

### 巻頭言

- 1 東日本大震災と原子力発電に  
思うこと 泉田裕彦

### 時論

- 2 福島事故と世界の対応  
世界は福島の事故から、真剣に学ぼうとしている。  
鈴木達治郎
- 4 ANS 2011年6月フロリダ・ハリウッド  
緊急安全対策が施された原子力発電所は、  
迅速に運転再開すべきである。  
松井一秋

### 解説

- 14 福島第一原子力発電所事故の  
分析と今後に向けて  
福島第一原子力発電所事故の終息のためには  
最初の13日間の重要な分岐点であった。この間に、  
いつ、どこで、どのようなことが起きたのか。被害と  
影響を最小限にとどめるには、何ができたろうか。  
事故進展と事故対応を検証する。  
山口 彰
- 32 JCO 臨界事故の教訓は生かされたか  
—原子力防災について考える  
JCO 臨界事故の教訓をもとに見直された原子力災害  
への備えは、今回の福島原発事故がその検証の場とな  
った。  
中島 健



陸揚げされた汚染水の浄化装置「サリー」  
(東京電力 HP)

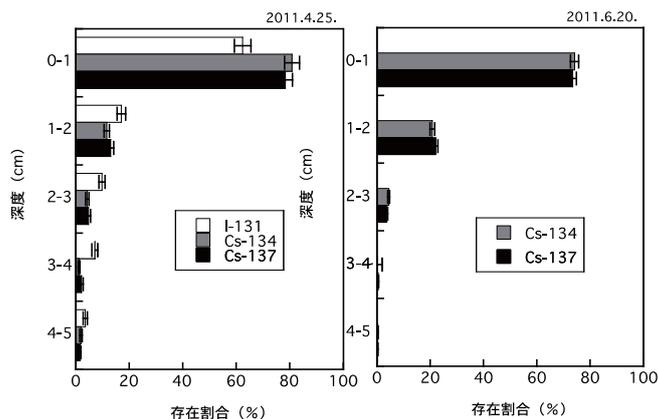
表紙の絵 「暮れなずむ淀屋橋」 製作者 平良 武二

【製作者より】 大都会の中心地淀屋橋の交差点、多くの人々が往来する。退社時の夕暮れ時、街灯やビルのあかりが灯り出す。空は赤く染まり、街灯は川面に映え、街のにぎわいに花を添える。水の都大阪中之島の夕暮れ時の風景です。

第42回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

### 解説

- 21 福島第一原子力発電所事故による放射性物質の汚染からの環境修復に向けて  
「原子力安全」調査専門委員会クリーンアップ分科会は環境修復に向けて、放射線モニタリングセンターと環境修復センターの早期の設置、環境修復戦略と環境修復技術プログラムの作成を提言した。  
井上 正、高橋史明、諸葛宗男
- 27 土壌における放射性核種の挙動特性  
福島第一原子力発電所の事故により、放出された放射性核種は、土壌中でどのような挙動をしているのか。それは、農作物にどのぐらいの割合で移行するのか。  
内田滋夫、田上恵子、石井伸昌



放医研敷地内における放射性核種の深度分布の変化  
(4月25日と6月20日に採取・測定)

- 6 福島原発事故についてのANSの受け止め方—ANS主要メンバーはこの事故情報をどう受け止めたか。

福島事故では、詳細な情報の提供が遅れた。そのことによる不満と失望の声を、数多く聞いた。

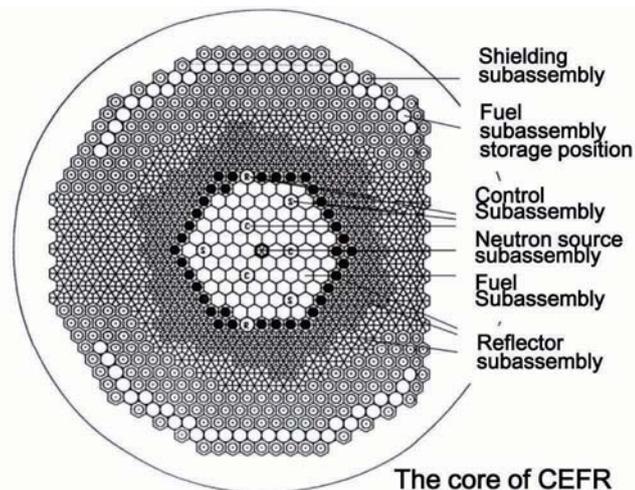
二ノ方 寿

## From Abroad

本誌では今月号より、海外からの寄稿を随時、掲載します。第1回目となる今回は、昨年7月に初臨界に達した中国初の高速中性子炉(CEFR)の初期炉心における性能試験結果について、China Institute of Atomic Energy(中国原子能科学研究院)の Xu Mi 氏らによる解説を紹介します。

### 37 Reaching First Criticality and Physics Experiments in the CEFR

Xu Mi, Yu Hong, Hu Yun, Chen Yiyu



## 解説 「匠」たちの足跡 第8回

### 47 BWR クラッド問題の解決と水化学対策への貢献

我が国初の商用BWRである敦賀1号機は、運転開始直後からクラッドが多量に発生し放射線量率が上昇したが、水化学面の改善によりこれらの上昇を大幅に抑制し、被曝低減など発電所の運営改善に貢献した。 目黒芳紀

## 解説

### 53 産官学による原子力人材育成ネットワークの設立—原子力界を支える人材の確保をめざして

今後の我が国の原子力界を支えていく人材の確保をめざして、国内の産官学の連携・協力による「原子力人材育成ネットワーク」が設立された。 村上博幸

## ATOMOS Special

### 世界の原子力事情(16) 東欧編

### 56 ブルガリア

—ベレネ原子力発電所を建設中

杉本 純

## 8 NEWS

- 原子力安全委、ストレステスト実施を要請
- 福島県、原子力脱却の復興ビジョン
- 政府、耐性評価制度導入で統一方針
- 菅首相が「脱原発依存」表明
- 第2回福島事故検証委が開催
- 東電、福島の津波影響の調査結果まとめ
- WiN-Japan、年次大会で福島事故を紹介
- 海外ニュース

## 連載講座 第2回 材料が支える原子力システム

### 42 高速炉炉心用改良ステンレス鋼

今回は軽水炉の多くの場所で使用されているステンレス鋼について紹介した。今回は高温、高速中性子や冷却材ナトリウムという過酷な環境にさらされる高速炉で使用される炉心用改良ステンレス鋼について紹介する。

井上利彦, 山県一郎, 浅賀健男

## 談話室

### 58 「原子力がひらく世紀」改訂3版の編集を終えて

熊谷 明

### 60 飯舘村訪問記—みんなで作っぺ!

澤田哲生

## 26 From Editors

- 36 第19回原子力工学国際会議(ICONE-19)のご案内
- 62 会報 原子力関係会議案内、主催・共催行事、人事公募、記事訂正、英文論文誌目次(Vol.48, No.9)、和文論文誌目次(Vol.10, No.3)、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

学会誌記事の評価をお願いします。 <http://atomos.aesj.or.jp/enq/>

学会誌ホームページはこちら

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

# 東日本大震災と原子力発電に思うこと



新潟県知事

泉田 裕彦 (いずみだ・ひろひこ)

昭和62年通商産業省入省，資源エネルギー庁に配属，通商産業省産業政策局，資源エネルギー庁石油部精製課長補佐，国土交通省貨物流通システム高度化推進調整官などを歴任，平成16年10月新潟県知事就任。

はじめに，今回の東日本大震災では大変多くの方が犠牲になられ，また，多くの方が被災され避難生活を送られておられますことに，心からお悔やみとお見舞いを申し上げます。

3月11日午後2時46分の東日本大震災発生直後から，新潟県は，福島県をはじめとする被災県を支援する準備をし，その日の内に職員を宮城県と福島県に向けて出発させました。併せて，福島県に向け食糧などの支援物資の輸送を開始しました。12日の日中には福島第一原子力発電所1号機で水素爆発が発生し，福島県などからバラバラと避難された方が来られるようになり，避難指示区域内から避難された方の健康保護を目的としたスクリーニング体制を整え，県内の市町村の協力を得ながら避難者受入を行い，現在も継続して支援を行っています。これまでに受け入れた人数は，最多で1万人を超え，現在も約7,500人が新潟県内に避難されています。新潟県では近年，新潟豪雨災害，新潟県中越地震，新潟県中越沖地震と立て続けに災害に見舞われ，全国の皆さんから暖かな支援を受けました。その経験を生かし，被災地を支援することが，過去の支援の恩返しになることだと考えています。

国の制度では被災した自治体がそこで被災した被災者を助けるということしか想定していませんでした。県境を越えて避難されてきた方を支援するという仕組を今の法体系は想定してないということです。今後は，国全体で大規模な災害にどう対応するかという，自治体の枠を超えた危機管理法制が必要だと思います。

次に，東京電力福島第一原子力発電所事故についてですが，事故発生直後から情報がほとんど出てこなかったと思います。何よりも困ったのは，福島県内のモニタリングポストのデータがまったく入ってこなかったことです。これは，原子力発電所にトラブルがあった場合，真っ先にほしい情報ですが，国や東京電力からはまったく来ない状態で，完全に目隠しされた状況の中で，手探りの対応を求められました。今回の事故では，現場から全然情報が出ず，記者会見を官邸，原子力安全・保安院，東京電力で別々にやっています。なぜ現場の福島から情報を出せないのか。官邸は，事故への対応や方針を決定すればいいのであって，官房長官がいちいち事実を説明する必要はないのではないかと思います。

中越沖地震において新潟県の私たちが経験した，原子力発電所の情報が即時に出ない状態，地域の住民の側に立った原子力行政がなされていないということが，今回も繰り返されたと感じています。原子力安全・保安院は，経済産業省の一機関という位置づけであり，職員も産業政策として普段は企業としかお付き合いをしてこなかった職員が要職を占めています。結果として，事業者行政に偏重している側面があり，安全確保は電力会社を規制するという意識しかありません。万が一の時，住民や地域の安全を如何に確保するのかという点はおどろきともいい状態です。

今回の震災では，地震発生の約15分後に柏崎刈羽原子力発電所から「異常なし，正常運転」という情報が来ましたので，県はすぐに公表できました。適切で透明な情報がいち早く出たと思っています。このように，情報をそのまま迅速に出すという体制にすれば，素人の政治介入の余地がなくなります。全国の原子力発電所で徹底すべきと思っています。まず情報を出し，その上で政治決断を伴う対策を考えるというかたちにすべきだと思います。

現実に新潟県内に柏崎刈羽原子力発電所があり，一方で地震のリスクが常に存在するわけです。そのような中，新潟県知事として，今回の未曾有の事態に直面し，原子力発電所のどこに脆弱性があるのか，国が福島で起こった事態をしっかり検証することを求めていかなければなりません。複雑で難しい技術を扱い，複雑な組織を運営しなければ動かすことが出来ない原子力発電所の課題が毎日に明らかになっている現時点において，問題点を放置したまま物事が進むことは許されないと考えています。 (平成23年7月15日 記)



## 福島事故と世界の対応



鈴木 達治郎(すずき・たつじろう)

原子力委員会委員長代理

1951年生まれ。東京大学工学部原子力工学科、米マサチューセッツ工科大学(MIT)修士卒。工学博士。専門は、原子力政策、技術の社会影響評価(テクノロジー・アセスメント)、核不拡散政策。(財)電力中央研究所を経て2010年1月より現職。

東京電力福島第一原子力発電所事故は、日本で起きた事故であるが、その影響は日本国内にとどまるものではなく、世界の原子力、いやエネルギー環境政策に大きな影響を与えるものである。事実、事故直後からの海外の報道もけた違いであったし、個人的な問い合わせや激励のメールもまたけた違いであった。その際、痛感したのは、国内からの情報発信(特に英語)が極めて少ない、ということであった。海外からの報道には少なからず誤報があったが、その原因の一つは日本からの情報発信の少なさにあったのではないかと、思われる。

4月以降、原子力委員会でも通常業務を再開し、4月5日、5月10日と2回に分けて見解を発表した。その中で、国内外への情報発信の重要性を重ねて強調したが、個人的には共同通信のインタビューに答えて「国際的に検証可能な独立の事故調査委員会の設置」を訴えた。情報不足等による海外に芽生えた不信感の払しょくには、このような対策が不可欠と感じたからであった。

5月から7月にかけて、スウェーデン(5月)、米国(6月)、韓国(6月)、ドイツ(7月)、英国(7月)と、国際会議への招待が続き、福島事故についての講演を行う機会を得ることができた。以下は、その海外での専門家との意見交換に基づく筆者の印象記である。

第一が既存原発の安全性確認である。どこの国も原子力発電所を抱えているため、当然のことながらその安全性に関心が高かった。そのためにも、少しでも正確な情報がほしい、という切実な声が多く、本来なら情報共有が進んでいるはずの規制当局の担当者でさえ、日本の規制当局からの情報が少ない、と嘆いていた。国際原子力機関(IAEA)や大使館を経由してくるものが多いため、どうしても時間がかかるということだった。欧州では早々と3月末には「ストレス・テスト」の導入を決定し、米国においてもストレス・テストとは呼ばないが、特別チームが異常天災・テロなどによる総電源喪失への対応や使用済み燃料プールの冷却能力確保など、12項目の勧告を最近発表している。実際に、関係者との対話からも、福島事故の深刻さを痛感すると同時に、教訓を少しでも引き出そうとする熱意を感じた。

第二に、安全規制に対する信頼の問題である。今回の事故の教訓として、共通して最も重要な点として挙げられたのが、この「安全規制に対する信頼の失墜」であった。安全基準を大幅に上回る地震や津波への対策、総電源喪失、といった技術的な課題については技術的に対応が十分に可能で、おそらく原子力発電の根本的な安全性の問題にまでは至らないだろう、という感触がありそうだ。一方で、安全規制に対する社会的信頼の失墜は、回復が極めて大変であり、日本の安全規制システムの改革は不可欠だろう、との見方が共通した見解のようだ。とくに「独立性、透明性、専門性の確保」といった点が指摘されている。すでに、インド、韓国はこういった教訓を踏まえて、安全規制機関の「独立化」を決定している。この問題は、単に規制機関を推進官庁から独立させるか否か、という問題にとどまらない。安全基準や規制そのもの、または検査に対する信頼性、さらには発信される情報の信頼性まで疑われることにつながっており、その影響は極めて深刻である。印象深かったのは、英国の最高科学顧問 Beddinton 卿が語った英国の経験である。BSE 事件の後、英国の科学技術行政の信頼が失墜し、その信頼回復に10年以上もかかった、というのである。

英国は、この事故直後、「日本の避難勧告は適切であり、東京在住の英国人は避難する必要はない」という結論を出したことで、パニックになりがちな状況に対して冷静な判断を促したことで有名だ。この時に活躍したのが、英政府の SAGE (Scientific Advisory Group for Emergency) と呼ばれる専門家集団で、Beddington 卿はそのリーダーである。SAGE は、BSE 事件の教訓を踏まえて設立され、最近では鳥インフルエンザやアイルランド火山爆発など、英国が直面する危機において科学的アドバイスを首相に的確に提示するグループとして機能しているようだ。このようなグループの存在により、英国の科学技術行政への信頼は回復しつつあるといわれている。

第三に、安全とセキュリティの共通点についてである。今回の事故で明らかになったことは、このような災害がテロによっても起きる可能性があることだ。核セ

キュリティ上、非常用電源や使用済み燃料プールの脆弱性等は、すでに専門家には知られていたものの、今回の事故を契機に、現実のリスクとして白日にさらされてしまったのである。また、事故後の緊急時対応についても、対テロリズム特殊部隊が今回は重要な役割を果たしたこともあり、原子力安全と核セキュリティの共通点が明確になったといえる。おそらく、来年春に開催予定の核セキュリティサミットにおいても、福島事故の教訓と原子力安全が大きな課題となるだろう。

第四に、汚染度と環境修復への思いである。多くの質問が、チェルノブイリと比較してどの程度汚染が広がったのか、住民の被ばくはどの程度か、住民の健康に影響はないのか等に集中していた。汚染状況と被ばく量を示した「汚染マップ」に注目が集まり、東京や周辺諸国は大丈夫か、といった質問まででた。最終的にいつごろ避難された住民が元の住居に戻れるのか。はたして、戻れる日はくるのか。現在の状況を考えると、この質問に答えられる日が来るのが待ち遠しい。

その中で、今回、日本の避難圏が20～30 km までひろがり、さらに最近では30 km 以遠も避難地域に指定されたため、各国も避難圏の在り方について、検討を要請する声があがっているという。特に、米国では今回50マイル(～80 km)圏の避難区域を設定したため、原子力発電所の周辺住民が不安を感じているとの話もあったのは興味深い。

最後に、今後のエネルギー・原子力政策である。これは、相手国の状況によって大きく異なる。原子力を積極的に推進している米国、韓国、中国、英国は、比較的冷静な反応で、執筆時点(7月14日)で原子力政策に大きな変更はない。米国では、新型炉、特にモジュール型小型炉の可能性について議論があった。オバマ政権になって特にモジュール型小型炉に対する期待が高まっているようだ。今回の事故以降、原子力の投資リスクが再び高くなったとみられ、モジュール型小型炉のメリットが強調されていたが、肝心の電力業界がどれだけ興味を示すかは未知数のようだ。事故の影響が市場にどれだけ影響を及ぼすかは、まだ読めないようだ。

韓国では、日本と似たような環境にあるため、日本の政策の行方に関心が高かった。韓国の原子力産業は現在も自信がありそうで、現時点では政策の変更を示してはいないが、マスコミや世論調査の結果などを聞くと、新增設への反対が増えているようだ。中国、韓国は、日本の隣国ということで、今回の事故を踏まえて、日中韓で安全面での協力をすすめられないか、との意見が多く聞かれた。英国は極めて冷静な対応であったが、議会の公聴会では研究開発、特に安全性に関する研究開発の行方について不安な声が多かった。

一方、脱原子力の政策をとっているスウェーデン、ド

イツでは、厳しい意見が相次いだ。特にドイツでは、ちょうど脱原発法が議会で成立した直後でもあり、事故の深刻さがそのまま再生可能エネルギーへの期待とコミットメントにつながっているようであった。再生可能エネルギーで原子力の代替をすべて行えるのかどうかは、さすがに不確実な部分もありそうだが、その基本的な方向については、間違っていない、との自信がうかがえた。

いろいろなメディアの方と会うことができたことも印象深かった。韓国の会議では、欧米からNew York Times, The Economist など、超一流のジャーナリストが訪れており、中には福島関連の記事で詳細なレポートを報じていた記者もあり、その情報量の質と量に驚かされるほどであった。日本の現地を訪れ、多くの関係者を直接取材している記者は、さすがによい記事を書いており、その取材力には感銘を受けた。一方、スウェーデンではラジオ、韓国では新聞・テレビなどからインタビューを受けたが、やはり日本からの情報が不足しているのか、誤解が多く、正確な情報を発信することの重要性を痛感した。韓国のインタビューでは、「フクシマの状況」について、心配する記者に対し、「フクシマは深刻な原子力事故のシンボルとなってしまった。しかし、原爆被爆地のヒロシマ・ナガサキは復興して平和の聖地となった。フクシマも、見事に復興させて、原子力事故のシンボルから復興の聖地となるよう政府としても個人としても努力したい」と述べた。すると、「フクシマを復興の聖地に」が翌日の見出しとなって、韓国全国にこのメッセージを伝えることができた。

諸外国を回ってきて、印象深かったのは「福島第一」は、「Fukushima Dai-ichi」であり、フクシマはすでに、世界の原子力に大きな影響を与えたことは間違いない。フクシマの情報をできるだけ迅速に、かつ正確に発信することは、我々の責務である。世界はこの事故から真実に学ぼうとしており、そこからの教訓を生かして、未来の原子力につなげていくことが求められている。

(2011年7月15日 記)



第59回パグウォッシュ会議(ベルリン)にて特別講演をする筆者(2011年7月4日)



## ANS 2011年6月フロリダ・ハリウッド



松井 一秋(まつい・かずあき)

(財)エネルギー総合工学研究所 理事  
 東京大学大学院工学研究科原子力工学修了。呉羽化学工業を経て、2003年から現職。  
 第4世代原子力開発国際フォーラム(GIF)日本代表、OECD/NEA 原子力開発委員会(NDC)委員長を兼ねる。

「この夏の電力危機を避けるため、政府は(7月)1日、電気事業法27条に基づく「電力使用制限令」を、東京電力と東北電力の管内で発動する。制限令発動は第1次石油危機の1974年以来、37年ぶり。大規模な工場や商業施設、オフィスビルについて、最大電力を昨夏より15%削減するよう求める強制措置だ。

74年の発動は火力発電の燃料不足が原因だったが、今回は東日本大震災で発電所が被災したため。東電と東北電は、臨時のガスタービン発電機を増設し、老朽化などで停止中の火力発電所を再稼働。被災した発電所の復旧も急ぎ、6月30日には両社共同出資の常磐共同火力勿来(なこそ)発電所(福島県いわき市)の9号機が営業運転を再開した。」

女川・福島第2・福島第一5号6号、東海第2や東通も含めて合計およそ一千万kWの原子力発電が利用可能だということに、上の記事が示すように、東日本は電力不足に直面している。人々が暑い夏を何とか汗だくになって乗り越えようとしているだけでなく、工場などの生産施設は活動に制限を受けるわけで、それだけ本来なら稼ぐことができたはずの国益が失われてしまう。クールなビジネスとしては逃げ出したくなるに違いない。

はたしてこれらの10基の原子力発電所は再稼働した場合の危険性はあるのか? 3月11日と同様の地震や津波が襲う可能性がないとは言えないにしても、各発電所で取られている緊急安全対策により福島第一の1~3号機で起こった炉心溶融の事態が再び起きる可能性は極めて低いはずである。まだいくつかなさねばならない作業があるにしても、これら10基の運転再開を声高く主張したい。

もちろんそのほかにも日本全体では、運転再開を待っている原子力発電所がたくさんある。

「経済産業省は原発をすべて火力発電で代替した場合の燃料コストの増加は、原発を運転する電力9社の合計で年間3兆円を超えると試算。」7月3日

「……リーマン前の景気拡大期のピークは、2007年4~6月期の(名目GDP年換算で)517兆円だったので、今の日本経済は約50兆円も縮小している勘定だ。…どん

底から立ち直ろうとしていた矢先に、地震、津波、原子力災害というトリプルショックである。…新成長戦略を訴えていた首相はそのことをころりと忘れ、脱原発と自然エネルギー推進に自らの政治声明をかけるという。もちろん、エネルギーをめぐる様々な議論はあってよい、問題は企業活動への影響だ。震災で生産立地のリスクが高まったうえに電力代がかさみ、しかも法人税は高いまま。企業は日本から静かに海外へと活動の場を移しつつある。成長より自然との共存が重要だといった主張も傾聴に値するが、その前に落ち込んだ所得をどう回復させるか。GDP 50兆円が消えたままだと、若年失業や貧困世帯の問題の解決にめどが立たないし、年金や医療も持たない。…」日経、7月3日、けいざい解説、解説委員、滝田洋一

故なく停止している原子力発電所の運転再開は、人々の感傷を超えて震災からの復興のカギだけにとどまらず新成長戦略の柱の一つである。

もう原子力はこりごりだ、こんなものなくて済むならそうしたいと思う気持ちはわからないではない。しかしそうはならない、この地球という水も空気もあっている生命が誕生した惑星には、人間という強欲でわがままかってし放題の生物が、他の生き物の迷惑も顧みず跋扈していて、ついには自分らがなしてきたことによって苦しみだしているのである。すなわち地球温暖化ガスの急激な増加やオゾン層の破壊、いわゆる公害などの環境破壊である。確かに今回の事故によって大量の放射性物質が特に発電所北西方向にばら撒かれ、少なくともすぐには住民は戻れなくなっており、原子力も環境を汚染したことになる、すなわち同罪ではある。

7月号の学会誌の長谷川真理子先生の巻頭言「文明の先を見据える」によると、現在、70億に達した世界の人口は「つい160年ほど前の1850年には10億人だった。その200年前の1650年には5億人、紀元ゼロ年にはおよそ2億5,000万人と推定されている。…ヒトの文明が、化石燃料と原子力によるエネルギーを湯水のごとく使って

いるからだ。」私は先生の主張とは少し違って、70億からがこの地球上で生き残っていくために役に立つのなら、それがリスクを上回るように使っていければ、何もしなくておかしくなるよりは良いのではないかと考える次第である。どのみちこの惑星で他の生物と調和的に存在できる数はたかが知れている。雑食動物の一つとすればおよそ2億弱。日本列島では、江戸時代の人口3千万人ぐらいでカツカツであろう。世界全体でいうなればグリーンに生き残ろうとしても何億人であろうか。

人が他の動物と違い出したのは多分、火を使い出したことも大きいのではないかと。初めにはひどく火傷したのもいたに違いないが、これは手におえないから使うのはやめようなんて言い出したサルはいなかった。原子力の利用は人智を超えるとすればサルより劣ることになる。日本列島を猿が島にはしたくない。

ここへきてドイツ、イタリア、スイスなどが再び脱原子力にかじを切りなおし、それを我が国のエネルギー・環境政策のお手本としてもはや傾向がある。彼らは欧州全体で電力網だけでなく、パイプラインもあってつながっている。すなわち自国には原子力エネルギー利用は許さないが、お隣の原子力にぶら下がっていかうということか？国内産業の疲弊や貿易収支上の問題は、自国の他の産業が比較的競争力があれば何とか持たないわけではないと踏んでいるのであろうか？あるいはもっと高尚な挑戦のつもりであらうか？いずれにしても欧州では当面何とかつじつまは合わせることは可能かもしれない。

しかし我が国では無理というものである。可能にするには、対馬を通して韓国から、択捉島あたりにロシアに原子力発電所を多数作ってもらって電力輸入するのか。日本のような火山列島の上に乗る、天変地異が想定されるようなところでの原子力はやめた方がよい、エネルギーは我々に任せるとかいう半分冗談みたいな話がロシアにあるそうである。韓国にしても、2030年までに原子力比率を6割弱まで上げ、世界の原子力発電所の建設に意欲を示している、対馬経由での電力輸出もまんざらではないかもしれない。我が国にとって比較的国際競争力のある産業がいくつもあることと、エネルギーの安定的な供給をどう保障していくのかという今までも抱えてきた問題ではあるが、輪をかけて未曾有の挑戦となるに違いない。

聞くところによると、ドイツ国民はそのつもりとのことであるが、日本の我々にはその覚悟が本当にあるのだろうか、いやその前にいろいろなレベルでの、それぞれ「文明の先を見据える」国民的議論が必要である。今まで多く見られたアリバイ作りの集会や、土下座や野次と怒号に終始する感傷的な対決は非生産的で、もうこりごりである。

今回のANS大会参加は筆者がANSの非米アジア・

オセアニアからの理事であることと、ANSは今回の福島第一発電所事故発生直後に日本支援基金(Japan Relief Fund)を立ち上げていて、合計で14万5千ドルが日本の原子力学会に振り込まれていることに対する謝意を示す意味もあった。この基金の目的は、事故の復旧に当たっている実際に作業をされている方とその家族への支援であり、執行に当たっては、どこにどうやって基金を渡したらよいのか橋渡しをしてほしいと頼まれていた。電工会、電事連、原産協などを通して東京電力に相談したところ、基金の趣旨は大変ありがたいのだが、周囲の目もあり、事故の責任がある身としては受け取れない、同様の申込みはいくつかあるのだが福島県の方へ回しているとのことであった。これもごもつともであるのだが、米国の原子力学会の趣旨とは異なることになり、また非公式ルートによる現場の相当厳しい状況を聞くと何とか現場の環境改善にと思いあぐねていた。学会の理事でもある川俣さんをお願いして、現場にも出かけているので相談してみるということになり、また現場の吉田所長も受け入れに賛同していただく結果となっている。今のところ、免震棟に付属して新設された休憩所に飲料水とその飲用水用の冷蔵庫を2台置くことから始めていただいているところである。現場の復旧作業環境改善にとっては極めて微々たることであり、また冷蔵庫の手配などかえって関係者を煩わせている面もあることは承知の上で、やはり米側の好意には素直に答えるべきと思っている。

なおANS初日の会長特別セッションの尾本原子力委員の福島事故についてのプレゼンテーションの終わりに冷蔵庫の写真もご紹介いただいている。2日目のもう一つの特別セッションでは、二ノ方東工大教授(ANS Special Committee on Fukushimaのメンバー)の事故についての技術的な報告もあったが、これからも続く国際会議などでも積極的に報告、会話していくことは、二度とこのようなことがないようにしていくためにも、事故の教訓、経験を共有していくためにも重要である。今年の10月にはANS冬季大会(ワシントンDC)、12月はGLOBAL(幕張)、来年3月はPBNC(環太平洋原子力会議、釜山)、6月はANSと共催のICAPP(シカゴ)などがある。

アジアオセアニア地区代表ANS理事としての私の任期は来年までなので、できれば後任となる人を日本から推薦するべく関係者間で相談している。なお、現時点で在米のためアジアオセアニア地区代表ではないが、全米からの選出理事に山内澄氏(三菱重工)が立候補の意向を表明されているとうかがっている。立候補された時はぜひ皆さんの温かい支持をお願いしたいところである。

(2011年7月3日記)

## 特別企画

## 福島原発事故についての ANS 受け止め方 ANS の主要メンバーはこの事故情報をどう捉えたか

米国原子力学会 福島原発事故特別調査委員会 委員  
日本原子力学会 原子力安全調査専門委員会 委員

二ノ方 寿

今回の事故をめぐる米国の対応は素早かった。半径50マイル以内に居留する米国人の退避勧告のことではない。事故の重大性の認識, USNRC, USDOE, NEI, INPO などによる情報収集, 分析・評価の開始, また大統領による全米の原発安全宣言などのことである。

以下, 私の話は, 自身の専門分野に近い原子炉事故の事象展開に偏ることをお許し願いたい。

3月11日夜, 地震と津波襲来による全交流電源喪失, 最終的な除熱源喪失の事態に陥ったことを知らされた。しかもプラントデータがほとんど不明という状態。このとき, 専門家は何を思ったか。海外であろうと日本であろうと, 情報がなかったという点では同じである。私が知る限りで共通したのは, 誰もか即座に予想した悲劇的な炉心の行末で, それを察知しながら何もできないという焦燥感, 怒り, 無力感である。そのうち, 米国では大学関係者を含む原子力学会関係者の中での意見交換が自然発生的に始まった。とくに米国の TMI 事故調査に関係した専門家たちの意見を参考にしながらの意見交換で, 事象展開についての意見一致は早かった。例えば, 前 DOE のシニアマネージャーだった Lake Barret 博士は, 既に3月中旬段階の私信で, 圧力容器の健全性について, 以下のような考えをいち早く提示している。

「我々は圧力容器の健全性が保たれているかどうかを示すデータを一切知らされていない。しかし, 私はまだ健全だと思っている。健全で, 部分的に溶けた燃料や炉心構造物質が混ざり合った溶融固化物質やデブリ状の堆積物を保持しているとみている。」と述べている。この圧力容器の健全性については, 必ずしも皆が同じ意見ではなかったが, 炉心溶融物質の保持に関しては, 号機により程度の差はあるにせよ, 大部分が保持されているとの意見で一致していた。「これらの溶融固化物は, 溶けたウラン, ジルコニウムとステンレス鋼の非均質な混ざりもので醜く, 複雑な形状をしているであろう。TMI の場合も融解した炉心物質が固まったひどい壊れ方だったが, 福島原発の各号機の炉心のその様子は, TMI 炉心よりもっとひどく醜悪であろう。しかしながら, 工学的な観点からは, TMI 炉心の壊れ方が大いに参考になる。詳細は省くが, 福島原発における事象展開は1979年 TMI-2で発生した事象に基本的に近いと考えている。」と注釈

した上で, 「熱力学的な応答, 水素燃焼, 冷却の回復, 格納容器応答など個々の展開は TMI 事故の時の様相にそっくりである」として, その思考実験の結果, 「福島原発各号機は, 炉心損傷の程度, プラントの汚染状況など, TMI-2とは比較にならないほど重大で深刻である」と結論付けている。この Barret 氏の考えは, 米国原子力学会熱流動部会の専門家たちの間で共有され, 私もその一員であった。その後, 小出しにされてきたプラント情報に照らし合わせても, 炉心溶融の当時の推定の正しさが証明されるだけである。

6月26日からフロリダ州ハリウッドで開かれた米国原子力学会の年会では, 福島原発事故に関する President Session や, 専門部会連合で主催した Fukushima 特別パネルセッションが, それぞれ初日と2日目の夕方, 多くの聴衆を集めて開かれた。聴衆の反応は, 事故の事実関係や事象展開, 日本における事故被災状況などではなく, むしろ米国の原子力安全行政へのインパクト, 原発における長期全電源喪失への備えの要求や確認などであり, 事故の概要については正しく把握されていると感じた。どこのテクニカルセッションにおいても, ほとんどの発表者が必ず「Fukushima」を意識して発言し, 発表者自身が福島事故と無関係かつ無関心でないことを強調していた。

では, 3/11以来, 米国原子力学会員はどのように事故を見ていただろうか。私の周辺に限って言えば, 端的に言って彼らの興味焦点は, 事故発生以来の最初の1週間に絞られている。もちろん, その後の事故収束へ向けての様々な事象展開や対策に対する意見, 避難住民の将来展望, 放射線健康影響などや, 長期的な日本のエネルギーポートフォリオがどうなるのかも。しかしながら, 多くの専門家は, 口をそろえて, 水素爆発と放射性物質の放散に至った経緯を克明に知りたがるのである。つまり, 当時, 彼らが欲する情報が一切公表されていなかった。そのため, 米国内の公衆へ向けて, 十分な確信をもって説明ができなかったことから, 公開に対する不満がいまだに尾を引いている模様なのである。おまけに当時の海外への情報伝達の不備が, 事故の本質を歪め, 不要な恐怖感, 警戒感を植え付けてしまった, と嘆く。

情報公開のあり方には, 必ずしも批判だけではない。

ある米国原子力学会の前会長は、あのような危機に際しては、ある程度の統制も必要かもしれないと同情する。しかし炉心の状態、放出された放射性物質の量を勘案すると、炉心情報が5月中旬まで出されなかったというのは極めて遺憾であった、と同氏はいう。このことは日本の誰しもが共有する感覚である。日本側の情報公開の姿勢に関し早くから問題点が指摘されている。情報公開に対する不満は、現在は事故初期に比べると減少はしているそうであるが、解消されているわけではない。USDOE、USNRC等の機関は、事故当初から最も情報を保有していたとみられている。しかし、これらの情報が米国の学会や専門家間で共有されたことにはつながっていない。アイダホ、オークリッジなど一部の国立研究所の担当者のみがアクセスできるのみで、しかも徹底した情報管理の壁に守られているという皮肉な状態である。

米国国民は、国家的な危機に瀕した際の国がとらうとする対応に信頼を置いている。と同時に、国民として常に心の準備を怠りなくすることの重要性を認識しているという。その結果、今回の福島原発事故の発生とその後の報道に国民はどのように感じたのだろうか。私の質問に対し、ある大学の教授は、事故の進展と対応状況が少しずつ公表されるにつれ、多くの米国民が失望といらだちを感じていった、というのである。米国原子力学会でも、やや遅きに失した感があるが、4月下旬、独自に事故調査特別専門委員会の立ち上げを行った。ウィスコンシン大学のM. コラディニ教授(次期学会長)をヘッドとして、当初5名の専門家からなるチームで活動を開始した。その活動成果は来年3月までには文書化して公表される予定である。委員の一人は、何が調査項目で大事か、という質問に対し、「最初の数日間の崩壊熱の除去、燃料破損防止と放射性物質の格納、と炉心溶融の防止。これらは何があっても達成すべきである。しかし、結果的に、大自然災害に遭遇しすべて失敗したという事実を、極めて重大な関心事として位置付けるべきだ」と答えている。実際、全除熱源喪失から最初の2～6時間の対応がその後のすべての事実関係を決めている。すなわち、

