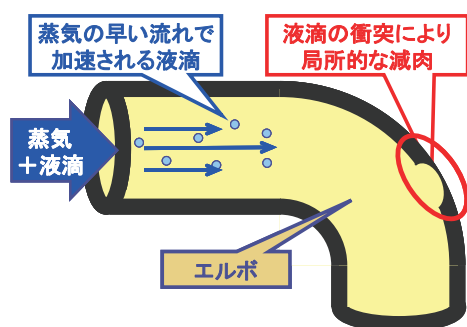


シリーズ解説 我が国の最先端原子力研究開発  
電中研 No.13

### 16 配管の健全性確保と合理的な保守管理を目指して—配管減肉現象のメカニズム解明と予測手法の確立

配管内面の腐食や壊食によって肉厚が薄くなる「減肉」。これが過度に進むと、配管破損事故をもたらすことさえある。配管減肉の発生メカニズムの解明とその予測は、どこまで進んでいるのか。

米田公俊, 森田 良, 藤原和俊



液滴衝撃エロージョン(LDI)による減肉の概念図(オリフィス下流側エルボに発生した場合の例)

#### 解説

### 25 核融合炉関連核データの現状と将来展望—フェムトスケールの物理が支える核融合炉開発

ITERの建設がフランスで開始され、材料照射実験を行うための国際核融合炉材料照射試験装置(IFMIF)の設計が本格化する。これらを支える核融合炉用核データとはどのようなものなのだろうか。

日本原子力学会 核データ部会

### 30 原子力施設の安全性および信頼に関わる課題と技術マップの構築

原子力施設の安全性を確保し、国民からの信頼を獲得するためには、人的・組織的要因への対策などソフト面の対策が重要だ。これに関する「技術マップ」と、関連する研究と研究者・研究機関をまとめた「人材マップ」を作成した。

首藤由紀, 牧野真臣, 滝田雅美

#### 巻頭言

### 1 「マニフェストと起請文」 —政治家は花魁じゃない

浜 矩子

#### 時論

### 2 日本社会と核セキュリティ —原子力の国際展開の中での セキュリティ認識

中込良廣

### 4 原子力の岐路、私の岐路

この10年で、原子力をめぐる情勢は大きく変化した。

田口 康

#### 解説

### 21 核拡散をめぐる国際政治 —インド、パキスタンの核兵器開発 を中心に

核不拡散には、NPT体制の継続・強化とともに、核兵器を開発しようという国の政治的意志を翻させるような環境を創造しなければならない。

広瀬崇子

#### 講演

### 35 立地町の一住民としての思い —原子力発電所とともに歩む 「原子力総合シンポジウム2009」に 参加して

国・県・マスコミ・研究者の役割はまだ十分ではないかと考える。

江上博子

#### 報告

### 37 企業における女性のキャリアの 磨き方—ダイバシティ連携のための 講演会

原子力分野で働く女性のさきがけの一人だった土井氏。今日に至るまでに彼女が経験したさまざまな「壁」とは。

笹尾真実子

#### 表紙 定期検査中の柏崎刈羽原子力発電所

(写真提供) フォトグラファー 柏木龍馬

(表紙デザイン) 鈴木 新

## 連載講座 21世紀の原子力発電所廃止措置の技術動向(3)

### 39 廃止措置技術—コンクリート解体／はつりの技術動向

軽水炉の解体技術開発には、機器等を対象とした鋼材解体と、建屋等を対象としたコンクリート解体とがある。今回は、放射性廃棄物となるコンクリートの解体技術を中心に述べる。

伊東 章, 鳥居和敬

## 連載講座 軽水炉プラントの水化学(8)

### 44 実機での水化学(2)—構造材料と水の相互作用

今回は、構造材料の損傷の原因となる応力腐食割れ(SCC)と流れ加速型腐食(FAC)について、最近の損傷事例や水化学影響因子、水化学対策技術の現状と今後の課題について述べる。

塚田 隆

## 私の主張

### 49 数学・計算法および炉物理の進歩 M&C 09に参加して

原子力コード利用環境の改善、公的な高等教育機関の拡充および定年制度の見直しを。

小林啓祐

## 談話室

### 51 原子力分野における「技術者倫理」と「安全文化」

—最近の2つの講演から学ぶこと

桑江良明

## 会議報告

### 53 FISA 2009会議

平田 勝

## 新・不定期連載 未来型リーダーシップを拓く②

### 54 学生団体 STEP

東大などの学生約70人は、環境・エネルギー問題を扱う団体を設立した。

大中 温

## 6 NEWS

- 浜岡発電所4,5号機,地震により自動停止
- 新潟県の技術委,柏崎刈羽6号機起動試験了承
- 保安院,柏崎市に耐震センター
- 島根3号機で圧力容器据付け(下に写真)
- 超強磁場 X線分光実験の世界記録を大幅に更新
- 核融合科学研と原子力機構,核融合で協力協定
- 原子力学会新会長,横溝英明氏に聞く
- 東大,原子力で3分野の国際サマースクール開催
- IAEA 次期事務局長・天野大使が原産に就任報告
- 原産,世界の原子力動向をプレスブリーフィング
- 海外ニュース
- EUの元担当者が横浜栄消防団を訪問



つり込み作業中の原子炉圧力容器。重さは820トンもある。(News p.7)

## 定点“感”測④

### 56 原子力の“グローバル”展開

敦賀・若狭地域を、世界の原子エネルギー拠点にできないだろうか。

秋田 晶

## ジャーナリストの視点

### 57 科学技術を見据えた平和構築

—永井隆博士の願いがオバマ演説に

佐藤年緒

### 24 From Editors

55 IAEA 版 JCO 臨界事故調査(英文)の発表について

58 「2010年春の年会」研究発表応募・参加事前登録のご案内

59 会報 原子力関係会議,主催・共催行事,人事公募,英文論文誌目次(Vol.51,No.10),入会案内,主要会務,編集後記

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/>

# 「マニフェストと起請文」

## ～政治家は花魁じゃない～



同志社大学大学院 ビジネス研究科 教授

浜 矩子 (はま・のりこ)

一橋大学卒。三菱総合研究所入社。同社初代  
ロンドン駐在員事務所長，経済調査部長，政  
策経済研究センター主席研究員

今年の夏は、マニフェストという言葉が随分流行った。天下分け目の総選挙を巡って、諸政党のマニフェストが飛び交う日々だった。

マニフェストは manifesto。イタリア語だ。さらに遡って語源を辿れば、ラテン語の manifestum に行き当たる。mani は手を意味する。fest は「打つ」あるいは「つかむ」の意だ。マニとフェストが合体すれば、要するに「手に取るように」解る文書ということになる。手に取るように解る文書なら、その中で嘘をつくわけにはいかない。かくして、マニフェストには、高らかに自らの信条を謳い上げ、そこに込められた信念に則って事を進めることを誓う誓約書としての意味がある。

ここで思い浮かぶのが、「起請文」(きしょうもん)という古い言葉だ。神仏に誓って交わす約束事の誓紙である。この誓いを破ると、天罰が下る。日本の政党たちは、何もマニフェストなどというカタカナ言葉を使わずに、起請文合戦を繰り広げるべきだった。そうすれば、「マニフェスト」では実感出来ない重みと、嘘をつくわけにはいかない覚悟が、どれほど芽生えたことだろう。

もっとも、起請文も時代とともに重みが薄れた。最終的には、お女郎さんが客寄せのために大量発行するえせ誓紙と化したのである。心にもない、不滅の愛のばらまきだ。そんなインフレ起請がもたらすドタバタの顛末を、古典落語の「三枚起請」(さんまいきしょう)が賑々しくも鮮やかに活写している。

三人の男を相手に、売れっ子花魁が起請文を乱発する。そのうちの一人の中年男などは、来年3月には、年季明けで必ずあなたと夫婦になるといわれ続けて、幾歳月もが経過している。「来年」とは、一体、どこから数えて「来年」なのか。それがいつになっても、解らない。どんでもない不良債権だ。それでも、じっと待ち続ける男心の悲しさ、いじらしさ。

それもこれも、自分一人が愛の誓いの対象だと思えばこそだ。だからこそ、かなわぬ辛抱も出来るというもの。ところが、実はライバルが二人もいたことが判明する。皮肉にも、真相判明の場面は、この中年男が若者に女遊びの危険性をレクチャーしている中でやって来る。

「だまされるなよ」と年配者にいわれて、若輩者が「大丈夫、大丈夫」と胸を張り、証拠書類を提示する。起請文である。中身を改めた中年男は、衝撃にのけぞる。その文面は、自分の大切な起請文と全く同じ。差出人も全く同じ。宛名が違うだけである。これだけでも耐えられないのに、そこに、さらに第三の男が登場する。通りすがりの仲間だが、一部始終を語っているうちに、この男もまた、起請文の持ち主であることが露呈する。

怒り心頭に発した三人組は、花魁のところに談判に駆け込む。そこから先の虚々実々がまた悲しくもおかしい。結局のところは、騙された方が悪いという雰囲気の中で、嗚は下げを迎えることになる。

相手が花魁衆なら、騙された方が悪いといわれても当然だ。反論の余地はあまりない。だが、政治家にこれを言われては、とうてい、納得するわけにはいかない。政治の質は有権者の質を表すというようなことが、しばしば、言われる。今の日本の政治状況の中で、これはちょっと有権者に失礼過ぎる。ただ、裏を返せば、政治家たちは、自分たちの品格が国民の品格の代理変数となることを自覚する必要がある。自分たちを選んでくれた人々の顔に泥を塗るような政治は、願い下げだ。本当の起請文に、本当に忠実な政治が定着していくことを切望する。

(2009年 8月29日 記)



# 日本社会と核セキュリティ

## 原子力の国際展開の中でのセキュリティ認識



中込 良廣(なかごめ・よしひろ)

(独)原子力安全基盤機構(京大名誉教授)  
1968年3月東北大学大学院理学研究科修士課程修了。理学博士。原子力委員会原子力防護専門部会委員。2006年5月よりIAEA核セキュリティ諮問会合(AdSec)日本代表委員。2007年3月京大原子炉実験所を定年退職後、本年4月から現職。

### 1. よく見る風景

新幹線で旅に出るとする。東京駅ホームで並んで待っているとき、弁当を買うのを忘れたのでバッグを列の中に置いて一自分の場所ダ、といわんばかりに…KIOSKに走る。日本ではどこでもよく目にする光景である。買っている途中に列車が入ってきて、乗客が乗り込む。気がつくとき、置かれたバッグがそのままホームに残っている。バッグは他人のものだとして、並んでいた人々は誰一人として手にしない。このようなことは皆、当たり前だと思っている。わが国では年少の頃から、人のものを盗んだり、人に害を与えたりすることは“悪行”であり、人に対して行ってはならないことだと教えられ、経験してきた。「ルールに外れたことをする者は、悪い!」、これが一般日本人の常識であり、これが我々のセキュリティ感覚と思っている。この感覚は、過激なことを好まない日本人特有の性格と、お互いを信頼することにより“心の通じ合い”を大切にしてきた社会環境によってできあがったものと理解している。大変すばらしい感覚であると思っている。

とはいっても近年、この信頼を裏切るような社会的事件が頻繁に起こるようになってきている。世界でも、自爆事案を含め「何でもあり」といった傾向が見られる。このような国際的背景の下に、日本で考える必要のなかった、または考えたくなかったセキュリティについて、要・不要、善・悪議論以前に、認識を持つ必要があると考え、思うところを記すことにした。

### 2. 国際社会から見ると…

#### その(1)

かつては「安全・水タダの国」といわれたわが国は、残念ながら世界の目から見ると、わが国の社会は特殊なもので、日本人・日本社会のセキュリティ感覚は一般的でなく、どちらかというといふと異端的と映るようである。セキュリティに関していえば国際的には、日本の(セキュリティに関する)常識は、世界的には非常識に見えるようであ

る。

筆者は、2006年4月からIAEAのエルバラダイ事務局長の諮問委員会である「核セキュリティ諮問グループ(Advisory Group on Nuclear Security : AdSec)」の日本代表メンバーとして、原則年2回、会合に参加している。しばしば、他国の委員から「北朝鮮の威嚇行為を、日本はどう見ているのか?」「イラクやイラン、インド・パキスタンの心配をするより、隣近所のややこしい国のことを心配する方が大事ではないのか?」といった話を持ちかけられる。「テポドン発射のその前後の期間は大きな問題としてマスメディアで扱われるが、直接の被害がないと『喉元過ぎれば熱さを忘れる』かのごとく、数日後にはその熱も冷め、何事もなかったかのような社会状態になる」といった実情を話すとき、まずびっくりされ、そしてあきれかえられるのである。もちろんすべての日本人がそうではなく、何%かの人は関心を持って注意深く、かつ忘れることなく彼の国の挙動を注視していることを付け加えるが…。

全体的なわが国のこのような社会反応に関し、諸外国から見たら、「信じられない!」と映るようである。上述のような威嚇行為に核弾頭が加わった場合、核セキュリティ問題は核テロ問題となる。それにもかかわらず…である。核セキュリティ問題と核テロ問題は同等でないものの、無関係ではないというのが国際社会の見方である。このことを忘れてはいけないのである。

#### その(2)

もう1件、似たような話を紹介したい。

核物質に関する“核物質防護(Physical Protection : PP)対策”からすべての放射性物質を対象とした“核セキュリティ”という国際的な認識変化の中で、近年、とりわけ、国境における不法移出入(俗にいう“核密輸”)の「検知と対応」に関心が高まってきている。この動向の顕著な例として、2007年12月にIAEA主催の下、放射性物質の不法移転に関する国際会議が英国エジンバラで開催されたことが挙げられる。

当時、この案件に関して日本政府は関心が低く(と、筆者は感じた)、筆者は参加者として、わが国のセキュリティ認識の低さを悲しむべきか、セキュリティを意識しないで暮らせるわが国の現状を喜ぶべきか、何とも複雑な気持ちになったことを覚えている。米国からは、次官補代理級の大物 PP 担当者を始め、34名の官民参加者があり、3名参加のわが国との関心の違いを見せつけられた。と同時に、わが国と世界(特に欧米)の核セキュリティ感覚の違いの大きさを痛感した次第である。

この会議や AdSec 会合での雑談話の中で、「地続きで国境を接する国同士は、どこからでも核物質等を不法に出入できるので、核密輸防止に大変な苦勞がかかるのでは?」との問いに対し、「いくら国同士が地続きで接していても、物を運ぶときには道路を通る。その道に必ずしも国境検問所があるとは限らないが、国境の道は大小関係なく、すべて管理下にあり封鎖措置をとることができるので、物の国内外不法移動は防止することができる」と回答された。逆に、日本での拉致事件について問われ、人が港から連れ去られたわけではなく、想定外の場所で拉致行為が行われたことから、海の国境こそ不法移転を防止することが難しい、といわれた。まさに、セキュリティに関する認識の甘さを指摘されたのである。

### 3. 核セキュリティ?、RI にも!

最近、核セキュリティ問題は、RI を用いたテロ行為(「R テロ」と呼ばれる)に重心が移ってきている。1970年代は PP として扱われ、核物質の盗取による核兵器への転換利用防止が中心であった。その後、原子力施設への妨害破壊行為(サボタージュ)が PP に組み入れられたことから RI のばらまき行為も加えられ、今や PP は「核セキュリティ」として、すべての放射性物質を対象とした防護措置として幅広く扱われるようになってきている。核物質の盗取より、放射能ばらまきを念頭に置いたサボタージュが現実的事象として、国際的な議論の中心になっているのである。筆者は「RI に絡んだサボタージュは“市民参加型”であり、核物質の盗取は“国家または大規模集団による組織型”」と考えている。したがって、われわれ市民は、少なくとも RI 絡みのテロ行為について、もっと身近なものとしてその認識を高めておく必要があると思っている。

「わが国では RI に対してまで核物質並みにセキュリティを考える必要はなく、これまでの安全管理で十分ではないか」といった意見がある。この件については理解できるものの、「最初から防護は不要である」との立場ではなく、「まず、防護意識を持ち、その上で具体的手段を探る」という方が国際感覚に合っているのではないかと

と思っている。当然のことながら、わが国においては RI 利用者数や施設数を考え、その影響を考慮しつつ、今後、防護議論を深めていく必要がある。

### 4. 核セキュリティ認識を高めよう!

ここ何年か原子力界にとって追い風が吹いてきた、といわれてきている。また、わが国原子力の国際市場への展開が広く叫ばれるようになってきた。やれ「原子力カルネサンスだ」とか「3S 構想の下に外国原子力事業に取り組むべし」といった雰囲気が満ちあふれてきている。唯一の被爆国であるわが国が、原子力の平和利用を積極的に進め、核不拡散政策の下、核燃料の平和利用を具体的に示す「保障措置」活動に関し、世界にその範を垂れてきたことは誇るべき所業である。今後、更なる国際展開を行うためには、安全対策はもちろんのこと、「核セキュリティ」対策を認識する必要があると心すべきである。核セキュリティ感覚の欠けた原子力戦略は、保障措置のないそれと同等ととらえ、国際市場に対し、核セキュリティの認識があることを示していくことが必要である。

本原子力学会において、ほとんどの会員の方々には「核不拡散」のことは十分理解されていることと思う。しかし、なかには、言葉は知っているが内容については詳細がわからず、保障措置やセキュリティは、原子力に関する研究または開発を阻害する“制度”として受け止められている節が見られる。このため2007年9月に、本学会内の組織として「核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会」が設立された。筆者はこの連絡会のまとめ役を仰せつかっているが、学会員として特に、核セキュリティ認識の高揚のために、この連絡会を利用し役立てていただきたいと願っている。

国外的には、本年12月から IAEA 事務局長として、天野之弥氏(前ウィーン国際機関日本政府代表部全権大使)が就任する。原子力の平和利用の推進者として、原子力の安全、核セキュリティそして保障措置を国際的に展開する IAEA の“長”である天野新局長を、わが国としてバックアップしていく必要がある。また、昨年、洞爺湖サミットでわが国が発信した「3S(Safety, Security, Safeguards(Non-proliferation))構想」についても、責任を持って意味するところを各国に伝えて行かなければならない。

今後、原子力の発展に期待する者として、核セキュリティを含む 3S 概念の整理を早急に行う必要がある。そのためには、核セキュリティに関する国際的な認識を理解することが不可欠である。具体的な核セキュリティ対策については、上記認識を持った上で、わが国で実施可能な対策を行うべきであろう。(2009年 8月20日 記)



## 原子力の岐路，私の岐路



田口 康(たぐち・やすし)

文部科学省 原子力計画課長  
名古屋大学工学部原子核工学科卒。1986年  
科学技術庁入庁。原子炉規制課，在ロシア  
大使館書記官等を経て，2000年原子力局立  
地地域対策室長。文部科学省では，大臣官  
房総務課，会計課等を経て，2007年研究環  
境・産業連携課長。2009年7月から現職。

この7月，科学技術庁が文部省と統合し文部科学省になって初めて，約9年ぶりに原子力の仕事に「戻って」きた。この間，ITER建設のための国の予算の調整やJ-PARCの共用のための法改正などで間接的に原子力に関わってきたが，原子力政策あるいは原子力行政を俯瞰できる立場にはなかったし，2001年の省庁再編以降，原子力を取り巻く情勢や政府の原子力行政体制も大きく変化している。また，私自身，長期間，他の仕事に携わっている間に原子力を見る目も変わってきていると思う。これを機会に，自分と原子力のこれまでの関係を振り返るとともに，私なりの現状認識や今後の展望を述べてみたい。

これまで，原子力と社会の関係は，大きな事故をきっかけに変遷してきた。原子力の安全に対する誤解も含めた懸念が原子力と社会をつないできたといえるかもしれない。1979年の米国スリーマイルアイランド原発の事故の後，我が国を含めた世界の先進各国で原子力発電の是非についての議論が巻き起こった。偶然にも直前に公開されたジェーン・フォンダ主演の「映画により，チャイナシンドローム」や「メルトダウン」という言葉が世界的に流行した。当時，私は高校生だったが，メディアや書籍を見ると，不思議なことに世の中には原子力の「反対派」と「推進派」しかないかのように思えた。これが原子力に関心を持つことになったきっかけで，反対派の本も推進派の本も読み漁ったが何が真実なのか理解できず，遂には大学で原子力を勉強することとなった。

大学に入ってから，我が国の原子力界におけるTMI事故の後遺症は大きく残っていたらしく，教養課程に割り込んでいた原子核工学科の講義でもTMI事故はたびたび言及された。(私は，「いったい原子力は安全なのか，危険なのか？」と，今考えると恥ずかしい質問をした記憶がある。)そして，日本語訳が出版されたばかりだった『岐路にたつ原子力』という本を買って読むことを勧められた。今，28年前のその本が手元にある。米国の初代原子力委員長リリエンスールがTMI事故の直後に著したもので，今読んでも我々原子力関係者にとって示唆に富

むものであると思う。大学では，入学前の「安全か危険か」，「推進か反対か」という疑問にも自分なりの答えを持てるようになり，結局，科学技術庁で働くこととなった。

1986年4月，社会人になってすぐの私を待ち受けていたのは，チェルノブイリ原発事故だった。私は原子炉規制課に配属され，同じ圧力管型原子炉である「ふげん」の安全規制，ATR実証炉の安全審査指針策定に関する業務も行っていたので，社会人1年目のGWのほとんどを役所で過ごすハメになった。

微量とはいえ我が国でも放射能が検出されるなど，原子力の安全性に対する社会の不安の高まりは，TMI事故を凌ぐものだった。そして，その後の原子力行政にも大きく影響を与えた。PRではなく，PA(パブリックアクセス)活動や情報公開，国民との対話に力を入れるようになった。かつては揚げ足を取られることを恐れて公表を避けていた情報も積極的に公開し，原子力の必要性や安全性について公開の場で議論していこうという風潮になった。原子力委員会や原子力安全委員会関係の会議も公開で行われるようになった。これらは，現在は法制化されている行政の情報公開を先取りするものであったと思う。社会の受け止め方も賛成か反対かという二元論ではなく，どの程度必要か，いかに進めるかという多面的な議論へと少しずつ変化していった。

チェルノブイリ原発事故の10周年，エリツィン大統領の提案によりモスクワで原子力安全サミットが開催され，日本の首相(橋本総理)がチェルネンコ書記長の葬儀以来11年ぶりに訪口した。この時，私はモスクワの日本大使館で担当の書記官として働いており，何かの因縁を感じざるを得なかった。

ロシアからの帰国後は，FNCA(アジア原子力協力フォーラム)の立ち上げや省庁再編に伴う新しい原子力行政体制のスタートのための通産省との調整などに携わったが，省庁再編予算の概算要求作業が終わり一息ついていた頃，原子力行政のあり方を変える大きな出来事があった。JCO事故である。

JCO事故の後、原子力災害対策特別措置法が制定され、地方公共団体、警察や消防を含めた1,200億円の補正予算が編成されたことにより、我が国に原子力防災体制が整備された。また、原子力損害賠償法も初めて発動されることとなった。私は、当時、予算や原子力損害賠償法の運用に携わり、その後は立地地域対策室長として、防災対策や省庁再編による原子力行政体制の変更について、立地地域の理解と協力を得るために各地を説明して回った。そして省庁再編を迎えた。

久々に戻ってきた「原子力界」は、景色が随分変わって見える。地球温暖化問題の深刻化による必要性の再認識、米国の新規計画、スウェーデンの脱原子力政策からの転換、新興国による原子力発電導入の動きの活発化、原子力産業の国際的な再編の動きなど、原子力カルネサンスという言葉で表わされるように、1960~70年代以来の世界的な追い風が吹いているように思える。しかしながら、我が国では必ずしもこの追い風を享受できていない。我が国の世論はかつてなく原子力の必要性を認め、核燃料サイクル計画は進展しているが、人材不足が深刻化し、地震の影響が足かせとなっている。

また、米印が原子力協定を締結するなど、国際的な核の秩序も微妙に変化している。国際協力・保障措置課で課長補佐として98年のインド・パキスタンによる核実験への対応やCTBT批准のための国内体制整備などに従事していた身としては少々複雑な心境だが、ITなど様々な分野でインドとの協力が進み中、原子力分野でも従来手法を変えて核不拡散・平和利用という目的の達成を目指す必要があるだろう。KEDOによる北朝鮮の原発の起工式にも出席したが、プロジェクトは頓挫し、北朝鮮の核の脅威は高まっている。

原子力界の外はどうであったろうか。20世紀から21世紀の変わり目を経て、我が国の国際競争力は大きく低下したと言われている。社会や産業のシステムが経済のグローバル化などに対応できず、思ったような成長を遂げることができていない。我が国は、20世紀中、欧米システムをキャッチアップしながら進化させ世界のトップランナーに躍り出た。しかし、その後の進むべき方向性をなかなか見出せないでいる。明らかなのは、これまでのシステムを変えねばならないことであり、政治、行政、メディア等あらゆる場面で「(構造)改革」が唱えられている。

国の競争力の鍵を握るのは、「イノベーションの創出」や「知」と言われている。各国が研究開発投資や人材の獲得競争に力を入れ、大学は、研究成果のみならず、教員や学生が「国際的」でなければ一流とは呼ばれない。基礎研究からビジネスモデルの開発、製品・サービスの市

場化まであらゆる段階で新たな「知」が求められ、垂直統合型の重厚長大産業は過去のものといわれている。日本企業の研究開発投資の効率は低下し、官民を挙げて研究開発成果を効率的に社会に還元する仕組みを構築していく必要性に迫られている。

このような状況は原子力の世界も例外ではない。今や人材育成では産学官連携が不可欠となっているほか、原子力産業の国際的な水平分業が現実のものとなりつつある。また、これまで古風なりニアモデルに基づき官民の役割分担が決められてきた研究開発も産学官連携によるスパイラルモデルへと見直されるべきである。安全規制もより確実で合理的な方法を追求していく必要があると思う。昨年、シリコンバレーに出張した際、カリフォルニア州立大学パークレー校の原子力工学科に立ち寄り、学科長のピーターソン教授から話を聞く機会があった。彼によれば、米国の原子力が好調な一番の理由は、NRCが安全規制の方法を変えたからだという。これにより原発の稼働率が上がって原発が投資の対象となり、小さな電力会社の原発をまとめて運用するビジネスも生まれたそうだ。これは、正に「イノベーション」である。

我が国の原子力にかかわる仕組や仕事の仕方もまだまだ「改革」の余地があるのではないだろうか。

TMIの事故に始まる原子力の安全に係る大きなイベントは、我が国の原子力計画にとってだけでなく、これまでの私自身の進路や仕事にとっても一定の節目となってきた。

JCOの事故からちょうど10年目に原子力計画課長を拝命したことも何かの縁であると思う。今後、六ヶ所再処理施設の竣工、もんじゅの運転再開、FBR実証炉に採用する革新技術の評価など、我が国の原子力計画は比較的大きな節目を迎えつつある。また、我が国の原子力産業が国際競争力を維持・強化できるかの正念場でもあり、人材育成や原子力技術の基盤強化に取り組んでいかねばならない。

『岐路に立つ原子力』の中でリリエンソールは、「原子力とともに生きることが、きたるべき未来のすべての人類の“生”(あるいは“死”)の条件の一つである」と述べている。我々は、核軍縮や核不拡散と同時に、原子力というプロメテウスの火を安全に使いこなし、人類の持続的な発展を図るための道のりを着実に進まなければならない。原子力に携わる関係者が自信をもって、かつ、市民に対する謙虚な姿勢を忘れずに、我が国のためのみならず、人類全体のために、我が国の原子力平和利用を進めていくことを確信している。私自身もその一員として努力を惜しまず職務を全うしたい。

(2009年 8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。

## 浜岡発電所 4, 5 号機, 地震により自動停止—主要設備の安全性に問題なし

中部電力の浜岡原子力発電所の 4, 5 号機が 8 月 11 日, 駿河湾を震源地とする地震発生に伴って, 自動停止した。地震当時, 3 号機は定期検査のため停止中で, 1, 2 号機は廃止措置準備のために停止していた。なお, 4, 5 号機は安全に停止し, 発電所の安全に影響のある被害はなく, 外部への放射能の影響もなかった。

また中部電力は 8 月 21 日, 同発電所での地震観測

データと設備への影響について, 原子力安全・保安院に報告した。報告では耐震設計上, 重要な機器・配管系のうち, 5 号機の建屋 1 階で設計時の基準地震動(484ガル)をわずかに上回る 488ガルが観測されたが, その他の設備では基準地震動を下回った。なお, 主要な設備の健全性は確保されているとしている。保安院は中部電力の報告内容を妥当だと評価した。

## 新潟県の技術委, 柏崎刈羽 6 号機の起動試験を了承

新潟県の「原子力発電所の安全管理に関する技術委員会」は 8 月 13 日, 柏崎刈羽原発 6 号機が起動試験に入ることを了承した。

また東京電力は, 7 月 30 日に燃料棒から放射性物質が漏れた 7 号機について, 燃料からの漏れは抑制されているとの中間報告をまとめ, 8 月 19 日に原

子力安全・保安院と地元自治体に報告した。報告では, 定格熱出力状態においても, 高感度オフガスモニタなどに異常は確認されておらず, 放射性物質が漏れた燃料の近くの制御棒を挿入した状態で運転を継続することに安全上の問題はないと判断している。

## 保安院, 新潟工大を研究拠点に柏崎市に耐震センター

原子力安全・保安院は 7 月 9 日, 新潟工科大学(新潟県柏崎市)に原子力安全基盤機構(JNES)が「柏崎耐震安全センター」を設置すると発表した。

同院では, 今年度から原子力発電所の耐震裕度を定量的に評価する手法やサイト近傍で常時地震観測を行うなどの調査研究を拡充し, 効果的な研究成果を上げていくために, 地元根ざした産, 学, 官の研究協力体制を構築すべく, 関係機関と調整してきた。

このほど, 新潟工科大学が耐震安全研究拠点の整備を決定したことに合わせ, 同研究拠点に「柏崎耐

震安全センター」を設置することにしたもの。同センターには運営委員会を設置し, 同大学や東京電力とも連携していく。

具体的には, 耐震設計の信頼性の向上に向け, 柏崎刈羽原子力発電所周辺で大深度(3,000m 級)への地震計を設置し観測を行うとともに, 地震観測ネットワークと接続し, 国際的にも最先端の研究を行う。さらに, 国際原子力機関(IAEA)などとの研究協力や人材育成プログラムを実施していく方針だ。

(資料提供: 日本原子力産業協会)



## 島根 3号機で圧力容器据付け，2011年12月営業運転めざす —総重量820トン，3時間かけ慎重作業

「築く信頼 地域とともに 魂込めて3号機」をスローガンに掲げ、中国電力が2011年12月の営業運転開始を目指し建設を進めている島根原子力発電所3号機(島根県松江市，137.3万kW，ABWR)で7月17日，原子炉圧力容器のつり込み作業が行われた(=写真)。

つり込みに使用された大型クローラクレーンは，最大定格荷重930トン，本体総重量3,600トン，移動式としては世界最大級のもの。当日は，松浦正敬・松江市長も現地視察に訪れ，原子力発電所の「心臓部」の据付作業を見守り，「工事の一番のクライマックス」などと述べ，今後の同機建設工事の安全な進捗を願った。

つり込み作業の実施は17日，朝方からの豪雨により一時，危ぶまれたものの，天候も小康状態を見せ，午前10時，作業が開始された。島根3号機の原子炉圧力容器は，内径約7m，高さ約21m，胴体部板厚約17cm，重量約910トン，鋼材は日本製鋼所室蘭製作所で作られている。圧力容器は，つり込みの3日前の14日，製造元のバブコック日立(広島・呉市)より海上輸送，陸揚げされた。つり込み作業は，大型クローラクレーンで，容器を地上約35mまで引き上げた後，アームを旋回させ，原子炉建屋へ降ろし終

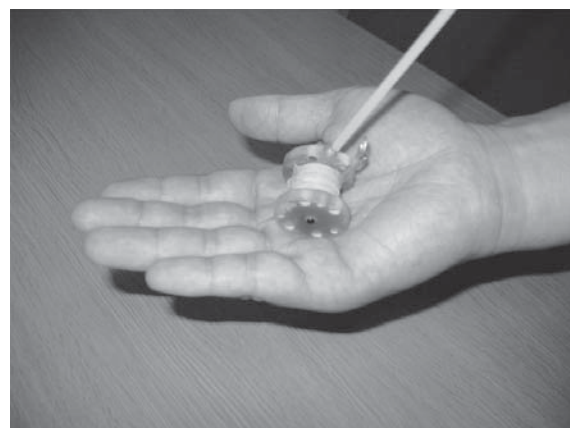


えるまで，およそ3時間を要した。つり込み時は，上蓋がないため，本体重量は約820トンとなっている。(同)

