

FOCUS 東日本大震災

解説

1 リスク学から見た福島原発事故

社会心理学やリスク学から見ると、今回の事故からは、さまざまな問題が浮かび上がる。原子力の専門家のコミュニティでは、外部とのエネルギー代謝が断絶していなかっただろうか。国家レベルのリスク・マネジメントは機能していただろうか。 **木下富雄**

9 福島原発で起きた原子炉建屋の損傷—なぜ水素爆発が起きたのか

原子炉建屋の爆発を引き起こした水素はどのようにして発生し、どのようにして建屋に流れたのか。 **内藤正則**

15 福島第一原発事故の大気を介した環境影響—環境影響の全体像把握に向けた第一歩

事故による放射性物質の環境影響については現地測定が精力的に進められているが、影響の全体像については公的な説明がまだにない。ここでは大気を介した環境影響の全体像について概観する。 **山澤弘実, 平尾茂一**

20 緊急時環境モニタリングの考え方—原子力安全委員会指針から

環境放射線のモニタリングは地味な仕事である。けれども今回の事故では、モニタリングデータとそれに基づいた対策が重要となっている。緊急時環境モニタリングの考え方や運用について述べる。 **下 道國**

報告

25 福島第一事故後の諸外国の原子力開発政策

福島第一原子力発電所での事故後、原子力開発をめぐる世界各国の対応は分かれた。何が、その対応を分けたのか。 **村上朋子**



津波に襲われる福島第一原子力発電所(3月11日)と非常災害対策室で行われている全体会議のもよう(5月25日、ともに東京電力提供)

NEWS

27 IAEA が福島事故で調査報告

ジャーナリストの視点

62 もうひとつの原発震災—すべての被災者に目を

東日本大震災では約2万4,000人の方が犠牲になった。この重大な事実が、連日の原発事故報道の陰に隠れがちになっている。 **斎藤義浩**

表紙の絵 「ラウンジのあるハーバー」 製作者 祖父江 郁夫

【製作者より】 初夏、伊勢志摩のヨットハーバーはまだ時折うとうとうしい梅雨もあるが、すでに木々も夏の装いを済ませ、ハーバーの海原にはさんさんと日差しが降り注ぎ白く輝き、時間だけがゆっくり流れて行く。林の中のラウンジでは、スキッパー達の訪れを待っている。そんな風景に魅かれ作品にしました。

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)

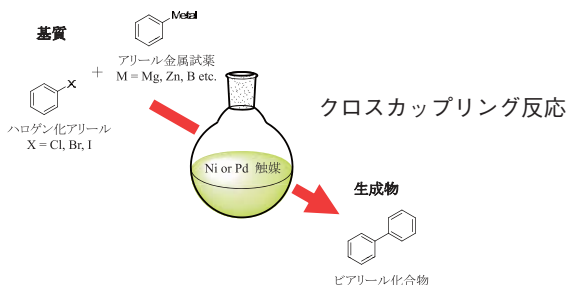
巻頭言

28 文明の先を見据える 長谷川眞理子

解説 みんなでわかってシリーズ

35 クロスカップリング入門 —基本的な考え方と応用

鈴木 章, 根岸英一氏らがクロスカップリングでノーベル賞を受賞した。クロスカップリングとは何か。最近の研究にはどんなものがあるのか。 秋山勝宏



解説 「匠」たちの足跡 第7回

39 原子力第一船の燃料・炉心国産技術の確立

原子力船「むつ」は、外洋を8万キロにも渡って原子動力で全速航海し、貴重なデータを後世に残した。

浜崎 学,
堀元俊明,
嶋田昭一郎,
石丸正之



「むつ」への原子炉容器吊り込みの様子

原子力外交シリーズ(5)その1

50 2010年 NPT 運用検討会議と今後の課題

武藤義哉

報告

45 世界原子力大学へ行こう!

世界原子力協会等が原子力分野における国際的な次世代リーダーの育成と国際教育を目的として開催している世界原子力大学の夏季研修に参加した。

大釜和也, 荻野晴之, 佐藤隆彦, 鈴木彩子

29 NEWS

- 20キロ圏内を「警戒区域」に
- 文科省, 積算線量推定マップを作成
- 原賠審査会, 損害範囲の判定で1次指針
- 損害賠償支払いに「機構」設立
- 中部電力の浜岡発電所が全号機停止へ
- 事故調, エネ政策の見直しも検討
- 1号機は滞留水利用し循環冷却へ
- 世界で436基が運転中, 原産まとめ
- 海外ニュース

ATOMOS Special

世界の原子力事情(14) 東欧編

53 チェコ—隣国オーストリアとの対話

杉本 純

談話室

55 用語「原子力」はガラパゴス 田上 嵩

会議報告

57 第3回革新的原子力エネルギーシステム国際シンポジウム

赤塚 洋, 加藤之貴

58 原子力発電技術の進歩に関する国際会議

藤井澄夫

49 From Editors

68 新刊紹介

「確率論的リスク解析の数理と方法」 吉田智朗

「放射性廃棄物の工学」 松浦祥次郎

63 会報 原子力関係会議案内, 主催・共催行事, 人事公募, 新入会一覧, 英文論文誌 (Vol.48, No. 7) 目次, 主要会務, 編集後記, 編集関係者一覧

WEB アンケート

4, 5月号のアンケート結果をお知らせします。(p. 60)

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

学会誌ホームページはこちら

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

リスク学から見た福島原発事故

(財)国際高等研究所 木下 富雄

私は社会心理学の研究者である。原子力の世界とは長い付き合いがあるが、その中味は所詮外野席からの聞きかじりであって、専門知識は乏しい。したがって以下の意見は、原子力の専門家からすれば的外れのことも多いだろう。それを覚悟しながら、社会心理学、ないしリスク学の立場から見た今回の事故の問題点を述べることにしたい。

I. 世界が眺めている原発事故

東日本大震災による福島原発事故は、世界に大きな衝撃を与えた。日本の原発に対する信頼が高かっただけにその反作用も強い。この衝撃は、市民レベルでは主として放射線へのパニック、それに基づく風評被害、反原発を掲げる諸団体の躍進、さらには科学・技術一般への懐疑といった形で現れることになる。

しかし、より深刻なのは世界の原子力産業への影響、それを基点としたエネルギー需給の逼迫、それが世界経済に与える影響といった、国家レベルにおける衝撃であろう。その対応を誤れば、世界はエネルギー・セキュリティを巡る大混乱、さらには日本の国力低下による、世界秩序のバランス喪失へ突入する可能性があるからである。

そして世界の主要国は、このような資源的・経済的な観点だけではなく、核戦争処理の実地シミュレーション、核テロへの対応、非常時における軍の展開力や所持する特殊機器の見極め、市民の危機事態への反応、政府の総合的なリスク・マネジメント能力といった見地からも、今回の事故を真剣な目で見守っている。非常時においてこそ、その国の形や潜在能力がよく見えてくるからである。

暖かい援助の手をさしのべてくれている世界各国の背後には、このような冷徹な国家の論理が存在する。だが国家のセキュリティという、地震や原発問題を越えた高度のリスク・マネジメントを、日本では誰が担当しているのだろうか。そもそも日本政府はその能力を持っているのだろうか。

II. 原発事故の日本へのインパクト

原子力に対する世論は確実に厳しくなるだろう。新規

の原発建設が困難になるだけでなく、将来に向けて廃炉を求める声が出てくるかも知れない。これまでの原発に対する世論は、「原発は危険だが、有用なので存続に賛成」というのが多数意見であったが⁷⁾、そのリスク・ベネフィットのトレードオフ関係にも影響が出てくる可能性がある。ただ直近の世論調査を見ると、「原発を推進する立場の人+現状維持を主張する立場の人」の割合は56%であった⁸⁾。2007年の調査に比して10%低下しているが、その値は予想されたほど大きくはないようである。事故がこのまま終息すれば、世論は「原発は危険な上に、無用なので存続に反対」というまでには至らないかも知れない。ただ世論は移ろいやすいものであるから、今後の事態の推移によってさらなる変化はありうる。

いずれにしても、国家政策としてのエネルギー・セキュリティ問題は、今後、世論を二分する大きな議論を巻き起こす可能性が高い。現行のエネルギー基本計画見直しの声も上がるだろうし、いわゆる原子力カルネッサスも、当分は遠のいたといえよう。さしあたっては軽水炉の後に予定されている、FBRのナトリウム冷却系破損時の安全性について、改めて再点検を求められるに違いない。

ただ原子力政策を含めたエネルギー・セキュリティ問題は、今や日本というローカルな視点だけではなく、世界戦略というグローバルな観点から論じる必要のあることだけは忘れてならないと思う。ことに避けるべきは、一時の感情的興奮に乗せられた議論、政治的思惑に彩られた議論である。

最後に私が一番気になるのは、原子力研究者・技術者の中に、意気消沈、自信喪失されている方が少なくないことである。これは今までの自信過多の裏返しかも知れないが、国民からすればこれは困ると言わざるを得ない。今回の事故の反省は必要だとしても、既存原発の保全や安全な原発の開発には、やはりこれらの方の知見が欠かせないからである。

The Disaster by the Fukushima Nuclear Power Plants and the Risk Science: Tomio KINOSHITA.

(2010年 5月12日 受理)

Ⅲ. リスク学から見たハード面の問題

現在はまだ事故が終息しておらず(本稿の執筆は4月下旬), 原因解明の作業も正式になされていないので, 事故原因に関わる議論をするのは時期尚早に見える。したがって以下の意見は, 予見に基づく誤った見解である可能性もあるだろう。また意見は正しくても, それは「後出しジャンケン」に過ぎないという批判もあると思う。しかし正規の報告書を見るまでもなく, これまでにあらわになったリスク学上の問題点を, あえていくつか指摘しておくことにしたい。

1. 全電源の喪失

今回の事故原因として, 津波による非常用電源の損失を取り上げることが多いが, 私はそれ以前に, 外部からの主電源がなぜこのようにもろくも崩壊したのか, またその回復がなぜ遅かったのかが気になる。大地震発生時に, 発電機などの関連機器を保護するために自動的に回路をシャットダウンするのは理解するが, 送電塔の倒壊, 補助回線の有無も含めて, 今回の外部電源喪失はそのレベルでの話しではない。

一方, 非常用電源であるが, リスク論の立場からすれば, 「非常用」といいながらそれに備えた準備が不足していたように思う。後述するように, 非常事態に要求される多重防護がなぜかなされていなかったからである。それにリスク学では, 非常事態に備えて電気を使わない機械系, ないし手動の操作系を常に用意しておくという発想が一般的であるが, 原発の場合にはその発想は無理なのだろうか⁵⁾。たとえば非常用復水器や原子炉隔離時冷却系はそれに準じるものと思うのだが, 今回はなぜ機能しなかったのだろう。

いずれにしても, 素人の目からすると, 電気屋なのに全電源喪失というのはあまりにも恥ずかしいという気がするが, その背後に, いかなる想定外の出来事があったのかが知りたい。

2. 炉の欠点にどれほど事前対応をしていたか

今回の事故を起こした炉は, 私の思い違いでなければ, すべてGEの設計によるBWR/Mark 1型である(施工主体はそれぞれ異なり, 介在するコンサルもあるが)。この炉の持つ弱点として, 冷却機能が喪失すると格納容器に想定以上の負荷がかかり破裂する可能性のあること, 格納容器が小さすぎて事故発生時に問題が発生しやすいこと, 使用済み燃料のプールの位置が高所にあつて管理に不適切であることなどが, Mark 2, 3型の設計時に判明したという報告が米議会の公聴会などでなされている。

これらはすべて今回の事故でもあらわになった重要な問題点であり, 事実, Mark 2以降の炉では, 指摘された点に改良が加えられた。GEは当時, この弱点をMark 1の全オーナーに連絡し対応を求めたようであるが, 今

回の結果から見れば, 日本の電力会社は対応し切れていなかったように見える。それはなぜか。外部の私には, これ以上の真相はわからない。

3. 災害はシステムの最弱点を襲う

リスク論的に見た場合, システムを構成する個々の機器は頑丈でも, システム全体としてみれば脆弱であることが少なくない。それは個々の機器を繋ぐインターフェースの部分に弱点が潜んでいることが多いからである。そしてシステム全体の強度は, システムを構成する要素の平均的強度や最強部の強度ではなく, 最弱要素の強度で決まってしまうことが多い。

そしてここが重要なのだが, 災害はシステムの最弱点を的確に襲うことが知られている。災害は「弱いものいじめ」なのである。したがってシステムのリスク管理には, 災害のもたらすこの特性を熟知しておく必要がある⁶⁾。

このことは, 実は阪神大震災の時にも指摘されていた。例えば非常時の情報システムに関してであるが, これは普通, 無線機と発電機という主要な機器から構成されている。ところが阪神大震災では, そのシステムの多くが機能しなかった。その原因は無線機や発電機という主要機器の損傷ではなくて, 発電機を冷やす水タンクの損傷, 両者を繋ぐパイプの切断という周辺機器の機能障害がほとんどであった。この場合も, 地震災害はシステムの最弱点を襲ったのである。

もっと卑近な例でいうと, 山歩きのパーティもそうである。パーティで登山計画を考えるときは, 一番体力に乏しい弱者を中心にスケジュールを考えなくてはならない。体力の平均値ではなくて弱者をベースに計画しないと, そこから脱落者がでるからである。

無線機の機能不全や登山パーティは, 原発に比すればはるかに些細な問題であるが, 機能的に見れば, これらの間にかなり共通性が存在するのではないか。というのは, 原発も典型的なシステムであり, 炉の本体は極めて頑丈だが, それ以外のマイナーな機器, それらを相互に繋ぐインターフェース部分(例えば配管や, 機器の接合部分や溶接部分など)に相対的な弱点を抱えているからである⁸⁾。そしてその部分の小さな破損が, システム全体を止めてしまうことが少なくない。「配管のお化け」という渾名が付くほど複雑な配管で構成されている原発に, このリスク対策がどの程度なされていたのかが素人ながら気になる。

4. 多重防護は本当に多重であったか

原子炉の放射線防護は, 5重の「壁」で厳重に守られており, その安全性の確率は極めて高いというのがこれまでの技術的説明であった。それが今回は簡単に打ち破られた。その原因は5重の壁が独立でなかったからである。それに非常用電源や使用済み核燃料プールの場合, もともと壁が多重になっていなかった。

改めていうまでもないが、多重防護で安全性の確率を上げるためには、その前提として、個々の防護システムが完全に独立事象である必要がある⁵⁾。壁をいくら多重にしてもそれぞれが独立でなければ、全体の安全性は、確率の積として求めるわけにはいかない。自動車のブレーキ・システムが、油圧系とワイヤー系という完全に独立な系によって設計されているのはそのためである。そしてこの「完全に独立な系」というのは、文字通り、最初から最後まで独立であることを意味する。その失敗例が、1985年の日航機墜落事故であろう。

ご承知の方も多いと思うが、墜落した日航機の尾翼の制御回路は複数系統あり、それぞれが独立していた。ところがその回路は、尾翼に到達する隔壁部分で最終的に1ヶ所にまとめられていたのである。そしてその隔壁が損壊したために、複数系統の回路が一気に破断してしまった。複数系統の回路は独立に見えながら、実は最後の1点で1系統になっていたのである。そして今回の原発事故は、この日航機の教訓に共通するところが多いように見える。

すなわち放射線防護の5重の壁は、日航機の尾翼制御回路のように、見かけ上は独立の設計になっている。しかし日航機の回路が尾翼の隔壁で1ヶ所にまとめられその独立性を失ったのと同じように、原発の壁も、燃料棒の冷却機能が継続して行われるという前提が崩れたところで、その独立性を失っているからである。

独立性に関してもう一つ気になるのは、非常用発電機の設置場所である。ここで非常時というのは、今回のような津波だけではなく、火災、爆発などさまざまなケースが想定されよう。そしてそのような非常時に主要機器が損傷するという事は、その付近に設置してある非常用発電機も同時に損傷する可能性が高いことを意味する。したがって、そのリスクを回避するには、少なくとも1台の非常用発電機を、主要機器と隔離された別の安全な場所に設置しておく必要がある。銀行が、その生命線である顧客データを、バックアップ用に、本店とはるかに離れた地方に別置しているのはそのためである。リスク・マネジメントでは最も基本的なこのリスク分散という設計思想を、原発の設計に当たってなぜ適用しなかったのかわからない。

5. 「想定外」の意味

今回の原発事故に際しては、想定外という言葉がしきりに交わされた。M9.0という想定外の大地震、15mという想定外の大津波というわけである。また、機器の設計に当たっては、ある想定をしないと、現実の設計は不能であるという声も聞かれた。だがリスク論的に見ると、この想定外という言葉に誤解があるように見える。というのは、想定にはいくつかのレベルがあるからである⁸⁾。

すなわち、(1)発生の確率が客観的に極めて低いので想

定から外したという意味での想定外(たとえば隕石が直撃する)や、(2)発生の確率のあることを主張する者はいたが、それは少数者で、学問分野全体としての見解は低確率であったために想定外とされたもの(学問水準の限界ないし、少数意見の取り上げ方の問題)、(3)発生の確率がある程度示されているのに、それを主観的に低いと見積もって想定から外したという意味での想定外(たとえば過信ないし慢心から。また苛酷な現実を目を向けたくなくて、問題を意識の外に追いやってしまうなど。これらは技術者倫理の問題⁶⁾でもある)、(4)発生の確率が存在することは理解するが、外部的要因とのトレードオフの結果、想定外としたというもの(たとえばコストがかかり過ぎるとか、政治的配慮とか)、(5)発生の確率があるにも関わらず、想像力や情報の不足で思いがそこに至らず、結果的に想定外になってしまったもの(無知ないし不勉強の罪、またはイメージネーション能力の不足)というように、想定外の中味はさまざまなのである。

また想定の外に関していえば、そこで発生する事象のどの範囲までリスクを想定したかという網羅性の問題、リスクを確率面から想定するだけではなく、それが発生したときの被害の大きさについてどれほど考慮が払われたかといった、トータルなリスク評価の問題などが絡んでくることになる。このリスクの想定の外に関して、外国は「最悪」の想定から始めるのが基本ルールだが、日本はなぜかそのような想定をしながらない。想定者はその理由を「過度の心配を与えないため」というがこれは嘘で、ただ「最悪を想定したくない」という逃げの姿勢、精神の弱さの表れなのである。

いずれにせよ、上述した5種の想定外のうち、最初に挙げた想定外が本来の想定外であって、それ以外の想定外、ことに3番目と5番目は、いずれもあってはならない想定外である。そして今回の災害の場合、そのような想定外はなかったのだろうか。この点に関して、マスコミ上ではさまざまな報道が乱れ飛んでいるが私には事実が確認できないし、それにこの問題は今後、法律論的な争点になるので、ここではこれ以上の意見は控えたい。

ただリスク学的に見て特に気になるのは、4番目の想定外、すなわちコスト面への配慮から想定外にしたというケースである。一般論的に言えば、設計に際してコストに配慮すること自体は当然でありその点に異論はないが、問題は、リスクとコストのトレードオフが、どのような基準、ないし価値観で評価されたのかである。コストにはイニシャルコストだけでなく、ランニングコスト、非常時の災害コスト、廃棄コストなどがあり、また経済的コストだけではなく、政治的・社会的・心理的コストなどもあるが、それらがどこまで配慮されていたのだろう。ことに非常時の災害コストは頻度が低いためにとかく後回しにされやすいが、そのイニシャルコストをけちったために、大きな災害を蒙ってしっぺ返しを受け

た事例は過去に山ほどある。もしかすると、今回もその轍を踏んだのではないか。そしてこのような判断ミスは、後述するごとく、組織内部だけの閉じた価値観で評価したときに、犯しやすいことが知られている。

さらにそのコストに関してであるが、実機設計にまで進むときのコストと、思考シミュレーションをして、事前に手順の準備だけを考えておくときのコストでは価格的に大きな差がある。その違いに当事者は気がついていただろうか。たとえば上述した隕石の直撃リスクにしても、実機を設計するときに必ず考慮せよとまでいうつもりはないが、少なくとも低コストの思考シミュレーションをして、こころの備えだけはしておいた方がよいのではないか。そしてこの発想は、先の2番目の想定外の場合にも当てはめられよう。

最後に、今回の災害に関して全電源喪失という事態は想定内であったのか、想定外であったのかという問題である。電源喪失の可能性は、行政の委員会でも一部の委員から指摘されていたし、それに備えたシナリオも議論だけはされていたという意味では、形式的にはある程度想定内であったといえよう。しかし実際の対応は、とても想定内の出来事とは思えないものであった。だとすれば、そこで想定した内容ないしシナリオはどんなものであったのか。

たとえば主電源が喪失しても、非常用電源のどれかは生きていだろうという、淡い希望をまじえた想定だったのか。全電源が喪失してもそれは一時的なものであり、短時間で回復すると想定していたのか。全電源が喪失すると、炉心溶融まで残された時間は限られているという知識は当然共有されているはずだから、それに備えて非常用電源を、確実に長時間生かしておくための特別な配慮はされていたか。「止める」「冷やす」「閉じこめる」の3原則のうち、最初の「止める」さえうまくいけば、その後の冷却プロセスはECCSを含めて、どれかの電動ポンプが働いて順調に進むはずという油断はなかったか。いずれにしても今後の事故調査で最大のポイントとなるのは、この想定レベルと、それをもとにした対応がどこまでなされていたかの問題ではないかと思う。

IV. リスク学から見たソフト面の問題

1. 構造物のレイアウトの問題

構造物システムの安全性は、構造物本体の安全性だけではなく、それらが全体としてどのように布置されるかという、レイアウト上の問題が絡んでくる。このうち、非常用発電機の設置場所についてはすでにⅢ-4節で疑問を呈したが、同じことは、Mark 1タイプにおける格納容器内の、配管や諸機器類の詰め込みすぎのレイアウト、それに原子炉建屋内の高所に置かれた使用済み燃料プールのレイアウトについてもいえる。ただこれはGEのデザインベースの問題であり、Mark 2以降の炉では

改善されているので、ここではこれ以上触れない。

むしろ気になるのは、4つの原子炉建屋やタービン建屋の相互間距離が近すぎることである。平時の効率は、当然ながら相互に近接した距離関係にある方が高いが、非常時にはそれが仇となって被害を増幅することが少なくない。例えばある原子炉が事故を起こして異常に強い放射線を発生させた場合、すぐ隣にある原子炉はその余波を受けて、修理どころか、近づくこともできなくなるのではないかという懸念を持つ。これは昔から「集中と分散」の問題として、リスク学だけではなく工学分野でもしきりに議論されてきたが、この点について十分検討されていたのだろうか。ただこの問題は、狭い国土でさまざまな制約条件下での立地に苦勞されている現場の苦勞を思うとき、答えは単純ではない。

また、日本の原子炉の多くは海辺にあるが、津波対策として10m以上の高い堤防を作るより、建屋の建設位置を10m高いところに置く方がかなり有効と思われるのだが、地形を利用したレイアウト的な設計思想はなかったのだろうか。また海辺にあるポンプ類の中には建屋がなく野ざらしのものがあつたが、なぜ建屋は省略されたのだろうか。

2. システム全体を把握しているプロの欠如

今回の事故への対応を見ていて感じるのは、原発のシステム全体を細部に至るまで把握しているプロの欠如である。システムの各構成要素についてのプロは沢山いるのだが、それを全体として見通せるプロが極めて少ないように見える。

ただこの問題は今回の事故によって始めて浮かび上がったのではなく、10数年前から現場では言い続けられてきた。事実、原発サイトを訪問してその責任者の方たちと議論すると、必ずといってよいほどこの問題が話題になった。責任者の方たちの話しによると、大きな設計図を黙ってじっと眺めていたベテランの技術者が、「ここが嫌な感じがする」とか「ここが何となく怖い」と言われることがあるという。実データがあるわけではないのだが念のため点検すると、やはりそこに問題点が見つかり、事前に無事対応できて胸をなで下ろしたというのである。これは「ヤマカン」ではなく、長年の経験に裏打ちされた「プロのカン」といえよう。システムにおいては、「部分」の単なる集合が「全体」ではないという当たり前のことが、彼らは直感的に理解していたことになる。そしてこのようなプロ中のプロが、これまで日本の原発を支えてきたのである。

ところが今回の対応を見てみると、1つの対応が、結果としてどのような連鎖の結果を生むかについて、ことに事故発生初期段階において十分判断されていなかったという印象を持つ。その原因が、マクロ的にシステムを把握するプロが減ってきたところにあるとすれば、今後の保全体制はどうなるのだろうか。そしてその人材養

成は、短期間でできることではない。

3. 設計は一流、施工は三流？

日本の原子炉の設計は一流だが、施工は三流、そして検査官も三流といった指摘がかねてよりなされていた²⁾。私はこの面に関して全くの経験がないので誤解があるかも知れないが、いわゆる反原発の立場の方ではなく、しかも現場の細部にまでに通暁しておられる平井氏の文には一定の説得力がある。そしてこの話は、熟練した技術の伝承がなされていないという、上述した原発サイトの責任者の嘆きとも重なってくる。

平井氏の話によると、現場では原子炉の仕事に従事する作業員から「職人」が少なくなり、素人に近い作業員が増えたこと、彼らを教育しようとしても被曝の問題があって後継者養成が困難であること、本省から派遣されて監督するはずの運転管理専門官も素人が多く、的確な指摘のできる人が少ないことなどが問題という。そしてこの話は必ずしも誇張ではなく、現場の技術者の方たちと議論すると同じ話がしばしば登場する。

なお、運転管理専門官に関してであるが、しっかりとした専門知識と技術を持ち、客観的な立場から公正に評価することのできる第三者機関設置の必要性は、平井氏の言を俟つまでもなく、かねてから指摘されていた。ただ第三者機関といっても、機能的に言えばその中味は提言を主とするもの、諮問を主とするもの、監視を主とするもの、評価を主とするもの、情報提供を主とするものなど、さまざまなバリエーションがある^{8,11)}。ここで求められているのは監視や評価を主とするものであろうが、この話は行政組織変革の話にもなるので、これ以上は深入りしないことにする。

4. 書類上の確認と現場の実態とのズレ

上に述べた問題と関連して安全の監査の第一段階は、行政があらかじめ求める点検項目に対し、企業側が回答する書類に基づいて行われることが少なくない。たとえば非常用の発電機はあるか、発電機を搭載した車が準備されているか、定時点検は実施されているか、連絡用の電話が不通になったときに備えて代替する交信システムは準備されているか、消防を担当する職員は何人用意されているか、非常時の訓練は実施されているか、といった類である。そしてその点検項目は膨大な数である。

この書類審査はそれなりに意味を持つし、そのすべてが悪いわけではないが、問題は、書類上の数字がどの程度実体を表しているかなのである。書類上の点検項目にすべて○が付いていたとしても、そこから実体が浮かび上がってくる訳ではない。なぜならこれは、悪く言えば単なる「員数合わせ」だからである。

たとえば上述の非常用の発電機にしても、問題はそれが数の上で存在するか否かではなく、その車が「生きた」状態で、いつでも稼働可能かどうかの問題なのである。そのためには車が常に安全な場所に保管されているか、

車は日々点検されているか、燃料は確保されているか、連続運転はどこまで可能か、車が車検や修理に出されているときの代替車は用意されているか、運転手の確保は、道路が障害物で通行不能になったときの対策はなどといった、あらゆる阻害要因に配慮する必要がある。そしてこのような複雑多岐にわたるリスクへの目配りは、現場に行かないとわからない。リスク・マネジメントは何度もいうとおり、書類だけで済むものでないことを銘記する必要がある。だが、このような点について目配りできるリスク・マネージャーが、そもそも現場に配置されているのだろうか。

5. 事故の模擬実験の必要性

事故に備えるために、日ごろの訓練が必要であることは論を俟たないが(ただしマニュアルに沿った訓練だけでは駄目)、それとともに重要なのは事故の事前シミュレーションである。それもコンピュータによる仮想のシミュレーションだけではなく、小さな装置でよいから、実機を用いた実験シミュレーションを実施することが望ましい。現にその種の実験は、京大の木村逸郎先生の話によると米国ではすでに行われているという。

ただこれは口で言うのはたやすくても、実際に行うとすればコストの関係もあって、かなり困難であることは認める。でもそこで得られる知見は、訓練でのそれとは違ってリアリティに富んでいるし、貴重な実データが得られるという大きな長所があるのではないかと。

6. 閉じた系としての原子力業界と安全文化

原子力の業界は昔から比喩的に「ムラ」に例えられてきた。それはこの業界が閉鎖的で、外部との情報の入出力があまり見られないからである。同じ意見を身内である電力会社の他部門の方も、関連他企業の方も、行政府の方も、研究機関の方も異口同音に述べられるから、その閉鎖性は単なる私の個人的印象ではない気がする。

業界の閉鎖性を作っているのは、おそらく今から50年ほど前に原子力の民間利用が急速に進歩し、原子力が「夢のエネルギー」として産・官・学・民からこぞってもてはやされるようになったこと、それを受けてエリートたちがこの業界になだれ込んだこと、最先端で高度の専門性を持つ技術であるがゆえに外部の者は近づきがたくなったこと、その反作用として内部集団は結束し情報を外部から求める必要性や、情報を外部に出力する必要性を感じなくなったことなどによるのではないかと。そしてそのことが、今回の事故の遠因になったとする、バッシングの声がかまびすしい。

だがここで誤解のないようにしておきたいのだが、私の言いたいのは、原子力の専門家が安全を無視してきたということではない。彼らは彼らなりに安全を追求してきたからである。例えば今回の事故の後、何人かの識者が原子力業界を批判して、「原子力業界は安全神話を振りかざして国民を騙してきた」という趣旨の発言をされ

ている。だがこの発言は必ずしも正しくはない。というのは、1991年に発生した関電の美浜原発の事故において、ECCSが作動する事態になったのを受けて関電は、それまでの原発PR誌に記してあった「事故は絶対に起こらない」という内容を大幅に訂正し、原子力安全委員会が刊行した2000年版の原子力安全白書にも、「安全神話と決別する」趣旨のことが明記されているからである。そしてそのことは、当時の新聞にも大きく報じられた¹³⁾。

ということは、科学技術の安全に関して絶対はないという価値観が、少なくとも理念レベルでは原子力業界に存在していたことを意味する。私自身もこの価値観が、2000年以降、業界に共有されているものと思っていた。ところが今回の事故を見ると、その価値観が、具体的な行動の形では十分に機能していなかったように見える。それはなぜか。

その理由はおそらく、彼らが安全と考える基準が、原子力ムラの外にいる専門家の考えるそれと、食い違っていたからではないか。そしてその食い違いの原因が、専門性に関する彼らの過信にあったのではないかという疑念、またその食い違いや過信に気が付かなかった原因が、ムラの閉鎖性にあったのではないかという疑念である。

つまりタテマエとしての安全意識はあったとしても、個別組織レベルの対応になると、途端に閉鎖的な判断になって想定の見積もりを甘くしたり、外部の少数意見を排除して自己を絶対化してしまったのではないか。言葉を換えると、せっかくの安全意識が組織の中に内在化していなかったともいえよう。そしてこのような現象は、組織規範のもたらすマイナスの側面として、長らく社会心理学の主要研究テーマの1つであった。原子力業界も今後の組織の点検に当たって、このような社会科学的な知見に目を向けてほしいと思う。ムラの外にいる「よそ者」の中にも、素晴らしい智恵が眠っているからである。

なお、原子力業界の閉鎖性を巡ってマスコミでは、政界や行政との癒着、利権構造などこれ以外にもいろいろな問題が論じられているが¹⁷⁾、私自身はその中味について論じるだけの資料も知識も持たないので、これ以上の深入りは避けたい。だが一般論として、外部とのエネルギー代謝を断ったシステムは、崩壊するのが常であることだけはもう一度喚起しておきたい。これは物理学上の法則であると同時に、社会科学上の法則でもあるからである。

V. リスク学から見た指揮・広報体制の問題

今回の原発事故は、炉の処理をどうするかという工学的な問題を超えて、発生した大事故を迎え撃つためにどのようなチームを作るのが有効か、そこで求められる

リーダーシップはいかなるものか、また心配する国民に対して事態を説明するためにいかなる広報を必要とするかといった、社会心理学的な問題についても大きな示唆を投げかけた。以下にその問題について述べる。

1. 指揮体制の問題

今回の事故発生に対処するプレイヤーは、東京電力、原子力安全委員会、経産省の原子力安全・保安院、東芝、日立と多数存在した。ではそこでどのような合同チームが形成され、誰が中心的な指揮を執ったのか。その姿がいまだによく見えない。

かつてJCOの事故が発生したときは原子力安全委員会が中心となって処理に当たり、比較的手際よく事態を収拾されたと思うのだが、今回はなぜか表に立たれることが少なかったようである。それには何か特別の理由があったのか。

でも問題はそのような詮索よりも、そもそもこのような大事故が発生したとき、いかなる組織が中心となって対応するかを、日ごろからなぜ明確にしていなかったかということである。ことが起こってから慌てて組織を立ち上げても、確なものができないことは衆知のごとくであろう。そして多くの諸外国では、当然ながらそのような組織を持っている。日本でも原子力災害対策本部なるものがあるようだが、今回の事故ではその技術的リーダーシップがあまり伝わってこなかった。それ以外にも類似の組織が他にもたくさん立ち上がっているが、それらは一元化されず、「船頭多くして船山に上る」の観が拭えない。組織を一番混乱させるのは、専門知識がないのに「やる気」だけある人が表に出たがる時である。

これまでの社会心理学の知見によれば、組織や集団の望ましいスタイルは、その組織や集団の置かれた課題環境に強く依存することが知られている。そして今回のように緊急性が高く、しかも専門性が高い課題環境下では、task-orientedな組織を作ることが必須である。言葉を変えると、一種の戦闘集団と言えよう。

そのためにはプロ中のプロを各専門分野別に集めること、それらの支援グループを下部に置いた上で、全体を統括する司令部を小人数で作ること(このようにときにこそ、先にIV-2節で述べた人材がいる)、リーダーには大局的判断のできる人を置いてその強力なリーダーシップのもとに一元化すること、そのリーダーには十分な権限を与えること(国によっては首相なみの権限を持たせる場合すらある)、何よりも決断力とスピードを大切にすることなどが要諦である。その好例は、数々の想定外の危機に直面しながら、無事に帰還を果たした小惑星探査機はやぶさのミッションに求められよう³⁾。

なおこのような高度の専門性を要求されるチームでは、知識の乏しい政治家が、技術的な議論の過程に口を挟むのはもってのほかである。だがこれは、彼らが無視せよということではない。彼らの出番は大きく分けて2

つあり、1つは問題解決の方向性を指示する場面、いま1つは最終的な決断をする場面である。

まず最初の場面は、そこで発生した事態が社会的に複雑な要素を含んでいて、どの部分から手をつければよいか現場が迷うとき、進むべき方向性や、手をつけるプライオリティを指図するという役目である。ただしそれを行うには、事態をマクロ的に把握するという高度の価値判断力を持っていることが前提である。