初期段階におけるすべての安全設備の機能喪失とともに事故対応で取るべきアクションが、その後の事故影響緩和にどう働いたか、学会としてもその本質を徹底的に分析し、検証して示す予定である。米国では、日本の事故を自らの教訓として捉え、同じ過ちは繰り返さない、とともに原子力発電所のより高い安全性を目指し改善を加えていく糧にする、という至極健全な考えなのである。

多くの専門家が、3月の時点ですでに炉心が大規模に損傷し溶融していたことを予測していた。このことは冒頭に述べた。前米国原子力学会会長も同じで、1号機から3号機までの炉心溶融が、単純な熱バランスだけでも起こることが予測され、そのことを実証する放射性物質の放出があり、国民に多大な被害を与えているにもかかわらず、東京電力および当局が事故発生から2ヵ月たつて初めて炉心溶融を認めたことに多大なる失望を感じた、という。この事実は、強いていえば国民の信頼を裏切ることにつながり、今後の日本の原子力エネルギーの利用に大きなダメージを与える要因の一つになると警告している。

日本は原子力エネルギー利用への国民の信頼を回復してもらいたい。そのためには、あらゆる手だてを通して協力と協働、支持、助勢を惜しまない、というメッセージが多くの米国原子力学会の皆さんから寄せられている。1979年のTMI-2事故のとき米国が経験した原子力の一時的衰退、批判勢力への説得とは比較にならない困難を伴う作業であろうが、時間をかけて努力することが肝心である。

以上、おおむね批判的な意見や感想を書き連ねてきたが、多くの米国の専門家から読者の皆様に伝言するように頼まれたことを以下に記して締めくくりたい。東京電力が事故の影響緩和に最大限また最善の努力を尽くしたこと、被災された方々、また多くの日本国民がこうした甚大な原子力災害にもかかわらず、冷静かつ理性的な行動をとっていること、そして彼らに対し、米国原子力学会会員は多大なる敬意を払っているということ。

(2011年7月22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。

## 原子力安全委、保安院にストレステスト実施を要請

原子力安全委員会は7月6日の臨時会議で、既存の原子力発電所の設計上の想定を超える外部事象に対する頑健性に関する総合的な耐性評価(いわゆるストレステスト)を実施するよう経済産業大臣に対して要請した。既存の発電所に対する緊急時安全対策やシビアアクシデント(過酷事故)への対応措置など、種々の取組が全体とし

ていかに施設の頑健性を高め、脆弱性の克服に寄与しているかを総合的に評価することが必要との考えから、報告を求めることとなったもの。委員会設置法に基づく大臣宛報告要請は、02年に東京電力不正問題で、07年に中越沖地震による影響で発出例がある。

## 福島県の復興ビジョン、原子力依存脱却盛り込む

福島県の復興ビジョン検討委員会(座長=鈴木浩・福島大学名誉教授)は7月2日の会合で、今後の震災復興計画に向けた基本理念と主要施策について議論し、おおむね取りまとめに至った。

基本理念は、原子力事故による広範囲かつ長期的な被害が明らかになったことから、今後は、「脱原発」の考えのもと、原子力への依存から脱却し、再生可能エネルギーを推進し、環境との共生の図られた社会づくりを目指すこととした。また、発電所の停止により、電力需要地にも影響が及んだことから、エネルギー政策の見直しを国

民全体の重要課題となったと指摘している。

さらに基本理念では、前回会合で示された3つの理念「原子力に依存しない、安全・安心で持続的に発展可能な社会づくり」、「ふくしまを愛し、心を寄せるすべての人々の力を結集した復興」、「誇りあるふるさと再生の実現」のもと、復興への主要施策として①緊急時対応、②ふくしまの未来を見据えた対応、③原子力災害対応——についての施策例をあげている。復興への基本理念・主要施策例は近く、県知事に対し提言され、復興ビジョン策定に移る予定だ。

## 政府、耐性評価の新制度導入で統一方針示す

枝野幸男官房長官は7月11日の記者会見で、福島第一原子力発電所事故を受けて、耐性評価(いわゆるストレステスト)を実施する原子力発電所の新たな安全性評価を導入する政府統一方針を発表した。枝野官房長官、海江田経産相、細野原子力発電所事故担当相の3氏で合意したもので、事故後の原子力発電所の運転継続には、新たな規制制度が必要としていた菅首相も了解した。枝野官房長官は、「さらなる安全性の向上と、安全性についての国民、住民の安心・信頼の確保を目的に行うものだ」と強調した。

欧州がこの6月から行っているストレステストをモデルとした日本版ストレステストでは1次評価と2次評価に分け、まず1次評価を定期検査後の原子力発電所の再稼働に焦点を当てて行い、運転再開の可否を判断する。次いで1次評価とは別に、2次評価として、1次評価を受けて再稼働した原子力発電所も含めた全原子力発電所を対象に行う。

特に、定期検査で停止中の原子力発電所の運転再開の可否について判断する1次評価は、安全上重要な施設・

機器等が設計上の想定を超える事象に対し、どの程度の安全裕度をもっているかの評価を、設計図面上やコンピュータ・シミュレーションなどによって確認する。

具体的には今後、原子力安全委員会を現行制度以上に活用し、同委員会による確認の下、評価項目や評価の実施計画を作成し、それに基づいて電気事業者が行う評価を原子力安全・保安院が確認した上で、さらに原子力安全委員会がチェックするという仕組みだ。

ストレステストの具体的な中身やスケジュールは今後、原子力安全委員会と原子力安全・保安院などの間で詳細で専門的に、実施に向けた検討を進めていくことになる。

枝野官房長官は、原子力発電所の定期検査後の再稼働にあたっての安全性の確認について、「政府の方針、考え方が明確でないために、立地地域などに混乱を招いた」として、「今後、立地地域の自治体などに、新たな安全評価の趣旨や内容などについて、丁寧に説明していきたい」と述べた。

## 菅首相が「脱原発依存」表明

菅首相は7月13日の記者会見で、原子力事故リスクの大きさを指摘して、「私としてはこれからの日本の原子力政策として、原発に依存しない社会をめざすべきと考えるに至った」と述べ、現役首相として初めて脱原発政

策への転換を表明した。首相は今後、中長期的なエネルギー計画をつくり、計画的、段階的に原発依存度を下げていくことが、我が国のめざすべき方向だと語った。

## 第2回福島事故検証委が開催

政府の福島原子力発電所事故調査・検証委員会(委員長＝畑村洋太郎・東京大学名誉教授)は7月8日、第2回会合を都内で開催し、同委下に設置されたチームが対象とする調査・検証事項および、今後、事実調査活動として行うヒアリングの手順を確認した。また、東京電力より事故の概況について説明を受けた。

前回会合で、設置が決まったチームが今後行う調査・検証事項に関して、「社会システム検証チーム」では、事故発生以前の事象・事柄を主な対象に、因果関係をさかのぼることにより、津波対策、シビアアクシデント対策、規制機能の適否などについて、組織的要因、制度的要因、社会的要因、歴史的経緯を明らかにする。

「事故原因等調査チーム」は、事故経過・事故対応の事実関係を客観的に検証し、事故発生・拡大の原因の技術

的問題点について調査するとともに、関係組織の意思決定過程の実態なども解明する。「被害拡大防止対策等検証チーム」では、事故発生前の避難対策、事故発生後の各種措置状況、情報提供、諸外国との連携などを検証することがそれぞれ確認された。委員からは、地震発生から津波襲来までの状況が十分解明されていないことなどがあげられ、今後の調査で、事態を時系列に整理していく必要を確認した。

委員会は、9月末まで会合を招集せず、今夏、事実調査活動に集中するが、関係者からのヒアリングについては、原則、非公開かつ少人数で行うことを申し合わせたほか、東北電力・女川原子力発電所など、他の発電所への視察も実施することを確認した。

## 東京電力、福島第1, 2の津波影響の調査結果まとめ

東京電力は7月8日、東北地方太平洋沖地震に伴う津波が福島第一・第二原子力発電所に与えた影響の調査結果を原子力安全・保安院に提出した。敷地内外の詳細な津波調査データを収集・整理した上、津波波源モデルの推定と再現計算結果などを踏まえ、浸水による建屋・設備への影響を分析している。

同社は4月、地震後に福島第一に襲来した津波の浸水高を、主要建屋設置エリアでOP(小名浜港基準面)約15m規模との暫定値を出しているが今回、さらに現地調査やデータ拡充・精度向上の上、主要建屋設置エリアの浸水高は、福島第一1～4号機側でOP約11.5～15.5m、同5, 6号機側でOP約13～14.5m、福島第二でOP約12～14.5mなどとの調査結果を示した。

また、今回の地震・津波による広域の浸水高、遡上高、浸水域、検潮記録、地殻変動を最もよく説明できる津波波源モデル推定を、数値シミュレーションしたところ、津波の高さは、福島第一で約13m、第二で約9mとなり、精密な分析の結果、両者の差異は、宮城県沖ならびに福島県沖に想定されるすべり量の大きい領域から発生した津波ピークの重なり度合いの強弱差によるものとみられ

ている。

一方、福島第一の建屋への影響については、OP10mの敷地にある主要建屋の周辺では、ほぼ全域が津波の遡上を受け浸水したと考えられているが、外壁や柱などには有意な損傷はなく、建屋の地上・地下の開口部が浸水経路となり、1～4号機タービン建屋の東側(海側)を中心に、扉・シャッタの損傷、地下の広い範囲への浸水に至ったものと分析している。耐震安全上重要な設備については、非常用電源盤が6号機を除き1～5号機すべての盤で浸水、非常用ディーゼル発電設備が6号機B系統を除き本体または関連機器の浸水で使用不可などといった影響が明らかになった。

なお、東京電力からの調査結果と合わせて、同日、大地震の影響を受けた東北電力女川発電所、日本原子力発電東海第二発電所からも津波の影響に係る詳細な調査結果が保安院に報告されている。

保安院では今後、これら報告内容について、評価することとしている。

(以上の記事は日本原子力産業協会提供)

## WiN-Japan, ブルガリアの年次大会で福島事故の概要を紹介

原子力産業に従事する女性を中心に組織される WiN (Women in Nuclear) は 6 月 6 日から 10 日までの 5 日間、ブルガリアで第 19 回 WiN-Global 年次大会を開催した。22 ヶ国約 150 名が参加した大会の冒頭には「フクシマ特別セッション」が設けられ、日本から参加した WiN-Japan (会長・小川順子東京都市大学准教授) 6 名が、福島第一原子力発電所事故の概要、技術的対策、放射線の環境影響と避難状況、得られた教訓等について発表を行った。この中で WiN-Japan は、より安全な原子力技術の確立と原子力発電を続けるためのコミュニケーションの再構築が課題であることを指摘し、参加者からは「福島の住民はいつ戻ることができるのか」、「チェルノブイリの教訓が活かされていないのでは」などの質問が寄せられた。

その後、各国の WiN が「フクシマ」後の取組みについて報告を行い、WiN-Global は『フクシマ宣言 (Fukushima Declaration)』を採択した。宣言には、福島を機に、原子力産業に従事する女性たちが、国際標準の安全基準や規制を作り上げるためにあらゆる努力をし、子供たちの将来のために強力な支援と貢献をすることが盛り込まれた。これと併せて募金が行われ、各国から集まった義捐金 (約 40 万円) は、福島第一原子力発電所



に全額寄付されることとなった。

また、年次大会に先がけて、WiN-Japan は 6 月 3 日、国際原子力機関 (IAEA) 本部で天野事務局長と懇談した。このなかで天野事務局長は、「福島後、原子力安全は変わったと言えなければならない」と述べ、「フクシマ」の教訓は世界の原子力安全の向上に生かされるべきだと強調した。

(資料提供：WiN-Japan)

### 海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

#### [国際]

## IAEA, 原子力安全閣僚会議で安全評価促す

福島事故後の世界の原子力発電所における安全性強化策を検討する「原子力安全に関する閣僚会議」が国際原子力機関 (IAEA) の主催で 6 月 20 日にウィーンで開幕し、25 項目からなる IAEA 閣僚会議宣言が採択された。

同宣言では原子力発電国に対し、原発の危険性と安全に関する包括的評価を透明性のある方法で実施するよう奨励。定期的な審査や評価ミッションを通じて、IAEA の枠組の中で国際的かつ独立の立場の原子力安全専門家から評価を受ける利点を強調した。ただし、強制力のある事項ではないため、その効果の程については疑問視する向きもある。

このほか IAEA 事務局長に対しては、同宣言および閣僚会議での結論に基づいて緊急時対応や放射線防護等に関する行動計画案を 9 月の総会までに提出要請。同理事会には関係予算の手当を要請するなど、計画の実行に向けて早急な対処を促す内容となった。

この会議は、福島事故で揺らいだ原子力に対する信頼を取り戻すには、同事故からの教訓をいち早く検証・今後の善後策に反映させる必要があるとして、天野事務局長が 3 月末に開催日程を加盟各国に告知していたもの。

宣言文では特に、福島事故を直接的に反映した項目として、「同事故に関連する IAEA 安全基準、特に複合的で深刻な災害に関連するものの見直しを含め、包括的で完全に透明性のある事故評価を日本および IAEA から得る必要がある」や「国内規制当局の権威、権限および資源のさらなる強化、効果的な独立性の確保に努力を傾注する」などが盛り込まれた。

また、「安全分野における国際的な法的枠組み強化の可能性を検討する」の項目では、IAEA の強化された取組みを意識。国内的・地域的および国際的な緊急事態に係わる準備と対応の改善に関しても、「対応と支援に関する IAEA の既存の能力を促進・拡大する」として IAEA の役割強化を強調している。このほか、原子力損害に対して適切な賠償を提供するため、賠償責任に関する一つの国際的な制度の必要性なども明記されている。

## [米 国]

## フォートカルホーン原発，洪水被害で冷却機能に影響なし

米ネブラスカ州のフォートカルホーン原子力発電所(PWR, 53万kW)では5月下旬以降、近隣を流れるミズーリ川の増水による浸水を食い止めるため、水を詰めた土のうで敷地内の主要建屋を取り囲む措置が取られている。土のうは高さ2.4m、幅4.8mという大きさで、全長は約609mに及ぶが、同発電所を所有するオマハ公共電力局(OPPD)は6月26日、この土のうの一部に穴が開いたため、主変圧器の周辺のコンクリート製フェンスが破れた場合に備えて、主変圧器への配電を外部電源から敷地内の緊急用ディーゼル電源に切り替えたと発表した。

現在、同発電所には米原子力規制委員会(NRC)の検査官が詰めており、格納建屋と補助建屋周辺に水が流れ込んだ後も原子炉の停止時冷却と使用済み燃料プールの冷却状態に影響はなく、発電所の機能が保たれていることを確認。すべての安全チェックが完了したため、外部電源への再接続を試みている。

同発電所は燃料交換のため4月9日に運転を停止。ミズーリ川からの洪水に備えて5月21日から砂袋や排水ポンプなどの設置を開始しており、平均潮位から309m上までの洪水に耐えられる体制を整備した。再稼働への準備活動は6月3日に中止し、4段階の緊急事態宣言の最低レベルである「異常事象事態」を6日付けでNRCに通知。7日には開閉装置で火災が発生し、使用済み燃料プール冷却ポンプへの電力を一時喪失したが予備ポンプの起動により冷却機能は回復した。

## 規制委のタスク・フォースが勧告，「体系的な規制枠組必要」

福島事故の情報と教訓を分析し、米国内の原子力発電所の安全性強化に役立てるために米原子力規制委員会(NRC)が設置したタスク・フォースは7月13日、発電所の規制事項・手続きに関して最初の90日間に実施した審査の報告書をNRCに提出した。「福島で発生したような一連の事象が米国で起こる可能性は低く、発電所は安全に稼働し得る」と宣言する一方、炉心損傷や環境への制御不能な放射能の放出を伴う事故は許されないとの認識の下、短期的および長期的に安全性を一層向上させるとともに、公衆に対してどの程度の防護レベルが適切か再設定するため、改善の必要な規制について、体系的な枠組の構築も含め12の包括的勧告事項を提示している。

米原子力産業界にとって、同報告書は原子力発電所の安全性強化に向けて今後数年間の土台作りとなる重要なものとの位置付け。改善を要すると指摘された分野は電源喪失から地震や津波、使用済み燃料プール、ベントおよび緊急時体制準備など多岐にわたっている。

タスク・フォースによると、過去数十年間にわたってNRCが実施してきた規制は設計ベースの事象に対する防護とその影響緩和を要求するアプローチの仕方であり、その時点で最良の情報・技術を採用して項目ごとに設定・補足してきた。その結果、重要だが相応の配慮がなされない規制要件の寄せ集めとならざるを得ず、今後はこれらを首尾一貫した規制の枠組みと取り換えるべきだと勧告。このような規制枠組の改善こそが現実的で達成可能なゴールになり得ると強調している。

今回、短期審査チームの指揮をまかされたNRC上級管理者のC・ミラー氏は、具体的な勧告事項は、①防護の強化、②事故影響の緩和促進、③緊急時対応策の強化、④NRCプログラムの効果の改善——の4分野に大別されると説明した。今後、原子力発電所の運転とNRCの認可活動を継続していく上で公衆の健康や安全に対し切迫したリスクは生じないものの、一番目の勧告として「一層バランスの取れた多重防護哲学を採用すれば、論理的で体系的、かつ理解し易い規制の枠組を提供できる」と提案。発生頻度は低いが影響が大きい事象への対処能力増強のために適切な要件を求める規制枠組となり、実質的な安全性の向上につながるとしている。

その後、同チームは19日にNRCと会見し、4か月近くに及んだ今回の作業について協議。28日には公聴会を開催し、8月17日にNRCの原子炉安全諮問委員会に出席する予定だ。

なお、長期的な分析調査を命じられたチームは6か月以内に行動勧告を含めた報告書を提出することになっている。

## [英 国]

## 原子力新設計画が進展，政策声明書を議会に提出

英エネルギー気候変動省(DECC)のC・ヒューン大臣は6月23日、原子力の新設計画を含むエネルギー関係の「国家政策声明書(NPS)」の最終案を取りまとめ、正式に議会に提出した。二度の公開諮問を通じて一般市民から聴取した2,500以上のコメントや議会の精査結果を盛り込んだほか、原子力規制機関(ONR)のM・ウェイトマン長官による福島事故の暫定評価内容も勘案。議会審議の後、承認が得られれば、今後これに基づいて具体的な原子炉新設計画が審査・決定される予定で、2018年以降の新規原子炉運転を目指す同国の原子力計画は、大きく

前進することになる。

「エネルギー NPS」は再生可能エネルギーなど6つのエネルギー分野に関する国家政策を設定。原子力 NPS では、2025年末までに出力5万kW以上の原子炉の設置が可能な候補地として、原子力施設がかつて稼働、あるいは現在稼働中の以下の8か所を指定した。ブラッドウェル、ハートルプール、ヘイシャム、ヒンクリーポイント、オールドベリー、セラフィールド、サイズウェルウィルファのそれぞれについて、軍事施設等との近接度、津波や洪水のリスク、民間航空機の航路との兼ね合い、海岸の浸食状況等に関する分析・評価結果を記している。

[フランス]

## 公共投資計画に変更なし、第4世代炉開発に10億ユーロ

フランスのN・サルコジ大統領は6月27日、原子力の一層の安全強化に向けた研究と第4世代原子炉の開発のため、フランス政府の原子力研究開発プログラムに対する合計10億ユーロ(1,168億円)の投資計画に変更がないことを明らかにした。福島原発事故後、近隣のドイツやスイスが脱原子力に向かう一方、フランスは2009年12月に公表した方針を堅持。再生可能エネルギーを含め、低炭素エネルギー技術の開発で同国が世界のリーダーとなり、安全性に優れた原子力開発継続の意思を貫く考えだ。

フランス政府が09年末に開始した「未来のための公共投資」計画では、350億ユーロの新規国債発行により優先投資していく産業分野を特定。「持続可能な開発とエネルギー」分野のため割り当てられた51億ユーロのうち、10億ユーロが将来の原子力開発に投資されるとしていた。

フランス政府はこのうち、6億5,160万ユーロを第4世代の新型ナトリウム高速冷却炉となる「ASTRID」の詳細設計等に投入。アレバ社と仏原子力・代替エネルギー庁(CEA)が実施中の共同作業を支援する。ASTRIDは現在、予備設計段階にあり、2017年に建設に進むか否かの判断を下す予定だ。

## アレバ社ローベルジョン CEO が退任、後任はウルセル氏

世界最大の原子力産業複合企業であるアレバ社のA・ローベルジョン最高経営責任者(CEO)が任期満了に伴い退任した。後任には、L・ウルセル副CEOが6月30日付けで就任した。

CEO交代の理由としてF・フィヨン首相は「大株主である国が管理チームの刷新を望んだため」と説明。この

人事は今月末にも、アレバ・グループ監査役会が承認するとしている。同首相はまた、ローベルジョンCEOがアレバ社を世界でも有数の大手企業に育て上げたとしてその業績をたたえる一方、ウルセル氏には同社の競争力強化を通じて業績を改善し、さらなる拡大を続けるよう要請。同社の戦略的な投資を支援するため、政府が昨年12月に3億ユーロの増資を申し出たことを強調した。

新CEOとなったウルセル氏はフランス産業省の天然ガスや石炭、電力部門等で勤務した後、1993年から世界最大の送電機器メーカーであるシュナイダー・グループの社長を務めた。04年から物流大手のGEODIS社のトップを経て、07年にアレバNP社に会長兼社長として迎えられた。2010年の組織再編後は原子力事業担当最高執行責任者としてマーケティングと国際プロジェクト事業を進めていた。

[ドイツ]

## 脱原子力法案を議会在議決

16の州政府代表で構成されるドイツ議会上院は7月8日、2022年末までに同国の原子炉17基を送電網から外すことを盛り込んだ原子力法改正を含む一括法案を採択した。同法案は6月30日付けで議会下院も513対79の賛成多数で可決しており、連邦大統領による署名の後、ドイツは福島事故後に脱原子力が法的に確定した最初の主要工業国となる。

A・メルケル政権は政府発表の中で、風力など再生可能エネルギー開発の促進枠組法案も承認されたと強調。脱原子力の完了時期を当初予定から早めたことにより、今後は一層のエネルギー効率化や省エネ効率の高い建物建築の加速などと相まって、将来の世代においても現世代と同等の繁栄と快適さが享受できると謳っている。

一方、同法案には原子力発電シェアの一部を代替するため石炭およびガス火力発電所の新規建設が盛り込まれており、「脱原子力の穴埋めのほとんどは火力」との分析家の指摘は、6月に新たなエネルギー戦略を閣議決定した時点からあった。また、温室効果ガス排出抑制政策との兼ね合いについては言及されていない上、再生可能エネルギーの発電シェアも現時点で約17%に過ぎないことから、一部の分析家は今回の議会承認を「深く考えずに、政府案をしっかりと確認せずに判を押した」と形容。昨年、メルケル政権に原子炉の運転期間延長を実現させた保守派の中には脱原子力を根強く批判する向きもあるが、福島事故後に急転直下で政策転換してしまった段階では、冷静に考え始めたとしても元に戻すのは難しいとの悲観的見方が大勢だ。

## [スイス]

## 下院が原発の段階的廃止動議を採択

スイス議会・下院は6月8日の審議で、原子力発電所の段階的な廃止に関する3つの動議をいずれも賛成多数で採択した。連邦参事会(内閣)が5月末に決定した政策一国内で稼働する原子炉5基は約50年間の運転寿命を終えた順に閉鎖していき、2034年までに脱原子力を完了——を受けたもので、これらの動議は今後、上院審議に回される。

スイスではチェルノブイリ事故後の1990年に原子力モラトリアムに関する国民投票が実施され、2000年までの10年間、原子炉の新設を凍結するという脱原子力時代を経験。2003年の原子力法改正と国民投票で、ようやく原子力オプションの維持が明確に打ち出され、2008年に既存炉3基のリプレース計画が浮上したところだった。福島事故の影響により、ドイツ同様、新たな原子炉の建設を待たずに脱原子力への回帰が決まっている。

8日の下院審議では、緑の党が提案した動議により、「連邦参事会は今年の夏までに段階的な脱原子力のシナリオを作成する」との方針を採択。保守民主党(BDP)の動議では、「原子力法の改正により、2012年1月以降、原子炉の新設に許可を与えない」という提案が可決された。

また、キリスト教民主党(CVP)が提案した動議では、「安全基準を満たさない原子炉を直ちに閉鎖」や「原子力なしで将来の電力供給を保証する戦略が提出されるべき」、「再生可能エネルギーとエネルギーの効率化を促進する」などの4項目が了承された。

これら3件の票決では、いずれも約100名が超党派で賛成する一方、反対票を投じたのは最大与党のスイス国民党(SVP)、および企業寄りの自由民主党のみだったと伝えられている。

## [フィンランド]

## 6党連立の新政権、「新規計画は認めず」

フィンランドで6月22日に6党の連立による新政権が誕生した。4月の議会選挙後、2か月間にわたって連立協議を続けていたもので、中道右派・国民連合党のJ・カタイネン党首を首相とする新政権はこの日、今後の施策を記した「政府プログラム」を公表。原子力関連では、前政権が「原則決定(DIP)」を与えた2件分の原子炉建設計画については「早急に建設許可を与える」との方針を示す一方、「これ以後は新たなDIPは与えない」と明言しており、福島原発事故が同国の原子力政策に少なからず

陰を落としていることが明らかになっている。

議会選では、これまで与党だった中央党が議席を大幅に減らして政権から外れ、反EU政策を掲げる保守系右派の「真正フィンランド人党」が34議席増やして躍進した。「政府プログラム」の内容も、財政破綻したポルトガルに対するEUメンバーとしての支援問題等、公的資金の安定政策などに主眼が置かれ、原子力については各党首の記者会見でも全く触れられなかったと伝えられている。

同プログラムのエネルギー政策は「効率化と省エネの促進」により電力の自給状況改善を目指す明記。再生可能エネルギーなど低炭素電源の増強による気候変動対策も重要だとしているが、風力や日照時間に乏しい困窮であるせいか、水力以外は比重が軽い印象だ。

天然資源に恵まれないフィンランドでは現在、4基の原子炉が稼働するほか、世界で初の欧州加圧水型炉(EPR)となる5基目の建設が進められている。後続計画についても昨年、議会が電力事業者3社による提案のうち2件について政府のDIPを承認していた。

## 新設計画で入札案内を送付

フィンランドで新規地点での原子力発電所建設を計画しているフェンノボイマ社は7月1日、仏アレバ社と東芝に対して入札案内書を送付した。原子炉とタービン系統設備の納入・建設を対象としたもので、2012年から13年にかけて、いずれかを選定する方針だ。

電力コンソーシアムであるフェンノボイマ社は2020年までに同国中西部のピュハヨキかその北部のシモで、最大180万kW分の原子力発電設備を総工費40億~60億ユーロで完成予定。政府から発給された原則決定(DIP)は昨年7月に議会が承認済みで、仏アレバ社製・欧州加圧水型炉(EPR)か東芝製・ABWRの採用を検討している。

今回の入札では、建設工事段階の1年目に行われるインフラ作業、地ならしや掘削などの準備作業、およびピジター・センターの建設等は含まれない。フェンノボイマ社は2008年にアレバ社と東芝を原子炉の供給業者候補として選定。昨年末には両社と先行エンジニアリング協定を締結したほか、タービン供給の代替業者としてはアルストム社および独シーメンス社を選択している。

サイトについては、最高行政裁判所が候補地点の土地利用に関する上訴案件について裁定を下し次第、決定する。一層詳細な地盤調査や環境調査、諸手続きなどはサイト決定後に実施する計画で、早ければ2012年末にも準備作業の一部を開始できる見通しだ。

# 福島第一原子力発電所事故の分析と今後に向けて

大阪大学 山口 彰

福島第一原子力発電所の事故の被害と影響を最小限にとどめるには何ができたであろうか。2011年6月に日本国政府の報告書と東京電力の報告書が公表された。What-if?を問うことは、今の段階では早すぎるかもしれないが、想定をはるかに超える外部事象に対する危機管理と備えを考えることこそ重要であると思ひ、現場の状況を整理・分析する。

## I. はじめに

2011年6月には、福島原子力発電所の事故に関する政府の報告書<sup>1)</sup>と東京電力の被災直後の状況に関する報告書<sup>2)</sup>が発表された。政府報告書には、我が国の原子力安全規制等の仕組み、東北地方太平洋沖地震とそれによる津波の被害、福島原子力発電所等の事故の発生と進展がまず記載されている。さらに、原子力災害への対応、放射性物質の環境への放出、放射線被ばくの状況などの環境影響と続く。そして、国際社会との協力、事故に関するコミュニケーション、今後の事故収束への取組みなどを述べ、最後に得られた事故の教訓が示されている。東京電力の報告書は、発表当時に得られていた情報や関係者の証言を基に、東京電力が事実関係を取りまとめたものである。

いまだ事故が収束していない段階での報告書であり、既に確認された事実、ならびにそれに基づきつつも不明の部分は仮定を与えることによる分析と推定がなされている。また、内外から指摘される課題と教訓を網羅的に列挙している。事故の進展についてもなお事実確認が進められているし、何より、まだ事故が収束していない。示された教訓は、必要かつ十分であるのか、現実的な解決策を与えうるか、安全確保に反映するときにこれらを検証しなければならない。日本原子力学会も教訓<sup>3)</sup>を提示しており両者に共通点は多い。事故の収束と現地の修復、原子力安全確保のための諸々の活動、国内および国際社会に継続的に発信することが求められる。

事故進展と対応では何が分岐点であったか、いつだったか、それは本質的なのかを考察しなければならない。本稿では、上記報告書などに基づき時系列を並べながら、これらを念頭に現地の状況を振り返ってみたい。事故の教訓を実効的に反映するにはWhat-if?を問わざるを得ない。そのために役立つであろうと考えた。

*Close Look at the Accident in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant and What-if*: Akira YAMAGUCHI

(2011年7月12日 受理)

## II. 原子炉と燃料プール：13日間に起きたこと

事故当時は、その対応に現地対策本部には相当の混乱があったはずである。地震発生直後から3月12日までは国の緊急災害対策本部、3月13日からは緊急災害対策本部と原子力災害対策本部の連名で「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震について」が発表された。東京電力もプレスリリースを公表し始めた。12日午前5時現在のプレスリリースで初めてモニタリングカーにより発電所構内(屋外)の放射性物質(ヨウ素等)の測定値が通常値より上昇したこと、モニタリングポスト1カ所での測定値が通常値より上昇したこと、隔離時冷却系による注水状況が不明であることを示唆する内容が発表された。原子力安全・保安院の発表は7月11日時点で地震被害情報196報に上る。6月には先に述べた国と東京電力の報告書が公開されている。

きわめて制御困難な状態に陥った福島第一原子力発電所で起きたことは、稀有な特別なできごとであった。それについてさまざまな推定と解釈が伝えられている。本誌にこれまで連載された解説記事は、公表されている情報に基づきかなり正確な分析と推定をしていると思う。しかし、未確定な部分も少なくないし、今後も新たな事実が明らかになるかもしれない、修正される可能性もある。推定と事実と混同することなく、先入観なく明らかになった事実を分析する必要がある。以下に、福島第一原子力発電所で起きていることの時系列を追ってみたい。

### 3月11日：地震と津波の発生

3月11日14時46分、地震により福島第一原子力発電所の運転中のすべての原子炉(1号機から3号機)が自動停止し、外部電源が喪失するも非常用ディーゼル発電機が起動した。15時27分に津波第一波が襲来し、15時37分に1号機、38分に3号機と4号機、41分に2号機のディーゼル発電機が停止し、電源融通もできず全交流電源喪失状態となった。また、いずれの原子炉も崩壊熱除去機能

が喪失し、崩壊熱を最終ヒートシンク(海水)に移行できなくなった。さらに1号機は直流電源のバッテリーが津波により喪失、2号機と3号機は数時間後にバッテリーが枯渇したため、プラントパラメータの確認ができなくなった。1,2号機では原子炉水位も注水状況も不明となり、15時36分に15条通報(非常用炉心冷却装置注水不能)がなされた。こうして、原子炉の水位、注水状況などが把握できず、照明、通信設備も失われ、文字通り手さぐり状態での事態収拾を強いられる、きわめて過酷な事故が始まった。

1,2号機では炉心の状態を把握することが最優先とされ、構内企業からバッテリーやケーブルを収集、図面の確認を行い、接続を行った。3号機は、直流母線が被水を逃れたため、バックアップ用蓄電池により長時間にわたり隔離時冷却系や記録計を動作させることができた。そこで、3号機と4号機では、交流電源がなくとも作動する隔離時冷却系と高圧注水系のために、バッテリーをできるだけ長く維持できるように、必要のない負荷を落とす作業が行われた。電源は重要であった。

東京電力は、津波直後から電源車を確保すべく奔走する。すでに外部電源の早期復旧は困難であるとの判断がなされ、非常用ディーゼル発電機が水没したことから他に選択肢はない。後にわかることだが、1号機と3号機は電源盤がすべて水没し、電源車がたとえ到着してもすぐには繋ぎ込めない状況であった。2号機は電源盤(パワーセンタ)が一部使用可能であり、優先して電源車を接続すべくケーブル敷設を開始した。この時点で、特に1号機は、相当に厳しい状況との認識があったはずである。

2号機は15時39分に隔離時冷却系を手動起動するが、原子炉水位が確認できなくなったため、17時12分にはアクシデントマネジメント対策である消火系ラインと消防車を使用した注水方法を検討、その後、ディーゼル駆動消火ポンプを起動するが停止してしまう。21時2分、注水状況が確認できず現地本部は燃料露出を懸念する。

3号機は16時3分に隔離時冷却系を手動起動し冷却が確保された。20時49分には1,2号機の、21時58分に3号機の中央制御室に仮設照明が設置された。そして1号機の液位が燃料頂部から+200 mm(21時19分)および+550 mm(22時)、2号機が+3,400 mm(21時50分)に液面があることを確認した。原子炉水位が維持され、炉心冷却がなされているわけで、厳しい中にも明るい情報ももたらされ、安堵したに違いない。

後に行われた解析により、1号機は、3月11日の夕刻(地震発生後2~3時間)には燃料が露出し、その1時間後に炉心損傷が始まり溶融炉心が下部プレナムに落下したと発表された。それは以下を仮定した解析に基づく：(1)非常用復水器は全交流電源作動して喪失以降は作動していない、(2)地震発生後18時間から格納容器に直径3 cm

の漏えい口が空き、50時間後に直径7 cmに拡大した。これらは、格納容器圧力を実測値とある程度合わせるための仮定である。全交流電源喪失の後、非常用復水器の弁開度の時系列が不明で非常用復水器がどの程度冷却に寄与していたかはわからず、解析結果は液位の測定結果と整合していない。

1号機では21時51分に原子炉建屋の線量が上昇し入域禁止に、23時にはタービン建屋の線量が短時間のうちに1.2 mSv/hまで上昇した。この時点で炉心が損傷し放射性物質が放出されたことを認識したはずで緊張感につつまれるとともに、ベントや海水注入などの手段が現実味を帯びてきたに違いない。

3月11日深夜から12日未明にかけて電源車が順次到着する。建屋内では暗闇の中、約40名が人海戦術で4~5時間かけて1トン以上のケーブル敷設を実施した。障害物の散乱、度重なる大津波警報で退避をしながらの作業である。電源盤へのつなぎこみ作業も困難を極めた。このとき、通信設備も使えないため、発電所対策本部との連絡も手間取っていた。

炉心の損傷を認識し、しかも電源がすぐには回復できないであろうこともわかっていた。電源がない状態で果たしてベントができるのか、これが次の焦点となる。夕刻から図面をとりに行き、ベント弁の型式・構造を確認した。その結果、手動でベントが可能であると判断された。11日深夜23時50分、望まざる情報が得られた。バッテリーをドライウェル圧力計につなげたところ、1号機の格納容器圧力が設計値の1.5倍(600 kPa)に達したとわかったことである。それ以前は格納容器圧力の記録は発表されていないのは、電源喪失のために測定ができなかったであろう。いよいよ格納容器ベントが喫緊事となった。