## 超強磁場 X線分光実験の世界記録を抜本的に更新

東北大学金属材料研究所などの共同グループはこのほど，40テスラという超強磁場下で，物質の電子状態を調べることに成功した。これまでの世界記録は10テスラで，40テスラは地磁気の約100万倍に相当する。

この実験に成功したのは，東北大学金属材料研究所の野尻浩之教授，東京大学物性研究所の松田康弘准教授，日本原子力研究開発機構の稲見俊哉博士，高輝度光科学研究センターの鈴木基寛博士，九州大学大学院理学研究院の光田暁弘准教授らからなる共同研究グループ。同グループではまず，大型放射光施設 SPring-8の高輝度X線と，独自に開発した超小型のパルスマグネットを組み合わせた装置を開



開発された一部を構成する超小型マグネット  
手のひらにのるほどコンパクトながら，地磁気の約100万倍の40テスラの強磁場を発生できる。

発。これにより超強磁場 X 線分光実験を実現することに成功した。

また、この装置を使って、希土類元素の 1 つであるユーロピウムを含む磁性体で磁気観測を実施。さらに元素ごとの磁性を調べる X 線磁気円二色性 (XMCD) 分光法と呼ばれる手法を使うことによって、ユーロピウムがもつ、“強い磁気を示したり、磁気が消えた状態になったりする奇妙な性質”を分析したところ、2 つの状態の磁場応答が全く異なることを初めて発見した。

物質の性質の多くは電子により引き起こされてお

り、その電子はスピンと呼ばれる小さな磁石を持っている。このため、磁場中の電子状態を理解することは、新しい素材を開発する上で大変重要であり、この手法の開発によって、新型磁気メモリーや磁気センサのための新しい磁気材料の設計・開発にも大きく貢献すると期待されている。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/press2009/p09072801/index.html>)

(資料提供：東北大学金属材料研究所、東京大学物性研究所、日本原子力研究開発機構、高輝度光科学研究センター、九州大学大学院理学研究院)

## 核融合科学研と原子力機構、核融合分野で協力協定

自然科学研究機構核融合科学研究所と日本原子力研究開発機構は 8 月 10 日、核融合研究開発分野において連携協力を進める協定を結んだ。

核融合研は、我が国の核融合科学分野における学術研究の中核機関として、大型ヘリカル装置 (LHD) 等を用い、核融合科学とその基礎となるプラズマ物理学、炉工学などにおいて学術的体系化を図り、世界に先駆けた成果を上げてきた。また、大学共同利用機関として国内外の大学、研究機関との活発な研究協力を推進し、優れた人材育成を目指している。

一方、原子力機構は、臨界プラズマ試験装置 (JT-60) 等を用いて、核融合エネルギーの実現を目指した総合的な研究開発機関として世界をリードしてきた。また、ITER (国際熱核融合実験炉) の国内機関および BA (幅広いアプローチ) の実施機関として、

大学・研究機関・産業界の意見や知識を集約しつつ、核融合エネルギー研究開発を進展するため全国的な体制で取り組み、ITER/BA と国内核融合研究との成果の相互還流を行っている。

この協力協定により、両機関がもつ研究開発能力や人材を相補的、総合的に活用することによって、核融合エネルギー研究開発の更なる進展を目指すことが可能となり、核融合科学体系化、ITER の建設や BA 活動の円滑な推進のための着実な成果が期待される。

(参考：<http://www.jaea.go.jp/02/news2009/090811/index.html>)

(資料提供：自然科学研究機構核融合科学研究所、日本原子力研究開発機構)

## 「批判を肥やしに壁越える 行動する学会へ変貌の時」 — 日本原子力学会の新会長に就任した横溝英明さん

今年 2 月に設立 50 周年を迎えた日本原子力学会。この半世紀の節目の年に横溝さんは学会長を務める。次の 50 年を創造する時代の先陣を切ってほしいものだ。「正直な話、50 年の歴史と会員数が 7,000 人を超える学会の会長に選任され、今は責任の重さを痛感しているところです」と実感を語る。

現在の原子力は、逆風にさらされて原子力業界全体の気持ちが小さくなっていった時代から、ようやく明るさが見えてきた。「エネルギーの安定供給は、

避けて通れない人類の大きな課題です。安定供給と地球環境の面で、基幹となりえるエネルギー源として原子力が期待されている、その表れですね」と強調する。

そこで頭脳集団である学会の存在がまさに問われている。「原子力村」から脱却し、「行動する学会」へ変貌しようとしている。その大きな流れとして、社会への情報発信を積極的に行っていこうという。「万が一、原子力施設でトラブルが発生したときに、国

や事業者から独立した立場でわかりやすい解説を発信できればと考えています」。北朝鮮が核実験を強行したときにも、即座にそれに反対する声明を発表している。

また次の50年を展望する際には何といても人材

育成が大きなカギを握る。「私自身がまさに団塊の世代、定年退職するフェーズで、活気が出てきた原子力においても技術に継承と人材の育成をいかに進めていくか。これは大きな課題です」。

(資料提供：科学新聞)

## 原子力で3分野の国際サマースクールを開催

東京大学グローバルCOE「世界を先導する原子力教育研究」プログラムでは、最初の2年間の国際活動の成果を生かして、若手育成などの活動をより広く国内外に展開するために、3分野の国際サマースクールを開催した。

「原子力発電」国際サマースクール・若手ワークショップは、原子力機構の共催、日本原子力学会の協賛で7月28日から9日間、東海村で開催した。日米中韓の大学・研究開発機関などから優秀な若手と大学院生57名が参加し、先進の軽水炉技術・燃料技術について22名の講師から講義を受け、全員のポスター発表、懇親会などを通じて交流した。参加者はスクールの内容と交流に満足の様子だった。来年は米国(UCバークレー校)、その後、中国、韓国と毎年交替で開催する予定。

8月2日から10日にかけては、UCバークレー校において東大とUCバークレー校との合同で「社会科学の視点と放射性廃棄物処分」をテーマに国際サマースクールを開催した。日米をはじめとする各国から、講師・講演者25名、聴講者30名が集まった。

講師・講演者はスウェーデン、韓国、日本、米国の事情を網羅し、聴講者の国籍も7カ国に及び、世界各国において大きな課題となっている放射性廃棄物処分問題への社会科学的アプローチについて掘り下げた講義とシンポジウムを行った。スクール最終日には、ニューメキシコ州カールスバッドの放射性廃棄物処分場(WIPP)への見学ツアーを行った。来年も開催する予定である。

8月5日から7日にかけては、山梨県北杜市の八ヶ岳山荘で、「放射線計測」に関する国際サマースクールを応用物理学会と共催で開催した。このスクールは、第1回を昨年UCバークレー校で開催しており、第2回の今回は日韓仏独米から5人の講師を招き、18名の教員・研究員および21名の学生の参加を得て、放射線計測分野における最先端の科学技術について講義、問題演習、ポスター発表会を行った。スクール最終日には、野辺山にある国立天文台の宇宙電波観測所への見学ツアーを行った。来年はUCバークレー校で開催する予定である。

(資料提供：東京大学)



## IAEA 次期事務局長・天野大使が今井原産会長に就任報告

国際原子力機関(IAEA)の次期事務局長に就任する天野之弥・在ウィーン国際機関日本政府代表部特命全権大使が帰国し、7月17日、東京の新日本製鉄本社に今井敬・日本原子力産業協会会長を訪ね、就任内定の報告と就任支持の御礼を述べた(=写真)。

天野大使は今井会長に、優れた原子力技術を持つ日本の産業界の引き続きの協力を要請した。

(資料提供：日本原子力産業協会)



## 原産協会、プレスブリーフィング「原子カルネッサンスを現実のものにするために」を開催

原産協会は7月15日、「原子カルネッサンスを現実のものにするために」と題したプレスブリーフィングを当協会会議室で開催し、24社38名のメディア関係者の参加を得た。

今回は、服部理事長より、世界的な原子力再評価の流れをはじめ、諸外国の動向、原子力発電の地球温暖化への貢献、原子力の持つ課題などについて最新の情報を紹介するとともに、原子カルネッサンスを実現するための課題とそれを解決する日本の強みと、なすべき取り組みについて講演を行い、その後、質疑応答を行った。

今回のブリーフィングは、昨今の日本の原子力産

業の国際展開に向けての官民を挙げての体制作りなどが進む中、当協会へのメディアからの問合せの多くが、原子力をめぐる海外動向に関するものとなってきており、新聞やテレビなどの報道でも、世界の中の原子力産業の動向について、取り上げられることが多くなってきていることから実施したもの。

当協会では、人材育成や、世界の原子力発電開発の動向などの原産の主要な活動や調査報告などについて、時宜を得た形でメディア関係者を対象に紹介するための懇談会を開催してきている。

(同)

### 海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[米国]

#### アメン UE 社、新設計画で COL 審査の停止を申請

米国でキャラウェイ 2 号機の建設計画を進めていたアメン UE 社が、6月23日付けで同機の建設・運転一括認可(COL)審査を停止するよう米原子力規制委員会(NRC)に申し入れていたことが明らかになった。

ミズーリ州を本拠地とする同社は昨年7月、キャラウェイ発電所の既存原子炉に隣接して、アレバ社

製160万 kW 級 US-EPR を 1 基建設することを想定した COL を NRC に申請した。しかし、その後の地元ミズーリ州議会審議の中で、約60億ドルと試算した建設費の建設中利子を顧客から回収できる見込みがなくなったため、同社は今年4月、建設計画の一時保留を NRC に連絡。NRC による COL 審査活動の継続は希望する一方で、同サイトでの新規原子炉建設が可能となるようなオプションの検討を社内で続けていた。

今回、NRC に宛てた書簡の中で同社の A・ヘフリン上級副社長は、「同 2 号機の COL 審査を中断することが当社にとって最良の利益になると判断した」と説明。COL 審査に関わる NRC のすべての活動を停止するよう申し入れている。

## DOE, 原子力教育支援に900万ドルを提供

米エネルギー省(DOE)のS・チュー長官は6月16日、米国で次世代の原子力開発を担う学生達の教育研究支援を目的とした「2009原子力エネルギー大学プログラム(NEUP)」の下で、原子力科学・工学研究が行われている全米23州の大学・短期大学29校に総額600万ドルの補助金を交付するほか、同分野の学部生と大学院生、合計86名に対して総額290万ドルの奨学金を提供すると発表した。

大学・短大へのインフラ補助金は1校につき1件で、交渉により10万~30万ドルを9月末までに支給する。具体例としては、訓練用原子炉へのフル・デジタル制御系設置やバックアップ用電力供給機器、取替え用制御棒の整備、原子炉安全と原子力物理研究のための計測装置等の設置で申請があったとしている。

一方、奨学金の対象となった学部生は合計70名で、来年分の学費として1人に付き5,000ドルを支給されるほか、特別研究奨学金については16名の大学院生が、1人に付き年間5万ドルを今後3年間の研究活動費として9月末までに支給される。

NEUPには、全米の優秀な学部生・大学院生の関心を原子力科学・工学研究分野に引き付ける役割があり、全米の教育機関での原子力研究インフラ整備を支援。研究炉や原子力研究専用施設、および研究所などで新たな設備・機器の整備を促進するため助成金を交付している。

## DOEがGNEP再処理施設の建設を中止

米エネルギー省(DOE)は6月29日付けの連邦官報に、国際原子力パートナーシップ(GNEP)の「プログラムレベルでの環境影響評価(PEIS)」の作成取消しを決定したと掲載し、GNEPの関連施設として国内整備が計画されていた商用再処理施設の建設を事実上、中止したことを明らかにした。

GNEP構想では、米国内の技術実証プログラムとして使用済み燃料処分の影響と核不拡散のリスクを低減しつつ、経済的かつ持続的な原子力発電を行

うための技術開発利用を検討。DOEは06年3月、拡散抵抗性が高く安全な燃料サイクルが環境や作業員、公衆等に与える影響についての解析評価文書となるPEISの作成計画を表明した。具体的な選択肢は、①ワンススルー、②高速炉サイクル、③プルサーマル、④熱中性子炉サイクル、⑤トリウム利用、⑥重水炉/高温ガス炉——で、昨年10月にはPEISの案文を公表。その後、今年3月16日までのパブコメ募集期間中に、DOEでは1万4,500件以上のコメントを受領していた。

しかし今回、連邦官報の中でDOEは、「前政権によるGNEP国内プログラムの主要項目である商業再処理はもはや推進しない方針であるため、PEISの作成は取り消すことに決めた」と説明している。

## エクセロン社が新設で計画変更、サイト認可を先に取得へ

米テキサス州ピクトリア郡で新規原子炉の建設計画を進めていたエクセロン・ニュークリア社は7月1日、建設・運転一括認可(COL)の審査を中断し、同建設予定サイトの早期立地認可(ESP)を先に取得する方針を米原子力規制委員会(NRC)に伝えた。

建設戦略変更の理由として同社は、近年の国内経済の不透明感に加え、連邦政府による融資保証制度の利用枠が限定的であり、経済的な検討の必要性に迫られたからと説明。建設と原子炉技術の選定に関する決定を最高20年間先送りし、それまでの間は、目に見える確実な活動であるサイト評価やその承認の取得に専念するとしている。ただし、交通インフラの改善やサイトの基礎整備など、大規模な建設準備作業の実施は保留する。

同社の副社長はまた、「建設決定までのスケジュールを大幅に変更しただけだ」と強調。ピクトリア市南部の同サイトは新たな原子炉の建設に適した地点だと改めて指摘する一方、現時点では経済面での現実的な問題のため、しばらくの間、決定を保留せざるを得ない状況にあると説明した。

### [カナダ]

## AECL, NRU 炉の運転再開は年末頃

カナダ原子力公社(AECL)は7月8日、5月の重

水漏れによりオンタリオ州チョークリバーで停止中のNRU炉について、様々な修理オプションを評価した最新の結果によると、運転再開は早くても今年11月頃になるとの見通しを発表した。

AECLによると、同炉の停止期間は重水漏れした容器や漏洩個所の状態、修理戦略、および停止が長引いた後に運転再開する際の必要項目など、最新情報の分析に基づく実態データで決まる。このため、同会社では運転再開までの作業を3段階に分け、現在、フェーズⅠの作業である原子炉状態の総合的な評価や複数の修理オプションのテスト、修理作業の全体計画作りなどを(事故発生直後から計算して)2か月半の日程で実施中。これらの作業いかんで、フェーズⅡの修理戦略を定めると説明した。

修理方法は今後、数週間以内に決定予定だが、フェーズⅡではその修理方法や規制上の条件、修理を要する範囲のさらなる分析等の状況に応じて、2か月程度を要するとAECLでは予測。原子炉のテストと運転再開段階に入るフェーズⅢでは、さらに2か月程度かかると見込んでいる。

## [英国]

### 原子力規制当局を機構改革

英国政府の原子力規制当局である保健安全執行部(HSE)は6月30日、下部組織である原子力局(ND)を機構改革する計画を公表。同日付で公開諮問を開始した。NDが同国の原子炉新設計画での新たな対応を含め、原子力産業の変化に伴う課題に容易に取り組める立場を得るとともに、堅固で効果的かつ効率的な原子力規制を持続させ得る組織とするのが目的だ。

主要な改善点は2点で、(1)非常勤で優位的な立場を持つ理事会、および部門ごとに独立した立場の規制官ポストを創設し、その規制上の機能や戦略、事業計画ごとに担当閣僚やHSEへの報告義務を負わせる、(2)放射性廃棄物の輸送や原子力サイトの安全保障、および保障措置を実施する法定上の責任を、運輸相およびエネルギー・気候変動相から新しい規制官に移管する。

公開諮問は9月22日までの予定で、年末にも関係する立法改革指令を議会審議にかけ、公開諮問に対する政府対応を公表する。議会審議が順調に進べ

ば、来年春に同指令が成立、同年の秋には新たな規制機関が成立することになる。

## [イタリア]

### 議会、原子力への復帰法案を可決

イタリアのC・スカヨラ経済発展相は7月9日、イタリアに原子力発電復活への道筋を開く法案が上院で承認され、議会として正式に可決したことを自身のウェブ・サイト上で発表した。イタリアはチェルノブイリ事故翌年(1987年)の国民投票で脱原子力政策を採択して以来、国内ですでに閉鎖していた1基に続き、稼働中だった原子炉3基をすべて閉鎖するなど徹底した脱原子力政策を遂行したが、EU内で3番目に高い電気料金や、世界最大の化石燃料輸入率などに対処するため、原子炉全廃後、約20年を経て、ついに正式に原子力カルネッサンスを迎えることになった。

今回承認された法案は、原子力などエネルギー分野の措置も含めてイタリア全体での経済改革や企業の発展、競争力の強化を図る目的で昨年8月に政府が提出していたもの。「原子力発電への復帰」と題した部分では、政府が6か月以内に新たな原子力発電所建設候補地を選定するほか、放射性廃棄物の管理基準や建設計画で影響を受ける住民への補償方法を策定することが明記された。

原子力復活による利点としては特に、電気料金の軽減と、温室効果ガスの排出削減を通じて地球温暖化防止のための国際的な数値目標達成を挙げている。また、専門家や技術者などで構成される原子力規制当局を創設し、緊急時対策や周辺住民および従業員の安全対策、環境防護に責任を負わせるとともに、年に1回議会への報告を義務付けるとしている。

昨年5月に発足した第3次ベルルスコーニ政権は、選挙公約としていた原子力の復活を実行に移すために着々と政策を推進。すでに今年2月、イタリア電力公社(ENEL)がフランス電力(EDF)と協力協定を結び、国内に少なくとも4基の欧州加圧水型炉(EPR)を建設するための実行可能性調査(FS)を実施することになっている。

スカヨラ経済発展相の見通しでは、2013年にも最初の原子炉の基礎掘削を開始し、その5年後を目処

に運転を開始したい考え。ただし、課題も山積しており、地元紙によると法案成立に反対していた環境派政党議員らは受入れ自治体探しの難しさを指摘したほか、「4基の建設費用は200億～250億ユーロと見積もられ、経済的にも環境的にも暴挙だ」と述べたと伝えられている。

## [インド]

### 原子力2サイトに米企業が原子炉輸出へ

インドを訪問していた米国のH・クリントン國務長官は7月20日、インドのM・シン首相との会談後に同国のS・クリシュナ外相と共同記者会見を行い、「インドの2地点で米国の複数の原子力企業による原子力発電所建設がインド政府によって承認された」と発表した。昨年10月に、ブッシュ前政権が民生用原子力分野における米印協力協定に調印後初めて、民間レベルでの協力が具体化することになった。

会見の中で同國務長官は、これら2地点の案件により、数十億ドル規模の米国製原子炉がインドに輸出され、両国に雇用を創出するとともにインド国民のエネルギー需要を満たすことになるだろうと強調した。地元紙の報道によると、これらの地点としては南部のアンドラ・プラデシュ州および西部のグジャラート州が有力だという。

ただし、同長官は米国企業がこれらの重要なビジネス・チャンスを実確なものとするために、今後、インド側が賠償責任に関する立法を承認することを求めており、実際の輸出にはさらなるハードルが残されていることを示唆した。また、会談後に米國務省が発表した資料には、両国が今後、原子力協力協定の第123条項に従い、米国製原子炉から出る使用済み燃料の再処理について協議と手続きを開始する予定であることが明記されている。

## [国際]

### 米ロ首脳が原子力協力で共同声明、原子力協力協定発効へ努力

米国のオバマ大統領とロシアのメドベージェフ大統領は7月6日、モスクワでの会談後に両国の原子

力協力に関する共同声明を発表し、昨年凍結されていた民生用原子力利用に関する協力協定については、発効に向けて協力していく考えであることを明らかにした。

声明の中で両大統領は、今年4月のロンドン金融サミットにおける両国の核削減等に関する合意内容を実行に移すため、民生用施設における高濃縮ウラン利用の最小化や、核物質の統合・転換などを通じて世界の原子力施設の安全保障レベルを向上させることで長期的な協力関係を一層拡大し、深めていくことを宣言。両国の核兵器解体から出たプルトニウムを処理し、低濃縮ウランとして米国の民生用原子炉で利用する協力を言及したほか、2005年の首脳会談合意に基づき、米ロそれぞれが設計した第三国の研究炉から高濃縮ウランを回収し、それらの炉を低濃縮ウラン仕様に転換する協力についても、継続して実施していくことを確認した。

また、原子力平和利用における保障措置促進の重要性に鑑み、国際的な保障措置システムの効率化や強化で2国間および多国間の協力を拡大していく点でも合意。クリーンで安全、価格も手頃な原子力の平和利用を促進させるという両国共通の展望を共有し、国際社会に対して両国は次のような点でさらなる努力を提供していくとしている。すなわち、(1)革新的で有望な原子力システムの開発、(2)信頼性のある燃料サイクル・サービスの提供メカニズムと手法の研究、(3)核不拡散体制を保証できる燃料サイクル・サービスの設立に向けた国際的アプローチの研究、(4)国際的な保障措置システムの改良——など。

### G8が排出量半減の目標再確認、原子力発電の促進も

G8ラクイラ・サミット(イタリア)が7月8～10日に開催され、「G8首脳宣言」では、温室効果ガスを2050年までに世界全体の50%削減する目標をすべての国が共有することを表明した。また、先進国全体では、1990年または、より最近の複数の年と比して、50年までに80%またはそれ以上削減するという目標も明記された。

原子力発電については、原子力安全、核セキュリティ、核不拡散の3Sを根本的な前提として、「費用効果分析、研究、インフラおよび人材開発、プラ

ント建設、運転、廃炉および廃棄物管理を含むあらゆるレベルでの国際的な協働を促進する」としている。IAEAの役割も強調した上、「我々は原子力エネルギーの民生利用に関心を持つすべての国々に対し、建設的な国際協力に関与するよう呼びかける」としている。

また、成果文書の一つとして「不拡散に関するラクイラ声明」が取りまとめられ、イランや北朝鮮の核開発問題などの脅威を指摘したほか、原子力の平和利用と核燃料サイクルにも言及。新興国での原子力教育、訓練分野などへの組織的な取組みを歓迎した。

## UAE と韓国が原子力協力協定に調印

アラブ首長国連邦(UAE)政府は6月22日に、韓国と民生用分野の原子力協力協定に調印したことを明らかにした。

UAEを訪問していた韓国の韓昇洙首相がUAEのシェイク・モハメッド首相と会談した後、両首相立会いの下で両国の外相が署名した。この2国間協定により、韓国の原子力企業はUAEにおける原子力発電所建設で必要となる原子力技術や技能を移転するとともに、機器類を20年間にわたってUAEに輸出することが可能になった。

UAEは2017年までに第3世代技術仕様の原子力発電所を少なくとも400万kW導入することを計画しており、その原子力開発利用計画において濃縮や再処理を実施しないことを明言。それにより欧米の原子力先進国からの信頼を勝ち得ており、すでに米国、フランスとは同様の協力協定を結んだほか、英国とも了解覚書を締結済みだ。

### [カナダ]

## ノルディオン社、RI供給問題でメープル炉計画の復活をAECLに要請

医療用アイソトープ(RI)生産炉であるNRU炉の運転再開が年末になるとしたカナダ原子力公社(AECL)の7月8日付けの発表を受け、RI販売業者のMDSノルディオン社は同日、カナダ政府とAECLは代替計画だったメープル(MAPLE)炉を完

成させることにより、RIの生産不足に取り組むべきだとの見解を発表した。

NRU炉はテクネチウム造影剤の原料となるモリブデンを含め、世界の医療用RI需要の約半分を生産しているが、運転開始後すでに52年が経過。ノルディオン社は、世界需要の3割を供給するオランダ・ペッテン炉の運転状況に触れ、同炉も今月中旬から約4週間の計画停止に入り、来年初頭まで修理のため停止予定である点に言及した。

世界のRI供給の脆弱性を克服するという観点から、同社は「NRU炉に替わってMAPLE炉を操業するという長年の誓約を果たすよう、カナダ政府からAECLに指示することが重要だ」と断言。MAPLE炉施設によって、カナダは革新的で重要性を増しつつある核医学分野においてリーダーシップを維持できるとの見解を表明している。

### [英国]

## ヨルダンの原子力計画に協力

英国政府は6月22日、原子力発電の導入を計画しているヨルダンを支援するため、同国との原子力平和利用協力協定に調印した。

調印は、ヨルダンのアブドラ国王の訪英を機に、英国のD・ミリバンド外相とヨルダンのN・ジュデ外相がロンドンで行った。ミリバンド外相は「世界を低炭素経済に向けて動かすにはエネルギー供給要素の重要な一部分として原子力が必要だ」と述べ、その意義を強調。一方、開発に当たっては安全かつ保証された方法が不可欠だとし、英国はヨルダンがそのような方法で開発するのを喜んで支援したいとの見解を表明した。

同相はまた、ヨルダンが国際原子力機関(IAEA)保障措置協定の追加議定書に同意したことや核物質防護条約に加盟したことを賞賛。原子力の導入を検討しているその他の国々にとっても、透明性に十分配慮した開発計画の推進モデルになるとの見方を示した。

天然資源に乏しいヨルダンは2040年までに国内の電力需要の3割までを原子力で賄いたい計画で、2015~17年までには発電と海水淡水化に利用できる原子炉1基の完成を目指している。すでに、フランス、中国、韓国、およびカナダとは2国間の原



子力協力協定を調印済みだ。

## [エジプト] 新設計画で豪コンサル企業と エジプト・アルメニアが契約

豪州に本社を置く国際的なエンジニアリング・コンサルティング企業のウォーリーパーソンズ社は6月19日、エジプトとアルメニア両国の新規原子力発電所建設計画でエンジニアリング・コンサルティング業務を受注したと発表した。

同社がエジプト原子力庁(NPPA)から請け負ったのは、同国初の商業炉となる120万kW原子炉の導入支援コンサルティング・サービス。サイトと原子炉技術の選定調査から原子炉の設計、建設管理、起動に至るまで8年間のプロジェクトでNPPAを支援することにより、ウォーリー社は約1億6,000万ドルを受け取ることになる。

エジプトは20年以上前から、エルダバ原子力発電所(PWR, 93.6kW×2基)の建設計画を掲げており、昨年12月には国際入札によりサイトと原子炉技術の選定や人材育成などを支援する技術サービス契約を米ベクテル社と締結していた。エジプト政府は今回、同契約業務をベクテル社からウォーリー社に移管したと伝えられている。

[ベトナム]

## 原子力建設評価委が原子力導入プレFSを承認、国会提出へ

ベトナムの国家原子力発電所建設評価委員会は7月20日、同国における原子力発電導入に関するプレ・フィージビリティ・スタディ(プレFS)の報告書内容に合意、これを投資報告書として10月の国会に提出することが確実な情勢となった模様。これにより、導入計画に関連した諸案件の動きが加速されることが見込まれる。日本としても今後、国会承認後のステップである正式なフィージビリティ・スタディ(FS)の受注等に向け活動強化の必要性が高まっている。

ベトナムでは2002年から03年にかけて、原子力発電の必要性や経済性のほか、炉型比較、サイト、環境評価、燃料/廃棄物、安全・法規制、人材育成、融資等に関する検討であるプレFSを日本の協力により実施。その報告書は昨年未まで改訂作業が行われ、「2020年までに初号機の運開を目指し、候補地である中南部ニン・トゥアン省の2地点それぞれに100万kW原子炉を2基ずつ、合計4基・400万kW建設する」ことが明記された。

### Topic

## EUの元原子力防災担当者が横浜栄消防団を訪問

EUの元原子力防災担当者であるドイツ人のHorst Miska氏がこのほど、私が所属する地元横浜の栄消防団を来訪した(写真)。氏はドイツのRheinland-Pfalz州政府で原子力を含む防災業務に従事し、その後、ブリュッセルのEU本部で同種の業務に従事。現在は退職し、ボランティア的に、防災に携わっている。

氏には2000年に実施された島根の原子力総合防災訓練に立会っていたが、訓練の評価をしてもらったことがある。JCO事故を教訓に制定された原子力災害対策特別措置法による最初の訓練だったが、その規模の大きさには驚いたようだ。それぐらいこの措置法は強力な体制・装備を規定しており、世界で最も強力なものといっていよう。

その見返りに筆者は、2001年に実施されたドイツとの境界にあるフランスのCattenon原発の防災訓練に立会った。私はフランスの県庁および現地対策本部に、氏はドイツの現地対策本部にいて、その時は原子力防災のあり方をいろいろと議論した。

その縁で来訪した氏は私たちとの意見交換で、日本はドイツと同等以上に、装備、体制はしっかりしていると感心していた。装備、体制は日・独で基本的には同じようだ。ただし経験面では、火災や災害に多く遭遇している日本の方が、より充実しているとのことであった。

(資料提供：原子力防災システム研究会・永嶋國雄)



## 我が国の最先端原子力研究開発

## シリーズ解説 第13回

## 配管の健全性確保と合理的な保守管理を目指して

## 配管減肉現象のメカニズム解明と予測手法の確立

(財)電力中央研究所 米田 公俊, 森田 良, 藤原 和俊

原子力や火力などの発電プラントでは、配管の内面の腐食・壊食によって肉厚が薄くなる「減肉」と呼ばれる現象が生じる。そしてその減肉が過度に進行した場合は、配管破損事故などにもつながることがあるため、プラントの健全性を保つためには、配管の保守管理が非常に重要となる。電力中央研究所では、こうした配管減肉の発生メカニズム解明とその予測手法の確立に取り組むことで、配管減肉を起因とする事故の未然防止に寄与するのはもちろんのこと、それらの検査を適正化し、重点的かつ効率的な保守管理ができることを目指している。

## I. はじめに

発電プラントにおける系統配管では、配管内面の腐食 (corrosion)<sup>a)</sup>・壊食 (erosion)<sup>b)</sup>によって肉厚が薄くなる減肉現象が普遍的に発生する。しかしこの減肉現象が過度に進展してしまった場合は、配管破損や内部流体の漏洩・噴出につながる可能性がある。例えば、1986年の米国サリー原子力発電所、2004年の美浜原子力発電所、2007年の米国イアタン火力発電所においては、配管減肉による大規模な配管破損により、犠牲者を伴う重大事故に至ってしまった。したがって、この現象に対しては、プラントの安全性・健全性はもちろんのこと、経済性の観点からも、十分な保守管理を必要とすることがいえる。

日本国内では、サリーおよび美浜の事故を踏まえて、更なる安全性の向上を目指し、日本機械学会 (JSME) において共通のルールとなる、配管減肉に関わる「管理規格」(以下 JSME 規格)が策定・施行された<sup>1~3)</sup>。この規格における減肉現象に対する管理の基本は、配管の肉厚測定による配管の余寿命の評価である。すなわち、複数回の肉厚測定の結果から、単位時間当りの減肉量(減肉速

度)を算定し、配管の健全性が維持できる最小の肉厚に至るまでの年数を予測し、これにより次回測定や配管取替の時期を適切に判断する。

配管の肉厚測定には、主として超音波を用いた測定器が用いられている。測定手法自体は、対象とする配管の外面に測定用のセンサを接触させることで比較的容易に実施できる。しかし、実際のプラントの現場においては、その測定に至るまでに、測定位置までの足場の設置、保温材の撤去、塗装の剥離・研磨等の前処理が必要であり、また測定後には逆に保温材の設置と足場の解体が必要となる。つまり、単に肉厚測定といっても多くの工程を要する作業である。そして実際にはプラントの1回の定期検査の中では、数百・数千といった膨大な数の測定対象箇所を扱う場合もある。したがって、電気事業としては、安全を十分に確保した上で、定期検査日数の短縮による稼働率向上や検査費用の削減が望まれている。

一方、上記の JSME 規格としては、現状で十分に保守的な管理が可能となつてはいるものの、部分的には改善の余地を含む課題がいくつか存在する。例えば、現行規格では、既存のプラントの運転条件を参照して策定されたが、減肉現象を抑制するための措置は各プラントですでに一部導入されつつあり、配管の材料変更や、配管内を流れる冷却水の水質変更等を行っている場合がある。これらのプラント運用条件に伴う各種環境の変更により、減肉現象が低減したとしても、現行規格では検査の合理的な緩和ができない。また、配管の減肉速度および余寿命を一部過剰に保守的に評価していることによ