第2の場面は、事態の進行途上で、いかなる選択をしてもネガティブな結果が予想されるという苦渋に満ちた局面に出会ったとき、自らの責任において決断するという意志決定の場面であろう。なぜなら、この2つの場面は、技術的決断というより、優れて政治的決断だからである。

2. 広報体制の問題

今回の事故に際して広報を担当したのは当初、官房長官と保安院のスタッフであった。その後、さらに東電が加わるようになって、現在は3者体制で広報が実施されている。そこで不思議なのは、なぜ広報を一元化しないかということである。というのは、上に述べた指揮体制と同じく、このような非常時場面では広報体制も一元化するのが、リスク学上の常識だからである。事実、発信元が3ヶ所になることで内容が重複したり、逆に内容にズレが見られて誤解を招いたり混乱を発生させる原因になった。

発信元が3ヶ所になることによる情報量の増大というメリットはもちろんあるが、それは3者が別々に開く形ではなく、まず1元化した上で3者がサポート役として陪席し、トピックスによって随時発言するというのが通常の姿であろう。だが広報における問題点はその体制だけではなく、内容にも関わっている。

まず全体としての情報開示のレベルに問題があり、一般的にいつ情報開示に消極的、ないし慎重でありすぎる。その理由として関係者は、「不確かな情報を出す国民に無用の不安を与えるから」というが、これは社会心理学のコミュニケーション理論を知らない素人考えであり、不確かな情報でもそのことを断りながら慎重に説明すれば、国民はそれを誤解することなく受け入れる。むしろ情報の出し惜しみをすることから、国民は情報が秘匿されていると勘ぐったり、かえって不安を感じるのである^{9,13,14}。国民への広報は学会での発表のように厳密さを求められているわけではなく、また国民は、関係者が思っているほど無知蒙昧ではないことを理解してほしい。

それともう一つ関係者が誤解しているのは、「国民に安心してもらおうのが正しい広報」と考えているフシのあることである。だがこれは誤っている。国民が、客観的に安全なものを不安に感じている場合にそれを正してやるのはよいが、危険なものを安心と思わせることはかえって危険だからである。必要なのは、「危険なものは

怖がれ、ただし正しく怖がれ」という態度を国民に持ってもらうことだと理解してほしい¹²。

なおそれと関係して知ってほしいのは、地震を含めた自然災害でパニックが発生したという経験データは存在しないことである。これは世界中の社会学者、心理学者の共有知である。地震パニックという言葉は、マスコミの造語に過ぎない。ただし、地震によって引き起こされた今回の原発災害の場合には、歪んだ情報によるパニックの発生はありうる。

次に問題として取り上げたいのは、提供する情報の質である。社会心理学の目からすると、残念なことに現在の広報担当者は、一般市民に対する広報の手法に関して、学問的な基礎知識をあまりお持ちでないように見える。できるだけ平易に話そうと努力されていることは理解するが、問題は、市民の認識構造に沿った説明がされていないことである。

例えば市民の関心が深い放射線被曝の問題を例にとると、市民の平均的な思考様式は恐らく放射線=原爆=チェルノブイリ=怖いものという程度であって、その危険性に関する放射線生物学的ないし放射線防護学的な知識はほとんど持っていない。SvやBqといった単位がわからないのは仕方ないとして、そもそも放射線のdose-response関係をどうして調べるのか、リスク測定とリスク評価の違い、放射線の時間的・空間的分布の変動、確率的影響の意味、許容リスクや規制値の意味、precautionary principleの意味などという、放射線に関する基礎知識を理解している市民は極めて少数ではないか。

そしてその基礎知識を多少とも持たないと、避難区域の距離設定がなぜ日本と米国で違ったのか、ほうれん草がなぜ最初に規制対象になったか、「とりあえず」屋外に出ないようにというあいまいな表現がなぜ使われたかの意味はわからないだろう。

だがこれらの概念について、市民が不勉強だと非難するのは誤りである。なぜなら、このような知識は普段の市民生活にさほど必要としないし、市民もそれなりに忙しいから、余計なことを勉強する暇はないからである。

もしそうだとすれば、関係者が市民側に歩み寄り、市民の認識レベルに合わせて概念を再構築しながら伝える努力をしないと、放射線リスクの意味はなかなか伝わらないことになる。それには放射線影響のプロとともに、コミュニケーションのプロの協力が欠かせないと思うのだが、そのような配慮がなされているようには見えない。そしてその背後には、情報を外部に出力することを軽視する、先にIV-6節で述べた原子力ムラの閉鎖的体質が関係しているように思われる。

この広報を改善する手法はいろいろ考えられるが、上に述べたように、放射線とコミュニケーションのプロがコラボして、市民に理解されやすい論理と表現を工夫す

るのがまず第一であろう。そしてその表現をもとにした解説記事を保存版として、放射線被曝に不安を持っておられる関連地域の方々に届ける必要があるのではないか(新聞はすでに類似の広報を試みている)。またこれも先に述べた、広報を中心業務とする公正な第三者機関の設置も有効であろう。その際の注意事項や参考となる資料は、私どものそれを含めていくつもあるから、利用していただければ幸いである^{4,9,10,11,13,15,18,19}。

なお、以上のことに関連して問題となっているものに、いわゆる風評被害がある。風評被害という言葉はマスコミの造語で、学問的な根拠はない概念なのだが、社会心理学的にはうわさとか、流言に近いものだと思っしてほしい。そして風評を含め、うわさや流言の発生を止めることは原理的に不可能である。だがその規模を縮小する技術はいろいろあるわけで、この問題についてもいくつかの研究が行われている^{6,14}。ただ紙数の関係で、ここでは詳しい話を省略することにしたい。

VI. おわりに

日本原子力学会からの依頼とはいえ、専門外の私が今回の福島原発事故に対して意見を述べたのは、甚だ僭越であったと自覚している。外野席のリスク学、ないし社会心理学の視点に立てばこう見えるということを書いたわけであるが、無知による誤解や偏見も多かったであろう。その点についてはお詫びを申し上げるより仕方がない。

ただあえて言わせていただくと、今回の事故に関して「安全神話」「想定外」を始めとする数々のあいまいな言葉が乱れ飛んだが、これはそもそも「安全・安心」という概念に基づいてなされた議論に問題があるのではということである、なぜなら「安全・安心」は耳障りこそよいけれども、操作的に定義できない怪しい概念だからである¹²。その議論の詳細は省略するが、今後必要なのは「リスク」という、科学的な視点から見た論理展開ではないか。そして菅原²⁰も指摘するように、「安全や安心という言葉に情緒的に満足するのではなく、あらゆる製品や技術にリスクの存在を認めた上で、それに対する正しい対処法を考える」必要があるのではないかと思う。

最後になったが、今なお福島原発サイトで生命を賭して戦っておられる技術者や作業員の方々に、最大限の尊敬と感謝の念を捧げつつこの稿を終えたい。

—参考文献—

- 1) 朝日新聞, 全国定例世論調査, 2011年4月18日付け朝刊。
- 2) 平井憲夫, 原発がどんなものか知って欲しい, <http://www.iam-t.jp/HIRAI/pageall.html>
- 3) 川口淳一郎, 小惑星探査機はやぶさ—「玉手箱」は開かれた, 中公新書, (2010)。
- 4) 吉川肇子, リスク・コミュニケーション—相互理解とより良き意志決定をめざして, 福村出版, (1999)。

- 5) 木下富雄, “地震防災の危機管理—地方自治体の場合”, 日本リスク研究学会誌, 7(2), 3~12(1996)。
- 6) 木下富雄, “風評被害—JCO 東海事業所の臨界事故と関連して”, *Isotope News*, 572, 5~14(2001)。
- 7) 木下富雄, “リスク認知の構造とその国際比較”, 安全工学, 41(6), 356~363(2002)。
- 8) 木下富雄, “リスク学の立場から見た柏崎原発災害—気になる総合的な広報戦略の欠如”, 日本原子力学会誌, 49(10), 654~655(2007)。
- 9) 木下富雄, “リスク・コミュニケーション再考—統合的リスク・コミュニケーションの構築に向けて(1)”, 日本リスク研究学会誌, 18(2), 3~22(2008)。
- 10) 木下富雄, “リスク・コミュニケーション再考—統合的リスク・コミュニケーションの構築に向けて(2)”, 日本リスク研究学会誌, 19(1), 3~17(2009 a)。
- 11) 木下富雄, “リスク・コミュニケーション再考—統合的リスク・コミュニケーションの構築に向けて(3)”, 日本リスク研究学会誌, 19(3), 3~24(2009 b)。
- 12) 木下富雄, “安全と安心—その真実と虚構”, ヒューマンセキュリティ・サイエンス, No.4, 1-30(2009 c)。
- 13) 木下富雄, “リスク・コミュニケーションの思想と技術—リスク・コミュニケーションにおける分かりやすいコンテンツとは—リスク・コミュニケーションのノウハウに学ぶ”, 柴田義貞(編), リスク・コミュニケーションの思想と技術—放射線リスクの正しい理解をめざして 長崎大学グローバル COE プログラム 放射線健康リスク制御国際戦略拠点, p.1~46, 47~79, 81~87(2010)。
- 14) 木下富雄, “うわさのコントロールは可能か”, 日本心理学会(編), 心理学ワールド—50号刊行記念出版, 新曜社, p.221~226(2011)。
- 15) 中谷内一也, リスクのモノサシ—安全・安心生活はありうるか NHK Books, 日本放送協会, (2006)。
- 16) R. Schinzinger, M. W. Martin, *Introduction to Engineering Ethics*, McGraw-Hill, (2000) (西原英晃監訳, 工学倫理入門, 丸善, (2002))
- 17) 選択編集部, 原子力村—解体は至難 日本のサンクチュアリシリーズ440 選択, 5月号, No. 435, 111~114(2011)。
- 18) 柴田義貞(編), リスクコミュニケーションの思想と技術—放射線リスクの正しい理解をめざして, 長崎大学グローバル COE プログラム 放射線健康リスク制御国際戦略拠点, (2010)。
- 19) 柴田義貞(編), リスク認知とリスクコミュニケーション—放射線リスクの正しい理解をめざして, 長崎大学グローバル COE プログラム 放射線健康リスク制御国際戦略拠点, (2011)。
- 20) 菅原 努, “日本のリスク研究は何処へ行く?”, 日本リスク研究学会 *News Letter*, No.4, 1~3 (2006)。

著者紹介

木下富雄(きのした・とみお)
 (財)国際高等研究所フェロー・京都大学名誉教授
 (専門分野/関心分野)社会心理学・リスク学



福島原発で起きた原子炉建屋の損傷 なぜ水素爆発が起きたのか

(財)エネルギー総合工学研究所 内藤 正則

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴う大津波が、関東から東北地方の太平洋岸に面する原子力発電所を襲った。特に、福島第一原子力発電所に設置されている1号機から4号機までの4プラントは甚大な被害を受けた。これら4プラントから環境に放出された放射性物質の量は、チェルノブイリ原発事故の約1/10と言われている。現在はすでに被害の拡大は抑えられ、核燃料から発生し続ける余熱(崩壊熱)を安定に除去する、いわゆる冷温停止状態を維持するための方策がとられつつある。しかし、ここに至るまで、なぜ多量の放射性物質の環境への放出という大惨事が起きたのであろうか。格納容器の過圧を防止するためのベントや核燃料の冷却を維持するための注水作業が遅れたことが一因として挙げられているが、直接的には水素爆発による原子炉建屋の損傷が、その後の事故の推移を決定づけたといえる。本稿では、「なぜ水素爆発が起きたのか」という点に焦点を絞って、現状で得られているプラント情報に基づいて解説する。

I. 水素爆発に至るまでのプラント状態

東北地方太平洋沖地震は2011年3月11日14時46分18秒、三陸沖を震源として発生した。マグニチュード9.0の巨大地震と、それに伴う大津波が関東から東北地方の太平洋岸一帯を襲った。地震発生時に運転中であった、日本原子力発電(株)の東海第二発電所、東北電力(株)の女川原子力発電所(1～3号機)、東京電力(株)の福島第一原子力発電所(1～3号機)、同福島第二原子力発電所(1～4号機)はすべて地震の信号によって制御棒が自動挿入され運転が停止(核分裂が停止)された。また、福島第一原子力発電所の4～6号機は定期点検のため運転停止状態にあった。福島第一原子力発電所(1～3号機)以外の運転中であった上記プラントはすべて安定な冷温停止状態(原子炉圧力容器の圧力がほぼ1気圧で、冷却水温度が100℃以下の状態)を維持できている。

一方、福島第一原子力発電所の1～3号機、および定期点検中であった同4号機は、これまで大きく報道されている通り、環境への放射性物質放出という大惨事に至っている。以下に、福島第一原子力発電所(1～4号機)のプラント状態の推移を示す。

1. 福島第一発電所1～4号機の仕様

第1表に、福島第一発電所1～4号機の主なプラント仕様を示す。2～4号機の仕様はほぼ同一であり、プラント出力は1号機の1.7倍である。これに対して、原子炉に装荷されている燃料集合体の数は1号機の1.37倍であり、燃料集合体1体あたりの出力が2～4号機では1号機よりも大きくなっている点に大きな特徴がある。4号機は、地震発生時には定期点検中で停止しており、炉内構造物の補修のために、装荷されていた燃料集合体(548体)はすべて使用済み燃料プールに移されていた。加えて、他号機よりも多くの古い使用済み燃料集合体もあわせて保管されていた。そのため、崩壊熱発生量(核燃料は、核分裂が停止した後も、それまでの核分裂で生成した放射性物質が他の原子核に崩壊する過程で長期間にわたって熱を発生し続ける。これを崩壊熱という)も他号機より多くなっている。

第1図に、1～4号機の原子炉建屋内の配置を示す。炉心と称する部分に多数の燃料集合体が垂直に林立している。原子炉圧力容器(以下、圧力容器)には炉内で発生した蒸気をタービンに送る主蒸気管、炉心冷却のための給水管、および非常用炉心冷却系(ECCS)の配管などが接続されており、その先は格納容器を貫通している。格納容器(ドライウエル)は、上記した各種配管が貫通しているほか、作業や機材の搬出入のためのマンホール、電気系統の配線の貫通部などがある。

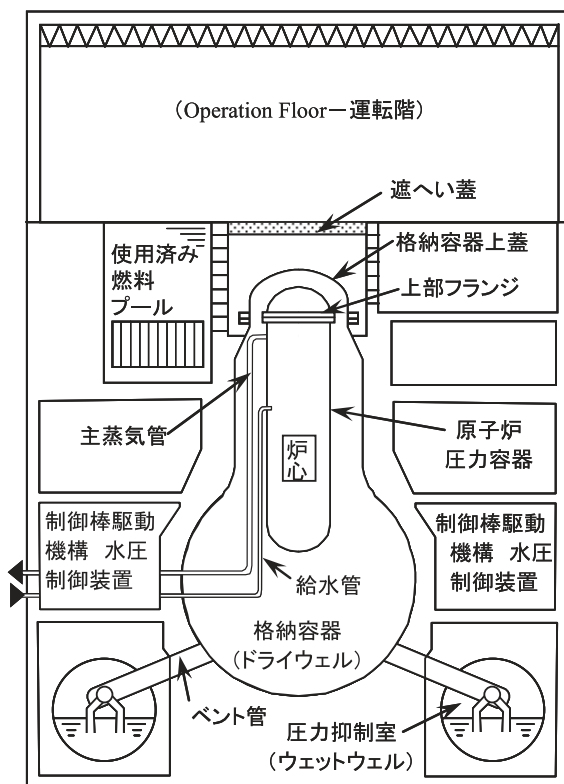
また、ドライウエルの下部は8本のベント管を介して圧力抑制室(ウェットウエル)に通じている。円環状の圧

Damage of Reactor Buildings at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants—Why hydrogen explosion occurred :
Masanori NAITOH.

(2011年 5月27日 受理)

第1表 福島第一発電所1～4号機的主要プラント仕様

	1号機	2号機	3号機	4号機
運転状況	運転中	運転中	運転中	定期点検中
原子炉型式	BWR-3	BWR-4	BWR-4	BWR-4
格納容器型式	MARK-I	MARK-I	MARK-I	MARK-I
定格熱出力 (MWt)	1,380	2,381	2,381	2,381
定格電気出力 (MWe)	460	784	784	784
燃料集合体数	400	548	548	548
ウラン装荷量 (トン)	69	94	94	94
原子炉容器寸法	4.78m ϕ ×19mH	5.57m ϕ ×22mH	5.57m ϕ ×22mH	5.57m ϕ ×22mH
ドライウエル寸法	(全高 約32m)	(全高 約33m)	(全高 約33m)	(全高 約34m)
球部内径×円筒部内径	17.7m×9.6m	20m×10.9m	20m×10.9m	20m×10.9m
圧力抑制室寸法				
円環断面内径	8.08m	8.9m	8.9m	8.9m
プール水量 (m ³)	1,750	約3,000	約3,000	約3,000
原子炉建屋寸法 平面	41m×41m	45m×45m	45m×45m	45m×45m
高さ	49m	62m	62m	62m
使用済み燃料プール				
容積 (m ³)	1,020	1,425	1,425	1,425
保管使用済み燃料体数	292	587	514	1,331
発熱量【崩壊熱】(kW)	70	464	232	2,320



第1図 原子炉建屋内の構造

力抑制室内は、中ほどまで水(圧力抑制プール)が満たされている。主蒸気管には、弁(減圧弁)を介して配管が圧力抑制プールに繋がっており、原子炉の圧力を低下させ

る必要が生じた場合に減圧弁が開いて、炉内で発生した蒸気をプール中に導き、蒸気を凝縮させて圧力を低下させる仕組みになっている。

2. 地震発生後のプラント事象の時間経過

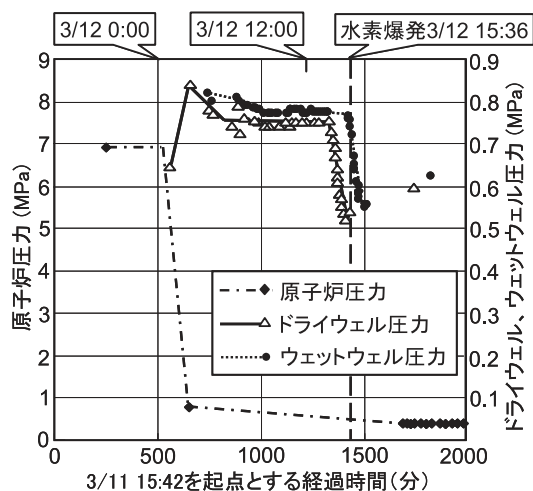
(1) 1号機

東京電力(株)(以下、東電)がプレス発表した情報を時系列に第2表に示す。また、東電公表のプラントデータのうち圧力の時間変化を第2図に示す。地震発生から56分後に津波が押し寄せ、すべての交流電源が喪失する事態となった。通常、原子力発電所には、全交流電源喪失の事態に備えて、約6時間ほど非常用機器を作動させるための直流電源が設置されているが、福島原発では津波の影響もあって、直流電源による機器類の作動は期待したほどの効果を発揮するには至らなかった。ここまでは、全号機に共通する事象である。1号機には、他の号機にはない非常用の冷却設備としてIC(Isolation Condensator: 非常用復水器)が設置されている。ICは電源を必要とせず、自然循環冷却方式によって原子炉内の蒸気を凝縮させ、凝縮後の水を原子炉内に戻す系統である。1号機では、このICが地震発生後に自動起動したが、約10分後に手動停止した。報道発表によれば、その後3時間ほどして手動で再起動させたが、約8時間にわたる作動の後、冷却機能を失ったといわれている。ICが再起動する前に、前述の減圧弁の一つである逃がし安全弁(SRV)

第2表 1号機で発生した主要事象

3月	1号機で発生した事象
11日	
14:46	地震発生→制御棒全挿入→核分裂停止 送電線の鉄塔の一部が倒壊し、原発外部からの受電が不能となる(外部電源喪失) IC自動起動
15:00	IC手動停止
15:42	津波襲来→オイルタンク流出、タービン建屋に海水浸入→非常用ディーゼル電源停止(全交流電源喪失)
16:36	SRVで圧力制御、原子炉水位の低下が始まる
18:00	IC再起動(時刻は不明確、18時過ぎと想定)
20:15	炉圧7.0MPaを確認
12日	
0:30	D/W圧力600kPaに上昇
2:00	IC機能喪失と推定(時刻は不明確、2時前か?)
2:30	原子炉圧力0.8MPa
4:00	D/W圧力840kPaに上昇
8:30	炉水位、炉頂部まで低下
14:30	S/C→スタック経由ベント
15:30	D/W圧力540kPa
15:36	R/B運転階にて爆発
19:04	海水注入開始
22:15	余震により海水注入中断
13日	
2:00	海水注入再開

ADS:自動減圧弁、D/W:ドライウエル、IC:非常用復水器、R/B:原子炉建屋、S/C:圧力抑制室、SRV:逃がし安全弁



第2図 1号機圧力の時間変化

が働いて、原子炉圧力は7 MPa 前後でほぼ一定値を維持していたと推定される。SRVは、圧力を一定値に保つよう機械的作用によって弁が開閉する仕組みのものである。原子炉に注水する系統が全く作動できなかったために、SRVが開く都度、原子炉内の蒸気が圧力抑制プールに排出されたことにより、原子炉内の水量は徐々に減少していった。同時に高温蒸気の凝縮は、ドライウエル及びウェットウエルの圧力上昇を招いた。原子炉圧力は

11日の20時7分に7 MPaが記録されていたが、12日の2時30分には0.8 MPaに低下している。この間にSRVシート部への異物付着等の理由で継続的に炉内の蒸気が排出され、炉圧が低下したものと推定される。ドライウエル圧力は上昇を続けて、最高で840 kPaにまで達した。その後、ドライウエルの気体を大気中に放出するベントがなされ、圧力は低下するが、ほどなく原子炉建屋の運転階で水素爆発が発生した。

第2図に示した圧力の時間変化から、ドライウエル圧力は、12日の午前4時頃に最高値を示した後、10時間ほど少し低い圧力でほぼ一定値となっている(ウェットウエル圧力も同様の傾向)。これは、ドライウエルから(およびウェットウエルからも?)内部の気体が原子炉建屋に漏れ出したためと推定され、これが水素爆発の要因となったと考えられる(次章で詳述する)。

(2) 2号機

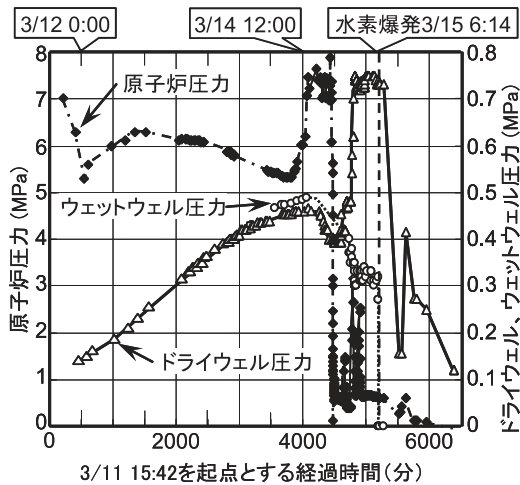
東電がプレス発表した情報を時系列に第3表に示す。また、東電公表のプラントデータのうち、圧力の時間変化を第3図に示す。

2号機には、1号機に設置されているICの代りにRCIC(Reactor Core Isolation Cooling System: 原子炉隔離時冷却系)が設置されている(3号機も同様)。東電は、2号機のRCIC1は地震発生直後から14日12時頃まで作動し続けたと発表している。第3図に示した原子炉圧力の時間変化をみると、地震の後、約1時間は7 MPaを維持していたが、その後、RCIC停止の14日12時頃まで、6 MPa前後に低下しており、さらに7 MPa前後に上昇した後、14日18時頃に急減少している。この要因について、筆者は以下のように推定する。

第3表 2号機で発生した主要事象

3月	2号機で発生した事象
11日	
14:46	地震発生→制御棒全挿入→核分裂停止 送電線の鉄塔の一部が倒壊し、原発外部からの受電が不能となる(外部電源喪失) 蒸気タービン駆動のRCICが作動 地震以後、原子炉水位が確保されていたため、ECCS系統は作動せず
15:42	津波襲来→オイルタンク流出、タービン建屋に海水浸入→非常用ディーゼル電源停止(全交流電源喪失) 直流電源設備に「接地」(短絡)発生
14日	
11:01	R/B建屋パネル開放
12:00	この頃まではRCIC作動継続と判断された
17:12	炉圧7.5MPaを確認
18:22	炉心全燃料露出
19:54	海水注入開始
15日	
0:02	ドライベント(数分間)
6:14	S/C付近で異音発生
6:28	S/C圧力ゼロ

ECCS:非常用炉心冷却系、RCIC:原子炉隔離時冷却系



第3図 2号機圧力の時間変化

(1) 炉圧が6 MPa 前後に保たれている期間： この期間は RCIC の作動期間でもある。全電源喪失により、RCIC 蒸気タービンの回転数(すなわち、タービン軸に直結しているポンプの吐出流量)を制御できなくなったため、本来の設計仕様を超えて若干の過冷却となり、7 MPa よりも低めの圧力が維持されたと考えられる。

(2) その後の圧力急上昇： RCIC の停止により、冷却機能がなくなった。そのため、燃料から発生する崩壊熱によって圧力が上昇した。

(3) 約7 MPa に維持された期間： 崩壊熱によって圧力が7 MPa 付近まで上昇すると逃がし安全弁(SRV)が働いて、圧力をほぼ一定値に維持した。

(4) 圧力急減： SRV シートへの異物付着等、何らかの原因で冷却材の漏洩が継続したためと考えられる。

上記した(1)の期間で、ドライウエルの圧力は上昇を続けている。これは、RCIC のタービンを駆動した蒸気が圧力抑制プール内に排出され、プール水温が上昇した結果として圧力が上昇したのではないかと推定される。その後のドライウエル圧力の一時的な低下はベント弁を一時的に開いて圧力を開放した結果と考えられる。さらに、その後圧力が上昇しているが、これはベント弁が閉じられたことと上記(4)の理由によって高温蒸気の圧力抑制プール内への放出が続いたことによると考えられる。

以上の現象の考察は、圧力指示値が正しいとした場合であり、今後、圧力計が校正された後に再度検討する必要がある。

水素爆発は15日6時14分に、ウェットウエル近傍で発生したが、これによってウェットウエルの一部が損傷し、圧力が急減した。

(3) 3号機

東電がプレス発表した情報を時系列に第4表に示す。3号機の RCIC 1 は地震発生直後から12日11時過ぎまで作動し続け、その後約1時間の空白の後、12時35分に原子炉水位低の信号によって HPCI(High Pressure

第4表 3号機で発生した主要事象

3月	3号機で発生した事象
11日	
14:46	地震発生→制御棒全挿入→核分裂停止 送電線の鉄塔の一部が倒壊し、原発外部からの受電が不能となる(外部電源喪失) 蒸気タービン駆動のRCICが作動 地震以後、原子炉水位が確保されていたため、ECCS系統は作動せず
15:42	津波襲来→オイルタンク流出、タービン建屋に海水浸入→非常用ディーゼル電源停止(全交流電源喪失)
12日	
11:36	RCIC機能停止
12:00	この頃まで炉圧は7MPaでほぼ安定
12:35	水位低信号により、HPCIが自動起動
20:41	格納容器ベント開始(準備開始の意味か、あるいは実際にベントしてもその後弁を閉じたと推定)
13日	
2:42	HPCI停止(炉圧が低下したため)
4:15	炉水位、炉頂部まで低下
9:20	格納容器ベント開始
11:00	真水の注入開始、炉圧0.12MPaに低下
12:18	格納容器ベント系の弁が何らかの原因で閉止
13:12	海水/ホウ酸水注入開始
14日	
1:10	海水注入一時中断
3:20	海水注入再開
5:20	S/Cベント開始(の準備?)
6:10	D/W圧力460kPa(最高使用圧力427kPa)
8:20	炉心注水を優先し、予定していたベントは見合せ
11:01	R/B運転階で爆発

HPCI: 高圧注水系(ECCSの一系統)

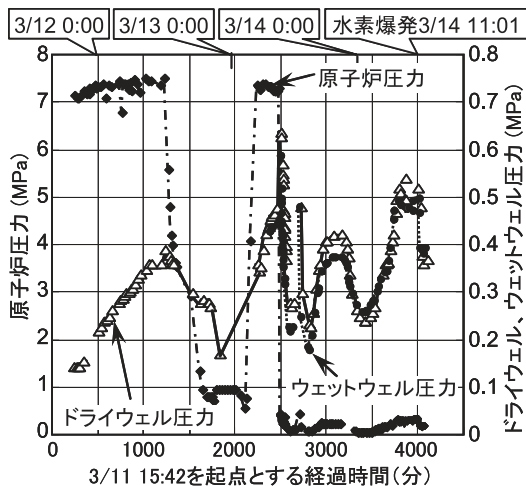
Coolant Injection System: 高圧注水系)が自動起動した。HPCIは13日2時42分にその機能を失い、その後の冷却は断続的に実施された真水あるいは海水の注入だけに依存した。格納容器ベントは比較的早い時期に実施されたが、ベント弁の不調により何度か ON-OFF を繰り返している。

東電公表のプラントデータのうち圧力の時間変化を第4図に示す。

原子炉圧力は12日19時頃より1 MPa 程度に低下し、安定に推移した後、13日2時頃から再び7 MPa に上昇、13日9時頃より数気圧に急減している。この圧力挙動については、原因特定に至っていない。

(4) 4号機の使用済み燃料プール

4号機では、原子炉内に装荷されていた燃料はすべて使用済み燃料プールに移送されており、点検・補修のために、格納容器の上蓋及び原子炉圧力容器の上部(第1図の上部フランジから上の部分)が外された状態にあった。この4号機でも、15日6時14分に原子炉建屋運転階付近で異音が発生し、建屋の外壁が損壊した。運転階では側壁が一部残っているものの、運転階の下にある4階は一部の側壁が損壊した。東電はこの原因を調査中であ



第4図 3号機圧力の時間変化

るが、現在の推定として、「①建屋の損壊は水素爆発、②格納容器ベント配管および建屋のガス処理系配管は3号機と4号機で共通の排気塔に接続されており、3号機の格納容器ベントに伴って、水素を含んだベントガス流が4号機建屋に逆流した可能性がある。」としている。

以上、各号機の地震発生後数日間のプラント状況を示したが、すべての号機において水素爆発による建屋の損壊、格納容器の一部破損が発生した。これが、その後の放射性物質の環境への飛散、事故収束手順の煩雑化を招いた決定的とも言える要因となった。

II. なぜ水素爆発が起きたのか

1. プラント挙動の解析

本節では、地震発生後、初期の段階におけるプラント挙動の解析結果を2例紹介する。

(1) Chris Allison 博士の解析： 米国ISS社(Innovative Systems Software:LLC)のAllison博士は自社で所有する解析コードRELAP/SCDAPSIMを用いて、全電源喪失後のプラント挙動を解析している。この解析は、3月中に実施され、IAEAの福島原発に関する会議で報告された。解析を進める時点では、福島原発の設計仕様、地震発生直前の運転状況およびその後の対応の詳細が不明であったため、福島原発に類似したメキシコのLaguna Verde原発を対象として解析したものである。

(2) IMPACT/SAMPSONコードによる解析： 筆者らは、所属する財団が所有する解析コードIMPACT/SAMPSONを用いて全電源喪失後のプラント挙動を解析した。

第5表に両者の解析結果を比較して示す。解析は、ともに原子炉停止を時刻ゼロとしてスタートし、すべての燃料の溶融が完了する時点で終了させたものである。

Allison博士によるISS社の解析は、福島原発を直接対象としたものではない。しかし、例えば燃料集合体数

第5表 プラント挙動の解析結果

解析実施者	ISS社の解析	筆者らの解析	
使用した解析コード	RELAP/SCDAPSIM	IMPACT/SAMPSON	
解析対象	対象炉	Laguna Verde	福島1号機
	原子炉型式	BWR-5	BWR-3
	格納容器型式	マークII	マークI
	定格熱出力(MW)	2,320	1,380
解析条件	燃料集合体数	444	400
	全電源喪失時刻	炉停止4.2時間後	炉停止1時間後
	ADS作動時刻	同上	同上
	冷却期間	炉停止後4.2時間	炉停止後1時間
解析結果	炉心部解析分割数	半径方向4領域 高さ方向13分割	半径方向4領域 高さ方向10分割
	燃料溶融開始時刻	炉停止5時間後 (3/11 19:46)	炉停止2.3時間後 (3/11 17:03)
	全燃料溶融完了時刻	炉停止7.5時間後 (3/11 22:16)	炉停止6.6時間後 (3/11 21:21)
	圧力容器下部溶融破損時刻	炉停止8.5時間後 (3/11 23:17)	炉停止4.9時間後 (3/11 19:37)
	溶融燃料の位置	溶融燃料は全て 圧力容器下部へ	80%:圧力容器下部 20%:炉心下部支持板
	全燃料溶融時の発生水素蓄積量	465 kg	500 kg
	最大水素発生量*	—	約800 kg
水素爆発時の建屋内最高圧力	—	約5気圧	

*: 炉内に存在するジルコニウムがすべて水と反応したと仮定したときの水素発生量の最大値

と比較すると福島1号機と2,3号機の間にあることから、この結果は福島1~3号機の間断的な挙動を示しているとも考えられることから、参考として示した。IMPACT/SAMPSONによる解析では、原子炉停止直前の炉心内出力分布を解析の前提条件として入力する必要があるが、未公開データであるため、ここでは、出力分布を仮想して解析した。したがって、厳密には福島1号機の再現計算とはなっていない。

さて、第5表のIMPACT/SAMPSONの結果を見ると、炉内の全燃料が溶融し終える3月11日21時21分の前に、圧力容器下部は一部分(第5表には示していないが、直径5cm程度の領域が)溶融していた(3月11日19時37分)ことになる。圧力容器下部の溶融破損は、放射性的核分裂生成物が格納容器雰囲気内に漏洩し、さらに格納容器の圧力上昇に伴って建屋内に漏出することを意味する。このことは、東電が公表した免震重要棟内の白板メモ書きの記述(3月11日21時過ぎに、建屋の放射線線量率が10秒間で0.8mSv(換算すると、288mSv/h)であり、立入り困難)と整合する。全燃料が溶融した時点では、溶融炉心の80%は圧力容器下部に落下し、20%は燃料集合体を支持する板(炉心下部支持板)の上に残存しているという解析結果である。

一般にウラン燃料は被覆管の中に収められている。被覆管の構成材料はジルコニウムである。ジルコニウムが高温になると以下の総括反応式に従って、水と反応して

水素が発生する。



このときの反応速度を表す式はいくつか提案されており、いずれの式も反応表面積、温度、反応時間等の関数であるが、簡便な式として以下の Bager-Just の式が広く知られている。

$$W^2 = 33.3 \times 10^5 \times t \times \exp(-45,500/RT) \quad (2)$$

ここに、 W ：ジルコニウムの酸化量 (mg/cm^2)

t ：反応時間 (s)