### 3月12日：1号機の水素爆発

1号機では、12日0時6分にはベント準備の指示とともに、800 kPaから100 kPaに圧力が低下した際に放出される放射性物質量の検討がなされた。0時30分に3 km以内の住民避難を確認、0時49分には1号機で2回目の15条通報(格納容器圧力異常上昇)が出された。格納容器のベントに注目が集まり、5時14分まで格納容器圧力は継続的に測定されている。2時30分には設計値の約2倍である840 kPaに達した。原子炉建屋や圧力抑制室の線量がきわめて高い上に暗闇の中、懐中電灯に頼りながらの作業が続く。この間、4時30分には余震による津波の可能性から現場操作禁止が指示されるなど多くの困難を伴った。なお、4時15分以降は、圧力は低下傾向と報告されている。4時23分の発電所構内のモニタリングで、20分前と比較して正門付近の放射線量が約10倍に上昇していることが報告された。つまり、放射性物質は建物の外にまで広がったこと、それも急速に、が確認されたの

である。

2時55分には津波が発生する恐れがある中、2号機の隔離時冷却系が運転していることを現場で確認した。冷却ができていた2号機よりも、1号機の対応を優先的に実施することになる。その後しばらく、2号機の操作などの記録はない。

1号機の炉心の冷却は不十分なままである。5時46分には消防ポンプによる代替注水を開始している。6時50分に手動によるベントの実施命令が経済産業大臣からあった。2時間をおいて9時を目標にベントを行うよう発電所長は指示する。空白の2時間である。9時15分に電動弁を手動で25%開度としたが、直列につながる空気作動弁の開操作はできなかった。線量が高すぎたためである。10時17分に計装用圧縮空気系の残圧を期待してベント弁操作を試みるがその成否は不明であった。14時に仮設の空気圧縮機を設置してベント操作を実施、14時30分に格納容器圧力低下によりベント成功と判断した。上述した解析においても格納容器の圧力時系列は再現されず、今なお不確かなところもある。水源枯渇のため、14時53分に淡水の炉心注入が終了する。80トン注入された。引き続き海水注入実施の指示があった。12日の午後には、格納容器のベントにも成功し、代替注水の準備も進んでいた。重大な危機は乗り越えたという認識が現地対策本部にあったかもしれない。放射性物質の放出は既であったとしても。

水素爆発が発生(15時36分)したのは、電源車による電源復旧により、ホウ酸水注入系からの注水準備が完了したときであった。1号機は原子炉建屋が著しく損傷し、ホウ酸水注入系の電源設備や海水注入のために準備していたホースも損傷し使用不能となった。結局、19時4分に消火系ラインから消防車による海水注入を開始することになる。放射性物質の放出については、国の報告書は、解析条件、解析モデル、および事象進展の不確実性がゆえに参考値にすぎないとしている。

水素爆発は、1号機原子炉建屋を損壊させただけでなく、事故収束のためになされていた準備を水泡に帰した。さらに、放射性物質を含む瓦礫を散乱させ作業員のアクセス性も著しく劣化した。水素爆発が発生しなければ、その後の進展は大きく異なっていたと思う。水素爆発を防げなかったことは最初の重要な分岐点である。

1号機の水素爆発により、現地の対応は2号機と3号機に重点が移っていく。1号機の水素爆発の後、17時30分に2号機のベント操作の準備指示が発電所長からあった。2号機の水素爆発は何としても防がなければならず、早期のベントが必須であった。

隔離時冷却系が起動していた3号機では、12時36分に同系がトリップするが、11時35分には炉心水位低により高圧注入系が自動起動した。3号機でも17時30分に格納容器ベントの準備指示が出る。3号機は炉心の冷却がな

されていたので余裕があると考えられていたのである。そうであるにしても、2号機と同様、水素爆発は何としても阻止しなければならない。

### 3月13日：原子炉冷却確保に手間取る

2号機では、13日11時ごろに圧力抑制室からのウェットベントライン構成が完了した。しかし、格納容器圧力がラプチャディスクの作動圧よりも低く、ベントされない。やむを得ず、しばらく圧力の監視を継続することになる。12時5分には発電所長から海水使用準備の指示がある。

3号機では、2時42分に高圧注入系が停止した。隔離時冷却系による原子炉注水ができなかったため、5時10分に原子炉冷却機能喪失と判断、15条通報に至った。これは、1、2号機より2日遅かった。5時15分には発電所長がベントライン構成の指示を出し、8時41分にベントライン構成が完了する。9時8分に逃し安全弁により原子炉の急速減圧を実施した。これにより格納容器の圧力が上昇してベントされること、そして原子炉圧力容器の圧力が低下することにより小さな駆動圧で原子炉に注水できるようになる。9時20分にはドライウエルの圧力低下を確認しており、ベントに成功した模様である。9時25分には消火系ラインにより淡水注入を開始する。しかし、水量は十分でなく、なお原子炉水位は低下し続けた。発電所長は10時30分に逆洗弁ピット<sup>a)</sup>から海水を取水して注入することを指示、いまだ余震が続き、そのたびに退避を余儀なくされる中、準備が進められたがはかどらない。そうするうちに、12時20分に防火水槽の淡水が枯渇した。消火系ラインから消防車による海水注入が始まるのは1時間後の13時12分であった。

### 3月14日：3号機も水素爆発

3号機では海水も不足するという事態を招いていた。逆洗弁ピットに海水を補給するため、1時10分から海水注入を停止する。3時20分ようやく逆洗弁ピットから消防車による海水注入を再開する。未明から格納容器圧力が徐々に上昇し始め、5時20分に圧力抑制室からのウェットベントを行っている。ベント、海水注入が行われたのであるが、注水量は毎時10トン強と不足していた。炉心の損傷が進んでいるのであろう。決定的な事態、水素爆発が発生したのは11時1分であった。原子炉建屋ならびに廃棄物処理建屋が損壊する。11名の負傷者を数え、全員避難。消防車やホースの損傷、高線量の瓦礫が散乱、逆洗弁ピットも使用不能になる。こうした混乱した状況の中、消防車を物揚場付近に移動して2、3号機に海水を送るラインを再構築し、16時30分に海水注入を

<sup>a)</sup>復水器細管を洗浄するとき、細管内の海水を逆流させるための弁が設置されているピット。タービン建屋と取水設備の間にある。

再開した。

3号機の水素爆発により、現場の関心は2号機へと移っていく。3号機の水素爆発は2号機にも重大な影響を与えることになる。ベント弁が閉となり開けることができなくなった。また、海水注入のために用意していた消防車やホースが使用不能になった。こうして津波襲来70時間後の14日の13時25分になって2号機の原子炉水位が低下し始めたことから、原子炉冷却機能喪失の判断(15条通報)がなされた。ベント弁が直ぐには使えず、16時頃に海水注水のために逃し安全弁で原子炉圧力容器の減圧を試みる。それに必要なバッテリーは構内の車両からかき集められた。ようやく18時頃に減圧に成功する。17時17分に燃料の露出が始まり、18時22分に燃料全体が露出したと判断された。19時54分によりやく海水注水を開始することにより冷却が復帰した。ようやく、各号機への海水注水が開始したことになる。

3号機の爆発時に2号機のブローアウトパネルが開いたことにより2号機の水素爆発が防がれたとの指摘もあるが、その真偽は確かではない。また、いずれの報告書にもその記載はない。翌15日の8時25分に2号機5階からの白煙を確認し、同9時16分には5号機と6号機の原子炉建屋外側の壁パネルの開放が検討されている。情報が錯そうする中、現地対策本部ではそのように考えていたのかもしれない。東京電力は19日になって、燃料プールからの水素対策のために5号機と6号機の原子炉建屋の屋根に3か所ずつの穴をあける。

2号機の海水注入が始まると、注目は注水からベントに移っていく。2号機でも水素爆発が起きないか心配されたはずである。その理由は定かではないが、2号機の原子炉建屋のブローアウトパネルが開口し、原子炉建屋に漏出していたであろう水素の排出、水素爆発の回避に至った。21時にはベントライン構成を完了するが、ドライウエルの圧力が上昇しているにも関わらず圧力抑制室の圧力がラプチャディスク作動圧よりも低くウェットベントができなかった。そこで、水を通さずにドライウエルベントを行う方針が深夜23時35分ごろに決定される。

事故後3日目になって1号機、3号機は炉心融融と水素爆発に至った。2号機は、炉心全露出、そして格納容器の圧力上昇という過酷な状況が続く中で対策が急がれた。

### 3月15日：2号機の格納容器破損

2号機では15日0時2分にベントがなされたが格納容器の圧力は750 kPaから低下しなかった。その後、原子炉には注水が続けられたが格納容器圧力は高いまま、6時ごろに圧力抑制室で水素爆発と見られる大きな衝撃音が発生、圧力抑制室の圧力が0 MPaを指した。

結局、地震時に運転していたすべての号機で爆発が起き、いずれの原子炉の冷却も完全な制御ができない異常事態に進展した。この後は、原子炉の冷却を休むことな

く続けることが必要であり、当面、それ以上になす術がなかった。7時には、監視と作業に必要な要員70名を残して650名が福島第二原子力発電所に一時退避することになる。

3号機は、原子炉に燃料が装荷されていない4号機にも重大な影響を与えていたようである。水素爆発後に4号機の原子炉建屋の5階屋根付近の損傷が、そして8時11分には原子炉建屋の損傷を確認、9時38分に同3階北西角で火災が発生、11時ごろに自然鎮火を確認している。4号機の建屋で起きたことは、現場の要員が少なかったこともあるかもしれないが、詳細は不明である。

23時5分には、正門付近で4,548  $\mu\text{Sv/h}$ というきわめて高い線量が計測される。

3月11日に遡るが、全交流電源喪失直後から、1号機から4号機で燃料プールの冷却不全に陥っていた。しかし、原子炉の対応に多くの資源を割かざるを得ず、燃料プールの冷却確保は後回しになった。最初の指示は、15日22時に経済産業大臣の4号機のプールへの注水命令である。これは、14日11時1分の3号機の水素爆発、15日6時ごろの2号機の圧力抑制室付近の爆発、4号機の原子炉建屋の著しい損傷の後である。

大量の放射性物質が放出されたのは15日から16日にかけてであった。その定量評価は解析によるものが発表されている。1号機の評価はすでに述べた条件で行われた解析である。2号機は、地震発生から21時間後に直径10 cmの穴がドライウエルに、衝撃音が発生した時点から圧力抑制室に直径10 cmの穴が開いたと仮定している。3号機は原子炉水位を計測値に合わせ、燃料域内に水位を維持できていないという仮定の解析である。放射性物質の放出量はこの仮定による推定値であると理解しておかなければならない。

### 3月16日：原子炉の燃料プールの冷却始まる

1号機から3号機まで海水注水が継続し、原子炉の状態は安定していた。冷却は順調になされているようであった。16日からは、燃料プールの冷却が始まる。最初に対策がとられたのは3号機である。3号機の燃料プールに自衛隊のヘリコプターによる放水が行われた。原子炉冷却は安定しており、懸案であった燃料プールへの対応が開始した。事故収束への光明を見出したという意味で、二つ目の分岐点であったと思う。

第1表に示すように、燃料プールに貯蔵される燃料の発熱は十分に低く、燃料上端が露出するまでの時間は最短の4号機でも12日間である。1号機は278日とほとんど何も手を施さなくともよい状況である。つまり、10日間程度は冷却しなくとも問題はない。まず1号機から3号機の原子炉への対応に集中したことは、妥当な選択であったと思う。4号機はプールの燃料の露出が当初から指摘されていたが、ヘリコプターからの目視により4号

第1表 燃料プールの冷却余裕日数

	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	共用プール
燃料集合体数(本)	292	587	514	1331	946	876	6300
プール水の量(m <sup>3</sup> )	1020	1425	1425	1425	1425	1497	3828
崩壊熱(Mcal/h)	60	400	200	2000	700	600	1000
除熱水量*(kg/day)	2500	16300	8200	81500	28500	24500	40800
余裕時間**(Day)	278	58	117	12	33	41	63

\*水の温度を50℃とする

\*\* 4 mの液位に低下する日数

機のプールに水面が見えたとの証言があったとのこと、建屋の損傷が激しく天井が損壊し、放水が可能な3号機プールの冷却を優先したのかもしれない。

### 3月17日：3号機燃料プールの安定冷却

3号機では17日より放水車、消防車により淡水および海水の放水が行われた。相当の冷却効果が確保され、放水はしばらく継続された。その後、3月29日よりコンクリートポンプ車による海水放水、4月26日より燃料プール冷却材浄化系を用いた淡水注入がなされた。

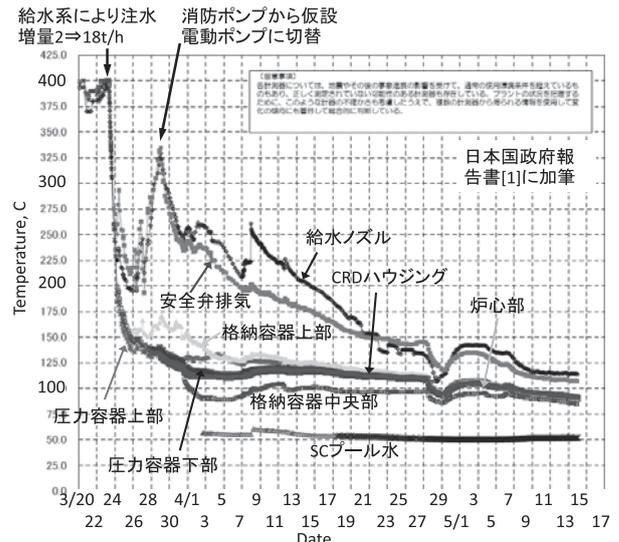
### 3月20日：燃料プール冷却の見通しがたつ

2号機は、20日より燃料プール冷却材浄化系を用いて海水注入を始めた。そして、3月29日より淡水注入をした。4号機は3月20日より放水車と消防車により淡水放水、3月22日よりコンクリートポンプ車による海水注水、3月30日より淡水注水を行った。1号機は、3月31日よりコンクリートポンプ車による淡水注水した。

1号機の対応は若干遅れたが、それは第1表に示す通り、冷却に十分な余裕があったからである。1号機から4号機までは、燃料プールへの海水注入が安定的にでき、燃料プールの冷却の見通しがたった。原子炉も燃料プールも冷却が可能となり、さらなる放射性物質の大量放出のリスクは回避された。いまだ多くの問題は残るにせよ、当初の緊迫した状態は脱した。

### 3月23日：原子炉の安定冷却確立

1号機から3号機の原子炉には、海水注入が続けられた。第1図に1号機の原子炉と格納容器まわりの温度を示す。3月23日未明まで原子炉压力容器の温度は400℃弱程度で推移している。原子炉圧力は3月15日からゲージ圧で0.2 MPaまで低下し、ほぼ一定値を示している。燃料が冠水しているとすればこの圧力では水は100℃強でなければならない。計測値が正しいとすれば、注入した水が蒸発、露出した燃料により過熱されていることを意味する。3月23日2時33分に消防ポンプにより消火系から海水を注水していたところに加えて海水系を用いて海水の外部注水を開始した。これにより、注水量は毎時2トンから毎時18トンに増やされた。すると原子炉温度



第1図 1号機の原子炉及び格納容器周りの温度推移

はみるみる低下し200℃程度に低下した。

この段階になって、現場ではすべての原子炉と燃料プールで状態が落ち着いたという認識を持ったのではない。それから後の対応は着実かつ確であり、状態は徐々に改善していく。1号機の原子炉温度が低下する少し前、3号機では22日深夜22時46分に中央操作室の照明が復帰した。24日11時30分には1号機の中央操作室の照明も復帰する。26日には2号機の中央操作室の照明が復帰した。3月23日は、三番目の分岐点であり、これを境に重要な関心が原子炉と燃料プールの冷却から、汚染水の処理に移行していくのである。

### 3月24日以降：放射性物質放出抑制に向けて

3月24日以降は、原子炉の冷却と燃料プールの冷却が維持される。25日は1号機と3号機、26日には2号機の原子炉注水を海水から淡水に切り替える。その後、消防ポンプによる海水注水から仮設電動ポンプによる淡水注入に切り替える。そして、タービン建屋地下の滞留水の移送も開始する。4月6日にピットから漏れいていた高レベル汚染水の対策が取られた。1号機では4月7日に窒素ガス注入が開始された。燃料プールの水は分析され、燃料の大部分が健全と判断された。また、酸化防止のためヒドラジンを注入した。

焦点は水素爆発の予防や汚染水の処理などの2次的なリスク管理に移った。4月17日には、事故収束までの工程表が東京電力から発表された。最重要の当面の課題は汚染水の処理である。本稿執筆時点で冷却水を除染・循環するシステムが動き出し、汚染水を増やさずに冷却ができるようになった。

## Ⅲ. 防災に関する問題(INESの評価とSPEEDI)

放射線防護、住民の方々の避難と的確な情報提供の間

題がある。原子力安全・保安院は、国際原子力事故尺度 (INES) の評価を実施する責務を負う。まず3月11日に1号機と2号機について冷却不能とし INES のレベル3と発表した。翌12日には1号機のベントと原子炉建屋の水素爆発を受け、レベル4とした。3月18日には2号機、3号機でも炉心損傷が発生しているとの判断からレベル5と引き上げ、4号機の燃料プールについては補給水と冷却機能の喪失によりレベル3とした。これをもってスリーマイルアイランド事故と同等と解釈されることになる。

およそひと月後の4月12日に INES の評価をレベル7に引き上げた<sup>4)</sup>。原子炉から大気中への放射性物質の総放出量がヨウ素換算で37万 TBq とした解析に基づき、それがモニタリング測定結果からの逆算とも整合すると判断した。レベル7の目安はヨウ素131換算で5万 TBq であり、それを超えている。これにより、国際社会はチェルノビル事故と同程度と解釈をした。この放出された放射性物質量は INES のレベル7の基準に達したという理由であるが、先に述べたいくつかの仮定をおいた解析などによっている。また燃料プールからの放出、海洋への放出については評価されていない。一方で原子炉は、安定化に向かっており、放射性物質の放出も減少傾向にある。

IAEA の INES マニュアル<sup>5)</sup>の冒頭に、“INES 尺度は、放射エネルギーという観点から、事象の安全上の意味を公衆とコミュニケーションするために、即座にかつ首尾一貫して、用いる”と述べている。そして、INES は専門家とメディア、公衆のコミュニケーションツールであると定義している。したがって、メディアと公衆が事象の理解について混乱しないためにも INES の事故スケールは迅速に発表することが大切である。

福島第一原子力発電所事故の際に、以下のように避難指示が出された。

3月11日には、避難区域：3 km、屋内退避区域：3～10 km とした。翌3月12日には避難区域：10 km、そして同日20 km と変更された。さらに、3月15日に屋内退避：20～30 km とされた。したがって、3月18日にレベル5に引き上げた時点では、住民の避難は完了していた。

このように、当初の INES のレベルの発表は、住民の避難と照らし合わせ、迅速で適切であると思う。また、18日の時点で引き上げたことは、避難が完了している状況ではあるが、15日から16日にかけての放射性物質放出の深刻さを伝えるメッセージとなっている。

INES がコミュニケーションツールであるとするならば、緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPEEDI) を活用すべきであることは言うまでもない。気象条件と放射性物質拡散の情報が、3月12日のベントの時点から発表されていれば、そして、各自治体(市町

村)にその情報が迅速に伝わり、それを理解して活用して防災対応を行っていれば、INES の情報と合わせて放射線防護に相当役立ったのではないかと思う。

4月12日のレベル7の再評価は早計であったと思う。なぜなら、新たな放射性物質の放出はないからである。INES マニュアルは、レベル7の5万 TBq の目安の数字そのものには意味はないと述べている。INES 尺度は、防災の観点から事故の重要性を語る物差しであることを前提として迅速な評価がなされるべきである。一方、事故の安全工学上の意味合いの評価は、十分な分析がなされた後でも構わない。結果的に、INES 尺度が、風評被害のトリガーになった面があるかもしれない。INES 尺度は、原因究明が行われ再発防止対策が確定した後に正式に評価される。公衆の放射線安全という観点から専門的な検討が行われること、過酷事故に対して INES のレベル分類は適切だったか、複数基の炉心損傷に対してどのように適用すべきか、事故のタイプ(例えば核暴走型と除熱喪失型)による放出形態と組成の違いをどのように考慮するのかなどの課題が明らかになったと思う。

#### IV. 過去の教訓に学ぶ

Accident Sequence Precursor (ASP) 分析という手法がある。これまでに経験した深刻な事故につながるかもしれない予兆事象を調査し、その事象が炉心損傷に至るとすれば、どのようなシーケンスになるかを分析する方法である。米国原子力規制委員会 (USNRC) は ASP プログラムを1979年から実施し、実際に発生した異常や事故が原子力安全にとってどのような意味を持つかにつき、貴重な考察と知見を米国の原子力産業に与えてきた。リスク評価 (PRA) 手法の開発と相まって、ASP プログラムは成熟した。ASP とリスク評価は教訓を学ぶ両輪である。

米国で最初の PRA 研究は、1975年に実施された Reactor Safety Study (WASH-1400) である。USNRC は、WASH-1400 のクロスチェック評価を実施すべく、ルイス委員会を組織した。1978年の報告書に示された多くの提言の一つが原子力発電所のリスクを評価するために運転データを活用するというものであった。潜在的に重要な事故シーケンスと予兆事象が発生した場合には PRA で検討したシナリオと照らし合わせて分析すべきと指摘した。この提言を受けて、USNRC のリスク解析部は1979年夏に ASP を開始する。奇しくもスリーマイルアイランド事故の直後であった。ASP の最初の報告書<sup>6)</sup>は1982年に発行された。重要なポイントはプラント固有の評価であり、USNRC はプラント固有の PRA モデルの開発を始めた。

洪水による外部電源喪失の事例<sup>7)</sup>を挙げる。フランスの La Blayais 発電所は900 MWe の PWR でボルド北西

のジロンド川河口近くの湿地に立地している。数十年間の洪水水位の記録を外装して設計洪水水位は5.02 mとされた。1999年12月27日に洪水が襲った時には1号機、2号機、4号機は定格出力運転中、3号機は燃料交換が終了したところであった。暴風と満潮が重なり設計洪水水位を大きく超え、19時30分から22時20分まで2号機と4号機の外部電源が喪失、原子炉停止した。洪水は19時30分から開始し満潮は21時30分であった。敷地の北西から浸水し、特に1号機と2号機は重大な被害を受けた。電気室、海水ポンプ室、燃料建屋などに浸水し、崩壊熱除去機能、補機冷却機能、電気系などが喪失した。

原子力安全のために行うべきであったこと、重要なことは、各国で発生している前兆事象やニアミスをしっかり分析して教訓を抽出すること、我が方のプラントであればどうなったかを考え固有の評価を行うこと、もしも脆弱性があればそれを自発的に強化する姿勢である。

## V. おわりに

全交流電源喪失による計器不良と照明、通信機能の喪失、高い放射線量によるアクセス性劣化の中、発電所対策本部の対応は極限の状態に相当のことをこなしている。あの津波では全電源喪失やヒートシンクの喪失はやむを得ないと思う。事故の経緯を見ると、何らかの手段を講じる可能性があるとするれば唯一、12日0時6分のベント準備指示から14時30分のベント成功までである。2時55分時点で2号機と3号機は冷却されていることがわかった。すべての資源を1号機に注ぎたはずである。この間、格納容器ベントと代替注水が試みられるが功を奏さない。ベント成功操作がなされたのは14時である。そして、15時36分に水素爆発が発生した。最初の分岐点と思う。もし、水素が原子炉建屋に漏出する前にベントが行われていれば水素爆発はなく事故収束に向けて様々な策をうてたはずである。

結局、3月15日までは対応が後手に回り続けた。1号機から3号機までの原子炉と1号機から4号機までの燃料プールが重大損傷した。一方で、消防ポンプを用いた海水注入による原子炉の冷却を16日までには確立した。燃料プールの冷却にも取り掛かった。二度目の分岐点である。その後、20日には燃料プールの安定冷却のめどが立った。最後の分岐点は23日である。いまだ高かった原子炉温度、さらなる放射性物質の放出もあり得た。給水系により注水量を増やし、十分な冷却を確立した。原子炉温度は直ちに低下した。津波発生から13日間にわたる必死の対応は一段落した。いずれかで異なった対応をしていればどうなったか、what-if分析をしてみると、現場の状況は極限状態といえるほど厳しい。

事故進展の分岐点と考えられるのは3月12日(水素爆発による悪化)、16日(炉心冷却の維持)、23日(炉心とプールの安定冷却)である。1号機でベントが速やかに行わ

れ水素爆発がなければ、このような事態には至らなかったであろう。しかし、電源も照明も通信もなく瓦礫が散乱し、たびたびの余震と津波警報が続く中で、それが可能であったかは不明である。津波の脅威は凄まじいと言わざるを得ない。

この事故では重大な放射性物質の放出があった。住民の方々の避難を適切に迅速に行うという意味で、INESの事故尺度とSPEEDIの活用はキーポイントであったと思う。INESの事故尺度はこの事故では必ずしも効果的に機能しなかった。課題と改善策について我が国からの発信を期待したい。また、SPEEDIなどの情報が十分活用できず、国、事業者、自治体が連携した体制がとれなかった。実効的な方策を議論する必要がある。

世界各国の運転経験を探れば、似たようなニアミスが見つかるはずである。過去の教訓に学ぶ姿勢を忘れることなく、安全向上に反映する仕組みを用意すべきと思う。いくら、安全対策を施しても我々の想像力の網をすり抜けるようなシナリオは発生しうる。しかし、最初は予兆事象やニアミスとして現れる。こうして顕在化した問題を、芽の段階でしっかり分析し、個々のプラントに当てはめてそれぞれの脆弱性を見出し、リスク管理を行うという地道な努力が大切であり、現実的かつ有効なアプローチである。

### —参考文献—

- 1) 原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について、原子力災害対策本部、平成23年6月。
- 2) 福島第一原子力発電所 被災直後の対応状況について、東京電力。
- 3) 日本原子力学会 <http://www.aesj.or.jp/information/fnpp201103/chousasenmonikikai.html>
- 4) 東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所の事故・トラブルに対するINES(国際原子力・放射線事象評価尺度)の適用について、経済産業省ニュースリリース、平成23年4月12日。
- 5) INES, *The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual 2008 Edition*.
- 6) *Precursors to Potential Severe Core Damage Accidents: 1969-1979, A Status Report* (NUREG/CR-2497, Volume 1), June 1982.
- 7) A. Gorbachev, *et al.*, Report on flooding of Le Blayais power plant on 27 December 1999.

### 著者紹介



山口 彰(やまぐち・あきら)  
大阪大学  
(専門分野)原子炉工学、システム工学

## 解説

## 福島第一原子力発電所事故による放射性物質の汚染からの環境修復に向けて

「原子力安全」調査専門委員会 井上 正, 高橋史明, 諸葛宗男  
クリーンアップ分科会

「原子力安全」調査専門委員会クリーンアップ分科会は放射性物質による発電所敷地外の汚染からの環境修復に向けて、放射線モニタリングセンターと環境修復センターの早期の設置、環境修復戦略と環境修復技術プログラムの提示を地域住民の参加を得て実施することを提言した。また、本稿では同様な地域汚染を経験したチェルノブイル事故の例を、環境修復の面からその知見を紹介した。一方、環境修復にあたっては、汚染されたガレキ等を制度面で産業廃棄物として取り扱えないことや、避難解除する場合の環境放射線の安全基準がないことが課題であり、法制度面での整備が必要となっている。

## I. クリーンアップ分科会の活動と提言

## 1. クリーンアップ分科会の活動

「原子力安全」調査専門委員会クリーンアップ分科会では、今回の福島第一原子力発電所(以下、発電所という)内外の放射性物質による汚染の除去や環境修復について分析し、課題の検討と解決に向けての提言を行うことを目的としたクリーンアップ分科会を立ち上げた。

発電所敷地内については、中長期的な検討として、(1)燃料の取出しとその処理、処分に伴う課題の抽出、(2)汚染水処理や汚染廃棄物の種類と物量を分析し放射性廃棄物の処理・処分方策における課題の抽出を行い、環境修復計画について必要に応じて提言を行う予定である。

発電所敷地外については、汚染状況の把握、分析を行い、大量で種々の汚染物からの放射性核種の除去、その処理について課題を抽出し、総合的な環境修復戦略を検討する。これを通して修復活動について提言や、社会も参加した実現可能な修復プロセスに関する技術プログラムを作成することとしている。また、今後必要な方策として汚染地域内に環境放射線モニタリングセンターや環境修復センターの必要性の提言など、環境修復に関する4項目の提言を行った。

## 2. 提言1：速やかなる「環境放射線モニタリングセンター」の設置と「環境修復センター」の設置

## (1) 「環境放射線モニタリングセンター」の設置

各機関が独自に実施している環境放射線の測定データ

は、それぞれの目的に応じて、測定条件や単位が設定されているため、一般公衆の理解を難しくしている。このためこれらのデータを集約し、測定地点間の比較や経時変化などを総合的に解析する「環境放射線モニタリングセンター」を設置することが有効と考える。また、モニタリングの実施には関係する自治体と連携し、きめ細かなデータを取得・収集する必要がある。収集されたデータおよび解析結果は、自治体等を通じて速やかに住民に説明することが重要である。さらに、被災地域周辺では、放射線に対する人体への影響や環境中に放出された放射性物質の今後の見通しについて、大きな不安が広がっていることを鑑みれば、本放射線モニタリングセンターの設置と並行して、放射線防護の専門家による現地住民への定期的な説明体制の構築を急ぐ必要がある。

## (2) 「環境修復センター」の設置

福島第一原子力発電所敷地内と敷地外の環境修復に対応することができる「環境修復センター」の設置を提言する。現在、発電所敷地内については電気事業者と国が事故後の状態の安定化に向けた対応活動に注力している状況であり、本分科会ではそれらの計画や実施方策について評価や必要な提言をしていく予定である。また中長期的な課題として、燃料の取出しや大量の汚染水の処理についてもその技術方策について検討し提言していく。

一方、発電所敷地外の環境修復については先を見通した一元的な計画策定とそれに基づく実践が早急に求められている。このような状況に鑑み、環境修復センターで

*Remediation of Contamination from Radioactive Material by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident* : Tadashi INOUE, Fumiaki TAKAHASHI, Muneo MOROKUZU.