*Study of Mechanism and Modeling of Pipe Wall Thinning* : Kimitoshi YONEDA, Kazutoshi FUJIWARA, Ryo MORITA. (2009年 7月7日 受理)

<sup>a)</sup>腐食 (corrosion) : 酸化還元反応により表面の金属が電子を失ってイオン化し、金属面から脱落していく現象。

<sup>b)</sup>壊食 (erosion) : 機械的な衝撃作用による材料の磨耗・損傷。

り、本質的に必要以上の肉厚測定や配管取替を実施している場合がある。

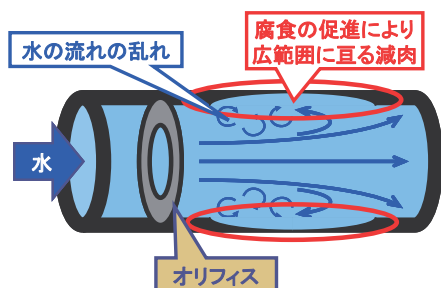
これらの課題の解決には、関与する環境条件を踏まえて、減肉現象の各発生部位における減肉速度・余寿命を、保守性を維持しつつ、現状よりも合理的に予測・評価することが必要である。このため当研究所では、配管減肉のメカニズム解明・減肉予測手法の確立に取り組んでいる。そこで本稿では、当所の配管減肉に関する研究の概要、現時点における成果、そして今後の展望について紹介する。

## Ⅱ. 配管減肉現象のメカニズム

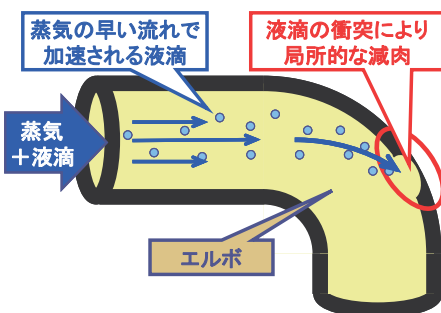
現在、JSME規格において、管理の対象とされている配管減肉現象は、「流れ加速型腐食(FAC: Flow Accelerated Corrosion)」と液滴衝撃エロージョン(LDI: Liquid Droplet Impingement Erosion)」の2種類である。各現象の概要を以下に簡単に記す。

### 1. 流れ加速型腐食(FAC)

FACは、炭素鋼や低合金鋼などの配管の内面に形成される保護酸化皮膜が、流動水の中に溶出することによって、腐食が促進される減肉現象(第1図)である。FACは配管の曲がり部分(エルボ、ベンド等)や流路面積が小さくなる絞り部分(オリフィス、弁等)など、流れが速く、強い乱れが生じる場所に発生する。また、FACは面的に広範囲にわたって発生することから、過度に進展した場合は大規模な配管損傷が生じる可能性があり、



第1図 流れ加速型腐食(FAC)による減肉の概念図  
(オリフィス下流側配管に発生した場合の例)



第2図 液滴衝撃エロージョン(LDI)による減肉の概念図  
(オリフィス下流側エルボに発生した場合の例)

冒頭に紹介した3件の配管破損事故は、すべてこのFACが原因であったと考えられる。このように、破損が発生した場合の被害は大きくなる可能性が高い現象ではあるが、比較的、減肉箇所の特定が容易である。

### 2. 液滴衝撃エロージョン(LDI)

LDIは、秒速100 m前後の高速で流れる蒸気中に混ざった細かい液滴が配管壁面に衝突し、その衝撃力で配管材料が破損する減肉現象である(第2図)。LDIも、FACと同様に、配管の曲がり部分や絞り部分などで発生する現象であるが、FACより狭い範囲で局所的に発生する場合が多い。したがって、過度に進展した場合でも、小さい貫通穴を伴うような小規模な破損に留まる。さらに、配管内の圧力が大気圧よりも低い負圧条件下で発生する機会が多いため、配管内の流体の噴出・漏洩が発生し難く、事故が発生する可能性は低い。しかし、局所的な現象であるがために、減肉箇所の正確な検出が難しい場合がある。

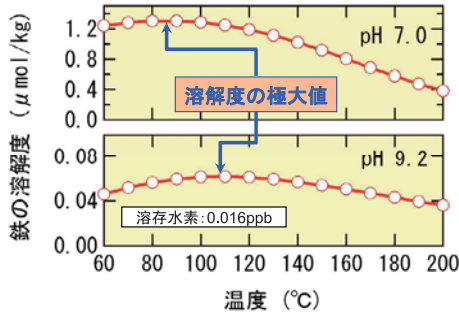
当研究所では、このFACおよびLDIに対して、実際の配管内の条件を模擬した実験や解析によって、減肉速度や減肉量の定量的な評価を行い、進展予測や余寿命評価に必要な減肉モデルや、それぞれの減肉現象評価システムの開発を進めている。以下、Ⅲ章ではFAC、Ⅳ章ではLDIの、おのおのに対する、当所の関連研究の概要と現時点における成果について記す。

## Ⅲ. 流れ加速型腐食(FAC)の研究

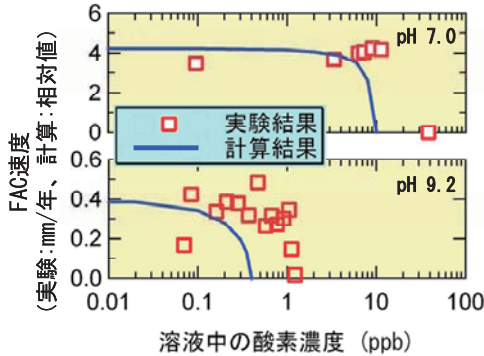
FACは先に記したように、「腐食」と「流れ」が重畳する現象である。したがって、現象を定量的に評価するためには、腐食に関与する水化学・材料因子、そして流れに関与する流体力学因子の、両面からのアプローチが必要である。当所では、主に、前者に対しては材料科学研究所が、後者に対しては原子力技術研究所が、おのおの専門分野に関する要素についてまず研究を進め、その成果を後に相互に照合し、最終的に総合的なFACの減肉率予測モデルの確立を目指している。

### 1. 腐食に関する研究

FACにおける「腐食」とは鉄の酸化反応であり、この反応の評価には鉄の「溶解度」が重要な要素となっている。溶解度に影響する水化学・材料因子としては、鉄を溶かす水の温度、pH、溶存酸素濃度、あるいは溶け出す配管材料に含まれるクロム等の含有量が、主な因子として挙げられる。鉄の溶解度に関しては、これまで数多くの研究が実施されているが、FACに着目し、詳細な溶解度評価を行った例は少なく、特に溶存酸素の影響を加味した研究は見当たらない。当所では、材料表面に鉄の飽和溶解層が存在することを仮定し、既存の熱力学



第3図 鉄の溶解度の温度依存特性

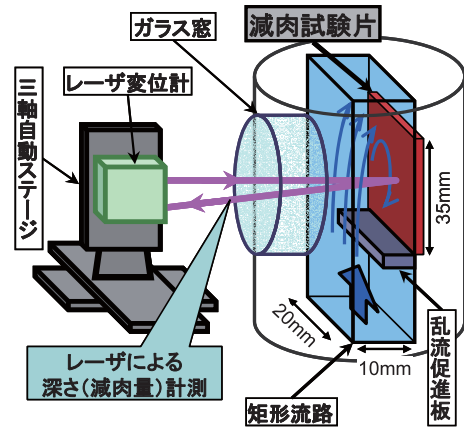


第4図 減肉速度に対する溶存酸素濃度の影響評価例

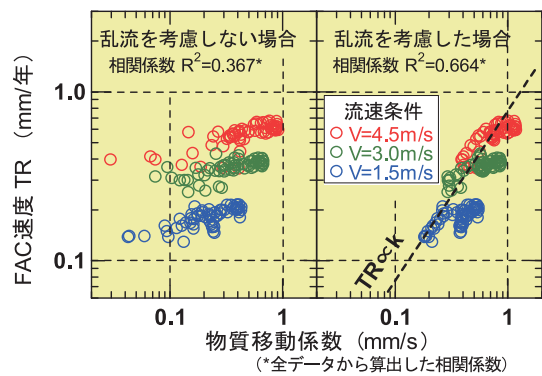
データ等を参照して、定常状態における鉄の溶解挙動の評価手法を導出した<sup>4)</sup>。この結果、鉄の溶解度は100℃前後で極大値となり(第3図)、中性の場合(pH<sub>25℃</sub>=7.0)と弱アルカリの場合(pH<sub>25℃</sub>=9.0)の場合とでは、溶解度が10倍程度異なる結果となっている。またFACに対する溶存酸素濃度の影響としては、減肉面における溶存酸素の供給と需要のバランスよりFACに対する溶存酸素濃度の影響を理論的に導いた。酸素の需要よりも供給が多い場合には、表面に安定な保護皮膜が形成され減肉が抑制され、この理論を実験値と比較すると(第4図)、急激にFACが抑制される「しきい」溶存酸素濃度の値が、各pH条件(中性・アルカリ性)において大きく異なる定性的な傾向が一致する結果となっている<sup>4)</sup>。

2. 流れに関する研究

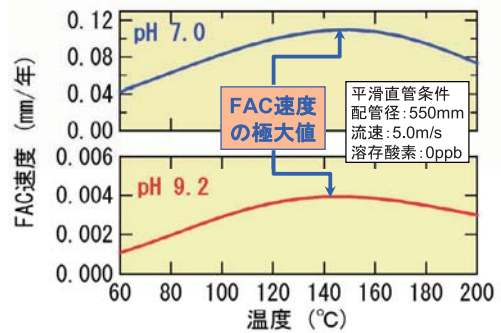
FACにおける「流れ」の影響とは、腐食によって配管から溶け出した鉄分を運び去る「物質移動」現象が重要な要素となっている。この物質移動に影響する因子としては、配管内の水の流量や配管の形状に依存する、流れの速さ(流速)や乱れ(乱流)が挙げられる。物質移動に関しても、これまでに数多くの研究が実施されており、各種の評価手法が提案されている。しかし、配管の曲がり部分(エルボ・バンド等)や配管径や流路面積が小さくなる絞り部分(オリフィス・弁等)といった、FACが主として発生する部位に対しては、物質移動の評価手法が確立されているとはいえない。そこで当所では過去の知見を整理した上で、既存の物質移動の評価式に、FACによる減肉面の表面近傍における乱流の影響を考慮した手法



第5図 減肉実験設備の試験部の概略



第6図 減肉速度と物質移動係数との相関において乱流の影響を考慮した効果



第7図 FAC予測モデルによる減肉速度の評価例

を提案した。この手法を、所内で実施している小規模矩形流路における減肉実験<sup>5)</sup>(第5図)から取得した実験値と比較すると、減肉面の乱流を考慮することにより、相関係数R<sup>2</sup>で評価した物質移動現象と減肉速度(FAC速度)の相関が大幅に改善する結果となっている(第6図)。

3. 減肉率予測モデルの構築

これらの腐食および流れに対する個別の要素研究を合わせて、当所ではFACによる減肉速度の予測モデルの構築にも着手している。このような減肉の予測モデルに関する研究は、1970年代より欧米諸国を中心に盛んに実施されているが、当所でもこれらの既存研究の調査を実施し検討を重ねた結果、基本的には上記の「鉄の溶解度」

と「物質移動」の積を主な構成とした予測モデルを、暫定的に構築した。このモデルを用いることにより、従来研究にて示されている、水中におけるFACによる減肉速度が150℃付近で極大値を有する特徴的な温度依存特性を、中性から弱アルカリの範囲で定性的に再現できることがわかった(第7図)<sup>4)</sup>。

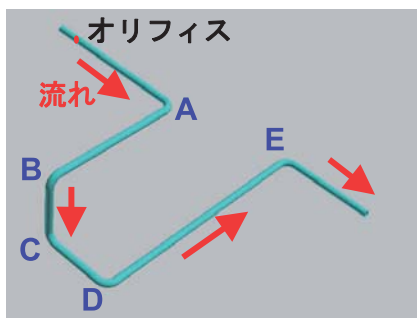
#### Ⅳ. 液滴衝撃エロージョン(LDI)の研究

LDIは配管材料も影響する要素となるが、液滴の流速や大きさなどの流動因子が非常に大きな影響を及ぼす現象である。さらに、発電プラント内の蒸気配管系では配管の流れ方向の位置によって流速や圧力が異なるため、減肉発生個所を予測する上では、流動状態の把握が必要となる。そこで当所では、まず蒸気系配管を対象とした流動評価手法を整備した。

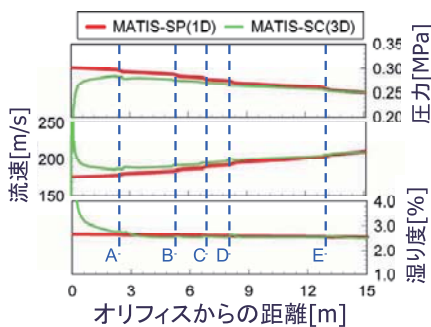
##### 1. LDIの予測評価のための流動評価技術

当所では、これまでに高速蒸気流を対象とした3次元計算コード“MATIS-SC”<sup>6)</sup>を開発しており、湿度(蒸気流中の液滴の割合)の変化を含めた蒸気流の流れ場の計算が可能となっている。しかし、実機の配管系は数十mにも及ぶ配管長であることを考えると、今後、発電プラントにおいて簡便に用いるツールとするためには、既存の技術の適用範囲の拡大や計算速度の向上が必要となる。

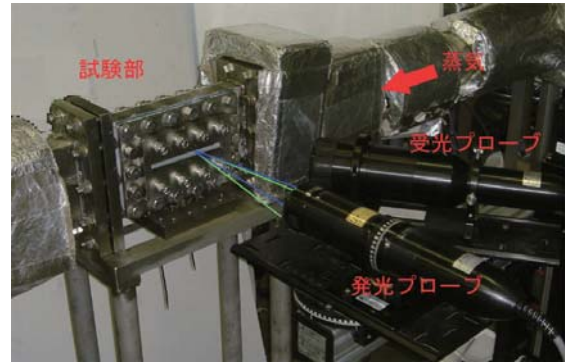
当所では、実機の長大な配管内の流れでは、オリフィスなどの複雑な流れ場となる箇所以外は、流れは配管の



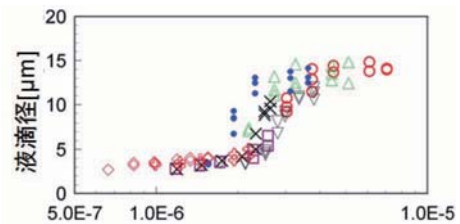
第8図 モデル配管体系のレイアウト



第9図 MATIS-SP(1次元)とMATIS-SC(3次元)のモデル配管系の計算結果の比較(配管流れ方向の断面平均分布)



第10図 蒸気実験による液滴径の光学的計測



第11図 液滴径と流動状態との相関式(記号は実験条件ごとに異なる)

断面方向に分布がないと考え、配管の断面平均の状態量(圧力、温度など)の流れ方向の分布を計算する1次元コード“MATIS-SP”<sup>7)</sup>を開発した。MATIS-SPは、MATIS-SCと同様、湿度の考慮が可能で幅広い蒸気状態に適用が可能となっている。また、モデル配管体系(第8図)での計算結果をMATIS-SCと比較した結果、複雑な流動となるオリフィス近傍以外はよく一致しており(第9図)、3次元計算に比べて1,000倍近い計算速度で計算が可能となる。

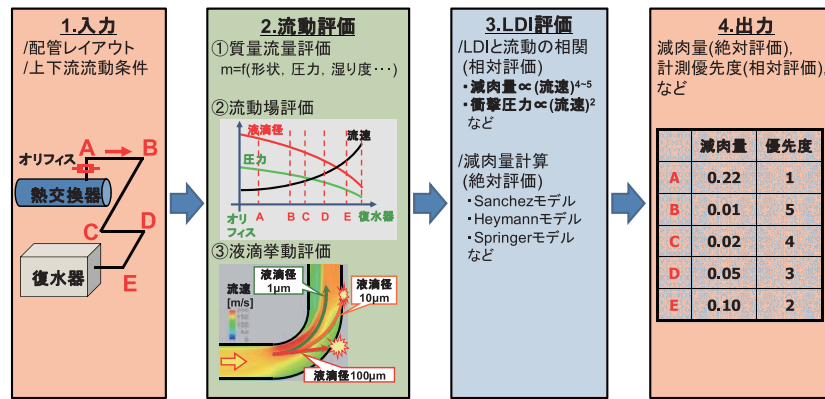
エルボ部などでの液滴の挙動に大きな影響を与える液滴径については、数値計算から求めることが困難であり、100 m/s以上の高速流体系に対応したモデルがこれまではなかった。このため当所では、蒸気実験によって液滴径を計測し、流速など既知の流動状態から液滴径を導く評価式を構築して用いている<sup>7)</sup>(第10、11図)。

##### 2. 流動評価を含めたLDI評価システムの構築

これら流動評価技術を活用することで、配管系におけるLDIを評価するシステム(LDI評価システム)を構築した<sup>8-9)</sup>。第12図にそのフローのイメージを示す。

LDI評価システムは、入出力部分を入れると、

- (1) 入力：配管レイアウトや上流・下流の流動境界条件を与える
  - (2) 流動評価：(1)の入力条件を基に、配管全体の流動状態や、局所における液滴の挙動などを評価する
  - (3) LDI評価：(2)で得られた流動状態を基にして、液滴衝撃力やLDIによる減肉量を評価する
  - (4) 出力：計測箇所の減肉量(絶対評価)や優先度(相対評価)などを出力する
- の4つの段階に大きく分けられる。



第12図 LDI 評価システムのフローイメージ

「(1)入力」において与えられた情報を基に、まず「(2)流動状態の評価」において、MATIS-SCやMATIS-SP、液滴径相関式などを用いて、流量や各位置における流動状態の評価、液滴挙動評価による液滴の衝突確率評価などを実施する。

次に、流動評価の結果を基にして「(3)LDI評価」を実施する。液滴の流速や大きさなどの流動状態と減肉量との関係に関する研究がこれまでに多数行われている<sup>10)</sup>などため、これらを活用することでLDIによる減肉量などの評価が可能である。

これら「流動評価」・「LDI評価」の結果を用いて、最終的に「(4)出力」において、各エルボ部における計測の優先度などを評価する。

## V. 今後の展望

FACに関しては、現状の予測モデルでは定量的な減肉速度の評価が可能レベルに至っていないが、これまでに構築した評価式の修正と、実験値および実機プラントにおける実測値を用いた検証を経て、モデルの精度向上と実機への適用を図る予定である。

LDIに関しては、本稿で紹介したLDI評価システムは、現在はまだプロトタイプの段階であるが、今後は入力環境の整備や計算速度の向上などを行い、近い将来、電気事業の現場で容易に使うことができる実用ツールにしていく予定である。

これらの評価手法を一つのFAC/LDIの予測評価コードとして開発し、実機における配管の減肉速度・余寿命を、保守性を維持しつつ、現状よりも合理的に予測・評価することが最終的な目的である。

### —参考資料—

- 1) 日本機械学会「発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格」, (2005).
- 2) 日本機械学会「発電用原子力設備規格 加圧水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格」, (2006).
- 3) 日本機械学会「発電用原子力設備規格 沸騰水型原子力

発電所 配管減肉管理に関する技術規格」, (2006).

- 4) 藤原和俊, 他, 水化学条件と流動状態が配管減肉挙動へ及ぼす影響に関する研究(その1), 電中研報告 Q 08016, (2009).
- 5) 米田公俊, 他, 流れ加速型腐食に対する影響因子の定量的な評価(その2), 電中研報告 L 07015, (2008).
- 6) 森田 良, 蒸気的非平衡凝縮を考慮出来る3次元流体数値計算コード“MATIS-SC”の開発, 電中研報告 L 04002, (2004).
- 7) 森田 良, 液滴衝撃エロージョンに関わる流動特性の解明(その2)—流動評価技術の高度化, 電中研報告 L 07016, (2008).
- 8) 森田 良, 液滴衝撃エロージョン評価システムの構築, 電中研報告 L 07017, (2008).
- 9) 森田 良, 液滴衝撃エロージョン評価システムの実用性の向上, 電中研報告 L 08019, (2009).
- 10) L.E.Sanchez-Caldera, “Mechanism of Corrosion-Erosion in Steam Extraction Lines of Power Stations”, Ph.D. Thesis, Dep. Mech. Eng., Massachusetts Institute of Technology, (1984).

### 著者紹介

米田公俊(よねだ・きみとし)



(財)電力中央研究所  
(専門分野/関心分野)流体力学/気液二相流, 熱流動-水化学連成現象

森田 良(もりた・りょう)



(財)電力中央研究所  
(専門分野/関心分野)流体力学・数値計算/高速流や蒸気流の係わる事象

藤原和俊(ふじわら・かずとし)



(財)電力中央研究所  
(専門分野/関心分野)腐食化学/軽水炉水化学管理

## 解説

## 核拡散をめぐる国際政治：インド、パキスタンの核兵器開発を中心に

原子力委員会 広瀬 崇子

## I. はじめに

原子力が国民にとって近づき難い存在であるのは、原子力分野が専門性が高く、理解が困難であるということに加えて、その技術が核兵器製造に転用される可能性があるということにも原因がある。確かに核兵器の開発は原子力の平和利用と技術的に共通する面もあるかも知れない。だからこそ、専門家は拡散性の低い燃料開発に力を注いだり、濃縮、再処理に神経をとがらせたりしてきた。また、国際社会は、NPT体制の下で平和利用に徹する国にのみ支援・協力をし、NSG(原子力供給国グループ)合意により、燃料、資機材の供給を制限したりしているのである。

NPT体制が核拡散防止に多大なる役割を果たしてきたことは疑う余地がない。しかしそれでも、核拡散を完全に阻止することはできなかった。しかもNPT設立当時想定された日本やドイツのような先進国ではなく、インド、パキスタン、そして北朝鮮といった発展途上国に核兵器は拡散したのである。なぜか。その理由は極めて政治的である。つまり、これらの国にとっては、少なくともインドとパキスタンにとっては、あらゆる犠牲を払ってでも核兵器を保有することが国の存亡に関わる問題と認識されたからである。それは安全保障上の問題と、核兵器神話とも呼べる国際政治におけるひとつのシンボルとしての意味づけの両方を含む。

そこで本稿では、インドとパキスタンの核開発の経緯と両国の核政策を追い、核拡散の政治的意味を考察してみたい。

## II. インドの核開発

インドの初代首相ネルーは科学の力を高く評価し、その一環として原子力の平和利用にも力を入れた。独立翌年の1948年に早くも原子力法を制定、原子力委員会を設

置して原子力開発を開始した。1956年には英国の支援を得て実験炉でアジア初の臨界を達成した。同年、国家的原子力発電炉開発計画を策定し、60年にはカナダ型のサイラス研究炉(重水炉)で臨界を達成している。また64年には再処理工場まで建設している。アジアにおける原子力先進国といえる。しかも当初、インドは核兵器を製造する意図はもたず、あくまで平和利用を目的として開発していた。

その事情が変わるのは、1962年に中印国境紛争でインドが屈辱的敗北を喫し、しかも64年にその中国が核実験を行ったためである。65年には「平和利用を目的とした核爆発研究」に着手し、74年に地下核爆発実験を実施する。インドは平和利用と主張したが、この実験によって海外からの技術、資機材の供給が停止され、以後、インドは自力で開発を行うことになる。このように第1回の核実験の最大の要因は中国への対抗であったといえる。しかし、それでも技術的には核実験をもっと早く行うことが可能であったが、政治的に抵抗も強く、これだけ時間がかかったとの見方が多い。

インドが必死になって「平和利用を目的とした核爆発研究」を進めている時に、世界は核拡散防止条約の締結に向けて動き出した。そこでは、中国を含めた5大国が核兵器保有国として認められ、それ以外の国は非保有国として、不拡散を義務付けられることになっていた。核兵器の廃絶は単なる努力目標であった。このような「差別条約」は到底受け入れられないとして、インドは加盟を拒否し今日に至っている。それでもインドは兵器化を公然とは行わず、「核のオプション政策」を取り続けた。技術的にはいつでも兵器を製造できるが、そこまではまだ行わないという曖昧戦略である。

インドは最終的に1998年5月に核実験を行い、核兵器保有を宣言した。ここでも国際的な要因が大きかった。今回は包括的核実験禁止条約(CTBT)である。インドはもともとCTBTの提唱者であったが、やはり差別待遇が問題となった。しかも、CTBT発効要件として、インド、パキスタンを含む44か国がこれを批准することを条件として国際社会は圧力をかけてきた。私はこれまで

*International Politics and Nuclear Proliferation; An Analysis of Nuclearization Policy of India and Pakistan* : Takako HIROSE.

(2009年 8月21日 受理)

100回近くインドを訪問しているが、この時ほど核問題がインド国内で論争になったことはない。争点は、インドが明確に反対表明してCTBTをブロックすべきか、それとも単に署名しないことで引き延ばしを図るべきか、ということであった。インドが核のオプションを放棄すべきという議論は全く起きなかった。結果的にインドは核のオプションを行使したことになる。

インドの核兵器保有の決定要因を整理すれば、以下のようになる。第1に、国家戦略として独立以来、原子力開発を進めており技術的基盤が存在したこと。それを兵器開発に利用したのは政治的理由による。

第2に、政治的要因としては対外要因が大きい。中国脅威論、パキスタンの核兵器開発およびそれへの中国の支援と米国の黙認が直接的要因である。そして、その中国を核保有国として認め、インドが核兵器保有を行う道を完全に閉ざすNPT体制にインドは強く反発したのである。それはCTBTが議題に上った時も同様であった。

第3に、強い国家への願望とその目的達成のために核兵器が大きな役割を果たすとの認識である。核実験後に、私はインドでのセミナーに数多く出席したが、その中でのインド人の発言で忘れられない言葉がある。それは、「今やインドは核兵器を保有しているのだから、P5と同様の地位、すなわち国連安全保障理事会での常任理事国の資格を得たと考える」というものである。それに対して日本からの出席者は、「インドはそう考えるかも知れないが、日本は全く違う論理を持っている。つまり、日本は技術的基盤があるにもかかわらず、核兵器を保有しないという選択を行った。このことによって、日本の強い平和志向が証明されており、日本も常任理事国になる資格があると考える」という反論を行った。認識の違いということで議論は平行線であったが、ここに現れたインドの「核兵器信仰」は、発展途上国ではかなりの程度共有されている認識であることに、日本も留意すべきだろう。

第4に、原子力科学者や技術者の圧力も大きな影響を与えた。インドでは原子力科学者の発言力は日本と比べるとはるかに強い。多くの研究によると、インドの科学者たちは、研究開発の観点から核実験の実施を求めていたという。1974年の第1回実験の時もそうであったが、1998年には、74年の経験者がすでに高齢になっており、知識の継承という意味からも早く核実験を行いたいと、1990年代には政府に対して相当の圧力をかけていたという。

こうしてインドは公然と核兵器保有国となった。しかし、その後の行動は、ひたすら核兵器開発に邁進するというよりは、自制のきいた「模範生」としての言動が目立っている。

### Ⅲ. パキスタンの核開発

パキスタンの事情は全く異なっていた。パキスタンの核開発はひとえにインドへの対抗であり、そのためには手段を選ばないというものであった。パキスタンがインドへの対抗意識をここまで強く持ったのは、独立の経緯と深い関係にある。

インドとパキスタンは1947年に英国植民地支配から分離独立した。当時、英領インドにいた人口の約3割を占めるイスラーム教徒(ムスリム)の指導者が、多数派ヒンドゥー教徒に支配されるのは嫌だ、ムスリムだけで別の国を作る、と主張した結果である。他方、インドは宗教が違っても一緒に暮らせるはずだといって、政教分離国家を建設した。こうして民族の大移動が起こり、新しく引かれた国境を渡って、インドからはムスリムが、パキスタンからはヒンドゥーとシク教徒が移住した。その数は何年で切るかによって異なるが、1,000万を下ることはない。独立前後の混乱期におけるヒンドゥー・ムスリムの暴動での死者は100万人を超える。しかもそれでもムスリムの約1/3がインドに残った。パキスタンは1971年に再分裂してバングラデシュが誕生し、現在、この3カ国にはそれぞれ1億5,000万人前後のイスラーム教徒が住んでいる。建国の理念が真っ向から対立する印パ両国は以来「宿敵」となった。これまで3度の戦争を経験し、国境付近では日常的に銃撃戦が続いている。「越境テロ」も後を絶たない。パキスタン人の多くは、「インドは分離独立を反故にして、パキスタンを吸収しようとしている」との恐怖心を抱いてきた。

こうした状況から、パキスタンは独立後の国家的努力のほとんどをインドとの対抗に費やしてきた。インドが原子力開発を行うならパキスタンも、ということで、独立後8年目の1955年に原子力委員会を設立、1965年には現在の首都イスラマバードの近郊に原子力科学技術研究所を設立し、米国から研究炉を購入した。その後、中国から研究炉や天然ウラン重水炉を購入している。石油危機以降、原子力発電にさらに力を入れ、現在、カラチ発電所(カナダ製原子炉、1972年運転開始、出力13.7万kW)とチャシュマ原子力発電所(中国製原子炉、2000年運転開始、出力32.5万kW)で発電を行っており、パキスタンの電力の約3%を供給している。チャシュマでは次の原子炉(中国製、30万kW)を建設中である。

さて、パキスタンは原子力の平和利用では満足しなかった。1971年の第3次印パ戦争で決定的敗北を喫し、バングラデシュがさらに分離独立して片肺になったパキスタンがインドと対抗するためにとった政策の大きな柱の一つが核兵器開発だったのである。パキスタンのブットー首相は「草を食べてでも核開発を行え」と命じ、ここからパキスタンの核開発は始まった。それは1974年にインドが核実験を行ったあと加速される。そして1975年に



A. Q. カーン博士がパキスタンに帰国すると、それが一気に本格化した。

A. Q. カーンは1936年に、現在のインドの中央にあるポパールという都市に生まれたが、52年に高校卒業を機にパキスタンに移住した。彼もまた分離独立の影響を強く受けたパキスタン人である。カラチ大学卒業後、1961年にヨーロッパに渡りドイツ、ベルギーなどで冶金学を学び、Ph.D.を取得している。72年にウラン濃縮企業ウレンコの下請け研究企業FDO(Physical Dynamics Research Laboratory)に就職し、ウラン濃縮のための遠心分離機技術の研究に従事する。ここで彼はかなりの機械技術へのアクセスを許され、その情報をパキスタンに流したとされる。(後に彼は核技術を盗んだ罪でオランダの裁判所から禁固4年の有罪判決を受けるが、裁判手続き上の不備により無罪となった。)1975年12月に彼は突然帰国し、核兵器開発の責任を担うことになる。以後、パキスタンの最高指導者の庇護の下に—それが民政であろうが、軍政であろうが—、彼は核兵器開発を行い、1986年ごろまでには兵器級のウラン濃縮に成功したといわれる。米国の報道によれば、中国からリング・マグネットなどの供給を受けていたという。核兵器の開発に成功したことによって、カーン博士はパキスタン国家から最高の栄誉をたたえる勲章を受け、国民的英雄となった。

この間、パキスタンの核兵器開発疑惑に対して、米国の政策は揺れ動いた。米国は1979年1月に「グレン・サイミントン条項、1977」を採用し、対パ援助を停止した。しかし、同年12月にソ連軍がアフガニスタンに侵攻すると事情はガラリと変わった。1981年にレーガン大統領は抗ソ戦のため、対パ援助禁止を解除し、さらに85年、プレスラー修正条項を導入して、大統領が各会計年度初めにパキスタンが核爆発装置を保有していないことを証明して援助を続けるようになった。しかし、ソ連がアフガンから撤退し、冷戦が終焉した1990年には、ブッシュ大統領(父)は「証明はできない」と発言し、再びパキスタンへの援助を停止した。1996年には援助の一部および兵器の供給を開始したが、それでもF16戦闘機などは、パキスタンがすでに購入代金を支払っていたにもかかわらず、供給はなされなかった。ちなみに、米国のこうした対パ政策の変化にインドも敏感に反応し、核開発を加速させたと言われる。