R ：ガス定数 ($=1.9872 \text{ cal}/\text{mol}\cdot\text{K}$)

T ：ジルコニウムの温度 (K)

(2)式より、ジルコニウムの表面積、温度、反応時間がわかれば、反応するジルコニウムの質量が求まる。これをモル数に換算すると発生する水素量が(1)式より求められる。このような方法で解析された、福島1号機における水素発生量は500 kgとなった。この水素が圧力バランスによって原子炉建屋の運転階に漏洩、蓄積したとすると、運転階における水素量は約250 kg、濃度は約15%となる。このときの水素燃焼挙動をIMPACT/SAMPSONコードで解析した結果(解析では、運転階の壁や床は完全剛体として扱い、破損しないという前提である)、燃焼は約20秒間継続し、建屋運転階の圧力は約5気圧に達した。原子炉建屋は耐圧構造ではないので、内圧が5気圧にも達すれば、壁は破損すると考えられる。

同様に、3号機を対象としたIMPACT/SAMPSONの解析によれば、3号機建屋の運転階における水素濃度は約30%に達し、燃焼の形態が爆燃(Deflagration)から、圧力波が音速を超える爆轟(Detonation)に遷移する現象が発生した。このときの燃焼時間は約20ミリ秒(0.02秒)で、圧力は約60気圧にも達した。これによって運転階の壁が1号機よりも激しく破損したと考えられる。

2. 水素の移行経路

原子炉内で発生した水素は、どのようにして建屋に流れたのであろうか。以下はその推定である。

1号機の記録によれば、原子炉圧力は少なくとも11日の20時7分までは7 MPaを維持していた。すなわち、この時刻までは逃がし安全弁の作動によって圧力が一定値に保たれていたことになる。また、その後も何らかの原因から逃がし安全弁が完全閉止状態にならなかったと推定される。逃がし安全弁が開くと、炉内で発生した水素は水蒸気とともに圧力抑制プールに流れ込み、水蒸気は水中で凝縮する。残った水素は圧力抑制プールの上部

空間に移る。この空間はドライウエルと繋がっているため、水素はドライウエルに蓄積していく。ドライウエルおよびウェットウエルの空間は窒素で置換されている(酸素がない)ため、ここでは水素濃度が高くなっても燃焼は起きない。ドライウエルには前述したように多くの貫通口や上蓋の接合部、溶接部などがある。ドライウエルの圧力が時間経過とともに上昇した結果、内部のガスはこれらの部分から外(すなわち、原子炉建屋内)に漏洩したと推定する。1号機、3号機の場合は、特に上蓋からの漏洩が際立っていたのではないかと推定され、この結果、運転階に重点的に水素が蓄積し、爆発に至った。

それでは、なぜ2号機では建屋下部の圧力抑制室近くで爆発が起きたか。2号機では3号機の水素爆発の爆風によって、建屋運転階にあるブローアウトパネルが開いたと考えられる。その結果、運転階に蓄積した水素は開放されたブローアウトパネルから大気中に放出され、爆発には至らなかった。ドライウエルやウェットウエルからは漏洩が可能な多くの貫通部や溶接部があるが、2号機の場合には、たまたまウェットウエル近傍の溶接部を中心として漏洩が多かったのではないかと考えられる。圧力抑制プールが納められている建屋下部の部屋は運転階よりも容積がはるかに小さいので、水素の濃度は容易に高くなり、爆発に至った。

Ⅲ. おわりに

以上、福島原発における水素爆発までの短期間の事象進展を解説した。本稿を執筆している時点においてもお事態は日々変化しており、溶融炉心の安定冷却にはまだ予断を許さない状況であるが、一刻も早い早期収束を願っている。

福島原発の悲惨な状況を目の当たりにして、筆者の最大の痛恨事は、水素爆発を予知できなかったことである。BWRでは、窒素置換されている格納容器内では水素爆発は起きない。容器が過圧によって破裂することは想定できたが、大きな漏洩を予知することができなかった。漏れないという先入観があったためである。

著者紹介

内藤正則(ないとう・まさのり)
(財)エネルギー総合工学研究所
(専門分野)原子炉工学、熱流動、シビアアクシデント



福島第一原発事故の大気を介した環境影響 環境影響の全体像把握に向けた第一歩

名古屋大学大学院工学研究科 山澤 弘実, 平尾 茂一

事故放出された放射性物質の環境影響について、現在は現地測定が精力的に進められており、徐々にその詳細が明らかになりつつある。一方、影響の全体像については公的な説明が一切なされていない。事故のいずれの段階でも、たとえ概要であっても生じた重大な環境影響の全体像をとらえ、社会に伝える努力が施設外事故対応の基本であろう。

I. はじめに

福島第一原子力発電所の北西方向での他の地域に比べて高い空間線量率の状態が、本稿を執筆している2011年5月初旬の段階でも継続している。事故サイトから100~200 km 以上離れた関東地方では3月15, 16日での空間線量率上昇が見られ、21日以降の水道水や農作物から放射能が検出された。また、一方では南相馬市の海岸寄りの地域等では比較的近距离でも空間線量率が低い。

これらの測定結果は国等の機関から公表されているが、質の異なる生のデータが時間的・空間的に統一性のない羅列の形で複数の機関から公表されており、事故後、2ヶ月を経過した段階でも影響の総体について公的な形で説明がなされていない。特に事故初期の2週間程度間に、プラントからの放射性物質放出状況に関する情報が皆無のまま、我が国がかつて経験したことのない事故放出放射能による環境汚染が各所で次々と検出され、米国の始めとする諸外国の反応も大きかったこともあり、断片的な情報が逆に憶測や社会混乱の原因になったように思える。環境分野を専門とする者ですら関係機関のホームページやマスコミから得られる情報を集めて注意深く解析しないと、事故規模や環境影響がどのように進行しているかの大きな輪郭さえとらえにくい状況であった。

放射性物質の海洋放出も重大な影響を与えているが、本稿では大気放出に限って事故の環境影響をもう少し分析的に見ることとする。比較的短期間で起こる影響を考える上で重要な視点は、(1)事故施設から放出された放射性核種の種類と量の時間経過、(2)大気中輸送現象の結果としての影響地域での放射性物質の大気中濃度と地表面

沈着量(土壌、水および農作物汚染)、(3)大気中の放射性物質からの放射線による外部被ばく(クラウドシャイン)および吸入による内部被ばく、(4)地表面沈着核種による外部被ばく(グランドシャイン)である。ここでは、これらの視点から大気輸送を中心に今回の事故影響を暫定的に概観することにする。

これらの視点のほかに、長期の影響を考慮すると地表沈着核種の再浮遊による内部被ばくや農作物への移行等が必須の視点となる。また、これらの事故影響の把握とそれに基づく対策立案・実施が適時・適切に行われたか、その結果が周辺住民の安全確保に寄与したか、情報が適切に公開され国民および世界の国々での混乱回避に寄与したかといった視点からは、今後、客観的かつ多面的に厳しい教訓が導かれることが必至である。ここでは予断を避けるべきであるが、情報が十分整理されていない現時点において本稿を執筆する制約上、事実と予断を区別することができない場合があることをあらかじめ断りする。

II. 事故施設からの大気放出

今回の事故では、大気放出された放射性核種、放出量(率)、放出形態(位置、連続的あるいは間欠的)、およびこれらの放出源情報の時間経過が施設側からの情報として全く得られていないことが、施設外の環境影響を見積もり、対策を立案する際に大きな障害となったことは明らかである。施設外の緊急時対策におけるこれらの情報の必要性・重要性が認識されていないのか、認識されているとすればなぜ必要な情報の収集が行われなかったのか、あるいは見積もる手段あるいは能力がなかったのか、十分に検証される必要がある。本章では、施設側からの情報が全く期待できない状況において、得られている限られた環境モニタリング結果等の情報からの放出源情報の推定について、原子力安全委員会から公表された推定結果も含めて概説する。

Impacts of Fukushima Daiichi NPP Accident through Atmospheric Environment : Hiroshi YAMAZAWA, Shigekazu HIRAO.

(2011年 5月31日 受理)

1. 施設等のモニタリングデータ

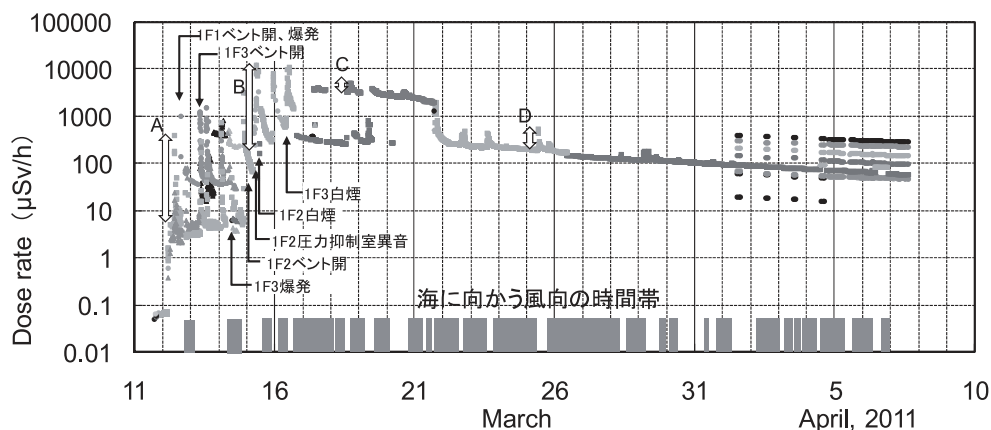
排気筒経由の放出であれば排気筒モニタから放出率の見積もりが可能である。しかし今回の事故では、電源喪失によるものかは不明であるが排気筒モニタの情報は全く得られていない。また、常設のモニタリングポストによる敷地境界での空間線量率の測定結果も得られておらず、3月中はモニタリング車により、おおむね1地点(正門あるいは西門が主)において10分間隔で線量率が得られているに過ぎない。測定者にとっては自身の被ばくや汚染を伴う作業であり、多大の苦労があったことは想像に難くないが、放出に関する大まかな傾向は読み取ることができるものの、放出源情報の経時変化を定量的に得るための情報として十分ではない。事故初期ではその拡充が行われず、影響評価で最も重要な14~16日にかけて測定箇所が減らされ、大量の大气中放出が継続していると見られていたその後2週間ほどの期間は拡充されなかった。4月以降、敷地境界のモニタリングポストで線量率が測定されるようになった。しかし、放出率がかなり低減した段階では最小位が $1\mu\text{Sv/h}$ のモニタリングでは、3月中のような極めて大量の放出がないことの確認に過ぎず、継続している放出の大きさを見積もる情報となり得ない。敷地外には福島県が20点以上の観測局を設けているが、地震および停電の影響によるものと思われるが、線量率、気象等の対策立案に必要な情報が得られていない。

第1図に事業者が公表した敷地境界(原子炉建屋から1 km 程度の距離)での空間線量率の測定結果を示す¹⁾。3月16日以前では線量率は大きな増減を繰り返しており、特に15日午前以前については放出を伴うであろうと推定される事象と対応している。図では線量率モニタリングに付随して測定された風のデータから、風向が海側に向かう時間帯をハッチした。風の測定はおそらく地上2, 3 m 程度で行われたものと思われ、平坦でない地形を考慮すると測定された風向がサイト全体の風を代表するものか注意が必要であるが、15日午前以前では、陸側に向かう風向が継続した時間帯でも線量率上昇のない場

合が多い。したがって、放出を引き起こす事象に伴う間欠的な放出であった可能性が高いと考えられる。

一方、16日以降では、内陸に向かう風向の時間帯では高い頻度で線量率上昇が見られる。プルームが通過する際の線量率上昇は、プルームの中央部が測定点の極近傍を通過するかある程度の距離を持って通過するかで大きく異なる。このことは、簡易な計算でも示すことができ、東海村臨界事故での測定値にも明瞭に見られた。地上付近の風向は大气乱流による揺らぎと気象場の経時変化により絶えず変動することを考え合わせると、線量率に見られる短時間の変動は、プルームの軸が測定点を横切ったこと(放出点を支点とする時計の針でプルームを例えると、針がスイープすること)を表しており、放出の変動を表しているとの見方は大方間違いない。これらのことを考慮すると、16日以降は放出が連続的に継続しているように筆者らには見えるが、現時点では確信を持っている訳ではない。風向変動の影響は15日午前以前についてもあてはまり、線量率変動の形状は必ずしも放出モード(放出率の時間変化パターン)を表しているとは限らない。

以上の考察より、敷地境界の線量率データから放出モードを推定するのは簡単ではないが、線量率の上昇幅はその時の放出率の情報を持っている可能性が高い。第1図にA, B等の符号を付して例示したように、各ピークの大きさを拾い上げ時系列を得れば、その包絡線は良い近似で放出モードの包絡線と見なすことができるものと考えられる。この考えに基づく解析結果は本稿では省略するが、放出は14日夕方までは比較的小さく、15日に最大であり、その後3月末にかけて漸減し、その時点で最大から3, 4桁小さいと推測される。ただし、この概算では線量率に寄与する核種組成の時期の違いは考慮していない。今後、線量率変動の特徴、例えばグランドシャイン成分の減衰やスカイシャイン成分とグランドシャイン成分の比等から放出源に関するその他の情報を引き出せる可能性がある。



第1図 事業者による敷地境界付近での空間ガンマ線量率のモニタリング値¹⁾

2. 遠方データからの放出源情報推定

4月12日に原子力安全委員会から、事故当初から4月5日までのヨウ素131およびセシウム137の放出量の暫定推定値がそれぞれ 1.5×10^{17} Bq および 1.2×10^{16} Bq と公表された²⁾。この推定値は、原子力安全・保安院公表の値(1.3×10^{17} Bq および 6.1×10^{15} Bq)³⁾とともに、INES(国際原子力・放射線事象尺度)レベル7との暫定評価の根拠となったものである。この原子力安全委員会の情報は、論文として公開される情報⁴⁾の公表日時点までのものである。図表等は参考論文に譲り、ここでは要点のみ概観する。

この推定値は、測定された放射性核種の大気中濃度をSPEEDIおよびWSPEEDIによる大気拡散計算で再現するために必要な放出率として得られている。すなわち、大気拡散計算では単位放出(例えば、各核種が1Bq/hで放出されたこと)を仮定し、測定で得られた濃度を計算で得られた濃度(この場合は希釈率に相当)で除することによって放出率を得たものである。ただし、15日は放出率推定に使用できる大気中濃度が得られていないために、事故施設から北西方向の地表面沈着核種からのグランドシャイン線量率の測定値と計算値を用いて推定されている。

その結果は、ヨウ素131の放出率は3月14日までは 10^{14} Bq/h 台、15日のある時間帯は 10^{16} Bq/h 程度、その後、24日頃までは 10^{14} Bq/h 台で推移し、その後、3月27日にかけて 10^{13} Bq/h 以下までに減少したものと推定されている。その後、3月末に一たん 10^{14} Bq/h 程度に増加し、その後数日の間に 10^{12} Bq/h 程度に減少したとされている。この変化の傾向は、前節で述べた敷地境界付近での線量率から推定される放出率変動と類似したものである。セシウム137については、対ヨウ素131比が時間の経過とともに増加しているものの、おおむね同様の変動傾向である。

類似の方法による推定は過去にも行われており、例えばチェルノブイリ事故⁵⁾、欧州での医療用セシウム137焼却による大気放出事故⁶⁾、JCO事故⁷⁾では他の方法による推定値と整合性のある結果が得られており、詳細な推定は原理的にできないが比較的堅牢な方法である。

一方、今回のこの推定方法には大きな不確かさが含まれている可能性がある。大気拡散計算では主に風速場および大気乱流場の誤差に起因する誤差が含まれ、計算で得られたプルームの位置および到達時刻等は必ずしも実測と一致するとは限らない。また、測定値がプルームの主要部をとらえたものであるかどうかとも推定精度を左右する。今回の場合、大気中濃度測定値の数は極めて限定的であるため、放出率の推定精度および時間変動把握の詳細さは限られ、公表された値は暫定的なものともみべきで、今後、検討が必要である。

この観点から、事故初期に緊急時モニタリングにより

大気中濃度がほとんど得られていないことは、前述の近傍での線量率モニタリングが不足していることとあわせて、放出率推定と環境影響の視点での事故規模把握にとって、さらに重要なこととして周辺住民の内部被ばく防護の観点から重大な欠陥である。事故発生後1週間以上にわたり緊急時モニタリングによる大気中濃度の測定が行われなかったのは(あるいは、行われたがデータが得られていないのか筆者にはわからないが)、施設外の事故マネジメントとして不可解である。

Ⅲ. 大気拡散の状況

1. 概要

5月の段階でも敷地内の線量率には風向変化とある程度相関を持って変動していることから、大気中放出が継続していると見られるが、その放出率は3月中と比べると数桁小さいものと考えられる。したがって、放出率が大きい3月25日頃までの大気拡散状況が環境影響の様態をほぼ決定づけたと見ることができる。本稿ではその期間のみ対象とする。ただし、それ以外の期間の大気放出による影響が無視できないことは当然である。

この重要な期間での影響を、①20km圏内での拡散と沈着による汚染(近距離影響)、②施設北西方向の数10km範囲への影響(北西域影響)、③福島県中通りや他の東北地方および関東地方への広域影響の3種類に分類すると把握しやすい。

近距離影響については、まだモニタリング情報が十分公開されておらず、大量放出期間の汚染の進展や現状での汚染分布の把握は不十分である。4月に文部科学省が初めて公表し、その後、数回測定が追加された20km圏内の線量率⁸⁾(主にグランドシャインで、土壌汚染を反映)は、 $100 \mu\text{Sv/h}$ を超える高い地点と、主にサイト北側の海岸近くの $1 \mu\text{Sv/h}$ 以下の地点が混在しており、汚染の局在性が強い。これは、事故施設からのプルームが伸びる方向、その時の放出率および降水の有無によって決定されたものと解され、今後、詳細な測定と解析が必要である。

2. 北西方向の汚染

海岸域では、一般場の気圧傾度が小さくなると海陸風循環が卓越し、福島第一原子力発電所の地域では夜間海側に向かっていった風が早朝に南側に向き、その後、順に南西、西を経由し午後から夕方にかけて北西に向かう時計回りの風向変化が何度も起こっている。また、阿武隈山地の斜面および谷地形に伴う谷風との複合による内陸への輸送が起こったものと考えられる。3月中の放出率が大きい期間では、15日、20日がその例である。特に、15日は他の日に比べて放出率が1~2桁大きいと見積もられており、このときに起こった海風・谷風による内陸部への輸送と夜間の弱風による滞留が大気輸送面での汚

染域形成の一要因である。ただし、現時点では、15日の何時頃に放出された放射性物質が北西域汚染に寄与したかは、十分把握されていない。

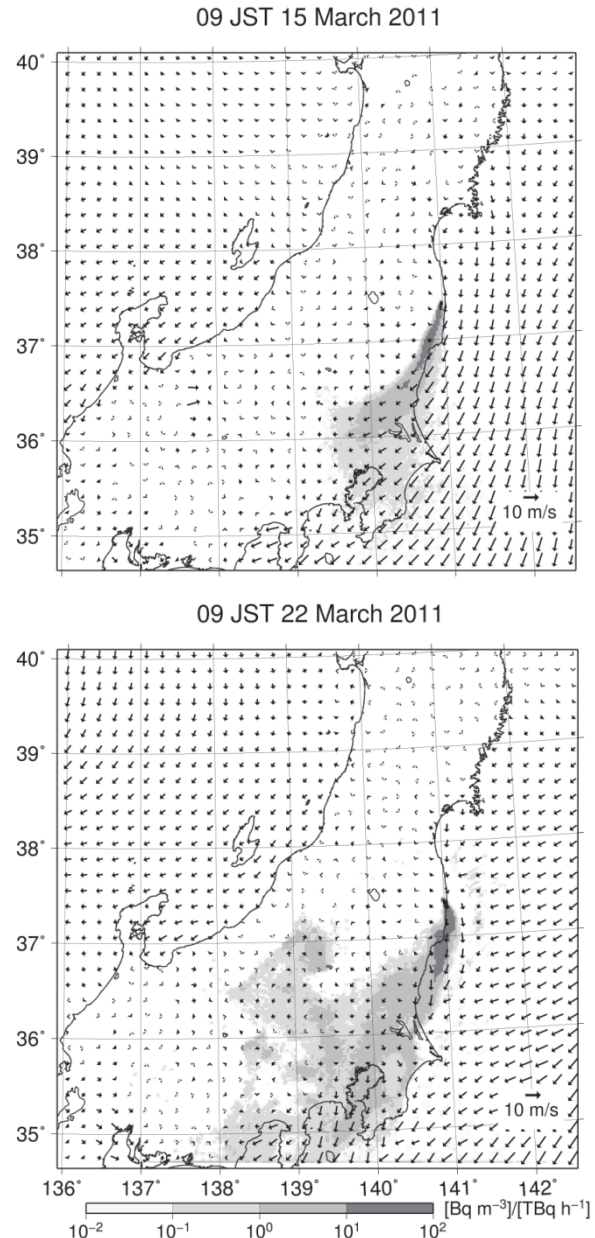
さらに、同日夕方から翌日にかけて降水が観測された。福島市では15日夜は雨であったが、気温が低下した16日未明は雪のため、標高の高い阿武隈山地では15日夜間も雪であった可能性が高い。降水がある場合の放射性物質の沈着(湿性沈着)は降水が関与しない沈着(乾性沈着)に比べて格段に大きな地表汚染をもたらす。重力沈着が効く大粒径粒子状の放射性物質を除くと、乾性沈着では地表面に接する空気中の放射性物質のみが沈着し、上空の放射性物質の寄与は、大気乱流による鉛直輸送を経る必要がある。すなわち、乾性沈着は地表面に近い大気中放射性物質が主に寄与する。一方、湿性沈着では、降水が落下過程で大気中の放射性物質を高い効率で捕捉して地上に運ぶ。したがって、希ガスを除き大気中に存在するすべての放射性物質が沈着の寄与源となり得る。

以上に加えてグランドシャインによるガンマ線線量率の経時変化に対する考察を加えると、北西方向の汚染域は、3月15日の高放出率、局地風循環および降水の3条件が重畳したことによるものと結論づけられる。この北西方向の汚染域(沈着によるグランドシャイン)は、遅くとも3月16日早朝の段階で原子力災害対策本部により行われた2号機圧力抑制室損傷を想定したSPEEDI計算の結果(原子力災害対策本部事務局の計算第41項)⁹⁾として把握されており、実際の汚染状況と近い分布が得られている。また、15日午後以北西方向へ拡散する可能性が高いことは、同日未明の段階でのSPEEDI計算より現地災害対策本部でも予測結果を得ている(現地原子力災害対策本部の計算第3項)¹⁰⁾。

3. 広域影響

着日期間での広域影響で顕著なものは、①12日の北方向への影響(女川での線量率上昇)、②15~16日および③20~22日の関東地方とその他の地方への影響である。本節では②および③の関東方面への影響について述べる。これら2つの事例についての数値モデル⁷⁾による大気輸送計算結果の例を第2図に示す。気象庁と電力中央研究所の解析気象データJRA 25を入力として非静水圧近似大気力学モデルMM5により風速場および乱流場の3次元分布を計算し、ラグランジュ型の拡散モデルにより濃度場を得たものである。いずれの計算も大気輸送の概要把握を目的とし、実際の放出率とは異なる一定の放出率を仮定し、沈着を含まない大気輸送過程のみを考慮した大気中濃度の暫定計算結果であるため、実際の濃度分布とは異なることに注意していただきたい。

福島第一原子力発電所が立地する東北南部-関東北部の阿武隈山地東側の太平洋岸では、本州南岸に低気圧あるいは停滞前線があり、北高の気圧配置の場合、阿武隈



第2図 事故放出放射性物質(非沈着性)の1時間平均地上大気中濃度の1 TBq/h連続放出を仮定した計算結果例(上図:2011年3月15日9時, 下図:3月22日09時)

山地が障壁となり、大気下層0.5~1 km程度では海岸線に沿って南向きの風が吹き、阿武隈山地が途切れ関東平野が開ける東海村付近から北東からの風となって内陸に入り込む風系が高い頻度で形成されることが知られている。このような風は一般的には海洋性の安定な温度成層を伴うことが多いため、拡散混合は小さく高濃度が維持されやすい傾向を持つ。また、関東地方では低気圧あるいは前線による降水を伴う頻度が高いことも特徴である。

②および③の期間はいずれもこの状況によるものである。幸いにも②の期間での降水は限られた地域だけかつ弱いものであったため、湿性沈着の影響は大きく出現しなかったと考えられる。また、15日に関東地方に影響

を与えたブルームは、大気輸送の時間経過を考え合わせると前日深夜から当日朝に放出されたものであり、北西方向に影響を与えたブルームとは異なり比較的放出率が小さかった可能性もある。このような拡散状況は、3月15日の時点で文部科学省および日本原子力研究開発機構により WSPEEDI の計算結果が得られており⁸⁾、その結果は筆者らの事後計算と類似し、濃度等値線の値は未確定であるものの分布の全体像とその時間進展は現実に近いものであったと考えられる。

一方、③の事例では、前述の風系による輸送が長時間継続し、さらに21～22日に関東全体で強い降雨が継続したことにより、広い範囲で放射性物質の沈着による影響をもたらした。影響の範囲および程度は実測に基づき評価されなければならないが、影響範囲が広いため実測と大気輸送計算との相補的な総合解析が必要である。

IV. さらに気がかりは

事故に伴う大気中放出放射性物質の影響については、定量性や空間的な詳細さは未だ不十分な状況であり、今後、実測に基づき把握することが、環境修復に向けた作業の第1段階である。

一方、今後の測定によって評価できない事項もある。まず、ブルーム通過時のクラウドシャインによる外部被ばく線量と吸入による内部被ばく線量である。各地で測定された線量率および大気中濃度から、広域での影響は小さいものと想定されるが、放出率を確定した後に SPEEDI 等の計算により被ばく線量を評価(線量再構築)し、その値が十分小さいことを確認する必要がある。特に、大気中濃度等の測定データの少ない事故初期および事故施設近傍ではその必要性が高い。

また、海洋汚染が問題となっており、その原因として4月上旬の滞留水放出(核種区別なし、 1.5×10^{11} Bq)と同時期の2号炉取水口付近の漏洩(主要核種の総量 4.7×10^{10} Bq)等の放出量が評価されている。汚染の影響は今後、長期間監視されることになるが、その原因としてこれら液体での放出・漏洩のみしか評価されていないのは明らかに片手落ちである。大気中放出量はこれらの量に比べて1～2桁大きいこと、大気放出された放射性物質は陸域に向かっていった時間より海上に向かっていった時間が長いこと、さらに海上の大気中放射性物質はいずれ海洋に沈着することを考えると、比較的広域での本当の海洋汚染源は大気中への放出であることは明らかである。筆者の調査不足であればよいのだが、この点について責任ある機関からの公的コメントが見当たらないのが気が

かりである。今後、もし未公開の測定結果が存在していたり、第三者や国外からの指摘で上記のような問題点を検討するようでは、事故の環境影響の全体像をありのままに把握しようとする姿勢とはいえず、関連分野の学会員・研究者からの信頼すら回復できない。

—参考資料—

- 1) 東京電力㈱, <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/index-j.html>
- 2) 原子力安全委員会, <http://www.nsc.go.jp/info/20110412.pdf>
- 3) 原子力安全・保安院, <http://www.meti.go.jp/press/2011/04/20110412001/20110412001-1.pdf>
- 4) M. Chino, H. Nakayama, H. Nagai, H. Terada, G. Katata, H. Yamazawa, "Preliminary Estimation of Release Amount of ¹³¹I and ¹³⁷Cs Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Atmosphere", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**, (2011). (accepted)
- 5) M. Chino, H. Ishikawa, H. Yamazawa, *et al.*, *Application of the SPEEDI System to the Chernobyl Reactor Accident*, JAERI-M 86-142, (1986).
- 6) 山澤弘実, "AlgecirasでのCs-137大気中放出事故の長距離拡散解析", *日本原子力学会誌*, **41**, 114-116(1999).
- 7) S. Hirao, H. Yamazawa, "Release rate estimation of radioactive noble gases in the criticality accident at Tokai-mura from off-site monitoring data", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **47**[1], 20-30(2010).
- 8) 文部科学省, http://www.mext.go.jp/a_menu/saigaijohou/index.htm
- 9) 原子力安全・保安院, http://www.mext.go.jp/a_menu/saigaijohou/syousai/1305747.htm
- 10) 原子力安全・保安院, http://www.nisa.meti.go.jp/earthquake/speedi/ofc/speedi_ofc_index.html

著者紹介

山澤弘実(やまざわ・ひろみ)
名古屋大学大学院工学研究科
(専門分野/関心分野)放射性物質の環境動態, 原子力環境安全

平尾茂一(ひらお・しげかず)
名古屋大学大学院工学研究科
(専門分野/関心分野)環境放射能・放射線, 大気環境動態

緊急時環境モニタリングの考え方 原子力安全委員会指針から

藤田保健衛生大学 下 道國

環境放射線のモニタリングは地味な仕事である。その中でも、緊急時の環境モニタリングは、平常時はあまり意識されることもないが、緊急時に備えて遺漏のないよう常に準備が必要である。今回の福島第一原子力発電所の事故で、はからずもその重要性が認識され、モニタリングデータとそれに基づいた対策が重要となっている。緊急時環境モニタリングは原子力安全委員会の指針の中に準備されているが、本稿ではこれに沿って考え方や運用について述べる。

I. はじめに

これまで、緊急時の環境放射線のモニタリングは、通常時の環境放射線のモニタリングと区別され、緊急時の環境放射線のモニタリング指針として、原子力安全委員会の中で整理されていた。しかしながら、平成20年3月には指針等の見直しの一環として、両指針が一つにまとめられ、新しく「環境放射線のモニタリング指針」として位置づけられた。これには、両者を分離した形で互いに独立の指針として存在するよりも、モニタリング技術の水準の向上は共通であり、齊一化は継続・持続的な関係にあることから一体化した方がより運用しやすい、という判断があった。したがって、その内容自体は従来と変わることなく、ほぼそのまま継続している。

このような経緯と緊密関係にあるために、通常時の環境モニタリングについても触れていくことで、緊急時環境モニタリングが平常時のモニタリングとどのように違い、どのように運用されることが期待されているかなど、その考え方等について原子力安全委員会の環境放射線モニタリング指針(平成20年3月)に基づいて紹介する。

II. 環境モニタリング

1. 平常時と異常時の対応

平常時の環境モニタリングは、原子力施設周辺の住民の健康と安全を護ることが第一義的である。そのために、地方公共団体が中心となってモニタリングを実施してきており、事業者はそれに協力すると共に、自らもモニタリングを実施している。

View of Environmental Monitoring in Emergency—Based on the guide by Japan Nuclear Safety Commission : Michikuni SHIMO.

