会・環境部会と WIN-Japan は共催で、「国際市民フォーラム」を10月に開催し、この問題を取り上げています。フォーラムの報告は、2月号に掲載されていますのでご覧ください。

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

## ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

### 「平和」への問いを

毎日新聞 山田 大輔

日本原子力学会は創立半世紀の年を迎えたという。「原子力の平和利用に関する学術および技術の進歩をはかり、原子力の開発発展に寄与することを目的とする我が国で唯一の総合的な学会」と、ホームページのトップに掲げられている。崇高な目標だと思う。庶民的な用語感覚からすれば、「平和利用」は民生利用と同義ではない。しかも、「学術」という言葉が入っていることは重い。

釈迦に説法を承知であえて書かせていただいたのはこのことが、なぜ原子力への市民の不安感が強いのかにかかわると思うからだ。日本にはヒロシマ、ナガサキの苦しい経験がある。これが不安の原因ではないのか。経済産業省原子力安全・保安院のある幹部は「その通りですよ。原子力という言葉はみんな知っているから」と答えた。

なまじ知っているから。本当は全然別物なのに。声を大にして言いたい人は少なくないと思う。しかし、「原子力施設」と「核施設」の語句を使い分ける程度では、人々は納得しない。「もっと身近な原子力」をPRしようと食品への放射線照射や重粒子線治療などを挙げても、肝心のがん放射線治療は外科手術や化学療法に大きく水を空けられ、欧米との違いが歴然とした現状が、不安の根深さをよく表していると思う。

そうであるならば、別物だと言うだけではなく、不安感の出発点である「平和」に積極的にコミットし、あらゆる場面でこの課題を絡めることが、逆に信頼への第一歩になるのではないか。

原爆症研究の第一人者で広島大、名古屋大の総長を歴任した病理学者の飯島宗一さんは、米軍に接収されていた被爆直後の解剖資料を返還させ、「人類の貴重な遺産」として誰でも研究できるよう体を張って尽力した。放射線被曝の影響を知る尊い資料が、軍機密の闇に葬り去られずに済んだ。

「この問題に触れることは科学者として安全でないという政治忌避のようなものがあって、日本の医学界最大の問題にふさわしい扱いを受けていない」と生前話していた険しい顔は今も忘れられない。政治に翻弄されない、筋の通った闘う「学術」の姿が見えれば、世間は信頼を置く。

原子力工学そのものは実に面白いものだと思うからだ。年会のプログラムはさまざまな可能性を持つ研究テーマが百花繚乱の様相だし、新潟県中越沖地震後の

原発の耐震性評価の過程も、建物や設備、配管の細部までバラしてもう一度再構成する作業を通して、原発が一つのプラントとしていかに考え抜かれた技術の塊かを教えてくれる。工学好きの若者がもっとはまって不思議ではないのと思う。

残念ながら、年会の抄録集は他学会より高価だし、耐震性評価の過程も、よほど興味のある人が議事録を通覧しない限り知ることはできない。いかに多くの人が汗を流しているかを考えると、これはもったいないと思う。分かりやすく、しかし細部の妙味が失われることがないように伝えることは難しいと思うが、専門家としてぜひ努めてほしいと思う。原子力担当になって改めて書店に駆け込んだが、原発推進か反対かの議論は置いて技術的側面を分かりやすく、突っ込んで解説した本はほとんど見つけられなかった。

漠然とした不安感は、放っておけば拒否感につながる。先日行われた社内での原発研修で、新人記者の多くは原発を「なにか危なくて面倒なもの」と印象を語った。しかし、発電所の視察や担当者の講義など2日間の研修が終わると、印象は「実は面白いものだ」に変わった。興味は出発点になる。子供向けのよう粗雑な説明で「安全です」と言って、興味の芽を摘んではもったいない。過去の不具合事象のデータベースを含め、詳細情報を誰でも「アクセスしやすい」形で積極的に公開することはその前提だ。電力各社のホームページは、原発の各号機がどう並んでいるのかさえ満足に図示していない。胡散臭さを感じてしまう。

仮に今すぐ原発全廃が国策になったとしても、廃棄物対策など今後百年オーダーで原子力と付き合い続けることに変わりはない。そういう成熟した時代にふさわしいオープンで、「さすが日本発の学術だ」と尊敬される学会活動を期待している。



山田大輔(やまだ・だいすけ)

毎日新聞東京本社科学環境部記者  
東京大学教養学科卒、92年春に毎日新聞に入社し、中部報道センター(名古屋)などを経て05年春から現職場に勤務。医療や環境行政、理系白書などを担当して、08年夏から原子力安全・保安院などの取材をしている。