以上述べてきたことをまとめると、パキスタンの核兵器開発の要因としては、第1に、対印脅威論を上げることができる。インドの脅威はパキスタン国家の存亡をも左右する問題で、それに対抗するためならば、たとえ国民が飢え死にするような事態に直面したとしても、核兵器開発に専念すべきであるというのが、いわばパキスタンでのコンセンサスであったといえる。そうした強い決意に対してはNPTも効力を持たず、また闇市の利用やスパイ活動でさえも正当化されるというものであった。

第2の要因は外国の関与である。決死の覚悟があっても完全に独力で核兵器開発を成功させることは難しい。またたとえ闇のルートを使用してもすべての資機材の調達も困難である。外国の援助は不可欠である。しかもそれがP5の国から供給されたことも特記すべきことである。状況次第でくると変わる米国の政策によってもパキスタンは翻弄されてきた。その結果、この国での反米感情は我々の想像を絶するほど強い。パキスタンの核科学者がある雑誌に「世界で最も反米感情が強い国はパキスタンではないか」とまで書いている。

#### IV. 核実験後の両国の政策

核実験後の両国の政策も対照的である。前述のごとく、インドは模範生ぶりを発揮した。核実験直後にインドは「核実験のモラトリアム」を一方向的に宣言した。そして99年には「核ドクトリン草案」を出し、インドの核政策の基本は、①「信頼できる最小限抑止力」、②核の先制不使用、③非核保有国への核不使用、④核兵器の究極的廃絶に向けた国際社会の取組への協力の継続であるとした。また、インドからの拡散は一切報じられていない。こうした経緯から、NPTに加盟せずに核兵器を保有したインドに対して、民生用の原子力協力を可能と認めようという動きが米国から起り、それが米印原子力協定の成立、NSG会合におけるインドの例外扱いの承認へと発展したことは周知の事実である。その是非を問うことは本稿の目的ではないが、国際社会がインドを原子力分野での協力相手として重要であると認めたことが、原子力開発の歴史上、きわめて重要な出来事であることだけは確かである。

これに対し、パキスタンは問題が多かった。パキスタンは、核兵器の先制不使用には同意しない。それは軍事力で優るインドに対して抑止力を失うことになるとの判断からである。そして、対印関係が決定的に悪化した際には核兵器を使用することもありうるとして、いくつかのシナリオまで出している。さらに、拡散問題がある。すなわち、核技術を「カーン・ネットワーク」を通じて、リビアや北朝鮮に流したことが発覚し、カーン博士自身がテレビでそれを告白したのである。その直後、彼はパキスタン当局によって自宅軟禁され、外国の調査機関やメディアとの接触さえも禁じられた。しかし、スパイ、闇市、機密情報の漏えい、などの汚名を着せられながらも、A. Q. カーン博士はパキスタンの英雄であり続けた。

#### V. 結論

ここまでインド、パキスタンの核兵器開発の経緯を見てきたが、ここからおそらく次のようなことがいえるであろう。

第1に、核兵器開発の政治的動機の強さである。国家の存亡にかかわる重大な国益が絡んできたとき、その国

はいかなる犠牲を払ってでも核兵器の開発を行うことがある。発展途上にあり、経済的に貧窮している国でも例外ではない。否、むしろ通常兵器で仮想敵国に抵抗できないと知った時、国家は最後の手段として核兵器取得を目指すことがあるわけである。

以上の点と関連して、第2に、こういった決死の覚悟を持った国の核開発を思いとどまらせるには、NPTやNSGによる規制だけでは十分ではない、という点を指摘せねばならない。NPTやNSGは、大多数の国の核開発を断念させる効力を持つ一方で、これらの条項を盾にどれほどの圧力をかけても、国の存亡のために核兵器が不可欠だと考える国を思いとどまらせることはできなかったということである。

第3に、外国の援助である。核兵器を独力で開発できる能力を持つ国は限られている。多くの場合は外国からの援助があって初めて可能となる。しかも、歴史的には、その援助にはP5が加担していることさえあったのである。この流れを完全に止めれば、核開発を完全に食い止めることができないまでも、少なくとも核開発にははる

かに多くの時間と労力を必要とすることになる。

したがって、核拡散を防止するためには、政治的意思を翻させるような環境を創造せねばならないということになる。核兵器の廃絶を真に願うのであれば、NPT体制による核拡散の防止を継続、強化するとともに、核兵器開発のインセンティブを抑える力を助長し、核兵器保有が無意味なばかりか、核兵器保有国を含めたすべての国にとって安全保障上マイナスになるという事実を作らねばならない。また、核軍縮なしに核拡散を防止することにも無理があることを我々は改めて認識すべきであろう。

#### 著者紹介

広瀬崇子(ひろせ・たかこ)



原子力委員会委員  
(専門分野/関心分野)国際関係論/特にインド、パキスタン政治外交

## From Editors 編集委員会からのお知らせ

○学会誌記事執筆者のための

テンプレートを用意しました

執筆要領と合わせてご利用下さい



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

○「投稿の手引」「和文論文テンプレート」を改定しました。

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

—最近の編集委員会の話題より—

(9月3日 第3回編集幹事会)

#### 【学会誌関係】

- ・学会誌記事の著作権については、執筆依頼書に「掲載された記事の著作権は本会に帰属する」ことを明示し、学会誌編集規程と関連するホームページを変更する。
- ・執筆者の所属、氏名の記載方法や企画・投稿記事の種別と内容等の見直しを実施した。

- ・執筆者より、記事提案書とともに原稿が送られてくる場合があるが、執筆に関する手順、要領が守られていないものが多い。今後は記事提案書のみを審議し、了承されたものについて執筆依頼書を送付する。その手順に従って作成された原稿を受理することにした。
- ・10月号より3月号まで、原子力発電所の現場写真を表紙に採用する。

#### 【論文誌関係】

- ・審査が遅滞している論文について、早く進むように手配することとした。
- ・担当編集委員に何らかの事情が有る場合は、分野別責任者がカバーすることとした。
- ・査読遅滞の場合の編集委員の判断基準を明確にすることとした。
- ・編集幹事会の継続的な体制作りに関して意見交換した。継続して検討をしていく。

編集委員会連絡先 [hensyu@aesj.or.jp](mailto:hensyu@aesj.or.jp)

## 解説

## 核融合炉関連核データの現状と将来展望

## フェムトスケールの物理が支える核融合炉開発

日本原子力学会 核データ部会

国際熱核融合実験炉 (ITER) の建設がフランスで開始され、これにあわせて、材料照射実験を行うための国際核融合炉材料照射試験装置 (IFMIF) の設計が本格化する。これらの活動を支える核融合炉用核データの重要性がいま高まっており、国際原子力機関 (IAEA) では核融合炉用評価核データライブラリーの新版である FENDL-3 の評価プロジェクトがスタートした。核融合施設の設計を支える核データとはどのようなものか、その役割と現状、今後の課題などについて最新の結果を交えながら紹介する。

## I. はじめに

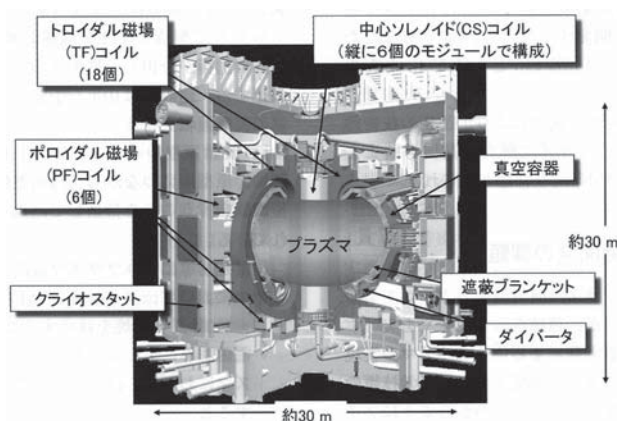
核融合炉研究は最近、大きな一歩を踏み出した。フランスにおける国際熱核融合実験炉 (ITER)<sup>1)</sup> の建設の開始である。日本では、日欧協力として「幅広いアプローチ活動」<sup>2)</sup> が開始された。これに合わせ、材料照射実験を行う国際核融合炉材料照射試験装置 (IFMIF)<sup>3)</sup> の設計も本格化し始めた。第 1 図に ITER の模式図を示す。

第 1 世代の核融合炉では、重水素  $d$  と三重水素 (トリチウム)  $t$  の核融合反応 (DT 反応) :  $d + t \rightarrow n$  (14.1 MeV) +  $\alpha$  (3.5 MeV) を用いる。 $\alpha$  粒子のエネルギーはプラズマを加熱して核融合反応を持続させるのに費やされるので、中性子のエネルギーを回収して発電し、天然には存在しないトリチウム燃料を中性子核反応によって

生産する必要がある。核融合炉の大きな問題である材料損傷も中性子によって引き起こされる。したがって、核融合炉の実現には、中性子と炉構成核種とのフェムトスケール ( $10^{-15}$  cm) での相互作用 (核反応) をよく知り、エネルギー生産、トリチウム生成等のバランスのとれた設計を実現することが鍵となる。

中性子の核反応率は中性子束、核反応断面積 (中性子と炉構成核種の核反応が起こる確率を表す物理量)、原子数の積で与えられる。中性子束分布は、核融合反応で発生した 14 MeV 中性子が炉構成材と衝突し、エネルギーを失うことによって形成されるので、中性子束を求めるためにも中性子の核反応断面積データが不可欠である。この中性子などの粒子の核反応断面積データを集大成したものが核データライブラリーと呼ばれるものであり、核反応断面積のほか、放出 2 次粒子のエネルギー分布や角度分布なども含む包括的なデータベースである。中性子入射に対する核データは核分裂炉でも不可欠で、原子力開発の初期から用いられてきた。核データライブラリーはエネルギー戦略や安全保障とも絡むため、米国、旧ソ連、ヨーロッパ、日本等で独自にその開発が行われている。日本の核データライブラリーは JENDL (Japanese Evaluated Nuclear Data Library) シリーズとして知られており、現在は JENDL-3.3 が使用可能で、核融合炉関連核データについても最も高い精度を備えている。

核融合炉設計では、中性子束をモンテカルロ法や輸送計算コードで求める。近年は計算機の発達によって計算精度が著しく向上したため、結果の不確かさは核データの誤差によって支配される場合が多くなっている。そのため、ITER の核設計に供すべく、国際原子力機関 (IAEA) において核融合炉用核データライブラリーの新版である FENDL-3 の開発プロジェクトがスタートし



第 1 図 ITER 模式図

*Present Status and Future Prospects of Fusion Reactor Related Nuclear Data—Fusion Reactor Development Supported by Femto-scale Physics*: Nuclear Data Division, Atomic Energy Society of Japan.

(2009年 7月30日 受理)

た。

核データは以上の通り縁の下の力持ち的な存在ではあるが、核融合炉開発に欠くことのできないものである。本稿では核融合炉用核データとはどういうものか。その特徴と含まれるデータ(Ⅱ章)、その基礎となる実験と理論計算、ライブラリーの開発過程、今後の課題と展望(Ⅲ章)を最新の成果を交えながら解説する。より詳細については、文献<sup>1-7)</sup>を参照されたい。

## Ⅱ. 核融合炉と核データ

### 1. 核融合炉開発の課題

核分裂炉の場合、核分裂エネルギーのほとんどが核分裂片を通じて燃料棒に与えられるので、燃料棒の冷却を通じてエネルギーを効率よく回収することができる。一方、電荷を持たない中性子は散乱や核反応を通じてしか物質にエネルギーを与えないため、そのエネルギー付与(核発熱という)の密度は核分裂片の場合と比べて非常に低い。したがって、核融合炉のエネルギー回収には中性子と炉構成材の相互作用を熟慮し、よりの確な設計を行うことが必要となる。また、トリチウムの生成はブランケットにリチウムを配置し、 ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$  および  ${}^7\text{Li}(n, n't)\alpha$  反応によって行うが、消費量以上に生成(増殖)するためには、Be、Pbなどを用いて中性子を増倍する必要があることが判明しており、それらの適切な組成、配置が必要となる。

核融合炉において中性子による材料損傷が大きな問題となるのは、中性子エネルギーが14 MeV と高いため、構成材料中で原子の弾き出しと水素やヘリウムなどのガスを生成する確率が高くなるためである。そのため、超伝導電磁石やコイル、真空容器壁、制御機器等を中性子による損傷から保護するための遮蔽が不可欠となる。それには、これらの機器に対して、いかに効果的に中性子のエネルギーを下げ(減速し)、かつ中性子束を減らすかが鍵となる。

### 2. 核データライブラリー

核分裂炉でも同様であるが、発生した中性子は炉内で散乱と減速を受け、最終的に $(n, \gamma)$ 反応や $(n, \alpha)$ 反応、核分裂反応等で消滅するか、炉外に漏れるかして生涯を終える。その間、炉構成材核種と相互作用しエネルギー付与を行うので、中性子の位置・エネルギー・方向を追跡することが必要である。そのため、核データライブラリーは、関与するエネルギー範囲および核種に対して関係する核反応のすべてを網羅し、汎用的なフォーマットにデータを格納することが必要となる。しかし、その作成を実験データだけで行うことは不可能である。必要な実験データが存在するとは限らないし、あっても正しいかどうか自明ではないからである。そのため、実験データと理論計算を基に正しい値を推定し、データの存在し

ない場合にはデータを補完することが必要となる。これを「核データ評価」という。評価された値はデータベース化され利用者に提供されるが、その核データライブラリーを用いることで炉の特性などを正しく予測できることが重要である。これは核データの品質保証にあたるが、組成や形状が明確で単純な臨界体系や核融合炉材体系について実験と計算を行い、比較することによって、精度検証、すなわちベンチマークを行う。

核融合炉用核データはいくつかの点で核分裂炉用核データと異なる。1つは中性子のエネルギーの違いであり、核分裂炉では5 MeV程度がほぼ上限であるのに対して、核融合炉では14 MeV中性子が支配的であり、IFMIFでは40 MeVの重陽子dとLiの反応により発生する中性子を用いるので50 MeV近傍まで必要となる。このため、弾き出し反応、 $(n, p)$ 、 $(n, \alpha)$ 反応などガスを生成し核変換を起こす反応や放射性核種を生じる反応(放射化反応)が起こりやすく、損傷試験にはその評価精度が重要となる。核融合炉では放射化に伴う崩壊熱が大きいいため、受動的安全性の確保と廃棄物管理の観点から放射化断面積も格段に重要となる。加えて、 ${}^6,7\text{Li}$ 、Be、Cなどの軽核に関するデータの役割が大きい点も核融合炉の場合の特徴である。さらに、中性子エネルギーが高いために、散乱や核反応による粒子の生成率やエネルギー分布が角度に強く依存するようになり、これをきちんと考慮することが必要となる。このような角度依存エネルギー分布をエネルギー・角度二重微分断面積(DDX)と呼ぶ。DDXは核分裂炉でも有用であり、幅広く用いられている。

このように核融合炉で特に重要な核データは、核分裂炉用核データではカバーされないものであり、それらの核データを重点的に開発・整備することが求められる。その内容を次に述べる。

### 3. 核融合炉設計の現状と核データの課題

ITER建設が本格的に開始された現在、核融合炉設計はITERを利用した工学研究(ブランケットやトリチウムなど)も、より具体的な段階に入りつつある。また、IFMIFの工学設計・工学実証活動が青森県六ヶ所村で開始され、核融合炉開発は新たな段階を迎え、核データに関しても新たな要求がでてきている。

#### (1) 遮蔽設計および核特性解析用核データ

核融合炉は、第1図に示すように、中性子源であるプラズマを囲むブランケット、真空容器、ダイバータ、超伝導マグネット、加熱機器、計測機器等の構造物で構成されている。上述のように、中性子照射に敏感な超伝導材や有機系・無機系の電気絶縁材等も含まれているため、核融合炉の設計においては機器遮蔽が主要課題になっている。特に超伝導コイルは核融合炉建設費の主要部分を占めるため、できるだけコンパクトにすることが

望まれている。したがって、プラズマと超伝導コイルの間の遮蔽厚さを可能な限り薄くするため、その遮蔽設計に使用する核データには高い精度が要求される。現在の20 MeVまでの汎用核データライブラリーはDDXを備えており、核融合炉の遮蔽設計等に十分使用できるが、更なる精度の向上と検証が課題である。

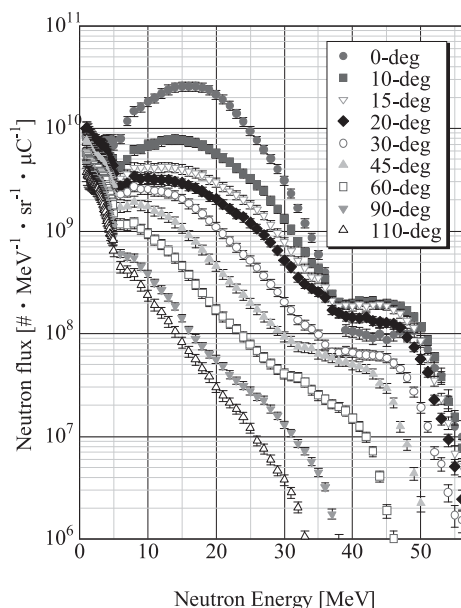
また、第一壁、ブランケット等の真空容器内機器を遠隔で交換することが予定されており、照射損傷を受けた部材の再溶接性等が課題となる。そのため、それらの材料について精度の高い照射効果評価が必要であり、弾き出し損傷の評価と核発熱を求めるKERMA(Kinetic Energy Released in Matter)係数や、水素とヘリウムの生成断面積にも高い精度が要求されている。

## (2) ブランケット設計用核データ

ブランケットは中性子エネルギーを熱として回収し、トリチウム燃料を増殖する。核融合炉では、トリチウム増殖比(Tritium Breeding Ratio:TBR)は、DT反応によって生成された中性子が、その反応で消費されたトリチウムをどの程度生成できるかを表す量であり、 $TBR > 1$ でなければならない。TBRの予測値は、ブランケットが真空容器全体を覆う場合で1.35程度であるが、ダイバータや加熱ポート、ブランケット間ギャップ等での中性子損失を考慮すると1.0~1.1に低下し、3桁目(0.01の桁)の攻防になっている。したがって、計算体系のモデル化と使用する核データの精度が重要となり、さらに誤差評価や感度解析のために、共分散ファイルも重要になると考えられる。

## (3) IFMIF用核データ

IFMIFでは、40 MeV、125 mAの重陽子ビーム2本を液体Liターゲットに照射し、 ${}^7\text{Li}(d,n)$ 反応で中性子を発生させる。発生する中性子のエネルギースペクトルは第2図(0-deg)のように、14 MeV付近にピークを持



第2図  $\text{Li}(d,n)$ 反応中性子スペクトル<sup>8)</sup>

つが55 MeV付近までテールを引き、核融合炉におけるものとは大幅に異なる。そのため、IFMIFと核融合炉における照射効果の対応づけを行うために、①中性子源スペクトルの確定、②そのスペクトル下でのヘリウム・水素の生成、弾き出し断面積(DPA: Displacements Per Atom)の評価、③放射化量の推定、が必要となる。

また、IFMIFでは、重陽子ビームによって加速器構成材料が放射化され、メンテナンス作業が制限されるために稼働率が低下するおそれがあり、重陽子に対する低放射化材料の選択と放射化の評価も重要な課題である。Fe, Ni, Cr, Mn, Au等のIFMIF加速器構成材料の放射化についての実験と計算法の開発が行われている。

## (4) プラズマ診断用核データ

ITERでは核融合反応生成粒子、特に高速 $\alpha$ 粒子のプラズマ中での挙動(密度、速度分布等)を調べるために、プラズマ中の燃料イオン( $d$ または $t$ )や不純物イオンとの核反応で生成する $\gamma$ 線を測定することが計画されており、 ${}^9\text{Be}(\alpha,n){}^{12}\text{C}$ 、 ${}^9\text{Be}(p,\alpha){}^6\text{Li}$ 、 ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ 反応などの正確な断面積や、 $\gamma$ 線放出比等が必要とされている。現在、ある程度のデータは揃っているが、データベース化と精度の検証は今後の課題である。

## III. 核融合炉核データ整備の現状と展望

### 1. 核融合炉核データに関する実験

#### (1) 必要なデータ

実験データは、核データ評価の基礎として重要である。ここでは、核融合炉用実験データを、(a)中性子生成二重微分断面積(DDX)、(b)荷電粒子生成断面積、(c) $\gamma$ 線生成断面積、(d)放射化断面積、(e)IFMIF用データ、に大別し、現状を概観する。II章で述べたように、(b)、(c)も強い角度依存性を持つため、DDXで与える必要がある。また、上述のようにIFMIFの場合は、 ${}^7\text{Li}(d,n)$ 中性子源のスペクトルと55 MeVにわたる(a)~(d)のデータが必要となる。

#### (2) 実験手法とデータの現状

(a)、(b)、(c)それぞれは、測定試料に中性子を入射させ、発生する中性子、荷電粒子、 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを角度の関数として測定することによって求められる。(d)では放射能を求める。(a)中性子生成の場合、エネルギーの測定にTOF(Time of Flight)法を用い、広い2次中性子エネルギー範囲を高いエネルギー分解能で測定することでデータを得る。(b)荷電粒子生成の場合は、試料を薄くする必要があるので、試料以外からのバックグラウンドを抑え、粒子を効率よく検出するための工夫が重要となる。一部、放射化法の利用が可能な場合がある。バックグラウンドの抑制の重要性は、(c) $\gamma$ 線生成の場合も同様である。

II章で述べたように、核融合炉の場合、5~14 MeV領域が主な守備範囲であるが、8~13 MeVの領域は単

色中性子源が存在しないためデータが格段に少ない領域(ギャップ領域)で、重点的な取組みが必要である。近年、LANL(Los Alamos National Laboratory)やCERN(European Organization for Nuclear Research)で連続スペクトルを有する強力な核破碎中性子源を用いた実験が活発に行われ、(b)、(c)に関してはかなり状況が改善されてきたが、未だ十分とはいえない。したがって、ギャップ領域では、(a)~(d)いずれもデータが乏しく、データの不確かさも明確ではなく、今後、努力を傾注する必要がある。

また、ITER等の大強度中性子束環境下では、 $Fe(n, p)$ で生じた陽子が $^{56}Fe(p, n)^{56}Co$ 反応で $^{56}Co$ を生成する場合や、中性子反応によって生成した核がさらに中性子反応を起こす場合など、いわゆるカスケード反応も重要となり、今後の新しい課題である。また、反跳原子スペクトルデータも損傷評価に必要であるが、直接測定は極めて困難なためほとんど例がなく、今後に期待したい。

(e)IFMIF関連データについては、上述のように、①中性子源スペクトル、②55 MeV程度までのヘリウム・水素の生成、反跳原子スペクトル、③放射化量の推定、が必要となる。①中性子源スペクトルについては、近年の系統的な測定によってスペクトルと角度依存性が明らかになり(第2図参照)、半実験的および理論的な解析が進められている。②、③に関しては近年、主要核種についての実験が行われ、ある程度データは揃ってきたが、まだまだ不十分であり、今後の努力に負うところが大きい。計算コードも加速器駆動システム(ADS)等との関連で整備されてきたが、未だ計算の不確かさは大きい。入射重陽子ビームによる放射化に関しては、エネルギー依存の断面積データが得られている。

核融合炉用核データの測定において、日本のグループが、中性子DDX、放射化、中性子源スペクトル、核融合ベンチマーク実験等で世界をリードする成果を上げ、それを基礎としたJENDLがベンチマーク解析等で高い評価を得てきたことはよく知られている。

### (3) 今後の課題

今後、実験データがないか実験が困難な種類のデータに意識的に取り組む必要がある。8~13 MeVのギャップ領域や、IFMIFに必要な20 MeV以上の領域がそうである。また、ITERなど実機レベルにおいて問題となるカスケード反応や核変換など新たな課題もある。

今後は、測定の困難な対象が多く、理論計算を中心にデータベースの確立を進めることになると考えられるが、実験には理論との連携を強め、典型的な条件下での信頼性の高い実験データを取得し、計算モデルの改善に供する役割が期待される。

## 2. 核データ評価とファイル化

II-3(2)項で述べたように、実験データが不足してい

るエネルギー領域や実験が不可能な不安定核などに対する断面積の予測のために、核データ評価では理論計算が重要な役割を担っている。DT反応で生じた中性子(14 MeV)は、核分裂中性子(平均約2 MeV)に比べてエネルギーが高いために、核反応機構がより複雑になる。数MeVまでの中性子反応では、核表面での反応である直接過程と入射中性子を吸収した原子核が熱平衡状態(複合核状態)になってそこから粒子が放出される複合核過程が支配的であるが、十数MeV以上になると、原子核が熱平衡状態になる前に粒子放出が起こる前平衡過程の影響も現れてくる。関与する核反応機構や理論については、核データ連載講座第2回<sup>9)</sup>に入門的解説があるので参考にして頂きたい。これまで核反応理論モデルに基づいて開発された各種計算コードが核データ評価に使用されてきた。一般に、理論モデルはいくつかのパラメータ(例えば、中性子と原子核の相互作用を表す光学モデルパラメータ)を含んでいる。既存の実験データを良好に再現するようにパラメータ値が決定され、それらの入射エネルギーや標的核の質量数の依存性が適当な関数形を仮定した最小二乗法によって導出されると、実験データのない領域の断面積を理論計算によって補完することができる。

こうした一連の核データ評価作業を経て、完成した国産の汎用核データライブラリーがJENDLである。この最新版はJENDL-3.3(2002年公開)である。337核種に対し、入射中性子エネルギー20 MeVまでの断面積データが格納されている。核融合炉設計に必要とされる中性子断面積データはすべて網羅されており、原子力機構・核データ評価研究グループのホームページ([http://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/Jendl\\_J.html](http://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/Jendl_J.html))から入手可能である。現在、JENDL-3.3の更新に向けた評価・ファイル化作業が原子力機構で進行中であり、2009年度末にJENDL-4が完成する予定である。なお、JENDLデータに基づいて、照射損傷評価に必要な反跳原子スペクトルやKERMA係数のデータベースの整備も進められている。

一方、IAEAが中心になってITER開発のために国際協力の枠組みを使って整備した核データライブラリーとして、FENDL(Fusion Evaluated Nuclear Data Library)がある。これは、独自の断面積評価作業を行わず、日本、米国、欧州、ロシアの既存の汎用核データライブラリー(JENDL, ENDF/B, JEFF, BROND)から最適な断面積データを核種ごとに選択し、編さんしたデータベースである。最新版はFENDL-2.1(2004年公開)(<http://www.nds.ipen.br/fendl21/>)で、71核種に対して20 MeVまでの中性子データから構成され、JENDLからは25核種のデータが採用されている。

FENDLに関しては最近、大きな動きがあった。IFMIFやITER以降の次世代DEMO炉までを適用対象とする

ために、FENDL-2.1の更新に向けた国際研究協力プロジェクト(2008~2010年)が組織された。その成果はFENDL-3 (<http://www.nds.iaea.org/fendl3/>)として2011年に公開予定である。FENDL-3では、IFMIF設計からの要求に応じるために、入射粒子のエネルギー範囲が150 MeVまで拡張され、陽子・重陽子反応データも含まれる。また、設計における誤差評価のために共分散ファイルの作成も計画されている。入射エネルギーの拡張に伴い、20 MeV以上の高エネルギー核データファイルの断面積データを収録する予定である。中性子用FENDL-3に格納予定の核種(88核種)の一覧を第1表に示す。国内では、すでにJENDL高エネルギーファイル(JENDL/HE)の核データ評価作業が進んでおり、2007年に最新版JENDL/HE-2007(106核種に対する3 GeVまでの中性子・陽子核データ)が公開された。FENDL-3の35核種+10核種(20 MeV以上のデータのみ)がJENDL/HE-2007から採用される見通しであり、日本からの貢献が大いに期待されている。

II-3(2)項で述べたように、核融合炉では、Li, Be等の軽核と中性子との相互作用に関する知見が重要となる。これらはAlやFe等の中重核領域の核に比べて、非常に個性の強い原子核で、核子の集団からなるクラスター構造(例えば、 ${}^7\text{Li}$ は3重陽子と $\alpha$ 粒子で構成)を取ることが知られている。その結果、中性子入射により標的核が分解され、終状態が3体以上になる多体反応(例： ${}^7\text{Li}+n\rightarrow n+t+\alpha$ )が非常に起こりやすいという特徴があるため、中重核領域で確立された断面積計算手法

第1表 FENDL-3に採用予定の核データライブラリー一覧  
(なお、括弧内の10核種は、20 MeV以上のデータがないためにJENDL/HE-2007が採用される予定)

核データライブラリー	核種数	核種リスト
JENDL/HE-2007 (日本)	35	${}^{12}\text{C}$ , ${}^{14}\text{N}$ , ${}^{23}\text{Na}$ , ${}^{24,25,26}\text{Mg}$ , ${}^{40,42,43,44,46,48}\text{Ca}$ , ${}^{46,47,48,49,50}\text{Ti}$ , ${}^{51}\text{V}$ , ${}^{55}\text{Mn}$ , ${}^{69,71}\text{Ga}$ , ${}^{90,91,92,94,96}\text{Zr}$ , ${}^{93}\text{Nb}$ , ${}^{92,94,95,96,97,98,100}\text{Mo}$ , ${}^{181}\text{Ta}$
ENDF/B-VII.0 (米国)	47	${}^{1,2,3}\text{H}$ , ${}^{3,4}\text{He}$ , ${}^{6,7}\text{Li}$ , ${}^9\text{Be}$ , ${}^{10,11}\text{B}$ , ${}^{16}\text{O}$ , ${}^{28,29,30}\text{Si}$ , ${}^{31}\text{P}$ , ${}^{32,33,34,36}\text{S}$ , ${}^{40}\text{K}$ , ${}^{50,52,53,54}\text{Cr}$ , ${}^{54,57}\text{Fe}$ , ${}^{60,61,62,64}\text{Ni}$ , ${}^{63,65}\text{Cu}$ , ${}^{182,183,184,186}\text{W}$ , ${}^{206,207,208}\text{Pb}$ , ${}^{209}\text{Bi}$ , ${}^{19}\text{F}$ , ${}^{35,37}\text{Cl}$ , ${}^{39,41}\text{K}$ , ${}^{58}\text{Fe}$ , ${}^{59}\text{Co}$ , ${}^{197}\text{Au}$
JEFF-3.1(欧州)	4	${}^{27}\text{Al}$ , ${}^{56}\text{Fe}$ , ${}^{(58,60)\text{Ni}}$
BROND-2(ロシア)	2	${}^{15}\text{N}$ , ${}^{\text{nat}}\text{Sn}$

をそのまま適用することには限界がある。さらに、IFMIF関連では、従来の中性子や陽子核データに加えて重陽子核データが必要となる。重陽子が核力やクーロン場で陽子と中性子に容易に分解されるため、従来の中性子・陽子反応用計算コードでは対応できず、重陽子分解を厳密に考慮した理論計算が必要となる。これら2つの課題については、国内の核理論コミュニティとの連携を深めつつ、独自の計算手法の開発に向けた研究が始まっている。

#### IV. おわりに

以上、核融合炉開発のための核データの現状を概観した。ITERの建設を機に、核融合炉設計とIFMIFの建設に向け、FENDL-3を整備するという新たなプロジェクトがスタートした。日本では、核融合炉用核データ分野において、世界をリードする成果を基に、質の高い国産核データライブラリーJENDLが整備されてきている。

FENDL-3では、IFMIFのために150 MeVまでの拡張が計画されているが、日本ではすでに高エネルギー核データへの取組みも進んでおり、FENDL-3において日本の大きな貢献が期待されている。FENDL-3の評価では、これまで評価精度が不十分であったデータがクローズアップされることになり、それらは、いわば取り残された「難物」といえる。それらを対象とすることはしかし、見方を変えればチャレンジングな研究ともいえ、核融合炉コミュニティとの情報交換を密にし取り組むべき新たな課題と考える。

FENDL-3や核融合炉核データに関してのご意見、ご要望は、[tokai-ndc-faq@jaea.go.jp](mailto:tokai-ndc-faq@jaea.go.jp)までお寄せ頂ければ幸いです。

(執筆担当：日本原子力研究開発機構・西谷健夫(非部会員)、東北大学・馬場 護、九州大学・渡辺幸信、大阪大学・村田 勲)

#### — 参考資料 —

- 1) <http://www.iter.org/default.aspx>
- 2) <http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/index.html>
- 3) <http://www.frascati.enea.it/ifmif/>
- 4) <http://www.ndc.jaea.go.jp/JNDC/ND-news/No93.html>
- 5) 吉田 正, 他, 日本原子力学会誌, **43**[5-7], (2001).
- 6) 村田 勲, 他, 日本原子力学会誌, **50**[9], 574(2008).
- 7) 馬場 護, 日本原子力学会誌, **50**[10], 635(2008).
- 8) M. Hagiwara, *et al.*, *Fusion Sci. Eng.*, **48**, 1320(2005).
- 9) 福島昌宏, 他, 日本原子力学会誌, **43**[6], 565(2001).