(2011年 5月30日 受理)

一方、施設に異常が生じて、放射性物質あるいは放射線が異常に事業所外に漏れるかあるいはその恐れがある場合、災害対策基本法(災対法)と原子力災害対策特別措置法(原災法)に基づいて、国、地方公共団体、指定公共機関および当該事業者は、中央防災会議が発する防災基本計画に沿って各組織が策定した防災計画に従って、しるべき防災対策を採ることとされている。この防災計画の一環として、環境放射線モニタリングが実施されることとなっている。特に、原子力施設等の防災対策については、原子力安全委員会が別途に定める指針により実施されることとされており、その指針が今述べようとしている環境放射線モニタリング指針の第4章緊急時モニタリングに相当する。この指針の構成は、「平常時モニタリング」、「平常時モニタリングの強化」および「緊急時モニタリング」に区分されている。

なお、この指針の適用範囲は、原子炉施設、再処理施設、加工施設、使用施設、廃棄物埋設施設及び廃棄物管理施設となっている。

2. 平常時モニタリング

平常時のモニタリングでは、以下の4点が具体的な目的であり、内容である。すなわち、

- (1) 周辺住民の線量推定とその評価
- (2) 放射性物質の環境での蓄積傾向の把握
- (3) 施設からの予期しない放射性物質や放射線の放出の早期検出と周辺環境への影響の評価
- (4) 異常事態もしくは緊急事態発生の場合の環境放射線モニタリングの実施体制の整備

である。各項目を簡単にいえば、(1)は、原子力施設に起因する放射性物質あるいは放射線による線量を推定して、1年間の線量限度を十分に下回っていることを確認することである。(2)は、施設の運転で放出された放射性物質の環境中での蓄積状況を把握することである。(3)

は、原子力施設の異常の早期発見である。(4)は、平常時モニタリングから、平常時モニタリングの強化、および緊急時モニタリングに迅速に移行して、対応できるように整備しておくことである。

第1表に、代表的なモニタリング調査内容を、また第1図には測定機器の選択のフローを示す。これらは平常時に対応しているが緊急時にも参考となるものである。

3. 平常時モニタリングの強化

平常時モニタリングの強化の目的は、過渡的な状態での措置に対処することである。すなわち、施設に異常事態が発生した場合、周囲の住民および環境への影響の有無やその大きさを迅速に把握すると共に、事態の原因や様態を明らかにして、緊急時モニタリングに備えることにある。

具体的な内容は次のとおりである。

(1) 空間線量率の監視強化

- (2) 大気放射性物質の監視強化
- (3) 気象観測の監視強化
- (4) 積算線量の監視強化
- (5) 移動サーベイの実施

これらは、必ずしもすべてを実施することが要求されているわけではなく、必要な項目でよい。また、中性子線放出の可能性があるときは、その測定も行うこととされている。

Ⅲ. 緊急時モニタリング

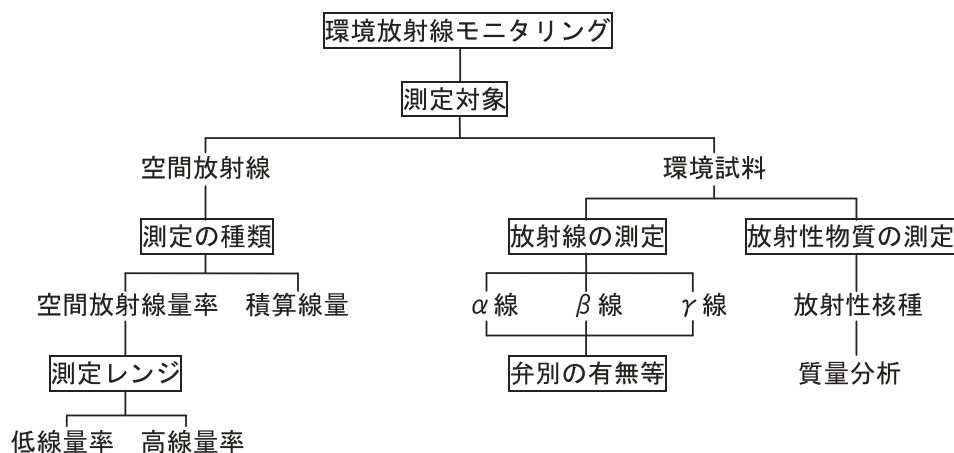
1. 目的

本稿の主題である「緊急時(環境)モニタリング」は、これまでに述べた平常時モニタリングとその強化の先に続くモニタリングであるが、その主目的は、緊急事態発生時に発動される放射線防護対策(屋内退避、避難、食物摂取制限など)の実施に必要な情報を収集して、周辺住民への影響を評価することにある。

第1表 代表的なモニタリングの調査内容

区分	調査対象	測定頻度	備考	
空間放射線	線量率	連続測定		
	積算線量	四半期ごとに測定	線量率からの算出も可能	
環境試料	陸上試料	大気	連続採取し測定 連続採取し1~3ヶ月毎に測定	ガスモニタ、ダストモニタ 浮遊じん等
		陸水	四半期ごとに採集し測定	飲料水等
		牛乳	必要に応じて採取し測定	I-131分析
		土壌	半年~1年ごとに採集し測定	表層土
		農産食品	収穫期に採集し測定	葉菜、根菜、米等
		指標生物	四半期~1年毎に採集し測定	ヨモギ、松葉等
		降水物、降水	1ヶ月毎に採集し測定	水盤法等
		海洋試料	海水	半年毎に採集し測定
	海底土		半年~1年ごとに採集し測定	表層土
	海産食品		漁期に採集し測定	
指標生物	四半期ごとに採集し測定		ホンダワラ等	

(注)空間線量率の測定は必要に応じてガンマ線エネルギーの測定を行う。また、環境試料は原則として核種分析を行う。



第1図 測定機器の選択のフロー

2. 役割

実施者は、国、地方公共団体、指定公共機関および当該事業者であり、それぞれが策定した防災基本計画に従って活動することである。

3. 計画と内容

緊急時モニタリングは、異常事態が発生した場合に、直ちに体制が立ちあがり、実施されなければ意味をなさない。そのための「緊急時モニタリングマニュアル」を整備しておく必要がある。この緊急時モニタリングマニュアルには、体制の整備、資機材の整備、実施方法について記載されていなければならない。

緊急時モニタリングは、第1段階モニタリングと第2段階モニタリングに区分される。具体的な内容は以下のとおりである。

第1段階モニタリング

緊急時発生時に迅速に行うモニタリングで、

- (1) 施設周辺の空間線量率と、大気中に放出された放射性物質(放射性希ガス、放射性ヨウ素、ウランまたはプルトニウム)の濃度の把握
- (2) 放射性物質の放出の影響を受けたと見られる環境試料中の放射性物質濃度の把握
- (3) 防護対策に資するための予測線量の迅速推定

である。

第2段階モニタリング

周辺環境に対する全般的影響を評価するためのモニタリングで、

- (4) (1)を継続するとともに、対象核種を増やすなど、より詳細な大気中放射性物質濃度の把握
 - (5) (2)を継続すると共に、対象核種を増やすなど、より詳細な環境試料中の放射性物質濃度の把握
 - (6) 被ばくしたと考えられる周辺住民の線量評価
- である。

4. 国の体制の整備

緊急事態発生時には、国レベルで、「原子力災害対策本部」と「原子力災害現地対策本部」が設置され、原子力災害現地対策本部には緊急時モニタリング情報の把握を担当する「放射線班」が置かれる。

放射線班の業務は、

- (1) 緊急時モニタリングデータの収集と整理
- (2) 地方公共団体災害対策本部への緊急時モニタリングの指導と助言
- (3) 緊急時モニタリングに必要な要員と資機材の調整
- (4) SPEEDIネットワークシステム^{a)}等の活用による被ばく線量予測の実施
- (5) 周辺住民の被ばく線量評価
- (6) 屋内退避、避難等の実施(解除)区域案の作成
- (7) 飲食物摂取制限の実施(解除)区域案の作成

(8) 飲食物摂取制限等の措置案のとりまとめ

(9) 原子力災害対策本部および地方公共団体の現地災害対策本部のモニタリング関係担当グループ(モニタリングセンター等)との連絡と調整

(10) 緊急時モニタリング等に関する合同対策協議会、記者発表資料の作成

等である。

5. 地方公共団体の体制

他方、地方公共団体では、緊急時モニタリング作業が的確かつ円滑に実施されるための組織として、モニタリングセンターとその指揮下に入るモニタリングチームの設置が効果的であるとされている。

モニタリングセンターの機能としては、

- (1) 計画立案、指揮、総括
- (2) 要員、資機材の配置など
- (3) モニタリング情報、気象情報の収集と解析
- (4) 地方公共団体の現地対策本部への報告
- (5) 原子力災害対策本部への報告

などがあり、モニタリングチームの果たすべき役割としては、

- (1) 緊急時モニタリングの実施
- (2) モニタリングセンターへの報告

などである。

6. 実施方法

緊急時モニタリングを迅速かつ有効に実施するためには、被ばく経路に配慮して、モニタリング段階ごとに測定項目、測定地点、試料採取地点、測定方法などについて、可能な限り前もって具体策を定めておくことが望まれ、それに従うことによって効果的なモニタリングの実施が可能となる。

実施に当っては、車両や可搬型モニタリングポストを有効に利用して機動性を高めること、さらに状況に応じて船舶や航空機の利用も必要となる。

以下に、第1段階と第2段階に分けて、詳しく述べる。

第1段階モニタリング

第1段階モニタリングは、先述したように、緊急事態発生直後から実施されるために、迅速性が第一に要求され、精度はそれほど要求されるべきでない。この結果は、放出源情報、気象情報、SPEEDIネットワークシステムからの情報とあわせて、予測線量の推定に用いられる。

測定項目は、

- (1) 空間放射線量率

^{a)}SPEEDI : System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information 緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム。原子力発電所などから放射性物質の放出など緊急事態に、周辺大気中の放射性物質濃度や被ばく線量を迅速に予測するシステム。

- (2) 大気中の放射性物質(放射性ヨウ素, ウランまたはプルトニウム)の濃度
 - (3) 環境試料(飲料水, 葉菜, 原乳および雨水)中の放射性物質(放射性ヨウ素, ウランまたはプルトニウム)の濃度
 - (4) 積算線量
- である。

測定地点と試料採取地点は, 気象条件と SPEEDI ネットワークシステムによる予測結果等を考慮して選定する。すなわち,

- (1) 最大空間放射線量率出現予定地点とその近傍の地点
- (2) 大気中の放射性物質の最大濃度出現予定地点とその近傍の地点
- (3) 風下軸を中心とした約60度の範囲において, 大気中の放射性物質の最大濃度の出現予定地点を通り, 風下軸と直行する線上の地点
- (4) 風下方向の人口密集地帯, 集落, 退避施設等で地点数は人口分布等から決定

であるが, 退避等の措置が取られた場合には, 退避施設等において環境モニタリングを実施することも決められている。

第2段階モニタリング

第2段階モニタリングは, 事故状況の予測が確実となり, 放射性物質あるいは放射線の放出も減少してきた段階で開始される。したがって, ここでは迅速性よりも正確さが必要となる。そのために, 実施範囲は第1段階よりも広範囲に, また実施頻度も放射性物質あるいは放射線の放出が終わった後も, 1日から数日の間隔で行われなければならない。この結果は, 住民等の線量評価と環境中の放射線状況の把握, および各種の防護対策の解除に用いられる。

測定項目は,

- (1) 空間線量率
- (2) 大気中の放射能濃度
- (3) 環境中の放射性物質濃度: 第1段階のモニタリング試料に加えて, 土壌・植物, 農作物, 原水(河川, 浄水場等), 魚介類(河川, 海洋への放出がある場合)となっている。特に注意する点として, 環境中に放出された放射性物質の経時変化を追跡する必要のある試料等については, 一定時間間隔で試料採取と測定を行うことが求められている。

7. 線量等の推定と評価

緊急時においてなすべきことは, まず, 計算によって周辺環境の放射能濃度並びに住民の予測線量を推定し, 次いで, モニタリング結果による実際の放射性物質濃度と線量を評価することである。なお, 予測線量とは, 放射性物質や放射線の放出量, 気象条件等から, 防護対策

を全く講じなかった場合に, その地点に留まっている住民が受けると考えられる推定線量である。当然のことながら, 予測線量は状況の変化に伴って変更する。

予測線量分布図の作成

予測される放射性物質の濃度および予測線量の情報を得るための計算手法は, 電子計算機を用いた詳細計算法(SPEEDI ネットワークシステム)と, 図表等を用いた簡易計算法がある。

詳細計算法では, リアルタイムで気象データを受け, 地形等あらかじめ作成・保存されている各種のデータベースを使って, 大気中で移流・拡散する放射性物質の濃度分布, 線量分布などが計算され, 図形表示される。緊急時では, 放出源情報を仮定して計算することも可能である。

簡易計算法では, SPEEDI ネットワークシステムによるオンライン情報が得られない場合に, 大気拡散計算式に基づいた計算結果から作図する。

8. 予測線量の推定

防護対策を講ずる観点からは, 予測線量を迅速に推定する必要がある。その場合, 施設の種類によって状況が異なるので, 以下の2つのケースに分けて記す。

原子炉施設等の場合

原子炉施設等についての線量評価は, 主に放射性希ガスによる外部被ばくの実効線量と放射性ヨウ素の内部被ばくによる甲状腺の等価線量から推定する。その理由は, 原子炉は多重防護壁により遮蔽されているため, 直達放射線はほとんど考慮する必要がなく, また, 固体・液体の放射性物質が広範囲に漏洩する可能性が少ない。漏洩の可能性の高い放射性物質は, クリプトン, キセノンの希ガスと揮発性の放射性ヨウ素である。また, これらに付随するエアロゾルも大気中で移動するため, 前者と同様の対策で対応できる。

核燃料施設の場合

核燃料施設では, 火災, 爆発, 漏洩などにより, ウランやプルトニウム等がエアロゾルの形で放出されることが想定される。この場合, プルームの形で放出・拡散のほかに, 爆発に伴う直接的な放出と量の多さに着目する必要がある。なお, 粒子状物質はガス状物質よりも比較的早く沈降すると考えられる。

また, 臨界事故が発生した場合は, 中性子線, ガンマ線による被ばくについて配慮する必要があるが, 放射線の強度は距離のほぼ逆2乗に比例して減少することから, 影響は近距離に限られる。臨界事故でも, 形態によっては放射性希ガスによる外部被ばくや放射性ヨウ素による甲状腺の等価線量の推定も必要となる。

9. 予測線量推定の注意点

予測線量は, 迅速性が求められる半面, 精度が疎かに

されがちである。ここでは、予測線量を推定する際に必要とされる注意点を挙げる。

- (1) 放出源情報(正確な放出量, 放出核種組成, 性状, 放出継続時間)の入手とその確認
- (2) 不十分な放出源情報による計算結果の不確実性に対する認識と周知
- (3) 図形作成時における迅速性と精度のかね合せ
- (4) モニタリング値による計算値の逐次修正と計算図形からモニタリング値の補完
- (5) 計算結果の信頼性に係る情報(日時, 出所情報など)の付記

これらは、ともすれば現場の忙しさに紛れて見逃すことがあり得るが、冷静な判断と沈着な行動により行われなければならない。

IV. おわりに

緊急時の環境放射線モニタリングの考え方とその実施方法について、原子力安全委員会の指針に基づいて解説した。

今回の福島第一原子力発電所の事故における緊急時モニタリング対応をみたとき、ここに記載されている事項・手法のかなりの部分はしかるべく対応できたが、そうでなかった部分もある。たとえば、施設の分類そのものが、これに当てはまらなかった。原子炉がメルトダウンし、また水素爆発をして原子炉の多重防護機能が破られたこと、使用済み燃料貯蔵プールからの放射性物質の放出があったことなどで、これはまさに環境モニタリング指針では想定していない事象であったといえる。

個別対応では、SPEEDI ネットワークシステムの運用に関しては、その予測機能が謳われているにもかかわらず、必ずしも十分な情報が迅速に提供されなかった。これについては、線源情報の不確かさなどが理由として挙げられているが、地域住民の安全に資することが課されているモニタリングにあっては、ハードとソフトの両面から十分な検証が行われなければならない、必要な改善は

迅速になされるべきであろう。さらに、モニタリング指針では、迅速な情報公開が指摘されているにもかかわらず、理由はともあれ、遅れたことも遺憾なことであった。また、情報の一部が公表されなかったなどのうわさもあるが、このようなうわさが出ること自体が問題であろう。

このように問題点が多々指摘されるものの、自治体、大学、各研究機関等で測定されたモニタリングデータが文部科学省で一元的にまとめられることで、緊急時における環境放射線モニタリングは何とか遂行され、防災活動に活かされてきたことは疑いのないことである。今後、かなり長期にわたって継続すると考えられる状況に対して、適切で着実かつ正確なモニタリングが求められることはいうまでもない。そのためにも、今回の稀有な事故に際して、当初うまく対応できなかった不備の点については、修正すべき点は迅速果敢に修正していく必要がある。

—参考資料—

- 1) 原子力安全委員会, 環境放射線モニタリング指針, 平成20年3月.
- 2) 文部科学省, 放射能測定法シリーズ.
- 3) 茅野政道, “原子力と大気拡散研究”, 日本原子力学会誌, **32**, 1080-1086 (1990).
- 4) 吉田宏明, 永井晴康, 古野朗子, “緊急時環境線量情報予測システム(世界版)WSPEEDI 第2版の開発”, 日本原子力学会和文論文誌, **7**, 257-267 (2008).

著者紹介



下 道國(しも・みちくに)
藤田保健衛生大学
(専門分野/関心分野)環境放射線, 特にラドンとその子孫核種の測定技術の開発および各種環境での測定・解析と放射線防護。

福島第一事故後の諸外国の原子力開発政策

(財)日本エネルギー経済研究所 村上 朋子

福島第一原子力発電所事故は世界の多くの国で論議を巻き起こしたが、新設・既設運転延長計画を凍結する国もある一方、基本的に原子力推進方針に変更はないとする国も見られる。原子炉の安全確保が厳しく注目される中、今後の原子力開発を巡る実際の状況は、各国個別に、エネルギー・環境・経済・産業等の様々な状況を踏まえた展開となると予想される。

I. 各国の原子力発電開発動向による分類

2011年5月現在、原子力発電は世界30ヵ国で利用されているが、その位置づけや今後の開発方針は各国の置かれたエネルギー・経済・産業のマクロ状況により異なる。

第1図に、世界主要国(地域)の既設原子力発電設備容量と今後2035年までに新設が予想される設備容量によるマッピングを示す。横軸が国(地域)別設備容量(2009年末現在)であり、縦軸が今後2035年までに追設されると予想される設備容量である。

このマッピングの意味するところ及びカテゴリー分類は以下の通りである。

- (1) 原子力利用・推進国： エネルギー自給率向上や戦略的産業成長戦略の観点から、原子力発電を国内で積極的に開発推進し、海外への展開も積極的に

行ってきた国。国内での新設必要数は国により差があるが、原子力産業を戦略的産業とする位置づけは共通している。

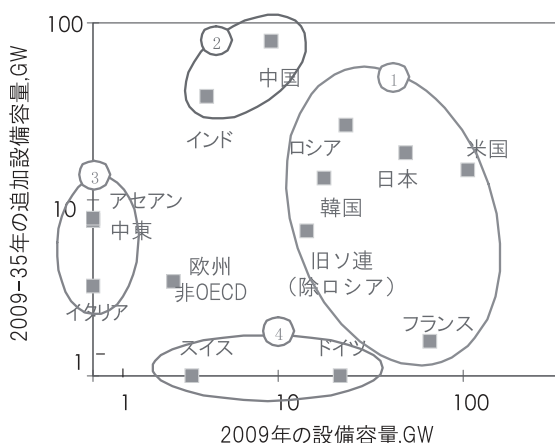
- (2) 原子力高成長国： エネルギー需要増に応じて今後、大規模な増設を必要とする国。
- (3) 新規導入検討国： これまではエネルギー事情の上で特に原子力に頼らずとも成立したが、今後はエネルギー需要増・化石燃料資源の温存等から、原子力導入を計画中の国。
- (4) 脱原子力傾向国： すでに原子力をエネルギー・ポートフォリオとして有しており、これ以上の拡大を差し当たりさほど必要としていない国。

II. 福島第一原子力発電所事故に対する各国の反応・政策対応の現状

1. 原子力利用・推進国(米国・フランス・韓国・ロシア)

米国エネルギー省は3月15日、低炭素化に向けたエネルギー・ベストミックスを志向するエネルギー政策基本方針に変更はないことを発表し、併せてそのために日本での事故から多くの教訓を学び、安全性向上の努力を維持していくことを明言した。事業者の撤退表明により中断中の新設プロジェクトも見られるが、これは事故をきっかけとしてというより、事故以前から顕著になっていた建設費高騰と資金負担によるものであり、「事故がルネサンスを後退させた」とは見られない。

フランスではサルコジ大統領が、事故直後から国内原子力施設の安全性確認を進めるとともに、フランスにとって「エネルギー自給のため、原子力を放棄することはあり得ない」と述べている。ロシアのプーチン首相は事故後直ちに自国の原子炉安全性総点検をロスアトム・キリエンコ長官に指示しているが、これも自国内での原子力維持を前提としたものである。韓国政府は5月6日開催した原子力委員会で、国内原子炉施設の安全性点検の結果、設計・運転の安全性を確認したと発表し、併せて最悪の自然災害が発生しても原子力発電所が安全に運



(出所)「世界の原子力発電開発の動向2010」, 日本原子力産業協会, 2010年4月 及び「アジア/世界エネルギーアウトルック」, (財)日本エネルギー経済研究所, 2010年10月
第1図 世界主要国における現・原子力発電設備容量および今後2035年までの追加設備容量見通し

Recent Nuclear Policy Trends in Major Countries Post Fukushima Accident : Tomoko MURAKAMI.

(2011年 5月16日 受理)

営されるよう50項目の安全改善対策を提示している。

以上のように、これらの国では原子力の一層の安全性向上を図りつつ、原子力を重要なエネルギー源と位置付けてその利用を維持していく基本方針に変化は見られない。

2. 原子力高成長国(中国・インド)

中国国務院は3月16日、日本の事故を受けて自国の原子炉施設の安全性を点検すること、その点検完了まで現在審査中の新設計画を含む中長期計画を見直すを発表した。これにより、ハイペースで進んでいた「2020年までに8,600万kW」の計画実現可能性は低くなるが、長期的に推進していく方針に変更はなく、建設中の嶺澳発電所では計画通り2011年6月から営業運転に入る見通しである。インドではシン首相が4月26日、積極的な開発政策を維持する方針を改めて表明するとともに、国内の原子力発電所の安全性評価などを行う独立機関を設置する法案の準備に着手すると発表している。

以上のように、両国においては、エネルギー需要増大とそれに見合う供給力確保の必要性に基づき、安全性確認のため若干はその速度が遅くなる可能性はあっても、長期的な開発促進を進める方針に変更はない。

3. 新規導入検討国(UAE, トルコ, ベトナム, インドネシア等)

このカテゴリーに類する国の反応は様々である。アブダビの水・電力省大臣は事故後、「再生可能電源拡大だけでは急増する電力需要に追いつかない」ことを理由に「原子力は我が国に導入すべき技術であり、2017年に最初の1基を運転開始する計画に変更はない」と明言している。ロシアのメドベージェフ大統領は事故直後の3月16日、トルコのエルドアン首相と面会し、ロシア製原子炉の同国への導入に関して面談している。ベトナムの原子力関連省庁は3月16日、自国の原子力導入計画に関するメディアへの説明会場で「ニントゥアン省での建設計画は国が承認したものであり、計画に変更はない」と、安全対策を徹底した上で実施する決意を明らかにした。5月6～8日にインドネシアのジャカルタで開かれた東南アジア諸国連合(ASEAN)首脳会議では、域内の原子力問題で情報共有と透明性の向上で一致するとともに、開発にあたっては国際原子力機関(IAEA)の安全基準を適用する方針が確認されているが、積極的な開発の意思を有する国が依然多いことがその背景にある。

これらの動きからは、電力需要増大などのエネルギー事情やすでに具体的な建設計画が決定されている新規導入国では、安全性を確認しつつ、当該計画を進めていく意向が基本的に示されているといえる。ただし、上記の条件に合わない国においては、原子力開発に対して慎重な姿勢が強まっていることも事実である。

4. 脱原子力傾向国(ドイツ, スイス等)

これらの国では一様に厳しい原子力見直し議論が起こっている。

最も迅速な反応を見せたのはドイツであり、事故からわずか3日後の3月15日、メルケル首相は昨年、閣議決定したばかりの国内原子力発電所の運転延長についてモラトリアムを宣言し、7基の既設炉が直ちに停止された。その後5月30日、2022年までの国内原子力発電所全廃止で連立与党が合意している。スイスでも5月25日、国内原子力発電所5基を2034年までに廃炉する国家目標を決めた。既設の原子炉の安全性に係る懸念は欧州全域に広まっており、3月21日ブリュッセルでEUエネルギー相緊急会合が開催され、EU域内で運転中の全ての原子力発電所を対象とした安全性検証(Stress Test)が実施されることとなった。5月24日、大規模な自然災害および人為的事象に耐えられることとした仕様が決定したが、欧州電力各社ではこれに先立ち独自に安全性検証を進めている。

脱原子力議論が巻き起こる中での課題は、欧州の多くの主要国では相当なシェアの既設原子炉が運転中であり、代替エネルギー源の確保なくしては早期の脱原子力は現実的ではないことである。既設炉の「安全性検証」は原子力の継続利用を前提としている、少なくとも継続利用を念頭に置いていなければあり得ないことを考えれば、迅速に全廃を決定したドイツおよびスイスにおいても、今般の影響によって直ちに原子力利用が放棄されるような状況にはない。また新設凍結については、事故が直接の引き金となったというよりも、コスト競争力や他エネルギー動向との相対的な関係により一進一退を繰り返してきた論議が、今般事故を受けて後退のほうに振れていると表現するほうが妥当であろう。

Ⅲ. 総括

以上を総括すると、原子力を重要なエネルギー・ポートフォリオと位置付けている国においては、原子力を重視する基本方針は維持されているが、原子力に関してもともと慎重な姿勢を見せてきた国においてはその慎重な傾向がより強まっている。今回、事故から世界各国が教訓を学び、原子力発電の安全性確保に対する要求が一層高まる中、強化される安全基準を満たしていくことが、今後の重要な要件となる点では共通しているが、原子力発電が各国のエネルギー・経済状況、各国におけるコスト競争力等に基づいて選択されていく(選択されない)ことに今後とも変わりはないと考えられる。

著者紹介



村上朋子(むらかみ・ともこ)
日本エネルギー経済研究所 戦略・産業ユニット原子力グループリーダー
(専門分野)企業経済学, 企業財務分析, 原子力工学

IAEA が福島事故で調査報告

福島第一原子力発電所で起きた事故の原因や、この事故から得られる教訓などを調べていた国際原子力機関(IAEA)の調査チームは6月1日、福島第一原子力発電所の事故に関する報告書の暫定的要旨を公表した。報告書では、事故に対する日本政府や発電所スタッフの対応が妥当だったと評価する一方で、津波の災害が過小評価されており、原子力プラント設計者と事業者はこれらの自然災害のリスクを最新の手法で評価するよう求めている。また安全規制については、規制者の独立性と役割の明確化を指摘した。報告書の要旨は以下の通り。

◇

3月11日に地震が発生した直後、運転中だった福島第一原子力発電所の原子炉は自動的に停止し、すべての緊急ディーゼル発電システムが設計どおり作動した。その後、大規模な津波がサイトに押し寄せた。発電所の防御施設は最大5.7メートルの津波に持ちこたえるよう設計されていたが、やってきた津波のうち、最大のは14メートル以上(=写真、東京電力提供)と推定された。津波は発電所の全交流電源喪失と、すべての機器とコントロール・システムの喪失をもたらし、1機だけ被害を免れた緊急ディーゼル発電機(6B)は、5、6号機間で共有される形で非常電源を供給する状況になった。

津波はこの発電所のインフラを破壊した。運転員は電源も、炉の制御も、機器も機能しない状態に加え、発電所内外の通信システムも甚大な影響を受けるという先例のない緊急事態に直面した。彼らは暗闇の中で6基の炉や燃料プール、貯蔵施設の安全を確保するために作業しなければならなかった。

原子炉を制御できず冷却する手段がない状態で、3つの原子炉内の温度は崩壊熱によって急速に上昇。運転員が冷却を行うために勇敢でかつ時には前例のない取組みを実施したにもかかわらず、燃料の重大な損傷と一連の爆発が生じた。



なお今日まで、今回の原子力事故による放射線被ばくの結果として人が健康上の影響を受けた事例は報告されていない。

またIAEAはこの事故から、原子力安全向上に資する下記の教訓を得た。

- ・地震後の非常に困難な状況下における運転員による献身的で強い決意を伴った専門的対応は模範的であり、非常事態を考慮すれば、結果的に安全を確保する上で最善のアプローチとなった。これは後方支援、とりわけ作業員の安全確保のための拠点であるJプレッジにおける対応が大きな助けとなっている。
- ・日本政府による避難や公衆を保護するための長期的な対応は見事であり、非常によく組織されている。公衆や作業員の被ばくに関する適切で時宜を得たフォローアップ計画や健康モニタリングは有益であろう。
- ・損傷した原子炉の復旧のために計画されたロード・マップは重要であり、認知されている。これは、避難した人々が通常の生活を再開することを可能とする計画の一部とみなされる。
- ・いくつかのサイトにおいては、津波というハザードが過小評価されていた。原子力発電所の設計者及び運転者はすべての自然のハザードの危険性を適切に評価し、これに対する防護措置を講ずるべきであり、常に最新の知見を踏まえてそれらを更新すべきである。
- ・原子力規制の制度は、それらに適切に対処するとともに、IAEA安全基準に沿って規制の独立性や役割の明確さが維持されるようなものとすべきである。
- ・深刻かつ複合的な外的事象に対する緊急時対応は設計、運転、資源の調達面も十分に考慮すべきである。また緊急時対応の中でも初期段階の対応は、シビア・アクシデントにしっかりと対応できるように設計されるべきである。
- ・この事故は、敷地内の堅固な緊急対応センター(免振重要棟)が適切な通信手段と重要なプラント・パラメータ、コントロールおよびリソースを十分に備えたものであったことを立証している。このような施設は、潜在的にシビア・アクシデントが起きる可能性のあるすべての主要な原子力施設に設けられるべきである。
- ・IAEA調査団は、国際的な原子力コミュニティに対し、世界の原子力安全について学び、これを改善することを追求すべく、福島の事故によって生み出されたこの比類ない機会を活用することを要請する。

文明の先を見据える



総合研究大学院大学 先端科学研究科教授

長谷川真理子 (はせがわ・まりこ)

東京大学大学院理学系研究科人類学専攻博士課程修了。専修大学教授、早稲田大学教授を経て、2006年から現職。専攻分野は行動生態学、進化生物学。著書は「進化とは何だろうか」、「ダーウィンの足跡を訪ねて」など。

この巻頭言を気楽にお引き受けしたのは今年の12月ごろだったろうか？ 原子力の専門家ではない私が何を書こうかとあれこれ考えているうちに、3月11日の震災と、それに続く福島原発の事故が起こった。この未曾有の出来事のあとに、私は何を言うべきなのか、まずは言葉を失い、その後はずっと悩み続けている。

震災から1ヶ月ほど経ったころ、あるところから、東北の被災者の方々に対する励ましのメッセージを何か書いてくれという依頼を受けた。しかし、私は辞退申し上げた。こうしてまだ何不自由なく東京で暮らしている私に、励ましなどを言う資格はないように思えた。

私は自然人類学の出身であるが、長らく、ヒトを含む動物の行動と生態を野外で研究してきた。アフリカ、マダガスカル、スリランカ、スコットランドのセント・キルダ島など、いろいろな僻地で調査を行なった。そのほかにも趣味で、ガラパゴス諸島や北極圏などを旅してきたし、早稲田大学に勤めていたときには、地質学の先生たちと一緒に、学生実習でグランドキャニオン周辺を広くめぐった。世界のさまざまな場所での環境破壊の様子は、ずいぶん見てきた。

私の研究分野は、広い意味の生態学の一部であり、地球環境問題に関しても、生態学者の立場からかかわってきた。生態学的に見て、ヒトという種は異常なことをしている。つい先頃、世界人口は70億に達したそうだが、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。これほどの勢いで、しかもヒトのような大型動物が増え続けるのは、明らかに異常である。

ヒトはその進化史のほとんどを狩猟採集民として暮らしてきた。つまり雑食動物である。植物は光合成によって栄養を蓄える。草食動物は植物を食べ、肉食動物は他の動物を食べる。この食物連鎖は、エネルギーの流れであるので、草食動物のバイオマスは植物のバイオマスよりも少なく、肉食動物のバイオマスは草食動物のバイオマスよりも必然的に少ない。雑食動物は、草食動物と肉食動物の間である。

動物がどれほどのエネルギーを必要とするかは、その動物の体重と関連しており、体重が重くなるほどエネルギー必要量は多くなる。そこで、1平方キロメートルの中にどれほどの数の動物が住めるのかは、動物の食性と体重で決まることになる。横軸に動物の体重を、縦軸に1平方キロ内に住める個体数をとると、その関係は、草食獣と肉食獣と2つのグラフが描ける。雑食動物はその2本の間の中間のグラフになるとして、ヒトの体重を60キロとして、グラフの縦軸をなぞると、1平方キロに1.2人という数字が出てくる。事実、狩猟採集民の人口密度はそのくらいである。ところが現在の地球上では、全体で平均して1平方キロに44人が住んでいるのである。これは異常である。

それもこれも、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。右肩上がりの経済成長を大前提として、すべてが設計されてきたこれまでの社会システムは、そろそろ終わりであろう。

それとは別に、私は、原子力発電に対し、廃棄物に関する根本的な解決を持ち合わせないこと、万一事故が起きたときのコストがあまりにも大きいこと、の2つの点から疑問を持ち続けてきた。しかし、そんなことを言っているだけでも、生物として分不相応な暮らしを続けていく限り、状況は変わらない。

この先のヒトの生活を見直し、文明の先を見据えることは、非常に重要である。肝要なのは、それを実践する気が本当にあるのか、ということだろう。

(2011年 5月6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。

政府、災対法に基づき20キロ圏内を「警戒区域」に

政府の原子力災害対策本部は4月21日、福島第一発電所から半径20キロメートル圏内を、災害対策基本法に基づく「警戒区域」に、翌22日には、同20キロメートル以遠の区域に、「計画的避難区域」と「緊急時避難準備区域」を設定、関係自治体の首長に指示を出した。

福島第一発電所から半径20キロメートル圏内はこれまで、原子力災害特別措置法に基づく「避難指示区域」に設定されていたが、圏内の安全・治安確保のため、応急対策に従事する公務員等以外が市町村長の許可なく立ち入れない「警戒区域」として、入域管理が強化されることとなった。

さらに、発電所から20キロメートル以遠の区域で、放

射線の積算線量が1年間に20mSvに達する可能性のある地域を考慮し、約1か月を目途に避難を求める「計画的避難区域」と、緊急時に屋内退避や自力での避難を求める「緊急時避難準備区域」を設定した。「計画的避難区域」、「緊急時避難準備区域」いずれも、福島県内の5市町村が該当している。これに伴い、福島第一から20～30キロメートル圏内に出されていた屋内退避指示は解除された。また、発電所から30キロメートル以遠の地域で「計画的避難区域」に設定された飯舘村と川俣町には、関係行政庁の職員からなる現地政府対策室を設置し、地元自治体と連携を取りながら、住民対応に当たることとしている。

文科省が積算線量推定マップと放射線量等分布マップを作成

福島原子力発電所事故対策統合本部の共同記者会見で4月26日、文部科学省は来年3月11日までの空間線量率の積算線量推定マップと避難区域20キロメートル圏内の土壌濃度の測定結果を初めて発表した。

空間線量率の1年間の推定は、原子力安全委員会が試算した際の推定方法である屋外滞在8時間と屋内滞在16時間における木造家屋の低減効果(0.4)を考慮して推計する(0.6をかける)方法を採用。現在の線量率は、今後減衰せずに1年間続くと仮定した。3月17日の放射能分布状態や、風向き、気象状況が大きく影響している。

◇ ◇

また文部科学省は、関係機関との連携により、福島第一原子力発電所事故の全体像を把握するとともに、周辺住民らの計画的避難区域等設定の評価に資するため、「放射線量等分布マップ」の作成など、環境モニタリングの取組を強化することとした。同省、内閣府、経済産業省

が4月22日に共同会見を行い、「環境モニタリング強化計画」として発表したもの。

このほど取り組むこととなった「環境モニタリング強化計画」は、事態がまだ収束していない中で、発電所周辺を含む適切な範囲での放射性物質の分布を把握、今後の各応急対策実施区域における線量評価や放射性物質の蓄積状況評価を準備し、周辺住民の被ばく線量評価にも資する。

同計画では当面、事故収束後の移行を視野に、①現状の放射性物質の分布状況を把握する「線量測定マップ」、②年間20mSvを基準とした事故発生後1年間の積算線量を推定する「積算線量推定マップ」、③「土壌濃度マップ」——を作成するほか、航空機サーベイ、海洋エリアでの放射性物質の拡散予測、水産資源の調査も実施する。

原子力損害賠償審査会、損害範囲の判定で1次指針

福島の原子力災害に係わる「原子力損害賠償紛争審査会」(会長＝能見善久・学習院大学法務研究科教授)は4月28日、損害範囲の判定に関する第1次指針を策定した。同審査会は、原子力損害賠償法に基づき文部科学省に設置されたもの。

第1次指針ではまず、政府による指示に基づく行動等によって生じた一定範囲の損害について、基本的考え方

を示している。具体的には、「政府による避難等の指示に係わる損害」として、「避難費用」、「営業損害」、「就労不能等に伴う損害」、「財産価値の喪失または減少等」、「検査費用(人)」、「検査費用(物)」、「生命・身体的損害」、「精神的損害」を、「政府による航行危険区域設定に係わる損害」として、「営業損害」、「就労不能等に伴う損害」を、「政府等による出荷制限指示等に係わる損害」とし

て、「営業損害」、「就労不能等に伴う損害」を対象とした。

政府の避難指示に係わる損害については、住民が負担した移動費用、宿泊費などが賠償の対象となるが、体育館などに設定された緊急避難所への宿泊の場合は、実費負担が発生しなくても、ホテル・旅館より、不便な生活による精神的苦痛も大きいことが考えられることから、「精神的損害」とも兼ね合わせて検討していくこととなった。