(2011年 7月1日 受理)

<sup>a)</sup>総合戦略とは、発電所敷地内外の広範な地域を対象に、周辺住民の生活上の重要度に基づく実効的な除染計画を立案するとともに、適用可能な技術とその実施方法を2次廃棄物の発生およびその処理、処分法も含めて提示する総合的な環境修復戦略をいう。

は、まず環境修復のための総合戦略<sup>a)</sup>を作成し、適用できる技術を提示し、実施計画、実施方策を明示することが必要である。また、その戦略策定にあたっては、発電所敷地外への放射性物質の放出による周辺住民の避難生活が長期におよび将来への不安が強くなっていることから、早期に放射性物質を含む土壌や水、粉じんなどを除去するため既存技術を適用した修復計画を策定することが必要である。さらに既存技術だけでは十分に放射性物質を除去できるとは限らないため、合理的かつ効果的な放射性物質の除去技術を開発することも必要である。

一方、実際に放射性物質の除去作業を展開するにあたっては、あらかじめその効果を定量的に把握しておくことが重要である。そのための実地試験場を被災地域内に設け、修復に適用する技術の除去効果を検証するとともに実際の作業にあたっての課題を確認することも環境修復センターの重要な役割と考える。

以上のような環境修復に関する戦略の策定、技術の提示、実証試験や技術開発を総合的に実施する機関として「環境修復センター」を被災地域に設置することを提言し、その設置、運用にあたって、クリーンアップ分科会は積極的に協力したいと考えている。

### 3. 提言 2：放射性物質の除去に向けた環境修復戦略の構築

#### (1) 放射線測定結果に基づく環境修復計画の策定

環境修復計画の策定にあたっては、空間線量率や、放射性物質の土壌濃度等のマップが必要である。また、対象となる土地や施設の利用状況および合理的に達成し得ると判断される放射性物質の除去効果に基づいて環境修復計画を策定することが必要である。一方、環境修復には長い期間を要する場合も想定されるため、必要に応じて段階的な目標を設定し、地道でたゆまぬ努力が必要である。

#### (2) 客観的指標に基づく環境修復の優先順位の決定

環境修復の対象となるエリアには、病院や学校、公共施設といった人の出入りが多い施設がある一方で、山林のようにほとんど人の出入りがない場所も存在する。また、山間の農地の場合、農地そのものの環境修復だけでは、山林からの影響を長期的に受ける可能性がある。したがって、そこで生活し、生産活動に従事する人々の放射線影響を考慮することが重要であり、環境修復の実施には総合的な検討を踏まえ優先順位を設ける必要がある。実際の環境修復の優先順位は、対象とされる施設や場所の放射性物質の濃度のほか、環境因子(利用形態、利用頻度など)に基づく客観的な指標によって決定することが公平かつ効果的と考える

#### (3) 合理的な環境修復技術の適応性評価

環境修復作業の実施によって、濃縮された放射性物質を含む廃棄物が多量に発生すると予想される。また、様々

な作業にともなう 2 次廃棄物も生じることから、それらの量、種類、放射性物質の濃度を適切に把握した上で、処理・処分の方策を検討することが重要である。一方、環境修復作業従事者の被ばくリスクの定量評価や防護策の検討も環境修復戦略の策定には欠かせない要因である。

### 4. 提言 3：環境修復技術プログラムの早期の提示

#### (1) 最終的な姿と段階的目標の早期提示

環境修復による被ばく線量率や放射性物質の濃度の低減効果について、あらかじめ達成し得る最終的な目標値を時間スケールとともに明確に示す必要がある。また、最終目標の達成に長期を要する場合には段階的な目標(被ばく線量や環境修復面積など)を達成時期ごとに示すことが地域住民にとって重要な指標となる。

#### (2) 確実に達成可能な環境修復効果の見極め

早期の修復作業の着手に向けて、対象となる地域や地目ごとに適用可能な既存の候補技術を定量的な環境修復効果とともに提示することが求められる。適用技術を選定する際には、期待される環境修復効果のほか、廃棄物の種類や特性なども考慮に入れなければならない。一方で、新たな技術開発が必要な場合は、課題を抽出し速やかに着手する必要がある。また、環境修復の実施および技術開発は、我が国の関連機関が協力して、その知見を総合して対応することが望まれる(現状は各機関が個別で統一がない)。日本原子力学会クリーンアップ分科会は、今後提案される様々な技術方策に対し、期待し得る環境修復効果や環境修復計画への適用性を評価し、環境修復の実施主体や地域住民へのわかりやすい情報提供に協力していきたい。

### 5. 提言 4：地域住民の参加の重要性

環境修復施策の選定や実施に関する優先順位などの議論は、常に地域住民や地元自治体を中心にして進めることが重要である。そのためには、判断の材料となる放射線モニタリングデータの意味、環境修復作業による効果や課題、技術的合理性に基づく将来の見通しなど、地域住民が抱く疑問に対し、誠意をもって対応し、わかりやすく説明する場を数多く設けることが必要である。

### 6. 今後の予定

以上ここでは、福島第一原子力発電所の事故による環境汚染について、クリーンアップ分科会としてその修復に関わる提言を紹介した。今後は次に示すような活動を予定するとともに、環境修復に関する国際会議やシンポジウムの開催を他の学協会とも連携して計画していきたい。

(1) 放射線モニタリングセンター、環境修復センターの役割、機能を具体化して提言する

- (2) 環境修復総合戦略の構築に助言する
- (3) 段階的な実施方策について、具体的技術プログラムを提示するとともに、今後、種々提案される技術について評価する
- (4) 地域住民の方々の意見の反映を図るため積極的に行動する
- (5) 海外機関との連携を図り、海外機関によるレビューに協力する

## Ⅱ. チェルノブイリ原子力発電所の事故に伴う環境修復

今後、福島第一原子力発電所の敷地外における環境修復プログラムを構築する際に、大規模な放射能汚染を起こしたチェルノブイリ原子力発電所事故での経験は有益な知見となり得る。国際原子力機関(IAEA)は、2006年に環境影響および修復対策に関して、報告書(STI/PUB/1239)を取りまとめ公開した。そこで、IAEAの報告書を中心にチェルノブイリ原子力発電所事故後に検討、実施された対策とその結果を調査した。また、地域特性や汚染状況を比較し、今後の環境修復を行う上で重要な観点を示す。

### 1. 汚染状況、土地利用状況の比較

チェルノブイリ原子力発電所事故でサイトから大気中に放出されたI-131およびCs-137の量は、それぞれ $1.8 \times 10^{18}$ Bq および $8.5 \times 10^{16}$ Bqであった。一方、4月12日に原子力安全委員会より、福島第一原子力発電所事故におけるI-131およびCs-137の大気中への放出量として、 $1.5 \times 10^{17}$ Bq および $1.2 \times 10^{15}$ Bq(チェルノブイリ事故の約12分の1および約7分の1)が発表された。

サイト周囲の土地利用状況について、チェルノブイリ事故の影響を受けたベラルーシ共和国全体では、農地43%、森林39%、河川、湖沼が2%であった。福島第一原子力発電所の事故でCs-137による土壤汚染濃度300 kBq/m<sup>2</sup>以上の区域内については、市街地が<5%、水田が<10%、その他の農用地が<10%として利用され、他のエリアは森林、山林で>75%(日本の全国平均67%)となっている。

### 2. チェルノブイリ発電所事故後の環境修復対策

#### (1) 都市部の環境修復

居住集落においては、道路、建物、土壤の表面等に付着した放射性物質が住民の被ばく源となった。都市部等の環境修復対策は、1986年から1989年に旧ソ連3ヵ国(ウクライナ、ベラルーシ、ロシア)の約1,000の集落、数万の家屋や建物において、建物の洗浄、道路の清掃および洗浄、汚染土壤の除去等の対策が進められた。その中で、幼稚園、学校、病院、他の訪問者の多い建物への対策は優先された。除染作業においては、建物の洗浄後

第1表 都市部の環境修復の対策技術

汚染面	IAEA STI/PUB/1239 <sup>1)</sup>		RISO-R-828 <sup>2)</sup>	
	手法	DRRF* <sup>1</sup>	手法	DF* <sup>2</sup>
壁	砂吹付け	10~100	砂吹付け	4, 5
			壁紙交換	100
屋根	放水, 砂吹き	1~100	高圧放水	2.2
			屋根交換	100
庭・草地	掘り起こし	6	掘り起こし	4~15
			表土除去	4~10, 28
道路	掃きとり	1~50	掃除機	1.4
	ライニング	>100	粉碎除去	>100

\*<sup>1</sup>Dose Rate Reduction Factor, 除染前後における対象表面からの線量率の比

\*<sup>2</sup>Decontamination Factor, 除染前後における対象表面もしくは対象物中の汚染濃度の比

に壁近傍の土壤の汚染レベルの増加等も生じた。

第1表は、IAEAの報告書が示している除染対象、対策および達成し得る効果をまとめたものである。また、デンマークのRISO研究所が実験から得た除染効果を併せて示す。除染効果として100を超える対策は、屋根の交換等の汚染表面の除去を伴うものであることがわかる。各対策技術の除染効果はおおむね2以上であり、チェルノブイリ事故でも異なる測定点で、採用した手法に依存して線量率が1.5~15のファクタで減少した。しかし、高費用が汚染エリアでの幅広い適用を妨げ、年間の外部被ばく線量の減少は、平均で10~20%、対策を優先した学校等に通う幼児・児童でも30%であった。一方で、対策された場所で2次汚染は確認されていない。

#### (2) 農業対策

チェルノブイリ事故後の初期数ヵ月では、農作物への直接付着による汚染、原乳の汚染が生じた。このような初期フェーズ後の段階では、放射性核種としてCsによる汚染が最も重要であった。1年目と比較して、事故後2年目では穀物類の放射能濃度は低くなった。1987年以降では、放射性Csの高い放射能濃度は食肉、原乳で確認された。そのため、旧ソ連3ヵ国の集約農家で畜産物に含まれる放射性物質の低減化対策が進められた。

主に、①土壤耕作、再種まき、無機肥料(窒素、リン、カリウム)および石灰散布による根元改良、②Csの摂取量が少ない菜種を耕作し、家畜飼料に利用、③汚染の少ない飼料、牧草で家畜を飼育するクリーンフィーディング、④家畜の消化管でのCs吸収を減少させるCs結合剤を飼料に混合して投与といった対策が採られた。根元改良等の土壤処理は、初回の効果が最も大きく、土の質、肥沃状態等の影響を受けた。汚染の少ない飼料の使用については、一定の効果が得られた。Cs結合剤として、放射性Cs核種の摂取時に排泄を促進させるプルシアンブルーが数種類使用され、調達できなかったウクライナ等の地域では、粘土鉱物が利用された。

### (3) 森林対策・水域対策

森林では樹木のフィルタ効果で多量の放射性物質が沈着し、生態系による再循環により動植物中の放射性Cs量は低減しにくいという特徴がある。環境修復としては、利用制限による管理ベースの対策、機械または化学薬品を利用した技術ベースに大別される。

チェルノブイリ発電所事故後は、管理ベース対策として、①森林への立入制限、②食物(キノコ、イチゴ類、猟肉)や薪材の収穫制限、汚染レベルによっては木の伐採制限、③獲物が汚染植物を摂取している季節における狩猟の回避勧告、④環境への2次汚染の防止という観点での山火事の発生防止が採られた。これらの対策は、旧ソ連3カ国のほかに、一部はスカンジナビア国家でも進められた。しかし、旧ソ連3カ国では、禁止されている地域でのキノコの摂取等、社会的に受け入れられず、公衆に遵守されないといった問題もあった。技術ベースの対策は、コストが莫大で非現実的と評価された。

事故直後の水汚染は、I-131等の短半減期核種の効果によるものであったが、その後は希釈、減衰、土壌への沈着により減少した。長期的には、土壌からのCs-137とSr-90の流出、汚染堆積物の移動が、ゆっくりではあるが継続されている。魚の体内放射能は、放射性核種の減衰で減少したが、その後は水系の生物間の食物連鎖によりCsの濃度が高まった。

汚染土壌を回収して水系への放射性核種移行を防ぐ対策は、高価かつ効果が薄い上に作業員の被ばくを招いた。また、農業対策と同じように、湖で魚のCs等の摂取量を減少させるため、石灰やカリウム剤を散布した実験が進められた。しかし、水中での化学物質の保持時間の問題により、長期間の効果はなかった。その結果、汚染された水と淡水魚の摂取制限以外は、効果的な対策は見当たらないとされている。なお、灌漑水への直接的な対策はされなく、黒海やバルト海からの距離も遠いため、海水系の対策の要求や適用の証拠はない。

### 3. 福島第一原子力発電所事故における環境修復対策を考える上の留意点(チェルノブイリと比較して)

環境特性としては、沈着した放射性物質の挙動に影響する水域、長期的な被ばく線量低減の方策が重要となる森林・山林の面積比の違いを考慮する必要がある。農業については、稲作における灌漑用水の利用等の習慣が大きく異なる。また、事故の原因となった地震や、津波によるガレキの大量発生、インフラ損壊は、今回の事故における固有の課題となっている。一方、チェルノブイリ事故時でも問題とされた対策により発生する低レベル廃棄物処理、修復作業に要する期間や作業員の被ばく線量を含むコスト等は、今後の修復対策の構築においても検討、評価すべき問題である。

## Ⅲ. 環境修復の実施における法制度面の課題

福島第一原子力発電所事故による周辺地域のクリーンアップに係る法制度面の課題について整理する。

### 1. 事故で放出された放射能とその影響

まず、事故によって放出された放射能の量がどれほどであったのかであるが、4月12日に原子力安全委員会が公表した放出された放射性ヨウ素、放射性セシウム量の推定値は16万テラベクレル(16京ベクレル)である。

この放出された放射性物質により生じた影響のうち、これまで確認された主なものと、それに対する法的な対応は以下の通りである。

#### (1) 水道水、野菜、魚介類から高い放射能が検出された

厚生労働省が3月17日に食品衛生法上の暫定規制値を定め、これを上回る場合は食用に供しないよう規制。4月5日、魚介類中の放射性ヨウ素に関する暫定規制値を追加した。

#### (2) 避難区域、計画的避難区域、緊急時避難準備区域の稲の作付

農水省がこれらの区域の平成23年度産の稲の作付を控えるよう指導。原子力災害対策本部長(菅総理)が作付可能土壌中のセシウム量の上限値として5,000 Bq/kgを提示した。

#### (3) 牧草からも高い放射能が検出された

農水省が畜産農家に対して粗飼料中の放射性物質の目安を指示した。

#### (4) 廃棄物からも放射能が検出されている

まだ処理法および基準値が決められていない。

### 2. 問題の所在(1) 廃棄物問題

現在、法制度面で大きな問題となっているのは放射能で汚染されたガレキ等を産業廃棄物として取り扱えないことである。

産業廃棄物に関する法律(「廃棄物の処理および清掃に関する法律」)では、廃棄物の定義として放射性物質およびこれによって汚染された物を除くこととされている。

原子炉等規制法では、放射性廃棄物として取り扱わなくてもよいとする基準(クリアランスレベル)が定められているが、災害廃棄物は原子力施設から出る廃棄物ではないので、これを適用することは不相当である。

このような廃棄物の処理方法や技術基準が存在しないことが大きな問題となっている。

その発生量は大量である。ガレキだけでも約290万トン発生すると見込まれている。さらに基準値以上の放射能が検出された農作物、牧草、場合によっては汚染された土壌も対象となる。

### 3. 問題の所在(2) 環境放射線問題

次に問題となるのは、避難解除する場合の環境放射線の安全基準がないことである。原子力災害対策本部から、4月19日に福島県内の学校等の校舎・校庭等の利用判断における暫定的基準 $3.8 \mu\text{Sv/h}$ が示された。これは、国際放射線防護委員会(ICRP)の事故収束段階の介入線量値、 $1 \sim 20 \text{ mSv/年}$ の上限値 $20 \text{ mSv/年}$ を超えないことを目安にされて決められた。(その後、実際に学童が被ばくする放射線量は最大約 $10 \text{ mSv/年}$ と見込まれるとの試算値が文科省から示された。なお、その後様々な対策が実施されたため、4月27日～7月3日に55校の教職員1人あたりが受けた放射線量の時間平均値は $0.2 \mu\text{Sv/h}$ であり、1日8時間・年間200日と仮定すると年間 $0.3 \text{ mSv}$ に相当することとなることが7月21日、文科省から原子力安全委員会に報告されている。)

現在の避難区域の設定は、国際放射線防護委員会(ICRP)の事故時の勧告値、 $20 \sim 100 \text{ mSv/年}$ の下限值 $20 \text{ mSv/年}$ が目安とされている。すなわち、これまでの観測値をもとに来年3月までの累積線量予測値がこの目安値を超える地域が計画的避難区域とされている。

### 4. 廃棄物問題に関する現在の状況

原子力安全委員会の助言を得た上で、厚労省、経産省、環境省が連名で5月2日、以下の応急的措置を示した。(cf. 2011.5.2付環境省文書「福島県内の災害廃棄物の当面の取扱い」)

- ・避難区域および計画的避難区域について  
当面、これらの区域では災害廃棄物の移動および処分を行わない。その後の対応は、避難区域などの指定の状況を踏まえて検討する。
- ・浜通り地方および中通り地方(避難区域および計画的避難区域を除く)について  
当面の間、仮置き場に集積しておき、処分は行わない。処分については、災害廃棄物の汚染状況についての現地調査結果を踏まえ検討する。
- ・会津地方について  
会津地方の災害廃棄物については、従前通り計画的に処分を行う。
- ・生活廃棄物や少量の一般の産業廃棄物は従来の方法で取り扱う。また、屋外に置かれていたものでも事故後3月下旬までの間に置かれた物でなければ通常通り取り扱う。

なお、「災害廃棄物」とは、津波または地震により発生し、屋外に放置された廃棄物をいうことと定義されている。福島県で発生する災害廃棄物は約290万トンと推計され、災害廃棄物を取り扱う作業員については、粉じん等の吸入を防止するための措置等を講じることとしている。また、災害廃棄物の集積に当たっては、環境省等が仮置き場周辺における環境モニタリングを行い、立入制

限や飛散防止等周辺への影響を可能な限り低減させる対策を講じることとされている。

### 5. 今後発生する廃棄物

長期汚染区域からは、汚染防護処置に伴って大量の放射性廃棄物が発生することが予想される。発生源としては、建物の浄化、土壌および植生の改善等である。既に小学校の校庭の浄化を実施している地域もある。汚染土を安易に個別施設の片隅に埋設処理するだけでは中長期の土地利用で2次災害を起こす恐れがある。国は処理方法の選択肢とそれぞれの方法に適した安全基準を早急に提示する必要がある。

### 6. 解決策の検討

#### (1) 事故後の長期汚染区域に居住する人々の防護

これが事故後の復興段階の始まりを意味することになる。事故後の防護基準の決定は、放射線の潜在的な健康影響に対する防護と、しっかりした生活様式や生計手段を含む持続可能な生活条件を人々に提供することになる。

この問題に関する世界中の知恵を結集したものが2009年の国際放射線防護委員会(ICRP)勧告(Pub 111)である<sup>3)</sup>。

放射線防護だけでなく、環境、健康、経済、社会、心理学、文化、倫理、政治などの日常生活のあらゆる側面を考慮した考え方が盛り込まれている。特に重要なことは、環境修復や、住民に対する生活上の一部制限、生活上の注意喚起など、今後の対応方針等について、あらかじめ利害関係者と十分に協議し、その情報もあわせて提供することである。

#### (2) 事故後の法的措置で考慮すべきこと

事故後の緊急性に迫られて災害対策本部が決定する方式から、状況を考慮して合理的に達成可能な限り被ばくを軽減することを目的とした、合議的な方式へと管理を変更することが求められる。

汚染区域で生活、労働する場合、被ばく予測を一律に決めることは適当でない。被ばくレベルは主として個人の行動によって決定されるので個人差が大きい。したがって、個別に防護方策を計画すべきである。集団が汚染地域にとどまることが認められる場合に、社会および個人に対する総合的な便益を保証する責任は国にある。防護方策の決定には利害関係者の参画と、重要な情報をすべて関係者に提供し、意思決定プロセスを文書化して記録に残すことが極めて重要である。

### 7. まとめ

ここで取り上げたクリーンアップに関する2つの法的問題はいずれも放射線の安全基準に係る問題である。とりわけ避難している住民の早期帰宅を実現するための施策に繋がる環境放射線基準は特に緊急性が高い。

この問題に関する世界中の知恵を結集したものが2009年のICRP勧告(Pub 111)である。ICRP(Pub 111)に精通した専門家の助言を得て、汚染地域の住民を中心とした利害関係者を入れた場で重要情報を共有して検討を行うことが肝要である。

これにより具体的な防護方策を計画し、合理的に達成可能な防護基準を定め、避難解除に向けた具体的ロードマップを立案、実行することが求められる。この計画に合わせ、専門家により廃棄物の処理方法、安全基準の策定を行うことが望ましい。

—参考資料—

- 1) IAEA, STI/PUB/1239, (2006).
- 2) RISO, RISO-R-828-EN, (1995).
- 3) 国際放射線防護委員会(ICRP)勧告(Pub 111), (2009).

著者紹介



井上 正(いのうえ・ただし)  
(財)電力中央研究所 研究顧問  
(専門分野/関心分野)核燃料サイクル, 次世代再処理



高橋史明(たかはし・ふみあき)  
(独)日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)放射線防護, 被ばく線量評価, 被ばく線量評価



諸葛宗男(もろくず むねお)  
東京大学公共政策大学院特任教授  
(専門分野/関心分野)原子力法制度, 原子力研究開発制度

## 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—

(7月7日第1回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・22年度の主な実績報告が有り、また23年度の主要な活動計画を検討した。
- ・震災関連論文の早期掲載に関して、進捗状況が報告された。
- ・英文誌の出版社移行に関して、進捗状況が報告された。
- ・第12回放射線遮蔽国際会議(2012年)の論文集をProgress in Nuclear Science and Technologyにおいて発行することを了承した。
- ・学会賞論文賞への編集委員会推薦のスケジュールが確認された。

【学会誌関係】

- ・伊藤委員長、井口副委員長から新年度の挨拶があった。
- ・2011年度の専門分野別リスト、幹事会出席委員リストが配布され、前年度と同じく、編集長、副編集長、グループ主査体制で運営を行っていくことが説明された。ただし、A、B、Cグループは統合して記事企画を行っていく。
- ・編集長、各グループ主査から次年度の計画について説明を行った。
- ・記事の掲載予定について報告・審議さ、巻頭言、時論など新たに記事企画案が出された。

(7月7日編集委員会全体会議)

- ・今年では会議場の都合で、学会誌と論文誌の編集幹部が別れて1-7分野、8-12分野の2つに分けて全体会議を実施

した。伊藤編集委員会委員長および白川学会誌、矢野論文誌各編集長から挨拶があった。

- ・編集委員の自己紹介があった。
- ・学会誌および論文誌の22年度実績と23年度の運営方針が示された。
- ・英文誌の新しい審査システムについて概要が紹介された。
- ・学会誌の記事作成工程が説明され、企画記事について意見交換がされた。
- ・学会誌Webアンケートの結果が報告された。

(8月5日第2回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・震災関連論文の受付・審査・掲載状況が報告された。また、Review執筆を依頼することとした。
- ・英文誌の出版に関してTaylor&Francis社との契約内容が報告され、これを了承した。
- ・学会賞論文賞への推薦方針を確認し、各分野責任者に候補論文の選択を依頼することとした。なお、本年より、会員資格が撤廃された。
- ・米国在住の2名の研究者から英文誌の査読者になりたい旨の申し出があり、1名を承認した。
- ・和文論文誌のJ-Stageへの掲載が完了したことが報告された。また、先行公開が開始された。
- ・投稿規定の一部改訂(速報にも抄録を必須とする)を承認した。

【学会誌関係】

- ・編集理事より一層のコスト削減の必要性の要望があった。原子力の経済面、放射線記事を強化し学会員が読んでも一般の人に説明できるような、オピニオンリーダー的学会誌にするべく一層の努力をしていく。
- ・記事文中の図や写真は、カラー印刷せず、モノクロ印刷を採用するよう、予め執筆者にモノクロ印刷で判別できるものを提供するよう伝えることとした。
- ・会議用資料など、特例を除き、配布資料はモノクロで読める資料を作成するよう配慮する。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

# 環境における放射性核種の分布と動態

## 1. 土壌における放射性核種の挙動特性

放射線医学総合研究所 内田滋夫, 田上恵子, 石井伸昌

福島第一原子力発電所の事故により大気中に放出された放射性核種の土壌中における挙動について、現在の主要な核種である放射性セシウム ( $^{134}\text{Cs}$  および  $^{137}\text{Cs}$ ) による汚染状況を把握するとともに、大気圏内核実験によるフォールアウトやチェルノブイリ原発事故に起因するデータ等をもとに、 $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{129\text{m}}\text{Te}$  および  $\text{Pu}$  が土壌中においてどのような挙動をするのかについて示す。また、土壌を介して農作物へ移行する割合についても取りまとめた。

### I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の4つの原子炉における事故により、主に3月中旬に大量の放射性物質が大気中に放出された。本稿は、事故発生後4ヶ月が経過した時点で書いているが、現在、土壌中に検出される主な放射性核種は、テルル-129m ( $^{129\text{m}}\text{Te}$ )、セシウム-134 ( $^{134}\text{Cs}$ ) およびセシウム-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) である。しかし、微量ながら検出されているストロンチウム-90 ( $^{90}\text{Sr}$ ) とプルトニウム ( $\text{Pu}$ )、また、短半減期のためほぼ消滅してしまったヨウ素-131 ( $^{131}\text{I}$ ) も関心の強い核種であろう。そこで、これらの核種の土壌中における汚染分布状況について公開資料等を元に調べた。さらに、これらの放射性核種についての土壌における挙動特性を土壌-土壌溶液間分配係数 ( $K_d$ ) を用いて解説する。土壌中の放射性核種は外部被ばく線源であるという観点のみならず、人が食べる農作物へ移行することも検討する必要があるため、土壌-農作物を介した放射性核種の人への移行を念頭に、移行の程度についても記載する。

### II. 土壌汚染分布状況

震災以降に放出された放射性核種のうち、220 km 離れた放射線医学総合研究所屋上で採取した降下物からは  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{136}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{129\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{Te}$  が検出され、極微量の  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  ( $^{99}\text{Mo}$  由来) も検出された。また、原発から約20 km の地点で4月20日に採取された土壌を測定したところ、主に  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  が検出されたほか、 $^{132}\text{I}$ ,  $^{129\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{Te}$  が検出された。日本分析センターは、空間線量率に寄与する放射性核種として、希ガスで

ある  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  以外にも、 $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{136}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{129\text{m}}\text{Te}$  および  $^{132}\text{Te}$  が3月中に測定されたと報告している<sup>1)</sup>。土壌には希ガス成分は沈着しないので、それ以外の核種に着目すると、どの地点でもほぼ同じ核種が確認されていることがわかる。これらの核種を、チェルノブイリ原子力発電所事故時に放出された核種<sup>2)</sup>と比較したところ(第1表)、福島第一原発事故からは希ガスおよび揮散しやすい核種が主に放出されており、それ以外の放射性核種については、大気中への放出が少なかったことが推測できる。実際、上述したように、 $^{90}\text{Sr}$  や  $\text{Pu}$  が微量しか検出されなかったのは、第1表に示されるように、両核種とも比較的飛散しにくいカテゴリーに分類され、原発近傍に降下した可能性はあるが、大気放出の量としては極めて少ないと考えられる。短半減期核種以外で注目しなければならないのは、したがって、 $^{134}\text{Cs}$  および  $^{137}\text{Cs}$  である。

$\text{Cs-137}$  は物理学的半減期が長く、汚染された地域に

第1表 チェルノブイリ原発事故により大気中に放出された放射性核種の放出程度のカテゴリー[UNSCEAR 2000 Report<sup>2)</sup>]と福島第一原発事故後に確認された放射性核種(下線を付した核種)

Category	Radionuclides
Noble gases	<u>Kr-85, Xe-133</u>
Volatile elements	<u>Te-129m, Te-132, I-131, I-133, Cs-134, Cs-136, Cs-137</u>
Elements with intermediate volatility	Sr-89, Sr-90, Ru-103, Ru-106, Ba-140
Refractory elements (including fuel particles)	Zr-95, <u>Mo-99</u> , Ce-141, Ce-144, Np-239, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Cm-242

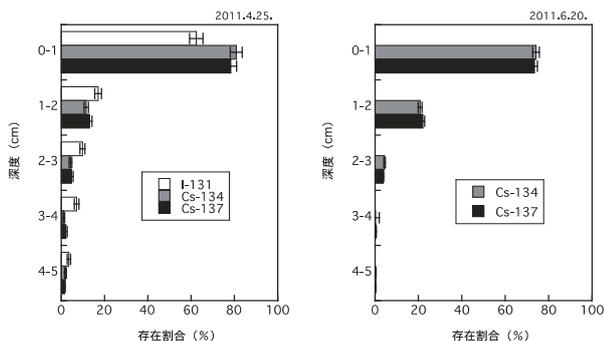
*Characteristics of Radionuclide Behavior in the Soil Environment* : Shigeo UCHIDA, Keiko TAGAMI, Nobuyoshi ISHII.

(2011年 7月13日 受理)

において生活する人々の生涯の実効線量に寄与し、かつ測定しやすいことから、チェルノブイリの事故において地表汚染の基準放射性物質として選ばれた。国連科学委員会 UNSCEAR 2000 Report<sup>2)</sup>では、 $^{137}\text{Cs}$ が $3.7 \times 10^4 \text{ Bq/m}^2$ を超える地域を汚染地域としており、この基準ではチェルノブイリの周辺はもちろんのこと、多くのヨーロッパ諸国が汚染地域となる。その面積は $146,100 \text{ km}^2$ と、日本の国土( $377,930 \text{ km}^2$ )の1/3以上が汚染されたことになる。

福島第一原子力発電所の事故においても、発電所を中心に80 km 圏内の $^{137}\text{Cs}$ の汚染地図が、平成23年5月6日、文部科学省より発表された。 $3.7 \times 10^4 \text{ Bq/m}^2$ を超える地域は、主に中心から30 km 圏内であるが、北西方向の一部地域では、50 km 圏内まで汚染があったと見積もられており、また、関東平野においても $^{137}\text{Cs}$ による汚染は見られる。日本分析センターの発表によれば、千葉市内にあるセンター敷地内の0~1 cmの表層土では $1.0 \times 10^4 \text{ Bq/m}^2$ を超える $^{137}\text{Cs}$ が検出されている<sup>1)</sup>。千葉県北西部や埼玉県南部の一部地域では、空間線量率が周囲の地域より高い傾向にあるが、これは土壤に沈着した放射性核種、特に放射性セシウム( $^{134}\text{Cs}$ および $^{137}\text{Cs}$ )のガンマ線が原因であると考えられている。しかしながら、これら地域の詳細な汚染状況はいまだ明らかでなく、今後、詳細に調査する必要がある。

放射性セシウムの土壤鉛直分布を明らかにすることは、土壤の除染や作物への移行を検討する上で重要である。一般に、1価の陽イオンとして存在するセシウムは負に帯電している土壤粒子に電気的に吸着されやすいことが知られている。そのため、原子力発電所由来の $^{137}\text{Cs}$ が降下した土壤においても、表層にとどまっていることが期待された。4月に千葉県内で行った我々の調査では、校庭のように比較的踏み固められた土壤に沈着した $^{137}\text{Cs}$ の80%程度が表層5 mmの深さに存在した(未発表)。また未攪乱土壤では、そのほとんどが2 cm 以内にとどまっており、6月においてもほとんど下方に移動していないことがわかった(第1図)。同様に、4月に行われた日本分析センターの結果においても、放射性セシウムは土壤表層2 cm までにとどまっていた<sup>1)</sup>。ただし



第1図 放医研敷地内における放射性核種の深度分布の変化(2011年4月25日と6月20日に採取・測定)

小石まじりの土壤では5 cmの深さまで放射性セシウムが移行していることから、土壤の物理・化学的特性と放射性セシウムの深度分布の関係を検討する必要がある。

### Ⅲ. 土壤中における挙動：土壤—土壤溶液間分配係数

土壤溶液にイオン形で添加された放射性核種はいろいろな形で土壤固相に収着される。土壤中における挙動は化学形と存在形態に依存しており、それにより動きやすさや植物根圏域の滞留時間および植物への吸収が影響を受けることになる。土壤中における放射性核種の動きやすさを表すパラメータとして $K_d$ がモデルで使われており、次式で表される<sup>3)</sup>。

$$K_d = \frac{\text{固相中における放射性核種濃度 (Bq} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{液相中における放射性核種濃度 (Bq} \cdot \text{l}^{-1})}$$

時間の項目が入っていないことからわかるように、これは平衡状態における土壤固相と液相間における放射性核種の分配を示している。 $K_d$ 値が高いほど土壤固相に固定されて動きにくいことを示している。 $K_d$ の測定方法については、バッチ法等による測定値の変動要因が検討されており、それを踏まえて、日本原子力学会標準委員会よりバッチ法による基本手順が示されている。IAEAでまとめられた環境移行パラメータ集 TRS-472<sup>3)</sup>では、必ずしも同じ手法で測定されているわけではないが、専門家による厳しい実験方法確認の後に $K_d$ が取りまとめられ報告されている。第2表に主な元素の $K_d$ について抜粋した。また、第3表には我が国で報告されている値を取りまとめた。なお、IAEA-TECDOC-1616には、TRS-472の取りまとめに当たった研究者らによる、さらに詳細なデータの解説が記述されている。 $K_d$ 値は一般に対数正規分布することから、その平均値および標準偏差は、幾何平均値(Geometric Mean:GM)およびその幾何標準偏差(Geometric Standard Deviation:GSD)で示される。したがって、表においてもGMおよびGSDを記載した。

#### 1. ストロンチウム

我が国のSrの $K_d$ とIAEAで取りまとめられた推奨値を比較すると、我が国の値の方が5倍程度高いことから、諸外国よりもSrが土壤に収着されやすい可能性がある。Srの $K_d$ は土壤溶液中のCaおよびMg濃度に対する陽イオン交換容量の比により推定できるが、これらのデータを得るのが困難な場合にはcation distribution ratio(Cation exchange capacity/cation concentration)で推定できる<sup>4)</sup>。実環境中では、大気圏内核実験により水田土壤に降下した $^{90}\text{Sr}$ については、動きが早い成分と遅い成分の2成分で表した方が1成分で推定するよりも適合することが述べられている。すなわち、Srは土壤中を移動しやすい成分があることを示唆している。

第2表 土壌—土壌溶液間分配係数,  $K_d$  (IAEA-TRS-472<sup>3)</sup> より抜粋)

Soil type	Data	$K_d$		
		GM	GSD	Range
Sr All	255	52	5.9	0.4-6,500
	Sandy	65	22	6.4 0.4-2,400
	Loam + Clay + Organic	176	69	5.4 2-6,500
Te All	2	480		180-790
I All	250	6.9	5.4	0.01-580
	Mineral	196	7.0	5.2 0.01-540
	Organic	11	32	3.3 8.5-580
Cs All	469	1,200	7.0	4.3-38,000
	Sandy	114	530	5.8 9.6-35,000
	Loam+Clay	227	370	3.6 39-380,000
	Organic	108	270	6.8 4.3-95,000
Pu All	62	740	4.0	32-9,600
	Sandy	11	400	4.0 33-6,900
	Loam+Clay	37	1,100	3.3 100-9,600
	Organic	6	760	3.7 90-3,000

第3表 我が国の土壌の土壌—土壌溶液間分配係数,  $K_d$  の報告値

Soil use and type	Data	$K_d$		
		GM	GSD	Range
Sr Paddy	63	370	1.8	100-1,820
Sr Upland	78	220	1.8	60-640
Sr All	36	166	0.25	42-163
Se Paddy	63	120	4.3	10-2,100
Se Upland	78	70	3.9	6-1,360
I <sup>-</sup> Paddy	63	67	2.4	5-570
I <sup>-</sup> Upland	78	21	2.2	4-180
I <sup>-</sup> All	68	450		1-10,200
IO <sub>3</sub> <sup>-</sup> All	68	360		2-8,210
Cs Paddy	63	2,560	2.8	270-50,000
Cs Upland	78	4,230	2.7	360-35,700
Cs All	36	1,850	0.41	215-42,600

## 2. ヨウ素

ベントの開放や水素爆発により環境中に漏洩した放射性ヨウ素は、ガス状で大気中を漂ったのちに、雨等によって大気中から土壌表面に降下したと考えられている。こ

のときの化学形は IO<sub>3</sub><sup>-</sup> や I<sup>-</sup> であったと考えられる。Yoshida ら<sup>5)</sup> は、我が国の畑でよく見られる黒ボク土を対象に I<sup>-</sup> および IO<sub>3</sub><sup>-</sup> の収着実験を行った。その結果、IO<sub>3</sub><sup>-</sup> ではアロフェンもしくは鉄やアルミニウム酸化物による収着が影響していたが、一方で、I<sup>-</sup> の場合はその収着メカニズムが不明であることを示した。後に、彼らは I<sup>-</sup> も IO<sub>3</sub><sup>-</sup> も微生物活動およびオートクレーブ滅菌により影響を受ける土壌特性と強い関連があることを示している。そこで我々は、室温での  $K_d$  採取だけではなく、微生物活性を抑えるために同じ操作を 4℃ でも行い  $K_d$  を求めた<sup>6)</sup>。その結果、4℃ の  $K_d$  の方が統計的に有意に低い値であったことから、微生物活性が影響していることが明らかとなった。同じ国内の土壌でも、Yoshida らの値の方が 1 桁程度高くなっているが、化学形別の違いは顕著ではない。なお、ヨウ素は酸化還元電位反応に敏感であり、土壌が酸化的雰囲気であれば土壌に収着するが、還元が進むと土壌粒子から溶出してきて土壌溶液中に増える。

## 3. テルル

第2表に示したように、Te の  $K_d$  に関する情報はほとんどない。しかし、Te の化学形は同族元素のポロニウム (Po) よりもセレン (Se) に近いので、Se を用いたバッチ実験で得られたデータを第3表に示す<sup>7)</sup>。日本の土壌の場合は酸性土であるため、Se の化学形は主に亜セレン酸 (HSeO<sub>3</sub><sup>-</sup> もしくは SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) で存在すると考えられている。Te も同様に、HTeO<sub>3</sub><sup>-</sup> で存在している可能性があることから、恐らくは  $K_d$  は近い値をとると思われる。第2表の Te の  $K_d$  と比較すると Se の  $K_d$  が近いことがわかる。Po については IAEA-TRS-4723) には 210 (範囲: 12~7,000) の報告があり、Te の  $K_d$  と近いが、その化学形は H<sub>2</sub>PoO<sub>3</sub> と推定されているので、適当なアナログ値として利用できない可能性がある。

## 4. プルトニウム

文部科学省の HP から公表されているように、Pu は今回の事故において、環境中にほとんど放出されていない核種である。Pu は水溶液中で複数の化学種が存在するが、主に Pu(IV) と Pu(III) である。酸素を含むイオン (OH<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) と電荷のある錯体を作り、水に溶けているために土壌には付着しづらくなる。それを反映して、Pu の  $K_d$  は全土壌で 740 であり、Am の 2,600, Cm の 9,300, Th の 1,900 に比べて低めであるが、U ( $K_d=200$ ) よりもやや高い値である<sup>3)</sup>。

## 5. セシウム

原子炉から環境中に放出された Cs は、イオン態として雨に溶けた状態で土壌に降下すると考えられる。アルカリ金属元素である Cs は土壌に降下すると Na や K と

同様、1価の陽イオンとして存在する。NaやKと挙動が全く同様であれば、イオン交換画分に存在して土壌中を比較的動きやすいはずであるが、土壌に含まれる粘土鉱物や有機物に吸着される。特にCsは粘土鉱物に吸着されやすく、イライトのような粘土鉱物はCsを特異的に吸着し、他の化学物質とは交換しにくいサイトを有する。土壌には粘土鉱物が含まれるため、Csはイオン形で土壌に付加された後には、このサイトに徐々に固定されてしまい、土壌粒子が動かない限りはなかなか移動しなくなる。国内のいろいろな箇所における土壌深度方向のグローバルフォールアウト<sup>137</sup>Cs濃度測定が行われているが、土壌が攪乱されていない場合では、ほとんどが表層20 cm以内にとどまっている。土壌が攪拌される農耕地土壌においては、耕作された部分のみ均一な濃度で分布していることが知られている。

通常、 $K_d$ を求める際には、できるだけ早く土壌固相と液相が接する状態を増やす手法を使うため、平衡に達するのが早いですが、実際の土壌中では徐々にCsの固定が進む(Aging効果)。したがって、土壌に添加直後はやや動きやすいと考えられている。我々の実験では土壌に添加後、静置した状態でイオン交換画分を抽出した結果、平衡に達するまでに2週間程度有し、酸化還元状態には依存しなかった。また、Tsukadaらは土壌中のフォールアウト<sup>137</sup>Csを土壌への吸着の強さや様式で分けて、土壌中での動きやすさを測定し、 $K^+$ や $NH_4^+$ 等の陽イオンと置き換わることができるイオン交換態が10%、有機物結合態が20%、粘土鉱物等と結合態が70%との結果を得ている<sup>9)</sup>。なお、このようにCsは有機物にも分配しているが、Nakamaruらによれば、土壌中に可溶性有機物が存在することで、放射性セシウムが動きやすくなることが示唆されている<sup>9)</sup>。