# 原子力施設の安全性および信頼に関わる課題と技術マップの構築

(株)社会安全研究所 首藤 由紀,

(独)原子力安全基盤機構 牧野 眞臣, 滝田 雅美

原子力施設の安全性を確保し、国民・地域住民の信頼を獲得するためには、人的・組織的要因への対策など、いわゆるソフト面の対策が重要である。このため、これらソフト面の課題とその解決のために必要な知見・研究テーマを整理した「技術マップ」を構築し、その上で、各研究テーマについて「近年どのような研究成果があり、誰に聞けばいいのか」がわかるよう、関連する研究と研究者・研究機関をまとめた「人材マップ」を作成した。

## I. はじめに

原子力発電所をはじめとする原子力施設の安全性を確保し、国民や地域住民の信頼を得るためには、施設・設備などハード面の健全性を中心とした安全対策だけでなく、運営管理などの人的要因にも目を配る、いわゆるソフト面の安全対策が重要である。これまでも、こうしたソフト面での安全確保に関して、数多くの研究開発が行われ、また規制制度の見直しをはじめとする安全対策が推進されてきた。

しかし、それにもかかわらず、人的要因・組織的要因に起因するトラブルや不祥事は、決して低減しているとはいえない状況にある。たとえば、高速増殖炉「もんじゅ」の2次系ナトリウム漏えい事故、東海村の臨界事故、事業者による自主点検記録の改変、関西電力美浜3号機における2次系配管破損事故、北陸電力志賀1号機で発覚した過去の臨界事故など、安全文化や組織管理などの問題が要因となって、原子力全体の安全性、信頼性が問われることが続いている。

一方、こうしたソフト面の安全対策に関わる研究領域は、ヒューマンファクター、品質マネジメント、社会技術などに多岐にわたって細分化されており、領域相互間の情報共有は必ずしも十分とはいえない。また現状では、原子力施設の安全性確保・信頼獲得に際して、特にソフト面で抱えている課題にどのようなものがあるかについても、その全容が十分に整理されているわけではない。

したがって、これらの研究領域で得られている成果を

*Issues and Technology Mapping Related to Safety and Trust for Nuclear Facilities*: Yuki SHUTO, Maomi MAKINO, Masami TAKITA.

(2009年 8月3日 受理)

原子力施設の安全性確保・信頼獲得に活用し、また今後さらに研究開発を推進していくべきテーマを特定するためには、まず現状の原子力施設が抱える課題の全体像をとらえ、これと既往研究・知見との関係を整理することが必要である。

こうした観点から、原子力施設の安全性確保・信頼獲得に関わるソフト面の安全対策技術(安全マネジメント技術)の現状の課題を抽出・整理するとともに、主にヒューマンファクター、品質マネジメント、社会技術の3つの研究領域を中心に既往研究・知見の収集・整理を行い、産官学に関連する課題を網羅した「技術マップ」と、その課題を研究できる研究者等を示す「人材マップ」として取りまとめた。本稿では、その成果について概要を紹介する。

## II. 検討方法・体制

原子力施設の安全性確保・信頼獲得のために、現状で問題となっており解決の必要な事項(研究ニーズ)と、既往研究などにおいて知見が蓄積されている事項(研究シーズ)などを把握するため、以下のような情報収集・分析を行った。

### (1) 研究ニーズに関する調査

- 規制側(原子力保安検査官等)に対する意見聴取
- 事業者側(電力会社品質・安全担当者等)に対する意見聴取
- その他有識者に対する意見聴取
- 原子力施設で発生した近年の事故・トラブル事例分析

### (2) 研究シーズに関する調査

- 近年(1998~2008年)の関連学協会誌における文献調査
- 関連学会(日本原子力学会ヒューマン・マシン・シ



ステム部会)有識者に対するアンケート調査

- 文献データベース(国立情報学研究所論文情報ナビゲータ, 国立国会図書館蔵書検索システム)を用いた文献調査

これらの検討に当たっては、ヒューマンファクター、品質マネジメント、社会技術の3研究領域における有識者等で構成する「原子力安全マネジメント技術検討会」を設置するとともに、その下に、領域横断的に主に課題等の検討を行う「原子力安全マネジメント技術検討幹事会」と、研究領域ごとに検討する「分科会」を設置した。また、学会等が主体となって開催されている「原子力の安全管理と社会環境ワークショップ」において経過報告を行い、そこでの議論を反映した。

### Ⅲ. 成果の概要

#### 1. トップダウンによる課題の整理

原子力施設の安全性確保と信頼獲得に向けて、どのような課題が存在するかについては、「原子力発電施設の安全性を確保する」「原子力発電に対する国民の信頼を獲得する」「原子力施設の存在を地域住民が納得する」という3つの目標を設定し、その目標実現のために必要な要素にブレークダウンしていくというトップダウン方式の検討を行った(第1図)。

##### (1) 原子力発電施設の安全性を確保する

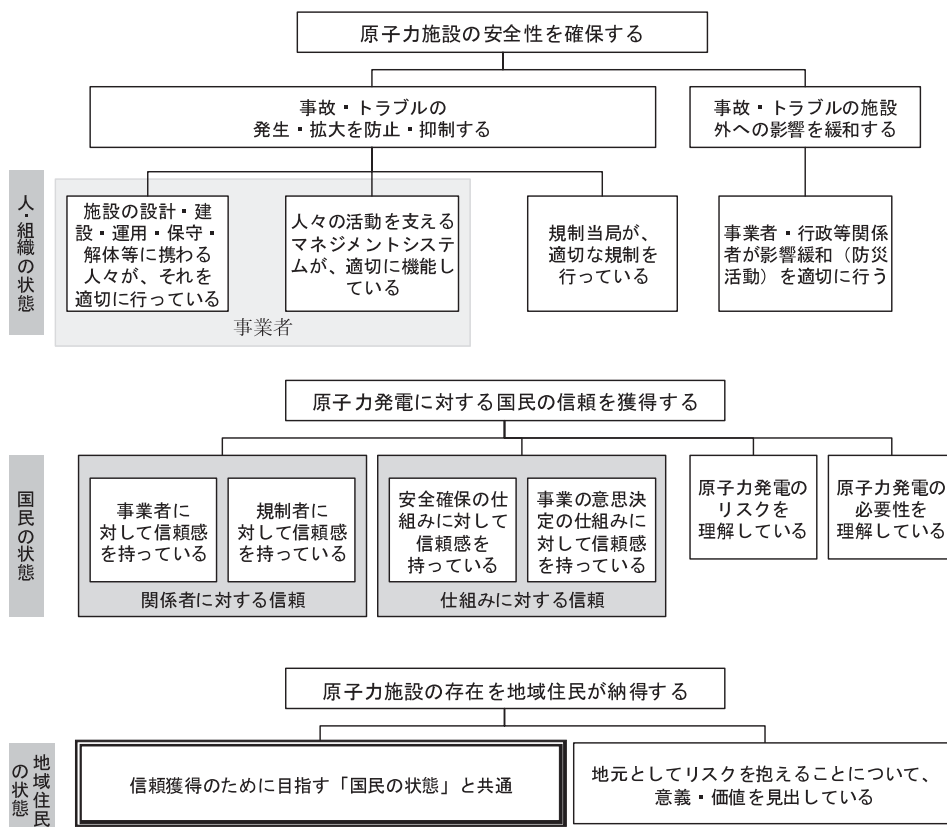
原子力施設の安全性を確保する上では、事故・トラブ

ルの発生・拡大を防止・抑制するとともに、万が一、事故・トラブルが発生した場合に施設外への影響を可能な限り緩和することが必要となる。このため、目標をさらにこの2つにブレークダウンした上で、これを達成するために関係組織(事業者・規制者)およびそれを構成する人々に求められる状態(人・組織の状態)を検討した。

この結果、①施設の設計・建設・運用・保守・解体等に携わる人々が作業の現場で行っている対策・活動などの状態、②それらの活動を支える組織の仕組みとしてのマネジメントシステムのあり方、③規制当局による規制のあり方、④関係機関による防災活動のあり方、の4つの大分類の下、12中分類、24小分類に区分される人・組織の状態が整理された。一例として、大分類①に関する人・組織の状態を、第1表に示す。

##### (2) 原子力発電に対する国民の信頼を獲得する

原子力発電施設とその施設運用のあり方(これを総称して「原子力発電」と呼ぶ)に対する国民の信頼獲得については、まず、「国民が信頼する」ために必要な事項として、国民それぞれがどのような状態であるべきかを検討し、これを「国民の状態」とした。この結果、信頼獲得のために達成すべき国民の状態としては、事業者・規制者の技術的能力と誠実さを認識することで得られる「関係者に対する信頼感」と、仕組みの有効性、公正性などを認識することで得られる「仕組みに対する信頼感」、原子力発電のリスクと必要性に対する理解に整理された。こ



第1図 課題のトップダウン整理(全体概要)

第1表 原子力施設の安全性を確保するための人・組織の状態(一部抜粋)

大分類	中分類	小分類
施設の設計・建設・運用・保守・解体等に携わる人々が、それを適切に行っている (作業の現場における対策・活動)	人が、職務に応じた知識・技能を身につけている	職場において行うべき作業が明確になっている
		担当者が、作業に必要な知識・技能を身につけている
	作業が、人間特性に配慮したものとなっている	装置・設備・手順などが人間の特性に配慮したものとなっている
		作業環境・作業空間が人間の特性に配慮したものとなっている
	人々が適切に連携し、能力を発揮している	人々のコミュニケーションと役割分担が適切に行われている
		人々が互いに信頼感・一体感を持ち、良い人間関係を構築している
	問題の発見・改善が組織的・継続的に行なわれている	現場の問題(潜在リスクを含む)が特定されている
		特定された問題に対する改善が行われている
	人々が、働く意欲と安全意識を持ち、それが浸透している	人が、職務に対する意欲・誇り等を持っている
		人々に、安全を重要な価値と位置づける文化が根付いている

の国民の状態も、Ⅲ-1(1)項と同様に、さらに中分類・小分類に区分して整理されている。

次いで、このような国民の状態を導き出すために各主体の行うべき事項について、①事業者、②規制当局、③規制当局以外の行政全般(事業推進当局を含む)、④独立した第三者有識者等、⑤報道機関、⑥国民自身という6つの主体別に検討した。

### (3) 原子力施設の存在を地域住民が納得する

原子力施設の立地地域に居住する住民に対しては、単に信頼を獲得するだけでなく、身近にリスクを伴う施設が存在することへの納得を得ることが必要となる。このため、Ⅲ-1(2)項を前提に、さらに追加的な状態としての「地域住民の状態」を検討し、「地元としてリスクを抱えることについて意義・価値を見い出している」という状態を取り上げ、そのために各主体が行うべき事項についても検討した。この場合の主体は、Ⅲ-1(2)項の6主体に加え、地元行政(都道府県・市町村)、地域住民とした。

## 2. 必要な知見・研究の「技術マップ」

上記の結果を踏まえ、「人・組織の状態」の実現や、「各主体の行うべき事項」の適切な実践のために必要な研究・知見の検討を行った。たとえば、「中分類：人が、職務に応じた知識・技能を身につけている(小分類：職場において行うべき作業が明確になっている、担当者が作業に必要な知識・技能を身につけている)」に対応して必要な知見・研究は、第2表のように挙げられている。

こうした検討により、安全性確保と信頼獲得・納得のために必要な知見・研究は、19分野、25分類の計135テーマが抽出された。この検討結果を、整理された課題とともに全体を俯瞰的に一覧できるように示したものが、今回作成した「技術マップ」である。

第2表 必要な知見・研究(例)

A-1) 作業・業務の標準化
① 作業分析、作業設計
② 作業手順・マニュアルの策定・管理
③ 保全に関する計画業務の管理
A-2) 作業・業務に関する知識・技能の教育訓練
① 適性・エラー傾向の評価
② 作業・業務に関する知識・技能の同定と評価
③ 作業・業務に関する知識・技能の教育訓練・伝承の方法
④ 作業・業務に関する知識・技能の資格制度
A-3) トラブル・異常対応に関する知識・技能の教育訓練
① 緊急時対応に関する知識・技能とその訓練

## 3. 「研究テーマ別カルテ」と「人材マップ」の作成

### (1) 作成の手順

「必要な知見・研究テーマ」の抽出を受けて、以下の(a)~(d)に示す手順で、各テーマに対する研究のニーズとシーズの現状を示す「研究テーマ別カルテ」を作成した。この「研究テーマ別カルテ」に示す主要研究者・研究機関の総体を「人材マップ」と呼ぶ。

#### (a) 文献調査結果の対応づけ

文献調査などに基づく研究シーズ調査結果を各テーマと対応づけ、テーマ別に既往研究とそれに関わる研究者等(研究人材)の分類・整理を行った。

#### (b) 主要研究者・研究機関と主な研究内容の抽出

テーマごとに、当該テーマに関して特に有用・多様な研究実績(論文・著作等)がある研究者・研究機関を抽出し、主要研究者・研究機関として位置づけるとともに、その主な研究内容を整理した。この抽出は、上記(a)の結果を基に、以下の点を参考としつつ、各分科会における有識者の専門的判断により行ったものである。

- 当該テーマに関連して、比較的多くの発表論文等がある
- 当該テーマを総括・概括する著作(共著、部分執筆を含む)がある
- 当該テーマに関連して、特に原子力分野での実用に結びつく研究を行っている

#### (c) 関連キーワードの付与

各テーマの研究・知見について文献データベース等による検索を行う場合に、利用することが推奨されるキーワードを検討した。これにより、たとえば「国立情報学研究所論文情報ナビゲータ」や「国立国会図書館蔵書検索システム」などの文献データベースを検索して、今後の新たな知見・研究も入手・把握することが可能となる。

#### (d) 研究ニーズとシーズの現状に関する解説

上記の分類・整理結果に加え、事業者・規制者等の意見聴取などの研究ニーズ調査結果を反映させ、テーマごとにこれまでの研究・知見蓄積状況や、原子力施設の安全性確保と信頼獲得・納得のためにどのような研究ニーズがあるかを取りまとめ、解説として記載した。

### (2) 「人材マップ」のまとめ

#### (a) 「安全性確保」に関連したテーマの現状

安全性確保、特にヒューマンエラー防止対策に対する研究ニーズは全般的に高く、またこれまでに多くの研究成果・知見の蓄積があるテーマも少なくない。主な現状は、以下のとおりである。

- 「人を取り巻く環境における人間特性への配慮」に関連するテーマについては、基礎研究は比較的充実している。今後は、その知見を活かし、原子力産業への応用研究へ進めることが必要である。
- 「人々の連携」関連のテーマでは、特に運転チームに関わる知見・研究の蓄積があり、今後は保修など運転以外のチーム行動への発展が期待される。また、リーダーシップなど「ソフトスキル」のあり方、部門間・組織間のコミュニケーションと役割分担のあり方などについて、特に研究ニーズが大きい。
- 事故調査、原因分析(根本原因分析を含む)関連のテーマでは、「真の原因」究明と有効な対策立案のニーズが非常に大きい。このため、分析手法だけでなく、調査・分析等に必要な知識・能力、その教育・訓練法などに関する知見・研究が必要とされている。
- マネジメントシステムに関連するテーマでは、特にパフォーマンス尺度や管理指標の設定法、品質マネジメントシステム(QMS)評価法へのニーズが非常に大きい。これは、QMSが原子力施設の安全規制に導入されたことも一因と考えられる。
- 上記以外でも、特に品質マネジメント研究領域の知見全般(たとえばQMS運用、教育法などマネジメントシステム全般に関わる各テーマ)について、実

践例は多数あるがその体系的整理が不足している部分がある。また、他分野で得られている知見を原子力産業へ適用する方法論の研究が必要と考えられる。

- 「規制の範囲・仕組みの適切性」、「規制の能力・意欲」については、知見・研究蓄積はほとんど得られていない。ただし、近年、一部で「安全規制のあり方」についての議論が始められている。

なお、この取りまとめにより、研究一現場間に距離感があり、これまでの研究成果の活用や現場ニーズに応える新たな研究への展開が必ずしも進んでいないという課題があることも判明した。

#### (b) 「信頼獲得・納得」に関連したテーマの現状

リスクコミュニケーションのあり方検討・実践、社会的合意形成など、最近になって充実しつつある分野はあるが、それ以外のテーマに関しては、下記のとおり必ずしも知見・研究蓄積が十分に進んでいるとはいえない。

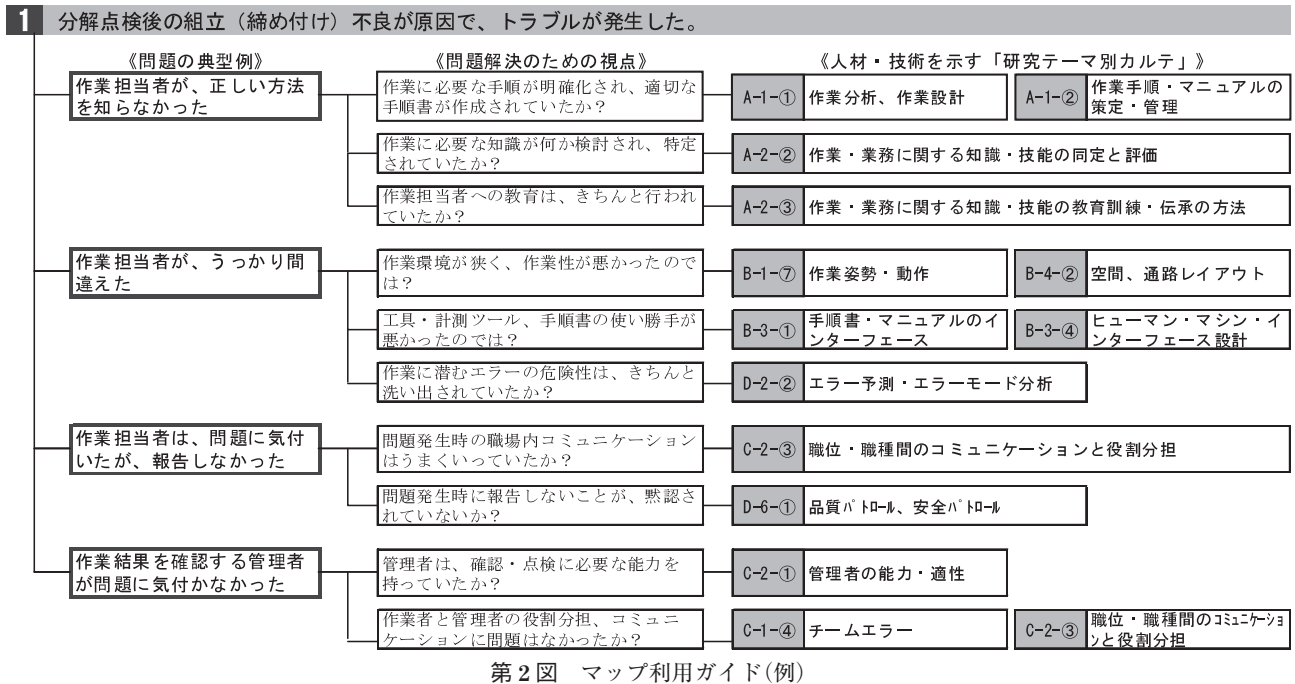
- ほとんど研究がないか、「基礎研究」が中心で実社会への応用に向けた知見・研究となっていない。
- 一部のテーマについては、他の研究領域における研究テーマとなり得る内容であるにもかかわらず、原子力(または電力)関係者による研究しか行われていない(例:「エネルギー問題に対する意識調査」など)。
- 「情報公開・情報提供と報道」に関わる研究ニーズとして、「技術用語、専門用語のわかりやすい表現方法」などが挙げられるが、これは必ずしも国民・地域住民の信頼獲得・納得に結びつくものとはいえず、そもそもこれらの目標を達成する上で必要な事項は何か明確となっていない実態が見受けられる。

### 4. 利用促進のための「マップ利用ガイド」

技術マップ、人材マップ(研究テーマ別カルテ)には、幅広く多くの情報が含まれている。これをどのように活用して必要な知見・研究や人材を導き出すかを検討し、具体的な活用例を示す「マップ利用ガイド」を作成した。

「マップ利用ガイド」は、実際に原子力の安全性確保や信頼獲得・納得などに関わる事業者・規制者など関係組織において比較的多く聞かれる「現場の悩み」をもとに検討し、その背後にあると想定される問題の典型例と、その問題を解決するために持つとよい視点(問題解決の視点)を示し、そこから参照すべき「研究テーマ別カルテ」へとつなげた(第2図)。

これをたどることで、実際にこうした「現場の悩み」を抱える現場の実務担当者が、既往の知見・研究や人材を見出す上での参考情報とすることができる。また研究者も、この「マップ利用ガイド」を参考として、新たな知見・研究の求められているテーマや、自らの研究テーマに関



連した実務現場での具体的な問題点・課題などを理解することが可能と考えられる。

#### IV. おわりに

本稿で紹介した調査検討の最終的な目的は、原子力施設における事故・不祥事を起こりにくくする「仕組み」を構築することにある。「技術マップ」および「人材マップ」は、まずこれに関わる課題と技術・人材を整理することで、今後の検討を進めるための基盤(インフラストラクチャー)を提供する。

これらは、必ずしも完成・完結したものではなく、今後のさらなる検討・議論を通じて、さらに進化・改良されていくべきものである。その意味で、この研究成果がより多くの視点からの議論を呼び起こし、原子力施設の安全性確保・信頼獲得に向けた検討を進める上で大きな役割を果たすことが望まれる。

#### — 参考資料 —

- 1) 平成20年度人間・組織等安全解析調査等に関する報告書 ヒューマンファクターを主体とした安全管理技術に関

する課題の抽出と整理—原子力施設の安全性確保と信頼獲得・納得に向けた課題と技術・人材マップ, 平成21年7月, 原子力安全基盤機構。

[http://www.jnes.go.jp/katsudou/2008\\_genshi.html](http://www.jnes.go.jp/katsudou/2008_genshi.html)

#### 著者紹介

首藤由紀(しゅとう・ゆき)

(株)社会安全研究所

(専門分野/関心分野)事故・災害時における人間の心理・行動, ヒューマンファクターズ

牧野真臣(まきの・まおみ)



(独)原子力安全基盤機構

(専門分野/関心分野)ヒューマンファクター, 安全文化, 根本原因分析, 計測制御

滝田雅美(たきた・まさみ)



(独)原子力安全基盤機構

(専門分野/関心分野)ヒューマンファクター, ヒューマン・マシン・インターフェース, 計測制御

## 講演

# 立地町の一住民としての思い

## —原子力発電所とともに歩む

### 「原子力総合シンポジウム2009」に参加して

高浜女性ネットワーク会長／  
関西原子力懇談会原子力広報 江上 博子  
女性アドバイザー代表

#### 住民にとっての安全や安心について

私たち住民が求める安心とは、

- ・この町に暮らして良かったと思えること
- ・末永くこの町で、子々孫々、心豊かな暮らしを営んでいけること
- ・原子力に対する不安や心配がないこと

つまり、オフサイトセンターが使われるような「事故が起こらないこと」である。このことが一番の安全・安心なのである。

高浜町は福井県の最南端に位置し、西は京都府、南は滋賀県に隣し、日本列島の真ん中に当たる。人口は11,200人の小さな町である。海岸線は若狭湾リアス式海岸で、その海岸線の内浦地区に、原子力発電所がある。昔から関西の奥座敷といわれ、浜辺は、それはそれは長い白砂と青松、名高い若狭富士を望む、風光明媚な町である。海や山の豊かな食材、電気の生産、それに人情味溢れるもてなしは自慢である。また、神社仏閣も多く、いろいろな伝説もあり、小京都といったところである。ぜひ一度お運びいただければうれしく思う。

東の方には、敦賀発電所・美浜発電所・大飯発電所があるが、どの町もみんな共通点がたくさんあり、お互いに交流を図っている。

#### 私と原子力発電所

当時、原子力発電所の誘致に一生懸命取り組んでおられた町長の信念ある姿をみて、町長選挙の応援に立ち上がったことが始まりであった。毎晩、1軒1軒、住民の家を説得に回っておられた町長の姿が印象的であった。

ところがそれからというもの、連日、原子力に反対する人たちによる怒りやののしりの電話や、吐き捨てるような言葉、行動に遭い、生きた心地のしない毎日で、人間不信に陥り、孤独であった。無知がゆえに、そのよう

*Expectations to the Stakeholder for the better Symbiosis:*  
Hiroko EGAMI

(2009年 7月15日 受理)

な心ない行動が生まれたのであろう、無理のないことと思っ

た。今、結果としては、町全体が豊かになり、だんだんと理解が進み、当時、反対攻撃をしていた人達も今は家族揃って原子力関係の仕事に携わっている、そういうご家庭がたくさん増えて

きた。この姿を見て、私はとってもうれしく思っている。原子力の誘致が町のためになると理解されたと感じるからである。今ではあのときの悲しく傷ついた心は消えてしまった。目的が達成できたと感じている。



#### 高浜町と原子力発電所

高浜町に原子力発電所が立地された経緯をお話しさせていただく。高浜町では過疎化が深刻な問題となってきた。昭和40年代に入り、電源立地による地域の発展を望み、原子力発電所の誘致検討が議会にて始まった。そうして昭和41年10月には発電所の誘致が議決され、用地買収や補償などについて協議が重ねられていた。昭和45年に1号機・2号機の建設、そして昭和49年に運転開始に至った。

原子力発電所を誘致してから町は、賛成と反対に二分されたが、これはどんな問題でも必ず起こることと思う。

#### 住民と原子力発電所

住民が原子力と共生の道を歩むことになった経緯であるが、高浜町では何回も何回も説明会が設けられ、勉強をするという啓蒙活動が行われ続けた。理解を深め、盛り上げていくために、発電所の説明会や研究者の講演会、シンポジウムに参加したり、実になる内容で続けられた。

また、毎年いろいろなイベントが行われ、学習グループにも大勢の住民が参加するなどして、やがて、町(住



高浜1・2号機建設当時の風景  
(昭和47年9月撮影。高浜発電所提供)

民)と発電所との信頼関係が出来上がってきたと思われる。発電所との連携は密にしており、共生している。今や住民にとって原子力発電所は、なくてはならないものになっている。

### 立地住民として思うこと

原子力発電所のおかげで立地地域は教育施設の充実、農業・工業・商業・漁業など、町の財政基盤の安定や人づくり、町の発展に大きく貢献している。高浜町では、町づくりの基本課題の中で原子力発電所との共生が謳われているが、町民と原子力発電所との間に信頼関係ができていく証であり、とてもいい関係にあるのだと思っている。わが町に原子力発電所ができてよかった、信念を貫いてきてよかったと思っている。しかし、立地住民に対する国・県の姿勢、原子力に対するマスコミ、原子力の研究者・専門家の役割についてはまだ不十分ではないかと考える。

#### 1. 国・県へ

国・県の行うことには形式的で、意味のないように思うことが多い。例えば、住民との座談会を行っていただきたい、プルサーマルなど何か新しく事を起こすにあたって、国は町へ出向いて、時間内でさばくというのではなく、私たちとひざを突き合わせて話し合うとか、そういうことがない。インタビューで応えておられるのは見ることはあるが、事故が起こればなおさら国の人が私たちの前に現れることはない。

また、若者(学生)と専門家との意見交換、これは地元からの技術者育成に向けての勉強会等のことであるが、行われることを期待する。

#### 2. マスコミへ

マスコミの皆さんには、原子力の報道をされる時、どのような知識をもとに報道されているのか疑問に思うことがある。原子力を専門に、研究に励まれている先生方の意見を採り上げて、国民に発信してほしいと思って

いる。素人の憶測でなく、専門家の冷静な意見こそ伝えてほしい。地元が風評被害に遭うようなことは控えてほしいと思う。

#### 3. 研究者・学者へ

そして学者の先生方には、私たち立地に暮らす者は、ニュースキャスターの意見より、専門家の先生方の説明をどれだけ聞きたいことかと強く思う。この事故は起こってしまったけれども、こういうことで安全は確保できるとか、おっしゃっていただければ、私たちは安心できる。それによってこそ、住民は真の安心を得ることができる。そして誰しもが思っている。専門家の先生方の言葉は、私たち住民を守ってくれる大きな力であると思っている。

最初に、立地住民が安心して暮らしていけることは「事故がないこと」といったが、事業者が常日頃から絶対の安全を心がけるだけでなく、国、県、研究者(専門家)、事業者が互いに連携・協力すること、また、マスコミと国民が、原子力や放射線について正しく理解・認識すること、そういうことこそが、立地に住む私たちの安心につながるものと信じているし、今後の原子力の大きな発展につながっていくのだと思う。

ありがとうございました。

### あとがき

昨年12月13日に、私が所属する関西原子力懇談会の「原子力広報女性アドバイザー設立25周年記念シンポジウム」で、全国の立地女性たちとともに、国や自治体、学会の先生方などと今後の原子力について本音で語りあったことがきっかけとなり、今回、発表の機会を頂戴できたことと感謝している。

学術的かつ高尚な発表がなされる中で、場違いではと気後れをしたが、わざわざ我が家まで依頼に来て下さった木村逸郎先生はじめ、私の前に発表された若狭エネ研の来馬克美氏や福井大学の竹田敏一先生に大いに激励いただき、勇気づけられたので、長年、原子力発電所と共に生きてきた一人の住民としての視点から感じることを、願うことを発表させていただいた。

今回、私が発表させていただいたことは、昨年の25周年記念シンポジウムと一緒に登壇した立地女性たちも話していたことである。地域の事情による違いや個人の体験には違いはあるものの、立地地域の住民としての思いは同じであると思っている。

皆で互いにうまく協力し合っていければ、物事は必ず良い方向へ進んでいくものと信じている。

## 報告

## 企業における女性のキャリアの磨き方

## ダイバシティ連携のための講演会

日本原子力学会 男女共同参画委員会 笹尾 真実子

男女共同参画委員会では、原子力学会「2009年春の年会」の企画セッションとして「企業における女性のキャリアの磨き方」というタイトルで、(株)東芝の土井美和子さんをお招きし講演会を開催した。講演の中で土井さんは、3つの壁((1)前例がない、(2)余裕がない、(3)自分を閉じ込める)をいかに乗り越えてきたかということを紹介した。その後、会場の参加者から、これらはまさに私達が今感じている壁であることが例とともに挙げられ、この壁を乗り越えるための意見交換が活発に行われた。そして、会合では多くの参加者の共通認識が得られ、原子力分野の技術者研究者のダイバシティ連携への第一歩となった。

## はじめに

原子力分野は、企業においても研究機関、大学においても、極めて女性比率の低い分野である。原子力学会男女共同参画委員会では、原子力がより社会に受け入れられるためには、より多角的な視点を取り込んだ技術へと成長する必要がある、そのためにはダイバシティの視点が重要であると考えている。この上で女性技術者、女性研究者の役割に期待されるものも大きいと思われるのだが、現場での女性技術者、女性研究者はそれぞれ様々な問題を抱えつつ日々働いている。そこで、男女共同参画委員会では、原子力学会「2009年春の年会」の企画セッションとして、このような中で大企業のトップにまでキャリアを積み上げてこられた(株)東芝の土井美和子首席技監をお招きし、「企業における女性のキャリアの磨き方」と題し講演していただいた。

土井さんは東京大学工学系修士課程修了後、東京芝浦電気へ入社(現(株)東芝)。以来「ヒューマンインターフェース」を専門分野とし、日本語ワープロ、機械翻訳、電子出版など現代では私達の生活に密着した技術に初期段階から携わられた方であり、現在は東芝技術陣のトップとして、また行政関係の各種の委員として活躍中である。

## 第1の壁・前例がない

原子力分野で働く女性はその職場で初めての女性ということが多くある。土井さんも東芝で初めての大学院出の女性技術者であり、しかも日本語ワープロの操作性設計/評価という、当時は経験者もいない前人未踏の分野での仕事から始められた。前例がないということで何をすることも大変。そこで学んだことは、研究者や技術者にとっ

て前例のないことこそチャンス、前例を創ればいいという逆転の発想であったようだ。

## 第2の壁・余裕がない

家庭を持ち2児の母親になってからも、職場での仕事は、文書エディタの設計や機械翻訳のヒューマンインターフェース設計/評価と、次々と重要な仕事が入る。時間的にも余裕がなく、毎晩9時半に目覚ましをセットし、起きて時間をつくらうといった毎日。今でもどのように乗り切ったか記憶がないくらいだそう。そんな中で学んだことは、よく考えて優先順位をつけ、リスクを見込んで仕事を進めるとのこと。偶然お子さんの学校が一緒の縁でわかったことだが、日本一忙しい経営者と思われる孫正義氏もお子さんの学校の行事にはしっかりと出席されていたとか。どんなに忙しくても時間はあるはずである。

## 第3の壁・自分を閉じ込める

その後、土井さんは、グループリーダーやラボ長代行



講演する土井さん。その後、30名余の参加者がみなキャリアの磨き方への思いを語る。

(2009年3月24日、学会A会場にて)

Career Development of Women in Engineering: Mamiko SASAO.