農産物や水産物の出荷制限指示に係わる損害について

原子力損害賠償の支援枠組決定、事故に備え「機構」設立

政府・原子力発電所事故経済被害対応チームは5月13日の関係閣僚会合で、福島原子力発電所事故の損害賠償に関する政府支援の枠組みを決定した。原子力損害賠償の支払いに対応する機構を新設し、必要な資金を融通させ、被害者からの相談に当たるほか、将来の原子力災害に備え、東京電力以外の原子力事業者も参加させる。

これに先立ち、海江田万里経済産業相(原子力経済被害担当)は10日、東京電力からの国に対する原子力損害賠償に係わる支援要請を受け、(1)賠償総額に事前の上限を設けることなく迅速かつ適切な賠償を確実に実施、(2)原子力発電所の状態の安定化に全力を尽くすとともに従事者の安全・生活環境・経済面にも配慮、(3)電力の安定供給と設備の安全性を確保するために必要な経費を確保、(4)最大限の経営合理化と経費削減、(5)政府が設ける第三者委員会の経営財務の実態調査に応じる、(6)金融機関から得られる協力の状況について報告——について同社より確認した。

その上で、政府として、法令の枠組みのもと、国民負

担の極小化を図ることを基本に、東京電力に対する支援を決めた。

具体的な枠組みとしては、所要の法整備が必要となるが、まず原子力損害が発生した場合の賠償支払いに対応する機構を設け、原子力事業者である電力会社を基本に参加を義務付け、十分な資金を確保し、機構は、賠償のために資金が必要な事業者に対し、援助を行う。政府は、機構に対し、交付国債の交付、政府保証の付与等、必要な援助を行うが、援助する事業者に対して、一定期間、経営合理化等について監督する。援助を受けた事業者は、毎年の事業収益等を踏まえて設定される特別な負担金を支払う。

今回の枠組み決定に伴い、電力事業形態のあり方を含め、エネルギー政策の見直しを検討し、所要の改革を進めるとともに、一定期間後に、被害者救済、電力の安定供給、金融市場の状況など、必要に応じ、追加的措置を講ずることとしている。

中部電力の浜岡発電所が全号機停止へ

中部電力は5月9日の臨時取締役会で、菅直人首相から海江田万里経産相を通じて要請された浜岡原子力発電所の全機運転停止を受け入れることを決めた。今夏の電力需給状況は厳しいものになるものの、早急に防波壁の設置など津波対策の強化策を実施し、「中部地域への電力の安定供給のために早期の運転再開をめざす」としている。

菅首相は5月6日、記者会見を開き、「浜岡原子力発電所のすべての原子炉の運転停止を中部電力に対して要請した」とし、その理由として、文部科学省の地震調査研究推進本部の評価で、「これから30年以内にマグニチュード8程度の想定東海地震が発生する可能性は87%と極めて切迫している」と説明した。

首相は他の原子力発電所との立地の違いを強調し、「浜

岡原子力発電所の置かれた特別な状況を考慮するならば、想定される東海地震に十分耐えられるよう、防潮堤の設置など、中長期の対策を確実に実施することが必要だ」と述べた。さらに首相は「国民の安全と安心を守るためには、こうした中長期対策が完成するまでの間、現在、定期検査中で停止中の3号機のみならず、運転中のもの(4号、5号機)も含めて、すべての原子炉の運転を停止すべきと私は判断した」と説明した。

浜岡原子力発電所(静岡県御前崎市)は中部電力の唯一の原子力発電所サイトで、1、2号機はすでに廃止措置が取られており、3～5号機の合計出力は361万7,000kW。想定東海地震の想定震源域の中心部に位置しているため、3～5号機ではさまざまな耐震裕度向上工事を行ってきている。

菅首相、事故調査委の包括的な検討とエネ政策の見直しに言及

菅直人首相は5月10日、東日本大震災の発生2か月に当たり記者会見を行い、浜岡原子力発電所の運転停止要請を中部電力が早期に受け入れたことについて感謝するとともに、電力不足に対する国民の協力を求めた。

また菅首相は現在、原子力事故調査委員会発足の準備を進めており、発足にあたり、(1)従来の原子力行政からの独立性、(2)国民および国際的にも事実をしっかりと伝える公開性、(3)技術分野に限らず、様々な制度や組織的な

過去の在り方が今回の事故に及ぼした影響を含めて検討する包括性——を原則としたいと述べた。

今後のエネルギー政策については、今回の事故や地球温暖化問題も踏まえて、原子力と化石燃料という2つの柱に加え、太陽・風力・バイオマスなど再生可能な自然エネルギーと省エネ社会の創造がエネルギー政策の柱になりうるとの考えを示し、「エネルギー政策全体の見直しの議論を進めていきたい」と強調した。

東電、1号機は滞留水利用し循環冷却へ

東京電力は5月17日、福島第一原子力発電所事故の収束に向けた取組の進捗状況を発表した。4月17日に、同社は事態収束に向け進めていくべき課題を、3か月程度(7月中旬目途)の「ステップ1」、続く3～6か月程度の「ステップ2」に区分して取りまとめており、1か月経過したことから、これまでの総括と合わせた改定版として示した。

前回、各ステップで目標に掲げた「放射線量が着実に減少傾向になっている」、「放射性物質の放出が管理され、放射線量が大幅に抑えられている」に変更はないが、冷却、抑制、除染・モニタリングの3分野と、原子炉、燃料プール、滞留水、大気・土壌、測定・低減・公表の5課題に対し、改定版では余震対策等、環境改善の2分野と、地下水、津波・補強・他、生活・職場環境の3課

題を追加し、計5分野・8課題に再整理している。

原子炉関連では、作業環境整備後、1号機原子炉建屋に入り、内部状況を確認したところ、格納容器から冷却水の漏れが判明したため、「ステップ2」での冷温停止状態に向けた主対策として、建屋等に滞留する汚染水を処理して、原子炉注水に再利用する「循環水冷却」の確立を、冠水作業(燃料域上部まで格納容器を水で満たす)に先んじて実施することとした。

一方、滞留水は増加傾向にあり、処理施設の運転開始と、「循環注水冷却」の早期確立による抑制が重要課題となってきており、同時に、海洋汚染拡大防止対策の強化や、地下水の汚染拡大防止に向けた諸対策が追加された。

世界で436基が運転中、原産協会が「世界の原子力発電開発動向」まとめ

日本原子力産業協会は5月18日、『世界の原子力発電開発の動向2011年版』を刊行した。同協会が世界の電力会社等から得たアンケートの回答などにに基づき、2010年1月1日現在のデータを集計。今日の原子力業界を俯瞰できる内容となっている。

本書によると、世界全体の原子力発電所基数は436基

で、出力は3億9,920万3,000kW。新規に営業運転を開始したのは、拡大傾向著しいインドと中国、およびロシアの5基だった。

問合せは、原産協会(電話03-6812-7103)情報コミュニケーション部まで。

(上記の資料提供はすべて日本原子力産業協会)

海外情報

(情報提供：日本原子力産業協会)

[国際]

潘基文・国連事務総長が安全強化の具体策を勧告

国連の潘基文事務総長は4月19日、福島第一原発事故の影響を国連の全組織を挙げて調査するなど、原子力の今後の安全性強化のために具体的かつ実用的なステップ5項目を世界に呼びかけた。ウクライナのV・ヤヌコビツ

チ大統領の主導で開催された「安全で革新的な原子力エネルギーの利用に関するキエフ・サミット」の席で明らかにした。25年前に同国で起きたチェルノブイリ事故を振り返るとともに、福島第一原発事故発生を契機に、最大限の安全性と平和利用を同時に保証するにはどうしたらいいか、世界全体がこの基本的な問題を再考すべき時が来ていると訴えた。

同事務総長はまず、2つの事故が残した教訓は様々に異なっても、住民の健康と環境への直接的な脅威とな

り、経済破壊を引き起こしたほか、農産物の取引にも被害を与えるなど、どちらも憂慮すべき課題と恐怖を提起したと指摘。原子力ではこうした影響が国境を越えるという性質上、将来的に安全性を強化していくには次の5点が必要だと提唱した。

- (1) 国レベル、国際レベルで安全基準の徹底的なレビューを行い、各国が事故の教訓を勘案して可能な限り厳しい基準が適用されるよう対策を取る。
- (2) 安全問題における国際原子力機関(IAEA)への支援を強化する。この意味で、福島事故の早急な収束をIAEAの天野事務局長に改めて要請したい。
- (3) 地球温暖化が極端な気象状況を引き起こすという観点から、天災と原子力安全の新たな結付きを一層重要視していく必要がある。原子力発電所は地震や津波、火事や洪水などの全てに耐えねばならない。
- (4) 原子力の費用対効果分析を改めて実施しなくてはならない。核不拡散体制下で原子力を平和利用する権利が守られるよう、国連は福島事故の影響を全機関体制で調査する考えだ。
- (5) 原子力発電所の安全性とセキュリティは明らかに異なる問題だが、一方を促進すればもう片方も増強されるため、これらの結びつきを一層強める必要がある。

潘事務総長はこれらのステップこそ、21世紀のエネルギー問題に一層周到に取り組む方法だと強調。チェルノブイリと福島の悲劇が過去の物となるよう力を合わせようと締めくくった。

OECD/NEA, RI の供給保証で「各国の協調必要」と提言

経済協力開発機構・原子力機関(OECD/NEA)は5月2日、医療用放射性同位元素(RI)の長期的な安定供給を保証していくための政策提言を発表し、各国政府と産業界が共同歩調を取るなど、国際的に一貫した政策アクションを取る必要性を訴えた。

がんや心筋血流の画像診断などでテクネチウム製品の需要が世界的に増しているにもかかわらず、その生産はカナダのNRU炉など数基の古い研究炉に依存。ここ10年来、供給の信頼性は著しく損なわれてきている。

この問題の解決のため、NEAが2009年に創設した「RI供給の確保に関するハイレベル・グループ(HLG-MR)」は昨年、この業界で新規の投資が促されるよう、供給チェーンの経済構造改革を訴える報告書を発表。各国政府が採用すべき6つの原則に基づき、経済的に持続可能な供給チェーンの創出、およびその機能に適切な環境を作り出すための経済構造改革が必要となる政策アプローチを策定した。

NEAの運営委員会はHLG-MRのそうしたアプローチを正式に支持しており、それらを実行に移すアクションを取らなかった場合、今後10年間に供給不足は恒常的になると警告。供給の信頼性を根本的に脅かしている経済構造を適切に改革するよう各国政府や産業界に呼びかけている。

[米 国]

NRG社、STP増設計画で投資打ち切りを決定

米国でサウステキサス・プロジェクト(STP)原子力発電所3,4号機の増設計画を進めていたNRG社は4月19日、同計画への今後の投資を打ち切ると発表した。福島第一原発事故により、東京電力が約束していた出資参加が期待できなくなったほか、規制当局による安全基準見直しの動きなどが原因と見られている。

同計画では2009年2月に、東芝がEPC(設計・調達・建設)契約を受注、日本企業として初めて海外から請け負った新設計画となるはずだった。今後はプロジェクト企業に一部出資している同社が建設・運転一括認可(COL)取得のための経費を継続負担するが、計画再生の見通しは立っていない。

NRC、国内事業者電源喪失対応で情報要請

米原子力規制委員会(NRC)は5月11日、原子力発電所における緊急時の影響緩和戦略に関する文書を全米の原子力発電事業者宛てに発出し、深刻な事象発生後の全交流電源喪失への対応手順について情報を提供するよう要請した。福島原発事故の発生経緯を重く見、各発電所が従来から策定している過酷事故の收拾対応手順のみならず、要員の能力の確保や機器の維持管理が現実的であるか、NRCとして審査する必要性を認めた措置といえる。

米国では70年代後半から、原発における全交流電源喪失のリスクが対応を要する重要課題として浮上。80年代後半にNRCが公布した規則により、各原子力発電所では全交流電源喪失への対応が求められることになった。また、2001年の9・11テロ事件を受けてNRCは翌年、緊急時対応に関する指令を発出。その中の「B5b条項」で緊急時の影響緩和措置についても規定していた。

今回の措置はこのB5b戦略に基づくもので、NRCは通常の安全システムが損傷を受け、利用不能になった場合でも、炉心と使用済み燃料プールが確実に冷却されるよう、規制項目の遵守状況について事業者に包括的な確認を要請。このほか福島事故に鑑み、(1)追加の評価プ

ログラムが必要であるか、(2)現行の検査プログラム強化の必要があるか、(3)さらなる規制アクションが必要か——を確定するため、事業者から情報を求めたいと説明している。

NRC，新設2計画で環境影響声明書

米原子力規制委員会(NRC)は5月13日と16日に相次いで、2つの原子炉建設計画に関する環境影響声明書(EIS)最終版を発行した。

福島事故の影響によりサウステキサス・プロジェクト3、4号機建設計画が頓挫する一方、三菱重工業社製US-APWRの建設を想定したコマンチェピーク3、4号機計画、および仏アレバ社製欧州加圧水型炉(EPR)を想定したカルバートクリフ3号機計画では、建設・運転一括認可(COL)審査が一步前進したことになる。

COLの一部となるEIS最終版(FEIS)の発行はNRCが当該原子炉の建設と操業に許可を与えても周辺環境に影響が及ばないことを結論付けるもの。NRCは今後、両計画について独立の立場の米国原子炉安全諮問委員会による勧告を盛り込んだ安全評価報告書(SER)最終版の完成に向けて審査作業を続けていく。

[ロシア]

メドベージェフ大統領，安全性向上で各国に提案

ロシアのD・メドベージェフ大統領は4月26日、チェルノブイリ事故後25周年の犠牲者追悼式典で、世界の原子力発電所における安全性強化で国際的な法制システムを創設するなどの提案を明らかにした。

これは福島原発事故の分析結果を、世界で急速に拡大している民生用原子力施設への対応としてまとめたもので、すでに国際原子力機関(IAEA)や主要8か国(G8)、新興5か国(BRICS)および独立国家共同体(CIS)の各国首脳に送信。G8などの場で協議を検討中だという。ロシアが原子力で賄う電力は国内需要の17%程度だが、CIS諸国やインド、新規導入国への原子炉輸出を推進していることから、万全な安全確保体制の確立により世界的に高まりつつある原子力への懸念払拭を図るのが目的と見られている。

同大統領が既存の国際条約およびIAEA憲章を補足するイニシアチブとして提案した安全強化項目は次の通り。

(1)事故時の影響を最小化するため、タイムリーで適切な対応責任を当事国に義務付ける、(2)事故管理における当事国、操業機関、および監督機関の協力と調整に規制条項を設ける、(3)安全レベルがIAEAの安全基準を下回

らないことや、緊急時の行動計画策定を利用各国に義務付ける、(4)IAEA勧告に合致した原子力インフラを、原子炉機器供給業者参加の下で整備するよう新規導入国に要求する、(5)地震多発地域や天災発生リスクの高い地域での原子炉建設を規制する要求項目を新たに導入する、(6)IAEAの評価尺度に応じて、事故情報の迅速な提供を新たに義務付ける。

[ポーランド]

議会が原子力法修正案を可決，安全優先で原子力導入

ポーランド議会下院は5月13日、経済省と国家原子力庁が提出していた原子力法修正案を407対1(棄権2)の圧倒的多数で可決した。同国初の原子力発電所の設計技術選定や手続きなど、原子力関係活動の様々な側面の中で安全性を絶対的な優先事項とする条項を盛り込んだもの。福島事故の教訓を踏まえた上で、何としても2020年末までに初号機の完成を果たす考えだ。議会は同時に、原子力発電施設への投資準備と実施に関する法案についても可決しており、上院での審議の後、大統領が署名すれば、7月1日にも発効の運びとなる。

これらの一括法案では、原子力施設における安全要求項目や核物質と使用済み燃料の取扱いに関する基準、放射線防護と原子力損害への賠償責任に関する要求事項などを規定。原子力発電所建設のための法的基盤となるもので、原子力開発を担当するH・トロヤノフスカ経済省次官によると、国際的な勧告や規制に準じた最高レベルの安全要求項目を設定した近代的な法案となっている。

現在の開発スケジュールでは、法案が7月1日付けで発効することにより、実施主体であるポーランド・エネルギー・グループ(PEG)は2013年末までに採用原子炉メーカーを選定するための入札告知が可能となる。その後、2016年に初号機着工、2020年末までの完成という段取りだ。

[スイス]

規制当局，安全審査で燃料プールの脆弱性を指摘

スイスの原子力安全検査局(ENSI)は5月5日、福島第一原発事故後に国内の4原子力発電所で実施した安全審査の最初の結果を公表した。その結果、緊急の危険性はないものの使用済み燃料貯蔵プールの防護機能に若干の脆弱性が認められることから、8月末までに改善対策を提示するよう各発電所に通達している。

福島では想定外の規模の天災が事故原因となったが、スイスではここ数年、最新の科学的知見に照らし合わ

せてこうした災害によるリスクを評価。ENSIによると、福島に匹敵する規模の天災がスイスで起こる確率は極めて低く、国内原子炉の基本的な安全性に問題はないが、同事故の教訓はさらなる安全性改善に向けた重要な新情報を提供していると指摘した。

こうした背景からスイスでは今後、世界中の原子力発電所で国際原子力事象評価尺度(INES)レベル2以上の事故が起きた場合、ENSIが原因解明するとともに、国内発電所における類似事象の発生防止策を検討。そのための手順は3つのポイント——(1)緊急の危険性があるか、(2)一時的に原子炉を停止すべきか、(3)安全性改善対策を取る必要があるか——に基づき、3段階に分けて実施されるとしている。

[英国]

フィナンシャル・タイムズ紙、社説で「原子力推進」呼びかけ

英国のフィナンシャル・タイムズ紙は4月25日付けの社説で、「今こそ原子力を再生させる時だ」との見解を表明した。

同紙は数日前、9人のノーベル平和賞受賞者が原子力の段階的廃止を求める書簡を各国元首に送ったことに触れ、彼らの主張とは裏腹に「原子力のない世界は安定性が低くなる」と断言。世界の総発電電力量の14%を生み出す原子力はその他のエネルギー源で代替できず、強行すれば深刻な電力不足に見舞われると警告している。また、原子力による死傷者数が石炭や石油、天然ガスによる犠牲者数より桁違いに少ない点を強調した。

同紙はまた、各国政治家達に原子力の現実的な安全性評価を要請。福島事故に対応して原発の増設計画を一時停止し、既存炉の安全性点検を命じたことは正しかったが、地震と津波という特殊な状況が欧州北部に当てはまる可能性は低く、原子炉7基の一時停止を命じたドイツの判断は行き過ぎだと批判している。

[フランス]

フランス電力、安全局に安全性改善勧告を通達

フランス電力(EDF)は4月21日、福島第一原発事故後初めて、仏原子力安全局(ASN)に対する一連の勧告事項を取りまとめて通達した。

国の即時対応タスク・フォースを創設して、緊急時に水と電力の確実な供給体制を整えるなど、国内で稼働する原子炉58基の安全性と管理体制を大幅に改善する方針だ。

EDFによると、フランスの原子炉では継続的な改

善という原則が厳守されており、世界中の原子力事故事象から得られた教訓を建設中の1基も含めた全基にコンスタントに集約・フィードバックしている。

福島事故後、原子炉の設計・事業者であるEDFは、そうした改善手続きの一環として、短期的および中・長期的な主要アクション・プランの策定を開始。それらにおける規定の詳細を、欧州の主な規制機関と連携して考案した文言に基づいて、早急に欧州レベルで調整したいとしている。

EDFがASNに勧告した対策プログラムは以下の3点。すなわち、(1)事故時に技術的および人的資源が最良レベルで正しく配置されているかを評価、(2)危機対応プログラム支援のための国家的な即時対応タスク・フォースを創設。同プログラムでは例えば、24~48時間以内に稼働可能かつ専用の輸送力と人的資源を備えた電力・水バックアップ機器を、発電所毎に装備する、(3)原子力発電所設計の多重審査。ここでは、地震や洪水、電源および冷却機能の喪失といった事象と関係する設備の安全裕度調査が含まれ、今年中に原子炉と使用済み燃料プールの両方で実施する。

これらすべての評価活動および安全裕度審査はASNの管理下で行われ、フランスの原子力安全基準に盛り込まれる計画だ。

[イタリア]

政府、原子力の新設条項を無効にする法案を上院に提出

イタリアのS・ベルルスコーニ政権は4月19日、同国で原子力発電所を建設するための条項を無効とする法案を議会上院に提出した。

福島原発事故によって増幅された国民の懸念に配慮した形。一部の反対派が「6月に実施予定だった原子力復活法の撤回に関する国民投票を無効にするためのごまかした」として警戒する一方、産業界ではこの修正が原子力復活の無期限凍結につながり、少なくとも現政権下で原子力発電を復活させることはできなくなると危惧している。

今回、経済開発省が公表した資料は「福島原発事故がすべてを変えてしまった」との文で始まる。政府はエネルギー源多様化と供給保証のための新たな方策を特定し、再生可能エネルギーなどクリーン・エネルギーを生産する最良の技術を駆使していくと明言。今後20年間の新たなエネルギー戦略を秋頃までに策定するとしている。

クロスカップリング入門

基本的な考え方と応用

東京工業大学 秋山 勝宏

「パラジウム触媒によるクロスカップリングの発展への寄与」の功績により根岸英一、鈴木章、R. E. Heck 先生らが2010年にノーベル化学賞を受賞した。クロスカップリングは1970年代から盛んに研究され、有機合成ではこの分野は日本のお家芸といえるほど、日本人の貢献が大きい。今回はクロスカップリングについて、その基本的な知識や考え方を解説する。まず総論としてクロスカップリングの反応形式や反応機構について説明し、医薬品やエレクトロニクス材料への用途について述べる。各論として代表的な反応である熊田—玉尾カップリング、根岸カップリング、鈴木—宮浦カップリングと溝呂木—Heck 反応について反応の特徴や問題点について解説する。最後に、最近の研究として固定化触媒の開発や安価な鉄触媒を使用する研究を紹介する。

I. 総論—基本的な反応と用途

有機化合物は炭素原子によって分子の骨格が成り立っており、その合成には目的の炭素原子へ選択的に炭素—炭素結合を構築することが重要である。今から40年以上前の有機化学では、 sp^3 軌道の炭素(アルカンなどの四面体構造の炭素)同士を結合させる方法は確立されていたが、アルケンやベンゼンなどの sp^2 軌道の炭素(二重結合をもつ平面構造の炭素)原子に対して選択的に炭素—炭素結合を構築することは困難とされていた。これを可能にしたのがクロスカップリングである。クロスカップリングにより、 sp^2 炭素で骨格が構成される液晶や有機エレクトロニクス材料の合成が簡単になり、ノーベル賞を受賞した根岸カップリング、鈴木—宮浦カップリング、溝呂木—Heck 反応は数多くの分子の合成に利用されている。クロスカップリングには多くの人名反応が存在するが、基本的な反応形式と反応機構をおさえておけば、簡単に理解できるようになるので、まずその説明を始める。

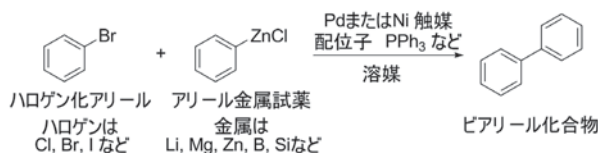
(1) 基本的な反応形式¹⁾

一般的にクロスカップリングとは、ハロゲン化アリールとアリール金属試薬がPdもしくはNi触媒の存在下で、炭素—炭素結合が生成する反応である(第1図)。アリールとは芳香族環(ベンゼン環)の意味である。アリール金属試薬はハロゲン化アリールから合成することができる。つまり、2種類のハロゲン化アリールがあれば片方を金属試薬に変換し、両者を簡単につなげるのであ

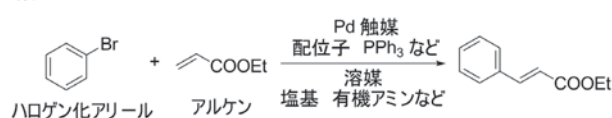
る。溝呂木—Heck 反応はクロスカップリングとは反応形式が異なるカップリング反応であり、アリール金属試薬の代わりにアルケン基質を使用する。詳しい反応機構や特徴についてはII-(4)節で述べる。これらの反応の基質は一般的にハロゲンや、金属の結合する炭素は sp^2 軌道である必要がある。これは sp^3 炭素の場合はPdやNiは第2図に示す β -水素脱離という副反応を起こし、収率が低下するためである。ハロゲン化アルケニルやアルケニル金属試薬と呼ばれるアルケンの二重結合部位にハロゲンや金属が結合した基質でも問題なく反応は進行するが、アルケニル基質はアリールと比べて反応性が高く、副反応が起こりやすくなる。

以降ではアリール基質を例として取り上げ解説する。触媒は一般的にPdが使用され、配位子と呼ばれる触媒を活性化して化合物と錯体を形成させて用いられる。配位子にはトリフェニルホスフィン(PPh_3)をはじめとする有機リン化合物が最も使用される。

クロスカップリング



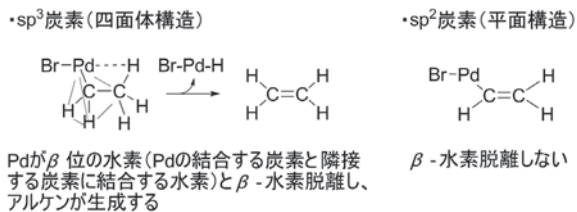
溝呂木—Heck 反応



第1図 基本的な反応形式

Introduction of Cross Coupling : Katsuhiko AKIYAMA.

(2010年 4月16日 受理)



第2図 β-水素脱離

(2) クロスカップリングの反応機構¹⁾

クロスカップリングの反応機構は3つの素反応により成り立っている。酸化的付加, トランスメタル化, 還元的脱離である。第3図にプロモベンゼンとフェニル亜鉛試薬を使用したカップリング(根岸カップリング)を例にして, それぞれの反応について解説する。

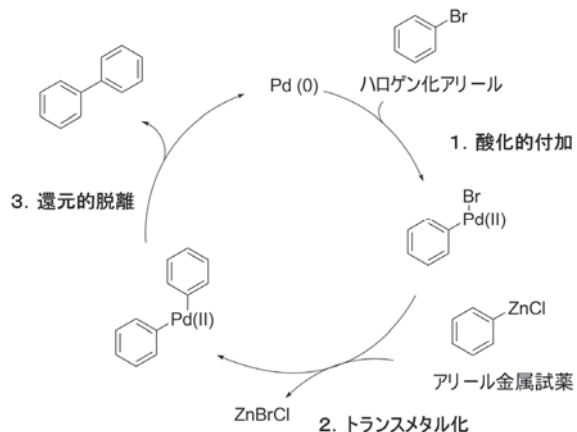
1. 酸化的付加: 0価のPdがハロゲン化アリールと反応し, Ph-Br結合が切れ, PdにBrとフェニル基が結合する。この反応でPdは0価から2価に酸化されるため, 本反応を酸化的付加という。

2. トランスメタル化: Pd-Br結合とアリール金属試薬が反応し, Ph-Pd-BrがPh-Pd-Phとなり, ハロゲンは金属と塩を形成し反応系から出て行く。Pd-Br結合とPh-Zn結合とが入れ替わるためトランスメタル化と呼ばれる。

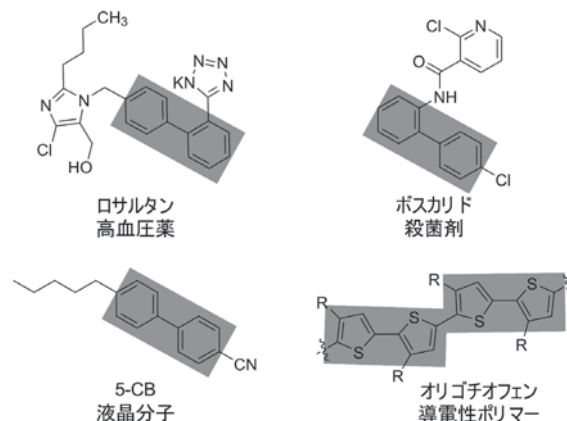
3. 還元的脱離: Ph-Pd-Ph結合の2つのPh基がPdから脱離しながら結合しPh-Phが生成する。その際にPdは2価から0価に還元される。0価のパラジウムは再びハロゲン化アリールと反応する。

(3) クロスカップリングの用途²⁾

クロスカップリングは医薬品からエレクトロニクス材料の合成法として幅広く使用されている。第4図にクロスカップリングにより合成されている化合物を例示している。医農薬品では高血圧薬のロサルタンや殺菌剤のボスカリドの合成にクロスカップリングが利用されている。ロサルタンは高血圧症に非常に有効な薬であり, 世界約100カ国で販売され, 3,000億円を超える売上高となっている。有機ELや液晶パネルなどのエレクトロニクス材料の合成にもクロスカップリングが貢献してい



第3図 クロスカップリングの反応機構



第4図 クロスカップリングで合成される化合物

る。液晶分子の5-CBはクロスカップリングにより容易に合成される。液晶材料はテレビやパソコンのディスプレイに利用され, 液晶テレビの世界出荷金額は2009年で7兆218億円にもなる。またオリゴチオフェンなどの導電性ポリマーの合成にもクロスカップリングが使用されている。これらの化合物は, どれも芳香環が2つ結合したビアリール骨格を有しており, クロスカップリングはその構築に非常に有効な方法である。

II. 各論—代表的な反応

クロスカップリングには数多くの人名反応があり, その違いは使用するアリール金属試薬である。アリール金属試薬の反応性が高ければ, 反応は進行しやすいが使用できる基質が限定されてしまう。このため金属試薬の反応性を下げて, 利用可能な基質の範囲を広げることを目的にクロスカップリングが研究されてきた。第5図には使用する金属試薬と反応名, その報告された年について例示している。代表的な金属試薬としてMg, Zn, Sn, B, Siがあり, 下に行くにつれてその反応性は低下する。

以下にクロスカップリングの主要な3つの反応(熊田-玉尾カップリング, 根岸カップリング, 鈴木-宮浦カップリング)と溝呂木-Heck反応について, その代表的な反応の特徴を解説する。

アリール金属試薬	反応性	反応名 報告された年, (報告者), 触媒
	高 ↓ 低	熊田-玉尾カップリング 1972年, 熊田誠, 玉尾皓平, Ni触媒 1972年, R. J. P. Corriu, Ni触媒
		根岸カップリング 1977年, 根岸英一, Pd触媒
		小杉-右田-Stilleカップリング 1977年, 小杉正紀, 右田俊彦, Pd触媒 1978年, J. K. Stille, Pd触媒
		鈴木-宮浦カップリング 1979年, 鈴木章, Pd触媒
		檜山カップリング 1988年, 檜山為次郎, Pd触媒

第5図 代表的なクロスカップリングと金属試薬

(1) 熊田-玉尾カップリング^{1,3)}

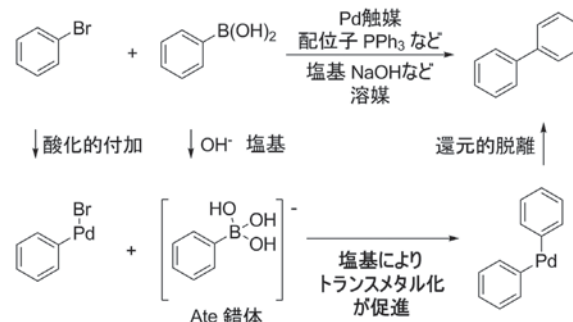
1972年に熊田, 玉尾らによって触媒量の Ni ホスフィン錯体が塩化ビニルとフェニルマグネシウム (Grignard) 試薬の立体選択的なクロスカップリング反応が報告された(第6図)。Corriu も同年に類似の反応を報告している。これらはクロスカップリングの研究の発端となる報告であり, この Ni や Pd を触媒によるハロゲン化アリールと Grignard 試薬とのカップリング反応は熊田-玉尾カップリングと呼ばれるようになった。この反応の問題点は Grignard 試薬の反応性が高すぎることである。Grignard 試薬は水と激しく反応し少量の水でも発火するため, 試薬の長期保存が難しく, 反応条件も水や空気をフラスコから完全に除くことが必要となる。また基質に Grignard 試薬と反応する官能基, カルボン酸, ケトン, アルデヒド, エステル, アミド, ニトロ, ニトリル, ヒドロキシル基があると反応に使用できないなど改善点は多く残されていた。

(2) 根岸カップリング^{1,3)}

熊田, 玉尾らの報告以降, アリール金属試薬の反応性を抑える研究がされ, 1977年に根岸らは Ni や Pd 触媒とアリール亜鉛試薬との組合せで反応が良好に進行することを報告した。第7図に基本的な反応形式を記載している。亜鉛試薬は Grignard 試薬と比べると, 高い反応性を維持したまま, 基質適用範囲を大幅に改善でき, 副反応も少なく, 毒性もほとんどないことが利点となる。アリール亜鉛試薬はアリール Grignard や Li 試薬と ZnCl₂ を混ぜて調製される。しかしながら, この反応も水や空気をフラスコから除くことが要求される。また基質にエステル, ニトリル, ケトンなどの官能基があっても問題なく反応は進行するが, カルボン酸, ヒドロキシル, アルデヒド基などの酸性度の高い水素や反応性の高い官能基が存在する基質は使用できない問題が残されていた。

(3) 鈴木-宮浦カップリング^{1,3,4)}

現在最も利用されているクロスカップリングは, 1979年に鈴木, 宮浦らによって報告されたホウ素試薬を使用するカップリングである(第8図)。ホウ素試薬は水や酸素に非常に安定で長期保存が可能であり, 空気中で反応



第8図 鈴木-宮浦カップリング

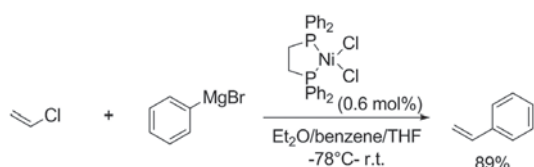
させることもできる。それまで問題となっていた基質の官能基許容性も高く, 上述した官能基があっても反応は良好に進行する。ホウ素が安定であることは, 反応が進行しにくいともいえるが, この点は塩基を添加し, ホウ素の反応性を向上させることで克服している。塩基はホウ素の空の p 軌道に配位し, Ate 錯体と呼ばれる錯体を作り, トランスメタル化の反応性を上げている。有機ホウ素化合物は, ハロゲン化アリールからの変換反応に加えて, 三重結合にホウ素を付加するヒドロホウ素化反応や C-H 結合を切断して C-B 結合へ変換する反応など合成方法のバリエーションも豊富である。ノーベル賞を受賞し, 実用化もされている素晴らしい反応であるが, その論文が受理されるのには苦勞を要したという。