以前、我々はCsの $K_d$ ともっとも相関が高い土壌特性について、100項目余りについて調べたところ、あまり相関は高くなかったが $NH_4^+$ が挙げられ、 $NH_4^+$ 量が増えるほどCsの $K_d$ が下がる傾向が認められた。土壌、特に粘土鉱物に固定されたCsはイオン半径の類似する $NH_4^+$ を添加することや、同族元素である $K^+$ を土壌に投入することで、 $Cs^+$ と交換することができると期待される。

#### IV. 土壌から農作物への移行

放射性核種の土壌から農作物への移行には、土壌中における動きやすさに加えて植物の必須元素が移行に影響を与えている。その例として、放射性ストロンチウム(カルシウム)、放射性セシウム(カリウム)がある。ヨウ素やプルトニウムは化学的に類似している元素が必須元素にないため、吸収の程度が低いと考えられる。土壌から農作物への放射性核種の移行は次の式で表され、どちらの濃度も乾重ベースで計算されることが多い。

$$TF = \frac{\text{農作物可食部中の放射性核種濃度 (Bq} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}}{\text{土壌中の放射性核種濃度 (Bq} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}}$$

第4表に例としてIAEA-TRS-472からのデータを取りまとめた。なお、Teのデータが少ないため、安定Seで求めた結果も付した<sup>10)</sup>。TFと土壌中における放射性核種の動きやすさ、 $K_d$ には明確な相関が得られているわけではないが、水溶性画分は植物に利用される形態(可給態)と考えられるので、幾つかの元素のTF値について、 $K_d$ 値を用いて検討を行った。日本の土壌で得られた $K_d$ は $I < Se < Sr < Cs$ の順であり、TRS-472の結果からは、 $I < Sr < Te < Pu < Cs$ である。すなわち、同程度の量が土壌に添加された場合には、土壌溶液中にはIがもっとも多く、最後にCsになる。しかし、米に着目す

第4表 放射性核種の土壌—農作物可食部移行係数, TF (IAEA-TRS-472<sup>3)</sup>より抜粋) 乾重ベース

	Crop	Data	GM	GSD	Range
Sr	米	71	0.023	4.7	0.0021-6.0
	麦類	282	0.11	2.7	0.0036-1.0
	葉菜類	217	0.76	6.0	0.0039-7.8
	豆類	148	1.4	2.3	0.13-6.0
	根菜類	56	0.72	4.1	0.03-4.8
	芋類	106	0.16	3.0	0.0074-1.6
Te	麦類	1	0.1		
	葉菜類	1	0.3		
	根菜類	1	0.3		
	芋類	1	0.2		
Se*	米	67	0.061	1.9	0.009-0.29
	麦類	9	0.038		0.0079-0.15
	葉菜類	26	0.029		0.008-0.30
	豆類	7	0.011		0.00024-0.0046
	根菜類	14	0.015		0.00039-0.011
	芋類	11	0.0013		0.000035-0.0058
I	米	8	0.0038	2.1	0.0011-0.0076
	麦類	13	0.00063	2.3	0.0001-0.011
	葉菜類	12	0.0065	3.7	0.0011-0.1
	豆類	23	0.0085	7.4	0.0002-0.14
	根菜類	28	0.0077	3.0	0.0014-0.047
	芋類	1	0.1		
Cs	米	466	0.0083	6.2	0.00013-0.61
	麦類	470	0.029	4.1	0.0002-0.90
	葉菜類	290	0.060	6.0	0.0003-0.98
	豆類	126	0.040	3.7	0.0010-0.71
	根菜類	81	0.042	3.0	0.0010-0.88
	芋類	138	0.056	3.0	0.0040-0.60
Pu	麦類	105	0.0000095	6.7	0.0000002-0.0011
	葉菜類	13	0.000083	2.7	0.00001-0.00029
	豆類	18	0.000063	1.4	0.000037-0.00015
	根菜類	5	0.00039	10.0	0.00007-0.0058
	芋類	87	0.00011	5.5	0.0000038-0.005

\*安定元素から求めたTF

ると、 $TF$  は  $Pu < I < Cs < Sr < Se$  の順であった。 $K_d$  だけの観点からは、 $Pu$  や  $I$  に比較して  $Cs$  は吸収されにくいはずであるが、同族元素が必須元素であるため、 $Cs$  の  $TF$  は  $Pu$  や  $I$  の  $TF$  よりも高くなっていることがわかる。 $Sr$  は  $K_d$  が低く、また同族元素に必須元素があるため、高い値となったと考えられる。

## V. おわりに

原発事故の収束に向けての工程がいつそう進めば、原発から大気中に放出される放射性核種はなくなるはずである。今後さらなる放出がなければ、重要な核種は放射性セシウムであり、外部被ばくおよび内部被ばくに関連してくる。いまだ土壌表層にほとんどの放射性セシウムがとどまっている現状において、外部被ばくを低減させるためには、濃度の程度により、表層の除去、深耕、上下層の入れ替え、盛土などの措置が考えられる。また、農作物摂取による内部被ばくについては、農作物への移行に着目すると、これからは主に土壌からの経根吸収による移行経路になる。上述したように、 $TF$  (乾重ベース) はほとんどの農作物で0.1を下回っており、乾重ベースではなく生重ベースではさらに低下する。したがって、汚染された地域を何も対策することなく農地として使用する場合を除き、今後は食品の暫定規制値を超える農産物が出てくることは極めてまれな状況になると予想されるが、さらに調査を続けて、土壌中での挙動や農作物等への移行についても多くのデータを取得して、経過を確認していく必要がある。

### —参考資料—

- 1) 日本分析センター, <http://www.jcac.or.jp/fukushima.html>
- 2) United Nations, *Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000. Report to the General Assembly, with Annexes, E.00. IX. 4.* New York, (2000).
- 3) IAEA, *Handbook of parameter values for the*

*prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*, IAEA Technical Report Series No.472, (2010).

- 4) N. Kamei-Ishikawa, S. Uchida, K. Tagami, *Appl. Radiat. Isot.*, **67**, 319-323 (2009).
- 5) S. Yoshida, Y. Muramatsu, S. Uchida, *Water Air Soil Pollut.*, **63**, 321-329 (1992).
- 6) 放射線医学総合研究所, 放射性核種生物圏移行評価高度化調査(平成22年度報告書), (2010).
- 7) N. Kamei-Ishikawa, S. Uchida, K. Tagami, "Soil-soil solution distribution coefficients for radionuclides in Japanese agricultural soils," *Proc. 16th Pacific Basin Nuclear Conf.*, Aomori, Japan, Oct. 13-18, Atomic Energy Society of Japan, (2008).
- 8) H. Tsukada, A. Takeda, S. Hisamatsu, J. Inaba, *J. Environ. Radioactiv.*, **99**, 875-881 (2008).
- 9) Y. Nakamaru, N. Ishikawa, K. Tagami, S. Uchida, *Colloid Surface A.*, **306**, 111-117 (2007).
- 10) S. Uchida, K. Tagami, N. Kamei-Ishikawa, "Concentration, soil-to-plant transfer factor and soil-soil solution distribution coefficient of selenium in the surface environment," *Proc. 35th Waste Management Symp.*, Phoenix, AZ, Feb. 24-28, WM Symposia, (2008).

### 著者紹介

内田滋夫(うちだ・しげお)

放射線医学総合研究所

(専門分野/関心分野)長半減期核種の環境移行挙動, 動態モデル

田上恵子(たがみ・けいこ)

放射線医学総合研究所

(専門分野/関心分野)環境放射能, 放射化学分析

石井伸昌(いしい・のぶよし)

放射線医学総合研究所

(専門分野/関心分野)放射線の環境生物影響, 土壌生態系動態

# JCO 臨界事故の教訓は生かされたか 原子力防災について考える

京都大学原子炉実験所 中島 健

JCO 臨界事故の教訓をもとに大幅な見直しが行われた原子力災害への備え(原子力防災)は、今回の福島原発事故がその検証の場となった。これまでのところ、初期対応時の情報の取扱いや関係機関間の連携等の問題点が指摘されている。原子力防災を実効性のあるものにするためには、事故は起こりうるという認識に立った準備を行うことが肝要である。

## I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所では3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とその後の津波により、すべての冷却機能を喪失し、複数の炉心において燃料溶融(炉心溶融)が発生、水素爆発により建屋が破壊したほか、複数の使用済燃料プールに貯蔵中の使用済燃料も損傷したとみられている。その結果、周辺環境に大量の放射性物質が放出され、多くの住民が避難する状況となり、さらに飲用水や農産物、海産物の放射性物質による汚染が発生している。地震発生から3ヵ月以上が経った現在でも、現場では高い放射線等の劣悪な作業条件の中で、事故収束に向けた懸命の努力が続けられている<sup>1)</sup>。

今回の原発事故では、1999年に制定された原子力災害対策特別措置法が初めて適用された。同法は、同年9月30日に発生したJCO 臨界事故の教訓を踏まえたものであるが、今回の事故対応において、関係機関の連携や情報の公開のあり方など、多くの問題点が指摘されている。事故が収束していない現時点では、事故時の対応について適切に評価することは困難であるが、これまでに明らかになっている情報をもとに原子力災害発生時の対応のあり方について考えてみることにしたい。

## II. 原子力災害対策の変遷

### 1. 法整備

原子力災害対策については「災害対策基本法」に基づく「防災基本計画」の中で対策が定められているが、1979年に米国で発生したスリーマイル島原子力発電所2号機の事故以降、原子力災害に特有の対策が必要との判断から、中央防災会議が「原子力発電所等に係わる当面取るべき措置について」(1979年)を、原子力安全委員会が「原

子力発電所等周辺の防災対策について」(防災指針、1980年)を定めた。また、1995年に発生した阪神・淡路大震災を受けて「防災基本計画」の見直しが行われ、「第10編 原子力災害対策編」(1997年)が作成された。

1999年9月30日に茨城県東海村で発生した核燃料加工施設 JCO の臨界事故では、これらの災害対策に則った対応が行われたが、その際の問題点として以下の項目が挙げられている<sup>2,3)</sup>。

- ・核燃料施設が事故想定の対象となっていなかった。
- ・事業者からの情報提供の遅れと不十分な伝達内容により、初動対応と活動体制の確立が遅れた。
- ・住民の避難および屋内退避の決定にあたり、国からの技術的助言を事前に得ることが困難であった。
- ・関係機関間や住民等への情報伝達が適切に行われず、混乱を招いた。特に、事業者である JCO からの事故状況に関する情報伝達がきわめて不十分であったため、その後の対応に支障が生じた。

これらの問題点を踏まえて、国は1999年12月17日に以下の項目を含む原子力災害対策特別措置法(原災法)を制定した(施行は2000年6月16日)。

- (1) 対象原子力施設の拡張
- (2) 初期動作の迅速化
- (3) 国・地方自治体の連携強化
- (4) 国の体制強化
- (5) 事業者責任の確保

原災法における、上記項目の具体的な内容は、第1表に示すとおりであり、対象施設に関しては、原子力施設全般に拡張された。初期動作の迅速化では、それまで明確に示されていなかった原子力事業者からの通報基準を明確にし、罰則も設けている。また、国の対応についてもあらかじめ手順が定められた。国と地方との連携強化では、全国の原子力施設の近傍(22ヶ所)に、緊急時対応の現地拠点となるオフサイトセンターが設置され、原子力防災専門官が配置されている。緊急時には同センター

*Are the Lessons of JCO Criticality Accident Well Applied?*  
—For the nuclear accident management : Ken NAKAJIMA.  
(2011年 6月21日 受理)

第1表 JCO 臨界事故の反省点原子力対策特別措置法への反映内容\*

目的	制定された内容
対象原子力施設の拡張	●原子力発電所，再処理施設に加え，試験研究炉，核燃料加工施設，核燃料使用施設，廃棄物管理施設，放射性物質の輸送も対象とする。
初期動作の迅速化	●原子力事業者からの異常事態の通報の義務づけ。 ●所管大臣は初期動作を開始し，あらかじめ定められた手順に従い，直ちに内閣総理大臣を長とする「原子力災害対策本部」を設置。 ●当該市町村および都道府県の対策本部も設置。国は避難等に必要な措置を自治体に指示。
国，地方公共団体の連携強化	●政府は現地に「原子力災害現地対策本部」を設置。 ●国と自治体の現地対策本部の連携を高めるため「原子力災害合同対策協議会」を設置（オフサイトセンターに置く）。 ●総合防災訓練の実施。
国の体制強化	●国の原子力防災専門官を法的に位置づけし，原子力事業所の所在する地域に常駐させ，中核的役割を担う。 ●本部長は関係行政機関，関係自治体に対し，応急対策について必要な事項を指示。 ●本部長への防衛庁長官に対する自衛隊の派遣要請権限の付与。 ●主務大臣はオフサイトセンターをあらかじめ指定。 ●原子力安全委員会・調査委員の技術的助言の法的位置づけの付与。 ●原子力災害緊急時において各種対応機能の迅速な現場投入体制の確保。
事業者責務の確保	●敷地内における放射線測定設備の設置義務の明確化および記録の公表の義務づけ。 ●通報義務の明確化。 ●事業者は防災組織を設置し，災害応急措置を実施。 ●事業者に原子力防災管理者をおく。 ●事業者の原子力事業者防災業務計画の策定義務の明確化。

●出典：http://www.nisa.meti.go.jp/genshiryoku/bousai/soti.html を一部改訂。

に，国，地方自治体，事業者等の関係者が一堂に会する「原子力災害合同対策協議会」が開設されるとともに，国の現地対策本部（本部長は担当副大臣）が設置される。国の体制強化では，基本的に地方公共団体が対応の中心となっていたこれまでの防災体制を見直し，総理大臣を長とする原子力災害対策本部に多くの権限を与えることにより，国主導の体制を明確にしている。

## 2. 防災施設等の整備・開発

原災法の制定に伴い，上述のとおり全国の原子力施設近傍に緊急事態応急対策拠点施設（オフサイトセンター）が設置された。このオフサイトセンターの活動を技術的に支援する組織として，日本原子力研究開発機構は支援のための活動拠点である「原子力緊急時支援・研修センター」を茨城県と福井県に設置した。同センターでは，平常時には各機関の防災関係者の研修，原子力防災に関する調査研究，情報収集を行っており，緊急時には，事故情報の収集・解析・評価により，オフサイトセンターや事業者に対する支援を行うとともに，国や自治体の要請による専門家の現地派遣，移動式現場指揮車やモニタリング車等の特殊資機材の提供を行う。

また，(財)原子力安全技術センターでは，周辺環境における放射線量等を地形や気象を考慮し，迅速に予測する緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム（SPEEDI）の運用，航空機サーベイシステムの運用に向

けた開発・整備，原子力緊急時に事故現場の放射線量などの情報を遠隔操作により収集するためのロボットの開発（旧日本原子力研究所と共同）を行っている。

## Ⅲ. 福島原発事故における対応

### 1. 初期対応

福島原発事故において2011年3月11日に行われた初期対応の流れを以下に示す<sup>1)</sup>。

- 15:42 原災法第10条第1項に基づく通報（運転中の全交流電源喪失）  
原子力災害警戒本部，同現地本部の設置（経産省）
- 16:00 緊急助言組織の立ち上げ（原子力安全委員会）
- 16:31 官邸対策室の立ち上げ（内閣危機管理監）
- 16:45 原災法第15条に基づく通報（冷却機能喪失）
- 19:03 原子力緊急事態宣言（総理大臣），原子力災害対策本部，原子力災害現地対策本部設置

事業者からの通報は，原災法に従い適切に実施されており，原災法の第10条通報を受けた経済産業省や原子力委員会も迅速に対応を行っている（ただし，緊急助言組織については一部の委員のみが招集されたとのこと）。しかし，国としての対応である「原子力緊急事態宣言」には，原災法第15条通報から約2時間の時間遅れが生じている。JCO 臨界事故の場合には，事故発生から通報までが約1時間であり，国（科学技術庁（当時））の対策本部

が立ち上がるまでは約4時間かかった<sup>2)</sup>。JCO 臨界事故に比べれば、対応が早くなったといえるが、原災法によれば、総理大臣は第15条通報を受けた場合に、「直ちに」原子力緊急事態宣言をしなくてはならないこととなっている。原子力施設からの通報等において「直ちに」とは15分以内を指していることが一般的<sup>4)</sup>であり、その観点から考えると2時間の時間遅れは大きいといえる。当時は大規模な震災の対応に追われている状況であり、通報内容の確認等のために時間がかかったことはやむを得なかったかもしれないが、今後の検証が必要となるが、意思決定者である総理大臣が今回のような事態を想定した訓練を受けていたならば、「直ちに」対応をすることが可能であったのではないかと考える。

筆者は、JCO 臨界事故の翌年に行われた海外の原子力災害危機管理体制の調査<sup>5)</sup>に参加する機会を得た。この調査では、欧米の関係機関を訪問したが、どこの担当者も危機管理で最も重要なことは訓練であると強調していた(Practice! Practice! Practice!)。米国では、その中でも意思決定者(Decision maker)の訓練に重点を置くべきとのことであった。今回の事故対応においては、そのことを実証するような場面が多くみられたように思う。今後、原子力災害時の体制についての見直しが行われると思われるが、いずれにせよ、災害対策の意思決定者に対して十分な訓練を行うことが、危機管理時の対応を迅速にかつ確実にを行うための必要条件といえる。

## 2. 国の体制

災害対策では、「住民に最も身近な行政主体として第一次的には市町村があたり、都道府県は広域にわたり総合的な処理を必要とするものにあたる。また、地方公共団体の対応能力を超えるような大規模災害の場合は、国が積極的に応急対策を支援するものとする」ことが、「防災基本計画」におけるすべての災害における基本理念となっており<sup>3)</sup>、この考えは欧米においても共通である<sup>5)</sup>。JCO 臨界事故の対応をみても、迅速で的確な対応は、事故の詳細を知っている原子力事業者、事故現場に近い市町村レベルの地方自治体により行われた。しかし、原災法の制定により、原子力災害における国の体制が強化された結果、原子力災害対策本部長である総理大臣が関係行政機関や自治体に対し、応急対策について必要な事項を指示することとなった。これは災害対策の基本理念に反するものであり、このことにより地方自治体が国の判断待ちの状態となり、迅速な対応に逆行するものとの懸念が出されていた<sup>2,3)</sup>。福島原発事故においてはこれまでのところ、国主導の体制による直接的な悪影響は報告されていないが、格納容器のベント作業の遅れの問題や海水注入の一時中断騒ぎに関連して、体制の在り方が問題視されている。

## 3. 関係機関の連携<sup>1)</sup>

原災法の下での緊急時体制では、オフサイトセンター内に、国、自治体、事業者による原子力災害合同対策協議会が設置され、各機関の連携が行われることとなっている。今回の事故においても第15条事象の発生を受け現地対策本部が立ち上げられた。しかし、震災により電源設備や通信設備が損傷したため、非常用電源が復旧する3月12日3時20分までの間、オフサイトセンターは機能不全に陥った。非常用電源の復旧に伴い衛星回線による通信システムが利用可能となったが、情報収集やテレビ会議などのシステムは利用できず、その後の放射線量率の上昇により、3月15日には福島県庁へ移転することとなった。また、震災の影響と考えられているが、現地対策本部要員の参集割合は全体に低かった。このような状況下では、関係機関の間の連携を十分に取ることは困難であり、このことが、事故の初期対応の障害になったことは否めない。

## 4. オフサイトセンターの機能

上述のように福島オフサイトセンターは、震災およびその後の放射線の影響により現地の事故対策拠点としての機能を果たすことができなかった。オフサイトセンターは、十分な耐震性や耐放射線性を有していなければいけないはずの施設であるが、宮城県や茨城県のオフサイトセンターも震災(地震あるいは津波)の影響で利用できなかったこと[河北新報：2011年3月24日、読売新聞：同年3月30日]を考えると、残念ながら、現在のオフサイトセンターは今回のような災害時には利用できないということになる。オフサイトセンターの設置にあたっては、サイトから20 km 以内という要件はあるが、どの程度離れていなければならないという要件はない<sup>6)</sup>。福島のオフサイトセンターは、サイトから約5 km に位置しており、事故時には放射線の影響を受ける可能性のあるEPZ(防災対策を重点的に充実すべき地域の範囲)<sup>7)</sup>内にある。

オフサイトセンターは原則としてEPZの外側に設置されるべきであるが、EPZ内に設置されている場合には、耐放射線性を考慮した建屋とする必要がある。しかし、2009年に実施された総務省の調査<sup>8)</sup>によると、調査対象となった13オフサイトセンターのうち7つ(北海道、六ヶ所、宮城、福島、静岡、石川および愛媛)がEPZ内に設置されており、そのうち2オフサイトセンター(北海道および六ヶ所)は高性能エアフィルタを有した換気設備を設置しているが、福島を含む残りの5オフサイトセンターにはそのような被ばく低減措置が取られていないことが指摘されている。高性能フィルタではダスト状の放射性物質は除去できるが、希ガスやヨウ素等のガス状の放射性物質は除去できない。すなわち、7か所すべてでヨウ素の放出を伴うような今回の事故が発生した場

合には、オフサイトセンターは利用できない可能性があることとなる。この総務省の指摘(勧告)に対して、経済産業省は以下のように改善措置を回答している<sup>9)</sup>。

「各センター運営要領において、被ばく放射線量を低減する措置を講じるための方策として、i)放射性物質の放出が始まる前の段階での十分な換気の実施、ii)放射性物質の放出が始まった場合のセンター内の気密性の確保および要員の入館管理、iii)出入口付近で活動する要員などが放射性ヨウ素等を吸引するおそれがある場合の防護マスクや防護着用等を明記」(する)。

上記の措置は、ヨウ素等の放出が続く間は換気を行わないことを意味しており、短時間で収束する事故の場合には対応可能といえるが、長期にわたる事故に対しては十分な措置とはいえない。結局のところ、原子力防災の観点での災害(事故)の規模をどのように想定するかという基本的な設定が不十分であったことがうかがえる。

## 5. 事故情報の収集・評価

災害発生時の原子炉の状況を把握し今後の事故進展を予測することは、住民の安全確保や事故収束のために大いに役立つものであり、このためのツールとして緊急時対策支援システム(ERSS)が整備されている。ERSSは事故時のプラント情報を収集・表示するとともに、事故状態の判断の支援、今後の事故進展の予測解析を行うシステムである。ERSSにより評価した放射性物質放出量データを緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム(SPEEDI)に引き渡し、周辺環境における放射性物質の大気中濃度や被ばく線量などを迅速に予測することが可能となる。ERSSのうち、予測解析については原子力安全基盤機構が実施し、その結果を国やオフサイトセンターに配信する。また、SPEEDIは、文部科学省の指示の下に(財)原子力安全技術センターが解析を実施し、その結果を国、自治体、オフサイトセンター等に配信する体制となっている。今回の原発事故では地震により原子炉のデータを伝送するシステムが機能しなかったため、ERSSを活用することができなかった。また、ERSSの結果を用いて放射能影響を評価するSPEEDIについては、単位放出量を用いた評価を事故直後から実施していたが、仮想的な評価であることから「無用な混乱を招く」との理由で当初は結果が公開されていなかった<sup>1)</sup>。ERSSについては、原子炉の計測系電源が喪失しデータが取得できない状態となったため、データ伝送システムが健全であったとしても、利用はできなかった可能性が高い。しかし、SPEEDIの結果については、いろいろなところで指摘されている<sup>1)</sup>ように、事故直後から公開していれば住民の退避の際の有用な情報になったと考えられる。

## 6. 事故収束への対応

原子力災害におけるサイト内の対応は事業者が行うのが原則であるが、今回の福島原発事故では、その被害の大きさから事業者だけによる対応が困難であり、多くの関係機関のほか、海外各国からの支援も行われている<sup>1)</sup>。現在最大の懸念となっている敷地内の大量の汚染水の処理についても、フランス、米国の企業が中心的役割を担っている。この支援の一つとして、原子炉建屋内の損害状況および放射線量率把握のために、米国アイロボット社製のカメラや放射線モニタを搭載したロボットが提供され、貴重なデータを取得している。

原子力災害用のロボットについては、II-2節で述べたように我が国においてもJCO臨界事故後に開発が進められたが、残念ながら事故の初期対応においては利用されなかった。その理由は、報道によると、日本原子力研究所(現日本原子力研究開発機構)が2001年に完成させた原子力防災ロボット4機種5台は、その後の予算がないために廃棄されたり、保守管理をせずに倉庫に放置されて動かなくなったりしていること[西日本新聞:2011年5月14日]、また、(財)原子力安全技術センターのロボットは、敷地内に散乱しがれきのため活動できない状況に陥っている[西日本新聞:2011年5月5日]とのことである。さらに、通商産業省(当時)のプロジェクトで開発されたロボットについては、「原発などの災害で活用する場面はほとんどない」との判断により廃棄処分となっている[朝日新聞:2011年5月14日]。このことは、ロボットの開発が原子力防災の実地での運用を想定しないまま進められたことを示している。先に述べた海外の原子力災害危機管理体制の調査<sup>5)</sup>において、欧米各国が原子力災害を実際の危機として捉えていることが多くの面で示された。その一例として、フランスのグループ・アントラ(Groupe Intra)社という遠隔操作ロボットの運用を中心とした原子力災害時の緊急時支援組織が挙げられる。同社はEDF(電力会社)、フランス原子力庁(CEA)そしてコジマ(COGEMA)社が出資し、年間予算約8億円(2000年当時)で運営されている。ロボット等の資機材の操作は、常勤職員とは別に国内の各サイトの職員が訓練を受けており、どのサイトにおいても資機材を操作できる体制となっている。資機材は、小型のロボットから、遠隔操作可能な大型トラクタやトラック、操作のための指令車や指揮車、除染用の車など各種の状況に対応できるものが整備されている。また、ドイツにもKHG社という同様の組織があり、全国の43社の電力会社を中心に運営されている。これらの組織は、これまで本格的に活動したことはないが、原子力防災における事業者にとっての一種の保険と考えられている。福島原発事故が発生した現在、わが国でもこのような民間を中心とした形態の緊急支援組織の設立を考える時期ではないか。

#### IV. 終わりに

「わが国ではこれまで、事故などのたびに(そこに)焦点を当てた追加的な形で規制の改革が行われてきた。したがって、必ずしも統一の取れた最適な形になっていない部分がある。効果的効率的な規制や防災システムを作るべく、不断の見直しと改善を行うことが重要である。」

上の文は、日本原子力学会 JCO 事故調査委員会報告書の「まえがき」に記されたものである<sup>2)</sup>(括弧内は筆者追記)。今回の福島原発事故への対応状況を見る限り、残念ながら JCO 臨界事故以降に「不断の見直しと改善」が行われていたとは言えない面がある。今回の事故後にも多くの改革が行われると思うが、それだけで満足せず、「不断の見直しと改善」を今度こそ確実に行う必要がある。今回のような事故を起こさないことが最も大切であることは言をまたないが、危機管理としては事故が現実起こりうるという意識をもって準備を行うこと、特に実効性のある「訓練」を実施し、その結果を「不断の見直しと改善」につなげていくことが肝要である。

(追記)

最後になりましたが、今回の震災により被害を受けられた皆さまに、心よりお見舞い申し上げます。なお、本資料は現時点で得られている情報を基に作成したのですが、事実関係やその解釈に誤りがありましたら、それは筆者の理解不足によるものです。先にお詫びするとともに、ご指摘くださるようお願いいたします。

#### —参考資料—

- 1) 原子力災害対策本部, 原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について, 平成23年6月.  
[http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea\\_houkokusho.html](http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html)
- 2) 日本原子力学会 JCO 事故調査委員会, JCO 臨界事故その全貌の解明事実・要因・対応, 東海大学出版会, (2005).
- 3) 内藤奎爾, 核燃料施設の臨界事故—JCO 臨界事故を省みて, 原子力安全研究協会, (2003).
- 4) 中央防災会議, 防災基本計画, 平成20年2月.
- 5) 内閣安全保障・危機管理室, 原子力災害危機管理体制に関する調査報告書, 平成12年3月.
- 6) 原子力災害対策特別措置法施行規則, 平成12年4月5日.
- 7) 原子力安全委員会, 原子力施設等の防災対策について, 昭和55年6月(平成22年8月一部改訂).
- 8) 総務省, 原子力の防災業務に関する行政評価・監視結果に基づく勧告(第二次), 平成21年2月.
- 9) 総務省, 原子力の防災業務に関する行政評価・監視結果に基づく勧告(第二次)回答, 平成21年8月27日.

#### 著者紹介



中島 健(なかじま・けん)  
京都大学原子炉実験所  
(専門分野/関心分野)原子炉物理, 臨界安全, 臨界事故, 原子炉実験・教育

#### ■第19回原子力工学国際会議(ICONE-19)のご案内

企 画 日本機械学会動力エネルギーシステム部門  
共 催 米国機械学会, 中国原子力学会  
協 賛 日本原子力学会, WNA, KNS, ENS, CNS, IAEA  
開催日 2011年10月24日(月), 25日(火)  
会 場 大阪大学吹田キャンパスコンベンションセンター  
内 容 各国を代表する方々の講演, 福島第1原子力発電所事故に関わる特別セッション, テクニカルセッションを予定。  
詳 細 <http://www.icone19.org/>  
参加費 協賛学会員20,000円, 非会員25,000円, 学生会員2,000円  
(当日会場にて支払い)  
申込・問合せ 日本機械学会 動力エネルギーシステム部門担当,  
川崎さおり  
TEL 03-5360-3502, FAX 03-5360-3508  
E-Mail: kawasaki@jsme.or.jp

## From Abroad

# Reaching First Criticality and Physics Experiments in the CEFR

Xu Mi, Yu Hong, Hu Yun, and Chen Yiyu  
(*China Institute of Atomic Energy, Beijing*)

The first criticality of the China Experimental Fast Reactor (CEFR) was reached on July 21, 2010. The CEFR is the first step in fast reactor engineering development in China, which was launched in the framework of The National High-Tech Program. The design and construction timetable, the main design characteristics and the parameters of the CEFR are briefly introduced in the paper. Emphasis is placed on describing the criticality calculation tools and results before its physics start-up and then the physics start-up testing process and results are described. Finally some important experiments completed at the reactor criticality state are listed.

**KEYWORDS :** *China Experimental Fast Reactor, first criticality, physics experiments*

## I. Introduction

The first step in China for fast reactor engineering development is the China Experimental Fast Reactor (CEFR) which is a sodium cooled pool type reactor with the power 65 MWt/20 MWe. After its conceptual design completed, the technical consultancy and co-technical design were conducted with the Russian FBR Association from 1993 to 1996, and its preliminary and detailed designs were completed in 1997 and 2005 respectively. The ordering of components was started in 1997. Imported components came mainly from Russia, France and the UK, with all imports from abroad accounting for about 30% of the total systems and components budgets. The construction was carried out from 2000 to 2007, followed by pre-operating tests including cooled and hot states without and with sodium in sodium related components and systems. Its first criticality was realized on July 21, 2010, and this was followed by physics experiments on 16 items including control rod worths, reactivity coefficients, power distributions, capture- and fission-rate measurements, neutron spectrum indices *etc.*

The power start-up of pre-operation testing has been started. It is planned to incorporate the CEFR into the national grid with 40% full power in June, 2011.

## II. China Experimental Fast Reactor (CEFR)

### 1. Basic characteristics and history of CEFR

After basic research studies (1967-1986) on sodium cooled fast reactor technology followed by applied basic research studies (1987-1993), the design and construction plan of the China Experimental Fast Reactor (CEFR) was launched. The purposes of the CEFR are the following:

- (1) to accumulate experiences on fast reactor design, construction and operation.
- (2) to irradiate and develop fuels and materials in its role as a fast neutron facility.
- (3) to test and demonstrate prototype equipment in its role as a platform for fast reactor parameters.

In order to decrease the technical-economic risks for following-ups of CEFR, the design requirements proposed for CEFR are as follows:

- (1) Main technical selections should be consistent with prototype and commercial fast reactors;
- (2) Thermal parameters non-related to reactor size should be close to the commercial parameters.

Based on established pre-requirements, the conceptual design was finished in 1993, and in order to compensate for lack of fast reactor engineering experiences, from 1993 to 1996 work was done in cooperation with the Russia FBR Association for consultancy and co-technical design. Cooperative work with the French CEA for R&D on FBR technology has

been conducted since 1995. The preliminary and detailed designs were completed during 1995–2005. The CEFR construction started in 2000 and was completed in 2009. After about three years pre-operation testing, its first criticality was realized on July 21, 2010, and this has been followed by reactor core physics experiments.

## 2. CEFR Introduction

The CEFR is a pool type sodium cooled fast reactor, the fuel used for the first loading is  $\text{UO}_2$  with enrichment of 64.4% U-235. The primary circuit including two main pumps, four intermediate heat exchangers and reactor core which is shown in Fig.1 is in a reactor vessel 8 meters in diameter containing 260 t liquid sodium.

The secondary circuit is divided into two loops. Each one mainly composed of one sodium pump, two intermediate heat exchangers and one steam generator (evaporator and super-heater). The tertiary water steam circuit is also divided into two loops, but superheated steam  $480^\circ\text{C}$  and 14 MPa from each is combined to enter one turbine generator.

CEFR is a small sodium cooled fast reactor with very strong negative reactivity feedback due to the temperature and power changes and the sodium void reactivity coefficient is negative everywhere the core. So the CEFR core has self-stability features.

The reliable removal of decay heat is very important after reactor shut-down in the accident state if the electricity supply is lost and the main heat transfer system cannot be used. For this reason, two

independent passive decay heat removal systems (PDHRS) are provided. The decay heat is removed by natural convection and circulation of primary and secondary sodium of the PDHRS and natural convection by air as well in such an accident.

The probabilistic analysis showed that the core damage frequency is  $4 \times 10^{-7}$ /reactor  $\cdot$  a. The safety analysis showed that the personal irradiation effective dose equivalent is less than 5 mSv/accident at the boundary of the CEFR site (153 m from CEFR reactor) by any beyond design base accident (BDBA). And the dose limit at the site boundary not requiring short-term off-site response satisfies the safety target proposed for advanced nuclear energy systems of Generation IV.

The main design parameters of CEFR are listed in Table 1 and its outside view is given in Fig 2.

## III. Design and Scheme of Neutron Flux Detection

For CEFR source range neutron flux surveillance, four boron counters type ZJ 524 A : I A, I B, II A and II B are equipped outside the reactor guard vessel about 7.74 m from the core center as shown in Fig. 3. Three U-235 high temperature pulse fission chambers (type KHT 54-2) P 1, P 2 and P 3 which were imported from Russia, are arranged in the graphite column at the corner of the core shown as Fig. 3. A Cf-252 start-up neutron source with an intensity of  $1 \times 10^6$  n/s is used in the core center.

The sensitivity and background values of detectors with start-up neutron source are given in Table 2.