(2009年6月23日 受理)

等の責任ある立場になると同時に、VR 技術を利用した原子力施設の制御室仮想試作システムや道案内システムの研究開発等といった新しい仕事も始める中で、失敗を恐れてすべて自分でやるといったように自分で自分を閉じ込める新たな壁を感じたという。その時に、1 回目の失敗は恐れてはいけない、前例がないことには常にリスクが伴うのだから、来たボールは迅速に適任者に回すことが大切ということがわかったそうだ。東芝という大きな企業の中には、他の部署にもいろいろな専門家がいます。いろいろな技術者に質問することによって壁を乗り越えた、などリーダーとしてチームを動かすノウハウの紹介があった。

### 意見交換会

このセッションの後半は「ダイバシティ技術者・研究者の集い」として一原子力における様々なキャリア・パスという話題で意見交換を行った。前半の土井さんのお話には、聴衆はみな強い印象を抱き、学生も、研究者も、就職したての若者も、また管理職試験を目前にした中堅も、この3つの壁、①前例がない、②余裕がない、③自分を閉じ込める、はまさに日ごろ感じていることだと、議論はこの話題が中心に展開し、講師の土井さんからひとつひとつ丁寧な回答やコメントをいただいた。

話題の一つは、土井さんのように女性を迎えた前例のない職場、女性の感性などは必要ないと思われる職場(電気や原子力関係の技術職のほとんどの職場はそうかもしれない)に配属された女性技術者、仕事がつらい、ハードであるというイメージがあり、女性には不向きであるという職場に配属された女性技術者が感じる壁であった。原子力のトラブルが起こったときに徹夜作業などができず、女性では無理であるという考えもそのひとつである。緊急時の対応は男女問わず大変であり、その時のためにこそ男女問わず高い技術能力で即座に対応できるような緊急対応システムを用意しておくことが必要という意見が会場から出された。一方、土井さんは男女の価値観の相違の壁よりも、技術上の分野の違いによる価値観の差の方が大きく、男女の差はあまり見えずにきたという。「このような職場で静かにしていたらどこに女性がいるかもわからない。存在を認めてもらうためには、自分の能力をアピールすることが大事」とは土井さんのコメントである。

もう一つはまさにキャリアアップしようとしている女性技術者が感じる壁。「自分に閉じこもってしまう、部下を育てられない」という大きな壁。解決にはどうい

工夫があるかという質問に対して、土井さんは「東芝には女性のマネージャーを育てるためのプロジェクトがある。やはりマネジメントに女性が入っていかないと本物にはならないから」と話された。

そして、自分は女性だとどうしても意識して自ら作ってしまう壁。土井さんは「自分はどのように生きていかでエネルギーの使い方が違うと思う」、「仕事で成果を出すことにエネルギーを使おう」と。「女性の私が言うと反発されるようで、会議で反発されずにうまく話を通すコツはないか?」との会議や打ち合わせなど、なんとなく自分の発言が浮いてしまうと感じる時の質問には、その対処法として「前の人が出たことを引用し、意見を肯定しつつ、自分の意見をうまくプラスしていくという方法を磨くとよいのでは。会議では、議題のディシジョン・メーカーは誰かということをもいつも考えること。また苦手な人に対しては、逆に相手の懐に飛び込んで、助けを求めるといことも必要」と、企業トップならではの秘訣を紹介された。

壁を乗り越えるときに力になるのは?との質問には、困ったときに助けてくれる家族や組織を作ることが大事とのこと。

最後に会場の若い男性から、新しい風を吹かせてくれるものが女性にはある。女性がいると盛り上がる。自分たちはそれが良くわかっているので徐々に壁は崩れていくはずという元気の出る発言があった。まさにこのことこそ、男性・女性が共に参画することでより高い成果を目指そうとするダイバシティ技術者・研究者の目指すところである。職場環境や仕事が大変だからという理由で女性への門戸を狭くする職場を失くすということは、男性にとっても働きやすい職場を増やすことにつながるといえるのではないだろうか。

以上のように、講演会とその後の意見交換で多くの参加者の共通認識が得られ、また力づけられ、原子力分野の技術者研究者のダイバシティ連携への第一歩となる会合であった。

### 著者紹介

笹尾真実子(ささお・まみこ)



東北大学。専門は核融合プラズマ計測学。イオンビーム工学。国際トカマク物理活動計測委員会委員・中性子計測作業部会長。



連載  
講座21世紀の原子力発電所廃止措置の  
技術動向

## 第3回 廃止措置技術

## —コンクリート解体/はつりの技術動向

大成建設(株) 伊東 章, 清水建設(株) 鳥居 和敬

## I. はじめに

軽水炉の廃止措置における解体技術開発としては、大きく分類して、機器等を対象とした鋼材解体と、建屋等を対象としたコンクリート解体に対する技術開発がある。このうち、鋼材解体の技術動向は、本連載講座の第2回目において記載されており、今回はコンクリート解体の技術動向について述べる。

軽水炉の廃止措置の対象となるコンクリートは、110万kW級軽水炉1基当たり約45万～50万tと推定されているが、そのほとんどが管理区域外から発生する一般的な廃棄物となるものであり、放射性廃棄物となるコンクリートは1%未満しかない。

しかし、この放射性廃棄物となるコンクリートを解体するためには、遠隔操作の必要性があること、部材の厚いコンクリートを処分レベルに合うように区分して解体する必要があること等の特徴があり、解体に際しては高度な技術が必要となる。一方、管理区域解除後に解体する大半のコンクリートは、部材が厚い、鉄筋量が多い等の特徴はあるが、解体技術としては従来技術でも十分対応できるものと考えられている。したがって、本稿では、放射性廃棄物となるコンクリートの解体技術を中心に述べることにする。

## II. コンクリート解体技術の種類と分類

放射性廃棄物となるコンクリートには、原子炉から照射される中性子によって放射化した生体遮蔽壁や熱遮蔽

*Trend on Decommissioning Technology of Nuclear Power Plants in 21st Century*(3): *Decommissioning Technologies—Status and Development of Dismantling and Decontamination Technologies for Concrete*: Akira ITO, Kazuyuki TORII

(2009年 3月11日 受理)

各回タイトル

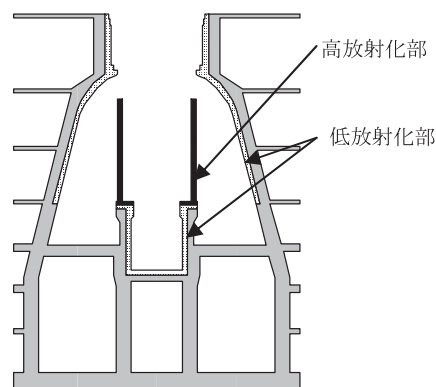
第1回 廃止措置の世界の概況とわが国の現状

第2回 廃止措置技術—鋼材解体の技術動向

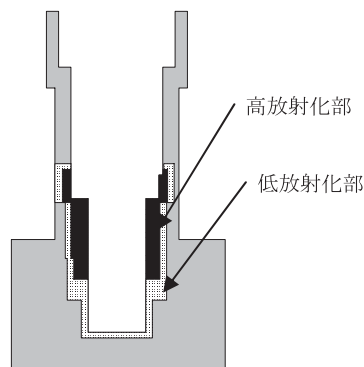
壁等の放射化コンクリートと、放射性物質がコンクリート表面に付着した汚染コンクリートに分類でき、放射化コンクリートを解体する技術と、汚染コンクリートを除染する技術が必要となる。また、放射化コンクリートは、放射能濃度のレベルによって、高放射化部と低放射化部に区分されている。

第1図に国内大規模プラント(BWR)における放射化区分を、第2図に国内大規模プラント(PWR)における放射化区分を示す。

コンクリートの除染技術と解体技術は多くあるが、現状において現実的と考えられる工法について、目的、解体の形態、その形態を実施するための原理、その原理を得るための方法によって分類整理した。整理結果とし



第1図 大規模プラント(BWR)の放射化区分



第2図 大規模プラント(PWR)の放射化区分

第1表 コンクリート解体・除染工法の概要

目的	形態	原理	方法	名称	概要	備考	
解体	切断	研削	擦り	ワイヤーソー	ダイヤモンド砥粒が付いたワイヤーをエンドレスに回転させて切断	コアボーリング等と併用	
				コアボーリング	ダイヤモンド砥粒が付いた円筒状の刃を回転させて円筒状にくり抜く	連続させることで切断となる	
				ディスク・カッター (カッター)	ダイヤモンド砥粒が付いた円盤状の刃等を回転させて切断		
		衝突	アブレッション・ウォータージェット (水ジェット)	研磨材を混入した高圧水によって切断			
			熔融	熱	火炎ジェット	灯油と酸素の混合ジェットの炎によって溶解切断	
					テルミット	鉄やアルミの合金線に酸素を噴射させて得る燃焼炎によって熔融切断	
	レーザ	レーザによる熱によって熔融して切断					
	破壊	破砕	打撃	ブレーカ	ノミ状の鋼材を振動打撃させて破砕		
				圧砕	圧砕機	コンクリートを掴み、掴んだ圧力で圧砕	
				爆破	制御爆破	影響範囲や方向を制御し、孔に爆薬を挿入し爆破の圧力で破砕	破砕または割裂の性状を制御することにより、ある程度の区分解体をすることが可能である
		割裂	圧力	バースタ	孔にジャッキ状の治具を入れ、ジャッキの伸びによる圧力で割裂		
				静的破砕剤	孔に徐々に膨張する薬剤を入れ、薬剤の膨張による圧力で割裂		
熱				電磁誘導/直接通電	コンクリート中の鉄筋に電流を発生させ、鉄筋の熱影響によって割裂	二次破砕が必要で、ブレーカや圧砕機と併用する	
除染	破壊	研削	擦り	ミーリングカッター (プレーナ)	円盤先端にダイヤモンド砥粒が着く刃を円筒状に並べ、回転させて研磨		
				グラインダ (コンクリートカチ)	円盤の平面に付いたダイヤモンド砥粒面を、回転させて押し付けて研磨		
				衝突	アブレッション・ウォータージェット	研磨材を混入した高圧水によって研磨	
		打撃	破砕	ブラスト	研磨材を圧縮空気等によって吹付け研磨		
				スキャブラー	突起を持つ複数の打撃具で、表面を打撃して衝撃力で破砕		
				ニードルガン (ニードルスクレーラ)	多数の針が前後に激しく往復し、表面に押し当てることで破砕		
	劣化	熱	ブレーカ	ノミ状の鋼材を振動打撃させて破砕			
			割裂	スポーラ	ドリルによって削孔した孔をジャッキ状の器具で押し広げ割裂		
			爆裂	マイクロ波	マイクロ波によってコンクリート中の水分を加熱し爆裂		
	劣化	強酸	微生物	レーザ	レーザによってコンクリート中の水分を加熱し爆裂		
				レーザ	熱でコンクリートをガラス化し、脆弱になった部分を削り取る		
				強酸	強酸を発生するバクテリアを塗布し、コンクリートを劣化させ吸引除去		

て、第1表にコンクリート解体・除染工法の概要を示す。

### Ⅲ. 解体技術選定に当たっての留意事項

#### 1. 解体技術

##### (1) 一般的要件

一般の解体と同様に、解体効率が高く、人件費、設備費、消耗品費等が低いことは、工期短縮、コスト低減において重要であることに変わりはない。特に高放射化コンクリートの解体においては、遠隔操作による繰返し作業が多いため、解体効率は重要である。

##### (2) 鋼材比率が高いマッシブなコンクリートの解体

原子力発電所のコンクリート構造物の特徴としては、部材が厚く、配筋量が多いため、コンクリート中の鋼材比率が非常に高いこと等が挙げられる。さらに、高放射化コンクリートとなる部位は、PWRではライナープレートが貼られており、BWRでは鋼板構造コンクリート造である。したがって、コンクリート解体に際しては、鋼材比率が高いコンクリートの解体が可能で、マッシブな部材を解体できる強力なパワーを持ち、部位によって

はライナー付きコンクリートの解体が可能な工法が要求される。

#### 2. 廃棄物低減

##### (1) 区分解体

原子力発電所の廃止措置において特徴的なものとして、廃止措置で発生する放射性廃棄物は、放射能濃度に応じて、余裕深度(地下50~100mのトンネルやサイロ)処分、浅地中ピット(地下10mのコンクリートピット)処分、および浅地中トレンチ(地下数mの素掘りトレンチ)処分に区分されて処分される。この放射性廃棄物の処分費用は一般産業廃棄物に比較して非常に高価であり、特に放射能濃度の高い廃棄物の処分費ほど高価である。このため、放射化コンクリートの解体においては、これらの処分レベルに応じて、対象となる部位のみを区分して解体する必要がある。

##### (2) 廃棄物の減容化

廃棄物の処分においては、余裕深度処分および浅地中ピット処分の対象廃棄物(高放射化部が該当)は容器に充填する必要があり、その充填率を向上することも重要となる。コンクリートを破砕した場合には、容積は約2倍に増加してしまうため、破砕することなくコンクリート

形状のまま、容器寸法と同形状で容器に入れることが可能であればその充填率は高いものとなる。

### (3) 2次廃棄物の低減

切断や破碎作業によって、スラリー(水と粉塵の混合物)やヒューム(切断時の熱によって蒸発した物質が冷却されて固体の微粒子となったもの)等の2次廃棄物が発生する。この2次廃棄物も放射性廃棄物となることから、その量の低減も重要であると同時に、その処理も一般解体とは異なり手間が掛かるため、2次廃棄物の形態や性状もコストや工期への影響が大きい。また、2次廃棄物を処理するためのフィルタ等も2次廃棄物の形態や性状によって大きく発生量が異なることにも注意が必要である。

### 3. 遠隔操作性

高放射化部のコンクリートを解体する際には、線量当量率がかかなり高く、人が接近して作業することが困難なため、遠隔操作で行う必要がある。一方、浅地中トレンチ処分の対象廃棄物(低放射化部が該当)は、線量当量率がそれほど高くなく、人がある程度接近して作業することが可能となる。

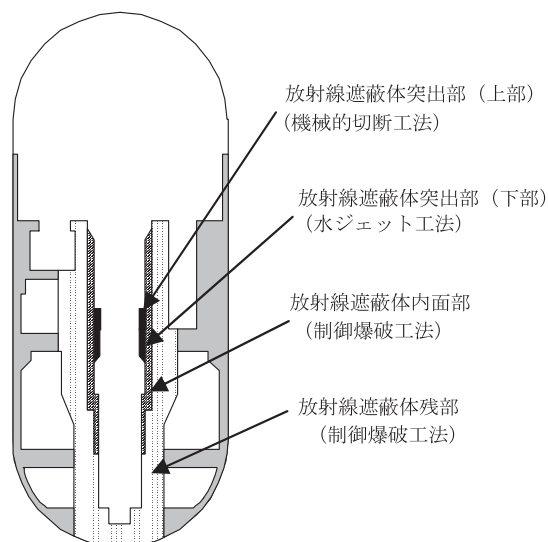
## Ⅳ. コンクリート解体技術の適用・開発実績

### 1. 適用実績(国内廃止措置)

#### (1) 日本原子力研究所(現 日本原子力研究開発機構) JPDR での実績

##### (a) 放射化コンクリート解体の概要

JPDRにおいて、放射化された部位は放射線遮蔽体であり、放射線遮蔽体の炉心中心部の40 cm厚みを増した部分(放射線遮蔽体突出部)、放射線遮蔽体の内面部、放射線遮蔽体の残部に区分されて解体された。第3図に



第3図 JPDRの放射線遮蔽体の区分と解体工法

JPDRの放射線遮蔽体の区分と解体工法を示す。

解体方法としては、放射線遮蔽体突出部はコアボーリング式切断とカッター式切断を組み合わせた工法、および水ジェット工法によって、遠隔操作により実施された。放射線遮蔽体の内面部分、放射線遮蔽体の残部は制御爆破工法が採用され、人が接近して作業を実施している。

##### (b) 放射線遮蔽体突出部の解体

放射線遮蔽体突出部の解体は、上部を機械的切断工法、下部を水ジェット工法によって切断し解体されている。

突出部上部の機械式切断工法においては、最初に内部の鋼板ライナーをカッター切断した後、コンクリートの側面を上側からコアボーリング穿孔によって行い、次に正面からのカッターによる水平切断(底面)によってブロック状に切断する方法が採用されている。

機械式切断工法のシステムには、切断装置本体のほかに、ブロック把持機、スラリー回収装置、切断機局所集じん装置で構成されており、平均で約1.1 m×0.25 m×1.25 mのサイズの解体ブロックを把持して回収するとともに、2次廃棄物も回収されている。

突出部下部の水ジェット工法においては、下部から上向きの水ジェットによって背面切断を行い、正面からの水ジェット切断による側面切断、水平切断(上面)によってブロック状に切断する方法が採用された。なお、水ジェットには、研磨材としてスチールグリッドが混入されている。

水ジェット切断工法のシステムは、切断装置本体、切断ブロック搬出用バケット、研磨材供給装置、高圧ポンプ、スラリー回収装置、切断機局所集じん装置で構成されており、平均で約0.6 m×0.4 m×0.3 mの大きさのブロックに解体されている。切断されたブロックは切断ブロック搬出用バケットに落下し、バケットから収納容器に収納され、スラリー等の2次生成物も回収されている。

##### (c) 放射線遮蔽体内面部および残部の解体

放射線遮蔽体内面部および残部は、廃棄物の区分の観点から区分して解体されたが、両者とも制御爆破工法で解体されている。制御爆破工法では、低爆速で破碎作用の少ない爆薬を使用し、解体部以外への影響を小さくする必要があり、JPDRではアーバナイト(低爆速(2,000 m/s程度)爆薬の一種で、制御発破用に適している)が使用された。なお、ライナーが残っている部分には、事前に水ジェット工法とカッター工法によってライナー表面にスリットを入れている。

2次破碎としては、放射線遮蔽体内面部ではハンドブレイカを用いて手動で解体されたが、放射線遮蔽体残部では、解体物量が多量であるため、解体効率を向上させるためバックホウ等の重機を使用し破碎されている。

## (d) 汚染コンクリートの除去

汚染コンクリートの除去に使用された機器は、ショットブラスト、サンドブラスト、床用スキャブラ、壁用スキャブラ、ニードルガン、プレーナ、スパイクハンマ、チップングハンマ、ハンドスキャブラ、コンクリートカンナである。なお、ショットブラストからニードルガンまでの5工法は、事前に試験が行われ、以下のような知見が報告されている

- ・ショットブラストとスキャブラは、サンドブラストやニードルガンに比べて作業効率は高いが、入隅部に剥離できない部分が生じる。
- ・広域面の入隅部の剥離にはサンドブラストが、狭面積の入隅部の剥離にはニードルガンが有利である
- ・足場等が必要な高所の剥離には作業性の面でサンドブラストが有効である。

## (2) NUPEC 確証試験

## (a) 生体遮蔽壁の解体

「実用発電用原子炉廃炉設備確証試験」において、「ディスクカッタとくさび工法による生体遮へい壁表層はく離技術確証試験」として、生体遮蔽壁の解体技術開発を実施している。

解体方法は、ディスクカッタによって正面側から上面、下面、側面を切断した後、切断面にくさびを挿入し、発生するせん断力で背面を割裂させ、ブロック状に切断する方法である。なお、ディスクカッタはダイヤモンドブレード(ダイヤモンド粒を表面に固着した円盤状の刃)とレジノイドブレード(熱硬化性樹脂で結合した砥石の円盤状の刃)の2種類を使用している。このディスクカッタとくさびを組み合わせ、ブロックを繰り返し剥離する方法により、表層から1mの深さまで切削剥離する試験を行っている。試験の結果、遠隔操作によるディスクカッタとくさび工法により、生体遮蔽壁の表層を切削できることが確証されている。

## (b) コンクリート除染

「実用発電用原子炉廃炉設備確証試験」の「原子炉遠隔解体システム技術」の「2次生成物回収技術」で、コンクリートはつり時の粉塵回収と併せて、はつり性能の確証を実施している。

技術調査結果から、はつり方式としてはスキャブラを用いた機械的打撃方式、移動方式としては登はん形移動機構のうちの複数ワイヤー式、局所バリア方式としては可搬型二重バリアを組み込んだはつり装置により、バリア機能、はつり機能、粉塵などの回収機能、移動機能などを確認し、実用化の見通しを得ている。

## (c) 切断作業時の2次生成物回収

「実用発電用原子炉廃炉設備確証試験」の「原子炉遠隔解体システム技術」の「2次生成物回収技術」で、コンクリートをワイヤーソーで切断する際に発生する粉塵、廃液の回収処理技術の確証を実施している。

コンクリート切断時の粉塵回収システムとしては、可搬型バリア+全体集塵装置(バグフィルタ+プレフィルタ+HEPAフィルタ)+局所集塵装置(回収フード+バグフィルタ)の構成となっている。廃液処理設備としては、フィルタプレス(加圧脱水装置)により脱水して固形分を分離し、炭酸ガスによる中和をした後に海洋放流することとされている。

## 2. 適用実績(海外廃止措置)

海外原子力施設の解体実績において、原子炉や炉内構造物等の機器の解体に関する情報に比べ、コンクリートの解体に関する情報は少ない。公表されている情報としては、フォート・セント・ブレイン(米国)ではワイヤーソーが、ニーダーライヒバッハ(ドイツ)では制御爆破が、トロージャン(米国)ではブレーカが生体遮蔽の解体に使用されている。

## V. コンクリート解体の適用技術と課題

## 1. 高放射化部のコンクリート解体技術

## (1) 切断技術

高放射化部のコンクリート解体の特徴としては、区分解体と遠隔操作が必須条件であり、さらに鋼材比率が高く、鋼板の貼られているコンクリートを、精度よく解体することが求められる。

第1表に示す解体を目的とした破碎工法のうち、ブレーカと圧碎機以外の工法は、区分解体が可能ではあるが、精度の高い区分解体をすることは困難である。また、破碎工法の中で解体効率の高い制御爆破工法は、装薬、タンピング(薬剤を入れた穴をふさぐ)、結線、爆破確認等の詳細な作業が必要であることから、遠隔操作で行うことは困難である。さらに、破碎工法の場合には廃棄物容器への充填率が低く、廃棄物容器形状に合わせて解体することが可能であれば充填率の向上が可能となる。したがって、高放射化コンクリートの解体工法としては、切断工法を適用することが効率的であると考えられている。

高放射化部のコンクリートの切断技術としては、当初は、非接触で、ある程度切断深さが大きい工法であり、鋼材の切断にも優位な工法として、火炎ジェット工法、テルミット工法等の熱的切断工法が目撃されていた。しかし、2次廃棄物となるヒュームが大量に発生すること、熔融したドロスを除去しないと深い切断が困難になること、切断溝幅が大きいこと等の課題があり、ディスクカッタ工法、コアボーリング工法、アブレッシブ・ウォータージェット工法等の研削を原理とする工法の研究も進められてきた。その後、同じ研削工法ではあるが、岩石の切断用に使用されていたダイヤモンドワイヤーソー工法(ワイヤーソー工法)が、鉄筋の入ったコンク

リートでも切断できるように開発され、その切断速度の速さから、現在ではワイヤーソー工法が有力候補とされている。

なお、ワイヤーソー工法は、水を使用しない無水工法が開発され、すでに一般工事にも適用されている。無水工法は、発生粉塵の局所捕集が必要となるが、2次廃棄物としてスラリーの処理が不要になるメリットがあり、適用の可能性は高いと考える。

## (2) 遠隔操作技術

前項に示した切断工法はすべて遠隔操作で実施する必要がある。一般的に遠隔操作の場合には、解体装置が解体対象と接触しない非接触工法のほうが不具合の発生率が低いと考えられている。しかし、現在、有力視されているワイヤーソー工法は接触工法である上に、一般工事においてワイヤーが切削溝に噛み込んだり、破断する等の不具合を発生させることもあり、遠隔操作性に優れた工法とはいえない。今後は、このような不具合が発生した場合の遠隔操作での対処方法を十分に検討する必要があるとともに、遠隔操作性に優れ、解体効率の高い工法を模索していく必要があるものとする。

また、切断したブロックの遠隔把持方法については、NUPECの確証試験において検討は実施されているが、重量物で、表面が脆く、把持性の悪いコンクリートブロックの特徴を踏まえ、コンクリートの把持に特化した検討が必要であるとする。特に、PWRの場合には、切断したコンクリートをそのまま把持する必要があるため、形状は非定形で、表面は鋼材等に比較して脆く、欠け落ちたりする可能性もある。また、ワイヤーソー工法によって切断したと仮定すると、切断溝は1cm程度しかなく、そのままの状態では把持することは困難である。

## 2. 低放射化部のコンクリート解体技術

低放射化部のコンクリートの解体は、高放射化部のコンクリート解体と同様に、区分解体の必要はあるが、人が接近して作業することが可能であるため、軽水炉では当初から解体効率が高く、区分解体も可能な制御爆破工法が想定されている。また、制御爆破工法には2次破碎が必要であり、2次破碎工法には一般的なコンクリート解体に多く使用されているブレーカや破碎機が想定されている。

低放射化部のコンクリートの解体は遠隔操作の必要性がないことから、現状技術の適用性が高いため課題は少ないが、物量が多いことから、解体効率を向上させることが重要になるものとする。

## 3. コンクリート除染技術

コンクリート除染の場合には、汚染が付着あるいは浸透したコンクリートを取り除くことによって除染しており、すでに実工事として実施されている。

コンクリートを除去する工法としては、第1表に示すコンクリート除染技術のうち、数mmから数cmの厚さの除染では、ミーリングカット、グラインダ、スクャブラー工法等が使用され、汚染の浸透深さが厚く、数cm以上を削り取る必要がある場合には、ブレーカ工法が採用されている。なお、入隅部で剥離できない部位においては、小型の装置を用いて剥離し、それでも剥離できない部分は小型のブレーカ等を使用して滑らかに削り取ることで対応している。

除染技術の課題としては、低放射化部の解体と同様に、除染効率を向上させることが重要になるものとする。

## —参考資料—

- 1) 総合エネルギー調査原子力部会中間報告—商業用原子力発電施設解体廃棄物の処理処分に向けて、(1999)。
- 2) 原子力発電技術機構 廃止措置技術総合調査委員会編、廃止措置技術ハンドブック、(2007)。
- 3) エネルギー総合工学研究所編、実用発電用原子炉廃炉技術調査報告書、(1998, 2003)。
- 4) 伊東 章, 他, “実用発電用原子炉廃炉設備確証試験”, 原子力学会「1991春の年会」要旨集, (1991)。
- 5) 宮坂靖彦, 他, JPDR 特集-1; JPDR 解体プロジェクトの概要, JPDR 解体実地試験—放射線遮蔽体の解体撤去, —原子炉格納容器等建家の解体撤去, デコミッションング技報 No.14, 原子力施設デコミッションング研究協会, (1996)。
- 6) 原子力発電技術機構 平成15年度実用発電用原子炉廃炉設備技術実証に関する報告書, (2003)。
- 7) 宮坂靖彦, 国内外の原子炉解体で適用された技術およびその解体経験, 第21回原子力施設デコミッションング技術講座, 原子力研究バックエンド推進センター, (2009)。

## 著者紹介

伊東 章(いとう・あきら)



大成建設㈱  
(専門分野, 関心分野)廃止措置

鳥居和敬(とりい・かずゆき)



清水建設㈱  
(専門分野, 関心分野)廃止措置

連載  
講座

## 軽水炉プラントの水化学

## 第8回 実機での水化学(2)

## —構造材料と水の相互作用

日本原子力研究開発機構 塚田 隆

## I. はじめに

軽水炉プラントにおいて冷却水と接する各種の金属材料は、軽水炉開発の初期から腐食や応力腐食割れによる多様な損傷を経験してきた。近年、軽水炉プラントの高経年化に伴い、構造材料の健全性確保が一層重要な課題となっており、「構造材料と水の相互作用」について基礎から理解し、材料損傷のメカニズムに基づく対策を検討する必要がある。実機プラントでの損傷事例の詳細な調査と基礎科学に基づき、構造材料と水の相互作用について理解を深めることは、今後も発生する可能性のある材料の腐食損傷を未然に防止することにもつながる。

2007年には「高経年化対応技術戦略マップ」<sup>1)</sup>が作成され、腐食損傷に関しては、応力腐食割れ(SCC: Stress Corrosion Cracking)および配管減肉腐食が重要事象として取り上げられ、検討すべき技術課題とロードマップが示された。また、同年に「水化学ロードマップ」<sup>2)</sup>も作られ、構造材料の健全性に関してSCCおよび流れ加速型腐食(FAC: Flow Accelerated Corrosion)による配管減肉の抑制について、水化学技術の観点から、今後の取組みの方向が示された。本稿では、SCCおよびFACについて最近の損傷事例、水化学影響因子、水化学対策技術の現状と今後の課題について述べる。

## II. 軽水炉の主要な構造材料

軽水炉プラントにおいて冷却水に接して使用される主な構造材料は、本連載講座第1回に示されているよう

*Water Chemistry of LWR Plants(8); Water Chemistry in Actual Plants—Interaction between Structural Materials and Reactor Water Chemistry: Takashi TSUKADA.*

(2009年 7月21日 受理)

各回タイトル

- 第1回 軽水炉プラントにおける水の役割と水化学制御
- 第2回 水化学の基礎(1)—腐食と電気化学
- 第3回 水化学の基礎(2)—酸化皮膜特性
- 第4回 水化学の基礎(3)—放射線化学
- 第5回 水化学の基礎(4)—水質計測
- 第6回 水化学の基礎(5)—水の浄化と浄化装置
- 第7回 実機での水化学(1)—燃料/水相互作用

に、ステンレス鋼、ニッケル基合金および炭素鋼である。以下それらの特徴を簡単に述べる。

## 1. 構造材料の必要特性と特徴

軽水炉プラントの安全性・信頼性を確保するために構造材料に求められる性質には、①強度、靱性等の機械的性質が十分なこと、②加工性、溶接性、熱処理性が良好なこと、③組織が長期間安定であること、④核的特性に優れること、⑤高温高圧水中の耐環境性に優れていること等が挙げられる。ステンレス鋼、ニッケル基合金および炭素鋼の主な特徴を第1表に示すように、これらの材料はそれらの特性に応じて使い分けられている。プラントの構成材料が冷却水に接する面積の比率は、本講座第1回に示されたように、沸騰水型原子炉(BWR)では炭素鋼とステンレス鋼が大きく、加圧水型原子炉(PWR)1次系ではニッケル基合金が圧倒的に大きい。また、両炉型では冷却水の水質と温度が異なるため、同一の材料であっても水との相互作用の現れ方が異なる。しかし、近年、両炉における材料の腐食およびSCC挙動の共通点と相違点およびそれらの根拠を明確にすることに努力が払われている。その目的は、両炉プラントにおいて想定外の腐食損傷が依然として発生しており、かつその原因が明確になっていない事象もあるため、両炉での材料と水の相互作用を広い視野に立って再検討し、損傷原因の解明と対策技術の検討を一層進めることにある。