(4) 溝呂木-Heck 反応^{1,3)}

溝呂木-Heck 反応はクロスカップリングと反応形式が異なり, 金属試薬の代わりにアルケンを使用する。R. F. Heck が1972年に本反応について報告し, この功績で Heck はノーベル賞を受賞しているが, Heck の報告よりわずか1年前の1971年に東京工業大学の溝呂木勉先生が類似の反応を報告している。

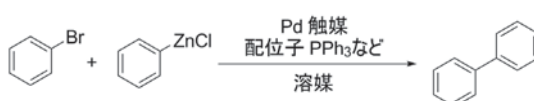
溝呂木-Heck 反応の利点は二重結合に対して直接炭素-炭素結合を導入できることである。クロスカップリングではアリール金属試薬を調整して, その部位を足がかりに炭素-炭素結合を構築する。アリール金属試薬の調整は水や基質の置換基により阻害されることが多いが, Heck 反応ではアルケンを反応点として使えるため, 使用できる基質の幅が広く, 天然物合成等に数多く応用されている。反応進行の優劣はアルケンの立体に大きく依存し, 一般的にアルケンの置換基が多くなるほど反応が進行しにくい傾向がある。

反応機構は第9図に示すように, 酸化的付加で生成する Pd-Ph 結合が二重結合に挿入し, 炭素-炭素結合を生成し, Pd に対して β 位の水素 (Pd が結合する炭素の隣の炭素に結合する水素) が脱離することにより生成物を与える (β-水素脱離)。生成する Br-Pd-H は塩基により Pd(0) に還元され, 触媒サイクルが成り立つ。

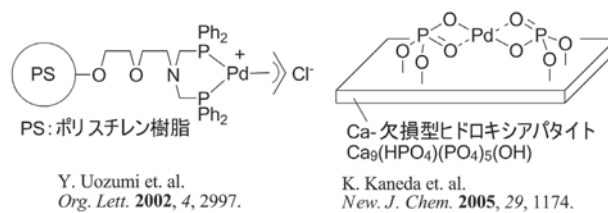
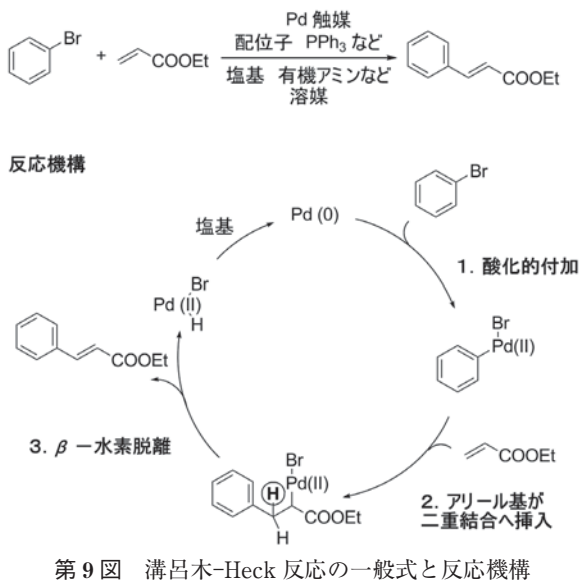


M. Kumada et al. *J. Am. Chem. Soc.* 1972, 94, 4374

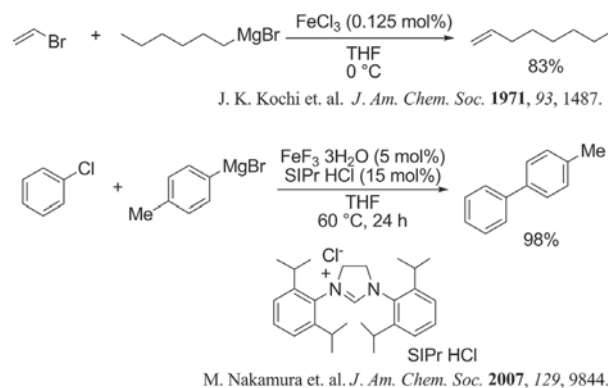
第6図 クロスカップリングの初の報告例



第7図 根岸カップリングの一般式



第10図 Pd 固定化触媒



第11図 鉄触媒のクロスカップリング反応の報告例

Ⅲ. 最近の研究

(1) 固定化触媒の開発⁵⁾

固定化触媒は、触媒が固体として反応溶液を浮遊する2相の状態をとるため、反応後に溶液をろ過すれば簡単に触媒の分離、回収をすることができ、コストや環境保護などの観点から工業化には非常に有用である。この観点からクロスカップリングに活性なPd固定化触媒の開発が近年盛んに行われている。

鈴木-宮浦カップリングのPd固定化触媒は、ポリスチレン樹脂にPd錯体を固定化した触媒や、Ca欠損型ヒドロキシアパタイトにPdを固定化した触媒などを始め、数多くの活性な触媒が報告されている(第10図)。これらの触媒は高収率で生成物を与えることに加えて、反応後も触媒は失活せず再使用が可能で、高いTON(Turn over number: 一つの触媒分子が反応を触媒する数)を有することなどが必要とされる。高活性な固定化触媒の開発はクロスカップリングの工業化に重要な役割を担っている。

(2) 鉄を触媒とするクロスカップリング⁵⁾

クロスカップリングの問題点は「貴金属のPdは高価」であり、工業化には触媒のコストを極力減らすことが必要である。このため近年、安価な鉄触媒によるクロスカップリングが注目を集めている。鉄触媒の報告例は古く、1971年にKochiらが報告したハロゲン化アルケニルとアルキルマグネシウム試薬とのカップリングが最初の例であるが(第11図)、NiやPd触媒によるクロスカップリングと対照的に、鉄のカップリングが注目されたのはつい2000年頃からである。鉄は反応中で酸化状態やスピン状態など非常に複雑になっており、PdやNiのようにはっきりとした反応機構がわからないことが研究の遅れた理由である。鉄のクロスカップリングの特徴は、NiやPdでは使用することが難しかったハロゲン化アルキ

ルやアルキル金属試薬などsp³炭素の基質に適用可能であることである。これは、鉄はPdやNiと比べてβ-水素脱離が起きにくいことに起因する。対照的にsp²炭素同士のカップリングについての報告例は少なく、中村らによってアリール Grignard 試薬とのカップリングが近年に報告されたばかりであり、今後の発展が期待される分野である(第11図)。

— 参考資料 —

- 辻 二郎, 遷移金属が拓く有機合成—その多彩な反応形式と最新の成果, 化学同人, p.15-58(1997).
- 日本経済新聞2010年10月07日号, p.13.
- László Kürti, Barbara Czako, 富岡 清 監訳, 人名反応に学ぶ有機合成戦略, 化学同人, p.258-259, 310-311, 448-449(2006).
- 宮浦憲夫, 化学者たちの感動の瞬間—興奮に満ちた51の発見物語, 化学同人, p.112-115(2006).
- 金田清臣, 森 浩亮, 水垣共雄, 海老谷幸喜, クロスカップリング反応—基礎と産業応用, シーエムシー出版, p.180-190, 191-209(2010).

著者紹介



秋山勝宏(あきやま・かつひろ)
東京工業大学 資源化学研究所
(専門分野/関心分野)有機合成化学, バイオマス化学/不斉触媒反応, 木質系バイオマスの有効利用

原子力第一船の燃料・炉心 国産技術の確立

三菱重工業(株) 浜崎 学, 三菱原子燃料(株) 堀元 俊明,
元 三菱原子力工業(株) 嶋田昭一郎, 石丸 正之

我が国の原子力第一船「むつ」は、初の実験航海での放射線漏れが社会的に大きく取り上げられ、我が国の原子力界にとって永く記憶されるべき教訓を与えた。一方、その後の実験航海が成功をおさめ、外洋を8万キロにも渡って原子動力で全速航海し、貴重なデータを後世に残したことは余り知られていない。また、「むつ」の炉心、燃料は、米国からの導入技術が発電炉のものに限られ、船用炉技術を導入できないという条件の下で確立した我が国国産技術である。

I. 原子力第一船の原子炉と燃料を受注^{1~3)}

ちょうど50年前の1961年の4月、我が国の原子力委員会に設置された原子力船分科会によって、我が国の原子力第一船を建造することが答申された。以後、1963年6月には日本原子力船開発事業団(原船団、後、日本原子力研究所—原研、現日本原子力研究開発機構に統合)が発足し、建造計画が開始された。原子力船建造契約が船炉分離方式で調印され、1967年11月、政府から原子力第一船原子炉の設置許可と第一船の船舶建造許可が得られたことによって契約が発効。三菱が正式に原子炉部分を受け持つこととなった。



第1図 「むつ」への原子炉容器吊り込みの様子

Establishment of Japanese Technology on the PWR Fuel and Core that Realized Japan's First Nuclear Ship:
Manabu HAMASAKI, Toshiaki HORIMOTO, Shoichiro SHIMADA, Masayuki ISHIMARU.

(2011年 3月2日 受理)

船用原子炉としては我が国初めてであることから、1965~66年に、原研と共同で同所のタンク型臨界試験装置(TCA)で基礎試験を実施した後、1969年には、三菱臨界実験装置(MCF: Mitsubishi Critical Facility)で詳細実験を実施し、1971年には、設計値の確認実験を行った。このMCFでの臨界実験に用いられた燃料こそが、原子力第一船「むつ」の原子炉にそのまま装荷され、1992年2月に終了するまでの間、実験航海の動力源として使用されたものであり、我が国で初の国産加圧水型軽水炉(PWR)用燃料となったのである。

このたびの原子力歴史構築賞の創設に当たり、三菱重工業が代表してこの事績を推薦し、見事、受賞の荣誉に浴することができた。

以下に、この燃料・炉心技術を国産のものとして確立した道程を振り返る。

II. 原子力第一船の炉心^{3,4)}

原子力船「むつ」の試設計が始まったのは1961年であった。この年、三菱グループの原子力専業会社である三菱原子力工業(mapi、後、三菱重工業と合併)と米国のウェスティングハウス(WH)社との技術提携が認可された。しかし、この技術提携では、船用炉技術は使用が認められていないので、陸上プラントの情報を参考とせざるを得なかった。PWR発電炉は、よく、元は船舶用の原子炉を発電用に改良したものとされるが、この場合は逆を行ったのである。その後、何度か設計を修正して第1次基本設計を決定した。参考とした発電炉より小型で中性子漏れが大きいことから減速材温度係数が負になりやすいことを利用して、水対燃料体積比を大きくとって中性子経済を改善したこと、沈没時を想定すると可溶性ボロンによるケミカルシムは使えないので、制御棒のパン長をできる限り大きくし、さらにバーナブル・ボイズ

ンを用いた点等が特徴であった。制御棒での緊急停止は、現在の発電用PWRのような自由落下でなく、重力の方向が一定でなく加速度が働く船舶の特徴を考慮し、ばね力で押し込む方式とした。

その後、当時の原研-原船団との共同で、TCAでの臨界実験を経て、制御棒を板状十字形のハフニウムから、棒状十字形のAg-In-Cd合金制御棒に変更、また、燃料濃縮度を3.2 wt%-4.4 wt%の2領域に決定し、第2次基本設計が確立した。このTCAでの一連の臨界実験が、三菱にとって初めての本格的な軽水炉の臨界実験、設計検証に当たり、この経験は三菱における軽水炉核設計の基礎確立に大きな意義をもたらした。

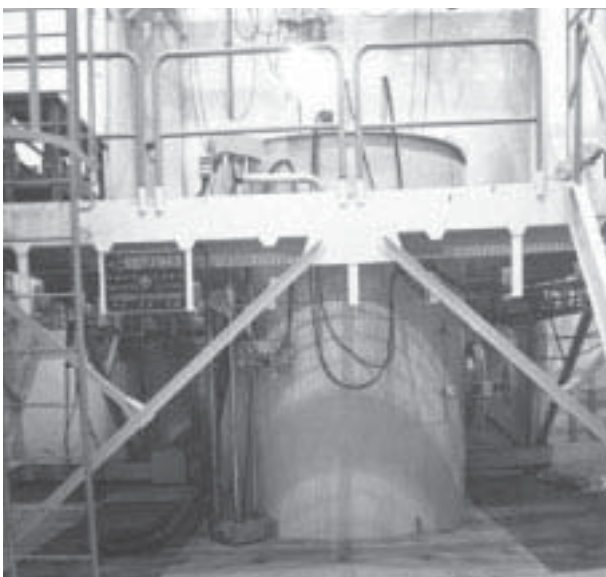
Ⅲ. 三菱臨界実験装置(MCF)^{3~8)}

1. MCFの建設と廃止の経緯

TCAでの臨界実験による確認で、原子力船「むつ」の基本設計に使用した2次元拡散コードには、TCA炉心の反応度にして2~3%の誤差があることがわかった。特に、最小炉心の臨界寸法の誤差が目立ち、問題となった。炉心が小さいため中性子の炉心からの漏れが大きく、反応度の誤差が燃料集合体数に換算すると大きな差となった。

1967年に正式に「むつ」の原子炉の設計製造を受注した時には、当時のPWRが使用していたステンレス鋼製燃料被覆管を採用したが、発電プラントでは既にジルカロイへの変更を決めていたため、ステンレス鋼被覆燃料に対するデータはWH社ですら整備が不十分なままであった。

ステンレス鋼は中性子をよく吸収するので設計誤差が大きくなりやすく、「むつ」の設計を仕上げるためには、臨界実験が必要と結論された。これを受け、臨界実験装置をmapi大宮研究所に設置する方針となり、準備を進



第2図 MCF炉心タンク全景

めた。原子炉設置許可申請は1967年12月11日付で行い、1968年7月10日付で許可を得た。使用前検査への立会いは、1969年7月17~23日に行われ、無事合格した。大宮は東京から近く、試験立会いでは科学技術庁の方もたびたび来られ臨界実験装置での実験を目にされ、原子炉への理解、特にいかに安全に炉心が制御できるかを実験頂けた。

MCFでの実験は約4年間実施され、この間「むつ」の炉心設計に対する実験と、陸上発電プラントの性能確認、改良のための実験を行い、炉心核設計コードの整備を行った。

この装置は民家に近いこともあり、日曜日などに研究所を開放し、説明に努めた。しかし、計画していた実験が一段落し、所定の成果を得たことから、MCFの解体変更届を1973年12月27日に提出し、廃止完了を1974年3月11日に報告した。

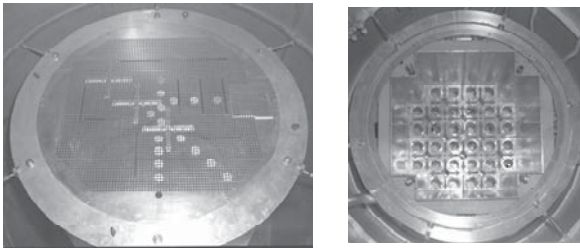
2. MCFの装置概要(第1表)

MCFの許認可上の最大出力は200 Wであるが、実験はほとんどが10 W以下で行われた。常温、常圧の開放系であり、温度係数測定実験のために80℃まで昇温できるヒータをダンプタンクに備えていた。

後述する「むつ」の陸上臨界試験では、実機条件を忠実に模擬するため、「むつ」の実燃料集合体32体をそのまま

第1表 三菱臨界実験装置(MCF)諸元

主炉心タンク	2,200 mmφ × 3,000 mm 高
制御系	
起動系	比例計数管 3系統
運転系	対数出力系(CIC管) 1系統 線形出力系(CIC管) 2系統
燃料	・ SUS被覆 UO ₂ ペレット充填燃料棒 U-235濃縮度2.7 wt% 1,465本 3.2 wt% 1,835本 4.4 wt% 243本 ・ 「むつ」実機燃料集合体
燃料棒	直径 10.5 mmφ 被覆管 SUS-27製, 0.4 mmt 有効長52~104 cm* (*「むつ」実燃料)
燃料格子板	下記の2種類 15.0 mm ピッチ*(H ₂ O/UO ₂ 体積比1.9) 14.0 mm ピッチ(H ₂ O/UO ₂ 体積比1.4) (*「むつ」実炉心は15.0 mm)
反応度制御	・ 水位制御 ・ ホウ素濃度制御 ・ 制御材(下記)挿入 ボラール板(3 mmt) Al被覆Cd板(2 mmt) Ag-In-Cd合金棒からなる十字形制御棒* (*「むつ」実機で採用)



第3図 MCF 燃料格子板(右は「むつ」実燃料用)

装荷し、軽水減速材は満水、ホウ素濃度はゼロという条件で実施した。

3. MCF 実験の概要

MCF で行われた実験は、おおむね 3 期に分かれている。

第Ⅰ期は、核設計コードの精度向上のため、TCA における臨界実験をフォローし、まだ使用実績の少なかつたホウケイ酸ガラスのバーナブルポイズン等、各種の反応度効果等の基礎データを取得した。

第Ⅱ期が、「むつ」の実燃料、実制御棒を使った陸上臨界試験である。

第Ⅲ期は、発電プラントの設計に使用する設計計算コードの仕上げのための確認試験、主として出力分布の誤差を確認し、精度を向上させる目的であった。

(1) 第Ⅰ期

TCA での「むつ」の実験結果を補足確認する実験が主体であったが、当時の背景として、九州電力玄海 1 号機の炉心設計を、始めて三菱が受け持つこととなったことがある。それまで、国内 PWR プラントの炉心設計は WH 主契約で推移してきており、1 号機は WH 社主契約、同型の 2 号機は三菱主契約という流れができていたが、ついに 1 号機からの国産化の期待に応えることになった。このため、三菱としても、WH から技術導入し



第4図 MCF での基礎実験の様子

ていた設計計算コードの裏づけとなる実験値を得ることが必要となり、MCF を大いに活用した。これによって、以降の PWR プラントは原子炉を含めて三菱が主契約となる流れができた。

発電プラントのための実験は詳細な出力分布やバーナブルポイズン、制御棒の効果や影響等であった。プラント実機の起動試験における炉心特性試験では、この実験で培った試験技術が役に立った。

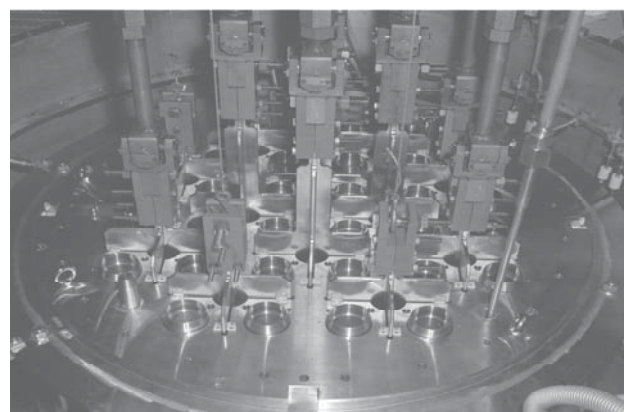
「むつ」については、発電プラントよりはるかに出力分布が複雑で非均質性が高いので、炉心の形状、濃縮度、制御棒の材質と形状、バーナブルポイズンの材質等の組合せを変え、出力分布測定を含め、数多くの項目の試験を行った。「むつ」では運転中の出力分布を測定できる炉内核計装系がなく、運転の出力上限を確定するためには MCF での試験が不可欠であった。これら試験の精度が高いほど出力を上げられるが、「むつ」では設計値に対し充分余裕があることを確認することに集中した。

この段階で設計計算コードの修正を確定して仕上げ、濃縮度を 2.7 wt%、3.2 wt% の 2 領域から 3.2 wt%、4.4 wt% の 2 領域に変更した炉心設計を完了した。「むつ」で採用された炉心設計は温度係数が負で大きく、1 次冷却材温度制御による負荷追従にほとんど温度係数だけで対応でき、制御棒動作が少なく、大変運転しやすいものであったと報告されている。

(2) 第Ⅱ期

「むつ」の実燃料を集合体に仕上げたものを実炉心と同じ配置構造にして実験した(第 5 図)。実験目的は、核特性の確認に止まらず、以下のように手順確立も含まれていた。

- (1) 本船への燃料装荷手順の確立
 - (2) 船上で実行困難な試験の代行
 - (3) 本船における出力上昇試験の能率向上と経済化
 - (4) 性能、安全性に関する炉心核設計値の確認
- 実験項目は、以下であった。
- a) 燃料装荷試験
 - b) 最小臨界炉心に関する試験



第5図 「むつ」実燃料による陸上臨界試験時の MCF 炉心上部

- c) 燃料集合体均一試験
- d) 制御棒集合体均一試験
- e) スタックロッド余裕度および停止余裕度の測定
- f) 制御棒等価反応度の測定
- g) 減速材温度係数の測定
- h) 余剰反応度の測定
- i) 出力分布の測定
- j) 各種制御棒パターンによる検出器応答特性

この実験終了後、全燃料は1972年2月の厳冬に、「むつ」が待ち構える基地に搬送されていったのである。これが、まだ輸入燃料を使用していた発電プラントに先駆けて、我が国で初めての国産PWR燃料のデビューであった(第6図)。

(3) 第Ⅲ期

発電プラントの設計手法の妥当性を裏づけるデータを整え、設計誤差を減らし、運転信頼性を増すとともに定格出力を増す、具体的には出力ピーキング係数の評価誤差を求めることを目的とした。

PWR炉心設計の特徴は、燃料棒ごとの出力分布を精度よく設計できることにあり、設計コードによる予測精度を評価する実験が重要となる。実験はPWR燃料集合体に近い配置で臨界とした後、放射線レベルの減衰を待ち、燃料棒を1本ごとに引き抜いて γ -スキャンを行う地道なものであった。燃料棒ごとの出力分布の実験値対計算値比較の統計的整理から、2~3%の範囲で設計できることが確認でき、その後の安全審査でもこの結果が活用されてきた。

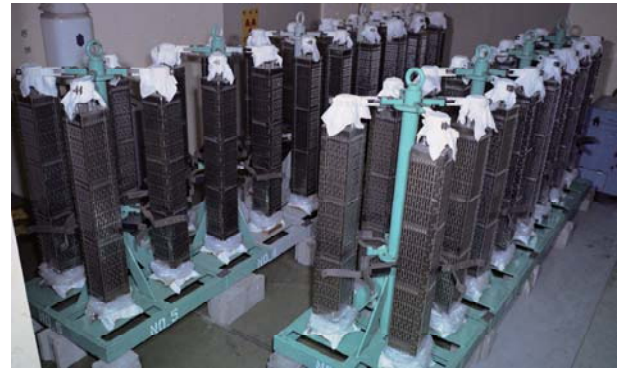
4. MCF 実験の評価

「むつ」の原子炉は発電炉の自主設計のない段階で総力を結集して、試行錯誤しながらまとめ上げたプロジェクトであり、関係者の努力の賜物である。MCFでの実験後、1974年に洋上での初臨界を達成。その後、原研を初めとする関係者のご尽力のお蔭で、16年後の1990年、「むつ」はついに原子動力航行を開始。その後、太平洋を80,000 km 航行し、1992年に海上公試を完遂。最終的に、国はこれを成功したプロジェクトと認定した。

何段階もの実験によって低温、低出力時の炉心の特性が完全に把握されており、「むつ」の試運転に際し、信頼感を持って出力上昇や負荷変動の試験を遂行できたと報告されている。

IV. 原子力第一船の燃料・制御棒の製造

mapiの研究所[大宮の三菱金属鋳業中央研究所(以下MMC, 現三菱マテリアル大宮総合整備センター)の敷地内]では、1960年に短尺スペーサ管を介してろう付けしたプレナム分散型燃料棒を束ねて集合体にする世界初のPWR商用原子力発電所であるヤンキー・ロウ発電所型燃料集合体を、1966年には十字形の断面を持つ制御棒



第6図 MCF および原子力船に装荷された初の国産PWR燃料集合体32体

に代わって、現在では標準となった、棒状に分散させ集合体内に挿入する方式の世界初のクラスタ型制御棒(RCC: Rod Cluster Control)を採用したサン・オノフレ1号機燃料集合体をいずれもウラン抜きで試作して、製造技術の開発、向上を図っていた。

さらに、1964年から計3回サクストン研究炉用の燃料集合体を製造し、これはそれぞれ実機照射された。そしてこのサクストン燃料が原子力船燃料のモデルになった。

1. UO_2 粉末

1954年から、MMCはウラン鉱の選鉱試験を開始しており、ウラン燃料の基礎的な研究を進めていた。ここが1956年に発足した原子燃料公社(動力炉・核燃料開発事業団、核燃料サイクル開発機構を経て、現日本原子力研究開発機構)初期の技術者の研修場所になった。UF₆から UO_2 粉末への再転換は、ADU(重ウラン酸アンモン)方式で行っていた。原子力船燃料工事に先立ち新鋭パイロットプラントを完成させ、米国から搬入した濃縮度3.24%と4.44%のUF₆の再転換作業を行った。

2. UO_2 ペレット

UO_2 粉末をペレットに成型するところからがmapiの担当であるが、サクストン燃料での経験はあるものの、1体ずつ作った当時とは異なり初の量産を経験することになった。小型ながら連続焼結炉で焼結して、量産対応をとったが、ロータリープレスはまだ採用しておらずプレス作業は手間がかかった。ペレットはディッシュ付きで、ディッシュ寸法形状がキャッピングとパンチのかけやすさにも影響するので、パンチの端面に対していろいろと工夫が必要だった。センターレスグラインダの研削砥石は、削り屑からのリサイクル粉の再利用が大変であるが、研削面がきれいに仕上がるGC砥石が主流だった。目詰まりが早く効率が悪かったが、ペレットのようなセラミックに対して、金属加工品と同等の寸法公差の仕様に應えることができた。ペレットの数が多く、欠け

等の外観検査も人海戦術だったが、無事終了した。

3. 燃料棒

原子力の部品は、特別仕様の少量製品のため、また日本仕様の原子力船用として、特注品として調達をせざるを得なかったが、かえてこれが国産化を進めるきっかけとなったともいえる。積極的に部品の国産化に取り組んだ。

被覆管に使われるこの種の精密ステンレス鋼管では、板を溶接して管にする溶接引抜き管でない肉厚の寸法精度が確保できないといわれていた。日本でも溶接引抜きの技術能力はあったが、原子力船燃料としてより高い品質を得るため国内管メーカーと、押し出し・引抜きで作るシームレス管を開発・採用した。当時の被覆管の検査の一つに溶接管に対して蛍光探傷検査を適用していたが、シームレス管検査にも適用した。原船団により、被覆管等の部品の検査から、集合体に至るまでの各工程の立会検査が行われた。

燃料棒端部の溶接は、ヤンキー・ロウ燃料以来の実績があり、ステンレス鋼管でもチャンバ内でのTIG溶接を行った。

4. バーナブルポイズン(BP)棒

集合体各コーナーに3本、燃料棒に代えて装荷するBP棒は、燃料棒と同じ被覆管にホウケイ酸ガラス管を挿入されている。一般的には、このような円筒長尺のガラス管は化学・医療用ガラス管で内径か外径かどちらか一方、ほとんどが内径だけの公差指定である。内径を満足する管をガラス管メーカーに作ってもらった後、外径は、特殊精密加工を営む小企業に頼み込み、研磨仕上げを行った。薄いので欠けやすく、歩留まりは良くなかったが、仕様通りのガラス管を必要量確保できた。芸術工芸品並である。

これを被覆管に挿入して、端部を溶接で封入する作業は燃料棒と同じである。

5. 支持格子

時効硬化性のインコネルの短冊状薄板(格子板)をX、Y方向に配列して格子に組み、各交点を真空ろう付けで固定する。それぞれの升目には、各方向に、スプリングとその相手の受け2個ずつが形成されており、計6点で燃料棒を保持する。この組立体を支持格子という。格子板は、金型を外注し、社内でプレス打抜き、曲げ加工を行った。

この支持格子は実績のあるサクストン支持格子を一回り大きくしたものであるため、同様の製造方法で対応した。

6. 側板(キャン)

側板は集合体の外面を囲う多数の穴の開いたステンレ

ス鋼薄板で、穴をあけた板の長手方向中央をプレスブレーキでL形に曲げ、さらに両端部を各2ヶ所凹凸直角に曲げて、燃料集合体のジルカロイ充填材のスペースを作る。

側板加工は金型製作からプレスブレーキ加工まで外注した。この5ヶ所の曲げで、板が反り、平面度を出すのに苦労した。

7. ノズル

ノズルはステンレス鋼を鍛造して、その後機械加工した。スプリングをとめる箇所以外溶接がないので、溶接歪による変形がなく、寸法はよく仕上がった。しかしX線の方向、特にフィルムカセットをセットする位置に苦心した。

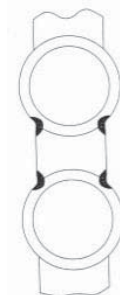
8. 燃料集合体

支持格子4個を一定間隔に並べて、側板2枚で4側面を囲う。支持格子と側板を点溶接で固定して骨格が出来上がる。これに燃料棒、BP棒を挿入し、充填材を入れ、両端にノズルを溶接で取りつけて燃料集合体となる。

原子力船燃料では原子炉中で制御棒が燃料同士の間に入っても空間が残る場所がある。この空間をジルカロイ-2の板の充填材で埋めている。充填材は、燃料の2つの相対する角に、長手方向全長にわたって各2枚入れる構造になっている。

9. 十字型制御棒

原子力船では、既存炉での知見を反映するため、Ag-In-Cd合金を細径の棒として被覆管に封入する溶出対策をとっている。この管を平面に並べて管と管の間に短いスペーサを入れ、管と溶接し、これ4枚を十字に配列して、上下に短い十字のステンレス鋼板を溶接して制御棒とする構造とした(第8図)。この上部のステンレス鋼板には駆動用つかみ部があり、下部には同じ十字の断面のジルカロイ-2板のフォロワーがつく(第9図)。



第7図 燃料集合体の外形 第8図 制御棒の溶接部



第9図 MCF 炉心に挿入された制御棒

肉厚0.3 mm の被覆管の裏あてなしでの円筒面での溶接は初めてで、最後の1ヶ所の溶接を失敗すれば、制御棒組立体全部が不良になってしまう。電子ビームで溶接試験をしたが満足な結果が得られず、最終的には、水素と不活性ガスの混合ガスを使うプラズマアーク溶接を用い、治工具を工夫し、さらに熟練の溶接技術をもって、全箇所十分に溶接することができた。完全密閉、ヘリウム漏洩なし、かつ完成組立体の平面度、直角度もすべて合格することができた。プラズマアーク溶接法を採用して、工法の検証を確実に行ったことで、優れた効果を上げることができた。

同型の燃料集合体と制御棒を使う原子炉はサクストンのほかに、米インディアン・ポイント(Indian Point) 1号機、伊セルニ(Trino-SELNI)、仏セナ(SENA)の3炉がある。三菱の成果は同業の他社からも称賛された。

なお、フォロワーは、運転時に制御棒が引き抜かれた際に、水による中性子減速条件が良くなって、隣接した燃料集合体の周辺の燃料棒の出力が高くなり過ぎないための設計である。

V. あとがき

今般の原子力歴史構築賞受賞は、国産技術確立に向けて努力を結集した諸先輩方や同僚諸氏のお蔭であり、感謝申し上げる。特に、本稿を取りまとめるにあたって、貴重な情報・示唆をいただいた元三菱原子力工業の諸先輩方に、改めて感謝申し上げたい。

また、語られることの少ない、80,000 km を原子動力で航海した原子力第一船の成功への産業界の貢献につい

て語る機会を与えていただいた日本原子力学会に感謝申し上げます。

—参考文献—

- 1) mapi 技術30年の歩み, 三菱原子力工業, (1989).
- 2) 関 義辰, “温故知新・シリーズ⑤ 燃料加工技術の流れを振り返って”, 日本原子力学会誌, 31[10], 1098(1989).
- 3) 小倉成美, “温故知新・シリーズ⑤③ 準国産エネルギーと自主技術への道程”, 日本原子力学会誌, 35[10], 891(1993).
- 4) 嶋田昭一郎, “軽水炉プラント—その半世紀の進化のあゆみ第5 回米国および日本の軽水炉改良研究(PWR)— Shippingポートから美浜1号機まで”, 日本原子力学会誌, 50[2], 109(2008).
- 5) 小倉成美, “原子力船『むつ』の設計”, エネルギーレビュー, (1991.8.).
- 6) 臨界実験装置設置許可申請書, 三菱原子力工業.
- 7) 三菱臨界実験装置の解体について, 三菱原子力工業, 昭和48年12月27日.
- 8) JNS-10, 原子力船『むつ』炉心陸上臨界試験報告書, 日本原子力船開発事業団, (1973.3.).

著者紹介



浜崎 学(はまさき・まなぶ)
(専門分野/関心分野)PWR 炉心技術, 燃料サイクル技術, 技術開発戦略




堀元俊明(ほりもと・としあき)
三菱原子燃料(株)
(専門分野/関心分野)PWR 燃料・炉心技術



嶋田昭一郎(しまだ・しょういちろう)
元三菱原子力工業(株)
(専門分野/関心分野)PWR 炉心設計技術, 燃料サイクル全般, 原子力技術の教育



石丸正之(いしまる・まさゆき)
元三菱原子力工業(株)
(専門分野/関心分野)原子燃料の製造, 品質保証


報告

世界原子力大学へ行こう！

日本原子力研究開発機構 大釜 和也，電力中央研究所 荻野 晴之，
日本原燃(株) 佐藤 隆彦，日立 GE ニュークリアエナジー(株) 鈴木 彩子

原子力分野における国際的な次世代リーダーの育成と原子力の国際教育を目的として、世界原子力協会(World Nuclear Association)および世界原子力発電事業者協会(World Association of Nuclear Operators)等の支援により2005年から開催されている世界原子力大学(World Nuclear University)の夏季研修(Summer Institute)に、2010年に筆者4名は参加した。このWNU SIを通し、幅広い視野・考え方に触れ、自分の意見を持ち、文化の違いを理解しつつ相手と英語で対話していく国際的なコミュニケーション能力を鍛え、リーダーシップのあり方を学び、かつ、多くの海外の原子力分野で働く若手とのネットワークを構築した。本稿では、多くの若手原子力関係者に本研修プログラムへの興味関心を持っていただき、今後さらに多くの方にご参加いただくため、筆者らの参加経験について紹介した。また、今後の原子力国際人材育成等に資するため、我が国の今後の世界原子力大学夏季研修への貢献のあり方について提言した。

I. はじめに

1. 世界原子力大学 夏季研修とは

2003年にロンドンに設立された世界原子力大学(World Nuclear University: WNU)は、グローバル化する21世紀の原子力をリードする次世代の指導者育成を目指している。「夏季研修(Summer Institute: SI)」はその中心的活動であり、夏季の6週間、30を超える国・地域から約100名の参加者(フェローと称する)が、国際機関、各国の原子力分野の専門家およびリーダーからの講義・講演を聴いたり、ほかのフェローとの議論を通じて現在の原子力が直面する課題やその解決の方向性について英語で議論する研修プログラムである。また、研修を通じて国際感覚を身につけるとともに、ほかの参加者との交流を通じて今後のキャリアで役立つ「ネットワーク」を構築することも目的としている。

2. 開催実績

2005年から2010年まで計6回開催されている(第1表)。2009年から英国オックスフォード大学で開催されており、今年も同地での開催予定となっている(2012年以降の開催地は未定)。

3. 参加者の構成

2010年の参加者97名(男性76名、女性21名)の出身地の構成は、北米26名、中南米6名、欧州23名、北欧5名、東欧およびロシア5名、アフリカ5名、中東3名、アジア

The experience of World Nuclear University Summer Institute 2010: Kazuya OHGAMA, Haruyuki OGINO, Takahiko SATO, Ayako SUZUKI.