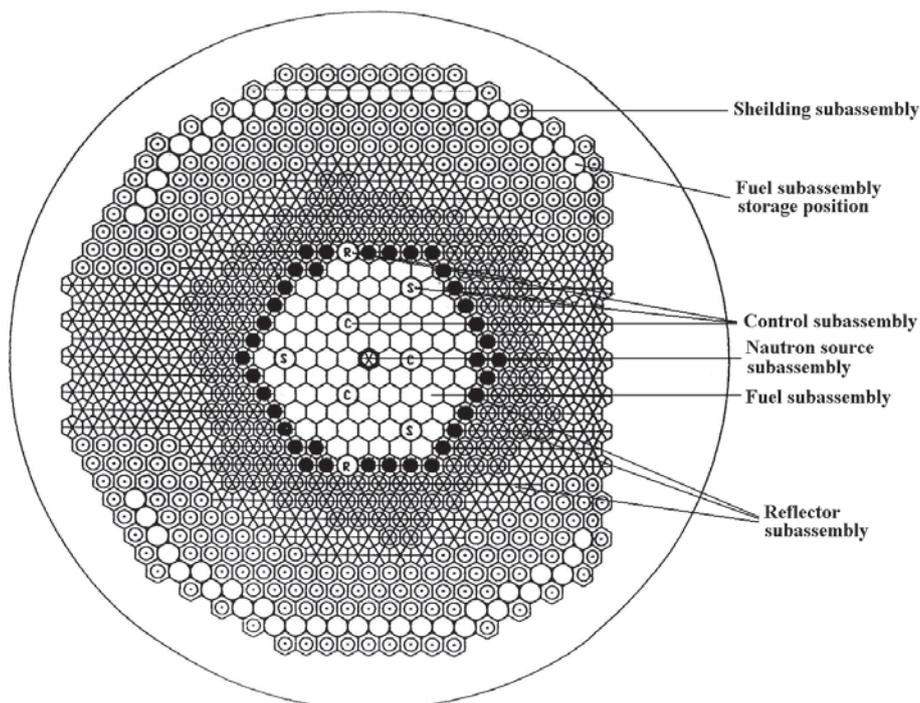


Fig.1 The core of CEFR

**Table 1** CEFR Main Design parameters

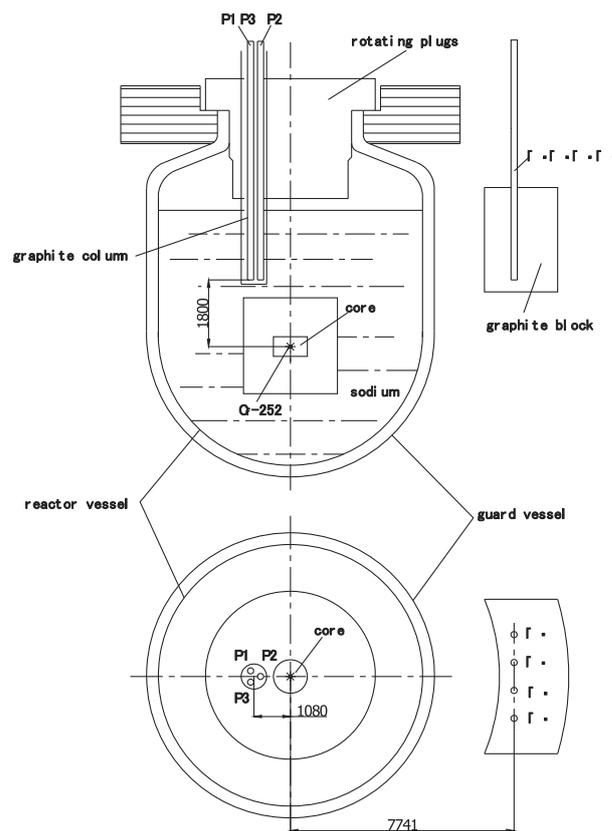
Parameter	Parameters	
Thermal power	(MW)	65
Electric power, net	(MW)	20
Reactor core		
Height	(cm)	45.0
Diameter equivalent	(cm)	60.0
Fuel		(Pu, U)O <sub>2</sub>
Pu, total	(kg)	150.3
Pu-239	(kg)	97.7
U-235 (enrichment)	(kg)	42.6 (19.6%)
Linear power max.	(W/cm)	430
Neutron flux	(n/cm <sup>2</sup> ·s)	3.7 × 10 <sup>15</sup>
Burn-up, target max.	(MWd/t)	100,000
Burn-up, first load max.	(MWd/t)	60,000
Inlet temp. of the core	(°C)	360
Outlet temp. of the core	(°C)	530
Diameter of main vessel (outside)	(m)	8.010
Primary circuit		
Number of loops		2
Quantity of sodium	(t)	260
Flow rate, total	(t/h)	1,328.4
Number of IHX per loop		2
Secondary circuit		
Number of loops		2
Quantity of sodium	(t)	48.2
Flow rate	(t/h)	986.4
Tertiary circuit		
Steam temperature	(°C)	480
Steam pressure	(MPa)	14
Flow rate	(t/h)	96.2
Plant life	(a (year))	30



**Fig. 2** The outside view of CEFR

#### IV. Criticality Calculation

The physics start-up testing of CEFR is divided into two phases including loading up to first criticality and physics testing under low power. Three categories of tests are been conducted which are control rod reactivity measurements, reactivity coefficient measurements and capture- and fission-rate measurements using foil activation methods.



**Fig. 3** Arrangement of neutron flux detectors

**Table 2** Sensitivity and background values of detectors

Detectors	I A	I B	II A	II B	P 1	P 2	P 3
Sensitivity (c/n/cm <sup>2</sup> ·s)	30.8				0.8		
Background (with Cf source)							
Control rods in core (c/s)	~0.5				57.1	13.9	14.8
Control rods out of core (c/s)	3.8	4.3	3.5	3.9	52.5	154.8	169.0

Before testing, the calculation analysis was carried out.

#### 1. Description of Computer Codes and Related Nuclear Data

The three dimensional static analysis of each step of first loading was conducted with four code systems: ERANOS, CITATION<sup>1)</sup>, HND and MCNP in which HND is a coarse mesh nodal diffusion code.

The Nvitamin-C file is used for the fine (171 groups) cross section data bank used in the core neutronics calculation by CITATION and HND codes, and incorporated with cross section processing code system PASC-1. ERANOS is an European fast reactor neutronics calculation code package matched with cross section data file JEF 2.0. MCNP has its own point cross section data bank. The cross section data used for physics criticality calculation are mainly from the ENDF/B-V bank.

The Nvitamin-C 171 group cross section bank was re-made up by the nuclear data center of the China

Institute of Atomic Energy, following the original Vitamin-C format and using rather new data (ENDF/B-VI, JEF-2, CENDL-2 and JENDL-3). In comparison to Vitamin-C Bank, besides having new data, the nuclide number has been increased from 66 to 105 in which single group false fission products of U-235 and Pu-239 are included. Based on approximately adopting the Bondarenko format for narrow resonance the resonance self-shielding is modified, to serve mainly for shielding and other calculations for the fast reactor or fusion reactor.

The micro cross section data bank of CITATION and HND is made up by PASC-1 code system with few groups bank. Even though that of CITATION could be made up by several codes, XSDRN<sup>2)</sup> was designed specially for this purpose and it is also a one dimensional SN transport calculation module. PASC-1 code system, which has a function similar to AMPX, is a code package by which the main format cross section bank of neutron fine groups is combined to a wide or few groups format cross section bank for core diffusion calculation by CITATION. The PASC-1 code system flow is shown in Fig. 4.<sup>3)</sup>

## 2. Calculation Results

Prior to the actual loading of fuel subassembly, the critical calculation of each batch of loading by the above mentioned four code systems was completed to give effective multiplication factors and critical number of subassemblies. The calculation results are given in Table 3 in which all core effective multiplication factors have been corrected based on the calculation results of CEFR first loading benchmark facility BFS 831 (IPPE, Russia). The first critical subassembly number is predicted between 71 and 73 by the calculations.

## V. Physics Start-up Experiments

As shown in Table 4, CEFR physics start-up experiments include four categories: loading and critical tests, control rod worth measurements,

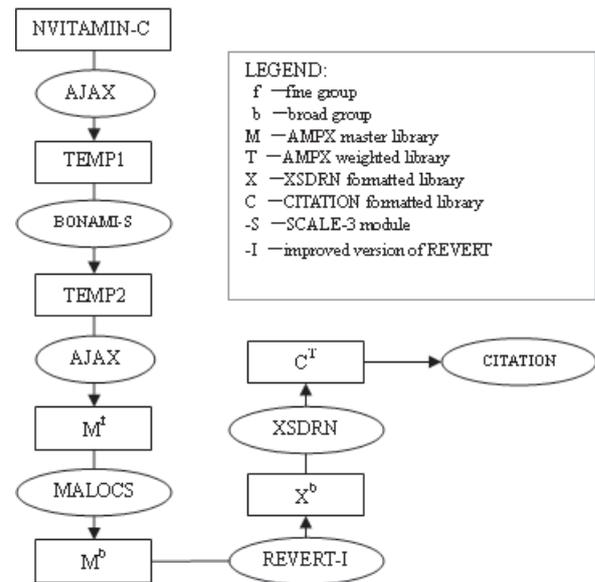


Fig. 4 PASC-1 code system flow

reactivity effect measurements, and activation measurements. Three criticality states are considered: net core criticality (minimum criticality), cold criticality and hot criticality for operation loading.

The first criticality involves just the net core in which the temperature is stabilized at  $250^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  and almost all control rods are out of the reactor core. Fuel subassemblies are replaced from dummy ones in a batch wise manner to reach criticality using the extrapolated method with the reciprocal of the neutron flux counts to obtain critical mass as shown Fig. 5.

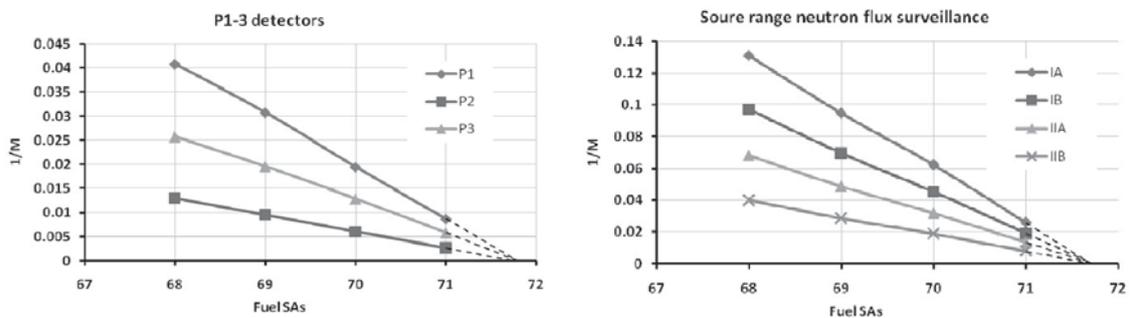
When loading up to 72 fuel subassemblies, the reactor reaches criticality and the excess reactivity of the core is determined by the calibrated differential worth of the control rods. The criticality tests for operation loading showed that the number of core loading is 79 fuel subassemblies for the rated operations including power ascension from cold to hot states. Related parameters are listed in Table 5.

Table 3 CEFR first loading criticality calculations

Load batch	Core S.A. number	Effective multiplication factors				Extrapolated critical number of subassemblies			
		ERANOS	CITATION	HND	MCNP	ERANOS	CITATION	HND	MCNP
1	24	0.65133	0.66858	0.67167	0.69139	—	—	—	—
2	40	0.81749	0.82594	0.82991	0.84316	36.8	57.7	57.2	56.5
3	48	0.88044	0.88227	0.88635	0.89820	57.6	64.7	64.1	62.6
4	56	0.92831	0.92669	0.93066	0.94085	63.2	69.2	68.5	67.3
5	62	0.95644	0.95327	0.95718	0.96494	68.0	72.5	71.7	70.5
6	66	0.97466	0.96994	0.97390	0.98024	71.3	73.2	72.2	71.5
7	69	0.99002	0.98422	0.98822	0.99305	71.6	72.3	71.5	70.3
8	70	0.99501	0.98883	0.99281	0.99784	70.9	72.4	71.6	70.5
9	71	0.99985	0.99333	0.99726	1.00190	71.0	72.5	71.6	70.5
10	72	1.00495	0.99803	1.00199	1.00684	71.0	72.4	71.6	70.6
11	73	1.01010	1.00281	1.00676	1.01151	71.0	72.4	71.6	70.5

**Table 4** CEFR physics start up experiments

Loading and criticality	Control rod worth	Reactivity coefficient	Activation of foils
1. Loading and first criticality	1. Scaling at first criticality	1. Pressure reactivity coefficient	1. Nuclear reaction rate relative distribution profiles
2. Initial core : Operation loading cold criticality	2. Operation loading cold state	2. Operation loading cold state	2. Flowrate reactivity coefficient
3. Nuclear heat starting	3. Operation loading hot state	3. Sodium void reactivity coefficient	3. Neutron spectrum measurements
4. Operation loading hot criticality		4. Fuel subassembly exchange reactivity	4. Absolute nuclear power determined by reaction rates with foils in relation to the neutron count rates of detectors
		5. Temperature reactivity coefficient	



**Fig. 5** Extrapolated method for first criticality

**Table 5** Criticality testing parameters

Parameter	Net core (Minimum critical core)	Initial core Operation cold	Initial core Operation hot
Core state			
Fuel S.A./No.	72	79	79
Primary Na (°C)	245	245	302
Primary Ar pressure (kPa)	5.2	5.3	49.7
Primary Na level (mm)	4,344	4,345	4,421
Primary pump speed (rpm)	151	151	901
Critical rod elevation (mm)			
1# compensation (SH 1)	542	283	299
2# compensation (SH 2)	542	282	299
3# compensation (SH 3)	543	284	299
1# regulation (RE 1)	542	272	255
2# regulation (RE 2)	122	273	256
Double period (s)	>500	>500	>500

**VI. Summary**

The first criticality of the CEFR has been reached and results were consistent with the calculated results obtained by four different neutronics code systems which are being used now for the design of the China demonstration fast reactor CFR-1000. Some important safety related parameters, e.g. control rod worth, temperature coefficient, sodium void effect, fuel

subassembly exchange reactivity, inertia whirl properties of primary and secondary pumps, etc. have been demonstrated in experiments at the initial core following the first criticality.

**Acknowledgement**

The authors sincerely express their thanks to all colleagues of the CEFR physics start-up team for their excellent work on the CEFR first criticality and following experiments and providing the data for this paper.

**References**

- 1) T. B. Fowler, D. R. Vondy, G. W. Cunningham, *Nuclear Reactor Core Analysis Code : CITATION*, ORNL-TM-2469, rev. 2, Oak Ridge National Lab., (1971).
- 2) N. M. Greene, *XSDRN : A discrete ordinates spectral averaging code*, ORNL-TM-250, (1969).
- 3) Y. Wang, J. Oppe, J.B.M. de Haas, et al., *The Petten AMPX /SCALE code system PASC-1 for reactor neutronics calculation*, ECN-89-005, (1988).

**Profile**

**Xu Mi**

China Institute of Atomic Energy, Beijing  
(Field of Interest) Fast Reactor, Closed Nuclear Fuel Cycle, Reactor Safety.

連載  
講座材料が支える原子力システム  
より良い信頼性のために

## 第2回 高速炉炉心用改良ステンレス鋼

日本原子力研究開発機構 井上 利彦, 山県 一郎, 浅賀 健男

連載講座の第1回目では、現行プラントである軽水炉の多くの場所で使用しているステンレス鋼について紹介した。今回は、同じステンレス鋼であるが、軽水炉と比較して、高温、高速中性子および冷却材ナトリウムという過酷な高速炉の環境で使用するために開発した高速炉炉心用改良ステンレス鋼について紹介する。

## I. 概要

ナトリウム冷却型高速増殖炉では、軽水炉よりも使用温度が高いため、主要な構造物のほとんどに高温強度に優れたステンレス鋼が使用されている。中でも高速中性子にさらされる炉心材料、特に燃料被覆管(以下、「被覆管」という)については、高温クリープ強度特性、耐スエリング性(スエリングについてはⅢ-3節参照)および耐食性に優れる必要がある。本稿では、高速実験炉「常陽」(以下、「常陽」という)、高速増殖原型炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」という)の炉心材料に使用している改良 SUS 316 鋼について、高速炉特有の使用環境や被覆管に求められる材料特性を示すとともに、開発の変遷等を紹介する。

## II. 高速炉でのステンレス鋼

## 1. 高速炉での使用環境

これまでに世界で建設、運転された高速増殖炉は液体金属ナトリウム冷却型が主流であり、原子炉を構成する炉容器、配管、燃料集合体等には SUS 304, SUS 316 等のオーステナイト系ステンレス鋼を使用している。

特に、炉心燃料集合体(第1図)に使用される被覆管やラップ管等の構成材料(以下、「炉心材料」という)は、軽水炉よりも厳しい環境で使用される。炉心材料の中でも被覆管は、使用環境が最も厳しくなる。以下に、日本原子力研究開発機構が開発を進めている高速炉での特徴的な使用環境を示す。

*Materials for Nuclear Energy Systems—Towards High Reliability*(2); *Modified SUS 316 Stainless Steel for Fast Breeder Reactors*: Toshihiko INOUE, Ichiro YAMAGATA, Takeo ASAGA.

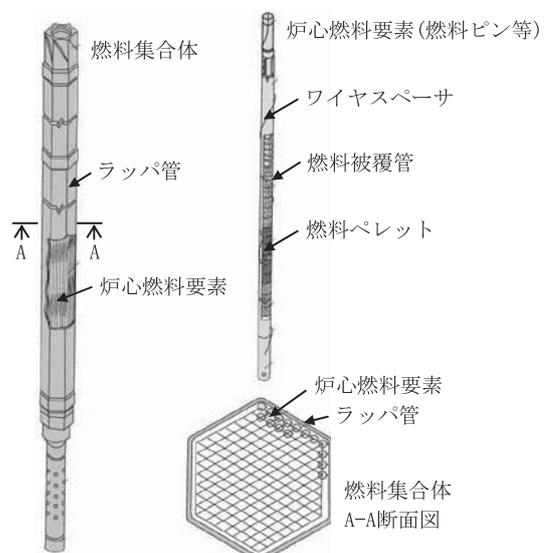
(2011年 3月1日 受理)

第1回 軽水炉用ステンレス鋼

## (1) 高温下における FP ガス圧荷の環境

軽水炉は濃縮ウランを燃やすため熱中性子を利用して。そのため、減速材と冷却材の機能を兼ねた軽水が用いられており、被覆管温度は325℃前後となる。一方、高速増殖炉は、プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料を燃やし、高速中性子を利用した核燃料の増殖を行うため、炉心の出力密度(単位体積当たりの出力)が軽水炉より高く、高速炉の被覆管温度は650℃前後となり、軽水炉よりも高い温度領域での使用となる。例えば、「もんじゅ」では、定格出力時の冷却材の原子炉容器入口温度は約400℃、同出口温度は約530℃、炉心燃料集合体の被覆管の最高温度(肉厚中心)は約675℃である。

また、燃料ピンは、燃料ペレットや核分裂生成物(FP: Fission Products)を閉じ込めるため密封構造とされており、燃焼に伴い燃料ペレットから放出される FP ガスにより燃料ピン内の内圧が上昇する。燃料ピン内には、FP ガスを蓄積するガスプレナム部が軽水炉と同様に設けられているが、高速炉では燃料の出力密度が大きく熱流束が高



第1図 「もんじゅ」炉心燃料集合体の構造概要

いこと、さらに軽水炉よりも薄肉の被覆管を用いているため、薄肉被覆管にはFPガスによる内圧クリープ変形を受ける。

### (2) 高速中性子照射環境

核分裂中性子の平均エネルギーは約2 MeVであり、高速炉では中性子があまり減速されないため、被覆管は軽水炉よりもカスケード損傷(高密度の欠陥形成)等の大きな照射損傷を受ける。被覆管が受ける高速中性子照射量は、「もんじゅ」では約 $2.3 \times 10^{27} n/m^2$ (最大約115 dpa, dpa: displacements per atom, 結晶中の全原子が平均1回衝突を経験する照射量を1 dpaといい、1 dpaに相当する中性子照射量は約 $2 \times 10^{25} n/m^2$ である)にも達し、軽水炉の約100倍に相当すると言われている。

### (3) 化学的環境

冷却材は中性子の減速効果が少なく除熱能力に優れる必要があり、通常、液体金属を使用している。「常陽」等では、冷却材にナトリウムを使用しており、被覆管の外表面は流動ナトリウムにより腐食される。また、被覆管の内面は、燃料ペレットに隣接しており、軽水炉と同様に、燃焼が進むと酸素ポテンシャルの上昇とFPの蓄積が相乗して、燃料—被覆管化学的相互作用(FCCI: Fuel-Cladding Chemical Interaction)が発生する。

## 2. 求められる諸特性

以上のような環境下で使用される炉心材料、特に被覆管に求められる諸特性は以下の通りである。

### (1) 高温強度特性

被覆管は、使用期間中、FPガスに起因する内圧(「もんじゅ」では周応力換算で約69 MPa)に耐える高温強度、特に高温クリープ強度を有する必要がある。

### (2) 耐スエリング性

被覆管は、高速中性子により照射損傷を受けて体積膨張(ボイドスエリング)し、その結果、燃料ピンの軸方向および径方向に寸法変化が生じる。使用期間中に過大な寸法変化が生じると、燃料集合体内の冷却材の流路面積が減少して冷却性能の低下をもたらすため、耐スエリング性は重要な材料特性である。

### (3) 耐食性

腐食によって被覆管が減肉すると、内圧による被覆管への負荷応力が増大するため、優れたナトリウムとの共存性と耐FCCI特性が要求される。

### (4) その他

「もんじゅ」被覆管は、直径6.5 mm、肉厚0.47 mm(公称寸法)、長さ約2,800 mmの薄肉小径の長尺継目無管である。被覆管材料は、厳しい寸法精度を満足するための加工性に加え、密封構造にするために優れた溶接性等が求められる。

## 3. 高速炉用材料の開発

我が国では、一般産業界において高温構造材料として多くの使用実績を有している日本工業規格(JIS: Japan Industrial Standards)のSUS 316鋼等をベース材料とし、海外の先事例を参考にしながら、高速炉炉心材料としての改良SUS 316鋼の開発を行ってきた<sup>1,2)</sup>。

海外では、高速炉炉心材料の開発が日本より先行して行われており、高温強度に優れるSUS 316鋼がベース材料となっている。例えば、フランスでは、AISI 316鋼(AISI: American Iron and Steel Institute)をベース材料として、TiC析出物による組織安定化を図ったチタン(Ti)添加材の316 Ti鋼、Ni/Cr組成比を15/15としてオーステナイト相を安定化しTiを添加した15-15 Ti鋼などが開発されている<sup>3)</sup>。

## Ⅲ. 改良SUS 316鋼の材料特性

SUS 316鋼は、クロム(Cr)濃度が高く耐食性に優れているため、高速炉被覆管の開発では、高速炉特有の寿命制限因子である高温強度特性の強化と耐スエリング性の改善の両立に重点を置いた<sup>1)</sup>。改良SUS 316鋼の開発の経緯と研究開発の結果の概要を以下に示す。

### 1. 改良SUS 316鋼の開発の経緯

改良SUS 316鋼の開発は、「常陽」MK-I炉心(増殖炉心)用材料(被覆管)を対象に1968年に開始し、SUS 316の強度向上を図った10%冷間加工SUS 316ステンレス鋼被覆管を1971年に製作した。また、これと並行して、「常陽」MK-IIおよび「もんじゅ」炉心材料として、鉄鋼メーカー、金属材料技術研究所(現、物質・材料研究機構)、大学等の協力を得て、SUS 316系ステンレス鋼のJISの範囲内での化学成分の最適化と加工法の改良などにより耐照射特性に優れた材料開発を目指した。年度ごとに試作した被覆管を用いて、各種強度試験、イオン照射などの模擬照射試験、ナトリウム中試験、模擬FPによる腐食試験、組織観察を含む一連の炉外評価試験を実施し、製造条件の最適化を図った。これらの評価試験で特性が優れると評価した材料をイギリスのDFRやフランスのRapsodie等の海外炉での中性子照射試験に供し耐照射特性を確認した。その他、加工性等の評価試験も実施した。

また、燃料ピン設計のベースとなる「材料強度基準」の整備を進めた。材料強度基準の策定では、被覆管を用いた引張試験(0.2%耐力、一様伸び)やクリープ試験(クリープ歪み、クリープ破断強さ)等に加えて、物性値(熱伝導度、ヤング率、熱膨張係数等)を評価した。このような試験は、非照射材とともに実使用環境を模擬した中性子照射材やナトリウム浸漬材等を用いて、強度特性に及ぼす環境効果の把握を行っている。

## 2. 機械強度特性(高温強度)

被覆管は、FP ガスにより内圧が漸増する状態で使用される。必要な燃焼度までの強度を担保するため、650℃、10,000時間で196 MPa以上のクリープ破断強度を有する高温強度を開発目標値とした。高温強度特性と耐スエリング性を両立するためのスクリーニング試験の結果、クリープ破断強度は、①冷間加工度、②結晶粒度、③微量添加元素(主にリン(P)、ボロン(B)、チタン(Ti)、ニオブ(Nb))に影響を受けることが明らかとなった<sup>1,4)</sup>。以下に概要を記す。

### (1) 冷間加工度の影響

冷間加工度をパラメータとした試作評価を行い、クリープ破断強度の改良の観点から最適値を選定した。15~20%程度の冷間加工度では変形双晶があまり発生せず、クリープ中は、加工転位上に析出した微細な炭化物により転位の移動が阻害され、転位密度の高い状態が長時間保持される。一方で、加工度が20%を超えると加工組織の回復・再結晶が起こりやすくなり、逆にクリープ破断強度が低下してしまう。以上の結果、冷間加工度の目標値は20%と規定した。

### (2) 結晶粒度の影響

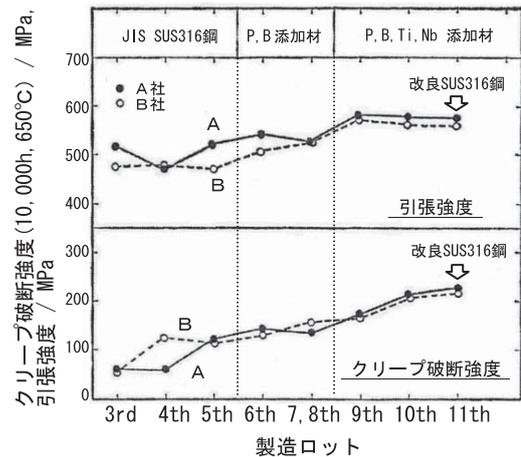
一般的にクリープ強度を向上させるには、粒界すべりを抑制する比較的大きな結晶粒が望ましいが、結晶粒が大きすぎると短時間強度特性が低下する。また、結晶粒が小さくなると結晶粒界に優先して析出する炭化物が多くなる。それに伴い、材料の強化に有効な結晶粒内の微細な炭化物が減少してしまうことになる。加えて、被覆管の製品検査に用いる超音波探傷検査による欠陥の検出では、結晶粒が大きすぎると欠陥検出に支障をきたす。これらの点を考慮し、クリープ強度の要求を満たすために結晶粒の大きさを約22~44 μm(結晶粒度は、ASTM No.6~8)と規定した。

### (3) 微量添加元素の影響

P, B, Ti, Nbの添加元素は、耐スエリング性や高温強度特性の改善を期待して、これらの元素の添加量を積極的に調整した。

P, Bの添加は、炭化物の成長・粗大化を抑制し、炭化物の微細分散によって高温・長時間まで高転位密度を保持し、高温強度、特にクリープ破断強度を改善する効果があることがわかった。さらに、Ti, Nbの添加は、クリープ変形中に微細な(Ti, Nb)炭化物が結晶粒内に微細析出することによりクリープ強度の改善に極めて有効であった。また、TiとNbの複合添加はそれぞれ単独添加の場合と比較して、重畳的な効果があることもわかった。JISのSUS316の規格では、Ti, Nbの量が明確に規定されていないため、改良SUS316鋼ではJIS成分内の不純物範囲とみなせる上限値0.1 wt%を添加目標値として規定した。

これらの添加元素量等を変えながら国内メーカー2社に



第2図 SUS 316鋼における強度特性の添加元素依存性<sup>1)</sup>

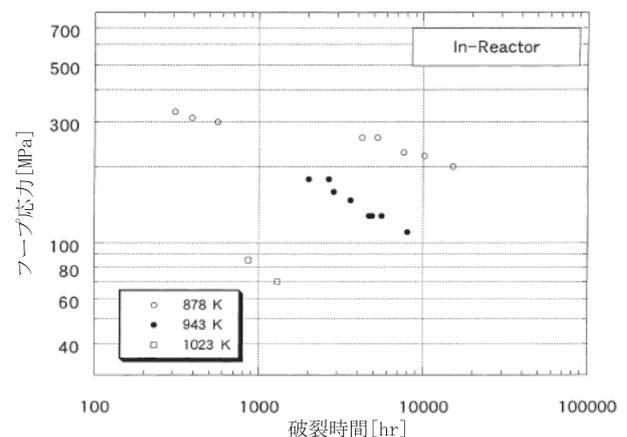
より試作材を製作し、650℃での10,000時間クリープ破断強度と引張強度を評価した。その結果を第2図に示す。このように試作を繰り返す過程でクリープ破断強度と引張強度を改善するための添加元素の組合せや添加量を最適化していった。

### (4) 照射による影響

炉外試験で良好な結果を得た改良SUS316鋼の照射後試験結果(炉内クリープ試験)の一例を第3図に示す。非照射材を用いた炉外試験と比較すると、照射の影響によりクリープ破断強度レベルが約20%低下することなどを確認している。また、照射材における引張強度の評価<sup>6)</sup>等も実施しており、これらの高温強度に及ぼす照射による影響は、冷却材ナトリウムの影響等を合わせて環境効果として考慮した上で、被覆管の寿命設計等へ反映している。

## 3. 耐スエリング性

材料が高速中性子を受けると“はじき出し”により格子間原子と空孔(これらを照射欠陥という)が生成される。照射欠陥自身は不安定であるため、粒界や転位等へ移動し安定化(消滅)する。この過程における照射欠陥の易動度の差によって空孔が過剰に蓄積されてボイドが形成さ



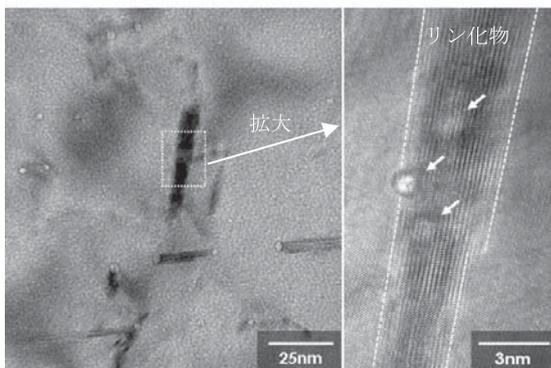
第3図 改良SUS316鋼(照射材)のクリープ強度<sup>5)</sup>

れ、体積が膨張する事象をスエリングという。耐スエリング性の向上には、欠陥の消滅場所(シンクサイト)を積極的に導入することが有効であり、高温強度特性の改善のために導入した冷間加工による高密度転位や微量添加元素による析出物の効果を積極的に利用した。ここでは微量添加元素による耐スエリング性への効果について、以下に概要を記す<sup>1,7)</sup>。

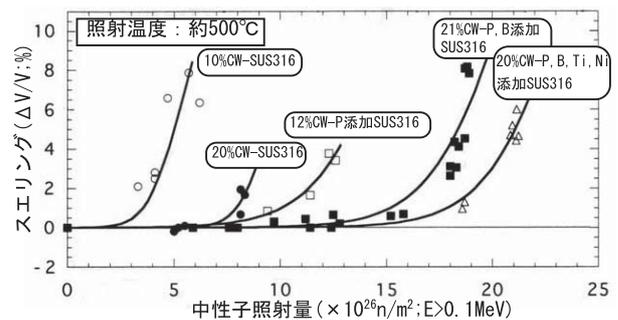
20%冷間加工した SUS 316 鋼に P を添加すると、照射環境下のみで析出する析出物(照射誘起析出物)であるリン化物(Fe<sub>2</sub>P 等)が形成することにより、ポイド形成の核になると考えられている He バブルをトラップしてその成長を妨げるため、耐スエリング性は良好になる。第 4 図に、代表的なリン化物の組織写真を示す<sup>8)</sup>。リン化物の周辺に He バブルがトラップされている様子がわかる。ただし、P の添加量が 0.03 wt% を超えると耐スエリング性の効果が漸減し、過剰な添加は溶接性も損なうため、添加量は 0.025 wt% に抑えている。

Ti, Nb の添加について、SUS 316 ステンレス鋼の JIS の不純物の範囲内(≤0.1 wt%)での添加では、金属炭化物(MC 相)として析出することにより転位組織の安定性を向上し、添加量の増加とともに耐スエリング性が良好になることがわかった。その他の元素としては、Si は欠陥の拡散挙動に影響することにより、耐スエリング性向上に寄与することから、添加量を JIS 成分内で増量した。

このように、高温強度特性を向上させるための改良が、同時に耐スエリング性も改善し、両者が両立可能であることが実証された。第 5 図はスエリング量の変化を中性子照射量の関数で示したもので、冷間加工度と微量添加元素による耐スエリング性の改善効果が示されている。10%冷間加工材と比較して、20%冷間加工材、P, B, Ti, Nb 等の元素を添加・増量した材料においてスエリングの立ち上がりが遅くなり、潜伏期間が高照射量側へシフトしている。



第 4 図 微細組織写真(リン化物)<sup>8)</sup>  
(図中の代表的な He バブルを矢印で示す。  
拡大図の点線はリン化物の境界を示す)



第 5 図 スエリング特性に対する冷間加工と添加元素の影響

#### 4. FCCI 等に対する耐食性

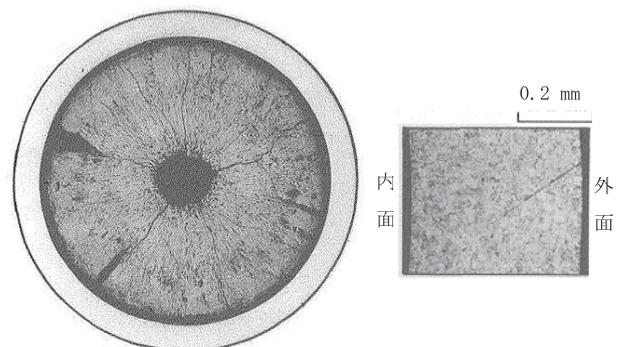
燃料ピンの内面腐食は、燃料ペレットと被覆管のギャップに蓄積した揮発性の FP により促進される FCCI により発生する。一例として、「常陽」MK-II で照射した実機燃料ピン(最高燃焼度：約 119 GWd/t)の断面金相観察の結果を第 6 図に示す。内面腐食は 100 μm を下回っており、著しい腐食は認められていない<sup>9)</sup>。また、外表面においても、ナトリウムによる著しい腐食も認められておらず、実使用環境下における改良 SUS 316 鋼の優れた耐食性を確認している。

### Ⅳ. 高速炉炉心材料の現状と今後の課題

#### 1. 改良 SUS 316 鋼の現状と今後

高温強度特性と耐スエリング性に優れた改良 SUS 316 鋼(20%冷間加工材、通称：PNC 316)は、1982年以降の「常陽」MK-II (照射用炉心)や「もんじゅ」の炉心材料に用いられており、「常陽」燃料ピンの本数として約 44,000 本の使用実績があるとともに、燃料集合体として約 2.1 × 10<sup>27</sup>n/m<sup>2</sup>(最高燃焼度：約 147 GWd/t)までの照射実績を有しており、良好な高温強度と耐スエリング性を実証している<sup>3,7)</sup>。

本稿で述べたように、「常陽」等の運転を通じて SUS 316 鋼の改良を継続し、世界的に多くの研究開発成果と使用実績を蓄積してきている。今後、「もんじゅ」における炉心集合体規模での照射実績の蓄積などが期待されている。



第 6 図 実機燃料ピン中央部の断面金相写真(全体)および被覆管断面部金相写真(エッチング処理後)<sup>9)</sup>

## 2. 高速炉の実用化へ向けて

我が国では、2025年頃までの実証炉と関連サイクル施設の実現に続く2050年以前の商業ベースの導入を目指した「高速増殖炉サイクル実用化研究開発：FaCTプロジェクト」を進めている<sup>10)</sup>。高速炉構造材料として、SUS 316のJISの範囲内で、炭素量と窒素量を最適化し、高温強度を高めたオーステナイト系ステンレス鋼の「316 FR 鋼」の採用を計画している。

一方、燃料被覆管、ラップ管等の炉心材料には、原型炉段階に比較して実証炉段階では、飛躍的に高い照射量に耐えることが要求されるため、耐スエリング性に優れた体心立方構造のフェライト系鋼の適用を検討している。

一般に、フェライト系鋼は、オーステナイト系鋼よりも高温強度に劣るため、オーステナイト系鋼と比肩する高温強度特性を付与するためにナノメートルサイズの酸化粒子を添加した酸化物分散強化型フェライト鋼（ODS 鋼：Oxide Dispersion Strengthened）の開発を進め、これまでに被覆管の製造を達成し、「常陽」等を用いた材料照射試験やロシアのBOR-60を用いた燃料ピン照射試験を実施して照射特性データの取得および照射特性評価を行っている。しかしながら、ODS 鋼の製造には粉末冶金法を用いており、実用化に向けては量産技術のさらなる開発が必要である。

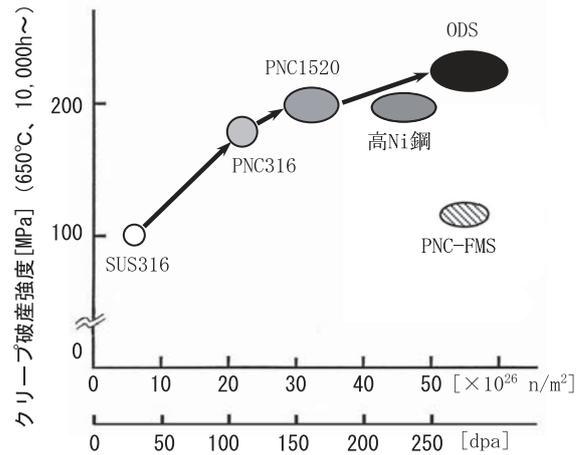
ODS 鋼という革新的な材料開発とともに、オーステナイト系ステンレス鋼のさらなる改良によって高い信頼性や高燃焼度化を追求することは、被覆管材料開発の選択肢を増やす観点から重要といえる。既にPNC 316鋼をベースに耐スエリング性を向上するNi等を増量した15Cr-20Ni鋼（通称、PNC 1520）は「常陽」MK-Ⅲの全炉心に燃料集合体として使用している。また、さらにNi量を増量した高Ni鋼の開発を進めている（第7図）。

高速炉用材料開発に不可欠な照射データ取得までには、準備（許認可、試料調達等）、照射、照射後試験等、非常に長期間を要する。材料開発は、必要な試験期間の長さや開発リスクを考慮しつつ常に複数の選択肢を用意しながら、安全確保を大前提に効率的かつ着実に進めていくことが肝要である。

本稿の執筆にあたって、ご協力とご助言をいただいた次世代原子力システム研究開発部門燃料材料開発 Gr と燃料材料試験部の各位、北海道大学名誉教授高橋平七郎先生に謝意を表す。

### — 参考資料 —

- 1) 立石嘉徳, 他, “高速炉炉心材料用改良 SUS 316 ステンレス鋼の開発”, 日本原子力学会誌, 30(11), 1005 (1988).