## 2. BWRプラントの主な構成材料

BWRの配管用材料としては、当初は最も一般的なオーステナイト系ステンレス鋼であるSUS304が使用さ

第1表 主な軽水炉構造材料の特徴

材 料	特 徴	使用部位例	代表材料
ステンレス鋼	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Cr添加で耐食性に優れる</li> <li>・Mo添加で耐局部腐食性改善</li> <li>・オーステナイト系が代表的</li> <li>・延性、強度、靱性が高い</li> <li>・加工性、溶接性が良い</li> </ul>	炉内構造物 構造物締結ボルト 1次冷却系配管	SUS304 SUS316 SUS304L SUS316L
ニッケル基合金	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高温強度特性に優れる</li> <li>・7alkali性環境でも高い耐食性</li> <li>・高温水中耐SCC性が高い</li> <li>・延性、強度、靱性が高い</li> <li>・熱膨張係数が中程度である</li> </ul>	炉内支持構造物 蒸気発生器伝熱管 压力容器貫通部	600合金 690合金 X-750合金
炭素鋼 低合金鋼	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐食性は中程度だが、SCC感受性を示さない</li> <li>・溶接性に優れる</li> <li>・照射脆化により靱性が低下</li> <li>・経済性が高い</li> </ul>	压力容器 配管	SA533B/508 STS410/480 SGV480

れていたが、1970年代に再循環系配管の溶接熱影響部で結晶粒界へのCr炭化物の析出が原因となった熱鋭敏化による粒界応力腐食割れ(IGSCC: Intergranular type SCC)が多発したため、その対策として熱鋭敏化を起こさない低炭素ステンレス鋼(SUS 304 L, SUS 316 L)への移行が進められた。ステンレス鋼は、炉心シュラウド、炉心支持板などの炉内構造物にも多用されており、現在の国内プラントの炉内構造物には、高温水中耐SCC性に優れているとされている低炭素ステンレス鋼が主に使用されている。しかし、近年、これらの低炭素ステンレス鋼部材にもSCCが発生しており、その原因究明が進められている。一方、シュラウドサポートなどの炉心支持構造物の溶接部には、ステンレス鋼よりさらに耐食性が高く、圧力容器鋼とステンレス鋼の中間的な熱膨張特性を有し、溶接性に優れた600合金などのニッケル基合金が用いられている。また、制御棒駆動機構や炉内計装管の圧力容器貫通部など重要な部位にもニッケル基合金が使用されている。耐食性はステンレス鋼に劣るが安価であり、SCC感受性が低い炭素鋼は、原子炉圧力容器や主蒸気系および給水系の配管に用いられている。

### 3. PWRプラントの主な構成材料

PWR 1次系の配管、炉内構造物、蒸気発生器等には、ステンレス鋼とニッケル基合金が多用されている。ほとんどの炉内構造物はSUS 304製であり、それらはボルトにより組み立てられている。締結用ボルトには冷間加工により強度を向上させたSUS 316が用いられるが、海外プラントではバフ板とフォーマ板を締結するバフ板フォーマボルトに照射誘起応力腐食割れ(IASCC: Irradiation Assisted SCC)の発生事例がある。原子炉容器の上蓋管および炉内計装筒の容器貫通部にはニッケル基合金が用いられているが、当初用いられた600合金に海外プラントで1次系冷却水応力腐食割れ(PWSCC: Primary Water SCC)が認められ、最近では、より耐食性に優れた690合金が採用されている。また、蒸気発生器伝熱管の材料には、従来の600合金または600合金に特殊熱処理を施したTT 600合金、さらにCr含有率を増加させた690合金が使用されている。これらの材料は耐食性に優れているが、伝熱管内面1次系の接水面積が大きいため腐食生成物の放出量が相対的に大きくなり、腐食生成物中のNiが放射化することによりCoが形成され系統内の被ばく線源となる。そのため被ばく線量の低減が、本講座の次回で述べられるように、水化学の重要な課題である。

PWR 2次系のタービン系統の容器および配管には主に炭素鋼が用いられている。炭素鋼は、高流速の高温水中では腐食減肉が問題となることは火力発電所における経験や米国サリー原発での配管破損事故など以前より知られていたが、2004年には美浜発電所3号機の復水系配管でFACによる配管減肉を起因とする破損事故が発生

した。近年、2次系配管の腐食減肉の防止の観点から、配管類への低合金鋼、ステンレス鋼採用が2次系水処理方法の改良と併せて行われている。

## Ⅲ. 最近の材料損傷事例と水化学

前述のように、軽水炉プラントの構造材料の選定では耐食性と耐SCC性に大きな注意が払われてきた。しかし、近年も実機の構造材料にSCCやFACなどの損傷問題が発生している。本章では近年、国内で経験された「構造材料と水の相互作用」に起因する主要な損傷事象および関係する水化学要因と対策例について述べる。

### 1. 応力腐食割れ

#### (1) 低炭素ステンレス鋼の粒界型応力腐食割れ

国内のBWR炉心シュラウド溶接部付近のひび割れは、2001年にSUS 316 L製のシュラウドに報告された後、多くのBWRで報告され、原因究明のための材料調査が行われた。また、同時に低炭素ステンレス鋼製の再循環系配管の溶接熱影響部に発生したひび割れについても原因究明が進められた。その結果、これらのひび割れは、機器、配管の表面に存在した加工硬化層で発生し、溶接時の熱影響により硬化した領域を結晶粒界に沿ってIGSCCとして内部へ進展したことが確認された<sup>3)</sup>。

低炭素ステンレス鋼の耐IGSCC性の向上原理は、鋼中の炭素含有量を約0.02%以下に低減し、溶接熱影響による粒界へのCr炭化物およびCr欠乏層の形成を防止することであった。しかし、低炭素ステンレス鋼のSCCはこの原理により抑制できないSCCメカニズムの存在を示唆した。SCCの発生・進展要因として、材料については従来合金化学組成の局所的な変化が耐食性の観点から重視されてきたが、近年の研究から材料の組織的、機械的特性とSCCの間に密接な関係のあることが明らかになってきている。特に、実機のSCC損傷部位の調査等から材料の硬さとSCC進展速度の間に強い相関性のあることが明らかとなり、溶接熱影響や冷間加工による硬さの上昇さらに中性子照射による材料の硬化も含めて、SCCのメカニズムに関する研究が行われている。

#### (2) ステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れ

IASCCは炉内構造物に特有の粒界型SCCであり、その発生にはしきい中性子照射量があり、SUS 316 L材では約 $1 \times 10^{25}/\text{m}^2 (> 1 \text{ MeV})$ とされている。BWRでは60年相当の運転期間中に、上部格子板、炉心シュラウド等においてこのしきい照射量を超える部位があるため、IASCCは高経年化に伴う重要な検討課題である。ただし、これまで国内のBWRでIASCCと特定された事象は制御棒の部材についてのみであり、例えば2006年にハフニウム板型制御棒のシース材(SUS 316 L)の割れ損傷が報告された。この損傷の原因は、調査の結果IASCCと推定され、シースとハフニウム板の間のすき間内での

冷却水の沸騰による不純物の濃縮と放射線分解が SCC を加速した可能性もある<sup>4)</sup>。一方 PWR では、海外プラントで炉内構造物のバップルフォーマボルトの IASCC 事例が報告されている。国内ではこれまで同ボルトの IASCC の報告事例はないが、今後の高経年化に伴いより注意深い保全を行う必要がある。IASCC の発生原因については、粒界における照射誘起偏析並びに照射硬化に伴う変形の局在化と粒界近傍でのひずみの蓄積が主要因と考えられている。

### (3) Ni 基合金の応力腐食割れ

Ni 基合金は、BWR および PWR の圧力容器貫通部や配管溶接部などの圧力バウンダリーおよび炉内構造物の支持部材等の重要な部位に用いられている。しかし、近年、BWR のシュラウドサポート溶接部等や PWR の原子炉容器上蓋管台貫通部の溶接部等において Ni 基合金の SCC 損傷が発生している。

2007年には、定期検査中の美浜2号機において、蒸気発生器1次側入口管台の溶接部(600合金)の内面に、最大深さ約13 mm の傷が確認された。これらの損傷の発生原因に関しては、機器製作時の機械加工により高い引張残留応力が発生し、その後、運転中の環境下で1次冷却水中 SCC (PWSCC: Primary Water SCC) が発生したものと推定された。発見されたき裂はいずれも軸方向のき裂であり、Ni 基合金の延性が高いことから、直ちにき裂部から配管の破壊に至ることはないと評価された<sup>4)</sup>。

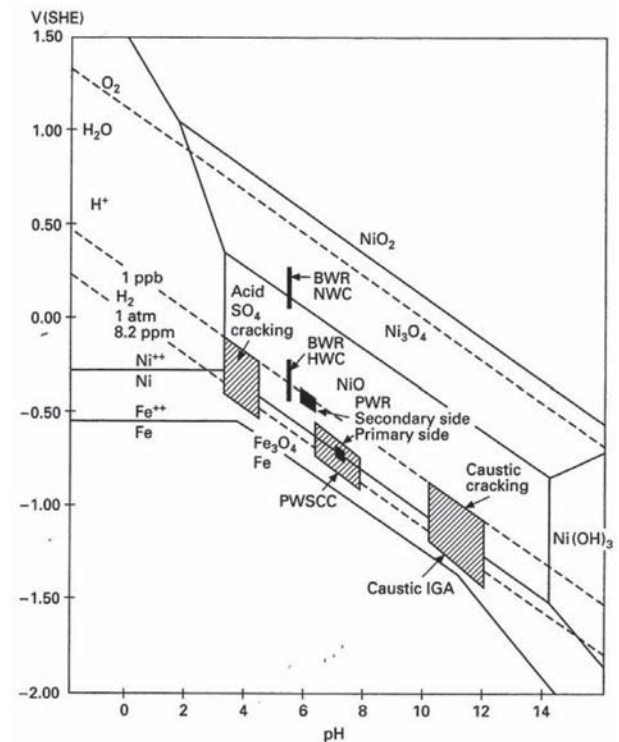
### (4) SCC の水化学影響因子

BWR および PWR において多様な SCC が発生しているが、両炉型の SCC を共通的な視点で検討することは、材料と水の相互作用の基礎に立ち戻るために必要である。本項では、BWR と PWR における SCC を水化学の視点から共通的に考えるために、本講座の基礎編において解説された電気化学(電位-pH 図)、放射線化学(水の放射線分解)および水素注入の観点から整理する。

#### (a) 電位-pH 図による整理

本講座の第2回と第3回で述べられたように、電位-pH 図を起りうる腐食反応や腐食生成物の推定に用いることが有効である。Scott<sup>5)</sup>による第1図は、Ni-H<sub>2</sub>O 系および Fe-H<sub>2</sub>O 系の300℃における電位-pH 図であり、図中には PWR の1次系と2次系および BWR の通常水質(NWC: Normal Water Chemistry)と水素注入水質(HMC: Hydrogen Water Chemistry)の運転条件が600合金の SCC が生じる腐食範囲とともに示されている。Ni 基合金の PWSCC については、電位-pH 図で整理すると水素電極反応線上およびそれ以下の低電位域で起こると考えられているが、第1図ではその条件は Ni-NiO の平衡線と近いことがわかる。これは後述の PWSCC き裂進展速度と水素分圧(溶存水素量)との関係にも現れている。

一方、BWR の運転条件との関係では、宮島ら<sup>6)</sup>は電



第1図 300℃での Ni-H<sub>2</sub>O 系/Fe-H<sub>2</sub>O 系の電位-pH 図<sup>5)</sup>

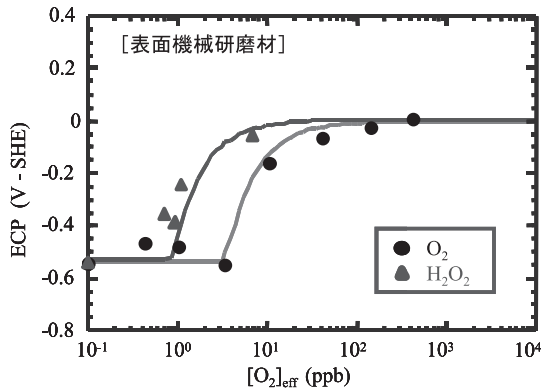
位-pH 図上でスピネル酸化物 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> と FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> が安定に存在し得る領域を検討し、HWC 条件においてステンレス鋼が電位-230 mVvsSHE 以下では SCC を生じないとされている根拠として、高温水中での表面皮膜の形態が水素注入により NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> から FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> へ変化することが原因であろうと推定した。このように、電位-pH 図上に各種 SCC の発生マップを重ねることにより、多様な SCC 現象を共通的な視点から検討できる。

#### (b) 水の放射線分解の影響

本講座の第4回には、水の放射線分解が原子炉内の環境を決定する最も大きな因子であることが述べられた。原子炉内では、水の放射線分解により生成する過酸化水素や各種ラジカル等の放射線分解生成物が腐食および SCC へ影響を与えている。SCC には溶存酸素などの酸化種がその挙動に影響するが、水の放射線分解により生成する過酸化水素は溶存酸素より酸化性が強いいため、SCC へ与える影響の定量的な研究が必要である。例えば、環境面での SCC 感受性の指標として材料の腐食電位(ECP: Electrochemical Corrosion Potential)が一般的に用いられているが、第2図<sup>7)</sup>に示すように、溶存酸素に比べ過酸化水素は少量でも高温水中に存在すると高い ECP 値をもたらすことがわかっている。

構造上の隙間部や狭隘部および材料表面近傍における局所水質は、バルク水質とは異なり、腐食および SCC 挙動を加速する要因となる。このため、過酸化水素添加条件またはガンマ線照射下での高温水中の腐食および SCC 試験が近年、実施されるようになってきた。また、





第2図 実効酸素濃度とステンレス鋼腐食電位の関係<sup>7)</sup>

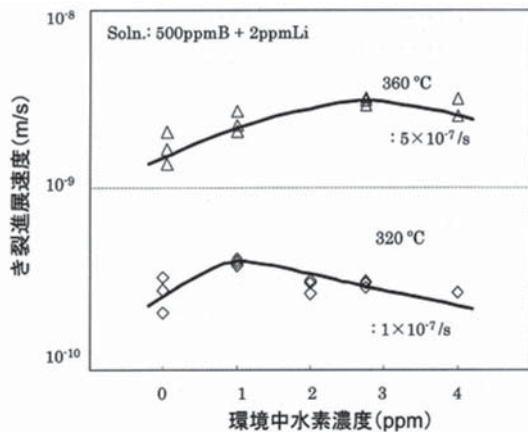
隙間内などの局所水質への放射線照射影響の評価のためには、放射線分解の計算シミュレーションを材料の表面近傍やすき間内を対象に行える手法を開発し、炉内の特定部位における放射線分解水質の影響および炉内腐食環境の評価手法の高精度化を行う必要がある。

(c) 溶存水素の影響

PWR 1次系では、比較的高濃度の水素添加によって冷却水の放射線分解および構造材料の SCC の抑制が図られてきたが、この環境下でも Ni 基合金が PWSCC を生じ、その挙動に溶存水素濃度が大きく影響していることが明らかとなってきた。第3図は、600合金の PWSCC の発生期のき裂進展速度と溶存水素量の関係であるが<sup>8)</sup>、360℃と320℃ではそれぞれ溶存水素量 3 ppm と 1 ppm 付近に進展速度のピークがあることがわかる。溶存水素濃度は腐食生成物の挙動に深くかかわっており、溶存水素が高濃度な高温水中では金属 Ni が安定であるのに対し、低濃度下では溶解しやすい酸化皮膜 NiO が安定となる。このため、PWSCC 進展速度にピークが現れることは、 $Ni + 1/2O_2 \rightleftharpoons NiO$  の反応の平衡水素分圧付近で600合金表面に形成される皮膜が不安定になることで説明できる可能性がある<sup>8)</sup>。

(5) SCC 抑制の水化学技術

すでに国内の多くの BWR プラントにおいて、SCC 環境を緩和するため冷却水へ HWC 技術が適用されてい



第3図 600合金の PWSCC 進展速度と溶存水素量の関係<sup>8)</sup>

るが、水素注入量を増やすとタービン系の線量率が上昇してしまう。この対策として、貴金属を材料表面に付着させ少量の水素で ECP を効果的に低下させる貴金属注入技術(NMCA : Noble Metal Chemical Addition)が開発され、国内でも適用され始めている。また、HWC は定格運転時が対象であるが、原子炉起動時に水素注入を行い、起動時の過渡的な温度変化と熱応力が SCC に与える影響を緩和する技術も開発されている。

一方、PWR では前述のように、PWSCC との関係から水素注入量の最適化の検討が行われているほか、被ばく低減を目的とした 1 次系水中への微量 Zn 注入は、同時に600合金の PWSCC 感受性の改善にも効果が確認されている。この検討では皮膜性状に及ぼす Zn 注入の影響として、10 ppb 以上の Zn 注入により酸化皮膜厚さが低下し、皮膜最外層の Cr, Ni 濃度が増加、Fe 濃度が減少する傾向が報告されており、それが SCC の抑制に効果があると考えられている。

2. 配管減肉腐食

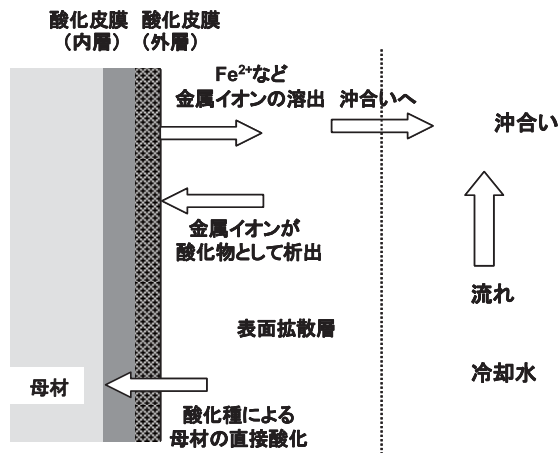
配管減肉をメカニズムの観点から分類すると、腐食による化学的作用が支配的な FAC と流体の壁面への衝突による衝撃力の機械的作用が支配的なエロージョン(Erosion)に大別される。以下では、炭素鋼製配管の大規模な破損につながる場合があり、かつ水化学因子との関係が深い FAC について述べる。

(1) 流れ加速型腐食

2004年に発生した美浜発電所 3 号機の 2 次系復水配管の破損事故は、脱気器入口復水配管の流量を計測するオリフィスの下流近傍で発生した。配管(SB 42)破断部の検査の結果、破断部肉厚は当初の10 mm から最薄部0.4 mm まで減肉し、その内表面には FAC に特徴的な鱗片状模様および破断面に延性破面が確認され、配管破断は機械的エロージョンではなく、FAC が原因であることが確認された<sup>9)</sup>。FAC は、配管あるいは構造材中で流れの乱れる部位(曲り管、T 管、オリフィスなど)にしばしば発生する。実際に FAC が発生した箇所の例として、PWR では主給水ポンプ吸い込み配管、給水加熱抽気配管など、BWR では湿分分離加熱器周辺配管、高圧注入系ドレン配管等、主として炭素鋼製の配管が挙げられる。FAC による減肉速度は、配管内面の表面境界層の厚さなどの流体力学条件および水化学、温度および材料の組成などの腐食条件によって大きく影響されることが知られている。

(2) FAC の水化学影響因子

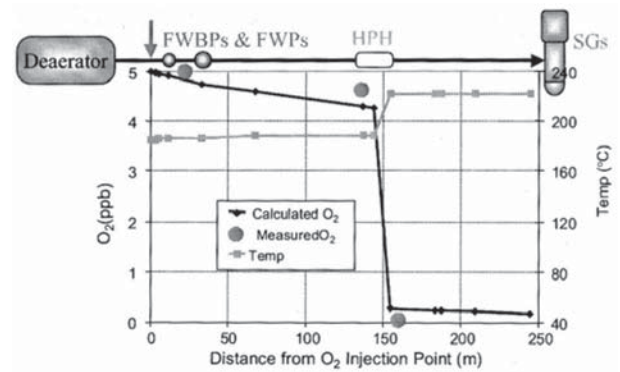
FAC は腐食現象が流れ的作用により加速する現象と考えられている。この流れによる加速効果のメカニズムについては、流れによる拡散により酸化皮膜の発達を阻害され、皮膜の厚さが薄くなって保護性が低下し腐食が加速するという説が有力である。第4図<sup>9)</sup>には FAC のメカニズムに関わる酸化皮膜形成の模式図を示す。水中

第4図 FACのメカニズムの概念図<sup>9)</sup>

の炭素鋼の腐食で形成される酸化皮膜は、母材の直接酸化に伴って形成される酸化皮膜(内層)と、母材から溶出した金属イオンが酸化物として析出し結晶化した酸化皮膜(外層)に大別される。FACのメカニズムとしては、この酸化皮膜の溶解と溶解に伴う皮膜の保護性の低下による腐食の加速がある。流速が大きくなり表面拡散層が薄くなると、拡散層中での金属イオン濃度が低下し、金属溶解を促進、すなわち腐食を加速する。腐食速度そのものは、酸化種濃度、pH、遷移金属イオンの濃度など水化学パラメータ、温度および材料の組成などの腐食条件に影響されるが、水化学パラメータが同じであれば、流速が増大すると表面境界層が薄くなり、母材から溶出した金属イオン母材表面の境界層から拡散し、沖合いに持ち去られる割合が増え酸化皮膜の発達が阻害される。

### (3) FAC抑制の水化学技術

PWRの蒸気発生器2次系側に付着する鉄酸化物の発生源は2次系構成材料の炭素鋼であり、そのFACが原因となる。FACの進行は冷却材のpHに左右されるため、pHを高め環境のアルカリ性を強めることでFACを抑制できる。美浜発電所3号機においても運転開始当初からアンモニア(pH調整剤)およびヒドラジン(脱酸素剤)を用いて処理する全揮発性薬品処理(AVT: All Volatile Treatment)が採用されていた。しかし、pH調整剤の添加量を増すと熱交換器細管などに用いられている銅系合金が腐食し、SG伝熱管の腐食に有害な影響を与えるため、高pH化には限界があった。これに対して、アンモニア濃度を高めpHを従来の9.3から10程度まで高めるHigh-AVT処理が適用され、十分なFAC抑制効果が得られるようになった。さらに、微量の酸素注入を併用することによりFACを抑制する処理法も考案され、敦賀発電所2号機において適用試験が行われた<sup>10)</sup>。そこでは第5図に示すように、脱気器出口から酸素を添加し溶存酸素濃度を2~5ppb程度とすると、蒸気発生器へは酸素が持ち込まれず、FACが問題となる配管内の表面皮膜がヘマタイト( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )化してFACが抑制されることが確認された<sup>10)</sup>。今後このような技術改良と

第5図 敦賀発電所2号機でのHi-AVT+微量酸素注入法<sup>10)</sup>

その適用の妥当性の検証を行うためには、本講座第5回で紹介されたような、実機の水質環境を計測するモニタリング技術の精度向上が重要となる。

## Ⅳ. おわりに

構造材料の腐食損傷は、原子力発電の初期から軽水炉プラントの安全性・信頼性に関わる大きな課題となってきた。その状況は現在においても同様である。また多様化する水化学技術の動向をみると、基本となる材料と水の界面における現象に立ち返り、機構論的な理解を深めることが重要である。この分野には未解明の事象が多く、若い技術者、研究者の参入が切望されている。

### —参考資料—

- 1) 関村直人, 他, 保全学, 7〔2〕, 9 (2008).
- 2) 内田俊介, 他, 日本原子力学会誌, 50〔5〕, 307 (2008).
- 3) 山脇道夫, 他, 日本原子力学会誌, 47〔6〕, 121 (2005).
- 4) 原子力安全・保安院報告資料(同HPに公開).
- 5) *Corrosion issues in light water reactors*, ed. D. Feron, et al., Woodhead Publ., (2007).
- 6) 宮島 香他, 電力中央研究所報告, T 00042, (2001).
- 7) S. Uchida, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **35**, 301 (1998).
- 8) 戸塚信夫他, “PWR 1次系環境下における600合金の応力腐食割れの発生と予測”, INSS Monographs No. 3, (2008).
- 9) 日本機械学会, 発電用設備規格配管減肉管理に関する規格, JSME SCA1-2005, (2005).
- 10) H. Takaiguchi, *Proc. Int. Conf. Water Chemistry of Nuclear Systems*, VGB, L 08-1, (2008).

### 著者紹介

塚田 隆(つかだ・たかし)



日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)原子力材料工学, 腐食防食技術

# 私の 主張

## 数学・計算法および炉物理の進歩 M&C 09に参加して

原子力コード利用環境の改善，公的な高等教育機関の  
拡充および定年制度の見直しを

京都大学名誉教授 小林 啓祐

### 序

本年5月3日から7日まで，米国ニューヨーク州サラトガ Springs で米国原子力学会主催の標記(2009 International Conference on Advances in Mathematics, Computational Methods, and Reactor Physics)の国際会議が開催された。その様子を報告する。

サラトガ Springs で前回1997年に開かれたときは，発表論文数161編，参加者数214人，参加学生数21人だったのに対し，今回は発表論文数285編，参加者数350人，参加学生数94人と格段に多くなり，5つのパラレルセッションで30のテクニカルセッションが持たれた。我が国からの参加は豚インフルの影響もあったようだが僅かに2名で，フランスの27名，ドイツの19名，韓国の8名に比べても非常に少なかったのは大層残念であった。

### Dr. E. Sartori 顕彰セッション

パリの OECD/NEA で長年，炉物理研究の発展に尽力されてきた Dr. E. Sartori が今年65歳の定年を迎えられ，彼の功績を顕彰する特別セッションが持たれ，そこで招待講演を依頼されたので参加した。

この Dr. Sartori 顕彰セッションでは，全部で12件の講演があった。1番目はロスアラモス国立研究所(LANL)の F.R. Brown が，“A Review of Monte Carlo Criticality Calculations Convergence, Bias, Statistics”の表題の講演を行った。PWR の炉心のピンセル構造を近似することなく，正確にモンテカルロ法で計算し， $K_{eff}$  および核分裂分布を計算するときの統計的な誤差を詳細に検証していた。謝辞に E. Gelbard と E. Sartori の名を挙げられていたが，Gelbard はモンテカルロ法の開拓者として著名であり，Brown の革新的な研究は長い伝統を受け継いだものと得心した。

この顕彰セッションの2番目の講演として，筆者は「球面調和関数法を用いたボイドのある簡単な体系の放射線輸送ベンチマーク」の表題で講演した。筆者は1996～2001年の間，Dr. E. Sartori の支援の元に3次元輸送ベンチマークを行い，その結果を *Progress in Nucl. Energy*, **39**, 119-284 (2001) に客員編集者としてまとめたが，当時は我々が作成した3次元有限フーリエ変換法コード FFT 3 にはプログラムエラーがあり，提案したベンチマーク計算を行うことができなかった。このたびの招待講演を行うために，FFT 3 コードを見直し，いくつかのエラーを修正して計算ができるようにし，3次元ベンチマーク

問題の計算結果が従来の球面調和関数法プログラムよりも高い精度で得られることを示せた。同時に，2次元のボイド問題で，球面調和関数法に対応する物質境界条件を使うことが精度の良い結果を得るために必須であることを FFT 2 による計算結果を使って示した。欧米の真似ではない研究を日本でも行っていることを示したかったが，目的は達せられたと思う。

### ヨーロッパソフトウェアプラットフォームの構築

フランス CEA の C. Chauliac は，“URESIM: A European Software Platform for Nuclear Reactor Simulation”なる表題で，現在，ヨーロッパの14の国の22の組織が参加して開発している原子炉シミュレーションのためのソフトウェアプラットフォームについて講演した。そこでは，特に安全性解析のために最新の炉心物理と熱流体モデルの結合計算や従来からある種々のプログラムを簡単に結びつけて使えるようにしてある。

ヨーロッパの炉物理コードシステムとしては，1990年代に作られたフランス，ドイツ，英国等により作られた ERANOS (The European Reactor ANalysis Optimized calculation System) が有名であるが，さらに参加国や組織を増やし，多くのコードを容易に使えるようにしたヨーロッパ諸国の努力には目を見張った。ヨーロッパ諸国は，フランス，ドイツ，英国等が協力してエアバス社を作り，米国の航空機分野の独占に対抗できるようになったが，原子力の分野でのこのような協力体制も大きな成果を上げるだろうと思う。

### 米国の原子核工学の高人気

米国のある大学教授の話では，米国の大学では現在，原子核工学の人気の非常に高く，学生も原子核工学を学ぶことを格好がよいことと思っている，人気が高い理由は卒業後の給料が高いからで，卒業生の最高クラスで，平均収入の約20%は高いとのこと。我が国では原子核工学だけではなく，理工系学部の人気が落ちているのが問題になっているが，米国の例を見れば人気を上げるのは極めて簡単で，就職先の給料を上げればよく，それをしないで精神論だけの我が国の現状は嘆かわしいことである。我が国も原子力ソフトウェアプラットフォームの構築を

筆者は30年前の1979年に英国のウインフリス研究所を訪問し，炉物理コードを開発していた Dr. Brissenden の話を聞いたことがある。当時はインターネットは影も

形もなかったが、彼によれば、英国の研究所や大学で作られた計算プログラムはすぐに1ヶ所に集められ、英国のどこの機関からも直ちに利用できるようになっていた、とのことだった。

筆者が1977年に旧西ドイツのカールスルーエ原子力センターにいたときも、炉物理コードシステムがあり、筆者が作った炉物理コードはそこに登録され、誰でもがすぐに使えるようになっていた。

それに反し、インターネットが発達した現在でも残念ながら我が国にはどこかの大学や研究所で作られたプログラムを他の大学や研究所で使えるようなシステムは作られていない。我々の研究室を初め、多くの研究室で作られた汗の結晶のプログラムは当時も今も誰も使うことはできず、それらを使ってその先の研究を行うことができない。

ヨーロッパでは国内で作られたプログラムを国内で利用するシステムはもちろん、上に紹介したように、諸外国で作られたプログラムも容易に利用できるプラットフォームが作られている。それはヨーロッパでの原子力研究の環境を大幅に向上させ、研究の進展を画期的に助けるだろう。

我が国ではこのような原子力コードの蓄積と共用が行われて来なかったのは、国の原子力関係予算の配分に携わった者がその重要性を認識できなかったためであろうが、極めて遺憾なことである。我が国の原子力研究が欧米に大きく立ち後れるようにならないためにも、ヨーロッパのソフトウェア研究開発環境を調査し、それに劣らない環境の構築に直に取りかかるべきである、とこのたびの国際会議で強く思った。

### 米国の大学の印象と各国の高等教育の比較

学会の帰途、ボストンのハーバード大学を見たが、美しい芝生の庭と、巨大な図書館には目を見張った。全長80 kmの本棚には350万冊の本があるとのこと。ハーバード大学は清教徒がプリマスに到着した16年後の1638年に教師一人と学生9人で始まり、今は2万人の学生が学ぶ総合大学に発展したとのこと。

ロスアンジェルスでは有名なカリフォルニア大学ロスアンジェルス校(UCLA)を見たが、美しい庭や木々を配した膨大な数の建物、広大なキャンパス(419エーカーの敷地内に163の施設)には驚いた。学部と大学院には合計36,000人が学び、図書館群には800万冊の蔵書があるとのこと。州立大学であるカリフォルニア大学にはバークレー校、デービス校、アーバイン校等10の分校があり、総学生数は191,000人もいる。

我が国の人口千人当たりの大学・短大等在学者数は23.3人である(文献 p.18)が、米国では36.5人と日本の1.6倍も多い。世界各国の高等教育の私立学校の割合は、日本74.6%、英国0.1%未満、フランス1.6%、ドイツ3.1%、米国25.5%と米国に比べても3倍も多く、我が国の公的な高等教育の体制は極めて貧弱である。(文献 p.78)

また、国内総生産(GDP)に対する高等教育への公財政支出比率は(文献 p.40)日本0.5%、ドイツ0.9%、英国0.9%、フランス1.1%、米国1.0%と、欧米先進国の僅か半分である。

### その他の感想

久しぶりに出席した国際会議で旧知の研究者と会えたのは大層うれしいことであった。*Annals of Nuclear Energy* の編集者をしている Prof. Williams は *Annals of Nuclear Energy*, 28, p.1783(2001)の書評で筆者の著書『原子炉物理』を高く評価されたが、ヨーロッパおよび米国の旧知の方々がその話をされ、8年も昔の記事を覚えて下さったのには感心した。

我が国では定年退官後に学会へ行くことは、そのような人があまりいないので気後れするが、米国では年齢による定年制がなく、給料は貰えなくなっても大学の部屋は使えるようだ。Prof. W.L. Wachspress の書かれた数値計算の本を若い頃に勉強したが、後年、水戸の国際会議で初めてお会いした。今はかなりの高齢であるが、この会議にも来られ、若い人に取り囲まれて楽しそうに話をしておられた姿は印象的であった。我が国のせつかくの有能な人材が、定年後はシンガポール等の外国でしか働けないのは人材の浪費である。

### 結論

#### (1) 計算プログラム利用環境の整備

研究成果を上げるためには、世界の最新の研究成果を文献やインターネットで速やかに知ることのできる環境が必要であるように、原子力分野での計算プログラムの研究開発のためには、国内の大学や研究機関で世界の最新の計算プログラムを利用できる環境の整備が必要である。また、そのシステムでは同時に、国内の各研究者が作ったプログラムは容易に登録され、他の機関の研究者が簡単に利用できるようにすべきである。

#### (2) 公的な高等教育機関の拡充

米国が世界一の経済力と軍事力を持ち、中国、インドや、韓国の経済発展が著しいのは公的な高等教育の充実にある。我が国は今厳しい経済環境にあるが、今こそ我が国の将来の生存を掛けて欧米先進国並み、またはそれ以上の公的な高等教育機関の拡充を行うべきである。

#### (3) 年齢による定年制度の廃止

人口の減少が危惧されている現在、年齢による定年制度は人材の浪費である。米国のように法律で年齢による定年制を禁止すべきである。もちろん、無駄な人件費の増大は避けるべきで、働きに応じた給与体系を再構築する必要がある。(2009年 7月10日 記)

#### —参考文献—

教育指標の国際比較, 平成21年版, 文部科学省.