(2011年4月20日 受理)

第1表 世界原子力大学夏季研修の開催実績および参加者数

開催年	開催地	参加者 (参加国)	日本人 参加者
2005	米国 アイダホ	77(33)	2
2006	スウェーデン スtockホルム	89(34)	1
2007	韓国 大田(デジョン)	102(35)	2
2008	カナダ オタワ	99(36)	1
2009	英国 オックスフォード	77(33)	5
2010	英国 オックスフォード	97(30)	4

ア・オセアニア24名だった。参加者の所属機関内訳は、行政機関および研究開発機関31名、電力会社28名、メーカ等36名、大学関係者2名だった。ほとんどは技術的な職務に従事していたが、約10名は法務、人事、マネジメント、コンサルティングなどの技術以外の職種だった。このように、通常の留学、海外勤務をしたのでは望むべくもない多様な出身地、業務、所属組織を背景に持つ人たちと接する機会となり、人の多様性を実感できる場といえる。

これまで日本から15名(男性14名、女性1名、うち大学関係者4名、電力会社2名、メーカ6名、研究開発機関3名)が参加している。特に、2009年からは、日本原子力産業協会の「向坊隆記念国際人材育成事業」による参加費の支援により、2009年に4名、2010年に4名参加している。2011年も同支援により3名が参加予定となっている。

II. 世界原子力大学夏季研修における経験

2010年の夏季研修の概要およびそこで学んだことについて紹介する。なお、研修内容は基本的に毎年同様の構成となっているが、原子力業界の最新の状況や参加した

フェローからの研修に対するフィードバックを踏まえて改善が行われている。

1. 講義

6週間の研修のうち、第3週と第6週以外は、午前中に原子力全般にわたる分野につき、専門家から講義を聞き、午後はおよそ10名のグループで講義内容についてさらに深く理解するために疑問点の整理、それぞれのフェローの出身国における当該分野に関する状況の情報共有、当該分野における課題についての議論を行った。また、午後のグループでの議論の後、あらためてフェロー全員の前で、講演者に対してグループとしての質問を行った。これにより、当該分野についてさらに理解を深めるとともに、当該分野における課題意識などをフェロー全員で共有した。また、パブリックコミュニケーションなどの分野では、ケーススタディやロールプレイなど、より実践的に学べるように工夫された研修もあった。

講義が行われた分野は、世界のエネルギー事情、気候変動、各国の原子力政策、世界の燃料マーケット(ウラン採鉱、濃縮、加工など)、次世代炉開発、原子力による海水淡水化などの非発電利用、放射線利用、輸送、廃止措置、放射性廃棄物の処理・処分、核不拡散、原子力安全、核セキュリティ、規制、原子力法、パブリックコミュニケーションなどであった。

午後のグループでの議論は、日本の原子力政策、研究開発、産業の状況を海外からの視点で改めてとらえ直したり、日本の常識に縛られている考え方を見直す機会となった。日本の状況を紹介し、ほかのフェローの意見を聞いたり、自分自身の考え・意見を積極的に述べ、相手からのフィードバックを得るように努めた。こうした議論は、多様な背景を持つ各国のフェローの意見、関心について知り、自分の思考の幅を広げる機会となった。

また、この機会に、原子力分野全体にわたる広範な内容について自由に意見を交わすことによって、世界の原子力分野を俯瞰することのできる視点を養うことができた。幅広い分野をカバーする原子力業界に在ると、どうしても自分の専門分野以外の情報に対して受動的になってしまいがちだが、この機会を通して、様々な地域における原子力の動きを能動的に知識として取り入れ、世界の原子力全体の動きとしてとらえていく訓練となった。

何よりも、毎日のように、文化や経験の異なる人たちと議論を行うことにより、自分自身の意見を持つこと、それを英語で発言することの重要性を改めて認識した。この6週間はこの能力を改善する上でも役に立ったが、それ以上に重要なのは、ここで、こうした課題を実感を伴って認識できたことである。今後、国際社会で活躍するために避けて通れない課題と正面から向き合うよい機会となった。

2. 招待講演(Invited Leader Presentation)

国際機関、各国の行政機関、産業界等のリーダー(国際機関、各国の原子力関連の行政機関・規制機関の長や上級幹部等、電力会社等のCEO等)から、リーダーシップのあり方と原子力の課題や将来についての講演があった。

一連の講演を通して、現役リーダーから、国際的リーダー像とリーダーシップのあり方について直接指導を受けることができた。ある講演者によれば、リーダーシップには決まった型はなく、また、講義で教えることができるようなものでもないため、リーダー達の経験を聞き、それぞれが自分なりに考え、自分らしいリーダーシップのあり方を探求していくことが重要とのことだった。この場を通し、普段の業務で、どのようにリーダーシップを発揮し、周囲に貢献し、より付加価値の高い仕事を行っていくべきかを自分なりに考える機会となった。

また、この機会を活かし、質疑応答を通して、原子力分野における課題と思っていることについて問い、リーダー達の考え方を知ったり、彼らの将来的な展望等を知る貴重な機会となった。

日本では、若手など一般の構成員が所属組織のトップと話す機会がほとんどないため、こうした立場にある海外の方と、質疑応答等を通して直に話をするというまたとない機会となった。また、欧米の企業から参加しているフェローに聞くと、彼らは自分の企業のトップと話す機会は多くあると言っていたことが日本と対照的だった。このように、日本では、構成員がトップと対話する機会が欠如している。このことが、各組織において、リーダーのビジョンの浸透を困難にする原因の一つとなっているのではないかと思った。

3. 課題討論(Forum Issue Group)

第5週の後半と第6週は、提示された幾つかのテーマから、各フェローが関心を持つテーマを選定し、同じ関心を持つフェロー数名が集まって議論を行い、最後に全員の前で発表するというグループワークを行った。

筆者らは、「再処理の利点・欠点(Advantages and disadvantages of fuel reprocessing)」(大釜)、「低線量放射線の健康影響(Health effects of low-level radiation)」(荻野)、「原子力利用の拡大と核不拡散(Controlling nuclear weapons development while expanding the use of nuclear power)」(佐藤)、「国際設計承認機関は必要か(Should there be an International Design Authority?)」(鈴木)をテーマとして選定し、それぞれのグループで議論した。

それぞれのフェローの興味のある分野に参加できるため、活発に議論に参加することができ、かつ、関心分野につき、多様な意見を聞くことができた。この中には、今後、日本が海外と付き合っていく上でヒントとなるよ

うなこともあった。

4. 原子力施設見学

研修の第3週に、英国内にあるウレンコ社(Urenco)のウラン濃縮施設、ウェスティングハウス社(Westinghouse)のスプリングフィールド燃料加工工場、英国原子力廃止措置機関(Nuclear Decommissioning Authority)のセラフィールドサイトおよび原子力発電所の見学を行った。同じく、英国で開催された2009年のWNU SIでは、フランスの原子力施設見学が実施された。

5. その他

フェロー同士の交流を図るため、講義等の時間以外に参加フェローが関心分野についてのプレゼンテーションを行ったり、サッカー、地元のテムズ川でのパンティング(舟遊び)などのイベントやパーティが開催された。イベントやパーティの幾つかは海外の原子力事業者等の出資を受け、WNU SIの事務局側で準備したものだったが、このほかに各地域から参加しているフェローによってホストされたパーティもあった(カナダ、米国、中南米、東アジア地域)。

以上のうち、特に、日本人参加者が貢献した事例を以下にて紹介する。

(1) 「Hiroshima」をテーマとした核不拡散と核軍縮に関する講演の実施

広島市出身の電力中央研究所の荻野より、「Hiroshima」をテーマとした核不拡散と核軍縮に関する講演を8月6日の朝に行い、世界中の同世代の原子力技術者から「強く心を動かされた」と多くの共感を得ることができた。講演では、広島と長崎で2回にわたって被ばくされた山口彊氏の反核の想いと、ルース米駐日大使やパン国連事務総長が初めて参列された同日の広島平和記念式典の様子を報告し、我々世代が山口彊氏のバトンを後世につなげていかなければならないというメッセージを投げかけた(第1図)。

(2) 世界原子力大学史上初となるアジア地域からの



第1図 「Hiroshima」をテーマとした核不拡散と核軍縮に関する講演

参加者によるパーティの共催

韓国、中国、台湾、日本の4地域のフェローが合同で「East Asian Party」を共催し、ほかのフェローを招待し、東アジアの各地域の文化に関するプレゼンテーションと料理を提供しつつ交流した。大勢の参加者を得て、各地域の文化や食べ物などを話題に交流した(第2図)。

日本からは、日本原子力研究開発機構の大釜および日本原燃の佐藤が代表として、東アジアの各地域からのフェローの代表者とのパーティについて議論し、運営を行った。共催するメンバー、内容、予算、役割分担等について議論を重ね、お互いの利害を調整しつつ合意した上で、協力し合い、共通の目的を達成していくことを経験した。

この多国間での交渉では、日本人の感覚ではそんなに細かいことまで協議しなくてもよいと思えるようなことまで、議論を進めると議題にあがった。こうした他の国との感覚の違いを知ったことは貴重な経験であった。恐らく、日本人同士であれば、お互いの共有する常識や相場観があり、詳細な調整、合意を要しない。ところが、そういった了解は外国人にはもちろん通用しないため、一つ一つのことを着実に確認、合意しなければならず、忍耐を要するプロセスだった。そして、これが国際的な場であると認識した。しかし、こうした着実な努力から、お互いの信頼の醸成、深い理解につながった。

Ⅲ. 今後の目標

筆者らは、WNU SIを通し、幅広い視野・考え方に触れ、自分の意見を持ち、文化の違いを理解しつつ相手と英語で対話していく国際的なコミュニケーション能力を鍛え、リーダーシップのあり方を学び、今後の自分と将来の世界の原子力のあり方を常に問い続けた6週間を過ごした。そして同時に世界各国で、原子力分野で働く同世代の仲間を得た。彼らからも多くのことを学んだ。この経験、出会った人たちとのネットワークを、今後、日ごろの業務と日本の原子力にいかしていきたい。

また、筆者一同、海外での原子力事業に携わりたくいと



第2図 East Asian Party を共催したメンバーの記念写真



第3図 卒業セレモニーにおける日本人参加者の記念写真
(左から, 鈴木, 大釜, 佐藤, 荻野)

願っており, また, いつか国際機関で仕事をしたいと願っている者もある。この6週間は, そうした環境でより効果的に貢献するために何が必要であるかを考え, 今後の自身の生き方を考えるよい機会となった。ここで得た貴重な経験を糧に海外で活躍できる人材となるべく, 今後も努力していきたい。

IV. 提言

最後に, 2010年に WNU SI に参加した経験を踏まえ, 原子力国際人材育成等に資するため, 今後の我が国の WNU SI への貢献のあり方について以下提言したい。

(1) さらに多くの参加者を

国際的な業務に携わる機会が多い方, あるいは, 今後携わりたいと考えている方, 国際機関で働きたいと考えている方にとって, WNU SI は, そのために必要なスキル, ネットワークを築くまたとない機会となる。ぜひ積極的な参加をご検討いただきたい(参加にあたっては, 日本原子力産業協会の「向坊隆記念国際人材育成事業」による支援もあるので, 参考にしていただきたい)。

また, 人材育成に携わる方には, 若手を WNU SI にお送りいただくことをご検討いただくと幸いと考えている。

これまでの日本からの参加者は最大で5名となっている。一方, 2010年実績として, カナダ14名, 米国12名, 韓国8名, フランス7名であり, 日本からの参加者はこれらの国と比較すれば若干少ない。毎年約100名のフェローが参加しており, 研修期間中は10人ずつ10グループでの討論が行われる。例えば, 国際感覚を磨く貴重な場を損なわないために, 同じグループに日本人が2人入らないようにするとしても, 現在の倍くらいまでは参加者を増やす余地があるといえる。これにより, より多くの国際感覚を身につけた原子力専門家の育成を行うことにつながる。

このために, 例えば, 日本原子力産業協会の支援とは別の枠組みで参加希望者を支援したり, 各社, 各機関が独自に WNU SI に派遣することなどを検討することも選択肢となりうるのではないだろうか。

(2) より多くの貢献を

2010年の WNU SI では, 専門家からの講義が約60件と12人のリーダーからの招待講演があった。このうち,

日本から講演したのは, 日本原子力産業協会の服部理事長および WNU SI にメンターとして参加された同協会の小西氏の2名のみだった。世界第3位の原子力発電設備容量を持つ国として, 貢献はまだ限定的ではないだろうか。

今後, 行政機関, 産業界, 研究開発機関などから多くの専門家, リーダーがこの場において, 日本の原子力の状況, 政策および技術などについて発信し, 各国の若手世代に将来の日本との原子力分野における協力の可能性を考える機会を提供していくことも重要ではないだろうか。

(3) 201X年世界原子力大学夏季研修 日本開催

日本には, 発電のみならず, ウラン濃縮, 燃料加工, 再処理にわたるサイクル施設とそれを支える高度な技術があり, 優れた人材がいる。加えて, 唯一の核兵器による被爆国として原子力の平和利用にかかる国際的な取り決めを遵守し, 核不拡散を担保する活動の先頭に立って貢献してきた歴史, 日本人の繊細な感覚かつ勤勉さに由来する現場の文化などがある。こうした技術, 人材, 歴史, 文化から, 各国の若手が学ぶところも多いのではないだろうか。

また, 一方で, 大変残念ながら, 大きな原子力災害の経験を持つ国でもある。こうした我が国の原子力が経験したことを各国の若い世代に知ってもらうことにより, 我が国で生じた災害を各国で二度と生じさせないようにすることに貢献できるのではないだろうか。

(4) 世界的な原子力安全の確保に向けた取組みを

WNU を運営する中核機関の一つである世界原子力発電事業者協会(WANO)の方の講義が大変印象的だったので少し紹介したい。WANO は, 1986年のチェルノブイリ事故後, 1つの事故が世界に大きな影響を及ぼすため, 同様の事故を二度と生じさせないための国際協力が重要であるとの認識の下, 設立された。その後, 事業者間での運転経験の共有等による原子力安全確保および信頼性向上に努めてきている。一方で, こうした取組みには, 諸々の要因(失敗をあまり言いたくないという人の自然な心理, 自分の経験がほかの人にとって役に立つかどうかという疑問, ほかに多くの仕事があって余裕がない等)による障壁もあるとのことだった。

いま, 我が国は, こうした障壁を乗り越え, 多くの経験を世界の原子力関係者と共有し, 今後の世界における原子力安全の確保に貢献することができるかどうかを問われているのではないだろうか。

WNU SI への多くの参加, 貢献, 我が国での開催などにより, 各国の若手の原子力関係者に我が国の経験から学ぶ機会を提供することができる。また, 我が国の若手の原子力関係者にとっては, 彼らとの議論をとおして今後の我が国の原子力安全について広い視野で考えていく機会となるのではないだろうか。

著者紹介

本研修への参加にあたりご支援くださいました日本原子力産業協会、このような貴重な研修の機会をご準備くださった WNU のスタッフおよび講演者の皆様に心より御礼申し上げます。

—参考資料—

- 1) World Nuclear University,
<http://www.world-nuclear-university.org/>
- 2) 日本原子力産業協会 世界原子力大学「夏季研修」の紹介
http://www.jaif.or.jp/ja/wnu_si_intro/index.html
- 3) 日本原子力産業協会「向坊隆記念国際人育成事業」,
http://www.jaif.or.jp/ja/wnu_si/index.html

大釜和也(おおがま・かずや)
(独)日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)高速炉炉心設計

荻野晴之(おぎの・はるゆき)
(財)電力中央研究所
(専門分野/関心分野)科学的合理性に基づいた放射線防護基準の創造

佐藤隆彦(さとう・たかひこ)
日本原燃(株)
(専門分野/関心分野)MOX 燃料の設計・製造, MOX 工場の建設

鈴木彩子(すずき・あやこ)
日立 GE ニュークリアエナジー(株)
(専門分野/関心分野)原子炉格納容器の設計

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—

(6月3日第12回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・福島原発事故関連論文の投稿状況が報告された。また、審査要領を一部見直し、適用範囲を明確にした。
- ・平成22年度の編集委員会活動報告案が説明され、了承された。
- ・2011年度の編集委員会グループ案が説明され、了承された。分野別責任者は論文誌幹事会出席時には、学会誌幹事会にも出席。
- ・英文誌共同出版への移行進捗状況が報告された。

- ・著作権について検討を進めることとした。
- ・Progress in Nuclear Science and Technology の新規提案(ISORD-6)があり、承認した。
- ・論文の審査分野の見直しを行うこととした。
- ・和文論文誌のJ-Stage登録が2006年までで途切れていたが、2007年以降継続的に登録することが認められたとの報告があった。

【学会誌関係】

- ・委員長より「会員に読まれ、役立ち、親しまれる学会誌とレベルの高い学術論文誌を目指し、自主的な編集・出版活動を継続した。」との今年度の活動報告があった。
- ・当面、福島原発(F1)事故関連記事を「FOCUS・東日本大震災」を会誌前半に纏めて掲載していくが、状況をみて記事構成を見直すことにした。
- ・今後、広い分野で多面的な側面からの記事が求められることから、記事企画グループの運用の見直し、編集委員会専門分野責任者のアドバイザーとして参画を決めた。
- ・編集委員会所掌の学会誌紙数はH22年度実績(70ページ)の約10%減での運用が必要であり、真に求められる記事を精査していくことにした。

編集委員会連絡先<<hensyu@aesj.or.jp>>

2010年 NPT 運用検討会議と今後の課題

外務省 軍縮不拡散・科学部審議官 武藤 義哉

1. はじめに

核兵器不拡散条約(NPT)は、1970年に発効(日本は1976年に締結、(締約国は190か国)、(未締約国は、インド、パキスタン、イスラエル))して以来、国際的な核軍縮・不拡散体制の基礎として、国際の平和と安定に大きく貢献してきた。

NPT体制は、核不拡散、核軍縮、原子力の平和的利用という3つの柱によるグランド・バーゲンからなり、この3つの柱を同時に進めていくことがこの体制の理念といえる。この3つの柱をもう少し具体的に説明すれば、次のようになるだろう。

- (1) 主に非核兵器国による核不拡散義務。NPTの非核兵器国は、核兵器を受領、製造等せず、また、原子力が平和的利用から核兵器に転用されることを防止するために、IAEA 保障措置を受諾する義務が課されている。
- (2) 主に核兵器国による核軍縮交渉義務。NPTでは、米、露、英、仏、中の5か国を「核兵器国」とし、NPTの下で核兵器を持つことが認められている一方で、核軍縮交渉を誠実に進める義務が課されている。
- (3) すべての締約国が有する「奪い得ない権利」として原子力の平和的利用の権利。締約国は、可能なときには、特に非核兵器国の領域における平和的利用のための原子力の応用の一層の発展に協力する義務が課されている。

NPTでは、第8条3に基づき、NPTの目的の実現と条約の実施を確保するよう、5年毎に条約の運用を検討するための会議を開催することとなっている。NPTが1970年に発効した後、1975年から2010年まで5年毎にNPT運用検討会議が開催されてきた。この会議で各国のNPTに対する立場が最も明らかになるが、NPT締約国の中に3本柱をめぐる対立構造が常に存在し、条約の実施が進まなかった。具体的には、核軍縮と核不拡散をめぐる核兵器国と非核兵器国の対立、核不拡散と原子力の平和的利用をめぐる先進国と途上国の対立があった。かかる対立を背景に、核不拡散と核軍縮の双方の進展がなかなか進まない状況、すなわち、非核兵器国からみれば、まずは核兵器国が核軍縮に取り組むべきとの考えであり、また核兵器国からみれば、核軍縮を進めるためには核不拡散が強化されなければならないとの意見である。これら運用検討会議の課題は、いかにこのグラン

ド・バーゲンを活性化させるかという点であった。

以下に、過去の運用検討会議の経緯、2010年NPT運用検討会議の評価、及び今後の課題について概説する。

2. 過去の運用検討会議の経緯

NPTの3つの柱のグランド・バーゲンの活性化という問題は、過去の運用検討会議において大きな課題であった。

例えば、条約では、条約発効の25年後に会議を開催し、条約の有効期限につき決定することとなっていたが、その会議に当たる1995年のNPT運用検討・延長会議においては、条約の無期限延長の決定と同時に、条約の目的の履行状況を検討するための「条約の運用検討プロセスの強化」、核不拡散、核軍縮、原子力の平和的利用に関する措置等を取り上げた「核不拡散と核軍縮に関する原則と目標」が同意されたことにより、3つの柱の将来の道筋が示された。また、特にアラブ諸国の懸念に応え、中東地域のNPT非締約国のNPT加入及び同地域における非大量破壊兵器地帯設置を求める「中東に関する決議」も採択された。

2000年のNPT運用検討会議については、事前に核軍縮を巡る消極的な動向(CTBT(包括的核実験禁止条約)及びFMCT(兵器用核分裂性物質生産禁止条約)を巡る前進の欠如、インド及びパキスタンによる核実験等)もあり、その見通しを悲観視する声もあったが、核軍縮に関する13の実際の措置(第1表)に合意し、核兵器国による核廃絶に向けた明確な約束を含む最終文書を採択し、核不拡散体制を堅持することができた。

他方、2005年NPT運用検討会議においては、米国によるCTBT批准の拒否等に見られる核軍縮の進展の欠如、北朝鮮及びイランの核問題、中東の問題(イスラエルのNPT未批准)等、核軍縮・核不拡散の問題を巡る大きな対立があり、同会議は最終文書を採択できずに、何ら成果もなく終わった。この結果を踏まえ、2010年NPT運用検討会議の成否は、NPT体制の将来を占う上での鍵と見られていた。

3. 2010年 NPT 運用検討会議の評価

- (1) 2010年NPT運用検討会議前のNPT体制を巡る状況

2009年に就任したオバマ大統領は、「核兵器のない世

第1表 核軍縮に関する13の実際的措置

- (1) CTBT 早期発効
- (2) CTBT 発効までの核実験モラトリアム
- (3) 軍縮会議にカットオフ条約の即時交渉開始及び5年以内の妥結を含む作業計画に合意することを奨励
- (4) 軍縮会議において核軍縮を扱う適切な補助機関の即時設置を奨励
- (5) 核兵器及びその他の軍備管理・削減措置への「不可逆性の原則」の適用
- (6) 核兵器の全面廃絶に対する核兵器国の明確な約束
- (7) START II 早期発効及びその完全な実施, 速やかな START III 妥結, ABM 条約の維持・強化
- (8) IAEA・米ロ間の3者協定の妥結・実施
- (9) 国際的な安定を推進し, すべての国の安全が損なわれないことを原則として核兵器国が核軍縮に向けて取る措置・核兵器国による一方的核削減のための更なる努力・核兵器能力及び軍縮協定実施についての「透明性」の強化・非戦略核兵器の一層の削減(国際平和と安定の推進に資するための, 一方的なイニシアティブを踏まえた, 及び全体の核兵器削減措置の不可分な措置)・核兵器システムの運用ステータスの一層の低減のための具体的な合意措置・安全保障政策における核兵器の役割の低減(核兵器の使用のリスクを最小限に抑え, 核兵器廃絶を促進するための措置)・すべての核兵器国による核廃絶に向けたプロセスへの関与
- (10) 余剰核分裂性物質の IAEA 等による国際管理, 及び同物質の処分
- (11) 軍縮の究極的目標が実効的な国際管理の下での全面完全軍縮であることの再確認
- (12) NPT 第6条及び「原則と目標」(核軍縮努力)の実施についての定期的な情報提供(ICJ 勧告的意見を想起した措置)
- (13) 核軍縮のための検証能力の向上

界)に向けて核軍縮を重視する立場を鮮明にし, CTBT 批准を目指すとの政策変更, 戦略核兵器等の削減のためのロシアとの新 START 条約の署名, 米国の核態勢見直しの発表等, 一連の措置を提示し, 核軍縮の機運の高まりに貢献した。他方, 北朝鮮及びイランの核問題並びに中東の問題が前進しないこと, 核軍縮の進展の欠如に対する非同盟運動(Non-Aligned Movement)諸国の不満といった点を巡り, 2005年の NPT 運用検討会議で大きな問題であった締約国内の対立は引き続き存在し, 2010年運用検討会議の見通しは予断を許さなかった。さらに, 核テロへの懸念の高まりや, 原子力の平和的利用の拡大の見通しに伴う核拡散の潜在的リスクの懸念への対応といった課題にも直面していた。

(2) 運用検討会議の争点

こうした中で, 昨年5月3日から28日までニューヨークの国連本部において開催された2010年 NPT 運用検討会議は, 前回の会議の結果を踏まえ, NPT への求心力を強め, NPT を基礎とする国際的な核不拡散体制を強化することが最大の目的であった。

この運用検討会議での主な争点は, 以下のとおりであった。

- (1) 核不拡散や原子力の平和的利用の前進を引き出すために, 新しい核軍縮措置の合意を目指す, 「核軍縮」の問題。
- (2) 未申告の原子力活動がないことを確認するためのより厳しい査察を可能とする IAEA 追加議定書の普遍化(未締結国の締結促進)・標準化(保障措置のスタンダードであるとの認識の共有), ある国が核兵器を製造した後に NPT を脱退するような事例を防ぐための議論, 輸出管理, 北朝鮮の核問題, 1995年の中東決議の履行といった, 「核不拡散」の問題。
- (3) すべての国が原子力の平和的利用を行う権利を有することの確認や, 途上国も原子力を利用できるようにするための, 専門技術や人材育成等の国際協力に関する, 「原子力の平和的利用」の問題。

(3) 運用検討会議の成果

会議の最終日まで, 特に中東地域の非大量破壊兵器地帯の設置の問題についてアラブ諸国と米国の見解の相違から最終的な合意が危ぶまれる中, 各国や議長が粘り強い交渉を行った結果, 運用検討会議では, NPT の3本柱それぞれにつき, 将来に向けた包括的かつ具体的な行動計画を含む最終文書を全会一致で採択することができた。

具体的には, 核軍縮では, (1)2000年に合意された「核兵器の全面廃絶に対する核兵器国の明確な約束」を再確認したこと, (2)削減された核兵器等を再び増強しないようにするための「不可逆性」, 核兵器が実際に削減されたことの「検証可能性」及び信頼醸成向上のため情報を開示していく「透明性」の原則を確認し, 具体的な核軍縮措置につき核兵器国が2014年の NPT 運用検討会議準備委員会において進捗を報告するメカニズムが盛り込まれたこと, (3)核兵器の役割の更なる低減を会議として要請したこと, が特筆すべき成果である。

核不拡散では, 北朝鮮に対し, 六者会合「共同声明」での約束を果たすよう強く要請し, また IAEA 追加議定書のすべての未締結国に対し, その速やかな締結を奨励した。会議の成否に大きな影響を与えるといわれていた中東決議の履行の方策に関し, 国連事務総長と中東決議共同提案国である米英露の召集にて, すべての中東諸国が参加する国際会議を2012年に開催することが最終文書に盛り込まれた。

原子力の平和的利用では, 原子力発電を含む原子力エ

エネルギーの利用に当たり、従来、我が国が強く主張してきた、いわゆる、「3S」という3つの要素(核不拡散/保障措置(safeguard)、原子力安全(safety)、核セキュリティ(security))へのコミットメントが盛り込まれた。

(4) 我が国の貢献

我が国からは、福山哲郎外務副大臣(当時)が首席代表として一般討論演説を行い、この運用検討会議への提案として豪州と共同で作成された実践的核軍縮・不拡散措置、IAEA 追加議定書普遍化の推進、北朝鮮やイランの核問題の解決、原子力の平和利用のための国際協力の重要性を強調した。

さらに、我が国は、①上記日豪共同提案による実践的核軍縮・不拡散措置、②軍縮・不拡散教育、③IAEA 保障措置の強化、④原子力平和利用のためのIAEA 技術協力に関し、我が国の考え方や最終文書の文言案を提示した作業文書を運用検討会議に提出した。これらは、多くの国から幅広い支持を得て、議論の基礎を提供し、その多くが最終文書に広く反映された。また、会議での交渉において、関係国と緊密に連携し、議場内外で核兵器国や非同盟運動等の国に働きかけを行い、会議の最終段階では、岡田外務大臣(当時)のイニシアティブにより、豪、オーストリア、独、韓、ニュージーランドの外相等とともに合意形成に向けた結束を呼びかける緊急閣僚声明を发出するなど、合意形成に重要な貢献を行った。

また、我が国は、核兵器の惨禍の実相を将来の世代に継承していくことを自らの責務として、軍縮・不拡散教育に取り組んできた。今次運用検討会議には、我が国から被爆者の方や多くのNGOの方々がニューヨークを訪れ、会議場や街頭で核廃絶を訴え、市民社会の大きな存在感が示された。我が国政府は、軍縮・不拡散教育で市民社会が果たす役割を確認し、政府と市民社会との連携の必要性を強調する作業文書を提出した結果、最終文書で初めて軍縮・不拡散教育に言及された。これは、我が国のこれまでの着実な努力の表れといえよう。

4. 今後の課題

2010年 NPT 運用検討会議については、NPT 体制が多く課題に直面する中で、国際社会が、2005年の運用検討会議の結果を繰り返すことを回避するために結束し、NPT のグランド・バーゲンである3つの柱に関する包括的な行動計画を含む最終文書を全会一致で採択した。このことにより、すべてのNPT 締約国が協働して対応できる道筋を提示し、NPT 体制を救った意義は大きい。

他方、今回の運用検討会議の議論を通じて3つの柱を巡る締約国間の対立が引き続き存在し、「行動計画」の採択が、この対立を解消したわけではないことを認識すべきである。すなわち、今次「行動計画」を成り立たせた基盤は脆弱であり、国際社会が引き続き結束して取り組まなければ、この合意を履行することは極めて困難であろう。

したがって、同運用検討会議によって高まった機運を維持・強化するとともに、同会議で合意を得た「行動計画」を着実に実施し、かつ、中長期的な核軍縮・不拡散の方向性を示すべく、現実的な取組の着実な実施を確保していくことが、国際的な核不拡散体制を強化する上で重要である。

かかる観点から、我が国は、豪州と共に、昨年9月、核軍縮・不拡散に関する外相会合を開催し、核リスクの低減を通じた「核兵器のない世界」の実現を目指す新たな地域横断的なグループを立ち上げた。このグループには、我が国及び豪州を共同議長とし、カナダ、チリ、ドイツ、メキシコ、オランダ、ポーランド、トルコ、UAE が参加している。我が国は、この活動を通じて、具体的提案を積極的に行い、核兵器国と非核兵器国、先進国と途上国といった対立構造を乗り越える解決策を提示していきたいと考えている。我が国は、これらの国々と共に、また、他の国々も巻き込みながら、NPT 運用検討会議の合意事項の実施を確保し、核兵器のない世界に向けて、国際的な議論を積極的に主導していく決意である。(本稿は筆者個人の見解である。)

(2011年3月25日 記)

ATOMOS Special

東欧編

世界の原子力事情 第14回

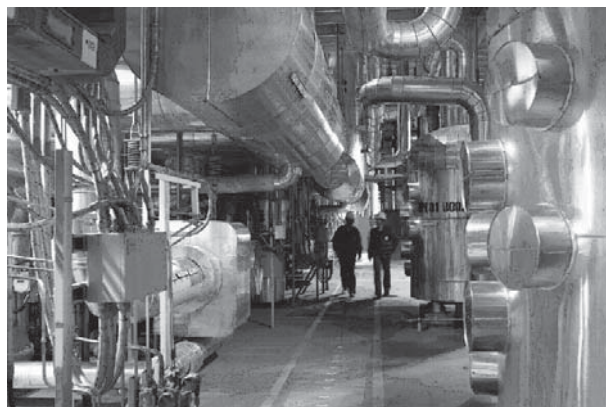
チェコ—隣国オーストリアとの対話

日本原子力研究開発機構 杉本 純

旧チェコスロバキアは1993年1月のチェコとスロバキアへの分離独立以来、経済的にも明るい兆しが見え始め、1995年11月、良好な経済実績と民営化の進捗が評価され、旧社会主義国では初めてOECDへ加盟した。チェコは石炭の資源は豊富であるが、その他の燃料は輸入に頼っている。1次エネルギーに占める石炭の割合は、中国、ポーランドに次いで世界3位(2005年)であるが、生産量は減少しつつあり、環境への懸念から原子力発電の増強、輸入を基盤とした天然ガス利用の強化を目指している。現在、天然ガスの8割以上をロシアから輸入している。チェコ政府は、EU加盟を意識したエネルギー政策を2000年に承認した。これによると、省エネルギーの達成と再生可能エネルギーの利用、エネルギー部門の民営化計画、EU法令に合致させるための国内エネルギー法の改正、エネルギー部門の価格政策の基本戦略、電気・ガス料金の改訂等を主要目標としている。

チェコで運転中の原子力発電所は、南モラヴィアにあるドコバニ原子力発電所とプラハの南、オーストリアの国境から60 kmにあるテメリン原子力発電所である(第1～3図参照)。いずれもロシア型の加圧水型炉であり、ドコバニ原子力発電所は、44万kW級4基より構成され、1985年に1号機が営業運転を開始し、87年までに全4基が営業運転を開始している。100万kW級2基より構成されるテメリン原子力発電所は、1987年に建設を開始したが、1989年のビロード革命後の新政権が当初計画

にあった3、4号機の建設中断を決定した。チェコスロバキアが分裂後の1993年にチェコ新政権が1、2号機の建設完遂を公式に決定し、計測制御系の完成にはウエスティングハウス社が選ばれた。テメリン原子力発電所は、西側のデジタル計測制御系がロシア型原子炉に組み込まれた初のケースである。2004年10月に営業運転を開始したことで、国内の複数の火力発電所が閉鎖され、年間約1,000万トンの二酸化炭素の排出を抑制している。同国の総発電電力に占める石炭の割合は6割以上と高い。原子力のシェアは34%と我が国の29%(2009年)に比



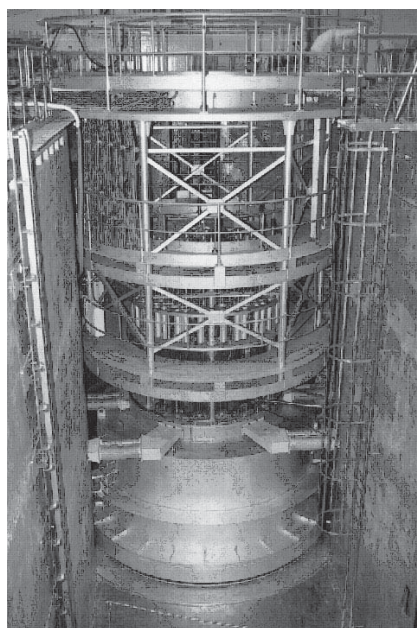
第2図 テメリン原子力発電所の内部 ©CEZ



第1図 テメリン原子力発電所 ©CEZ

Czech Republic—Dialogue with neighboring Austria: Jun SUGIMOTO.