上段：高速中性子照射量，下段：はじき出し損傷量

第7図 各開発鋼の目標強度（クリープ強度と照射量）の模式図

- 2) 鹿倉栄, 他, “高速炉炉心材料用改良オーステナイト鋼の開発”, 日本原子力学会誌, 36(5), 441(1994).
- 3) Jin Sik Cheon, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **392**, 324-330 (2009).
- 4) 藤原優行, 他, *FAPIG*, 第109号, (1985).
- 5) S. Ukai, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **278**, 320-327(2000).
- 6) T. Uwaba, S. Ukai, *Nucl. Eng. Des.*, **234**, 51-59(2004).
- 7) I. Shibahara, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **212-215**, 487-491 (1994).
- 8) S. Yamashita, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, (2011), doi:10.1016/j.jnucmat.2010.12.187.
- 9) 加藤優子, 他, JAEA-Research 2007-019, (2007).
- 10) 次世代原子力システム研究開発部門, 他, JAEA-Evaluation-2009-003, (2009).

### 著者紹介



井上利彦(いのうえ・としひこ)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野)高速炉炉心材料開発・評価



山県一郎(やまがた・いちろう)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野)高速炉炉心材料開発・評価



浅賀健男(あさが・たけお)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野)高速炉燃料材料開発・評価

# BWR クラッド問題の解決と 水化学対策への貢献

日本原子力発電(株) 目黒 芳紀

我が国最初の商用 BWR 発電所として、敦賀発電所 1 号機(以後、敦賀 1 号)は昭和44年に試運転を開始したが、当初より 1 次冷却系の腐食に起因する放射線量率の上昇、燃料健全性への影響等の、いわゆるクラッド問題が発生し、この対策に全力をあげて取り組むこととなった。1 次冷却系材料の腐食を抑制すること、原子炉内へのクラッド持込みを抑制すること等、水化学面からの改善対策を実施した。その結果、昭和50年代半ばにはクラッドの発生は大幅に減少し、BWR クラッド問題解決の技術的基盤を構築することができた。敦賀 1 号で得られた水化学改善の成果は、その後の BWR 発電所の運営に反映され、今日の水化学技術の礎となった。

## I. 運転当初の水化学管理の意識と改善の必要性

敦賀 1 号は我が国初めの実用軽水炉であり、水質管理(現在は、冷却材である軽水とプラントシステムとの相互作用を扱う工学として「水化学」と称している)も最初の適用となることから、まず GE の水質管理マニュアルをベースに JPDR 等の経験を活用することとした。当時の水化学の基本は燃料の健全性確保と放射性物質のふるまいに対する管理に重点が置かれており、BWR 発電所を水・蒸気サイクルのボイラ技術としてとらえ、水化学を最適化するとの意識は希薄だった。また、BWR の運用経験も日が浅く、米国の先行炉の知見も少なかったことから、運転開始後に発生した技術的問題の予見、それらへの備えも十分とはいえなかった。

BWR の場合、1 次冷却系の系統圧力が  $70 \text{ kg/cm}^2$  と低く、火力発電の低中圧ボイラの基準での運用が念頭にあり、当時の最新ボイラである貫流ボイラ(主蒸気の蒸気含有率が高いボイラ)が採用し始めていたきめ細かな水質管理レベルを適用するという概念が構築されていなかった。さらに BWR の特徴として、貫流ボイラのように化学薬品を用いた防錆対策が適用できないことから、中性純水処理を用いた運用を行うことを基本としていたが、そのために必要な BWR 固有の水化学技術が確立しておらず、現在適用されているような水質管理対策が取られていなかった。その結果、昭和44年の試運転開始直後から 1 次冷却系で多量のクラッド( $0.45 \mu\text{m}$  のミリボ

ワーフィルタで捕集された鉄を主成分とする腐食生成物：巻末「註」参照)が発生し、その対策に追われることとなった。さらには復水脱塩器、原子炉および燃料プール浄化系フィルタの目詰まりによる廃棄物処理系の負荷の増大、給・復水系統の配管減肉等を招き、敦賀 1 号は運転開始初期から発電所運用上大きな支障が生じた。

## II. クラッド発生低減・放射線量率低減

### 1. クラッド問題の発生

(1) 敦賀 1 号でまず経験したのは昭和44年の試運転開始直後から発生した燃料破損問題である。これに対し、後述のように、燃料製造法の改善、運転手法の見直し、それに水化学対策としてのクラッド低減などを総合的に取り組み、昭和50年過ぎから燃料破損は漸次減少した。次いで、燃料破損対策が収束し始めた昭和40年代後半から新たな問題として、復水系・給水系におけるクラッドの多量発生に伴う、いわゆるクラッド問題が表面化した。特に昭和50年以降、1 次冷却系を構成する構造材の応力腐食割れ(SCC)問題が生じ、原子炉周辺機器、配管の補修対策が必要になり、これに伴う従業員の被曝線量が増大し、これを抑制するため被曝低減対策が喫緊の課題となった。

従事者の総被曝線量は作業場の線量率と作業人数と滞在時間で決まることから、放射線の遮蔽、作業方法の短時間化等の対策を施したが、結局は根本となる場の線量率の低減が必須となった。

(2) 1 次冷却系の線量率を構成する主要放射性物質は、Co-60、Mn-54、Fe-59、Co-58などの放射性腐食生成物である。これらの親元素である、コバルト、鉄、ニッケルなどの腐食生成物が給水系から原子炉内に持ち込まれ、燃料被覆管に付着し、中性子照射を受け放射化

*Solution of Plant Operating Problems caused by Crud Generation and Contribution to Water Chemistry Improvement* : Yoshinori MEGURO.

(2011年 5月11日 受理)

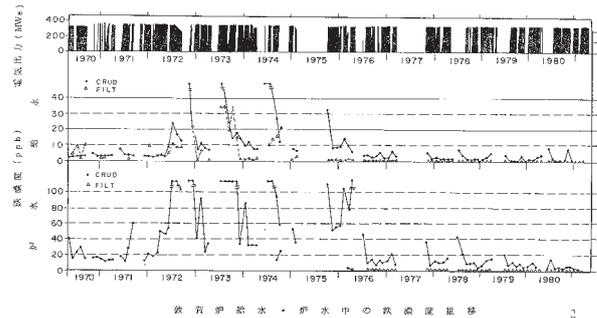
され、燃料表面から脱離したCo-60などが配管などの1次系構成機器に付着し、作業場の放射線量率を上昇させる。このメカニズムを定量的に把握し、主な線源であるCo-60などの蓄積を抑制するために、社内に「クラッド対策委員会(昭和50~56年)」を設置し、本店、敦賀1号、東海第二建設所の関係者により具体的対策の検討を開始した。

一方、BWRの設計・建設者であるGEが中心になり、「Water Chemistry Program(WCP:1973~1976)」がスタートした。BWRの初期時代のモンティセロ、ナインマイルポイント、オスカーシャム、グンドロミンゲンA、敦賀1号等を対象とし、発電所の実態に即した具体的対策を検討した。この検討にはGEのほか、同じ課題を抱えるスウェーデンのアセアトム、西ドイツのKWU等のBWRメーカーも参加したが、当社は唯一、電力会社として発電所運営経験を有する立場から参加し、BWR水化学問題の調査・検討に大きな刺激を与えた。この会議の特徴は水化学関係者だけではなく、機械、電気、燃料、材料、廃棄物等広範囲な技術者もそれぞれの役割を踏まえ参加し、プラントシステムとしての観点から、水化学の改善検討がなされたことである。その後EPRIが主催する「BWR Radiation Assessment and Control(1976~1980)」に引き継がれたが、常に相互の運転経験を持ち寄り、好事例を謙虚に学び合い、自ら所有するプラントの課題解決に反映した。これがその後の「水化学」工学の原点となった。

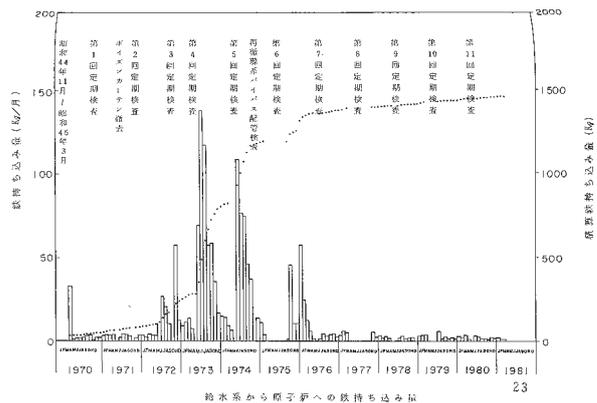
## 2. クラッドによる影響の把握

敦賀1号では、クラッドの発生源、運転状況と発生メカニズム等を正確に把握するため、系統ごとの状況を把握するため採取箇所を増加、配管内の流速による影響を排除し粒子状クラッドを正しく採取するため配管内挿入型プローブの採用、物質収支を精度よく評価するためイオン交換紙等を用いた連続通水型採取装置の設置、極微量コバルト測定のためチタン材を用いる等、サンプリング系の改良を他のBWRに先駆けて実施した。昭和40年代後半から昭和50年代前半にかけて、給水系から持ち込まれる金属不純物の発生源、年間を通した復水系、給水系からの移動量、水質と腐食の関係、復水浄化系の性能、1次冷却系における放射線量率の経年変化、構成する主要放射性核種の同定などをきめ細かく調査した。その結果、以下の事項がわかった。

(1) 試運転開始当初から昭和50年頃までに、給水中の鉄は約30 ppbに達し、年間約300~400 kg(昭和48, 49年の2年間には1,000 kg)の鉄が原子炉に持ち込まれた。原子炉浄化系での除去は年間100 kg以下、燃料表面に付着し燃料交換とともに炉外に搬出されるのが100 kg、したがって100~200 kgの鉄が炉内に蓄積(燃料表面に付着)した。このうち、昭和47, 48年には起動後の



第1図 敦賀炉給水・炉水中の鉄濃度の推移



第2図 給水系から原子炉への鉄持ち込み量

1ヶ月以内に炉内に約200 kgが持ち込まれた。このことは、給復水系で年間数百 kgに相当する配管減肉が生じていたことに相当する。給水、原子炉水中のクラッド濃度の変化を第1図に、給水から原子炉へのクラッド持込量の変化を第2図に示す。

(2) 燃料表面で放射化されたCo-60, Mn-54, Fe-59等の放射性腐食生成物が燃料から脱離し1次冷却系配管に付着し、再循環配管の放射線量率は、運転開始当初EFPY 3.5(Effective Full Power Year:実効運転年5年に相当)で、100 mR(1 mSv)/h/EFPYの割合で上昇し、第3図で示すように最高300 mR(3 mSv)/hに達した。

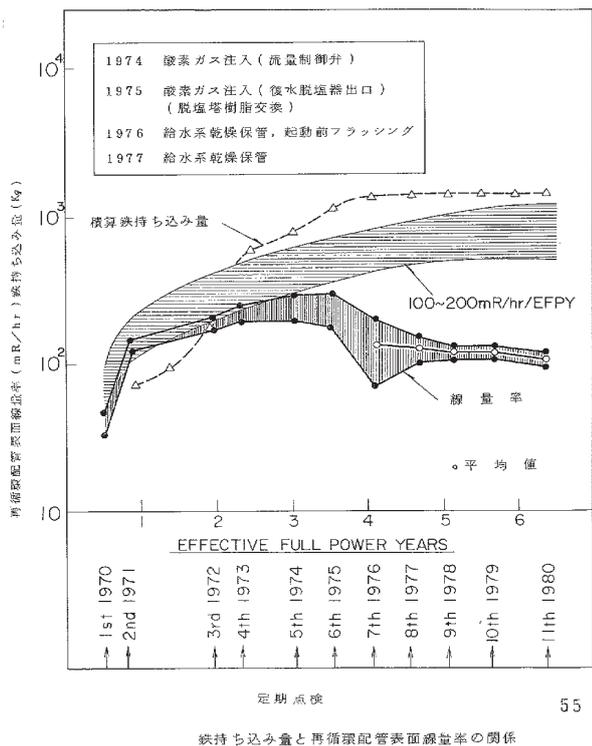
放射線量率上昇の主要放射性核種は上記3核種が90%を占めており、この親元素であるコバルト、鉄の発生低減と原子炉への持込抑制が必須であることが判明した。

(3) 従業員の被曝(総)線量も昭和48, 49年度には6.3~9.2人・Sv/年(630~920人・レム/年)に達した。

(4) クラッドの大量発生により浄化系の負荷が増大し、復水脱塩器、原子炉浄化系、燃料プール浄化系、廃棄物処理系フィルタの目詰まりが早くなり、フィルタスラッジの発生量が年間50 m<sup>3</sup>にも達した。

## 3. クラッド発生源と発生機構の究明

いずれもクラッドの大量の発生に起因する問題であり、クラッドの1次冷却系統における発生、移行、放射化、蓄積等の挙動を徹底して調査した。この結果、以下の事象が判明した。



第3図 鉄持ち込み量と再循環配管線量率の関係

(1) 定検等長期停止後の起動時に多量にクラッドが原子炉に持ち込まれることが判明し、停止時の防錆対策、系統保管が重要であること

(2) 原子炉起動後は、水質(水の純度、溶存酸素濃度など)が適正に保たれていないと、運転中を通して多量の金属不純物の持込が継続されること

(3) 原子炉起動後(運転中)のクラッドの主な発生源は、抽気系・ヒータードレン系等の二相流系、および復水系、給水系であり、

① 二相流系は、炭素鋼配管内表面に十分な保護皮膜が形成されない状態で、流体の流れによる侵食(エロージョン・コロージョン：現在の流動加速腐食 Flow Accelerated Corrosion : FAC)を受けていること

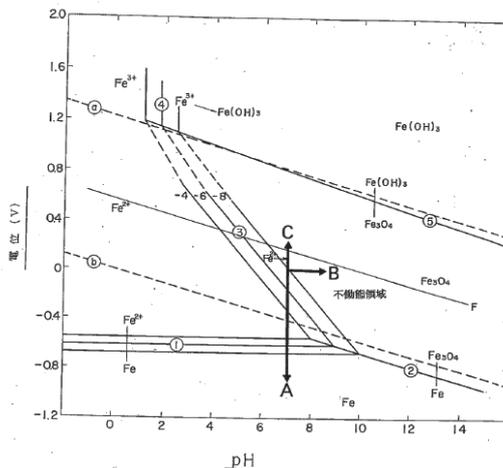
② 復水、給水系配管は、タービンの効率向上のためコンデンサの脱気能力が高く設定されているため、復水中の溶存酸素が7 ppb 以下となり、中性純水環境下で炭素鋼(鉄)の腐食電位(-0.3 V SHE@200℃以上)が第4図のAのようになり、不動態化に必要な領域(第4図のC)に維持できないこと

4. クラッド発生低減対策

当社は、これらの事象に対して以下のクラッド発生低減対策を講じることとした。

(1) 停止時の1次冷却系の防錆対策

(1) 配管、給水ヒータ等を開放点検する場合、水抜き後に系統内面を湿潤状態に放置することが最も錆を発生させていたと判断し、停止時に系統がまだ暖かく蒸発潜



第4図 鉄の不動態化電位に及ぼす pHの影響 (鉄-水系の Pourbaix 線図(25℃))

熱が存在する間に、短時間内に系統水を液体廃棄物処理系にドレンし、配管、機器表面を乾燥させ、発錆を抑制した。(東海発電所(GCR)の運転開始当時、熱交換器(SRU)の健全性維持が重要な課題であった。SRUへ不純物の持込を抑制するため、停止時に2次系(蒸気ドラムを含む)における発錆防止対策として効果があった乾燥保管の経験を活用した。)

(2) 短期間の停止時等で満水保管する場合には、保有水を静止状態におかず、可能な限り浄化系を通しながら循環させることとした。これは清浄水(中性純水)を使い、配管、機器表面に適正濃度の酸素を供給し、運転中と同じ状態に保つことを狙いとした。

- a) 起動前には、復水器、ヒータの水室等クラッドの蓄積しやすい場所の清掃の実施。昭和50年代初期には清掃により、約30l(100 kg 以上)のクラッドを除去した。
- b) 復水系、給水系を復水脱塩装置を使用し再循環させ、停止中に発生したクラッドをフラッシングしたあと系統に回収する等きめ細かい運用法を採用した。

(2) 原子炉起動後(通常運転時)の対策

(1) 復水脱塩器のクラッド除去性能を向上させるため、5塔中4塔運転(原設計は3塔運転)に変更し通水線流速を120 m/h から90 m/h に下げ、樹脂との接触時間を長くすると共に通水時の樹脂の不安定流動を抑制しクラッド吸着性を良くした。また昭和50年には機械的強度が劣化したイオン交換樹脂をゲル型の強度のある新樹脂に交換し、劣化による水質低下を防止した。この際に陽/陰イオン交換樹脂比を1.7/1にし、クラッド吸着性の高い陽イオン樹脂の割合を多くした。再生方法を改善し、再生時に陽/陰イオン交換樹脂を完全に分離し、再生薬品による逆汚染を防止した。

敦賀1号の復水脱塩器は、以後のBWRに比べ設計に余裕がありこの特徴を生かし、Cl, Na 等腐食を促進する不純物を排除し、復水、給水の電気伝導度0.06 μS/cm 程度(純水と同じレベル)に維持しつつ、クラッド

除去率を90%以上に向上させた。BWR 発電所で復水脱塩器単独でこの水質を達成したのは敦賀1号が始めてである。

(2) 配管表面の保護皮膜(ヘマタイト  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )を強固につけるため腐食電位を適正(0~0.1 V SHE@200°C)に維持するため復水系に酸素を注入することとした。昭和50年に復水ポンプサクション側のノズルから酸素ガスを手作りのラインを使い注入し、第4図のCの不動態領域(第4図のBはPWRの2次系などpHコントロールで防錆する例)に腐食電位を維持することが、中性純水状況下で腐食抑制に極めて即効性があることを昭和49年に確認し、昭和50年に注入系を恒久化した。

(3) 敦賀発電所1号機の原子炉浄化系の容量は、給水流量の約6.7%と他のBWRに比べ3倍以上大きい。この利点を活用し、原子炉水の浄化に努めた。

### (3) 適正材料への変更

(1) 抽気、ヒータードレン系等の二相流系で発生するエロージョン・コロージョン低減対策(現在の配管減肉対策)として昭和50年代から漸次、炭素鋼配管を低合金鋼等に交換した。

(2) 放射線量率上昇の主核種はCo-60であり、この親元素であるコバルトの炉内持込を抑制するため、コバルトを50%以上含有しているステライト材の代替材(コロモノイ材等)の採用、ステンレス鋼配管取替え時に低コバルト材を選択した。

## 5. クラッド低減の効果と評価

上記対策の結果、

(1) 昭和50年頃から原子炉への金属不純物は漸次減少し、復水浄化系に復水フィルタを持たない(復水脱塩器だけの)プラントとしては、第1図のように、給水系の鉄濃度は数ppbと従前の1/50以下と大幅に低減した。クラッドの炉内持込み量も300~400 kg/年から、第2図で示したように、10~40 kg/年と減少し、以降、今日まで低く管理されている。

(2) 当時、貫流ボイラ等循環比が低く、蒸気含有率が高いボイラでは酸素濃度を低くし、揮発性アルカリ薬品(AVT)で高pHに維持するのが汽水ボイラの腐食防止には最善の策と考えていた時代であった。酸素を復水系に注入することにより溶存酸素で配管の保護皮膜を形成する水化学は、これには逆行する技術であり、関係者の抵抗は大きかった。配管内表面で溶出率の小さい強固なヘマタイトを形成するのが最も重要と考え、前述の「WCP」等で得た欧米BWRの知見などを基に、中性純水環境下における酸素による適正腐食電位の維持の必要性について関係者の理解を得ることは簡単ではなかった。

(3) 溶存酸素濃度を定める際にも、当時、問題となりかけていた原子炉構成材料の応力腐食(SCC)への影響も

考慮し、給水系で20~60 ppb以下とした。これは原子炉水には放射線分解により溶存酸素が常時約200 ppb存在することから、これに影響を与えない範囲とした。

(4) 鉄を含めコバルト、ニッケルなどの金属不純物の原子炉内への持込みが減少するのに伴い、燃料表面の付着物も減少、原子炉水中のCo-60とMn-54濃度はともに数Bq/g( $10^{-4}$   $\mu\text{Ci/g}$ )レベルとそれまでの1/20以下に、上昇傾向にあった1次系機器、配管の放射線量率も3 mSv/h(300 mR/h)から1 mSv/h(100 mR/h)以下に減少した。主には鉄の原子炉内持込み減少によりFe-54から中性子反応によって生じるMn-54の生成が減少、さらに、このMn-54の半減期が312日と短いことから減衰による効果も重畳されたためと考えている。

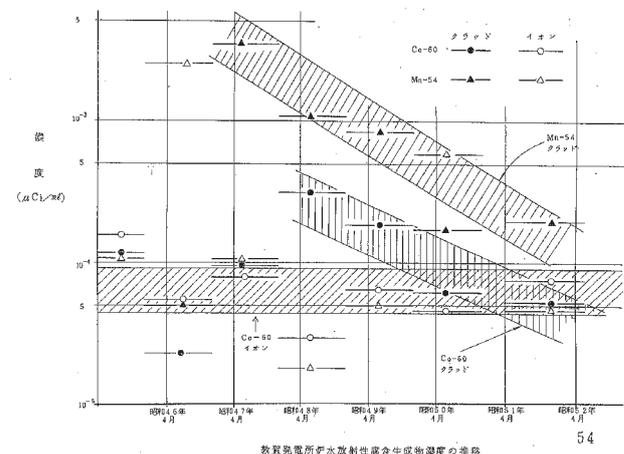
また、コバルトおよびニッケルは給水でそれぞれ1 ppt, 50 pptと鉄の30 ppbに比べ質量としては極めて少ないが、原子炉内で一定の割合で鉄とフェライト化合物( $\text{CoOFeO}_2$ )を形成し、鉄の挙動の影響を受ける。

鉄が多い時には燃料表面からの脱離により配管などの放射線量率を上昇させていたが、主成分の鉄が減少したことにより燃料表面に付着したままで、冷却材中に脱離しにくくなり放射線量率の上昇につながらなくなったのではないかと評価している。

上記対策の結果、上昇した原子炉水中のCo-60, Mn-54濃度は第5図のように1/10以下に、放射線量率も第3図のように1/3以下に減少させることに成功した。一度上昇した放射線量率を化学除洗等を行わず、前述のように大幅に低減したのは敦賀1号のほか例を見ない。

(5) 従事者の被曝線量も昭和52年度の約20人・Sv(2,012人・レム)をピークとし、漸次減少し平成元年以降2~3人・Sv/年になっている。被曝線量は前述のように、補修工事の内容によって影響を受けることから評価が難しいが、作業場の放射線量率を低減できたことが被曝線量の低下に大きく貢献していると考えられる。

(6) さらに、クラッド低減の副次的効果として、復水脱塩器、原子炉浄化系フィルタ、燃料プール浄化系フィ



第5図 敦賀発電所炉水放射性腐食生成物濃度の推移

ルタの目詰まりが少なくなり、逆洗頻度が低減し、フィルタスラッジの発生量も年間 $2.4 \text{ m}^3$ と従来の1/20以下になった。また、原子炉建屋内の放射性腐食生成物による汚染が減り、放射線管理区域の縮小、管理レベルを下げるができるようになり、保守作業時の従業員の負担、被曝管理の負担も軽減した。建屋内の汚染レベルも低減し、洗濯廃液系からの環境放出放射能も従来の1/2以下である。昭和53年度には $0.74 \text{ GBq/年}$  ( $20 \text{ mCi/年}$ )以下になった。(註：以降、環境放出量は漸次低減し、平成8年度以降はND(検出限界以下)となっている)

### Ⅲ. 燃料被覆管の健全性維持に関連した取り組み

昭和44年に燃料が装荷され試運転に入ったが、その直後から炉水のI-131が数十 $\text{Bq/g}$  ( $10^{-3} \mu\text{Ci/g}$ )レベルに、オフガスのXe-135も上昇し、停止時のI-131の追加放出も昭和45年には約 $63 \text{ TBq}$  ( $1,700 \text{ Ci}$ )に達し、燃料の破損が疑われた。

燃料の健全性を確保するために、当時、燃料の製造(ペレット形状・加工の改善、ジルカロイ被覆管の水素化防止)、運転手法の改善(ならし運転の採用)、前述のクラッド低減対策等あらゆる面から改善対策を実施し、昭和50年代初めからは燃料破損は減少し、昭和57年以降、破損は検出されなくなった。以下に燃料破損/健全性確保に関連して当社が他のBWRに先駆けて取り組んだ技術を紹介する。

(1) 当時、燃料表面を観察すると多量のクラッドが付着しており、ジルカロイ-2管特有の銀白色が見えず、鉄の酸化物色(赤褐色)になっていた。運転中に被覆管に給水系から原子炉水中に持ち込まれたクラッドが過度に燃料表面に付着した場合、被覆管の熱伝達を阻害すること、その結果、付着物の下部でジルカロイ被覆管の腐食が進み、こぶ状の厚い酸化皮膜を形成し、被覆管を腐食損傷(ノジュラ腐食)させる可能性があることから、水化学の観点から、給水系からのクラッドの原子炉持込み量低減は重要な課題であった。

当社は、前述のクラッド発生抑制等水化学面からの改善を行い、原子炉内へのクラッド持込み量を最も多い時期の数十分の一以下( $40 \text{ kg/年}$ 以下)に低減し、燃料表面をクリーンに保つようにした。

敦賀1号では、初めて国産化したジルカロイ-2被覆管の実証試験を昭和47年から昭和53年にかけて実施した。この時期はちょうどクラッドの原子炉内持込みが多い時期に相当しており、被覆管に及ぼす影響が危惧されたが、6年間実照射した後の照射後試験(PIE)において、ノジュラ腐食の徴候は一部確認されたが、被覆管損傷に影響を与える範囲ではないことが判明し、昭和50年以降、効果が出始めた水化学面の改善が燃料健全性維持に寄与していることを実証することができた。

(2) 運転当初、燃料破損がどのような原因によって生じるのかよくわからなかった。水化学の面からの原因追求として、当時行われたのは、炉水、オフガス系から採取したXe-135等の核分裂生成物を半導体検出器で放射化学的に核種の存在比、減衰割合などから分析・評価し、運転中において(PIEをする前に)燃料被覆管からの漏洩(破損)の形態(拡散、反跳、平衡モデル)、大きさなどの評価を行い、運転継続の可能性の判断に用いた。

また、破損燃料の検査技術として従来1バンドルごとに SHIPPING を行っていたのを改良し4バンドル同時に試料を採取できるシッパーキャップに改良し、作業効率を上げることができるようになった。この技術は今日も活用されている。

(3) 核分裂性放射性廃棄物を環境に放出させないように、GEの設計では、オフガス系に圧力減衰タンクを設置し、コンプレッサで放射性希ガスを押し込み一定時間保留し、短半減期のXe-135、Kr-97を減衰した後、環境に放出する設計になっていた。しかし、コンプレッサのダイヤフラムが破損し、頻繁に交換を余儀なくされたこと、さらに、この方法では、大気に対して正圧であり、建屋内へ希ガスが漏洩し、従事者の放射線管理に支障をきたしたことから、当時ドイツのグンドロミンゲン発電所で採用されていた活性炭希ガスホールドアップ装置を導入した。ガスクロマトグラフィーの原理を使用した装置で、燃料破損の程度と環境放出量とを評価し、装置の減衰効果(1/100)を設定し、それを担保できる活性炭(白鷺炭)を選定し、活性炭の希ガス吸着係数(動的吸着係数 $K=1,200$ )を試験により求め、長期的に性能を維持するための湿分管理(露点温度換算 $5^\circ\text{C}$ )条件を決めた。また、建屋内汚染を生じないようにシステムをブロウの吸引による負圧運転方式とし、これによりコンプレッサによるトラブルも解消した。

当時、ふげん発電所で本方式の仕様を検討しており、関係機関の了解の下この基礎データを用い基本設計は当社が直接行った。この基本概念はその後のすべてのBWRに反映されている。

(4) 敦賀1号で運転開始初期に破損燃料が生じたのは残念なことであったが、当社は従事者および周辺公衆の放射線管理の観点から、破損燃料が生じた昭和50年頃にかけて、燃料からのXe-135、Kr-85等の希ガス、I-131およびCs-137、Sr-90等の核分裂生成物の放出量、気体・液体廃棄物処理系での処理量、原子炉・タービン建屋への漏洩量(ドレンサンプの液体廃棄物から気相への移行状況)等を測定し、どのような経路をたどり、どの程度環境に放出されるのか、定量的に評価した。

当時、米国では、原子力発電所の通常運転時に環境に放出される放射性物質による周辺公衆の被曝線量を低く保つための努力目標値(線量目標値)の設定が既になされており、我が国でもその適用の検討が開始されていた。

この目標線量設定に際して、当時 BWR の場合、破損した燃料から放出された核分裂性放射性物質がオフガス系に移行し30分経過後(30分減衰換算値)で37 GBq/s(1 Ci/s)の放出を評価の前提としていたが、希ガスホールドアップ装置等での減衰・除去効果、および原子炉建屋など換気系・スタックを通して環境に排出される放射性物質の量を定量的に評価できるようにしておくことが必要であった。敦賀1号の調査は、線量目標値の検討のタイミングに合わせ実施され、核分裂放射性物質の発電所建屋内の挙動等について詳細に把握した。

この時の貴重なデータが、原子力委員会の「発電用軽水型原子炉施設の線量目標値に関する指針(周辺環境への影響を年間0.05 mSv(当時 5 mRem)以下に抑える、いわゆる ALAP の指針)：昭和50年5月」策定に際し、燃料破損が生じた場合においても線量目標値以下に管理されることを立証し、上記指針策定に寄与することができた。

#### IV. おわりに

敦賀1号の当初の化学担当者は、運転開始1年前の昭和44年1月に敦賀建設所に着任した。GE, JPDR, 東海発電所, 火力発電所等における研修・経験を有する社員と電力、メーカーからの出向者で構成されていたが、当時、クラッド問題を予測できる関係者は少なかった。また、欧米を見渡しても BWR 水化学の先人は、一部 GE の技術者を除いてほとんどいなかった。

必要性に迫られ、当社は当時の貫流ボイラ、東海発電所(GCR)2次系等における水質管理の知見を下に、独自に前述のアイデアを実施に移し、BWR の特徴である

中性純水環境下における水化学の礎を築いた。

一たん、1次系配管等の放射線量率が上昇した発電所で、化学除洗などを行わず、給水中の金属不純物濃度を1/20以下、配管線量率を1/3以下に下げたプラントは敦賀1号のほかに例を見ない。また、これらのクラッド低減対策は、燃料被覆管の表面のノジュラ腐食を抑制し燃料健全性を維持する上でも貢献できた。

これらの敦賀1号の成果は、欧米を含めその後の BWR 発電所の水化学技術の基盤構築に寄与できたものとする。

〔註〕 クラッド(CRUD)について

- ・「Inter Press Dictionary of Science and Engineering」によれば、Chalk River Unidentified Deposit の頭文字の略、カナダの原子力研究所「チョークリバー」で未確認物質の処理をする際につけられたのが語源とされる。
- ・現在では、「JIS 62095」および「ISO 266」に「原子炉一時冷却回路内の腐食と質量移行によって、燃料などに付着する腐食生成物」と定義されている。
- ・その他、小学館の「Random House」、研究社「新英和大辞典」等に、不純物、原子炉内の残留物、残渣などの記載がある。

#### 著者紹介

目黒芳紀(めぐろ・よしのり)  
日本原子力発電株  
(専門分野)水化学, 放射性廃棄物処理



## 解説

# 産官学による原子力人材育成ネットワークの設立 原子力界を支える人材の確保をめざして

日本原子力研究開発機構 村上 博幸

今後の我が国の原子力界を支えていく人材の確保をめざして、国内の産官学の連携・協力による「原子力人材育成ネットワーク」が設立された。各関係機関の情報共有、相互協力を進めるほか、原子力基礎教育、海外で通用する国際人材の育成、新規導入国に対する人材育成支援、実務段階の技術継承等の様々な分野で、オールジャパンによる原子力人材育成活動を推進する。

## I. はじめに

エネルギーの安定供給、地球温暖化防止等の世界的課題において、非化石エネルギーの重要性は高まる一方である。原子力はその最も重要な柱の一つであり、我が国においても今後の原子力界を支えていく人材の確保が重要な課題となっている。このような原子力分野における人材育成の必要性が広く認識されるようになって久しいが、近年、世界的にますますその重要性が高くなってきている。