[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/toukei/001/\\_icsFiles/afildfile/2009/01/30/1223117\\_1.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/001/_icsFiles/afildfile/2009/01/30/1223117_1.pdf)


 談話室

 原子力分野における「技術者倫理」と「安全文化」  
 最近の2つの講演から学ぶこと

技術士(原子力・放射線部門) 桑江 良明

最近、原子力分野の技術者倫理に関する2つの講演があった。一つは杉本泰治氏(NPO法人 科学技術倫理フォーラム代表)の講演<sup>a)</sup>であり、もう一つは大場恭子氏(本学会倫理委員会副委員長)の講演<sup>b)</sup>である。2人の講師に共通する点は、「外側から」あるいは「ごく近くから」原子力産業に接して、原子力分野の倫理の動向を見てきたところにある。そして、前者は冒頭、「どんなに優秀な人材を抱えた強力な組織にも、内側には見えないことがある」との切り出しで始まった。我々業界内部にいる者として、お二人の指摘をどのように受けとめ、そこから何を学ばよいのだろうか。

## 果たして「倫理」は消えたのか

## (1) 関心は「安全文化」へ(杉本講演より)

杉本氏は講演で次のように指摘した。

使用済燃料輸送容器のデータ改ざん問題の政府報告書('98.12)では、技術者の倫理の重要性について適切な指摘がなされていた。ところが、その後の報告書では、「倫理」が消えて「安全文化」に関心が移った(表)。当時、企業等でも同様の傾向が見受けられた。

なぜ、原子力業界から「倫理」が消えたのか。JCO報告もまた倫理を重視しながら(表参照)、そこに問題が潜在した。観念のみの倫理は、実務の役に立たない。関係者はそのことに気づき、倫理への関心を失った。代わって、これからは「安全文化」だ、となったようだ。

## (2) 反論は可能か

原子力業界で「倫理」が消え「安全文化」に関心が移った

表 政府の事故報告書の「倫理」「安全文化」  
(杉本氏講演資料の表を一部編集)

報告年月日	報告書(略称)	用語頻度(回数)		
		倫理	モラル (ハザード)	安全文化
99/12/24	JCO 報告 <sup>*1</sup>	30	10	12
02/10/17	東電報告 <sup>*2</sup>	1	0	9
05/4/28	関電報告 <sup>*3</sup>	0	0	34

<sup>\*1</sup>ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告, 原子力安全委員会ウラン加工工場臨界事故調査委員会

<sup>\*2</sup>原子力発電施設における自主点検記録の不正等に対する対応について, 原子力安全委員会

<sup>\*3</sup>関西電力美浜発電所3号機2次系配管事故最終報告, 原子力安全委員会

とする杉本氏の指摘に対して、業界内部の者としては出来ることなら反論したいところである。「『技術者倫理』は『安全文化』に包含され、表現としては消えてもその重要性について関係者間では十分認識されているはず。その証拠に…」残念ながら筆者の反論もここで止まる。「内側には見えないこと」があり、外からの指摘を謙虚に受け入れるところからスタートすべきであろう。

「倫理」から「安全文化」に関心が移ったとされる時期(1998~2005)には、学会では倫理規程が制定され、また、「倫理」を標榜する技術士資格には原子力・放射線部門が誕生している。しかし、倫理委員会の先進かつ精力的な取組みが他学協会等から高い評価を得ているにもかかわらず、原子力の実務の現場で学会倫理規程が話題に上ることは少ない。また、技術者個人の自律性に重きを置く技術士/原子力・放射線部門は徐々にその数を増やしているものの、やはり実務の場での具体的活用についてはようやく議論が始まったばかりである<sup>1)</sup>。このような状況からも杉本氏が指摘する、「倫理」から「安全文化」への関心の移行という兆候が見て取れる。

## (3) 「技術者倫理」と「安全文化」

その後(2007年)、「発電設備総点検」の結果を受け、「安全文化醸成のための体制」が、原子炉設置者が定め国に届出る保安規定の記載事項とされた。このことが、さらに関係者の関心を「倫理」から相対的に「安全文化」へ向かわせているように筆者には思える。

しかし、そもそも「倫理」や「文化」は自主的なものではなく、政府報告書等から「倫理」の文字が消えようが、また「安全文化」のみが規制対象となろうが、本来は、個人や組織がそれにより影響されるべきものではない。「安全文化」に対しては「醸成」の言葉が用いられる。これは、「文化」というものが、外部からの力によるのではなく、内部から沸々と生まれる力、すなわち「発酵作用」とでもいうべき働きによることをうまく言い表している。組織の場合、この「内部から生まれる力」の源は間違いなく構成員一人一人の意識であろう。そして、業として技

<sup>a)</sup>「原子力業の倫理とコンプライアンス」(2009.3.23, (社)日本技術士会主催シンポジウム「企業と技術者の倫理とコンプライアンス」)

<sup>b)</sup>「原子力における倫理の意義と技術士の役割」(2009.5.15, (社)日本技術士会原子力・放射線部会例会)

術を扱う組織であれば、それは技術者一人一人の「倫理」にほかならない。このように考えるなら、技術者倫理から目をそらしたままの安全文化の醸成などはありません。これは今さら筆者などがいうまでもなく、「安全文化とは、(安全問題に最優先の注意が払われなければならないという)個人や組織の特性と姿勢の総体である。」とするIAEAの定義などからも自明である。

「発酵」には“種(酵母)”と“適度な環境”，そして“時間”が必要である。学会倫理規程や技術士/原子力・放射線部門などが種となり，組織が環境を整えなければ安全文化は醸成されない。また，政府報告書等の指摘や国の規制により一朝一夕に実現するものでもない。

#### 実務に生きる技術者倫理(杉本講演より)

原子力のコンプライアンス問題について，杉本氏は，コンプライアンスの義務は、「規制される側だけでなく，規制する側の行政庁にもある」という双方向の義務であること(学会誌，2008年9月号「時論」参照)，そして，「法令の形式的順守にとどまらず，法令の趣旨が生きるよう心がける」倫理が必要，と述べた。

そのうえで，「この国で，一つの産業が倫理に取り組むのは，ほとんど前例のない，困難な事業である」とみる。わが国では，倫理とは何かについてのコンセンサスがなく，倫理について焦点が定まらない。「倫理規程・倫理担当役員・ホットライン等の形式を整えるのみ，あるいは，観念のみの倫理(=形式的・観念的な倫理)や，『公務員倫理法』のように，本来の職務ではなく付随行為(金銭・物品の贈与など)についての倫理(=消極的倫理)」が，「本来の職務遂行に関する倫理(=積極的倫理)」を妨げている。企業などで「成功している例もあるが他へ移植可能な普遍性のあるシステムは育っていない」。

倫理には旧来，「これを守っていれば安心」という心よりどころとしての性格があり，技術者倫理もまた，人に優しい，等身大の，わかりやすいものであるべきである<sup>2)</sup>。このような問題意識から，「企業などで実務に従事する者に適した倫理として再構成する必要がある」。そして，「原子力業がこの国の社会に適した倫理を見いだし，社会的信頼の確保という課題について他の産業にとってもモデルとなるような展開を期待したい」と結んだ。

#### 原子力技術者への期待(大場講演より)

大場氏は，「倫理とは何か」から技術者倫理一般，そして原子力界での取組み，学会倫理規程および倫理委員会の活動，事故事例などを幅広く解説した。単に「技術」というだけでなく，特に「原子力」技術の特徴を丁寧に見ていくことから始め，我々原子力技術者さらには原子力・放射線部門技術士への期待を述べた。

「一般の人から最も『見える』『感じる』『原子力』とは(原

子力分野に働く)“あなた自身”である」との指摘は，最も印象に残るものであり，参加者に貴重な“気づき”を与えた。そのうえで，特に技術士への期待として，所属組織のみに埋没するのではなく，「原子力ムラ」あるいは「閉鎖的」といわれる職場文化を打破するために，技術士の特徴を活かし，組織の垣根を越え，さらには技術部門をも越えて技術士同士が連携することや，技術士の資格や活動をより一層原子力界へアピールすること，さらに「技術士の誰々(個人)」として直接一般の方々と対話(コミュニケーション)するなど社会との接点で活躍すること等を求めた。

#### 実務への倫理の浸透・定着に向けて

大場氏の講演後に講演者も交え，参加者(主に「技術士」)による討論会を行った。討論のテーマは，「原子力の実務において技術者倫理を浸透・定着させるには」。

討論会は，進行役を任じられた筆者の期待通りに見事に発散した。討論を通じて改めて感じたことは，同じ技術士(しかもほとんどが同部門)でありながら，所属組織や立場，経験の違いにより「技術者倫理」や「安全文化」に対する見解に少なからず差異があるということである。これは，技術士に限らず技術者には，(それを「誇り」や「倫理」と呼ぶか否かは別として)それぞれに技術者としての思いがあることの現れであり，至極当然のことである。そのことにお互いが気づき，そして新たな倫理的価値や視点を共有するところに，技術者倫理をテーマに討論やケーススタディを実施する意味があるのだろう。参加者からは，「時間が足りない」「同じテーマでもう一度」「身近で切実なテーマを選び，組織横断的なケーススタディを」などうれしい反響や提案があった。

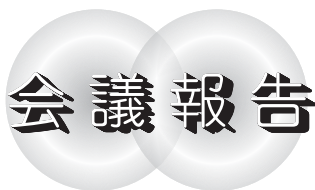
#### 終わりに

2つの講演は，我々自身の気づかない多くのことを指摘した。しかし，我々がそれを従来どおりに受身の講演のままとするならば，相変わらず「観念のみの倫理」で終わる。大学等での倫理教育と異なり，我々には経験にもとづく思いがある。「倫理」を意識に刻み込むために欠けているのは，それらを吐き出しぶつけ合うことではないのか，と試行的に実施した討論会を経て思う。技術士会/原子力・放射線部会では今後も継続的にこのような場を設けることとしたい。技術士に限らず，学会員を始め原子力分野に働く多くの技術者の参加を期待する。

#### —参考文献—

- 1) 桑江良明，“原子力分野における技術士資格の有効性を考える”，火力原子力発電，60〔4〕，64～67(2009)。
- 2) 杉本泰治，他，技術者倫理—法と倫理のガイドライン，丸善，(2009)。

(2009年 5月27日 記)



## FISA 2009会議

Seventh European Commission Conference on Euratom Research and Training in Reactor Systems

2009年6月22～25日(プラハ市, チェコ共和国)

### EURATOM 内の国際協力をめざして

EURATOM 関係機関が集まり、EC の FP7 予算(第7次研究枠組み計画)によって実施されている原子力研究開発の進捗状況を報告する会議、FISA 2009(Fission Safety)がチェコのプラハで開催された。参加者は中国からの8名を含む総勢450名であり、日本人の参加は ENEN (European Nuclear Education Network) の久住氏と私の2名であった。

Cooperation or Competition? この会議はまさに EURATOM 内の国際協力を目的として開催しているものの、水面下での各国の利害関係は極めて複雑である。「第4世代炉はナトリウム冷却高速炉を中心に」

会議初日には、いくつかの基調講演があり、EC の Z. Stancic 氏による地球温暖化の問題や原子力カルネッサンスを歓迎する講演とともに、GenIV、ITER や原子力関連の人材育成など、国際協力の動向や展望が述べられた。一連の基調講演の中で最も印象的であったのは、EDF の Y. Bamberger 氏の講演である。GenIV 炉としてはナトリウム冷却高速炉(SFR)を中心として進めるべきであり、原子力発電所からの電力によって水を電気分解して水素製造を行えば、CO<sub>2</sub>の低減にも貢献できるとともに次世代の水素エネルギー社会を安定して構築できると発言していた。各国で発電以外の原子力エネルギー応用研究を進めている段階で、主要ステークホルダーである EDF がこのように発言したことは衝撃的であった。

### EDF の研究規模の大きさに圧倒される

2日目には、各研究分野の代表者から進捗状況報告があった。EDF の Abdou Al Mazouzi 氏は、高経年化研究の進捗状況を報告していたが、シミュレーション分野の研究だけで350名の研究者を抱えているとのことであり、研究規模の大きさに圧倒された。第一原理計算による圧力容器の SCC 解析から、コンクリート構造材料や有機材料にいたるまで、様々な材料の劣化挙動を数値計算によって解析しようと取り組んでいる。また、CEA の C. Valot 氏は、ウラン酸化物や炭化物の第一原理計算

によるシミュレーションと熱力学挙動に関する比較研究を、同じく CEA の S. Bourg 氏は、JAEA が開発した抽出剤 TODGA による PUREX ラフィネートからの全アクチノイド回収について、ATALANTE (MA 研究施設) で実施した最新の研究成果を発表していた。これら基礎研究は、CEA や EDF を中心に、EU 諸国から様々な研究者が参加することによって進められていた。また、GenIV 関連では、SFR に関する研究を CEA の G.L. Fiorini 氏が報告し、ガス冷却高速炉 GFR については AMEC-NNC の R. Stainsby 氏、熔融塩炉に関する研究については CEA の C. Renault 氏から報告があった。FP7 の枠組みとして、日本との共同研究では、FZK の J. Knebel 氏による加速器駆動システム(ADS)関連の研究に JAEA が参加していることや、FZK の T. Schulenberg 氏による超臨界水冷却炉に関する研究で、東京大学との連携が紹介された。

### 競争と協調を使い分けるフランス

3日目には、原子力関連の研究者育成に関する取組みが CEA-INSTN の J. Safieh 氏によって紹介され、原子力機構や東工大も参加している ENEN が、今後の人材育成に多大な貢献ができることを紹介していた。また、CEA の D. Iracane 氏からは Jules Horowitz 炉の現状紹介があり、照射試験炉を中心とした共同研究の重要性が強調された。この最終日の午後には、これまでの研究状況について講評が行われ、その場で熔融塩炉の研究を今年末で終了することが発表されたほか、個々の研究内容にも踏み込んだ解説が行われた。特に、シミュレーションと実験の連携強化や MA 分離については実用化を目指すようにとの強い指示があった。SFR については、中国 CNNC の Sun Liya 氏から中国における原子力研究開発状況の報告があり、中国の高速実験炉が本年9月に臨界を迎え、来年には発電を開始するとのことであり、さらなる EU と中国との共同研究や情報交換について議論されていた。フランス政府や原子力産業界はしたたかであり、自国の収益につながる研究開発は国際競争 Competition、リスクが大きく遠い将来を議論する研究投資は、国際協力 Cooperation を中心として進める傾向が強い。日本も国際協力のみではなく、国際競争を重視した研究開発方針が必要であり、その方針の中で conflict を起こさせないことが大切であるように感じられる。

(日本原子力研究開発機構パリ事務所・平田 勝、  
2009年6月27日記)





## 学生団体 STEP

東京大学工学部システム創成学科  
環境・エネルギーコース  
学生団体「STEP」サブ企画リーダー

大 中 温

### 1. 私たち STEP の目指すもの—Sust-energy

「学生団体 STEP」は、東京大学工学部システム創成学科環境エネルギーシステムコースの学生を中心に、2008年7月に発足した団体です。環境・エネルギー問題を広く扱っており、現在は35名のSTEPメンバーとともに、大阪大学、九州大学、同志社大学、早稲田大学の学生団体と連携し、総勢70名弱による、STEP理念に基づいた全国での活動を行っています。

STEPの理念、それは「Sust-energy (Sustainability of Energy) 社会」という、学生の描く未来ある社会像を広く世間に知ってもらうこと、そしてSust-energy社会実現への道筋を提案することです。

では、Sust-energy社会はどんな社会なのでしょう？

19世紀後半の産業革命以降、私たち人類の文明は、数億年もの長い時間をかけて地球に貯えられてきた化石資源を、極めて短い期間で大規模に燃やし、大量の温室効果ガスを大気中に排出してきました。現代における人類の活動スタイルは、その規模とスピードにおいて、地球がその自然プロセスの中で対応可能な限界を明らかに超えています。今後ともこの地球システムを保持していくためには、可及的速やかに大量の温室効果ガスを排出する現在の活動形態を見直し、さらに、化石燃料のような枯渇性エネルギー資源から再生可能エネルギーおよび原子力エネルギーへの代替を進め、それぞれのエネルギー源の長所を適材適所に最大限活かすことによって、将来長きにわたって「持続可能な」エネルギー利用を追い求めていく必要があります。

しかし、私たち学生が描くのは、上記の理想を達成するために人間の生活や活動が制限される社会ではありません。

人々が地球に過剰な負担をかけることなく、しかし、エネルギーで不便することなく、しかし、地球に過剰な負担をかけることもなく、自分のライフスタイルを「自由に選択できる」社会。そして、近未来的生活を送る工業集約型コミュニティと、地元産業を中心に発展した共生型コミュニティが共存しており、そのコミュニティ間を結ぶネットワークが形成されている社会。

それこそ私たちが目指したい明るい未来であり、STEPが名付けた、Sust-energyという理想社会像なのです。

### 2. STEPの活動—学生環境・エネルギーフォーラム

今年、2009年度東京大学五月祭(5月30・31日開催)では、昨年度を上回る内容・規模を目指し、「学生環境・エネルギーフォーラム」を開催しました。企画へ賛同し集結した全国の学生たちとともに、一般の来場者の方に向けた環境・エネルギー問題への学生の意見の発信、および啓蒙活動を2日間にわたり行いました。

#### (1) 五月祭1日目

1日目は、三菱総合研究所理事長(前東京大学総長)の小宮山 宏氏により、「原理と現実とビジョンと政策」という題目のもと、環境・エネルギー問題における有識者という立場から、現在の日本のエネルギー政策についての見解を述べていただきました。

#### (2) 五月祭2日目

2日目には、本企画の目玉、「学生によるエネルギー戦略案の提言」を行いました。冒頭にSTEPの理念として掲げた、Sust-energy社会の構築に向けた2つの具体的目標、「エネルギー安全保障」と「低炭素社会の実現」の達成を目指し、エネルギー需要、エネルギー供給、資源確保の3面からの検討を行い、東京大学、大阪大学、九州大学、同志社大学、早稲田大学の学生たちによる、半年以上にわたる議論の集大成であるエネルギー戦略案を提示しました。電気自動車の普及や省エネ推進のための戦略案、そして、2050年における電力供給における再生



STEPメンバー勢揃い(前列右端が筆者)





ワークショップのひとつコマ

可能電源50%、原子力発電50%達成という大胆な構想とその実現へ向けた戦略は、多くのご来場者の方の興味と関心を得ることができたものと思っています。

以上のような2日間にわたるフォーラムでは、最大350人収容という大きな会場へ、たくさんの方にご来場いただきました。また、五月祭企画の人気投票において、学問・展示・実演部門において3位という栄えある順位をいただくことができました。

### 3. STEPのこれまで

学生団体STEPは、まだ発足して間もない団体であり、後に紹介する学生環境エネルギーフォーラム開催への取組みを皮切りに活動を始めました。しかし、STEP誕生の前年2007年度には、その前身である「チームマイナス7%」による活動が行われています。チームマイナス7%は、東京大学五月祭にて、「Channel to Earth—科学と理系思考による温暖対策」と題した企画のもと、地球温暖化問題解決に焦点をあてた展示、および発表にて、社会問題の総合解決を目指す独自の超長期ビジョン、「E-RISE」の提案を行いました。その成果をまとめた論文「エネルギー技術戦略の検討」は、(財)エネルギー総合工学研究所募集の大島賞懸賞論文において、今年(2009年)の最優秀賞をいただいています。

### 4. STEPのこれから

環境・エネルギー問題についてはより深く、掘り下げなければならない課題がまだまだ山積しており、学生としてもっと広く、もっと積極的に社会へ向けた意見を発信していきたいと、学生団体STEPは考えています。私たちは、今やっと活動の一步を踏み出したばかりです。これからは、今回の企画で得た全国の大学とのネットワークを生かし、Sust-energy 社会という理想像の普及と、その構築に向けた戦略案の発信の場を全国に求めていきたいと考えています。

(2009年 7月2日 記)

## ■お知らせ■

### IAEA 版 JCO 臨界事故調査(英文)の発表について

「JCO 臨界事故国際調査協力」特別専門委員会  
JCO 臨界事故の10周年(2009年9月30日)記念日も近い。この事故については、すでに本学会としては、日本原子力学会 JCO 事故調査委員会を設置して、継続的な作業を行いその成果は、すでに「JCO 臨界事故・その全貌の解明」(A4判、約300頁、2005年2月、東海大学出版会刊行)として発表されている。

その後、本件についての IAEA での調査活動に対しても、本会は「JCO 臨界事故国際調査協力」特別専門委員会を設置して全面的な協力を行ってきたが、その成果がこのほど英文で、A4判約130頁の形で公表された。経緯や内容は別途に報告される予定。骨子には上記の本会委員会の報告が基礎として採択されているが、前記の日本語判には収録されていなかった医療関係や国際的な批判等の重要な補充が含まれている。

IAEA の予算的な制約で、発表は次のように IAEA のホームページに掲載され、そこからダウンロードする形で利用できる。もしその方法で入手困難なときは、本学会委員会内部資料として用意されたものに若干の余裕があるので、学会事務局気付けで、上記委員会幹事まで連絡されたい。http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/iaea-response-system.htm に Working Material として本文と図・表が2部に分かれて掲載されており、両方をまとめて1編として利用されたい。



#### ④ 原子力の“グローバル”展開

敦賀市 秋田 晶



将来を見ないとはいけません。

敦賀を含む福井県若狭地区には、原子力発電所が14基あります。それらを40年後にコンクリート製のデッキい墓標にしてしまうのかどうか…私の孫の世代にこの難しい課題が出てきます。それを今から考えることが、私たちの未来世代への責任です!! 原子炉の廃炉、解体なんてそう簡単にできることではないですし、仮にできてもその跡地利用は難題です。今ある場所とものをもっと有効に活用していく知恵が必要なのです。

私は、ここ敦賀・若狭地域を、世界の、少なくとも東アジアの原子エネルギー拠点にするべきだと思います。いま、福井大学では原子力の国際化を目指していますし、東京でも新しい大学院の創設や、学部教育の復活があります。しかし、国際化の中身がどこまであるのかは疑問です。少なくとも、私が見る限りにおいて、「もんじゅ」を国際的な研究拠点にするとはいっても、高浜、大飯、美浜、敦賀などの現行の軽水炉の将来と国際化の話はほとんど聞こえてきません。原子炉の国際展開も、ものをつくって売り込む話ばかりです。いまある実用に供しているものも、国際化できるのではないですか。

「もんじゅ」の将来は不透明です。高速炉自体の将来も同様。私は専門家ではありませんが、30年、40年後に高速炉が軽水炉に取って代われるとは思えません。40年後は、遠い未来ではなく、間近なのです。もんじゅの空白の12年だって、意外にあっという間に過ぎました。

40年後、現行の敦賀・若狭軽水炉群をいかに活かすか…地元から声を上げて考えようではありませんか。そして、日本、もしくはアジアに貢献できるような原子力拠点構想へ発展させようではありませんか。

行政の方面からすれば、新しいことを起こそうとするには、県知事の許可が必要。しかも県知事の許可までに、幾重にも行政のバリアがある。バリアフリーではないのです。

大学の“国際”、“グローバル”の冠も、中身はおおむね、米国やEUの大学や研究所と連携することが、グローバル化ということになってはいないでしょうか？私はローカルとグローバルをうまくつなぐ、いわば“グローバル”な視点が欠けていると思っています。外ばかりでなく、内を、地元をみて、そこから世界に持っていけるもの、世界が注目してくれるものを創っていかなければなりません。

敦賀・若狭地区には、加圧水型軽水炉のすべての世代がそろっています。沸騰水型も高速炉「もんじゅ」もあります。今から思えば、新型転換炉「ふげん」が廃炉になっ

たのは実に情けないことです。経済的に合わないという点では仕方ありません。でも政策的に「ふげん」を単に大間実証炉への通過点とのみとらえて廃炉としたのが情けないのです。橋渡しとしての役割がなくなった「ふげん」に廃炉ではなく、もう一度別の役割を与えて活かす、という発想転換が必要だったのです。しかし、当事者の動燃はもちろん、学者も何も発言せず、他人事のように傍観した末の廃炉。「もんじゅ」が同じ末路をたどらない保証がありますか。軽水炉群の末路も透けて見えてきます。

さて、残った敦賀・若狭軽水炉群を廃炉にするわけにはいきません。『廃』という言葉には、負のイメージ、壊れた、役立たず、悪いものというイメージがつきまといま。過去40余年前、地元は誘致時に村を二分する運動に懊悩し、運転開始後は、様々な故障や事故と遭遇し、そのたびに風評被害と戦ってきました。その、原子炉群とつきあってきた地域社会の記憶や経験、さらに、原子炉の保守メンテナンスのノウハウ、原子炉群そのもの、それらを総合し、グローバルに活かす。これが私の考える『敦賀・若狭原子エネルギー拠点構想』の理念です。

2020年までに9基新設するといいますが、新たに立地の用地を獲得するのは夢物語だと思います。いまあるもの、老朽化していくものを大切に、ポジティブなイメージと価値を創り出す。それがアカデミックな人たちの責任でもあると思います。

社会と科学技術ということでは、その最先端を走っているのが原子力です。しかし、その認識がなく、暗く悲しい話ばかりしている現実に立地地域の私たちは怒りさえ覚えます。10数年前にケーブルカナベラルに行きました。まるで観光地のように見学料を取っていました。最先端の科学技術がこれでいいのかと、違和感がありました。が、少しして、これだと思いました。こういう発想の転換が必要だと。日本人は、ものづくりと同時にものを大切にしてきました。廃炉という負の遺産にせず、光り輝く活力源にするために皆さんの知恵を貸して頂けませんか。そうでないと、“もったいない”と思います。

また同時に、敦賀短期大学に原子力の研究センターを併設できないかとも思います。折角ある大学を活用して今以上に地域に役立てないと大変もったいないと思います。(2009年 8月19日 記)

秋田 晶(あきた あきら)

敦賀市蓬萊町『株秋田船具店』社長。戦前より、敦賀港で船具商を行う。家族は、家内と息子1人・娘2人。

趣味：旅行

## ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

### 科学技術を見据えた平和構築—永井 隆博士の願いがオバマ演説に

科学ジャーナリスト 佐藤 年緒

日食の観察も、甲子園も、雨にたたられ、台風や地震も続き……と、自然の力に翻弄された夏。政権交代が焦点の選挙戦の最中、広島・長崎では平和式典や核兵器廃絶運動に、未来世代への「希望」が生まれていたのが印象に残る夏だった。

記者時代の駆け出しは被爆地・長崎だった。その後、経済記者として電力会社、社会部記者として原水禁運動取材し、さらに科学記者として原子力行政や地球温暖化問題をカバーするなど、折々「原子力」の関連テーマに向き合ってきた。1951年生まれの後世代とはいえ、原子力を考えるときの思考の軸は8月6日、9日に戻る。

職場の時事通信に永井誠一(まこと)さんという先輩記者がいらした。長崎大学医学部の医師として、被爆者への治療に力を尽くした永井隆博士のご子息。『長崎の鐘』『この子を残して』といった作品を遺したことで知られる永井博士の、まさに遺児の一人であった。ベトナム戦争時にサイゴン特派員としても活躍し、定年後はふるさとに戻って「永井隆記念館」の館長をされた。2001年4月に66歳で亡くなられたが、その前年の秋、誠一さんから私に一冊の本が届けられた。書名は『永井隆』(発行サンパウロ)で、文字通り、父永井隆の生涯を綴ったものだった。

鳥根県松江市出身の永井博士が、医学を修学した長崎市で、敬虔なカトリック信者となっていた足取りは興味深かった。また博士は原爆投下の以前から、放射線専門医師の職業病である白血病となり「余命3年」と診断されていたが、原爆投下後、その身を押し被爆者の救済と治療に当たり、さらに被爆の医学的記録の作成に尽力した。病床に伏してからは自身の行く末を冷静に捉え、子どものために、また「平和」を訴えるために、多くの作品を遺した。科学的な探究心と「己の如く人を愛する」信仰の持ち主だった父を見つめ直した作品は、誠一さん自身の「遺言」にもなってしまった。

ジャーナリズムはこれまで「原水爆禁止運動」には労働運動の側面があることからどちらかというと政治・社会問題としてとらえてきた。担当する記者も平和運動は社会部、軍縮交渉は政治部。一方、原子力の「平和利用」、つまり原子力発電になると、経済部や科学部がカバーすることが多い。どの担当でも原子力に対

する科学的な理解が必要であり、それらが深く関連し合っているだけに統合的に見る目を持つことが大切であろう。しかし、その科学的な認識が十分されているだろうか。

もちろん科学技術の範疇に限定される問題だけでもない。1994年4月、高速増殖炉「もんじゅ」が初臨界に達したときに、北朝鮮から「H2ロケットの打ち上げ成功と併せて日本はこれで核兵器の開発準備が整った」と警戒する声明が発表されて驚いたことがあった。原子力も「平和利用」とは見られない国際社会の現実がある。この春、北朝鮮が相次いでミサイルを発射し、核実験を繰り返したように、宇宙開発と原子力は軍事技術であって、原子力発電が核拡散のリスクを背負うことを痛感させられた。

北朝鮮の核実験のあとに、オバマ米国大統領はプラハで、核兵器を使用した唯一の保有国としての道義的責任に触れて「核のない世界」の実現に向けた決意を語った。その演説が、広島・長崎の人たちに勇気を与えたことは両市長の支持演説でも明らかだった。

オバマ大統領は1月の就任演説で「科学を本来のあるべき姿に戻す(We will restore science to its rightful place)」と語った。ブッシュ前大統領が停滞させていた生命科学研究や地球温暖化防止への否定的な政策からの変更と理解されているが、一連の演説で、科学技術の成果を福祉・医療に活用することや、温暖化など地球規模の脅威に挑戦することを表明していることにも注目したい。

科学技術を正当に位置づけて、福祉や人類の平和に役立てる決意。それは放射線医師でもあった永井隆博士の願いと共通ではないだろうか。長崎では、先輩記者の誠一さんの亡きあと、その長男徳三郎さんが永井隆記念館館長を嗣ぎ、平和を訴え続けている。

(2009年 8月14日 記)

佐藤年緒(さとう・としお)

(独)科学技術振興機構エキスパート  
元時事通信編集委員。科学技術や環境問題取材。現在、(独)科学技術振興機構『Science Window』編集長、日本科学技術ジャーナリスト会議副会長。