(2011年 3月9日 受理)



第3図 テメリン原子炉圧力容器の上部 ©CEZ

べてやや高い。原子力の稼働率は2007～2009年の平均が79%とこちらも我が国の63%より高い。

テメリン発電所の建設をめぐる、反原子力政策を掲げる隣国オーストリアが建設に一貫して反対し、これに対しチェコが不快感を表明するなど、国内外に波紋を呼んだ。オーストリア政府は2000年、同発電所が国際的安全基準を満たさない限り、チェコのEU加盟に同意できない、との声明を発表した。これに対し、チェコ側は一斉に反対し同発電所をめぐる両国間の争いは一気に過熱した。両国間の関係悪化を懸念した欧州議会は、起動を控えた1号機に関し、チェコ政府に対し、同発電所の送電を開始する前に十分な手順を踏むよう要請した。また、国際的な原子力安全基準を満たしていることの証明を求めた。チェコとオーストリアの首脳会談の結果、チェコ政府はEUの監督の下、追加的な環境影響評価を2001年3月に完了した。これを受け、チェコ環境省は環境への影響は許容範囲内として承認した。その後両国は、ウィーン近郊のメルク修道院で同発電所をめぐる協定に合意した。チェコはオーストリアに十分配慮して原子力発電所の高い安全性の確保に努力することを約束する一方、オーストリアはチェコのEU加盟協議におけるエネルギー分野の交渉で協力することを約束した。この合意(メルク協定)は、両国は互いに独自のエネルギー政策を選択する権利を持つことを尊重しつつ、原子力発電について両国間の信頼のために徹底的に対話することの意義を確認したものである。その後も何かと外交問題になりがちではあるが、2009年3月に行われた世論調査では、チェコ国民の77%(および緑の党投票者の56%)がテメリン原子力発電所3、4号機の増設計画に賛成を示した。同年8月にはチェコ国営電力(CEZ)は、同発電所3、4号機の入札準備を開始している。計画によれば、120万kW級の原子炉2基を2013年には建設を開始し、3号機の完成は2020年の予定である。2008年中頃、CEZは環境省に3、4号機の環境アセスメントを要請しており、これには2～2年半の期間を要するとされている。このほか、120万kW級原子炉のドコバニ5号機の計画もある。これらの建設は、ウェスティングハウス、スコダ/ロシア連合、アレバの3候補があり、入札は2012年、契約調印は2013年の予定である。

筆者は日本原子力研究開発機構ウィーン事務所に赴任中の2007年、理事長の欧州視察に随行して、プラハの北北西約40kmのヴルタヴァ川沿いにある原子力研究所および核物理研究所を訪問したことがある(第4図)。両研究所の主な実験施設を見学する貴重な機会を得た。我が国の大学や当原子力機構と個々の研究分野で古くから協力が進められていることに改めて感心した。1970年代早くから産業界のニーズを取り入れるなど、我が国の感覚からすれば施設は古く規模も小さいが、工夫を重ねるこ



第4図 チェコ原子力研究所での会合(右端が筆者)



第5図 プラハ城とカレル橋を臨むヴルタヴァ川

とにより欧州を中心に科学技術的成果を上げており、その積極的な企業努力は我が国も見習うべきと強く感じたことを思い出す。

チェコの首都プラハはウィーンに似た美しい街であり、プライベートでも訪れたことがある。プラハ城とカレル橋を臨むヴルタヴァ川の美しさは欧州一という人もいる。川に向かうベンチに家内と座って水彩画を描いていたら、日本人の中高年婦人の一団と遭遇し、中の一人から「私もこのような絵を描いてみたい」といわれたのを覚えている。素人画で恐縮であるが、その雰囲気が少しでも伝わればと思い、拙い絵も掲載させていただく(第5図)。

参考：World Nuclear Association Web.

著者紹介

杉本 純(すぎもと・じゅん)



日本原子力研究開発機構 原子力人材育成センター
(専門分野)シビアアクシデント、原子炉システム安全、原子力人材育成

談話室

用語「原子力」はガラパゴス

元日立中央研究所 田上 嵩

はじめに

関東地方には珍しく大雪が降った2月13日の朝、日本経済新聞を読みながら、中外時評の欄の表題を見て驚いた。論説委員の署名入りで、「原子力もガラパゴス」とあった。本誌の読者も多くの方が読まれていると思うし、長年、原子力の分野から遠ざかっていた筆者には、内容の当否を論ずる見識がないので、詳細の紹介は避けるが、要するに、“日本の原子力発電所の安全規制は、開発当初に設定された古くからの規制の仕組みに、トラブルが発生する度に、新たな検査項目を付け加えるだけで済ませ、技術進歩に伴った抜本的な見直しを怠って来た。その結果、これ等の安全規制は、世界の潮流から孤立して、特殊な進化を遂げ、世界でも稀な非効率な規制が生き残った。”というような内容で、更に、政府の1月の原子力委員会において、“ガラパゴス化している印象がある”という意見が出たと付記されていた。

その論説の主題「原子力はガラパゴス」という隠喩を見たとき、昔から馴染みながらも長年にわたって不自然さを感じてきた「原子力」という用語が、不意に脳裏に鮮明に浮かび上がって来た。そこで、この機会に長年のモヤモヤを吐き出そうと本稿を綴ることにした次第である。

化石燃料や太陽電池こそ「原子力」に相応しい

石油、石炭等の化石燃料は、太古の動植物の遺骸だそう、その主成分は薪炭と同じく炭素であることが知られている。これらを燃やして得られるエネルギーは、主として酸素との「化学反応」によって発生する熱エネルギーであり、この化学反応で生ずる原子1個当たりのエネルギーの大きさはeVのオーダーであることは、理科の教科書が教える事実である。

要するに、化石燃料から生ずる熱エネルギーは、原子が内蔵する電子の位置のエネルギーが源泉という訳だ。これこそ「原子力」の名に相応しいと筆者は思うが、如何？

次に、太陽電池を考えて見よう。ご承知のように、俗称ソーラ電池、実態は“太陽発電板”とも称すべきこの機器の原理は、ご存知アインシュタインのノーベル賞の対象となった光電効果を利用している。例えば、シリコン半導体などのように、格子状に配列した原子の間にゆるく結合した電子が多い材料の表面に光が当たると、そのエネルギーを得てそれらの電子が自由電子となり、半導

体内部に電位差が生じて、電流が得られるという仕掛けである。つまり、これも、半導体を構成する特殊な状態の原子の存在が電流を生ずる発電現象であり、まさに「原子力発電」の名に相応しい。

なお、以上の説明を聞いて、「原子力」よりも「電子力」の方が適切ではないかと考える向きも予想されるが、それは違う。なぜなら、電子単独では以上のような能力は存在せず、以上の物質内で電子が原子という構成体の一員なればこそ、中央の核の正電気に拘束されて生ずるエネルギー準位が電子エネルギーの源泉だからである。

日本で普及している用語「原子力」とは何か

これはもう、本誌の読者には説明の必要はないが、議論の進行上に必要最小限を以下に説明したい。

原子核を構成する陽子と中性子は相互に強い核力で結合されているが、陽子間には弱いクーロン力による斥力が働くために、重い核では中性子の数が陽子の数よりも次第に多くなり、軽水炉の核燃料として利用されるウラン235では、陽子数92個に較べて中性子数は143個となり、53個も余分に増えている。本来、重陽子のように、陽子と中性子がペアの場合に働く結合力が最も強い性質があるため、中性子だけが増えた原子核はぶよぶよと不安定になり、外部から減速された中性子が衝突すると、ぶよぶよ振動と共振し、大小2個に分裂する性質がある。

その際に、最初のウラン核の質量よりも、分裂後の2個の核の質量の和が小さくなり、その差の質量分がエネルギーに変換され、2個の核分裂生成物と数個の中性子を生み出す運動エネルギーとなる。これが日本で「原子力」と称されている根源であることはご承知の通り。この際に、1個の核分裂で生ずるエネルギーの大きさは約200 MeVで、前項で述べた1個の原子の化学反応で生ずるエネルギーの大きさ数eVとは桁違い(約100万倍)の大きさであることも周知である。

また、前項で述べた化学反応との本質的な相違は、核分裂の結果生ずる生成物(以下FPと略記)のもつ特異な性質である。ウラン核の分裂で生じた大小2個のFPは、基のウラン原子核以上に中性子の数が過多の状態にあるため、核分裂後に平均して約3個の中性子を放出するが、放出までの時間遅れが長いものでは数秒以上の中

中性子が存在し、これを「遅発中性子」と称し、“この遅発中性子だけで核分裂の連鎖反応を維持させたらどうか”というアイデアが浮かんだことが、原子炉の安定した出力制御を可能とした「光明」であった。他方で、多くのFPは励起状態にあり、安定した同位元素に落ち着くまでの間に、中性子のほかにガンマ線などの“放射線”を放出し続け、半減期の長いFPは数週間から数年以上にわたって“崩壊熱”を放出し続ける。これらのFPは、平和利用の「影」として、使用済核燃料内に蓄積される。

以上のような原子核の特性を大学時代に追い求めて来た筆者にとって、この核反応エネルギーを化学反応に起因する「原子力」と同じ用語で用いることに、どんなに大きな違和感を持って来たかという心境を、多少でもご理解いただければ幸いである。

米国でも原子炉の開発初期には「原子力」が使用されていた

筆者が原子力の仕事に従事中、米国アイダホ州の砂漠に建設された「国立原子炉試験場」に1年間滞在し、軽水炉の主冷却管破断事故に伴う炉心溶融の実規模実験計画(LOFTプロジェクト)に参画した。

核兵器技術の平和利用に関する先駆者である米国でも、核エネルギーに対して戦後しばらくは「原子力(Atomic Energy)」という用語を使用していたことは筆者の体験から確かである。例えば、アイダホの試験場で目にしたほとんどの政府書類にはAEC(Atomic Energy Commission)の表示があり、新聞の原爆の用語はAtomic Bomb(略語A-bomb)だった。ただ、原子炉はNuclear Reactorと呼称されていたと記憶している。

これらの用語について試験場の技術者に尋ねたとき、“さあ良くわからないが、当時の役所ではatomとnucleusの区別が付いていなかったのではないかなあ。それとも、いまだ原爆情報に関する軍関係の秘密主義が残っているから、火薬atom爆弾の観念のままの方が好都合だったのではないかなあ”というような、曖昧な返

事しか返って来なかったような記憶がある。

しかし、米国研修を終えて帰国後間もなく、アイダホ試験場の友人たちからの情報によれば、Atomという表現が、少なくとも米国政府や試験場関係の文書から消えて、すべてNucleusに変更されたと伝えてきた。例えば、原子力所轄機関名は以前のAECからNRC(Nuclear Regulate Commission)に変更されたと書かれていた。

それ以来約30年を経ても、わが国では「原子力」という用語は生き残って来た。それを今頃になって筆者が持ち出したのは、冒頭の日経新聞の論評に悪乗りして、長年のモヤモヤを吐き出したに過ぎない。

おわりに

用語はその国の文化の象徴ともいう。わが国では“鉄腕アトム”から“本学会の表看板”まで、社会に広く深く浸透している「原子力」という用語に、いまさら難癖を付ける気持ちはない。それに、本学会の英文による研究論文誌は“Journal of Nuclear Science and Technology”と表示されているので、対外的にも問題はないと思う。

ただ、後世において子供や孫に尋ねられた場合に備えて、しかるべき返答だけは用意しておきたく、現役諸賢の良識に期待し、何十年ぶりに当誌に拙文を寄稿した次第である。

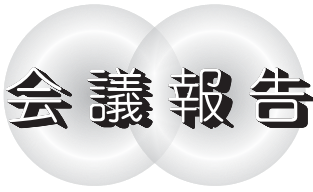
何かご意見、感想などを頂けるようでしたら、下記のメール・アドレスに気軽にご一報くだされば幸甚です。

<t.tagami8@jcom.home.ne.jp>

(追記)

本稿を編集部へ郵送直後に東日本大震災が発生し、現時点では福島第一原子力発電所の事故災害の鎮静作業が継続中と報じられています。原子力開発の揺籃期に安全性の研究に従事した一人として、種々の反省、悔悟と、一刻も早い震災地域の復興を祈念している所です。

(2011年3月28日 記)



力を蓄えた原子力の基礎科学・基礎工学—着実な展開の確認 「第3回革新的原子力エネルギーシステム国際シンポジウム」概要

The Third International Symposium on Innovative Nuclear Energy Systems (INES-3)

2010年10月31日～11月3日(東京工業大学 大岡山キャンパス)

東京工業大学 革新的原子力研究センター(CRINES)および東工大 原子炉工学研究所は、このたび、標記の国際会議を主催した。今回は参加登録者総数148名(うち海外18カ国から55名, 学生38名)の参加をえて、成功裏に会議を閉幕することができた。セッションとしては、特別講演1件として米国 Terra Power社のCEO John Gilleland博士から“The History of Terra Power and Travelling Wave Reactor Development”(一般に公開; 詳細後述), プレナリー講演6件, 口頭発表76件, ポスター発表34件であった。東工大では以前, 21世紀COEプログラム「世界の持続的発展を支える革新原子力」を獲得し, 革新原子力を議論し, 様々に成果をあげて来ている。その後も着実に研究展開がなされ, 国際的にも多くの研究者に対して求心力を一層高めている現状を俯瞰する必要があるとして標記会議が主催・運営されたと感じられた。

革新的小型原子炉として原理検証研究のなされたCANDLE燃焼に関する原子炉物理学的研究や, 次世代炉の1つとして注目され続ける鉛ビスマス冷却原子炉に関する熱流体・材料工学関連研究, 革新的燃料サイクルシステムを支える錯体化学の基礎など, 注目すべきセッションが多数組まれた。

CANDLE燃焼などはメンテナンスフリーの可能性も検討され, その結果, 原子力新興国もこの分野の研究に着手し始めていることが理解された。例えば, ロシアや欧州はいうに及ばず, インドネシアやモンゴルからもCANDLE燃焼研究の発表があった。もちろん, そのほかの国々からも, それぞれの得意分野に応じて様々に研究紹介があった。鉛ビスマスではロシア, 燃料サイクルでは韓国やスウェーデンなどである。

特に, 一般公開としての特別セッションは大きなインパクトを聴衆に与えた。すなわち, 2日目午後Terra Power社のGilleland氏から2006年から現在までのTerra PowerとTravelling Wave Reactor(TWR)に関する講演が一般公開で開催されたのである。この開発には, マイクロソフト社Bill Gates氏も開発支援を行っているが, この形式の炉の基本的なアイデアは関本教授自身のアイデアであるCANDLE炉にさかのぼることができる。CANDLE炉の燃焼解析が中性子スペクトルの点でも著しく進み, 燃焼の進んだ燃料要素を増殖体/可燃性毒物という両者の観点から把握できるようになったこ

とが大きな進歩である。CANDLE炉では, 燃料要素は静置されシャッフリングされることはないが, ここにシャッフリングの概念も導入することによりTWRの概念が導出された。燃焼の進行に従い, 燃料棒のシャッフリングを最大限利用し, 臨界維持に必要なフラックスを, エネルギースペクトルの解析も併せて進め, 小型動力炉として燃料の持つ潜在的なエネルギーを可能な限り利用するのがTWRの利点である。具体的な燃料のシャッフリング方法や, 燃焼方向などをアニメーションで示すなど, Visualでわかりやすい講演がなされ, さらにTerra Power社と関本研究室の今後の国際協力による開発の計画が紹介された。参加者からはそのような臨界性の維持は本当に可能なのかという原子炉物理の本質をつくような質問や, 安全性・材料工学的検討など, より工学レベルでの研究の必要性も指摘された。そのほか, 小型長寿命炉としての鉛ビスマス/鉛冷却炉の研究や, トリウム高速炉のフィージビリティスタディなど, 21世紀COEプログラムの成果が着実に引き継がれていることが示された。

3日目のプレナリーで, CRINESセンター長の関本博教授により, 革新的原子力エネルギーシステムに関する研究の回顧録と題し, 21世紀COEプログラムの研究成果が, プログラム終了後も着実に継続され, まさに持続的発展を支えていることの紹介があった。誌面の都合上, 詳細は省略するが, 口頭発表76件, ポスター発表34件も, 議論が白熱し, 時間が不足するセッションが続出する状況であった。特にポスターでは, 留学生を中心とする若い学生の研究の質の高さに, 多くの聴衆が刮目したことを記しておく。参加者の皆様から会議の発表内容の質の高さ, 運営のホスピタリティーの高さともに良い評価を頂けたと理解している。また閉幕後の評価委員会でも, 同様の評価と共に, 本センターならびに本研究が革新的原子力エネルギーシステム研究の日本のリーダーであるとの評価を得るにいたった。持続的発展のために, 漸進的な研究ではなく, 革新的な研究が必要であるという主張が, 21世紀COEプログラムの中核をなしていたが, これが確実に受け継がれ, 基礎科学・基礎工学として着実に受け継がれていることが理解して頂けるものと考えている。

(東京工業大学 赤塚 洋, 加藤之貴,
2011年 2月10日 記)



原子力発電技術の進歩に関する国際会議 議論は「Fukushima Daiichi, International Response and Global Perspective」に集中

International Congress on Advances in Nuclear Power Plants

2011年5月2～5日(ニース市, フランス)

原子力発電技術の進歩に関する国際会議(ICAPP)は、最新の研究開発成果に関する討論を通じ情報を共有し、更なる原子力発電技術の進歩を目指す国際会議で、今回フランス原子力学会(SFEN)の主催によりニースで開催されたICAPP 11が第10回目の開催となる。一昨年当学会の主催で東京において開催されたICAPP 09は原子力カルネッサンスの始まりの時期にあり明るい将来展望の下で活発な意見交換がなされ、ニースでのICAPP 11も原子力カルネッサンスが花開く中での開催となるはずであった。ところが3月11日に東日本大震災の津波影響で福島第一原子力発電所(以下1F)事故が起こり、その教訓を取り込んで原子力発電所建設を進めようという国と、潜在的リスクの大きさから原子力モラトリアムに向かう国に政策が分かれたことがマスコミで報道された状況下での開催となった。

全参加者数約520名のうち、現地に参加登録した人が約50名もあり、例年のICAPPよりも企業のマネジメントクラスの参加者が多いようであった。1F事故のあとで他の原子力関係国際会議が幾つかキャンセルされたこと、開会日の夜に急きょ「特別セッション日本」として1F事故の全体セッションが開催されることになったことなどから、これからの原子力発電事業の展開について意見交換する場として利用したようである。しかし日本からは、1F事故対応の多忙により全体セッションの講演予定者並びにテクニカルセッション発表者に多数の欠席が生じ、例年は少なくとも70人程度ある参加者数が今回は20数名にとどまった。

開発・建設のグローバル化を受け、産業界向けの全体セッション数が多い最近の原子力国際会議の一般的傾向と同じく、ICAPP 11でも6件の全体セッションが設けられたが、1F事故前に設定されたテーマは、「Nuclear Energy International Outlook」, 「Nuclear New Build」, 「Design, Engineering & Operation」, 「Nuclear Fuel & Sustainability」, 「Future Nuclear System」, 「Nuclear & Society」で、将来の約束された拡大をどのように達成するかについて焦点をあてたものであった。しかし、これらのセッションの講演者の多くは真っ先に1F事故に言及し、講演者が関与する原子力施設については設計基準事故を超える条件を想定したストレステストで安全性を確認したこと、将来さらに教訓を反映していくつもりであることなどが本論の前置きとして述べられていた。

1F事故をテーマとする「特別セッション日本」は、副題につけた Fukushima Daiichi, International Response and Global Perspective という内容であった。最初に、尾本東大教授による事故の状況の講演、東京電力の増井氏による事故の復旧作業状況の講演、日立GEの佐藤氏による1F各号機的设计概要の講演がなされた。尾本教授は日本政府としての公式見解ではないことをことわった上で詳細にわたる講演を行い、地震・津波対策も当時の最新の知見に基づく土木学会の指針により実施されていたことなども説明され、想定される事象に対して対策を講じていたことを会場にいた聴衆は理解したと思われる。その後、続いてフランス、米国の規制当局代表によるコメント並びに会場聴衆との質疑応答がなされたが、ストレステストで安全性を確認すること、事故時には情報を理解できる形でスピーディーに共有することが大事であるというのが大方の発言であった。

技術研究・開発成果を発表するテクニカルセッションは、12分野(トラック)において87セッションが設けられ、320件の発表がなされた。各トラックの発表件数は例年と変わらない分布をしており、「熱流動とCFD解析」, 「新型炉・GenIV」, 「安全評価と規制」で4割以上を占めていたが、特に安全設計と規制のグローバル化(標準化)に関連する内容のものが増えているようであった。

またICAPPとしては初めてのものであるが、欧州博士課程研究連絡会セッションという名称のトラックを13番目に設け、院生による9件の研究が発表されていた。これらから優秀な3件が選ばれ、3日目の全体セッション後に表彰を受けていた。今回のセッションはSFENの企画によるものであったことから欧州の学生だけを対象にしていたが、日本側に賛同が多ければ、次回からは日米欧韓の院生研究トラックとして設けることの提案も可能であろう。

ICAPPはにぎやかな企業展示も目玉の一つであるが、今回、日本企業の展示がなく、全体としても数が少なく寂しく感じられた。会議終了後の金曜日にもたれたテクニカルツアーは、カダラッシュにあるCEA(フランス原子力庁)の研究施設とITER建設予定地をバスで訪れるものであり、両コース合わせて24名が参加した。

次回のICAPP 12は米国原子力学会(ANS)の主催により2012年6月にシカゴで開催される予定である。

(三菱重工業・藤井澄夫, 2011年5月11日 記)

新刊紹介

確率論的リスク解析の数理と方法

金野秀敏著, 173 p. (2010. 10), コロナ社. (定価2,500円)
ISBN 978-4-339-07926-5

高度に複雑化した現代社会の中で、我々人間は多様なリスクにさらされている。そのような時代においてはリスクマネジメントが益々重要となっており、そのために適切な定量的リスク解析手法の確立が必要とされている。本書は、そのようなニーズに応えるための教育書として書かれたもので、著者が大学で担当されているリスク工学の講義内容をもとに編纂されている。

リスク解析の重要なキーワードは「不確実性」だと思われるが、特に確率論的手法では、対象とする量の不確実性を確率過程で表現して取り扱う。本書第1部基礎編では、その統計数理的基礎がまとめられており、具体的には、よく使われる離散的・連続的確率変数の確率過程、パラメータ推定法、寿命や極値の数理、回帰分析手法、従属性のある変数の解析手法などが解説されている。第2部応用編は、健康、自然災害、工学システムなどに係わる数理統計研究の実例となっており、例えば感染症や発がんのモデル、余震発生モデル、スペースシャトルOリング事故のモデル、構造物の極値応答モデル、などが解説されている。評者個人としては、あまり

扱ったことのないような手法が多数紹介されていることから、自分の仕事に応用できる方法はないか、と考えながら読めて有益であった。なかでも、確率変数の最大値の分布を扱う極値理論は、構造物損傷や自然災害のリスクを解析する際に有用な手段ではないかと興味深く感じた。

本書全体の印象としては、評者の浅薄な知識のせいが大きであろうが、基礎編も応用編も扱っている範囲が比較的広く、深い内容には付いていきづらい部分があった。各分野での基礎的な専門用語の説明をもう少し充実いただければありがたいと思う。「8.3従属故障」の内容は、評者の仕事と関係しており比較的理解しやすい部分であったが、モデルの概念や計算式の意味等にはあまり触れられていないため、専門以外の方には分かりづらいのではないかという気がする。

本書は、コンパクトなボリュームの割には内容が盛りだくさんなので、これ一冊で基礎から応用まで勉強しようという目的には向かないのではないかとと思われる。むしろ、自分の問題に関係しそうな解析手法やトピックスを見つけ、概要をつかみ、本格的には引用文献や類書にあたって理解を深めていく、という使い方が良いだろう。

(財)電力中央研究所 原子力技術研究所・吉田智朗)



放射性廃棄物の工学

長崎晋也, 中山真一共編, 235 p. (2011. 1), オーム社.
(定価3,000円+税) ISBN 9788-4-274-20969-7 C3054

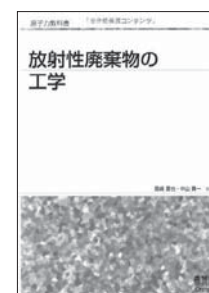
放射性廃棄物は原子力に残される最後の課題である。原子力による恩恵を享受している現世代に対して安全を確保することはもちろん、後の世代にリスクと負担を残さぬよう放射性廃棄物を管理/処理/処分することは当然である。一方、将来世代の意思決定の自由を奪わないことにも配慮する必要がある。また、放射性廃棄物を管理/処理/処分するためには、放射線に関する知識だけでなく、化学、機械、熱、地質といった幅広い知識が必要となる。このように放射性廃棄物に関する工学的アプローチは総合的の学問として捉えるべきである。

編者らは放射性廃棄物の専門家として四半世紀の経験を有しており、総合的な見地から本書はまとめられている。

第1章では、放射性廃棄物管理の考え方が述べられている。第2章では、さまざまな場所から発生する放射性廃棄物の特徴について示されている。第3章では、原子炉の廃止の

方法とそれに伴う放射性廃棄物の発生やサイト解放までの手順について述べられている。第4章では、放射性廃棄物として取り扱う必要のない、クリアランスの考え方とその認証手順について述べられている。第5章では、放射性廃棄物のさまざまな処理法が紹介されている。第6章では、放射性廃棄物の処分の考え方と方法について述べられている。第7章では、放射性廃棄物処分システムの性能評価の方法と例が示されている。付録として、クリアランスレベルの算出方法、放射性物質の移動を表す方程式や解法、熱力学や化学平衡についての説明が丁寧に記述されている。また、各章には演習問題が用意されており、内容のより深い理解を助ける工夫がされている。

大学での教科書としての利用だけでなく、放射性廃棄物について初めて学ぶ方にも役に立つ構成となっている。放射性廃棄物に関わる方だけでなく、多くの方に知っていただきたい内容が盛り込まれた良書であり、多くの学会員に読んでいただきたい。(九州大学・出光一哉)



福島原発事故に対する学会の役割に期待

世界への正しい情報発信が必要との声も (4月号の Web アンケート結果)

「原子力学会誌」4月号に対して寄せられた Web アンケートの結果をご紹介します。今回は46名の方から、回答がありました。

1. 高く評価された記事

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

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	報告	事故やトラブル時にどう対応するか?	4.15
1	談話室	立地地域からみた原子力	4.15
3	巻頭言	最近思うこと	4.00
3	ジャーナリストの視点	合理性なき安全審査の悲劇	4.00

第2表 「書き方」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (書き方)
1	巻頭言	最近思うこと	4.00
2	ジャーナリストの視点	合理性なき安全審査の悲劇	3.93
3	ATOMOS Special	世界の原子力事情 ⁽¹²⁾ 東欧編 ウクライナ—チェルノブイリを越えて	3.69
4	NEWS	4月号	3.58

「内容」については、震災前に執筆された記事ですが、原発事故に関連する記事が関心を集めました。

2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 報告「事故やトラブル時にどう対応するか?」に関して、実効性・判断・責任・訓練など考えさせられることがあまりにも多い。福島原発事故対応の検証の中で、是非、この分野の話題を関係機関が国民に紹介することを継続してほしい。
- (2) 解説「多国間設計評価プログラム(MDEP)とその影響」に関して、福島原発事故の後にこの記事を読むと、もっと適切に踏み込んだ議論がなされていれば…と思わずにいられない。
- (3) 原子力学会への要望として、今回の福島原発事故に対して、世界の原子力研究者に正しい情報を発信するように努めてほしい。

3. 編集委員会からの回答

福島原発事故の収束には、今後相当な期間がかかると予想されており、会員・読者に関心の高い話題をタイムリーに提供できるよう対応していきたいと思えます。

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

「FOCUS」に情報共有として高い期待が

内容についての要望も多く

(5月号の Web アンケート結果)

「原子力学会誌」5月号に対して寄せられた Web アンケートの結果をご紹介します。今回は107名の方から、回答がありました。

1. 高く評価された記事

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

第1表 「内容」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (内容)
1	FOCUS	緊急提言 福島第一原子力発電所事故対応に向けて	4.35
2	FOCUS	東京電力福島第一原子力発電所事故の概要と経緯	4.20
3	FOCUS	福島第一原子力発電所事故の放射線のレベルについて	4.10
4	羅針盤	巨大地震がみせた日本社会の脆弱性	4.05

第2表 「書き方」の評価点の高かった記事(上位4件)

順位	記事の種類	タイトル	評点 (書き方)
1	FOCUS	緊急提言 福島第一原子力発電所事故対応に向けて	4.23
2	羅針盤	巨大地震がみせた日本社会の脆弱性	3.76
3	FOCUS	東京電力福島第一原子力発電所事故の概要と経緯	3.75
4	シリーズ 解説	我が国の最先端研究開発 No.29 放射線医学総合研究所(最終回)	3.55

「FOCUS」に高い関心が寄せられています。

2. 自由記入欄の代表的なコメント、要望等

- (1) 「FOCUS」に関して、解説者的見地になっている論調が多いのが気になる。学会は今回の事象に対する「当事者意識」が具体的な形で見えることが少なく、世間からは業界の信用不安から業界技術者の信用不安という形で進んでいくのではないと危惧する。
- (2) 「FOCUS」に関して、新聞や一般の雑誌と異なった目線で記されており、非常に興味深かった。福島原発の情報が一転、二転しているので、来月号も詳しく考察してもらいたい。
- (3) 「FOCUS」に関して、世の中で問題になっていることを FOCUS として掲載されたのは非常に良かった。少し専門が違くと知らないことが多い。周囲の人に説明するのに役立った。
- (4) 「FOCUS 内部被ばくについて」に関して、まとめの中で、「低線量の長時間照射は人体に影響を受けにくい」と記述されているが、低線量の長期的な被ばくに関してはデータが少ないことから、慎重に議論すべきである。

3. 編集委員会からの回答

「FOCUS」に寄せられたさまざまなご意見を参考にして、今後の記事企画を進めていきたいと思えます。

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

ジャーナリストの視点 Journalist's eyes

もう一つの原発震災——すべての被災者に目を

朝日新聞 斎藤 義浩

3月11日午後2時46分。仙台市中心部にある朝日新聞仙台総局の中で、「永遠に続くのではないか」と思うほど長時間の激しい揺れに、もみくちゃにされた。東日本大震災の直後。まず頭に浮かんだのは、東北電力女川原子力発電所が無事かどうかだった。

女川原発の3基の原子炉は、1, 3号機が通常運転中、2号機は定期検査を終えて出力上昇中だった。東北電力の「緊急情報」第1報によると、強い揺れで原子炉はいずれも設計通りに自動停止し、排気筒モニターもモニタリングポストも変化はなく、安全が保たれているという。

翌12日になり、津波被害の概要もわかった。午後10時現在の発表資料には、1号機用の重油タンクが倒壊し重油が漏れ、2号機原子炉建屋地下3階(非管理区域)の補機冷却系の熱交換室に海水が浸水し、非常用ディーゼル発電機が起動しなかった、などがある。

だが、そのときは同じく津波に襲われた東京電力福島第一原発の信じがたい「原発震災」の情報が次々に報道されていた。1号機のベントと水素爆発、3号機のベント開始——。「冷温停止」である女川原発への関心は、正直いって失せていた。

震災から1カ月半も経った4月26日、自分の甘さを痛感させられた。宮城県の村井嘉浩知事らの立ち入り調査に合わせ、報道陣に女川原発が公開されたのだ。

女川原発の主要施設は海面から14.8メートルの高さの敷地にある。ところが地震に伴い地盤全体が1メートルも沈下し、そこに想定9.1メートルをはるかに超える13メートルの津波が来た。計算上、敷地まであと80センチのところまで原発への直撃を免れたことになる。しかし低地にある重油タンクは、ほぼ全体が津波に沈んだようだ。

バスで原発構内を抜けて坂を下り、港湾地域に出ると、眼前に広がる穏やかな太平洋と対照的な重油タンクの無残な姿が目に入った。直径12メートル、高さ11メートル。容量の3分の2ほどの重油600キロリットルが入っていたタンクは、津波でなぎ倒され、20メートルほど離れた作業小屋に乗り上げる形で横たわっていた。重油はほとんどが海に流出した。気仙沼市のように発火していたら、と思い、ぞっとした。

想定外の津波被害もあった。2号機の原子炉建屋地下の浸水は、海水を取り込む海面下の取水トンネルから、海水ポンプを設置してある地上部のくぼみに大量

の海水が「逆流」したのが原因であることが、この日初めて公表された。

この海水はさらに、配管を通す坑道(トレンチ)に入り、原子炉建屋の地下に流れ込んだ。浸水高は2.5メートル。見上げるような巨大な熱交換器が半分、水没した。非常用発電機3系統のうち2系統が停止したものの、外部電源と非常用1系統が正常に動いていたため、福島原発のような全電源喪失には至らなかった。

海水が流入したのは、海水ポンプのそばにある潮位計のふたが津波の高圧で押し上げられたためだという。原発の津波対策で、圧力の影響を考慮したことはない。このふたは現在、金属の棒でしっかり固定されている。

気になるのは地盤沈下の影響だ。「原発は軟弱地盤を掘り抜いた地下岩盤に建設してあるから地震に強い」。昔からこう説明され、納得もしていた。しかし今回は、その前提である岩盤自体が大規模に変形したというのである。女川原発では余震でも想定加速度を超える揺れを観測した。地盤沈下が耐震強度に影響したのではないかと、トレンチ調査をして岩盤をチェックしたほうがいいのではないかと。不安が次々にわいて来る。

自戒もある。報道側が大きくかかわった「もう一つの原発震災」を招いたことだ。

東日本大震災では、死亡と行方不明を合わせ、実に約2万4,000人の方が犠牲になった。生き残った多くの被災者にはいまだ支援が足りず、限界状態にある。連日の原発事故報道の陰で、この重大な事実が忘れ去られた。

自分が女川原発の被害を軽視したように、多くの日本人が津波を「もう終わったこと」と錯覚している。被災の地からは、そう見えてならないのである。

(2011年 5月10日 記)



斎藤義浩(さいとう・よしひろ)

朝日新聞東京本社・科学医療グループ員(5月10日付)

1983年朝日新聞入社、89年から科学技術分野を担当。震災時は仙台総局員として地震や原発、大学を担当。