産官学の関係者により平成21年度末まで2年半にわたって開催された原子力人材育成関係者協議会の最終報告書<sup>1)</sup>の提言に基づき、国(内閣府、文部科学省、経済産業省および外務省)が提唱した原子力人材育成に係る相互協力体制としての枠組みが、平成22年11月19日に設立された「原子力人材育成ネットワーク」である。このネットワークでは、国内の原子力関係機関の情報共有、相互協力を促進するとともに、機関横断的な活動・事業を推進することにより、我が国における原子力人材育成をより効果的かつ効率的に遂行することを目指している。本稿では、その概要および活動の現状について紹介する。

## II. 原子力人材育成ネットワークの概要

### 1. 原子力人材育成ネットワークとは？

原子力産業の健全かつ安定的な継続・発展のためには、長期にわたり技術者、技能者、研究者、規制担当者など幅広い人材の確保が必要である。このため、産業界、大学等の教育機関、研究機関および国など、すべての関係機関において原子力エネルギー基盤および今後の原子力産業を支える人材の育成に積極的に取り組む必要があ

る。

我が国においてこのような「原子力人材育成」を推進していくにあたっては、個々の関連機関や機関間の連携による取組みはもとより、産官学のあらゆる原子力人材育成関係機関の相互協力により国全体で一体となった原子力人材育成体制を構築することがきわめて重要であるとの認識のもと、関係機関の合意に基づいて設立されたのが「原子力人材育成ネットワーク」(以下、ネットワーク)である。

このネットワークでは、参加機関および既存の原子力人材育成関連事業間の情報共有、相互協力を促進するとともに、ネットワークを通じて我が国の関係機関が一体となった各種の原子力人材育成活動・事業等の実施を推進する。これにより、今後の我が国の原子力界を支える人材の確保を図るとともに、すでに原子力界にある若い研究者、技術者については、国際的視野を持ち、世界で活躍できる高い資質を有する人材としての大成を目指す。さらに、国際原子力機関(IAEA)等と連携し国際的な協力の枠組み作りも進めながら、海外の新規原子力導入国における人材育成の支援にも積極的に取り組むこととしている。ネットワークの基本概念を第1図に示す。

ネットワーク参加機関は、国内外での原子力人材育成活動に関係する国内の企業、機関、団体およびそれらの内部組織(個人での参加は認めていない)であり、平成22年度末現在、国内59の関係機関(国(4府省)、大学、高専、電力、メーカー、研究機関、関連法人等)が参加している。ネットワークへの参加は、参加登録申請書に連絡担当者等の必要事項を記入して提出する。

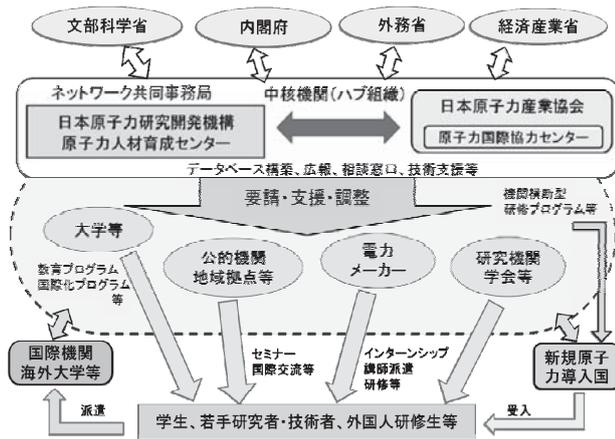
### 2. ネットワークの活動

ネットワークにおける活動の基本方針は以下の通りである。

- (1) 各機関で実施されている既存の人材育成活動を尊

*Establishment of Japan Nuclear Human Resource Development Network* : Hiroyuki MURAKAMI

(2011年 5月9日 受理)



第1図 原子力人材育成ネットワークの基本概念

重しつつ、関係機関相互の連携強化を図る。

- (2) 原子力人材育成関係者協議会による提言<sup>1)</sup>(10項目)の具現化を活動の基本とし、そのうち、緊急性および実現性の高いものから順次実施していく。
- (3) ネットワークのハブ機能(事務局)の充実を図る。ネットワークでは、これらの基本方針を基に、当面、次の5項目の個別テーマごとに、具体的な活動の企画・検討・実施を推進することとしている。

#### ① 高等教育段階の人材育成

- ・大学、高専などにおける原子力基礎教育の充実強化拡大とネットワーク化
- ・教育機関横断的活動(セミナー開催など)の推進

#### ② 国内人材の国際化

- ・国際機関、国際ネットワークとの相互交流推進
- ・若手技術者等のコミュニケーション能力の向上に係る事業の推進

#### ③ 新規導入国に対する人材育成支援

- ・我が国の原子力人材育成活動の可視化
- ・既存の支援活動、IAEA などによる国際活動との連携

#### ④ 初等・中等教育段階の人材育成

- ・エネルギー環境教育の推進
- ・理系・工学系への進学者を増やす取組み

#### ⑤ 実務段階の人材育成と技術継承

- ・技術継承の確実化
- ・形式知と暗黙知の維持、継承方法の検討

### 3. ネットワークの運営体制

ネットワークは、いわば参加機関同士の緩い集合体であり、ネットワークの活動の取りまとめについてはネットワーク事務局が担当している。事務局は、日本原子力研究開発機構(JAEA)の原子力人材育成センター、(社)日本原子力産業協会(JAIF)および(財)原子力国際協力センター(JICC)が共同で運営しており、ネットワークの最上位会議体である「ネットワーク運営委員会」、ネットワーク全体の実際の活動を企画・推進する「企画ワー

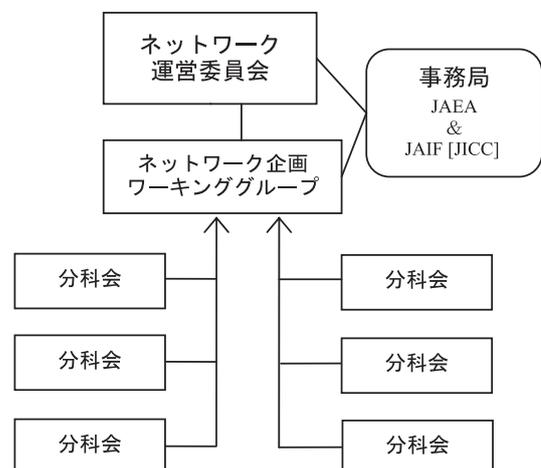
キンググループ」の開催事務を担当している。ネットワークの組織としては、このほかに、個別のテーマごとの活動を検討する「分科会」が設置され、具体的な機関横断的な活動の計画を策定する。現在は、前項で述べた5つの個別テーマのうちの2テーマに係る分科会が設置され、現状分析や具体的な活動内容の検討が実施されている。各分科会で検討・計画された活動内容は、ネットワーク企画ワーキンググループで承認され実施される。運営委員会は、ネットワークの総合的な活動方針や運営に係る方向性の検討を行うことになっている。ネットワークの運営体制を第2図に示す。

ネットワークの活動において、事務局の占める役割は大きい。既述の会合の事務局のほか、参加機関等に対する窓口機能を果たすとともに、国内外関係機関における原子力人材育成に係る情報収集活動や人材育成情報データベースの構築など、独自の機関横断的な人材育成活動も行っている。特に人材育成情報データベースでは、将来的には非参加機関をも含めて外部からアクセス可能なシステム作りを目指しており、原子力人材育成のコアな情報源となることを目指している。

また、先に述べた原子力人材育成関係者協議会による提言では、原子力人材育成を戦力的に進めるための強力なハブ組織(中核的恒常機関)の設立を目指すとしており、将来的には、現在のような共同事務局に替わりこの中核的恒常機関がネットワークの運営の中核となることが期待されている。

### Ⅲ. ネットワーク(活動)の目指すところ

すでに述べたように、ネットワークの活動は、産官学の原子力人材育成関係機関が相互に協力し、我が国全体で一体となった原子力育成体制(プラットフォーム)を構築することにより、各種の原子力人材育成事業・活動等を効率的かつ効果的に推進し、今後の我が国の原子力界を支える人材の確保や国際的視野を持った高い資質を有する人材の育成など、種々の目標の達成を図ることを目的



第2図 原子力人材育成ネットワークの運営体制

としている。各機関は、それぞれの人材育成活動を推進しつつ、ネットワークに参加することにより、より広範囲でかつ充実した育成プログラムを構築することができる。例えば、事務局による窓口機能により、目的にあった講師の紹介や他の機関の実習施設の紹介が受けられることなどが期待される。また、大学同士の連携により、複数の大学による遠隔講義や共同セミナーなどの企画が進められている。

また、新規導入国に対する支援においては、従来、大学や研究機関、企業など各機関がそれぞれ独自に実施して来ており、相手国からは我が国による協力体制が一体化しているとは見えない状況にあった。これらについて今後、一連のネットワークの活動の中で位置づける(特に相手国からの問合せや要望の窓口をネットワーク事務局において一本化する)ことにより、より効率的な人材育成支援活動を進めることができるようになる。

これらは、ネットワーク活動において期待される成果の例であるが、各機関単独では困難な面も多かったこともあり、機関連携協力の拡大への期待は大きい。

#### IV. 動き出した活動

各参加機関による実際の原子力人材育成活動も進められている。平成19年度から文部科学省と経済産業省により進められている原子力人材育成プログラムや平成22年度より文部科学省が開始した原子力人材育成に係る公募補助金事業においては、大学や高専、研究機関、企業などが新たな機関横断的な人材育成活動実施のための資金を確保してそれぞれ活動に取り組んでいる。これらの活動は、本ネットワークにおける活動として位置づけられており、今後連携の輪が広がることが期待される。

ネットワーク活動が開始されてまだ間もないが、すでに設置された2つの分科会(高等教育分科会および国内人材の国際化分科会)においては、いくつかの取組みが計画されている。高等教育分科会では、高専・大学による原子力基礎教育プログラムの充実やEラーニングの促進などが検討されている。また、国内人材の国際化分科会においては、IAEAなどの国際機関との連携協力活動の推進や若い原子力関係者を対象とした国際コース(マネジメントスクール)などの検討が進められている。また、分科会はまだ設置されていないが、新規導入国を対象とした支援活動として、いくつかのプログラム(相手国に講師を派遣して行う現地研修や留学生を対象としたバイリンガル講義など)が大学を中心に計画されている。

#### V. 今後の課題

平成23年3月11日に発生した東日本大震災とその後の福島第1原子力発電所の事故は、世界の原子力界に大きな衝撃を与えた。特に福島第一原子力発電所の事故は、

本稿を執筆している時点(同年4月末)でまだ収束の見通しが立っていない状況で、今後の原子力産業の先行きは不透明になっているともいえる。しかしながら、我が国には50基を超える発電炉、世界には430基を超える発電炉が存在しており、放射線施設や研究施設などを含めると莫大な数の原子力関連施設が存在している。今後も長期にわたりこれらの施設の安全な稼働、維持管理、廃止に至るまで、多くの技術者、研究者、規制担当者等が必要となることはいうまでもない。したがって、本ネットワークの活動は今後もいささかも中断させることなく継続して実施していくことが求められている。ただし、今後の活動においては、当面の活動テーマとして現在挙げている5項目のほかに、「安全」をより推進するための人材(例えば、安全分野の技術者と研究者、安全文化の確立を目指すための人材、リスクコミュニケーションを担当する人材など)の育成をターゲットとする分科会の設置なども検討していく必要があるかも知れない。

一方、ネットワークの活動をさらに発展させていくためには、参加機関の情報共有や外部機関への情報提供機能の充実がきわめて重要であり、事務局を中心にした情報発信活動のさらなる拡大強化が望まれている。現在、ネットワークの事務局を務めている原子力機構において、文部科学省の公募補助金事業によりネットワーク広報活動(例えばホームページの充実など)を進めているが、さらにこのような活動を恒常的なものとしていくためには、すでに述べたように、ネットワークにおいて強力なハブ機能を有する中核的恒常機関の早い時期の設立が望まれる。

#### VI. おわりに

放射線関係の技術者を含めた原子力分野の人材の育成は、現在から将来にわたって必要不可欠な活動であり、本ネットワークがその先導的役割を果たすことが期待されている。ただ、このような連携協力活動は事務局組織だけの努力では充実発展は望めない。原子力に関係するあらゆる機関のネットワークへの参加と各参加機関のネットワーク活動・事業への積極的な協力と寄与に期待したい。

#### —参考資料—

- 1) 原子力人材育成関係者協議会報告書—ネットワーク化、ハブ化、国際化—平成22年4月、(2010)。

#### 著者紹介



村上博幸(むらかみ・ひろゆき)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)保健物理分野の人材育成

# ATOMOS Special

東欧編

世界の原子力事情 第16回

## ブルガリアーベレネ原子力発電所を建設中

京都大学 杉本 純

ブルガリアはバルカン半島に位置し、北はルーマニア、西はセルビア、マケドニア、南はギリシャ、トルコと接し、東は黒海に面している。人口は約750万人で、そのうち、首都ソフィアの人口は約140万人、面積は本州の約半分である。1989年に他の東欧諸国とともに民主化・市場経済化を開始し、2007年1月にEUに加盟している。ブルガリアは、エネルギー資源に恵まれず、天然ガス、石油も他の東欧諸国同様、ロシアからの輸入に頼っている。エネルギー消費量の急激な伸びに合わせて、発電設備が集中的に開発されたが、国内である程度賄える石炭と原子力が電源開発の中心となってきた。

原子力発電開発では、旧ソ連の協力を得て、70年代からルーマニアとの国境近くのドナウ川沿いに位置するコズロドイ原子力発電所の建設が始まった。旧ソ連型PWR(VVER)44万kW級4基(1～4号機)は、74年から82年に掛けて営業運転を開始し、同100万kW級2基(5,6号機)は、88年および93年にそれぞれ営業運転を開始した(第1～3図参照)。しかし、度重なる事故のため、西側諸国から安全性が疑問視されてきたことから、ブルガリア政府は、ウィーンに本部がある国際原子力機関(IAEA)等の調査団を次々と受け入れ、その勧告に基づいて安全性向上対策を実施した。ところが、98年から始まったブルガリアのEU加盟交渉の結果、早期閉鎖を求める声の高かった1～4号機のうち、1,2号機の運転を2002年末に停止することとなった。3,4号機は、



第2図 同原子力発電所のタービン ©Kozloduy NPP



第3図 同原子力発電所インフォメーションセンター ©Kozloduy NPP



第1図 コズロドイ原子力発電所 ©Kozloduy NPP

*Bulgaria — Belene Nuclear Power Plant under construction* : Jun SUGIMOTO.

(2011年 7月22日 受理)

IAEAからは安全性については問題がないとの評価を得たものの、EU加盟文書には1～4号機を停止すると記載されているため、EU加盟直前の2006年末に運転を停止した。しかし、この2基については、運転再開に関する例外規定が同文書に設けられていることから、運転再開が可能な状態が現在も保たれている。

一方、旧ソ連製の第3世代炉である5,6号機は、安全基準をEU並みに引き上げる監視プログラム等の拡充を実施済みである。現在ブルガリアで稼働している原子炉は、5,6号機の2基だけであるが、同国の総発電量に占める原子力の割合は約33%で世界11位であり、我が国の約29%、世界第13位を上回っている(2010年)。また、2008年から2010年の稼働率の平均値は約87%と我が国の約63%より高く、欧州の原子力発電実施18ヶ国中第10位の比較的高い水準にある。



第4図 建設中のベレネ原子力発電所 ©Belene NPP

停止した3,4号機は、同国電力設備容量の約1割に相当し、早急な代替電源の導入を迫られた。そのため、ブルガリア政府は2004年5月、コズロドイ発電所の東約40 km、ドナウ川沿いに位置するベレネ原子力発電所の建設工事の再開を決定した。ベレネ発電所では旧ソ連製100万 kW 級2基の建設を86年、87年にそれぞれ開始したが、地元の反対や経済不振による資金難、地震の危険性が高いとの理由で、91年に一たんは建設を中止していた。当初、建設の再開が決定された同発電所の1号機は2011年、2号機は2013年に営業運転開始を予定していたが、建設に参加するロシアとドイツのメーカーのうち、ドイツが2009年末に撤退したことから、建設完了が危ぶまれていた。ところが2010年7月になり、ロシアとブルガリアの両政府は、ベレネ発電所建設完了に合意した。この発電所が完成すれば、ロシアがEU内で建設する最初のものとなる(第4図参照)。

昨年の8月頃、IAEAに勤務する日本人職員から、同僚のソフィア出身のブルガリア人女性をメールで紹介してもらい、彼女の個人的な意見として、多くのブルガリア人は原子力に対してポジティブであり、コズロドイ発電所は安全と信じていることを聞いた(第5図参照)。1～4号機の運転停止を余儀なくされた時は、国民的な抗議の声が上がったという。また、ベレネ発電所のような



第5図 ソフィア市内の風景 ©Rashkova@IAEA

新しい原子炉の建設に対しても、国民の多くは概して支持しており、原子力により国の独立性が高まり、電気料金も安くなり、適切に運転されている限り、原子力発電は安全で信頼でき、大きな懸念はないと思っているとのことだった。

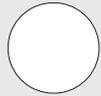
本年7月に入り本稿執筆のため、福島事故発生後のブルガリアの原子力事情について聞いてみた。事故を受けて、他のEU諸国と同様、運転中のコズロドイ5,6号機の実験テストを年内をめどに実施するとともに、ベレネ発電所についても追加費用と安全性の問題からロシアとの調整が難航している。ただ、6月5日にブルガリアで実施された世論調査によれば、国民の64%がベレネ発電所の建設を完成させるべきとの意見を表明し、建設反対の意見は26%、また、福島事故によってベレネ発電所建設計画に対する自分の意見を変えないと信じている人は43%とのことである。この結果から、一般公衆は、福島事故後も総じて原子力に対して好意的であることがわかる。ブルガリアというとヨーグルトくらいしか思い付かない筆者であるが、原子力への理解が国民レベルで進んでいることに改めて感嘆した。

参考：World Nuclear Association Web.

#### 著者紹介

杉本 純(すぎもと・じゅん)

本誌, 53〔8〕, p.589(2011)参照.



## 談話室

### 「原子力がひらく世紀」改訂3版の編集を終えて

「原子力教育・研究」特別専門委員会 編集幹事 熊谷 明<sup>1)</sup>

まさに驚天動地の出来事とはこのことである。大地震発生と東北地方の太平洋岸を襲った大津波、それが端緒となった福島第一原子力発電所の未曾有の事故。この小さな出版物制作の最終段階で、今回の大惨事が、あたかも悪魔が用意していたシナリオであり、それに本書の完成が飲み込まれたかのように展開した。本稿を書くに際し、日記を書いているような気持ちにさせられる。

最終段階では、学会「春の年会」で披露すべく、3月9日に編集委員、執筆委員へ最終稿をホームページ上で開示確認、10日に印刷工程へ委託、後は完成を待つだけと予定どおりに進んでいた。11日は年会期間中に関係者の打ち上げ会でもと考へ、インターネットで福井市内の適当な所を探していた。ちょうどそのとき事務所が激しく揺れ、あのような大災厄が襲ってきて……。

本書は、平成6～7年度の会長であった内藤奎爾先生が「学会活動の中に、原子力の平和利用のため、会員である研究者・技術者がどのように携わっているかを社会へ平易に伝える活動も手がけよう」と言われ、その一環として「原子力教育・研究」特別専門委員会が学校教師向け副読本制作を活動の一つとして取り上げたのが発端である。初版<sup>1)</sup>を平成10年3月、改訂2版<sup>2)</sup>を全国高等学校長協会の推薦を得て16年3月に刊行してきた。初版から積算して約2万部を世に出すことができた。原子力関係の本は売れないという定説を覆し、多くの読者を獲得することができたのであった。

平成19年ころから2版の改訂要望が高まってきた。改訂となるともっともな動機が必要である。改訂には明るい話題を盛り込みたいが見当たらなかった。そこで“もんじゅ”が再起動する見込みが立ったら、さらには再処理施設の運転の兆しが見えたらということにし延ばしてきた。

21年に入り、もんじゅ再開の情報が現れ始めた。本特別専門委員会では、他に毎年、小・中・高校の教科書の記述を調査し、誤りや誤解を招きそうな記述を指摘し文部科学省当局に提言するとともに教科書会社にも報告書を提示している。この報告書の中で、エネルギー・環境・原子力教育の記述には新しいデータに基づいた記述が望ましいと主張している。そう主張するからには、教師用

の副読本である本書のデータが古いのではまずいという事情もあった。

以上のような状況から、22年春の年会において改訂3版に着手することが検討され実行されることとなった。編集委員は上記特別専門委員会のメンバーが自主的に参加した。執筆協力者はメンバーの自薦他薦により構成した。

改訂の柱は、本書初版刊行時のコンセプトである「読者(国民一般)に原子力専門家として知らしめるのではなく、読者が知りたい事柄に丁寧に答える」という基本を踏襲し、今日的に古くなった事項・数値を更新し、2版以後に起こった出来事を追加するということにした。そして明るい話題・材料をできるだけ採り上げることとした。

2版の改訂では改訂事項を抽出・列挙する会合から始めたが、3版では古くなっていると思われる事項を筆者が抽出し、編集委員、執筆者に具申し、それ以降は執筆者の意向で改訂した。これは2版編集のころと違い、会合なしでもPC通信で必要事項が伝達しあえるようになったからである。執筆者には本書発刊の主旨と改訂の目標を示し初稿を提出していただくこととなった。改訂の進行は専用のホームページを設け、関係者がパスワードをもって随時閲覧できるようにし、1月下旬に3稿の段階で会合を持ち不備を直した。以下に紙面の制約で詳しく触れないが、各章の変更・強調の概要を記す。

1章は核分裂の発見から発電炉の誕生までを書いているが、ここはほとんど変更がない。最後に、わが国の原子力発電所の現状と原子炉プラントメーカーの再編に少し触れた。

2章は地球温暖化対策の目標の解釈を科学的に解明されていないこともあるとして書き改めた。COP15において鳩山首相が述べた「全ての主要国が参加する公平かつ実効的な枠組みづくり」の合意をCOP17での議論へ引き継いだことを記した。持続可能な発展を支える原子力の位置づけも書き改めた。

3章の新エネルギーでは、本文中の数値を更新した。

4章の放射線影響については、ICRPによる2007年報告に準じて直した。チェルノブイリ事故の影響についてもIAEAから2版以後に出された報告書に基づき書き

<sup>1)</sup>(財)日本原子力文化振興財団

替えた。放射線防護体系の近年の発展的考え方も紹介した。

5章では各方面の放射線利用例の実績を表す数値等を更新した。工業、農業利用を更新した。医療分野の利用はがんの診断と治療について2版より詳しく記述した。

6章では美浜発電所の2次側配管破損蒸気漏れ事故と福島第一3号機、志賀1号機の制御棒引き抜け事故、阪神大震災後の耐震の考え方、さらに新潟県中越沖地震を経験してどう変わったかを補充した。安全性研究の流れと新しい設計例への応用、メンテナンスの手法の改善などを加えた。新たに高経年化への対応も加えた。

7章の核燃料とリサイクルは、初版でも2版でも意見が寄せられる章であった。学会会員、読者がそれほど本章の内容について様々な見方・考え方があることを示している。国によっても進み方が異なっている。本書ではわが国の進み方を柱に置きつつそうでない考え方も併せて紹介した。もんじゅが運転再開されたことが本書改訂着手の最大の原動力であった。しかし初稿が入稿されないうちに炉内中継装置落下事故が起き、加えて六ヶ所村の再処理施設も操業延期となり、一時収めどころを見失いそうになったが、それでも執筆者の努力により高速炉技術の将来と高速炉時代に向けての燃料リサイクルを展望することで収めた。

8章の低レベル廃棄物については、廃炉に伴う使用済みの制御棒や炉心構造物の一部、再処理施設やMOX燃料加工施設から発生する浅地中コンクリートピットへの処分には適さないものに対する方法も紹介した。高レベル廃棄物の処理処分については旧版を継承した。そして世界の地層処分計画の進展状況を紹介するに止めた。

9章は近年の原子力ルネッサンスの潮流を受けた各国の原子力利用の現状を更新した。わが国の原子力科学関係の大学教育の状況と併せ米国、中国、韓国の大学教育も紹介した。世界の原子炉プラントメーカーの再編をわが国のメーカーとの関わりとともに紹介した。原子力学会の諸活動と原子力発電導入をめざす諸外国に対する協力の現状も新しくした。

10章は将来を展望する章であるが、現在、世界に普及している炉型に取捨選択されていった経緯を再考し、今後の新しい炉型まで展望した。4S炉、TWR、CANDLE炉など旬の話題も盛り込んだ。この中で高速炉の将来像を再び展望した。量子ビーム科学、放射線計測分野、核化学の応用、核医学、核融合などの進展も書き直した。原子力利用と社会との関わりでは、原子力事故に伴う風

評被害の事例と対処の実績について新たに加えた。最後に、初学者(読者)に原子力科学方面への誘いでまとめとした。

本書の構成には様々な意見がある。重要な事項に応じてページ数を配分すべき、類似事項が前後して書かれている等々である。原子力関係者が重要と思うことと読者が知りたいと思うことは必ずしも同じではない場合がある。何を知れば一般市民が安全・安心ととらえるかも原子炉プラント、放射線利用、廃棄物処理処分それぞれの項目で異なる。そのことから上のような意見にそぐわなくても、本書の最初のコンセプトである読者が知りたいことに丁寧に答えるという主旨を継承しようと努めた。本書のように原子力利用全域にわたる編集は、一つの事象が起これば複数の章にわたって記述の調整が生じ、整合を取るのに煩雑な作業になる。今回もそうであったが、とにかく完成まで漕ぎ着けることができた。工藤和彦編集委員長の監督の下、編集委員の一致団結と執筆その他ご意見等を寄せてくださった皆様のご協力のお陰と、心より感謝申し上げます。

改訂の目標は、前版で成し得なかった平易な読本にすることであった。ところが平易にというより詳しくの方に傾いてしまい、今回も初版の仁科浩二郎編集委員長の目標である、寝そべて読んでもわかる本とはならなかった。原稿の難しい部分を削除するのが一番辛い作業であると言い訳しつつ、担当の力量不足を恥じる次第です。2版に続き村野京一氏は、筆者の求めに応じ何度もレイアウトを直してくれた。大野フミヨ氏は、専門的内容を読者が親しめるようなイラストに描いてくださった。彼女がイラストを描けない原稿は、一般読者には難しいという目安にもなった。お二人のご協力に感謝します。

残念ながら本書は、福島の事故により完成当日から内容が社会の現実と大きな食い違いを含むものとなった。本書の読者対象を一般人としているからには事故の真相・顛末を書き足すだけでは済まない。原子力と社会との関わり、特に安全・安心とは何かを再考しなければならない。原子力利用に大きな見直しが待ち構えているであろうことを考えると、学会活動と一般市民を結ぶ本書の役割はさらに重要となろう。(2011年4月20日記)

#### —参考文献—

- 1) 日本原子力学会誌, 「談話室」, 40〔3〕, 52~54(1998).
- 2) 日本原子力学会誌, 「談話室」, 46〔5〕, 60~61(2004).

# 談話室

## 飯館村訪問記—みんなで作っぺ!

東京工業大学 澤田 哲生

### 早寝、早起き、朝ご飯!

村に入って最初に目に飛び込んできた……

「早寝、早起き、朝ご飯 いいたてっ子は元気です!」という大きな看板一元気な子供の顔が道路脇で山盛りごはんを食べる。

「ホー、ホケッキョ!」とその看板の後方の里山でうぐいすが鳴く。実にのどかな風景である。そしてどこか私の故郷の風景に似ている。ここは緩やかな盆地状の土地である。福島県飯館村。5月の大型連休。水仙が、シバザクラが、チューリップが咲き誇り、駒桜、山桜、染井吉野、木蓮などが里山にいっせいに咲き乱れる。まるで桃源郷のようである。しかし、村はどこかひっそりしていて、人の気配が弱々しい。計画的避難命令が出る前から、この村のことがとても気になっていた。

3月30日。3月中旬以降、飯館村に独自に入ったIAEAの検査官の調査報告と、日本政府の見解が食い違った。IAEAの検査官は、飯館村で採集した土壌を検査し放射能のベクレル数がIAEAの避難勧告値を超えていると知った。これに基づいてIAEAは、飯館村からの住民の避難を検討するように政府に対して勧告していた。当時、政府の発表は避難勧告値を下回っており、避難の必要はないとされた。政府とIAEAの食い違いは住民にとっては大きな不安材料だった。菅野典雄村長は「政府を信じています!」とテレビ画面で自信に満ちた顔で言い切っていた。しかし、その後の経緯は皆さんよくご存知の通りである。飯館村がどのようなところなのか、村人はどうしているのか。私はとても気掛かりになった。

### 福島県飯館村に向かう

5月×日朝。簡易式放射線量計を手に、青森まで全線開通した東北新幹線に単独乗った。東京駅の空間線量は0.10マイクロシーベルト/時間。約1時間半後、郡山に停車。新幹線内で計る。線量はやや高い。0.28マイクロシーベルト/時間(以下では単位を省略)。13時18分福島駅着。車内0.29、車外0.36。改札手前の構内で立ち食いそば屋に立ち寄る。メニューをよく見ると『ラジウムそば』とある。なんだろうと思って選



ラジウムそば

ぶ。でてきたそばをみて、店のお姉さんに「どこがラジウムなの?ラジウムの粉でもはいつてるの」と聞くと、にっこりと微笑んでややはかみながら「いえまあ、この温泉卵がねえ……」。なるほど温泉卵からラジウムかな。なかなかのネーミングだ。

駅前ロータリー0.56。レンタカーを借りる。「お客さん、瓦礫の方へいきますう?パンクしやすいので気をつけてくださいね」車を駆って、県庁をすぎる。線量計は0.61をさした。約30分。コスギンの町というモニュメントが目飛び込んできた(0.47)。川俣町である。ここも福島第一原発から30km圏外でありながら、結構、線量が高いといわれている。林に囲まれた緩やかな丘陵地を起耕したばかりの畑で作業をする農夫が数人いる。山桜が美しい。

山桜たがやす畠に土香る

運転再開。114号線から399号線に入って(0.45)、339から12号線に移行する(0.41)。12号線、通称富岡街道である。車がひっきりなしに行き交う。「災害派遣」のプレートをかかげた自衛隊のオリーブ色の車両がだんだん増えてくる。

### 飯館村に入る

約10分、ゆるやかな峠が見えてきた。峠の頂上には水鏡妙見神社がある(0.74)。すぐさま、「飯館牛」の看板が目に入って来た。飯館村が、阿武隈が誇る銘柄牛だ。東北一どころか日本一の呼び声も高い。道路の両側には、まったくのどかな風景が広がる(1.07)。あちこちでうぐいすが鳴いている。

飯館のうぐいす渡る田んぼかな

水芭蕉の群生地がある。やがて高台にある小学校が見えてきた(3.45)。山肌に凜と建つ白亜色の校舎である。私は吸い寄せられるように校舎脇に車を停めて、校庭を覗いた。人影はまったくない。近くの田畑はしんと静まり返っている。校庭を見下ろす高台に登る(5.42)。徐々に高い値を示してきた。校庭にも校舎内にも人影一つない。谷をわたる優しい風が私の



校庭表面の線量

頬をなぞっていく。高台から校庭へと足を運んだ。校庭を端から端までゆっくり歩いた。すこしザラついた砂が混じるようなグラウンドである。ついこの間まで児童たちが勢いよく遊んでいたに違いない。ちょうど中央あたりで立ち止まって、線量計を地面に直づけしてみた……数値が安定するまでしばらく待つ。この谷間の村は阿武隈山の南部の麓にあり、豊かな農産物を産してきた。いろんな花々が本当に至るところに咲き誇っている。

数値が安定した……7.24であった。

校庭の隅には、自家菜園があった。もう種まきの季節だが、耕された気配はない。昨年のもと思われるトウモロコシの株がたくさん転がっていた。小学校を後にして、村の中心部へ向かう。飯館牛のミートプラザを目指した。

16時半ミートプラザについた。飯館牛の直販所だ。しかし、残念なことに、ここも臨時休業であった。そこで、隣のコープを覗いてみることにした。店内は品物が普通にあり、買い物客も10人くらいいる。まず最初の野菜コーナーで、かき菜が目に入ってきた。群馬産である。事故後、放射性ヨウ素が検出と、最初に騒がれたかき菜だ。そして、魚コーナーをへて、肉コーナーに回ってきた。おう、あるある飯館牛。しかも加工されたばかりの品だ。すき焼き用の特上霜降り肉!!コープを出て、右折すれば2kmで村役場である。

16時半 飯館村役場に到着。線量は3.25である。役場前の芝生に『地の力—あぶくま神』という御影石の彫刻がある。この辺りでは良質の御影石がとれるようである。芝生の上に線量計を置いた。



タジンすき焼き

5.83を表示した。ちょうどそのとき「夕焼け小焼けで日が暮れて?……」のチャイムが村に響き渡った。村役場の玄関は、人の出入りが結構見える。日が陰ってきたので、先を急ぐ。やがて石ボロ坂トンネルが見えてきた(2.04)。八木沢峠の真ん中あたりで車を停めた(1.51)。山あいには新緑でもえるようだ。

夕暮れてあさぎに萌ゆる八木の沢

### 南相馬、がれき、立ち入り禁止

翌朝9時に福島駅を再スタート。南相馬、そしてがれき地帯を目指す。11時八木沢峠1.58。峠を越えて、街が近づいてくるに従って、戸外の人影が増えてきた。南相馬市役所0.48。南相馬警察署0.34。あの勇壮な野馬追いの街である。野馬追祭場の看板が目に入ってきた。そして海岸地帯に近づいていく気配を感じる。やがてがれきの山が、そのむこうに太平洋が見えてきた。自衛隊や機動隊の車がなおいっそう増えてきた。山口、神戸、鳥取、

愛知……さまざまな地域の機動隊である。車は国道6号線にはいった。6号線を浪江方向に下って、聖下を通過する(0.27)。そこから約1km。『立ち入り禁止』の点滅板と数人の警察らしき人影がみえる。検問である。検問には、自衛隊、機動隊、警察の車両がひっきりなしに行き交っている。この検問所で0.46である。福島駅からの距離は75kmだった。

帰路、再度飯館村のミートプラザ横のスーパーで飯館牛の霜降りヒレステーキ肉、そしてかき菜を購入。その日帰宅後、夕食は飯館牛と川俣ネギでお手軽すき焼きをつくった。タジンなべに並べて焼くだけである。付け合せに飯館で購入した群馬産のかき菜のおひたしを添えた。すき焼き肉はとっとうまいと子供達に好評であった。かき菜もぺろりと平らげた。美味しい食卓は、笑顔で盛り上がった。阿武隈の里飯館村ありがとう!しかし、私の脳裏にはもう一つの笑顔が気になって仕方なかった。飯館村で見た、大きな看板の『みんなで作っぺ!』の少年少女の大きく口を開けた笑い顔だ。この子供



『みんなで作っぺ!!』

達の未来が私の息子娘の将来とダブった。

飯館村で目についたもう一つの標語は、『美しい村を未来へ?花いっぱい運動?』である。信じていたはずの政権の長が、いとも簡単にあっさりと計画的避難を指定した。そんなことでいいのか。政権内での意思決定システムはいったいどのように機能しているのか。実態は機能不全丸出しである。そして、飯館村の誇り、飯館牛は移動を制限され、全頭処分目前だという。放射性物質はウイルスと違い、牛から牛へはうつらない。しかも私が購入した飯館牛のヒレ肉に検出器を密着させても、0.08マイクロシーベルト/時しか示さない。なんの問題もないのである。飯館牛は移動させて種を保存するべきなのである。“みんなで作っぺ!”を一刻も早く取り戻さないといけない。そのために、科学技術を駆使して最大限の努力をし成果を収めなければならない。それが科学技術立国日本のだれもが取り組むチャレンジなのである。

いま、日本人の叡智と胆力が問われている。

(2011年5月8日記)